

# Projektarbeit II

*im Masterstudiengang „Angewandte Forschung und Entwicklung in den  
Ingenieurwissenschaften“*

## **„Mobile Füllstandsregelung Teil II: konstruktive Weiterentwicklung und Anwendung weiterführender Regelungsverfahren“**

*Technische Hochschule Rosenheim – Technical University of Applied Sciences  
Labor für Regelungstechnik und Simulation – Prof. Dr.-Ing. Peter Zentgraf  
Wintersemester 2019/20*

von

**Andreas Scheuck**

(Matrikelnr.: 816326)

Erstprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Peter Zentgraf
Zweitprüferin:	Dipl.-Ing. Michaela Huber
Betreuer/in:	Prof. Dr.-Ing. Peter Zentgraf & Dipl.-Ing. Michaela Huber
Eingereicht am:	25.03.2020



## Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Zentgraf bedanken, der mir die Bearbeitung dieses sehr spannenden und interessanten Themas ermöglicht hat. Für Fragen und Tipps stand seine Tür immer offen. Durch seine aufgeschlossene und empathische Art, sowie seine Expertise konnte ich mir zusätzlich wertvolles Wissen aneignen, welches sehr nützlich für das kommende Berufsleben sein wird.

Zudem will ich Frau Dipl.-Ing. Michaela Huber für Ihre herzliche und sympathische Art danken. Sie unterstützte mich tatkräftig bei der Bearbeitung der Projektarbeit. Des Weiteren stand Sie mir bei offenen Fragen, sowie der Organisation immer zur Seite, was nicht selbstverständlich ist.

Außerdem bedanke ich mich sehr bei Adrian Zeitler (Labormitarbeiter), Andreas Bernatzky (Labormitarbeiter) und Prof. Dr.-Ing. Dominik Bücken (Professor für Strömungsmechanik), die sich enorm hilfsbereit beim Beantworten aufkommender Fragen zeigten. Generell herrschte in dieser schönen Zeit immer eine sehr angenehme und lockere Stimmung im Labor.

Durch die nicht selbstverständliche Unterstützung meiner Familie, sei es im finanziellen aber vor allem im menschlichen Bereich, fiel mir die Bearbeitung der Projektarbeit sehr einfach. Ich verspürte zu jeder Zeit einen festen Rückhalt und dafür bin ich sehr stolz und dankbar.



## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Rückblick: mobile Füllstandsregelung Teil I</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Zielsetzung der mobilen Füllstandsregelung Teil II</b> .....	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Konstruktive Weiterentwicklung der Hardware</b> .....	<b>4</b>
4.1	Netzteil .....	4
4.1.1	robuste Labor-Netzteil .....	4
4.1.2	Steckernetzteil 9-24 V .....	5
4.1.3	Beurteilung der Testergebnisse .....	5
4.2	Sensorik .....	6
4.2.1	Ultraschallsensor HC-SR04 .....	6
4.2.2	Infrarotsensor GP2YoA41SKoF von SHARP .....	6
4.2.2.1	Bezeichnungen .....	7
4.2.2.2	Leistungsspezifische Daten & Charakteristik .....	7
4.2.2.3	Funktionsweise .....	10
4.2.3	Beurteilung der Testergebnisse .....	10
4.3	Konstruktive Neuentwicklung des Deckels .....	11
4.3.1	Deckel der mobilen Füllstandsregelung Teil I .....	11
4.3.2	Deckel-System der mobilen Füllstandsregelung Teil II .....	11
4.3.2.1	Deckel .....	12
4.3.2.2	Zentrierrohr .....	12
4.3.2.3	Schwimmer .....	13
4.3.2.4	Platte für Arduino Due .....	13
4.3.3	Zusammensetzung der Einzelbauteile .....	14
4.3.4	3D-Druckteile als Gesamtsystem .....	14
4.4	Holzklötzchen .....	15
4.5	Wasserspritze als Störung .....	15
4.6	Schaltungsbild des Arduino Due .....	16
4.7	Versuchsaufbau der mobilen Füllstandsregelung Teil II .....	17
<b>5</b>	<b>Antike Lösung der Füllstandsregelung</b> .....	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Anwendung weiterführender Regelungsverfahren</b> .....	<b>20</b>



6.1	Experimentelle Modellbildung mit pzMove .....	20
6.1.1	Analysieren der Messdaten in pzMove.....	20
6.1.1.1	Sprungantwort .....	20
6.1.1.2	Antwort auf selbst erzeugtes Signal mit Signal Builder .....	22
6.1.2	Modifizierung der Übertragungsfunktion .....	24
6.2	Steuerung .....	25
6.2.1	Lookup Table .....	26
6.2.2	Steuerung mit stationärer Verstärkung im Kehrwert.....	28
6.2.2.1	Simulation des Sensorrauschens .....	29
6.2.2.2	Messergebnis.....	30
6.2.3	Steuerung mit Wunschübertragungsfunktion.....	31
6.2.4	Problem 1: unbekannte Störung .....	32
6.2.4.1	Zustand 1 .....	33
6.2.4.2	Zustand 2.....	33
6.2.4.3	Zustand 3.....	34
6.2.4.4	Interpretation der Messergebnisse .....	34
6.2.4.5	Lösungsstrategie .....	34
6.2.5	Problem 2: nichtlinearer Bereich der Pumpe.....	35
6.3	Regelung.....	36
6.3.1	Totzeit .....	36
6.3.2	Saturation.....	37
6.3.3	Regelung mit P-Regler.....	38
6.3.3.1	Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Regelparameter.....	38
6.3.3.2	Verlauf der Füllstandsregelung mit P-Regler .....	39
6.3.3.3	Lösung für Problem 2: nichtlinearer Bereich der Pumpe.....	40
6.3.3.4	Lösung für Problem 1: unbekannte Störung Pumpe .....	40
6.3.4	Regelung mit PI-Regler.....	41
6.3.4.1	Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Regelparameter.....	41
6.3.4.2	Verlauf Füllstandsregelung mit PI-Regler ohne Störung .....	42
6.3.4.3	Verlauf Füllstandsregelung mit PI-Regler mit Störung.....	43
6.4	Störgrößenkompensation .....	43
6.4.1	Prinzip der Störgrößenkompensation.....	44

6.4.2	Grenzen der Störgrößenkompensation .....	45
6.4.3	Anwendung der Störgrößenkompensation .....	45
6.5	3D-Animation mit Simulink.....	46
6.5.1	Moving Average.....	47
6.5.2	MATLAB Function .....	47
6.5.3	VR Signal Expander & VR Sink .....	47
6.5.4	Fertiges 3D-Modell für die Animation .....	48
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>49</b>
	<b>Anhang A: Stückliste .....</b>	<b>50</b>
	<b>Anhang B: Zusammenbau.....</b>	<b>51</b>
	<b>Anhang C: Vorgehensweise &amp; Erklärung von pzMove.....</b>	<b>52</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>56</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau mobile Füllstandsregelung Teil I.....	2
Abbildung 2: robustes Labor-Netzteil .....	4
Abbildung 3: Steckernetzteil 9-24V von Voltcraft .....	5
Abbildung 4: Ultraschallsensor HC-SR04 [1] .....	6
Abbildung 5: Infrarotsensor GP2Y0A41SK0F von SHARP [2] .....	7
Abbildung 6: Schema der internen elektrischen Schaltung des IR-Sensors [2].....	8
Abbildung 7: Charakteristik IR-Sensor [2] .....	9
Abbildung 8: Funktionsweise IR-Sensor nach dem Prinzip der Triangulation [3].....	10
Abbildung 9: Konzept Deckel der mobilen Füllstandsregelung Teil I.....	11
Abbildung 10: Deckel der mobilen Füllstandsregelung Teil II .....	12
Abbildung 11: Zentrierrohr .....	12
Abbildung 12: Schwimmer .....	13
Abbildung 13: Platte für Arduino Due.....	13
Abbildung 14: Gesamtsystem Deckel mit Füllstandsbehälter in der Schnittansicht 3D .....	14
Abbildung 15: verschraubte 3D-Druck-Einzelteile & IR-Sensor an Unterseite des Deckels angeschraubt .....	14
Abbildung 16: Holzklötz als Unterlage .....	15
Abbildung 17: Wasserspritze als Störung .....	15
Abbildung 18: Arduino Due Schaltung der mobilen Füllstandsregelung Teil I .....	16
Abbildung 19: Arduino Due Schaltung der mobilen Füllstandsregelung Teil II .....	16
Abbildung 20: kompletter Versuchsaufbau der mobilen Füllstandsregelung Teil II.....	17
Abbildung 21: antike Lösung der Füllstandsregelung [6].....	18
Abbildung 22: Blockschaltbild für die antike Lösung der Füllstandsregelung.....	19
Abbildung 23: Verlauf antike Lösung der Füllstandsregelung .....	19
Abbildung 24: Simulink-Modell für die Aufnahme der Sprungantwort .....	20
Abbildung 25: Analysieren der Messdaten der Sprungantwort mit pzMove.....	21
Abbildung 26: Blockschaltbild zur Erzeugung des eigenen erstellten Signals mit Signal Builder .....	22
Abbildung 27: Analyse des erzeugten Signals mit Signal Builder zum Vergleich .....	23
Abbildung 28: Modifizierung der identifizierten Streckenfunktion .....	24
Abbildung 29: Blockschaltbild IR-Sensor mit 1-D Lookup Table.....	26
Abbildung 30: Lookup Table für die neue Umwandlung für die mobile Füllstandsregelung Teil II.....	26
Abbildung 31: Blockschaltbild Steuerung mit inverser stationärer Verstärkung.....	28
Abbildung 32: Random Number für Simulation des Sensorrauschens .....	29
Abbildung 33: Steuerung mit inverser stationärer Verstärkung.....	30
Abbildung 34: Blockschaltbild Steuerung mit Wunschübertragungsfunktion .....	31
Abbildung 35: Steuerung mit Wunschübertragungsfunktion .....	32
Abbildung 36: Verlauf der Füllhöhe bei Zustand 1 .....	33
Abbildung 37: Verlauf der Füllhöhe bei Zustand 2 .....	33





Abbildung 38: Verlauf der Füllhöhe bei Zustand 3 .....	34
Abbildung 39: Abriss im nichtlinearen Bereich der Pumpe .....	35
Abbildung 40: Simulation der Totzeit der Pumpe .....	36
Abbildung 41: Begrenzung der Stellgröße .....	37
Abbildung 42: Blockschaltbild Regelung mit P-Regler .....	38
Abbildung 43: Blockschaltbild zur experimentellen Bestimmung der Regelparameter .....	38
Abbildung 44: Füllstandsregelung mit P-Regler ohne Simulation des Sensorrauschens .....	39
Abbildung 45: Blockschaltbild der Füllstandsregelung mit PI-Regler .....	41
Abbildung 46: Füllstandsregelung mit PI-Regler .....	42
Abbildung 47: Füllstandsregelung mit PI-Regler mit Störung .....	43
Abbildung 48: Blockschaltbild der Störgrößenkompensation .....	44
Abbildung 49: Störgrößenkompensation mit $T_k = 2s$ .....	45
Abbildung 50: Störgrößenkompensation mit $T_k = 1.5s$ .....	45
Abbildung 51: Füllstandsregelung ohne Störgrößenkompensation .....	46
Abbildung 52: Blockschaltbild für die 3D-Animation .....	46
Abbildung 53: Einstellungen für Moving Average Block .....	47
Abbildung 54: Matlab-Funktion zur Umrechnung .....	47
Abbildung 55: Fertiges 3D-Modell für die Animation .....	48
Abbildung 56: Einzelbauteile .....	50
Abbildung 57: fertiger Versuchsaufbau .....	51
Abbildung 58: Programmvorbereitung pzMove .....	52
Abbildung 59: Startfenster pzMove .....	52
Abbildung 60: Identifikationseinstellung 1 .....	53
Abbildung 61: Identifikationseinstellung 2 .....	53
Abbildung 62: Identifikationseinstellung 3 .....	53
Abbildung 63: Identifikationseinstellung 4 .....	54
Abbildung 64: Identifikationseinstellung 5.1 .....	54
Abbildung 65: Identifikationseinstellung 5.2 .....	54
Abbildung 66: Identifikationseinstellung 6 .....	55
Abbildung 67: Identifikationseinstellung 7 .....	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezeichnungen des IR-Sensors .....	7
Tabelle 2: Leistungsspezifische Daten des IR-Sensor .....	8
Tabelle 3: Prinzip der antiken Lösung der Füllstandsregelung.....	18
Tabelle 4: Umwandlung der analogen Ausgangsspannung des Sensors in die entsprechende Füllhöhe .....	27
Tabelle 5: Bezeichnungen der Regelgrößen.....	28
Tabelle 6: Definition der Regelgrößen .....	30
Tabelle 7: Parametereinstellung Steuerung mit Wunschübertragungsfunktion.....	32
Tabelle 8: Deklaration der Variablen für die Regelung mit P-Regler .....	39
Tabelle 9: Deklaration der Variablen der für die Regelung mit PI-Regler .....	42
Tabelle 10: Stückliste .....	50
Tabelle 11: schrittweiser Zusammenbau .....	51



## Abkürzungsverzeichnis

V	Volt
bzw.	beziehungsweise
etc.	et cetera
z. B.	zum Beispiel
cm	Zentimeter
IR	Infrarot
GND	Ground
Vcc	Versorgung
Vo	analoge Ausgangsspannung
bzgl.	bezüglich
od.	oder
ml	Milliliter
s	Sekunde
d. h.	das heißt
versch.	verschiedenen
ggf.	gegebenenfalls

# 1 Einleitung

Die Regelungstechnik ist ein essenzieller Bestandteil der heutigen Industrie. Fast alle Vorgänge, seien es mechanische, elektrische oder mechatronische Systeme, laufen mittlerweile vollautomatisch ab. Um einen solchen Vorgang gewährleisten zu können, ist eine einwandfrei funktionierende Regelung notwendig. Ein weiterer Baustein ist die Simulation. Je besser die Modellbildung der Strecke ist, desto genauer und fundierter lässt sich ein bestimmtes System nachbilden und simulieren. Dadurch kann enorm viel Arbeitszeit eingespart und somit die Produktivität gesteigert werden.

Die Projektarbeit II ist die Fortsetzung der Projektarbeit I, bei der das Fundament - der sogenannte „Prototyp“ der mobilen Füllstandsregelung - entwickelt wurde. In dieser Arbeit geht es nun um die konstruktive Weiterentwicklung des Prototyps, sowie die Anwendung weiterführender Regelungsverfahren. Dabei war es wichtig, so gut wie möglich den Versuchsaufbau zu vereinfachen und mobiler zu gestalten. Deshalb sind schwere und große Hardwarekomponenten durch leichtere und kleinere getauscht worden. Zudem wurden neue Bauteile konstruiert und mittels 3D-Druck-Technik an der Hochschule intern gefertigt. Um die Genauigkeit, sowie die Zuverlässigkeit zu steigern, ist ein neuer Sensor getestet und entsprechend der resultierenden Ergebnisse beurteilt worden.

Zusätzlich wurde der Füllstand mittels eines speziell dafür entwickelten Aufbaus geregelt, ohne dabei elektrische Energie zu verbrauchen. Die Idee dazu stammt aus der früheren Zeit, genauer gesagt aus der Antike. Zu dieser Zeit entwarf ein intelligenter griechischer Erfinder einen „Öllampen-Niveau-Regler“, was damals ein purer Luxus für die Bürger war.

Nach Abschluss der konstruktiven Weiterentwicklung und Aufbau des kompletten Versuchsaufbaus war es wichtig, die Steuerung, Regelung und weiterführende Regelungsverfahren, darunter die Störgrößenkompensation, in das System zu implementieren.

Zudem traten während der Bearbeitungszeit einige komplexe Probleme auf. Um diese zu beheben, sind sorgfältig und präzise Lösungsstrategien entwickelt und umgesetzt worden. Das Lösen der Probleme, sowie die Ergebnisse daraus, nehmen einen sehr wichtigen Raum in dieser Projektarbeit ein und werden dem Leser detailliert aufgezeigt.

## 2 Rückblick: mobile Füllstandsregelung Teil I

In diesem Abschnitt wird kurz und kompakt der Versuchsaufbau des Prototyps der mobilen Füllstandsregelung aufgezeigt. Diese Zusammenfassung dient dazu, dem Leser einen reibungslosen Übergang in die mobile Füllstandsregelung Teil II zu gewährleisten. Teil I stellt das Fundament für Teil II dar, auf dem nun aufgebaut wird.

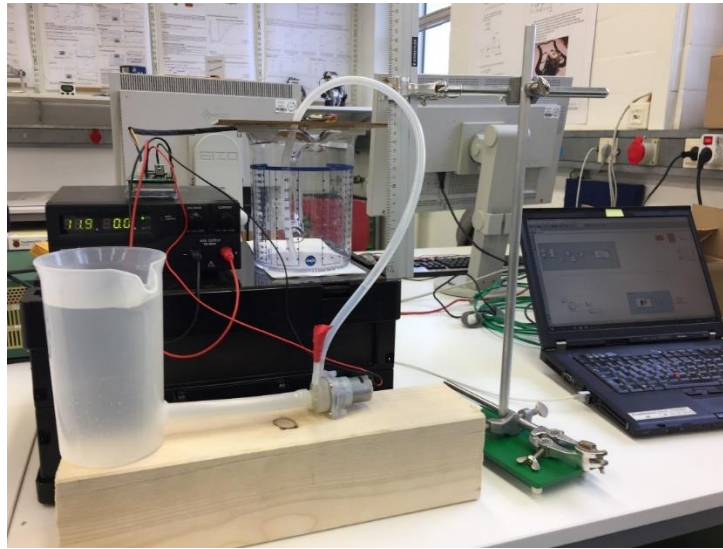


Abbildung 1: Versuchsaufbau mobile Füllstandsregelung Teil I

Abbildung 1 zeigt den Prototyp für die mobile Füllstandsregelung. Dort sind alle Hardwarekomponenten dargestellt, die für den Prototyp relevant sind. Ziel der Projektarbeit I war es, die Hardware auszuwählen und zu verifizieren. Um das Wasser dementsprechend befördern zu können, wurde als Stellglied des Regelkreises eine kostengünstige 12V-Kreiselpumpe verwendet. Das Füllniveau, in cm gemessen, ist der sogenannte Sollwert. Beim Messglied fiel die Auswahl auf einen Ultraschallsensor, der in Echtzeit die Füllhöhe erfasst und als Istwert dem Sollwert abgezogen wird. Aus dieser Subtraktion ergibt sich ein entsprechender Differenzwert, der als Eingangswert für den Regler-Block fungiert. Als Verbindungselemente wurden Silikonschläuche mit unterschiedlichen Durchmessern benutzt. Durch ihre Materialeigenschaft, der Transparenz, war der Wasserfluss stets gut ersichtlich. Zur Erfassung der Messdaten und der Datenverarbeitung diente der Mikrocontroller Due von Arduino, welcher sehr leistungsstark ist. Zur Durchführung der Regelung und der Darstellung, sowie Verarbeitung der Messdaten wurde die Programmierungssoftware MATLAB/SIMULINK verwendet. Ein massives Labornetzgerät stellte die Energieversorgung für den Aufbau zur Verfügung. Nach Abschluss der Verifikation ist eine erste Regelung am System durchgeführt worden.

In der folgenden Arbeit geht es nun um die Fortsetzung der mobilen Füllstandsregelung, bei der die konstruktive Weiterentwicklung der Hardware, sowie die Implementierung weiterführender Regelungsverfahren untersucht und umgesetzt wurden.

### 3 Zielsetzung der mobilen Füllstandsregelung Teil II

In diesem Punkt werden die Anforderungen an das Projekt „Mobile Füllstandsregelung Teil II: konstruktive Weiterentwicklung und Implementierung weiterführender Regelungsverfahren“ beschrieben. Folgende Bedingungen sollen erfüllt werden:

- konstruktive Weiterentwicklung der Hardware
  - Versuchsaufbau leichter und mobiler gestalten
  - neue Sensorik testen → um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu steigern
  - Konstruktion: Deckel für Behälter → bessere Integration der Sensorik
  - Testen eines mobilen Netzteils → leichteres und transportierbares Netzteil
  - Auswahl einer geeigneten Störung → Wasserentnahme oder -zugabe
- Implementierung weiterführender Regelungsverfahren
  - Integration der antiken Regelungsstrategie, ohne elektrische Energie zu verbrauchen
  - Experimentelle Modellbildung mit pzMove
  - Anwendung der Steuerung mit stationärer Verstärkung im Kehrwert und Wunschübertragungsfunktion
  - Anwendung der Regelung mit P- und PI-Regler im Regelkreis mit und ohne Einfluss der Störung auf die Strecke
  - Schätzung und Unterdrückung der Störung durch eine geeignete Störgrößenkompensation
  - 3D Animation der Füllstandsregelung mit SIMULINK als zusätzliche Visualisierung der Regelung

## 4 Konstruktive Weiterentwicklung der Hardware

Eine der Hauptzielsetzungen dieser Arbeit ist die konstruktive Weiterentwicklung der Hardware. In diesem Kapitel sind sukzessive die Komponenten des Versuchs auf Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, Mobilität, Gewicht, Genauigkeit und Einfachheit beurteilt worden. Ziel ist es, den Versuchsaufbau zu überarbeiten und ihn leichter und mobiler zu gestalten. Zudem wurde ein komplett neuer Deckel, zur besseren Integration der Sensorik, entworfen und mittels 3D-Drucktechnik intern an der technischen Hochschule Rosenheim gefertigt.

### 4.1 Netzteil

#### 4.1.1 robuste Labor-Netzteil

Das robuste Labor-Netzteil (orange gekennzeichnet), welches in Teil I der mobilen Füllstandsregelung verwendet worden ist, hatte den Vorteil, dass beliebige Spannungen zur Energieversorgung eingestellt werden konnten. Der große Nachteil an dieser Spannungsquelle war die entsprechend große Masse des Geräts. Da der komplette Versuchsaufbau mobil und leicht zu transportieren sein sollte, musste eine andere Lösung für die Versorgung des Systems mit Strom gefunden werden.

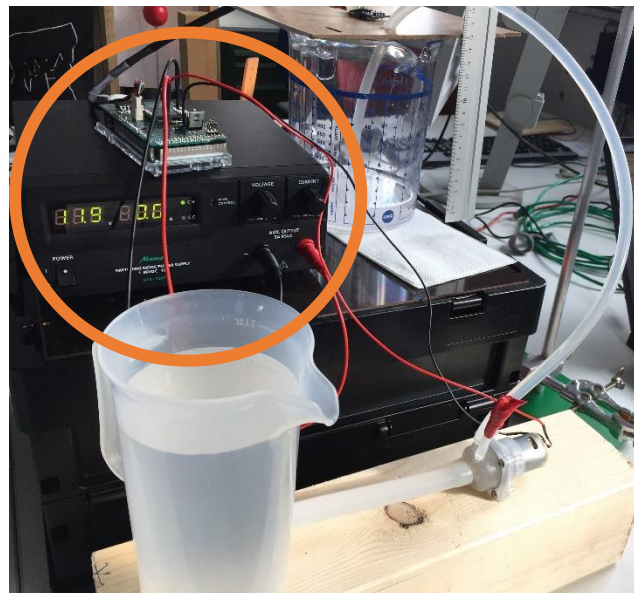


Abbildung 2: robustes Labor-Netzteil

Abbildung 2 zeigt das robuste Netzteil, welches mit dem orangen Kreis gekennzeichnet ist. Im Folgenden wird ein übliches mobiles Netzteil getestet, das mit einem Handy-Netzteil gleichzusetzen ist.

### 4.1.2 Steckernetzteil 9-24 V

Dieser Versuchsaufbau wird zu Lernzwecken an Vorlesungen der Hochschule gezeigt und muss somit leicht transportierbar sein. Um dies zu gewährleisten, fiel die Auswahl auf ein herkömmliches Steckernetzteil.



Abbildung 3: Steckernetzteil 9-24V von Voltcraft

Die Masse dieses Netzteil ist im Vergleich zu dem robusten Labor-Netzteil wesentlich geringer. Somit ist die erste Bedingung bereits erfüllt. Das Weiteren lässt sich das Steckernetzteil an jeder Steckdose anstecken, wodurch der Versuch fast überall im Raum gezeigt werden kann.

Die zweite wichtige Voraussetzung für die Verwendung ist der Betrieb der Pumpe, sowie des Arduino Due. Gibt es Unterschiede beim Betrieb bzw. bei der Regelung des Füllstand beider Netzteile?

### 4.1.3 Beurteilung der Testergebnisse

Folgende zwei Betriebszustände sind zu untersuchen:

- Betriebszustand I: Betrieb Pumpe mit robusten Labor-Netzteil
- Betriebszustand II: Betrieb Pumpe mit Steckernetzteil

Beide Betriebszustände zeigen keinen signifikanten Unterschied bei der Leistungsaufnahme. Auch bei der Anwendung der Steuerung und Regelung sind die Verläufe nahezu identisch. Ist der Schalter des Steckernetzteil auf 12V eingestellt muss zwingend die Spannung mit einem Spannungsmessgerät nachgemessen und überprüft werden.



Dieses Steckernetzteil misst bei der Schalterstellung 12V eine tatsächliche Spannung von 12.34V, was einem Offset von 0.34V entspricht. Dies muss in der Umrechnung des PWM-Signals bei der Definition von  $U_{max}$  berücksichtigt werden! Hier wird die Variable  $U_{max}$  mit dem Spannungswert 12.34 anstatt 12 definiert.

Zusammenfassend wird das robuste Labor-Netzteil durch das mobile und leichte Steckernetzteil getauscht und in das System integriert.

## 4.2 Sensorik

### 4.2.1 Ultraschallsensor HC-SR04

Ein großes Problem bei der mobilen Füllstandsregelung Teil I war die Aufnahme der Füllhöhe mit dem Ultraschallsensor. Da es sich bei diesem Versuch um einen eher kleinen Füllstandsbehälter handelt, bei dem der Durchmesser nur ca. 15 cm beträgt, ist der Störeinfluss von Schallwellen, die an der Wand reflektiert werden, sehr groß.

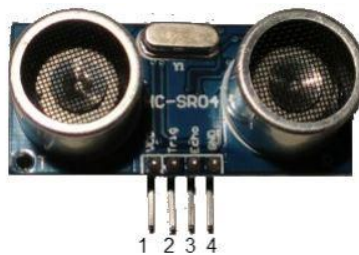


Abbildung 4: Ultraschallsensor HC-SR04 [1]

Abbildung 4 zeigt den Ultraschallsensor, der eher für größere Behältersysteme geeignet ist. Zudem besitzt der Sensor eine geringe Zuverlässigkeit der Messwerte. So gibt dieser, bei gleichbleibender Sensorposition und gleichem Füllniveau, unterschiedliche Messwerte bei hintereinander folgenden Messzyklen aus. Dieses Szenario ist bei der mobilen Füllstandsregelung, wo Genauigkeiten im Millimeterbereich notwendig sind, nicht brauchbar. Deshalb wird in dieser Arbeit ein neuer Sensor getestet und verwendet. Detaillierte Informationen zur Funktionsweise und zu den Leistungsdaten sind in der Projektarbeit I der mobilen Füllstandsregelung zu finden.

### 4.2.2 Infrarotsensor GP2Y0A41SKoF von SHARP

Bei diesem Infrarotsensor handelt es sich um einen Entfernungsmess-Sensor, der den Abstand zwischen Sensor und zu messenden Oberfläche erfasst. Dabei gibt der IR-Sensor eine analoge Ausgangsspannung aus.

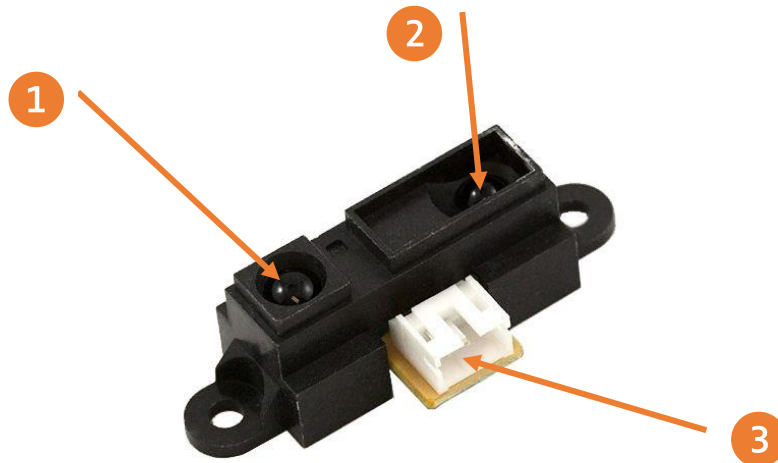


Abbildung 5: Infrarotsensor GP2YoA41SKoF von SHARP [2]

Abbildung 5 stellt das Messgerät von SHARP da. Im Anschluss werden die Bezeichnungen, Leistungsdaten, sowie die Funktionsweise des IR-Sensor näher beschrieben.

#### 4.2.2.1 Bezeichnungen

In diesem Punkt werden die Komponenten des Infrarotsensors beschrieben. Dabei sind die drei Hauptkomponenten wie folgt:

<b>1</b>	<b>IR-LED – Infrarot-Leuchtdiode</b>
<b>2</b>	<b>PSD – positionsempfindlicher Detektor</b>
<b>3</b>	<b>Anschluss für GND, Vcc und Vo</b>

Tabelle 1: Bezeichnungen des IR-Sensors

Tabelle 1 beschreibt die Einzelkomponenten des IR-Sensors. Dabei sind die IR-LED und der PSD mit Linsen versehen. Sie haben die Aufgabe, dass der ausgesendete und empfangene Strahl stets zielgerichtet ist. Dadurch wird ein sehr dünner Strahl erzeugt, wodurch Reflektionen an Gegenständen in der Umgebung jederzeit vermieden werden. So haben Störeinflüsse, die auf die Reflektion zurückzuführen sind, keinen bzw. einen sehr geringen Einfluss auf das ablaufende Gesamtsystem der mobilen Füllstandsregelung.

#### 4.2.2.2 Leistungsspezifische Daten & Charakteristik

In diesem Abschnitt sind die wichtigsten Daten des Sensors dargestellt. Die Charakteristik, sprich der Zusammenhang zwischen analoger Ausgangsspannung und Entfernung, sind wichtig, um den Sensor korrekt betreiben zu können. Im späteren Verlauf dieser Projektarbeit wird die Wichtigkeit dieses Verlaufs noch ersichtlich.

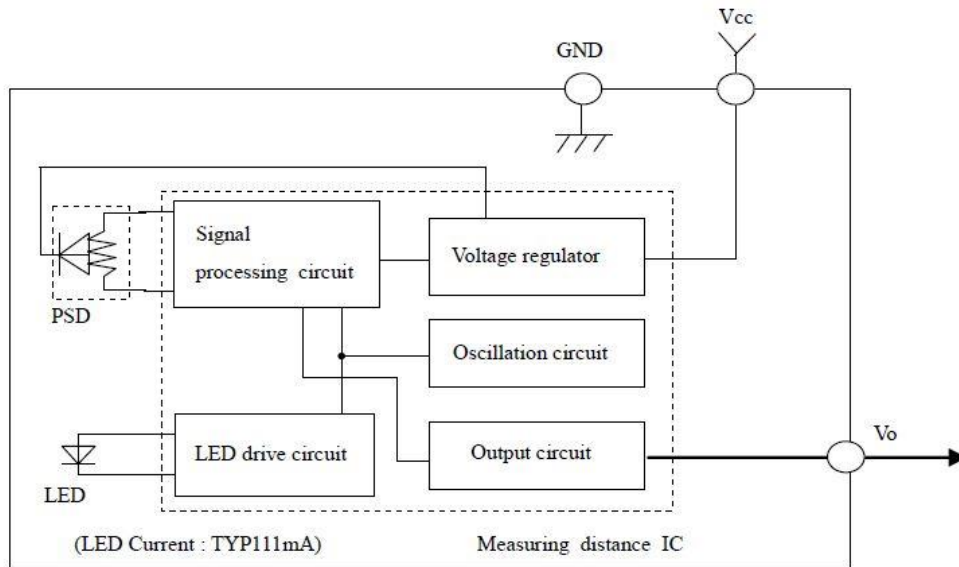


Abbildung 6: Schema der internen elektrischen Schaltung des IR-Sensors [2]

In Abbildung 6 ist das Innenleben, der entsprechende elektrische Schaltplan des Entfernungsmess-Sensors dargestellt. Er zeigt die Zusammenhänge zwischen den Einzelkomponenten und wie sie miteinander geschaltet sind.

Spannungsversorgung	4.5 – 5.5 V	Vcc
analoge Ausgangsspannung	0 – 3.2 V	Vo
Messbereich	4 – 30 cm	
Anlaufspannung	0 – 2V	

Tabelle 2: Leistungsspezifische Daten des IR-Sensor

In Tabelle 2 sind die leistungsspezifischen Daten des IR-Sensor den jeweiligen Bezeichnungen zugewiesen. Diese sind wichtig bzgl. der Beschaltung mit dem Mikrocontroller Arduino Due. Die analoge Ausgangsspannung wird später an den analogen Pin des Arduino angeschlossen. Dabei ist es wichtig zu wissen, dass der Arduino Due lediglich 3.3 V an den Pins verträgt. Da  $V_o$  höchstens 3.2 V erreicht, ist eine Zerstörung des Mikrocontrollers nicht möglich. Somit kann der Sensor einwandfrei verwendet werden.

Bei der Charakteristik des Infrarotsensors ist folgender Zusammenhang gegeben.

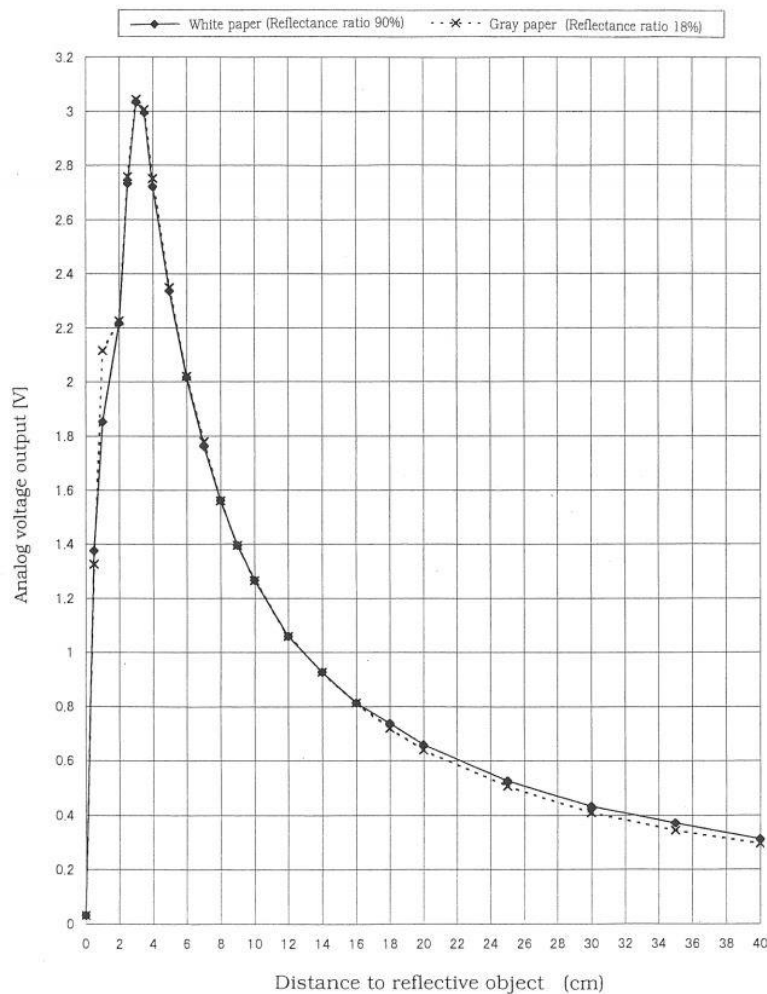


Abbildung 7: Charakteristik IR-Sensor [2]

Abbildung 7 zeigt den Zusammenhang zwischen der analogen Ausgangsspannung (y-Achse) und der Entfernung zum reflektierenden Objekt (x-Achse). Der Sensor arbeitet bei Entfernungen von 4 – 30 cm korrekt. Im Bereich  $< 4$  cm existieren zwei Entfernungswerte bei nur einer analogen Ausgangsspannung. Somit wird dieser Bereich gemieden. Im Bereich  $> 12$  cm flacht die Kurve sehr stark ab. Dadurch ändert sich die Spannung bei einer größeren Entfernungsänderung nur marginal. Deshalb ist dieser Bereich nichtlinear und daher unbrauchbar. Das Intervall 4 – 12 cm zeigt einen nahezu linearen Verlauf mit einem starken Gefälle. Dieser Bereich wird für die Füllstandsregelung sehr wichtig. Diese Erkenntnisse werden später wichtig, wenn es um die Konstruktion des Behälterdeckels geht. Dies wird allerdings noch erläutert.

#### 4.2.2.3 Funktionsweise

Der IR-Sensor arbeitet nach dem Prinzip der Triangulation als Messmethode. Dieser spezielle Messablauf ist in Abbildung 8 illustriert.

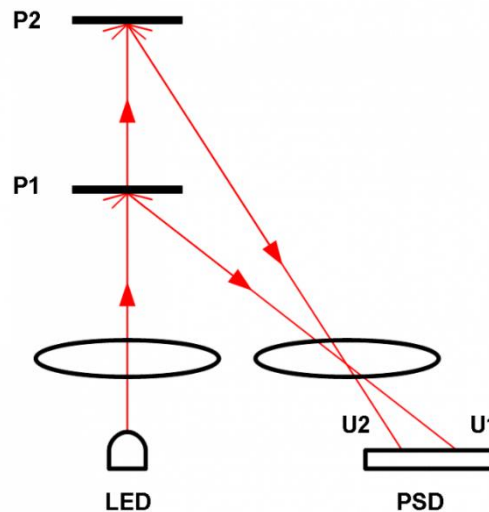


Abbildung 8: Funktionsweise IR-Sensor nach dem Prinzip der Triangulation [3]

Der Ablauf für einen Messzyklus läuft wie folgt ab:

1. Die IR-LED sendet einen schmalen (durch Linsen) Infrarotstrahl aus
2. Die Linsen vermeiden die Streuung und somit störende Reflektionen
3. Der Strahl wird an der zu reflektierenden Oberfläche P reflektiert
4. Anschließend trifft der IR-Strahl auf den PSD oder auch OPS – optischer Positionssensor – genannt
5. Je nach Position der Oberfläche (hier: P1 od. P2) wird der Strahl an eine andere Stelle (U1 od. U2) des PSD reflektiert
6. Je nach Auftreffen des Lichtstrahls ändert sich die Leitfähigkeit des PSD
7. Umwandlung der Leitfähigkeit in eine analoge Ausgangsspannung

Die angezeigte Ausgangsspannung des Sensors kann dann mithilfe von Abbildung 7 in die entsprechende Entfernung zum reflektierenden Objekt umgewandelt werden.

#### 4.2.3 Beurteilung der Testergebnisse

Das Reflexionsverhalten des Gegenstands, die Umgebungstemperatur, sowie die Betriebsdauer des IR-Sensors von SHARP haben einen sehr geringen Einfluss auf die Entfernungsmessung. Darüber hinaus zeichnet er sich durch eine hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit aus. Genau diese Eigenschaften hat der Ultraschallsensor vermissen lassen, weshalb die Entscheidung zugunsten des IR-Sensors gefallen ist.

## 4.3 Konstruktive Neuentwicklung des Deckels

### 4.3.1 Deckel der mobilen Füllstandsregelung Teil I

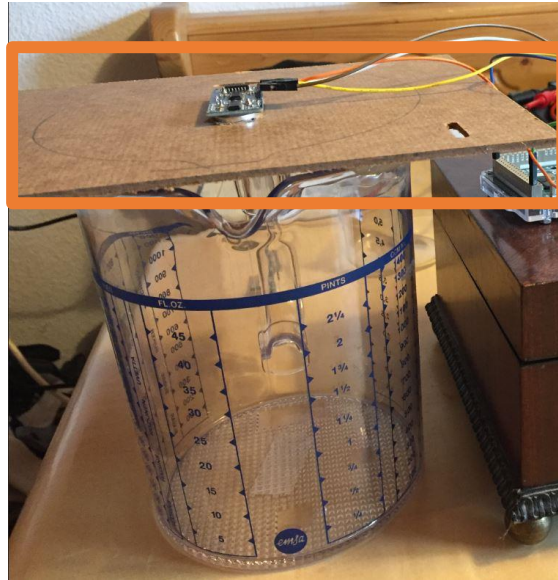


Abbildung 9: Konzept Deckel der mobilen Füllstandsregelung Teil I

Der Deckel in Abbildung 9 (orange gekennzeichnet) aus Projektarbeit I wurde aus vorhandenen Materialien des Labors und von Zuhause zusammengebaut. Da der jetzige Infrarotsensor allerdings nur in dem Bereich zwischen 4 und 12 cm zuverlässig arbeitet, muss dafür ein neuartiger Deckel entwickelt werden. Der nächste Abschnitt zeigt dieses Vorgehen und die Erstellung eines entsprechenden Deckels.

### 4.3.2 Deckel-System der mobilen Füllstandsregelung Teil II

Dieser Unterpunkt beschreibt die Erstellung der Einzelteile für das Gesamtsystem der mobilen Füllstandsregelung Teil II. Zusätzlich zum Deckel werden noch ein Schwimmer, dessen Zentrierungsrohr, sowie eine Platte zur Befestigung des Arduino Due erstellt. Alle diese Einzelteile werden nach Erstellung an den Deckel angeschraubt und zu einem kompletten System vereint.

*Wichtig:*

- *Alle folgenden Teile sind mit **SOLIDWORKS2019** erstellt und mittels **3D-Druck-Technik** intern an der technischen Hochschule Rosenheim gefertigt worden!*
- *Die Farbe entspricht nicht der dargestellten Farbe, sondern wird in **orangener** Farbe im 3D-Drucker gedruckt! Ausgenommen der Schwimmer, der in weiß gedruckt wird!*

### 4.3.2.1 Deckel

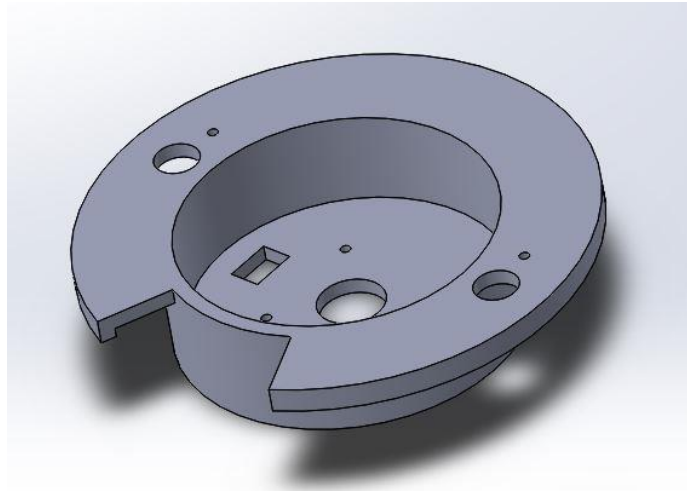


Abbildung 10: Deckel der mobilen Füllstandsregelung Teil II

Abbildung 10 zeigt die Geometrie des Deckels mit den Löchern für die Silikonschlauchzufuhr, die Zufuhr des Zentrierrohrs, sowie die Öffnung für das Kabelmanagement des IR-Sensor. Die beiden äußeren Öffnungen sind zum einen für die antike Lösung der Füllstandsregelung und zum anderen für die Realisierung der Störung durch eine Wasserspritze erstellt worden.

### 4.3.2.2 Zentrierrohr

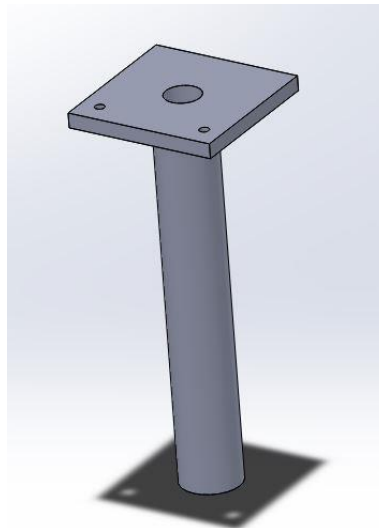


Abbildung 11: Zentrierrohr

Durch das Zentrierrohr kann sich der Schwimmer (siehe Abbildung 12) reibungslos auf und ab bewegen. Zudem wird durch die obere Öffnung der Silikonschlauch, der von der Pumpe kommt, zum Boden des Füllstandbehälters geführt.

### 4.3.2.3 Schwimmer

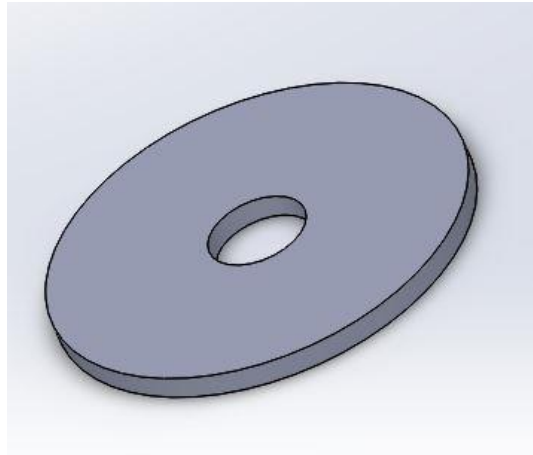


Abbildung 12: Schwimmer

Der Schwimmer hat die Aufgabe, als reflektierende Oberfläche des IR-Sensors zu fungieren. Dieser wird in weiß gedruckt, damit die Reflexionsrate bei 90 % liegt. Zudem wird so das Schaukeln der Wasseroberfläche verringert, wodurch exaktere Messwerte erfasst werden können.

### 4.3.2.4 Platte für Arduino Due

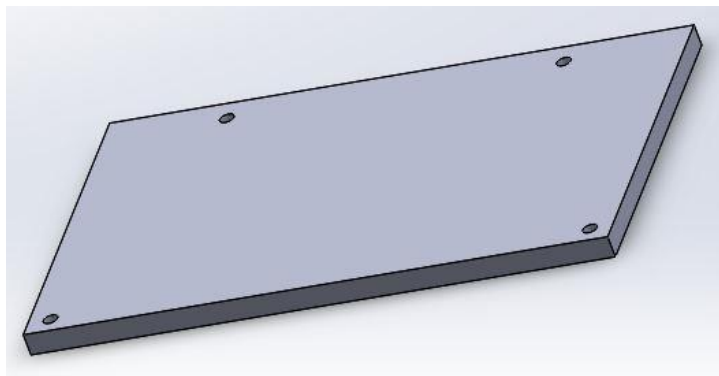


Abbildung 13: Platte für Arduino Due

Damit der Arduino fest im Versuchsaufbau integriert ist, wird er an die in Abbildung 13 abgebildeten Platte verschraubt, die wiederum fest am Deckel verschraubt ist. Zum zusätzlichen Schutz vor Wasserspritzern erhält der Mikrocontroller einen Schutzkasten aus festem Kunststoff (hier nicht dargestellt).



### 4.3.3 Zusammensetzung der Einzelbauteile

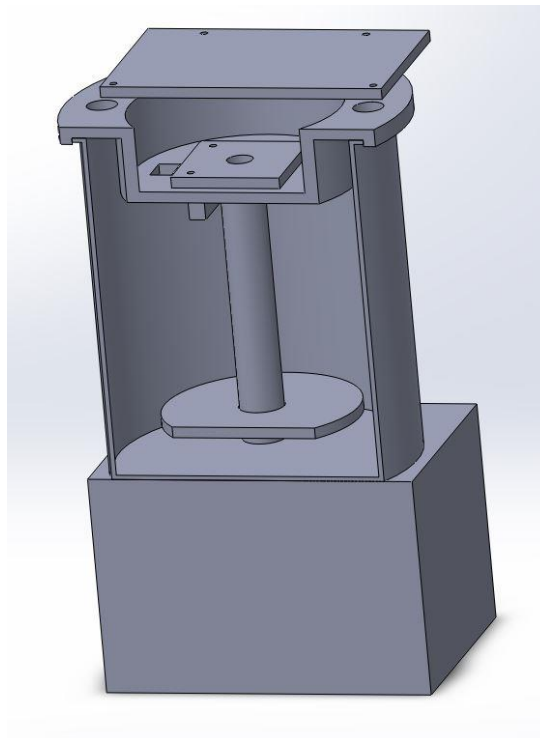


Abbildung 14: Gesamtsystem Deckel mit Füllstandsbehälter in der Schnittansicht 3D

Abbildung 14 indiziert die Vereinigung der einzelnen Bauteile zu einem Gesamtsystem des Deckels. Zusätzlich sind hier noch der Füllstandsbehälter und ein Klotz als Unterlage dargestellt (siehe Abbildung 16). Dieser Holzklötz dient dazu, einen Höhenunterschied zwischen Füllstands- und Vorratsbehälter zu erzeugen, damit ein automatisiertes Abfließen des Wassers im Füllstandsbehälter gewährleistet ist. Das Funktionsprinzip der „kommunizierenden Gefäße“ ist in Teil I der mobilen Füllstandsregelung erläutert, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

### 4.3.4 3D-Druckteile als Gesamtsystem



Abbildung 15: verschraubte 3D-Druck-Einzelteile & IR-Sensor an Unterseite des Deckels angeschraubt

## 4.4 Holzklotz



Abbildung 16: Holzklotz als Unterlage

Der Holzklotz enthält zusätzlich eine Einfräsung an der Oberfläche, sodass der Füllstandsbehälter passend in den Klotz eingesetzt werden kann. Somit ist ein Verschieben des Behälters nicht mehr möglich, was während einer laufenden Regelung das System stören könnte.

## 4.5 Wasserspritze als Störung



Abbildung 17: Wasserspritze als Störung

Die Wasserspritze dient zur Simulation der Störung, die auf die Strecke wirkt. Durch Ziehen an der Wasserspritze können bis zu maximal 250 ml Wasser aus dem Füllstandsbehälter entnommen werden.

## 4.6 Schaltungsbild des Arduino Due

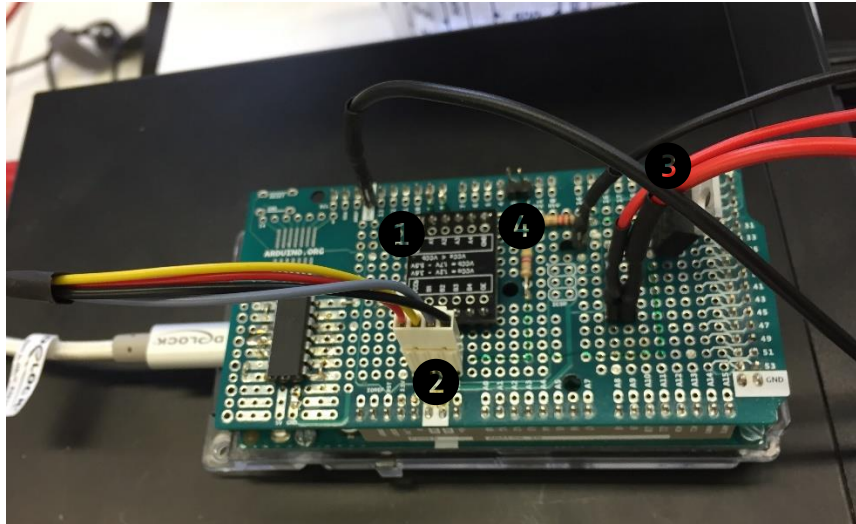


Abbildung 18: Arduino Due Schaltung der mobilen Füllstandsregelung Teil I

In Abbildung 18 ist die Schaltung des Arduino Due der mobilen Füllstandsregelung Teil I dargestellt. Der Level-Shifter ① und die Anschlüsse des Ultraschallsensor ② fallen bei dieser Arbeit, der Projektarbeit II, komplett weg. Die Anschlüsse für die Pumpe und das Netzteil ③, sowie die Treiberschaltung ④ bleiben erhalten.

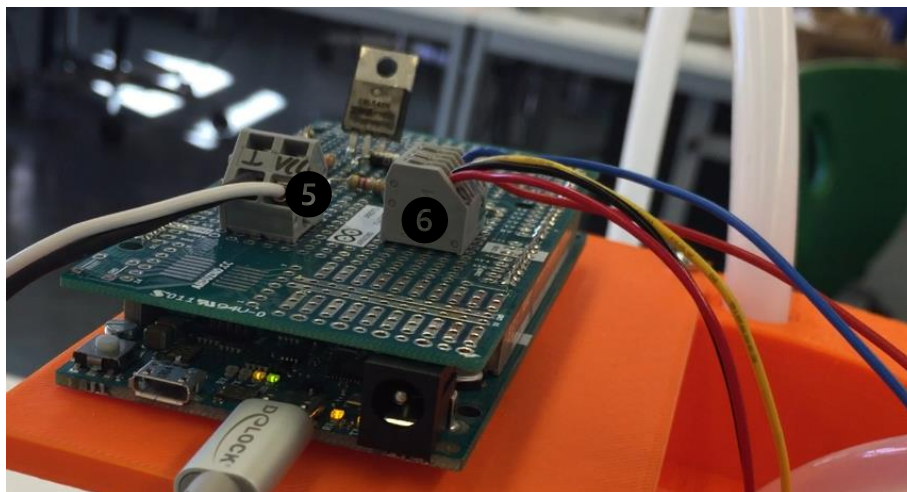


Abbildung 19: Arduino Due Schaltung der mobilen Füllstandsregelung Teil II

In dieser Projektarbeit ist der Anschluss für das Steckernetzteil separat am Arduino Due angeschlossen, durch sogenannte Steckbuchsen. Der Anschluss des Infrarotsensor (GND, Vcc und analoge Ausgangsspannung), sowie die Anschlüsse der Pumpe (GND und Vcc) ⑥ sind an einer anderen Buchse angeschlossen. Die Pumpe wird wie bei Projektarbeit I mit einem PWM-Signal betrieben. Die genaue Funktionsweise ist in Teil I der mobilen Füllstandsregelung beschrieben und wird daher hier nicht mehr aufgeführt.

## 4.7 Versuchsaufbau der mobilen Füllstandsregelung Teil II

Nun werden die entwickelten Hardwarekomponenten miteinander zu einem kompletten Versuchsaufbau vereint. Des Weiteren ist es sehr wichtig, bevor es mit der Anwendung weiterführender Regelungsverfahren weitergeht, dass die Pumpe einwandfrei läuft und das tut, was sie soll – nämlich Wasser vom Vorrats- in den Füllstandsbehälter befördern. Zusätzlich muss der Sensor geprüft und nochmal im Gesamtsystem getestet werden.

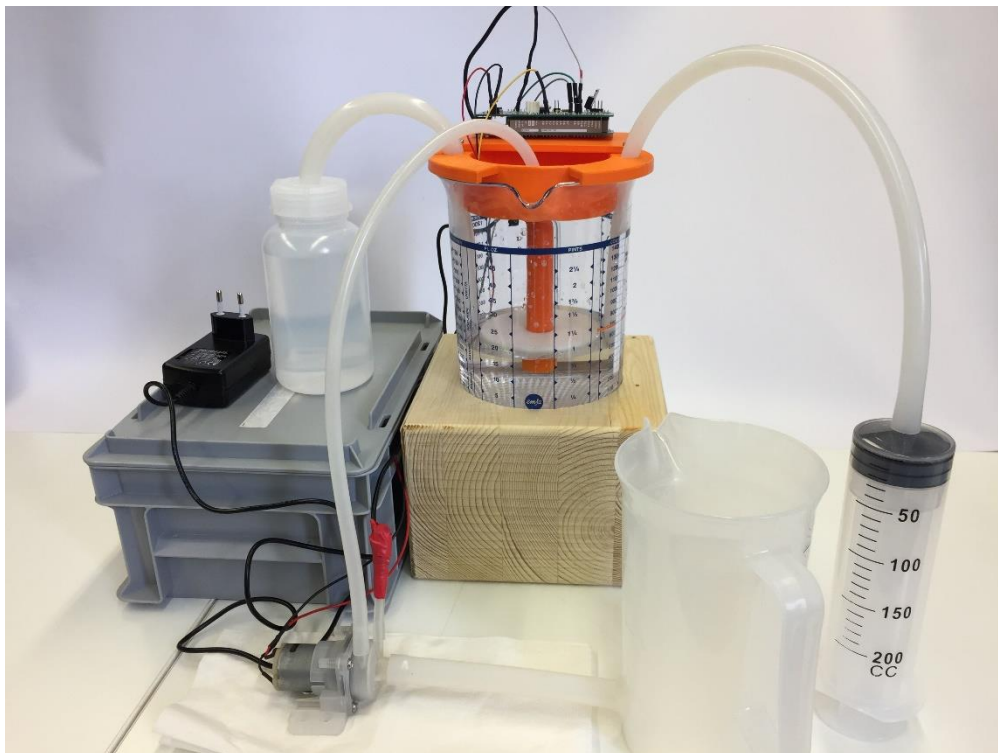


Abbildung 20: kompletter Versuchsaufbau der mobilen Füllstandsregelung Teil II

Abbildung 20 zeigt den kompletten Versuchsaufbau der mobilen Füllstandsregelung Teil II. Auf der grauen Box ist ein Behälter dargestellt, der später wichtig für die antike Lösung der Füllstandsregelung wird.

Nun kann mit der Steuerung, Regelung und den weiterführenden Regelungsverfahren fortgesetzt werden. Die angesprochenen Themen werden in Kapitel 5 näher untersucht und beschrieben.



## 5 Antike Lösung der Füllstandsregelung

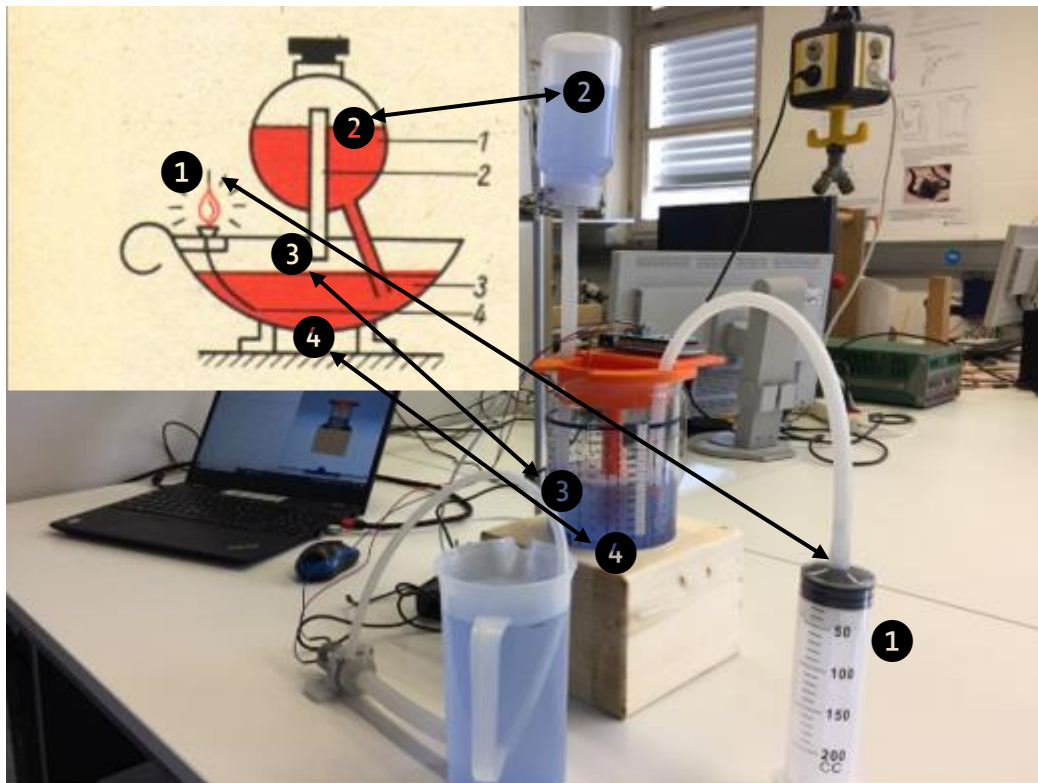


Abbildung 21: antike Lösung der Füllstandsregelung [6]

Links oben im Eck in Abbildung 21 ist der Öllampen-Niveau-Regler von Philon – griechischer Entdecker – dargestellt. Die Ausgangslage beider Systeme ist gleich. Zu Beginn ist der Luftspalt geschlossen.

Schritt	antike Lösung Öllampe (früher)	antike Lösung Füllstand (heute)
1	Luftspalt geschlossen	Luftspalt geschlossen
2	Docht brennt	Spritze wird betätigt
3	Öl wird verbraucht	Wasser wird entnommen
4	Luftspalt offen	Luftspalt offen
5	Öl fließt nach	Wasser fließt nach
6	Luftspalt geschlossen	Luftspalt geschlossen

Tabelle 3: Prinzip der antiken Lösung der Füllstandsregelung

Mit diesem Aufbau kann der Füllstand geregelt werden, ohne dabei elektrische Energie zu verbrauchen.

Durch die Integration der antiken Lösung in die mobile Füllstandsregelung ist es möglich, den Verlauf der antiken Lösung der Füllstandsregelung mit dem IR-Sensor zu erfassen. Somit lässt sich dieser Verlauf darstellen.



Abbildung 22: Blockschaltbild für die antike Lösung der Füllstandsregelung

Folgender Verlauf ergibt sich für die Füllhöhe:

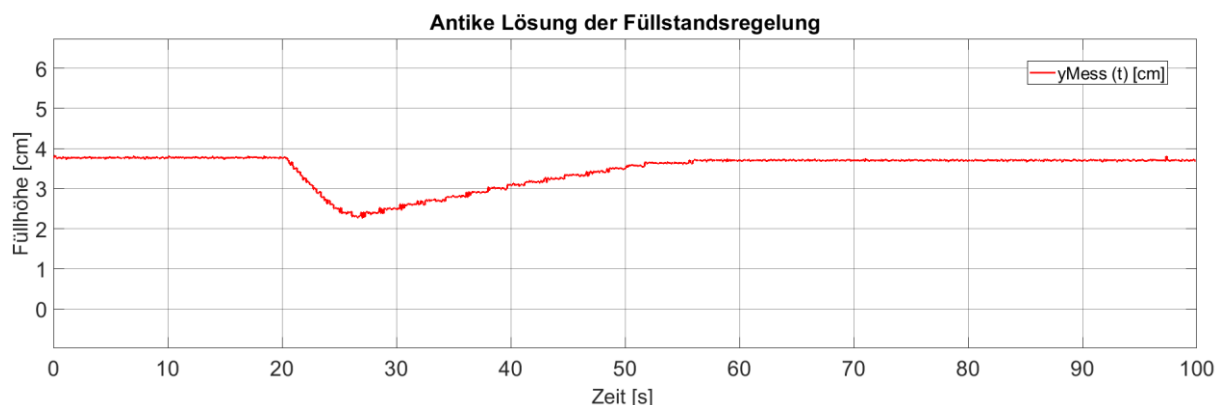


Abbildung 23: Verlauf antike Lösung der Füllstandsregelung

Bei dem Zeitpunkt  $t = 20\text{s}$  wird dem System Wasser durch die Wasserspritze ❶ entnommen. Es entsteht ein Luftspalt am Schlauchende ❸ und das Wasser fließt vom Vorratsbehälter ❷ in den Füllstandsbehälter ❹ nach, bis sich der Luftspalt wieder schließt. So wird, durch einen einfachen physikalischen Zusammenhang, eine effiziente Regelung, ohne jeglichen Verbrauch von elektrischer Energie, erzielt. Allerdings benötigt diese Art von Regelung ein bisschen, bis der Sollwert wieder erreicht wird. Beschleunigen lässt sich die Regelung durch Vergrößerung des Schlauchdurchmessers. Dadurch könnte eine größere Wassermenge nachfließen. Aber diese Vergrößerung ließe sich nicht in dieses Deckel-System mit integrieren. Die Wichtigkeit liegt allerdings nicht in der Schnelligkeit, sondern darin, dass sich dieses Prinzip übertragen lässt und einwandfrei funktioniert.

## 6 Anwendung weiterführender Regelungsverfahren

In diesem Kapitel werden nun die weiterführenden Regelungsverfahren beschrieben. Zu Beginn ist es allerdings wichtig, eine experimentelle Modellbildung zu machen, da sich in Hinsicht auf Teil I der mobilen Füllstandsregelung der Versuchsaufbau und somit der Höhenunterschied zwischen Vorrats- und Füllstandsbehälter geändert hat. Zudem wird ein neuer Sensor im Versuch verwendet. Diese Modellbildung wird mittels der Software pzMove, die ausschließlich Studenten der Hochschule Rosenheim verwenden dürfen, durchgeführt. Im nächsten Punkt werden die Ergebnisse der experimentellen Modellbildung mit pzMove gezeigt.

### 6.1 Experimentelle Modellbildung mit pzMove

In diesem Abschnitt ist es wichtig, eine Sprungantwort in MATLAB/SIMULINK aufzunehmen, und anschließend den Zeit-, Eingangs- und Ausgangsvektor zu einer Matrix zusammenzufügen, damit die Daten sofort in pzMove eingelesen werden können. Anhand dieser Daten errechnet sich das Programm pzMove die Übertragungsfunktion der Strecke. Diese Vorgehensweise beschreibt eine experimentelle Modellbildung, da kein physikalisches bzw. mathematisches Modell gebildet worden ist. Hier wird nur anhand der Auswertung von den Messdaten des realen Systems die Strecke modelliert.

#### 6.1.1 Analysieren der Messdaten in pzMove

##### 6.1.1.1 Sprungantwort

Das Eingangssignal ist die Pumpenspannung in [V]. Als Ausgangssignal ist der Füllstand, welcher in [cm] gemessen wird, definiert. Die Zeit entspricht der Simulationszeit in [s], nach der die Simulation endet. Nun werden die Messdaten bei einem Sprung von 3V, bei der sich nach einiger Zeit ein entsprechender Füllstand einstellt, in pzMove eingelesen und analysiert.

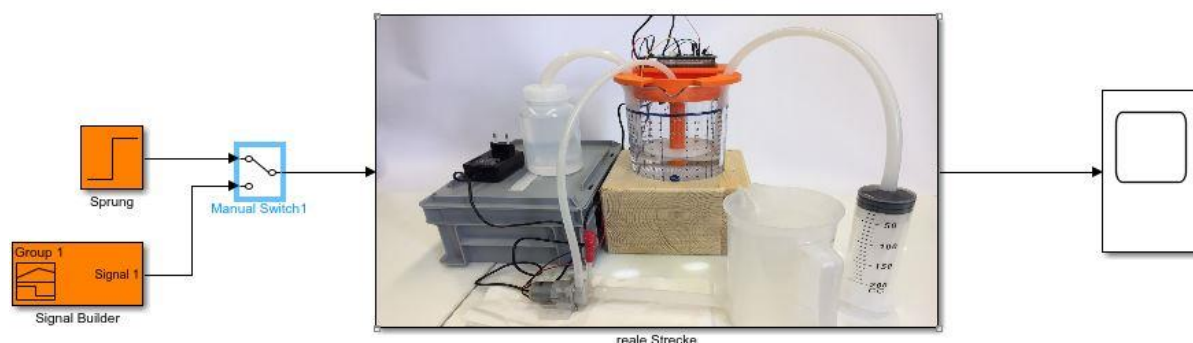


Abbildung 24: Simulink-Modell für die Aufnahme der Sprungantwort

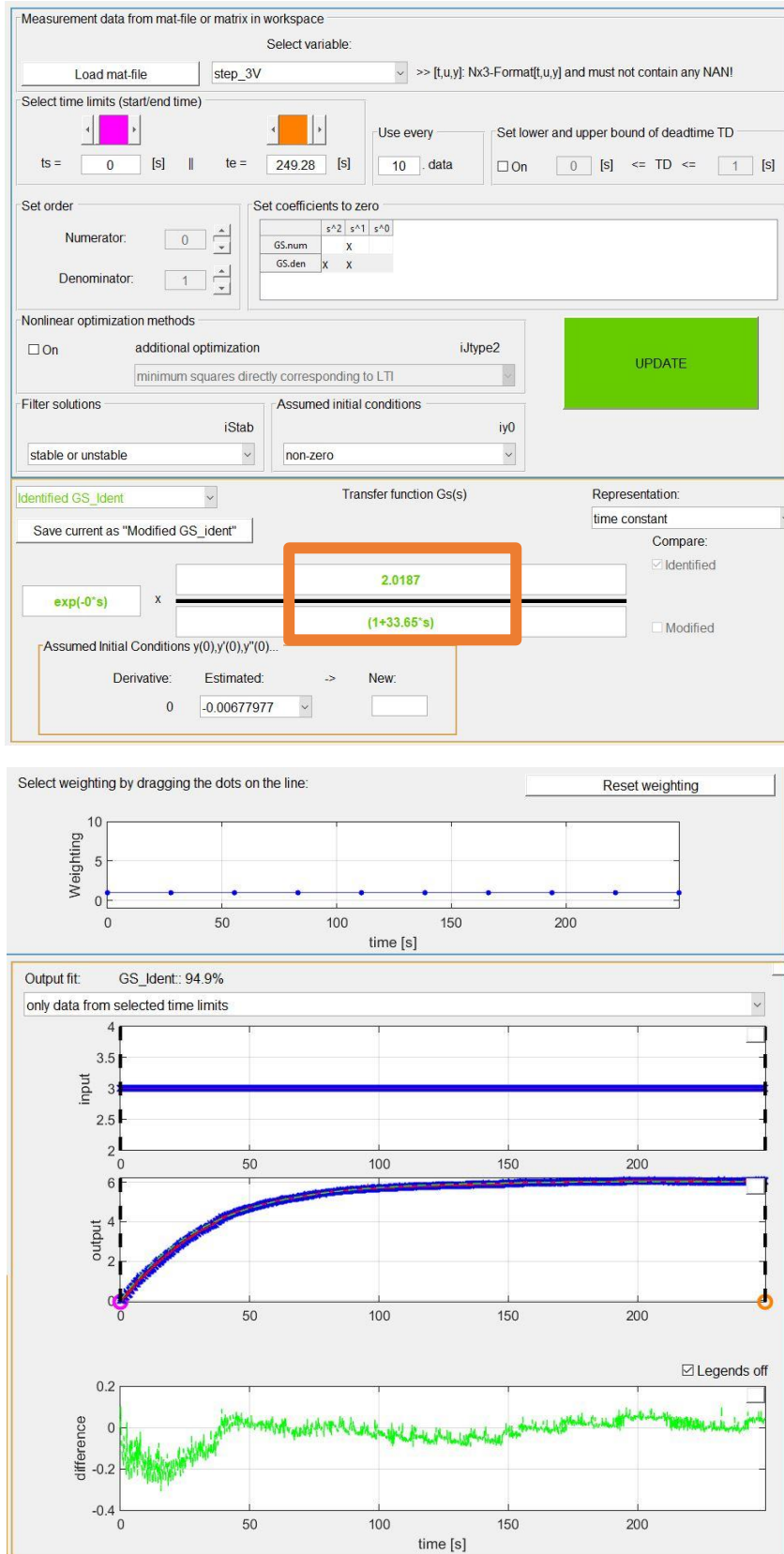


Abbildung 25: Analysieren der Messdaten der Sprungantwort mit pzMove



Abbildung 25 zeigt die Streckenidentifikation der Sprungantwort mit einem Sprung von 3V. Nach der richtigen Einstellung der Parameter von pzMove, errechnet sich das Programm eine identifizierte Übertragungsfunktion. Folgende Funktion ergibt sich für die Sprungantwort:

$$GM_{Sprung}(s) = \frac{2.0187}{(1 + 33.65 \cdot s)}$$

Normalerweise müsste für die experimentelle Modellbildung noch mindestens eine weitere Sprungantwort aufgenommen werden. Diesmal mit der doppelten Eingangsgröße von 6V. Da sich bei diesem System allerdings nur bei den Eingangsgrößen 1.5V – 3.0V eine Sättigungs-Füllhöhe einstellt, ist dies in diesem speziellen Fall nicht möglich.

Trotzdem muss zum Vergleich ein weiterer Verlauf der Füllhöhe bei unterschiedlichen Spannungswerten untersucht werden.

### 6.1.1.2 Antwort auf selbst erzeugtes Signal mit Signal Builder

Zusätzlich zur Sprungantwort wird ein eigenes Signal mit *Signal Builder* (Simulink-Block) erzeugt, welches durchlaufen wird. Dabei wird der Verlauf der Füllhöhe aufgenommen und die erstellten Messdaten in pzMove ebenfalls eingelesen und analysiert.



Abbildung 26: Blockschaltbild zur Erzeugung des eigenen erstellten Signals mit Signal Builder

In Abbildung 27 ist die Streckenidentifikation für das reale System dargestellt. Es ergibt sich eine Übertragungsfunktion von:

$$GM_{Signal-Builder}(s) = \frac{2.1459}{(1 + 33.78 \cdot s)}$$



Abbildung 27: Analyse des erzeugten Signals mit Signal Builder zum Vergleich

Werden nun die sich ergebenden Übertragungsfunktionen miteinander verglichen, fällt auf, dass sie sich nicht wesentlich unterscheiden. Dadurch lässt sich sagen, dass sich die Pumpenspannung auf den Füllstand bezogen nahezu linear verhalten. Dies ist sehr wichtig für die korrekte Modellbildung. Zusätzlich lässt sich mit dem Programm pzMove die Übertragungsfunktion noch anpassen.

### 6.1.2 Modifizierung der Übertragungsfunktion

Durch Ändern der stationären Verstärkung, sowie der Zeitkonstante lässt sich die Übertragungsfunktion ganz einfach modifizieren. Dabei ist es wichtig, dass die modifizierte Übertragungsfunktion für beide Verläufe – sowohl der Sprung als auch das selbst erzeugte Signal – stimmig ist!

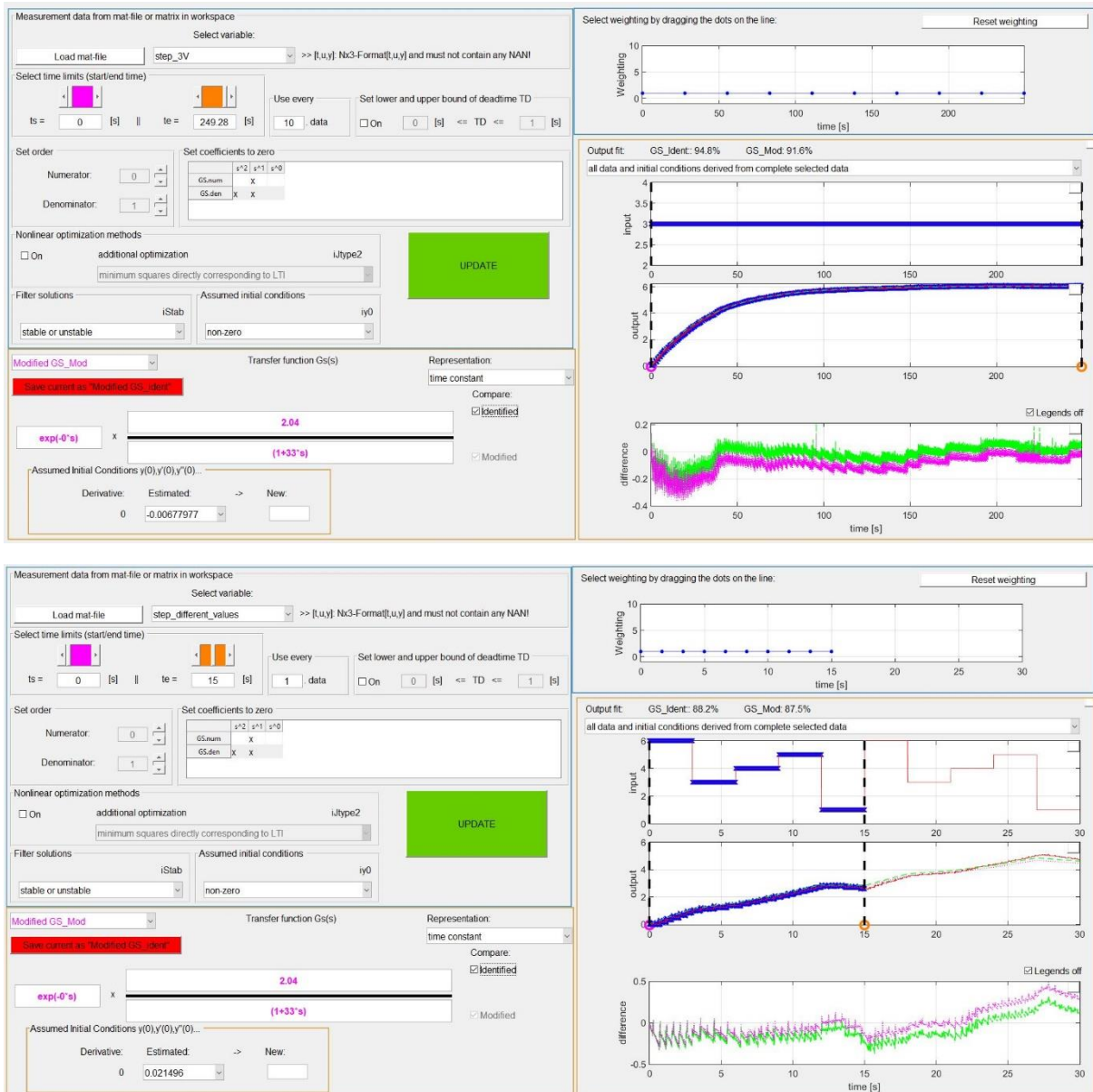


Abbildung 28: Modifizierung der identifizierten Streckenfunktion

Nun ist die experimentelle Modellbildung abgeschlossen und die Übertragungsfunktion kann für die weiteren Regelungsverfahren verwendet werden. Sie dient zum Vergleich zur realen Strecke. Ist die Strecke gut modelliert, können die Regelparameter einfach und schnell experimentell mit MATLAB/SIMULINK bestimmt werden. Zudem steigert eine gute Simulation die Produktivität durch die daraus resultierende Zeitersparnis.

Folgende modifizierte Übertragungsfunktion wird für die weiterführenden Regelungsverfahren verwendet:

$$GM(s) = \frac{2.04}{(1 + 33 \cdot s)}$$

mit der stationären Verstärkung ( $t \rightarrow \infty$ ):

$$GM(s \rightarrow 0) \rightarrow Ks = 2.04$$

und der Zeitkonstante der Strecke:

$$Ts = 33$$

Bei dieser Übertragungsfunktion handelt es sich um ein PT<sub>1</sub>-Glied. Die identifizierte Strecke ist ein Verzögerungsglied 1. Ordnung.

## 6.2 Steuerung

Eine Steuerung ist durch einen offenen Regelkreis gekennzeichnet. Das heißt, der Istwert wird dem Sollwert nicht zurückgeführt, wodurch keine Differenz gebildet werden kann. Dadurch kann nicht auf nicht bekannte Störungen reagiert werden. Sind alle Störeinflüsse bekannt, ist eine Steuerung in den meisten Fällen sehr viel schneller als die Regelung. Meistens sind Störungen aber nicht bekannt oder vorhersehbar, weshalb bei der Regelung kein Weg vorbeiführt. Nun aber zu den Ergebnissen der Steuerung.

Zunächst wird die Steuerung mit der stationären Verstärkung im Kehrwert dargelegt.

### 6.2.1 Lookup Table

Da für die mobile Füllstandsregelung Teil II ein neuartiger Deckel entwickelt wurde, muss eine neue Umwandlung der analogen Ausgangsspannung zur Füllhöhe gemacht werden.

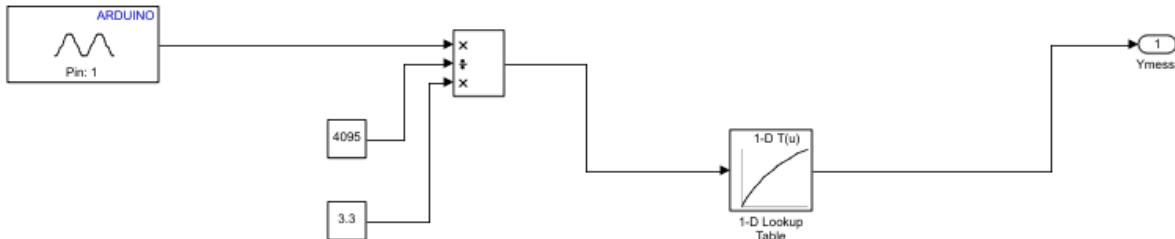


Abbildung 29: Blockschaltbild IR-Sensor mit 1-D Lookup Table

Durch Doppelklick auf den Block *1-D Lookup Table*, öffnet sich folgendes Fenster, in welchem die entsprechenden Werte, wie in Tabelle 4 aufgelistet, eingetragen werden.

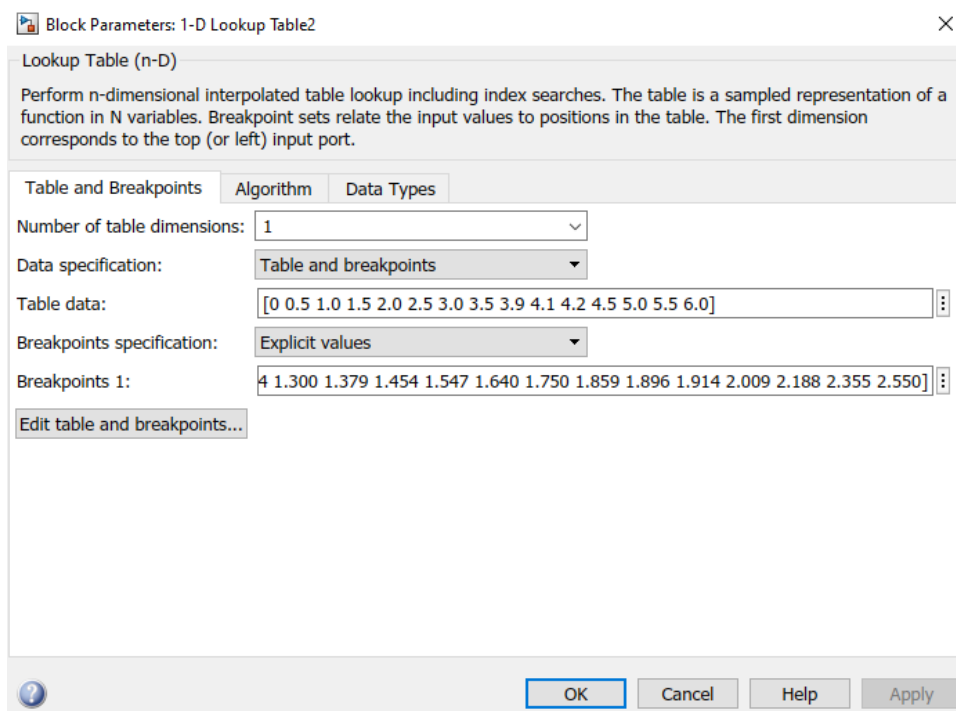


Abbildung 30: Lookup Table für die neue Umwandlung für die mobile Füllstandsregelung Teil II

Table data / Füllstand	Breakpoints 1 / analoge Ausgangsspannung
0	1.187
0.5	1.244
1.0	1.300
1.5	1.379
2.0	1.454
2.5	1.547
3.0	1.640
3.5	1.750
3.9	1.859
4.1	1.896
4.2	1.914
4.5	2.009
5.0	2.188
5.5	2.355
6.0	2.550

Tabelle 4: Umwandlung der analogen Ausgangsspannung des Sensors in die entsprechende Füllhöhe

Um die Füllhöhe von 4 cm werden mehrere Messwerte hinzugefügt, da der Sensor bei genau 4 cm ein ungewohnt hohes Schwanken anzeigt. Somit bleibt die Genauigkeit der Messwerte um die 4 cm bestehen. Sobald die *Lookup Table* eingefügt ist, kann mit der Messdatenaufnahme begonnen werden.

### 6.2.2 Steuerung mit stationärer Verstärkung im Kehrwert

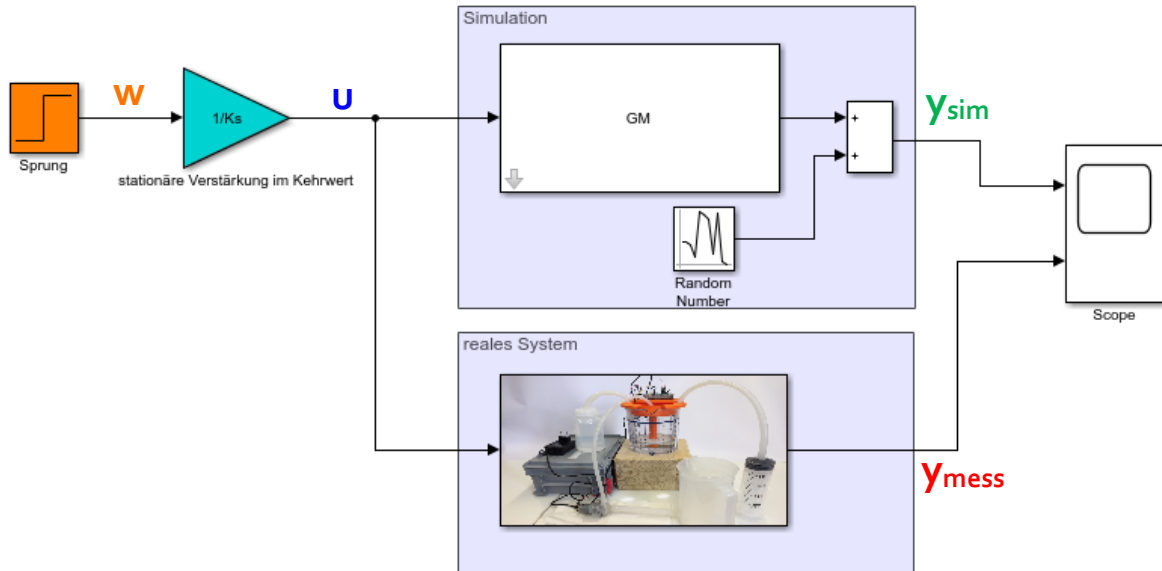


Abbildung 31: Blockschaltbild Steuerung mit inverser stationärer Verstärkung

Abbildung 31 zeigt das Blockschaltbild für die Steuerung mit der inversen stationären Verstärkung mit ihren Größen. Die Bezeichnungen für die Größen sind folgendermaßen:

<b>W</b>	Sollwert	Füllstand	[cm]
<b>U</b>	Stellgröße	Pumpenspannung	[V]
<b>Y<sub>Sim</sub></b>	Istwert Simulation	Füllstand Simulation	[cm]
<b>Y<sub>Mess</sub></b>	Istwert Messung	Füllstand Messung	[cm]

Tabelle 5: Bezeichnungen der Regelgrößen

Dabei ergeben sich folgende mathematischen Zusammenhänge:

$$u = w \cdot \frac{1}{Ks}$$

und

$$y_{sim}(s) = u \cdot GM(s) = w \cdot \frac{1}{Ks} \cdot \frac{Ks}{(1 + 33s)}$$

Wird jetzt der stationäre Zustand ( $t \rightarrow \infty$ ) betrachtet, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$y_{sim}(s \rightarrow 0) = w$$

### 6.2.2.1 Simulation des Sensorrauschens

Der Infrarotsensor von SHARP hat ein gewisses Sensorrauschen. Um die Simulation noch genauer zu definieren, wird dieses Sensorrauschen durch die Varianz bestimmt und der Übertragungsfunktion  $GM$  hinzuaddiert.

Dazu wird der Füllstandsbehälter bis zu einer gewissen Höhe mit Wasser gefüllt und die Füllhöhe mit dem IR-Sensor gemessen. Dabei ist es wichtig, die Standardabweichung  $\sigma$  zu ermitteln. Wird nun, vom Erwartungswert ausgehend, drei Standardabweichungen nach links und drei nach rechts gegangen, sind 99,7 % der möglichen Ergebnisse abgedeckt. Bei dieser Vorgehensweise geht es um die Normalverteilung, die auch, nach ihrem Entdecker, als Gauß-Verteilung bezeichnet wird [4].

Nun kann die Standardabweichung, sowie die Varianz aus den Messdaten ermittelt werden.

$$\sigma = \frac{\text{Maximum} - \text{Minimum}}{6} = \frac{4.65 - 4.53}{6} = 0.021$$

Es wird durch 6 geteilt, da damit 99,7 % der möglichen Ergebnisse abgedeckt sind. Anschließend lässt sich aus der Standardabweichung die Varianz wie folgt berechnen:

$$\sigma^2 = 0.021^2 \rightarrow \text{Varianz}$$

Abschließend ist es notwendig, die Varianz in den Block *Random Number* in Abbildung 31 einzutragen. Abbildung 32 zeigt die Einstellungen für den Block *Random Number*.

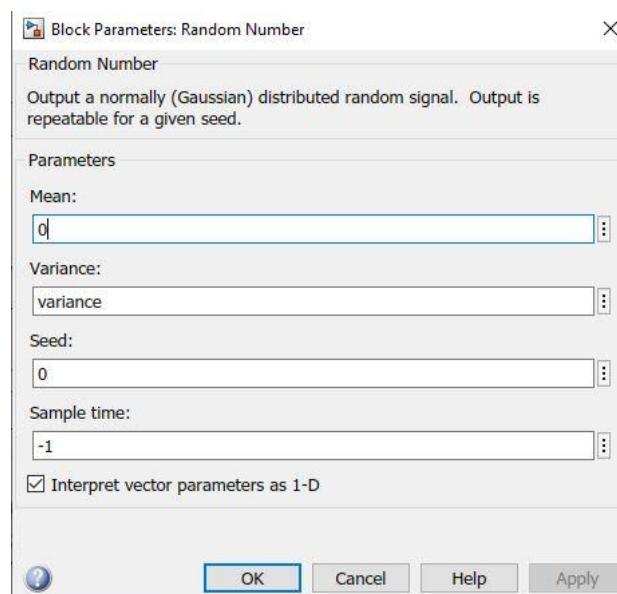


Abbildung 32: Random Number für Simulation des Sensorrauschens



### 6.2.2.2 Messergebnis

Anschließend wird die Messung für folgende Parameter durchgeführt:

T_step	Samplezeit	0.1	[s]
T_end	Simulationsende	250	[s]
Ks	stat. Verstärkung	2.04	[cm/V]
Ts	Zeitkonstante Strecke	33	[s]
w	Sollwert	6	[cm]
U_max	maximale Spannung	12.34	[V]

Tabelle 6: Definition der Regelgrößen

Nun ist der nächste Schritt das Simulink-Programm, welches in Abbildung 31 dargestellt ist, zu starten. Entsprechender Verlauf ergibt sich:

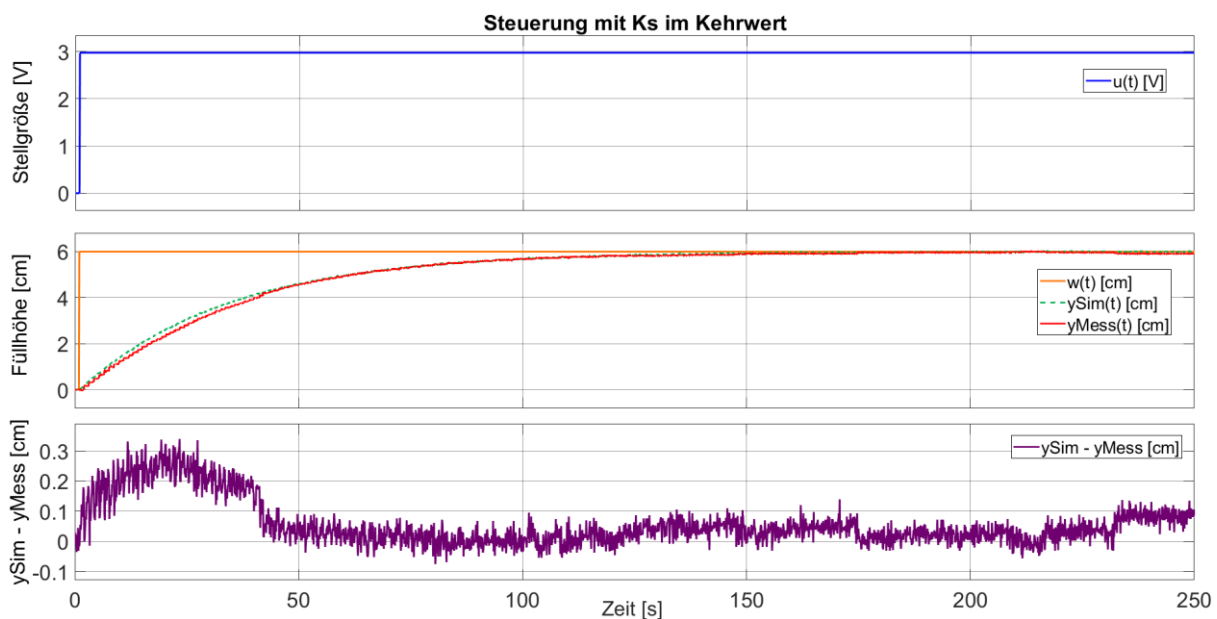


Abbildung 33: Steuerung mit inverser stationärer Verstärkung

Wird die Simulation mit der Messung verglichen, ist eine geringe Abweichung ersichtlich. Somit entspricht das Modell dem realen System gut.

### 6.2.3 Steuerung mit Wunschübertragungsfunktion

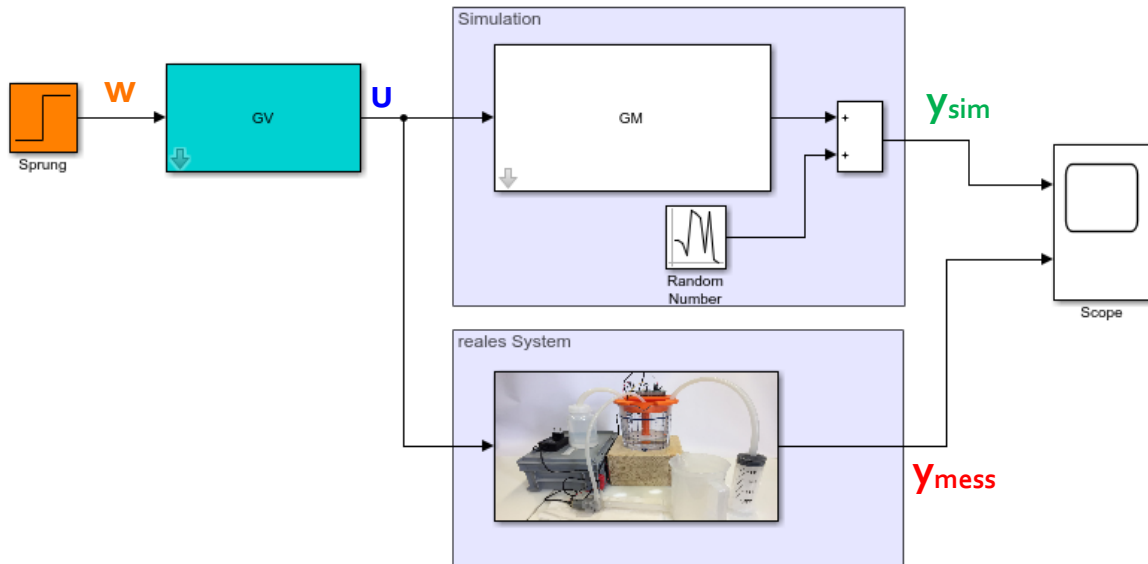


Abbildung 34: Blockschaltbild Steuerung mit Wunschübertragungsfunktion

Um den gewünschten Sollwert schneller zu erreichen, wird eine Wunschübertragungsfunktion  $GW$ , bei der die Zeitkonstante beliebig gewählt werden kann, mit der inversen Streckenfunktion  $GM$  davor geschaltet. Folgende mathematischen Zusammenhänge ergeben sich:

$$GW(s) = \frac{1}{(1 + T_w \cdot s)} \rightarrow \text{Wunschübertragungsfunktion}$$

und

$$GV(s) = GW(s) \cdot \frac{1}{GM(s)}$$

$$\rightarrow y_{sim}(s) = w \cdot GV(s) \cdot GM(s) = w \cdot \frac{GW(s)}{GM(s)} \cdot GM(s) = w \cdot \frac{1}{(1 + T_w \cdot s)}$$

Nun kann durch verschiedene Zeitkonstanten  $T_w < T_s$  der Sollwert schneller erreicht werden. Folgende Parameter werden für die Messung verwendet:

T_step	Samplezeit	0.1	[s]
T_end	Simulationsende	250	[s]
Ks	stat. Verstärkung	2.04	[cm/V]
Ts	Zeitkonstante Strecke	33	[s]
Tw	Zeitkonstante Wunschübertragungsfunktion	30	[s]
w	Sollwert	6	[cm]
U_max	maximale Spannung	12.34	[V]

Tabelle 7: Parametereinstellung Steuerung mit Wunschübertragungsfunktion

Für die Einstellungen, wie sie in Tabelle 7 dargestellt sind, ergibt sich nachfolgender Verlauf.

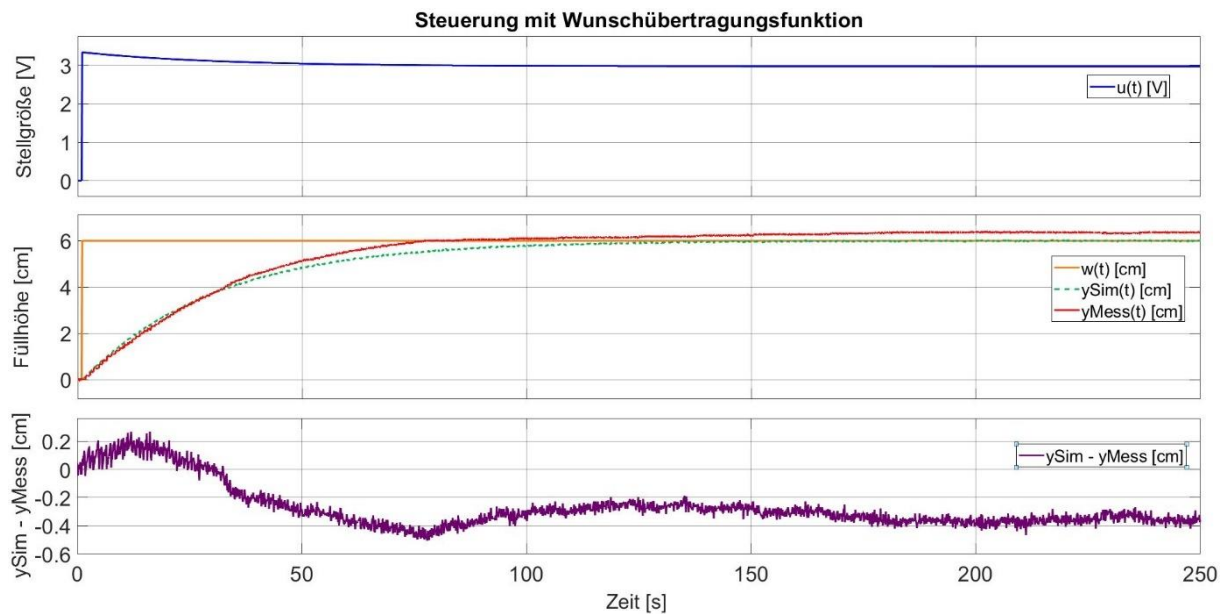


Abbildung 35: Steuerung mit Wunschübertragungsfunktion

Wie in Abbildung 35 auffällt, folgt die Messung der Simulation bis zur Füllhöhe von 4 cm. Danach erreicht die Messung schneller den Sollwert als die Simulation. Dabei handelt es sich um eine unbekannte Störung. Dieses Problem wird im nächsten Punkt genauer dargestellt und mit verschiedenen Zuständen bewiesen.

### 6.2.4 Problem 1: unbekannte Störung

Bei der Steuerung der mobilen Füllstandsregelung fällt auf, dass bei verschiedenen Messungen der Verlauf der Messung unterschiedlich ist. Nun besteht die Aufgabe darin, diesen Einfluss zu untersuchen und zu versuchen das unterschiedliche Verhalten zu reproduzieren.

### 6.2.4.1 Zustand 1

Bei Zustand 1 ist die Messung ganz zu Beginn des Arbeitstages im Labor durchgeführt worden. Dabei waren das Netzteil und alle anderen elektrischen Komponenten über die Nacht abgesteckt. Folgender Verlauf ergab sich für Zustand 1:

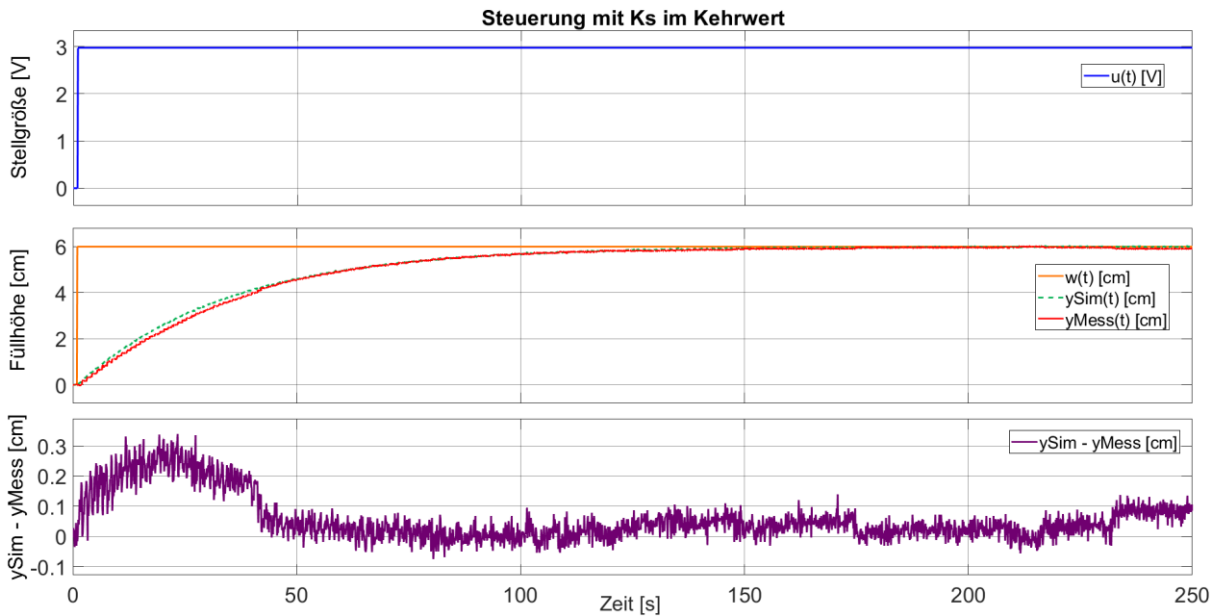


Abbildung 36: Verlauf der Füllhöhe bei Zustand 1

### 6.2.4.2 Zustand 2

Bei Zustand 2 wurde kurz nach der Messung mit Zustand 1 gewartet. Danach ist die Messung mit identischen Einstellungen nochmal gestartet worden. Folgender Verlauf ergab sich:

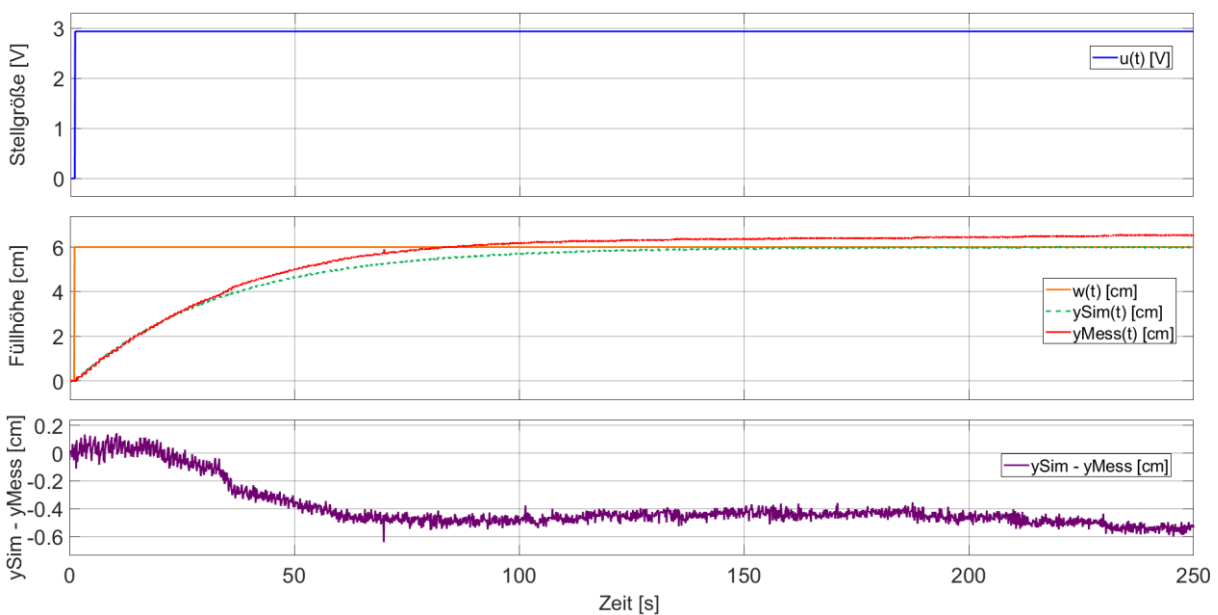


Abbildung 37: Verlauf der Füllhöhe bei Zustand 2

### 6.2.4.3 Zustand 3

Anschließend wurde die Messung erneut mit identischen Einstellungen gestartet. Doch diesmal ist während der Messung die Pumpe durch permanentes „Pusten“ gekühlt worden. Folgender Verlauf stellte sich ein:

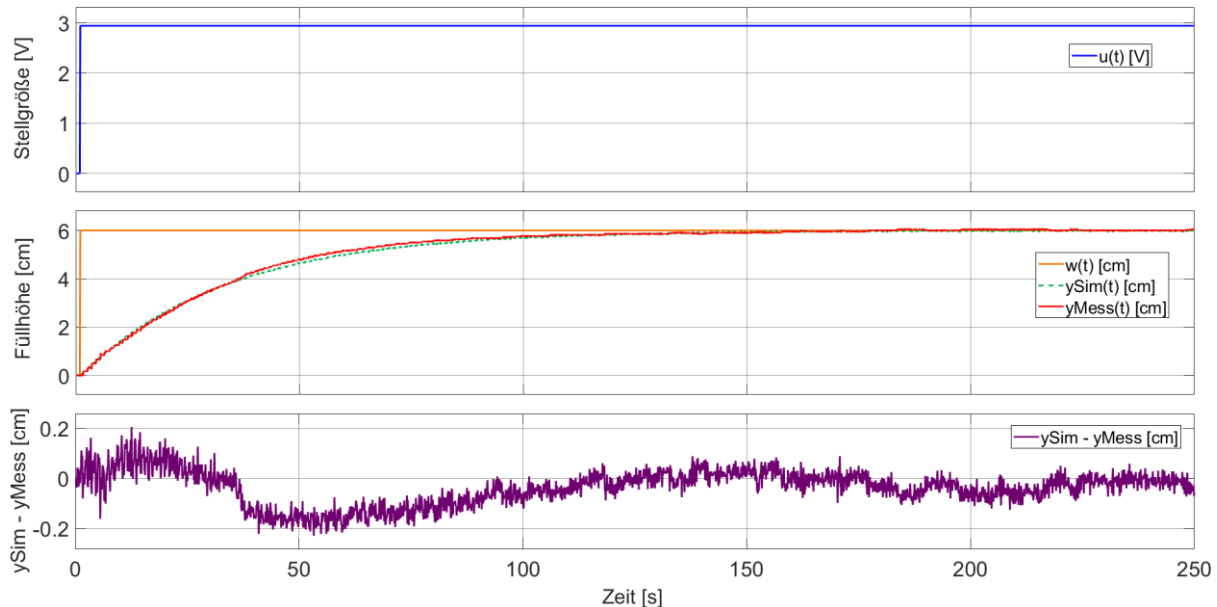


Abbildung 38: Verlauf der Füllhöhe bei Zustand 3

### 6.2.4.4 Interpretation der Messergebnisse

Bei verschiedenen Zuständen zeigen sich Unterschiede bei dem Verlauf der Füllhöhe, obwohl nichts am System oder an den Einstellungen geändert worden ist. Zudem ändert sich das Verhalten beim Kühlen der Pumpe. Dabei wird der Pumpenmotor durch das permanente „Pusten“ gekühlt. Es scheint als würde sich die Pumpenspannung mit der Temperatur ändern und so das Verhalten ändern. Zusätzlich sind die Spannungen an der Pumpe mit Picoscope erfasst und untersucht worden. Leider konnten keine eindeutigen Schlüsse daraus gezogen werden. Es handelt sich demnach nach einer Störung, die sich nicht reproduzieren lässt.

### 6.2.4.5 Lösungsstrategie

Eine Regelung des Systems soll nun diese unbekannte Störung eliminieren bzw. unterdrücken. Die Ergebnisse der Regelung werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit dargestellt.

## 6.2.5 Problem 2: nichtlinearer Bereich der Pumpe

Zum einen besitzt die Pumpe eine Anlaufspannung im Bereich 0 – 2V. Des Weiteren arbeitet die Pumpe erst ab 3V zuverlässig. Ist die Pumpenspannung < 3V so ist die Drehzahl der Pumpe zu gering um zuverlässige Arbeit zu verrichten. Dies wird bei Betrachtung der Pumpenschaufeln ersichtlich. Ab einem bestimmten Punkt, bei der die Spannung den Wert ~2.7V unterschreitet, nimmt die Füllhöhe, entgegen der Erwartung, ab und folgt nicht mehr der Simulation. Dies geschieht, wenn ein Sollwert < 6cm eingestellt wird und somit die Spannung unter den genannten 3V fällt. In diesem Fall liegt der Sollwert bei 4 cm. Abbildung 39 veranschaulicht dieses Problem eindeutig.

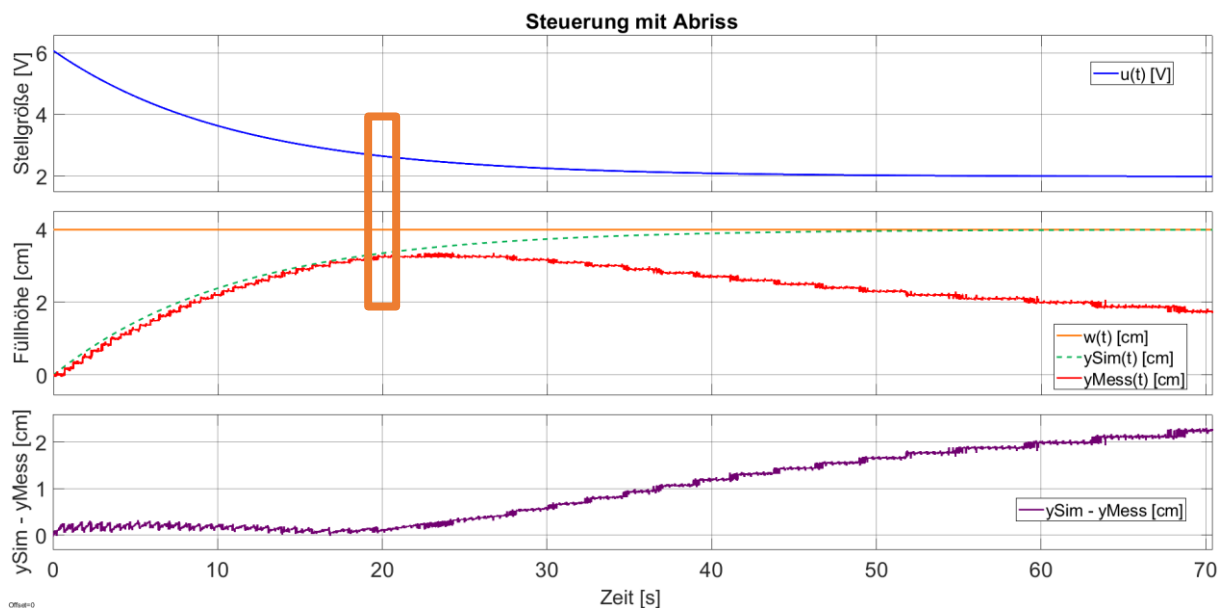


Abbildung 39: Abriss im nichtlinearen Bereich der Pumpe

Mit zunehmender Füllhöhe steigt der Schweredruck, der durch  $\Delta h$  zwischen dem Pegel im Füllstands- und dem Vorratsbehälter herrscht. Zudem nimmt die Stellgröße mit der Zeit exponentiell ab. Ab einem bestimmten Punkt ist die Pumpenspannung zu gering, den Höhenunterschied auszugleichen und die Füllhöhe reißt ab. In diesem Beispiel bei einer Stellgröße von ca. 2.7V. Der Schweredruck ist wie folgt definiert:

$$\Delta p = \rho_{Wasser} \cdot g \cdot \Delta h$$

Auch auf diese Störung kann durch eine entsprechende Regelung reagiert werden. Wie oder ob sich dieses Problem in der Regelung auswirkt, wird dem Leser im nächsten Abschnitt wissenschaftlich dargelegt.

## 6.3 Regelung

Bei der Regelung wird nun der Regelkreis geschlossen. Dabei findet am Eingang des Reglers ein Soll- und Istwert-Vergleich statt. Ist keine Differenz vorhanden, so ist kein Eingreifen des Reglers notwendig. Ergibt sich jetzt, durch Wirken einer Störung, eine bestimmte Differenz, so reagiert der Regler entsprechend der Deklaration der Parameter, bis die Differenz wieder den Wert 0 erreicht. Dabei wird je nach Auslegung der Regler-Parameter die Stellgröße, die dem Ausgang des Reglers und dem Eingang der Strecke entspricht, beeinflusst.

### 6.3.1 Totzeit

Die Kreiselpumpe wird von einem elektrischen Motor betrieben. Dadurch ist in diesem System eine Induktivität mit einem ohmschen Widerstand in Reihe geschaltet. Die Induktivität bewirkt eine Verzögerung des Stroms, der durch die Pumpe fließt. Daraus resultiert eine Totzeit, die in diesem System berücksichtigt werden muss. In Simulink gibt es einen Block, der nennt sich *Dead Zone*. Mit diesem Block lässt sich die Totzeit additiv simulieren.

Dabei wird die Tot-Zone experimentell bestimmt. Die experimentelle Bestimmung ist wie folgt definiert:

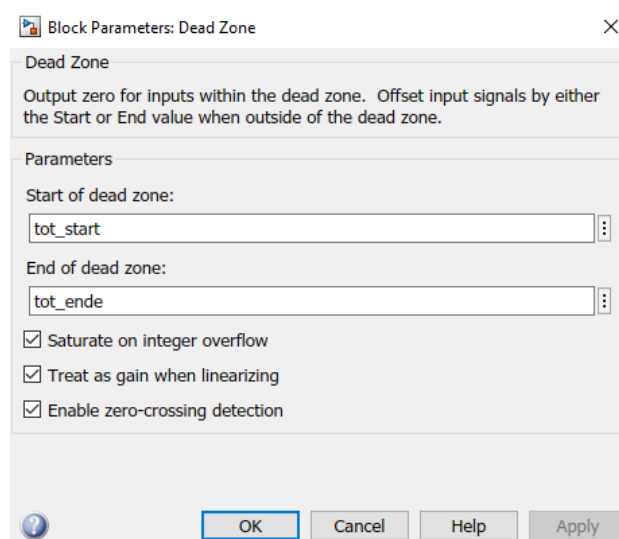


Abbildung 40: Simulation der Totzeit der Pumpe

Ein Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigt, dass die Füllhöhe bei der Messung erst ab dem Wert  $tot\_ende = 0.1$  der Füllhöhe der Simulation beginnt zu steigen. Der Wert für eine neue Messung unterscheidet sich nur marginal vom Wert 0.1. Somit kann eine experimentelle Bestimmung für diesen Fall durchgeführt werden.

$$tot\_start = 0$$

$$tot\_ende = 0.1$$

### 6.3.2 Saturation

Durch den Block *Saturation* kann die Stellgröße begrenzt werden. In der mobilen Füllstandsregelung ist es wichtig, dass die Wasseroberfläche beim Befüllen des Füllstandsbehälters nicht zu große Wellen schlägt. Zum einen verfälscht es ein wenig das Ergebnis der aktuellen Füllstands. Aber noch viel wichtiger ist, dass durch einen zu extremen Wassereinfluss der Schwimmer ggf. im Wasser untergeht. Folgende Einstellungen werden bzgl. der Spannungsbegrenzung übernommen:

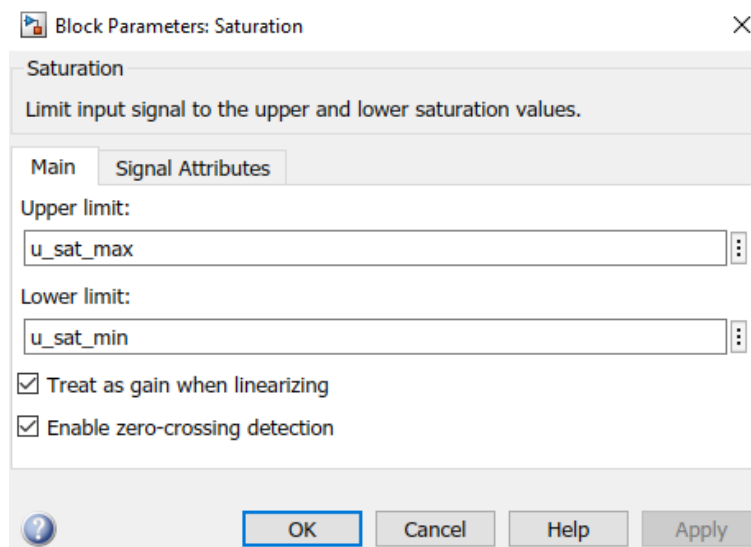


Abbildung 41: Begrenzung der Stellgröße

Dabei wird bei verschiedenen Pumpenspannungen die Wassereinlauf beobachtet. Bei einer Spannung von 6V ist das sprunghafte Einlaufen des Wassers in den Füllstandsbehälter, bezogen auf die entsprechende Wellenbildung, sehr gut. Es sind auch Spannungen bis 10V möglich, aber in diesem Fall ist das Wasser schon sehr unruhig und der Schwimmer fast am versinken. Für das untere Limit wird folgender Wert gewählt:

$$u_{sat\_min} = 0 [V]$$

und für das obere Limit:

$$u_{sat\_max} = 6 [V]$$

Somit ist die Stellgrößenbeschränkung deklariert und kann für die Regelung verwendet werden.



### 6.3.3 Regelung mit P-Regler

Ziel dieses Abschnitts ist die Bestimmung eines Proportional-Reglers für die mobile Füllstandsregelung.

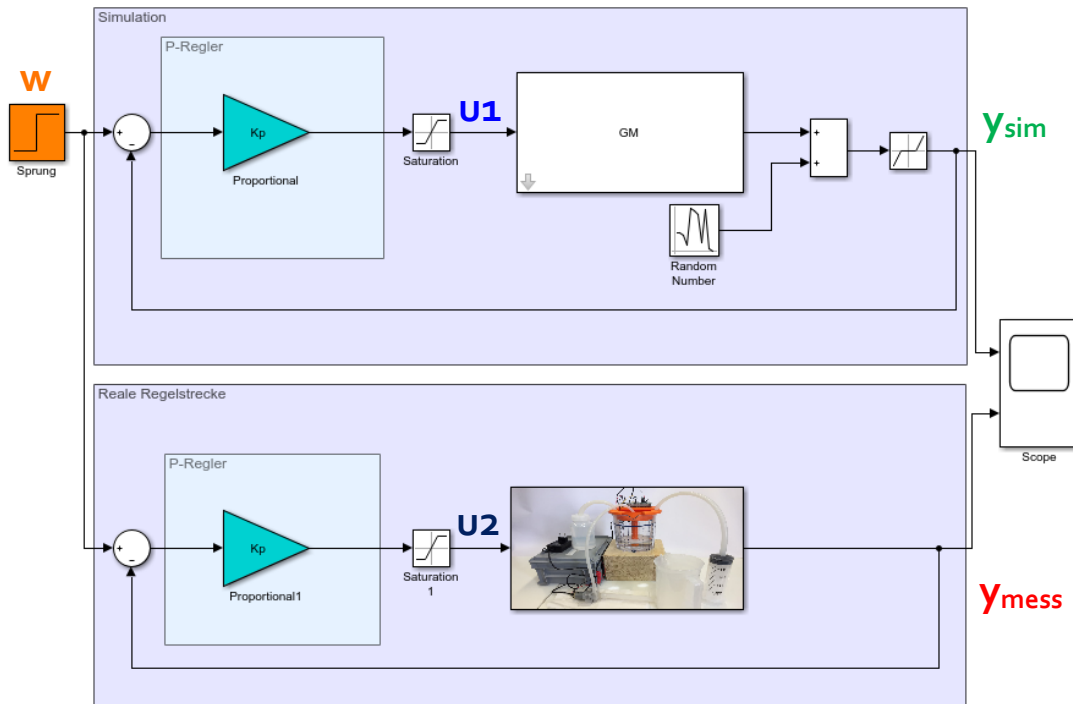


Abbildung 42: Blockschaltbild Regelung mit P-Regler

Dabei entspricht  $u_1$  der simulierten Stellgröße, während  $u_2$  die reale Stellgröße darstellt.

#### 6.3.3.1 Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Regelparameter

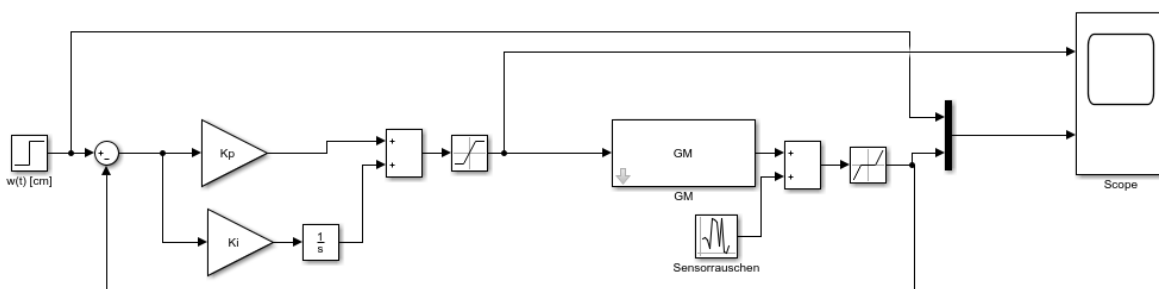


Abbildung 43: Blockschaltbild zur experimentellen Bestimmung der Regelparameter

Für die experimentelle Bestimmung wird  $K_i = 0$  gewählt, da in diesem Abschnitt nur die Proportionalverstärkung  $K_p$  bestimmt wird. Folgendes  $K_p$  ergibt sich:

$$K_p = 15$$

### 6.3.3.2 Verlauf der Füllstandsregelung mit P-Regler

Für den Verlauf der Messung werden folgende Parameter deklariert:

T_step	Samplezeit	0.01	[s]
T_end	Simulationsende	100	[s]
Ks	stat. Verstärkung	2.04	[cm/V]
Ts	Zeitkonstante Strecke	33	[s]
w	Sollwert	4	[cm]
U_max	maximale Spannung	12.34	[V]
Kp	Proportionalverstärkung P-Regler	15	[sV/cm]

Tabelle 8: Deklaration der Variablen für die Regelung mit P-Regler

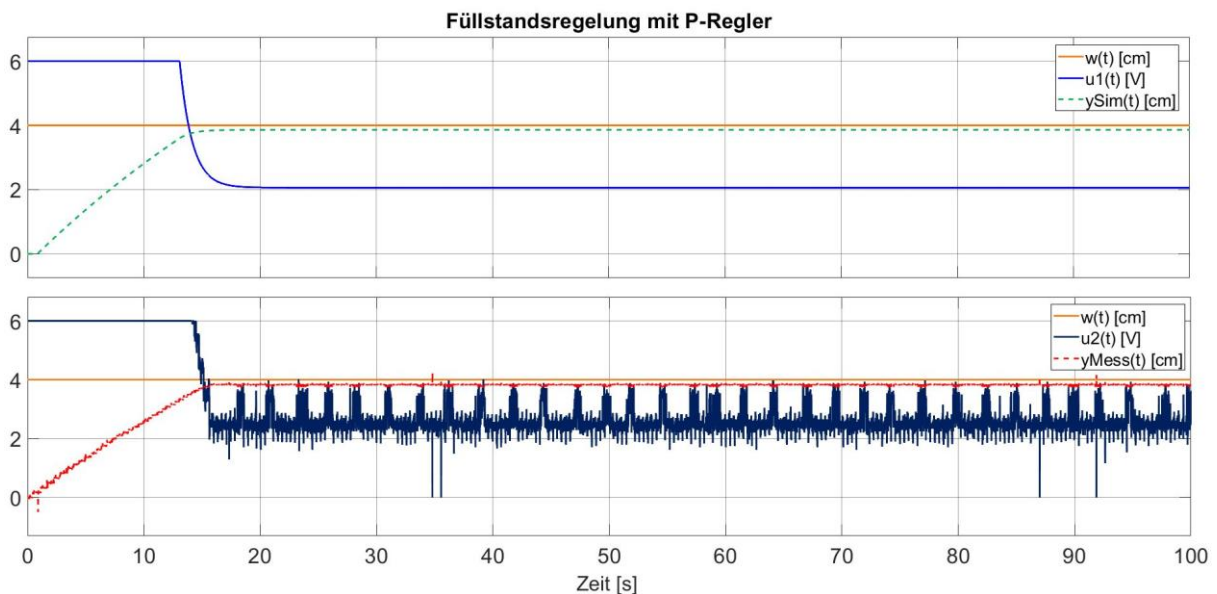


Abbildung 44: Füllstandsregelung mit P-Regler ohne Simulation des Sensorrauschens

Die Füllstandsregelung mit P-Regler ist noch ohne Simulation des Sensorrauschens untersucht worden. Das Sensorrauschen wird beim Verwenden des PI-Reglers mit in die Simulation eingebaut.

Wie der Verlauf in Abbildung 44 zeigt, bleibt eine bleibende Abweichung zum Sollwert bestehen. Dies liegt an dem P-Regler. Um jetzt keine bleibende Regelabweichung im stationären Zustand zu bekommen, wird ein PI-Regler bestimmt. Durch den Integralanteil wird die Regeldifferenz integriert und bewirkt somit, dass bei  $t \rightarrow \infty$  und somit  $s \rightarrow 0$  kein Offset zum Sollwert besteht.

### 6.3.3.3 Lösung für Problem 2: nichtlinearer Bereich der Pumpe

Wie in Abbildung 44 ersichtlich ist, reißt die Messung in periodischen Abständen kurz ab. Allerdings erkennt die Regelung diese Störung, welche durch das Eintreten der Spannung in den nichtlinearen Bereich der Pumpe erzeugt wird. Die Regelung setzt die Stellgröße hoch und gleicht somit die Störung sofort aus.

Somit funktioniert die Regelung besonders gut. Die Stellgröße  $u_2$  zeigt diesen Effekt sehr gut. Fällt der Istwert der Messung, so wird die Stellgröße erhöht, bis der Sollwert wieder erreicht wird.

Zudem lässt sich durch Minimieren der Proportionalverstärkung  $K_p$  und Bestimmung eines PI-Reglers, die Stellgröße und der Verlauf der Füllhöhe ein wenig beeinflussen. Dadurch ist es möglich, das Verhalten der Stellgröße zu beruhigen. Die Ergebnisse zum PI-Regler sind im späteren Verlauf aufgezeigt.

### 6.3.3.4 Lösung für Problem 1: unbekannte Störung Pumpe

Des Weiteren wirkt sich die unbekannte Störung der Pumpe in der Regelung nicht mehr aus. Bei jeder erneuten Messung sind die Verläufe nahezu identisch und verhalten sich bei einer Zustandsänderung nicht anders, wie es bei der Steuerung der Fall war.

Es zeigt sich somit, dass die Regelung sehr wichtig ist, damit jegliche Störungen, seien sie bekannt, wie das automatisierte Ablaufen durch den gegebenen Höhenunterschied der kommunizierenden Gefäße oder der unbekanntem Störung der Pumpe, unterdrückt bzw. eliminiert werden.

Die Regelung zeigt sich als äußerst nützlich in Bezug auf die Lösungsstrategie für auftretende Störungen bei realen Systemen. In diesem Fall bezieht sie sich auf die mobile Füllstandsregelung.

### 6.3.4 Regelung mit PI-Regler

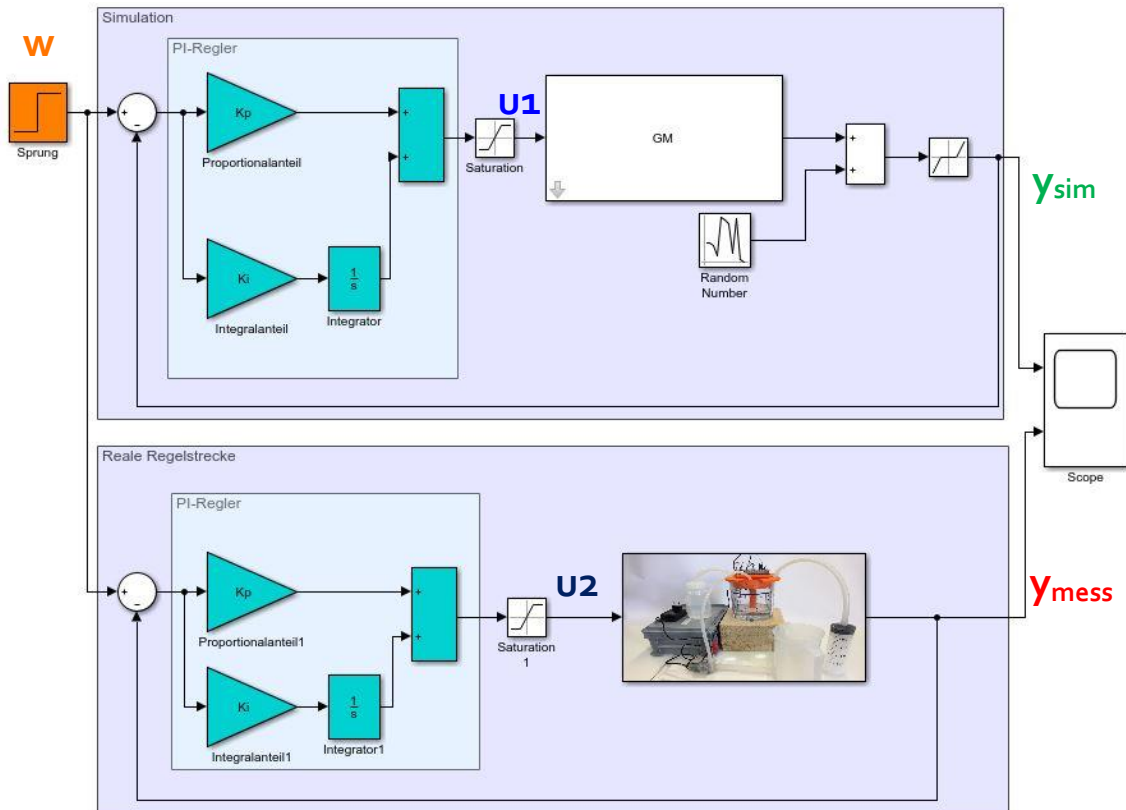


Abbildung 45: Blockschaltbild der Füllstandsregelung mit PI-Regler

Durch die Auslegung des Reglers mit einem Proportional-Integral-Regler sollen nachstehende Ziele erreicht werden:

- kein bleibender Offset im stationären Zustand
- Minimieren des Einflusses der bekannten Störung durch den entstehenden Höhenunterschied

Was allerdings nachteilig gegen den PI-Regler spricht, ist die Regelgeschwindigkeit. Ein PI-Regler ist langsamer als ein P-Regler. Allerdings wird dadurch der bleibende Offset vermieden.

#### 6.3.4.1 Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Regelparameter

Jetzt werden im Gegensatz zur Regelung mit P-Regler beide Regelparameter, sowohl die Proportionalverstärkung  $K_p$  als auch die Integralverstärkung  $K_i$ , bestimmt. Dabei ist es wichtig, dass die Werte nicht in großen, sondern in kleinen Schritten geändert werden. Anschließend ist es signifikant, den Verlauf in Abbildung 43 zu betrachten.

Passen die Werte, so können diese übernommen werden. Andernfalls ist eine weitere Testphase dafür notwendig. Folgende Parametrierung resultiert:

$$\text{Proportionalverstärkung} \rightarrow K_p = 2$$

$$\text{Integralverstärkung} \rightarrow K_i = 0.06$$

### 6.3.4.2 Verlauf Füllstandsregelung mit PI-Regler ohne Störung

Für den Verlauf sind nachstehende Einstellungen festgelegt:

T_step	Samplezeit	0.1	[s]
T_end	Simulationsende	100	[s]
Ks	stat. Verstärkung	2.04	[cm/V]
Ts	Zeitkonstante Strecke	33	[s]
w	Sollwert	4	[cm]
U_max	maximale Spannung	12.34	[V]
Kp	Proportionalverstärkung P-Regler	2	[sV/cm]
Ki	Integralverstärkung PI-Regler	0.06	[s <sup>2</sup> V/cm]

Tabelle 9: Deklaration der Variablen der für die Regelung mit PI-Regler

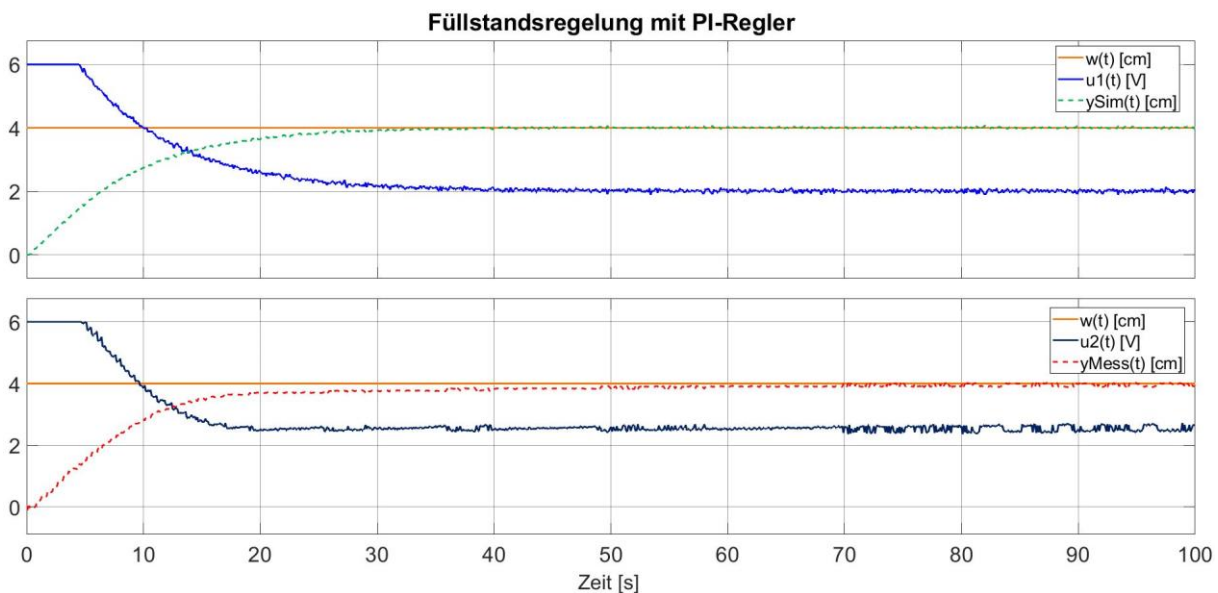


Abbildung 46: Füllstandsregelung mit PI-Regler

Wie in Abbildung 46 ersichtlich ist, gibt es keinen bleibenden Offset. Zum anderen ist die bekannte Störung, sprich die periodischen Abrisse der Füllhöhe  $y_{Mess}$ , nicht mehr zu sehen. Somit ist die Zielsetzung erfüllt. Im nächsten Abschnitt wird nun eine zusätzliche Störung eingebaut und das Verhalten betrachtet.

### 6.3.4.3 Verlauf Füllstandsregelung mit PI-Regler mit Störung

Eine Wasserspritze, die ein Volumen von 250 ml hat, sorgt dafür, dass bei einem bestimmten Zeitpunkt dem System Wasser entnommen wird. Die Einstellungen aus Tabelle 9 bleiben dabei identisch.

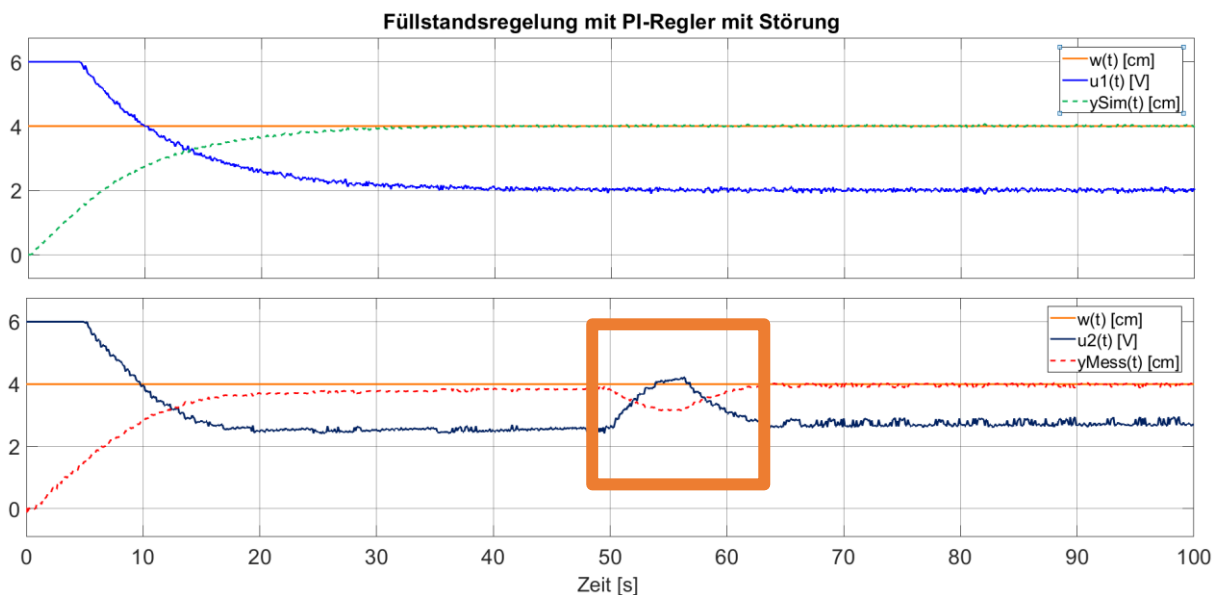


Abbildung 47: Füllstandsregelung mit PI-Regler mit Störung

Ab dem Zeitpunkt  $t = 50$  s wird dem System mit einer Wasserspritze Wasser entnommen. Die Regelung gleicht diese Störung aus, wie in Abbildung 47 ersichtlich ist. Der Istwert nähert sich dem Sollwert wieder an, bis er diesen erreicht.

In der Simulation ist diese Störung nicht simuliert, da für diese Projektarbeit kein physikalisches bzw. mathematisches Modell erstellt wurde.

Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit der Anwendung der Störgrößenkompensation.

## 6.4 Störgrößenkompensation

Bei der Störgrößenkompensation wird die Störung geschätzt. Bevor die Störung sich auswirken kann, wird mittels dieser speziellen Schaltung durch Hochsetzen der Stellgröße entgegengewirkt.

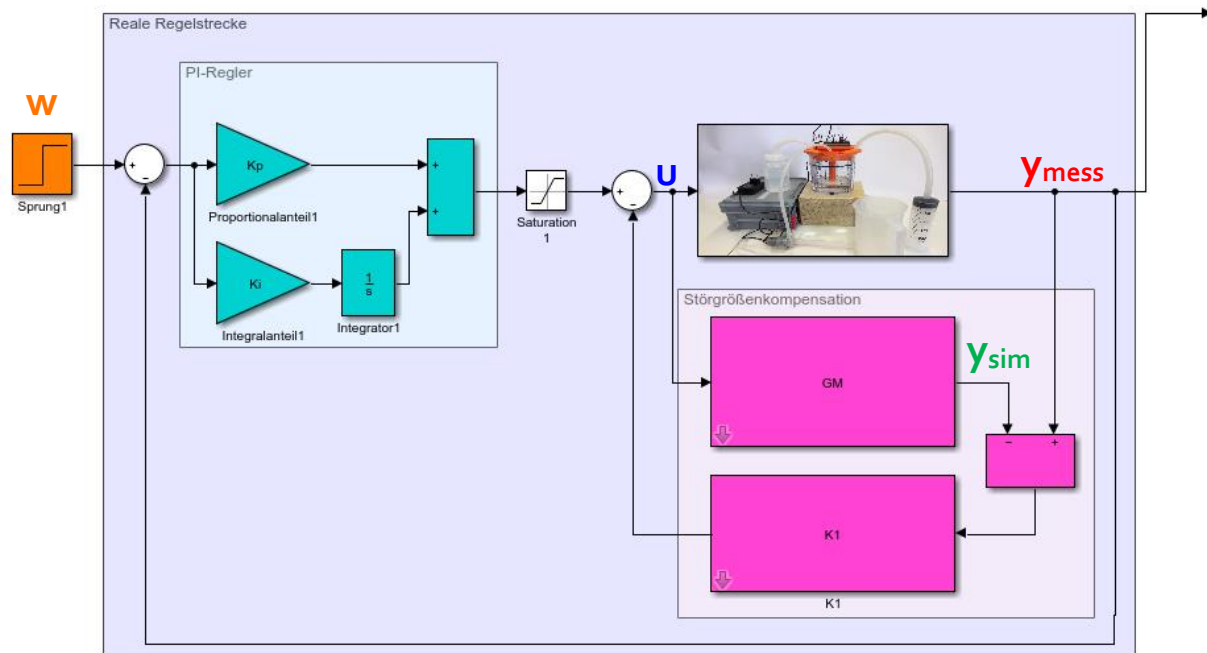


Abbildung 48: Blockschaltbild der Störgrößenkompensation

### 6.4.1 Prinzip der Störgrößenkompensation

Der simulierte Istwert wird von dem gemessenen Istwert abgezogen. Würde diese Spannungsdifferenz jetzt ohne eine Verzögerung zurückgeführt werden, gäbe es ein nichtkausales System, das mehr Pole als Nullstellen hat. Um dies zu verhindern wird der Polüberschuss durch eine Verzögerung  $K_2$  ausgeglichen. Möglich wäre auch die Verwendung eines PT<sub>2</sub>-Glieds. Es muss nur darauf geachtet werden, dass kein Polüberschuss vorliegt [5].

Eine ausführliche Herleitung der Störgrößenkompensation ist in der Projektarbeit II „Mobile Temperaturregelung Teil II“ von Hr. Sebastian Fischer zu finden.

Folgende Verzögerung 1. Ordnung ergibt sich:

$$K_2(s) = \frac{k}{(1 + T_k \cdot s)}$$

$K_1$  ist folgendermaßen deklariert:

$$K_1(s) = K_2(s) \cdot \frac{1}{GM(s)}$$

## 6.4.2 Grenzen der Störgrößenkompensation

Dabei gibt es zwei Punkte, die bei der Störgrößenkompensation unbedingt berücksichtigt werden müssen. Zum einen muss das Modell GM sehr genau der Realität entsprechen. Ansonsten würde die Kompensation nicht funktionieren. Zum anderen wird mit Verkleinerung der Zeitkonstante  $T_k$  das Sensorrauschen verstärkt. Besitzt ein Sensor demnach ein großes Rauschen, muss die Zeitkonstante angepasst, d. h. vergrößert werden. Würde  $T_k \rightarrow 0s$  so ließe sich die Störung nahezu komplett kompensieren. Allerdings ist dies in der Praxis meist nicht möglich, wie auch bei der mobilen Füllstandsregelung.

## 6.4.3 Anwendung der Störgrößenkompensation

Folgende Werte ergeben sich für die Kompensation der Störung:

$$k = 1$$

Für die Zeitkonstante ist folgender Wert deklariert:

$$T_k = 1.5s$$

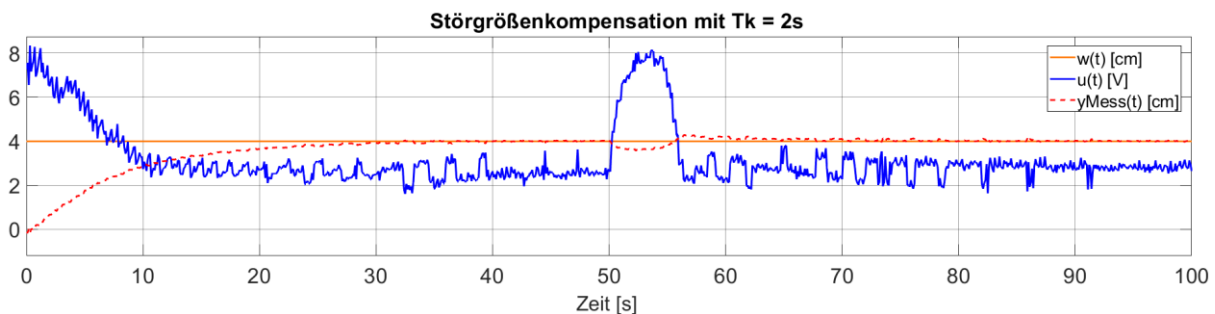


Abbildung 49: Störgrößenkompensation mit  $T_k = 2s$

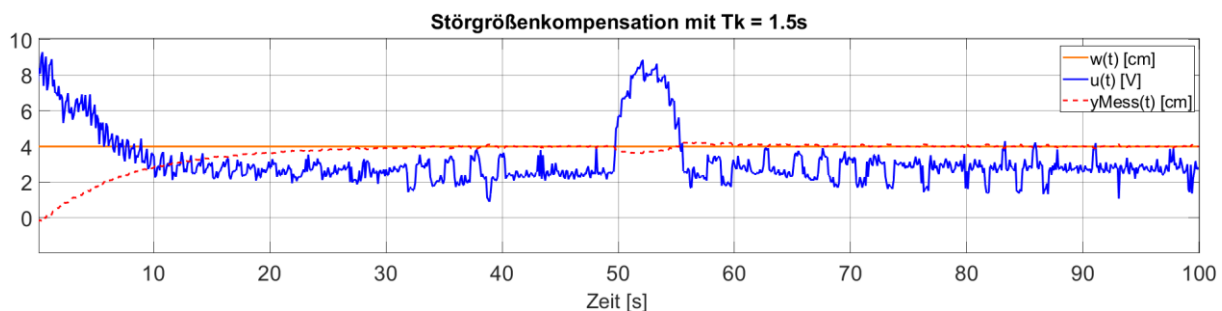


Abbildung 50: Störgrößenkompensation mit  $T_k = 1.5s$



Wird nun der Wert  $k = 0$  gesetzt, so wird die Störung nicht kompensiert. Folgender Verlauf ergibt sich:

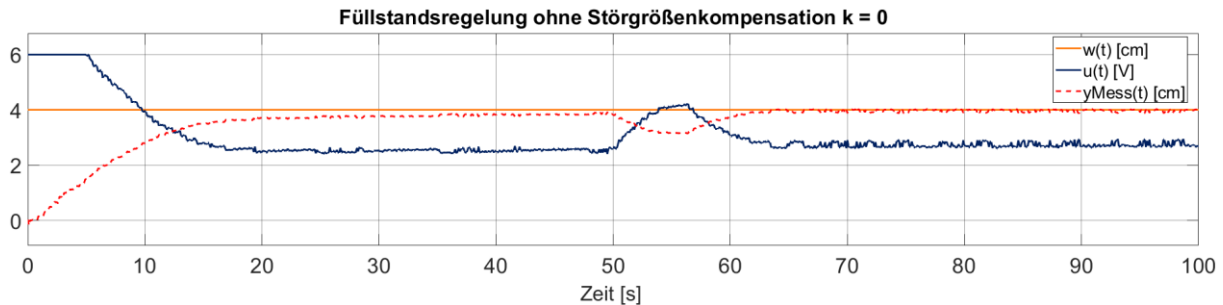


Abbildung 51: Füllstandsregelung ohne Störgrößenkompensation

Nun ist es bedeutend, Abbildung 50 und Abbildung 51 miteinander zu vergleichen. Es fällt sofort auf, dass die Störung sich mit Kompensation sehr viel geringer auswirkt. Sie wird wortwörtlich kompensiert. Somit funktioniert die Störgrößenkompensation für die mobile Füllstandsregelung einwandfrei, was ein Ziel dieser Arbeit war.

## 6.5 3D-Animation mit Simulink

Als gelungener Abschluss wird eine 3D-Animation mit Simulink für die mobile Füllstandsregelung erstellt. Sie soll zusätzlich neben dem Versuchsaufbau als Visualisierung am PC dienen.

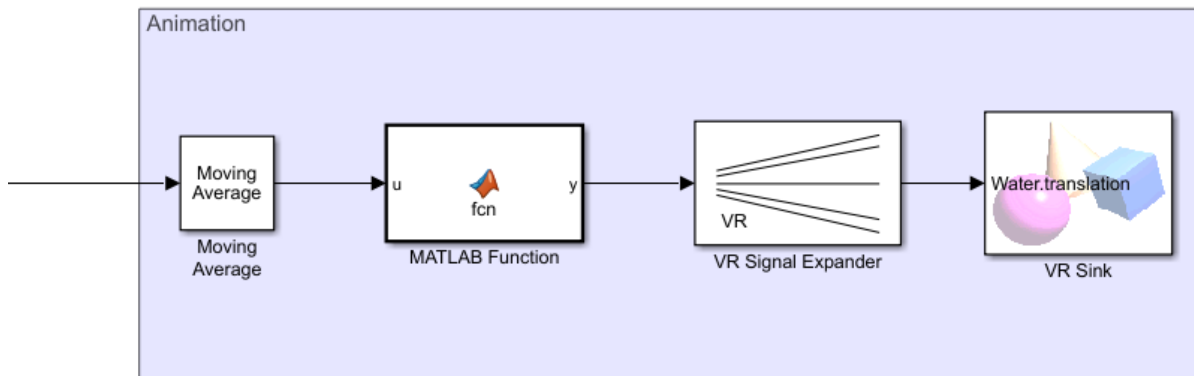


Abbildung 52: Blockschaltbild für die 3D-Animation

In den nächsten Abschnitten werden die Blöcke, die in Abbildung 52 vorkommen, kurz erklärt.

### 6.5.1 Moving Average

Dieser Block sorgt dafür, dass das Wasser in der Animation nicht zu sehr ruckelt und dadurch flüssiger verläuft. Folgende Einstellung ist dabei wichtig:

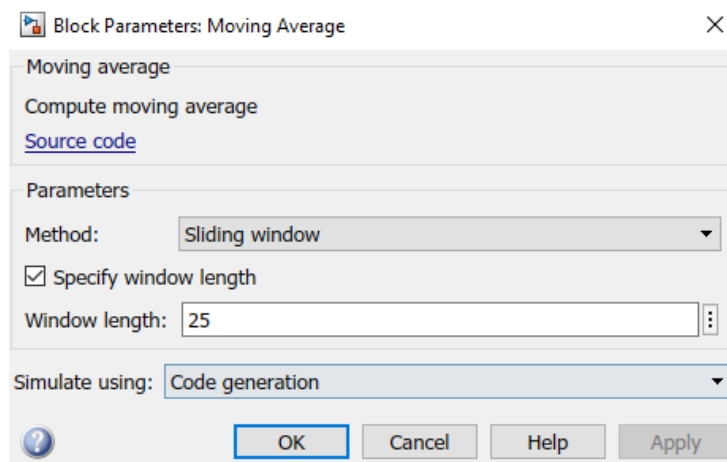


Abbildung 53: Einstellungen für Moving Average Block

### 6.5.2 MATLAB Function

In diesem Block wird eine MATLAB-Funktion erstellt, die dafür sorgt, dass die Füllhöhe an die translatorische Höhe des Wassermaximums im 3D-World-Editor angepasst wird. Dabei entsprechen 0 cm Füllhöhe  $\rightarrow$  -1.9 bei der translatorischen Position. Die Füllhöhe 12 cm entspricht 0. Die Größe  $u$  entspricht dem Eingang des Blocks, die Füllhöhe od. der Istwert.

```
function y = fcn(u)
    m = 1.9/12;
    y = (m*u) - 1.9;
```

Abbildung 54: Matlab-Funktion zur Umrechnung

### 6.5.3 VR Signal Expander & VR Sink

Diese Blocks sind in der 3D Animation Simulink Toolbox zu finden. Im VR Sink lässt sich die Geometrie erstellen und mit VR Signal Expander lässt sich das reale System mit der 3D-Geometrie verbinden und kann somit interagieren.

## 6.5.4 Fertiges 3D-Modell für die Animation

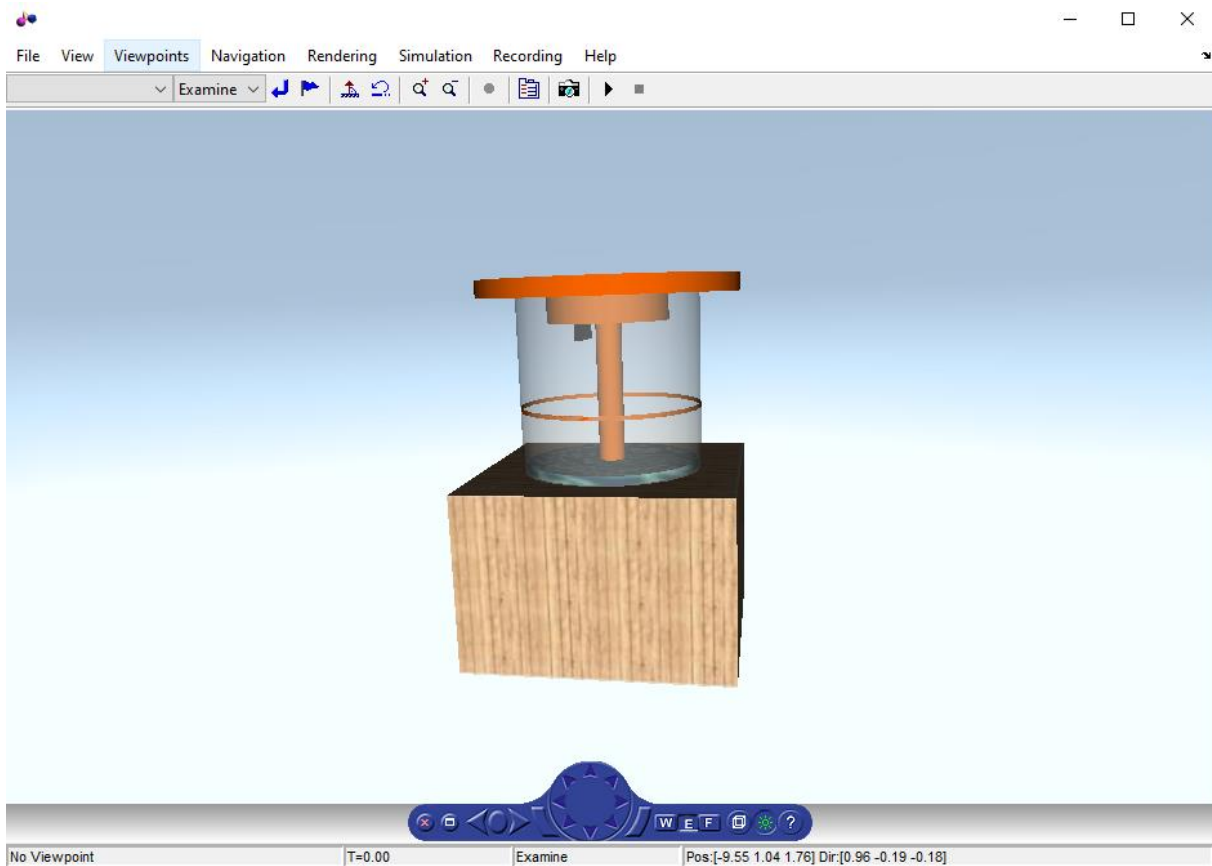


Abbildung 55: Fertiges 3D-Modell für die Animation

Nun kann die 3D-Animation für die Anwendung der weiterführenden Regelungsverfahren hinzugeschaltet werden. So lässt sich die mobile Füllstandsregelung auch am PC wunderbar als zusätzliches Tool visualisieren

## 7 Zusammenfassung

Zielsetzung der mobilen Füllstandsregelung Teil II war zum einen die konstruktive Weiterentwicklung der Hardware und zum anderen die Anwendung weiterführender Regelungsverfahren, darunter die Störgrößenkompensation. Während der Bearbeitung der Projektarbeit II sind einige komplexe Probleme aufgetreten. Allerdings konnte durch die Anwendung weiterführender Regelungsverfahren ein Großteil dieser Störeinflüsse behoben bzw. eliminiert werden. Dabei war es signifikant, Lösungsstrategien allein, sowie zusammen mit den Betreuern, zu entwickeln und umzusetzen. Zu Beginn der Arbeit war die Zielsetzung ganz auf die konstruktive Weiterentwicklung gerichtet. Dabei wurden schwere und größere Komponenten durch leichtere und mobilere ersetzt, wie z. B. der Tausch des robusten Labor-Netzteil gegen ein leichtes und mobiles 12-V-Steckernetzteil. Des Weiteren ist der Entfernungsmesssensor – ein Infrarotsensor von SHARP – getestet und mit den Eigenschaften des alten Ultraschallsensors aus Teil I der mobilen Füllstandsregelung verglichen worden. Dabei stellte sich heraus, dass der IR-Sensor ein besseres Reflexionsverhalten als der Ultraschallsensor aufweist. Zudem brillierte der Infrarotsensor durch seine hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit. In Bezug auf den Deckel, wurde eine Neuentwicklung durchgeführt. Dabei entstand ein Deckelsystem, welches aus Einzelbauteilen zusammengefügt und passend auf den Füllstandsbehälter gesetzt wird. Zusätzlich galt die Neuentwicklung des Deckels dem Sensor, der nun fest im System integriert ist. Als Unterlage für den Füllstandsbehälter ist ein Holzklötz mit einer zylindrischen Einfräsung gefertigt worden. Eine große Wasserspritze mit einem Fassungsvermögen von 250 ml fungierte als Störung des Systems durch Wasserentnahme bzw. -zugabe. Das zweite Hauptziel war nun die Anwendung weiterführender Regelungsverfahren. Zu Beginn wurde eine experimentelle Modellbildung der Strecke mit der Software pzMove durchgeführt. Nach der Streckenidentifizierung bestand die Aufgabe darin, die Steuerung zu implementieren. Da Störungen durch eine Steuerung nicht ausgeglichen werden, war es unbedingt notwendig eine Regelung für das System zu entwerfen. Dabei kamen der P- und PI-Regler zum Einsatz. Wie sich rausstellte, konnten die Störungen durch die Regelung nahezu vollkommen ausgeglichen werden. Ein weiteres Ziel war die Störgrößenunterdrückung durch eine entsprechende Störgrößenkompensation, bei der die Störung geschätzt wurde. Eine Gegenüberstellung der Regelung mit und ohne Störgrößenkompensation zeigte, dass sich die Störung mit Kompensation sehr viel geringer auswirkt als ohne. Abschließend bestand die Aufgabe darin, eine 3D-Animation mit Simulink zu entwerfen. Dieses Tool zeichnet sich durch eine zusätzliche und schöne Visualisierung der Füllstandsregelung am PC aus. Schlussendlich entstand ein interessanter und einfacher Versuchsaufbau, der für Studenten konzipiert worden ist. Der Versuch ist zudem leicht nachzubauen. Der Erfahrungswert lag bei dieser Projektarbeit sehr hoch, da einige komplexe Probleme auftraten, die es zu lösen galt. Für die Zukunft lässt sich sagen, dass ein zukünftiges Aufgabengebiet dieser Arbeit die physikalische bzw. mathematische Modellbildung sein kann. Des Weiteren kann sich eine zusätzliche Rückführung/Störung des Wassers, vom Füllstands- in den Vorratsbehälter, positiv auf das Systemverhalten auswirken.

## Anhang A: Stückliste

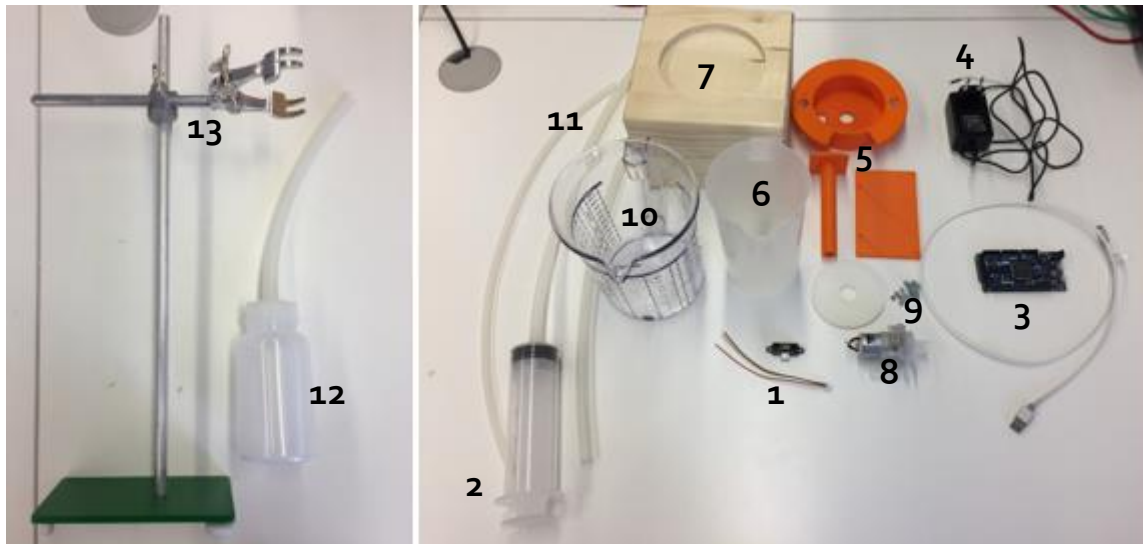


Abbildung 56: Einzelbauteile

Nummer	Bezeichnung	Anzahl	Preis
1	Infrarotsensor GP2YoA41SKoF SHARP	1	9.34 €
2	Wasserspritze 250 ml	1	nicht bekannt**
3	Arduino Due	1	35 €
4	Steckernetzteil Voltcraft		15 – 25 €
5	Deckel mit allen Einzelkomponenten	1	nicht bekannt*
6	Vorratsbehälter aus Kunststoff	1	nicht bekannt*
7	Holzklotz	1	nicht bekannt*
8	12V-Kreiselpumpe	1	3.95 €
9	M3-Sechskantschrauben mit Mutter	4	nicht bekannt*
10	Füllstandsbehälter (Messkanne)	1	9.92 €
11	Silikonschläuche in versch. Größen	-	30 €
12	Behälter für antike Lösung	1	nicht bekannt*
13	Laborstativ	1	nicht bekannt*

\*vorrätig in der Hochschule / Hochschule intern gefertigt

\*\*von Labormitarbeiter/in bestellt / keine Rechnung abrufbar

Tabelle 10: Stückliste

Dies sind die Einzelbauteile, die für den Zusammenbau der mobilen Füllstandsregelung notwendig sind.

## Anhang B: Zusammenbau

Schritt	Anweisung
1	alle Einzelteile des Deckels vorbereiten
2	Deckel + Zentrierungsrohr + Sensor mit M3-Schrauben zusammenfügen
3	Platte + Deckel + M3-Schrauben zusammenfügen
4	Zusammenbau Deckel abgeschlossen
5	Loch in Vorratsbehälter bohren + Schlauch einführen + mit Silikon verdichten
6	Diesen Schlauch mit der Pumpe verbinden (großer Durchmesser)
7	kleiner Schlauch mit Pumpe verbinden
8	Füllstandsbehälter auf Holzklötz setzen
9	Schlauch mit Spritze verbinden + andere Ende Schlauch durch Öffnung Deckel
10	zweite Öffnung Deckel + zusätzlicher Schlauch einführen zur Fixierung Deckel
11	Schlauch von Pumpe (kleiner Durchmesser) durch Öffnung Zentrierrohr
12	Schlauch zum Boden des Füllstandsbehälter führen
13	fertiger Versuchsaufbau

Tabelle 11: schrittweiser Zusammenbau

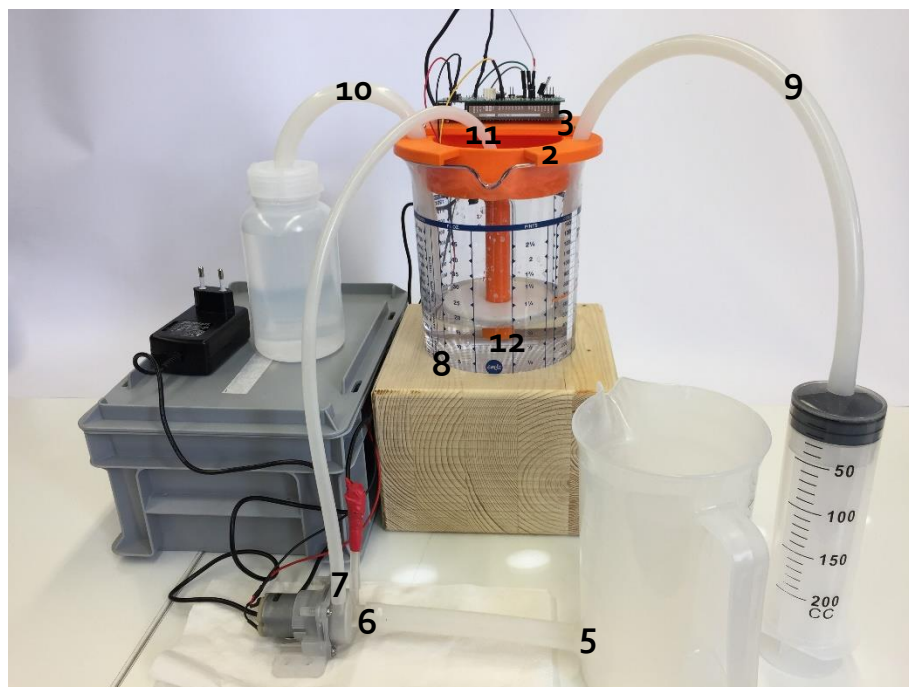


Abbildung 57: fertiger Versuchsaufbau

## Anhang C: Vorgehensweise & Erklärung von pzMove

In diesem Anhang werden die wichtigsten Schritte zur Vorgehensweise mit der Software pzMove zur Streckenidentifikation stichpunktartig erklärt.

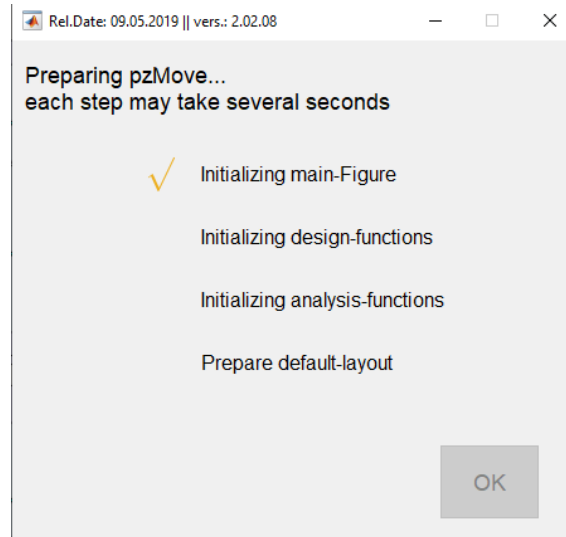


Abbildung 58: Programmvorbereitung pzMove

- Vorbereitung pzMove beim Starten des Programms
- Nun öffnet sich das Hauptfenster von pzMove

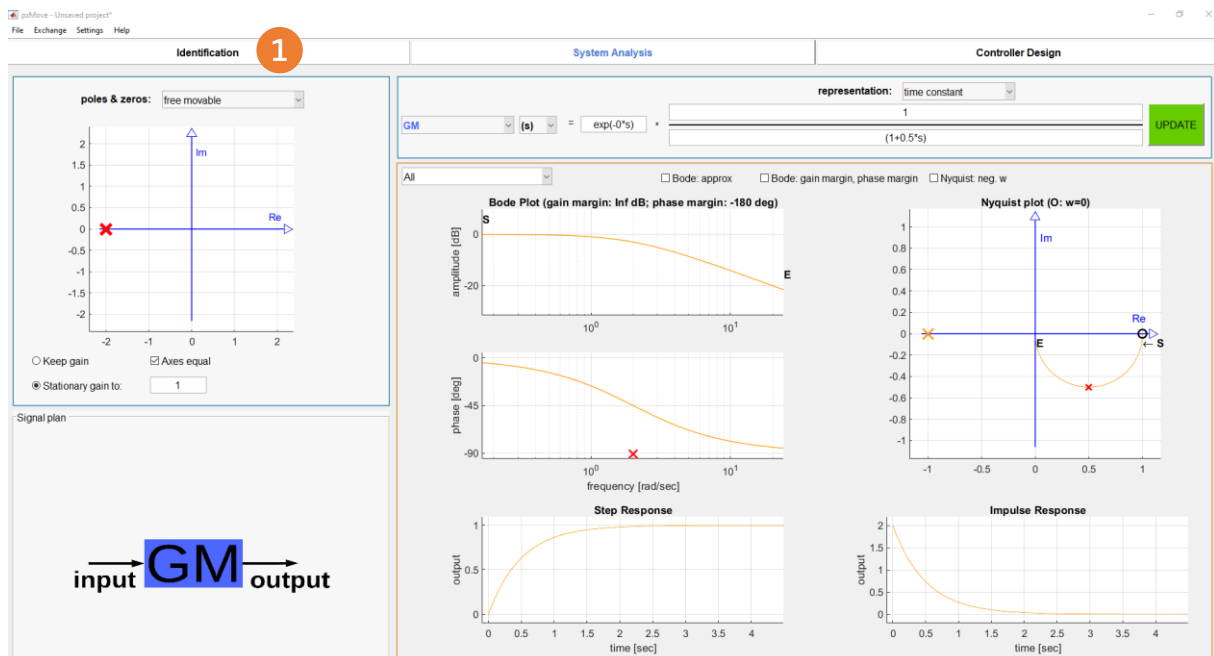


Abbildung 59: Startfenster pzMove

- Anschließend auf *Identifikation* klicken (1)
- Dort wird die Strecke identifiziert

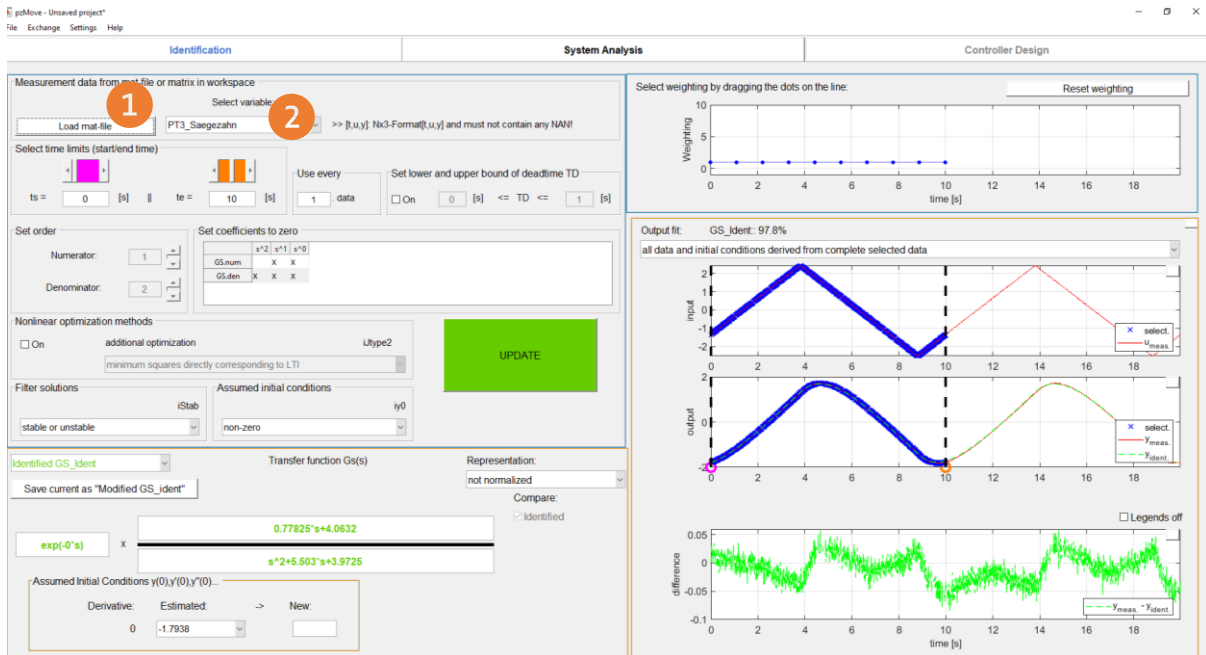


Abbildung 60: Identifikationseinstellung 1

- Im nächsten Schritt wird durch Klicken auf *Load mat-file* die aufgenommenen Daten aus MATLAB importiert (1)
- Nun findet eine Übernahme der Messdaten statt und sie sind abrufbar (2)

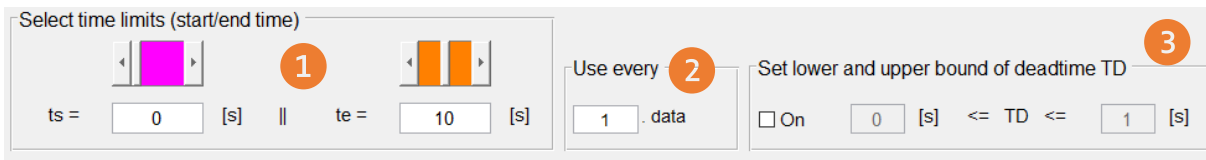


Abbildung 61: Identifikationseinstellung 2

- Zum einen kann der Messverlauf durch Zeitlimits eingeschränkt und betrachtet werden (1)
- Zudem lässt sich die Datenmenge verringern (2)
- Soll eine Totzeit bei der Identifikation berücksichtigt werden -> aktivieren *On* (3)

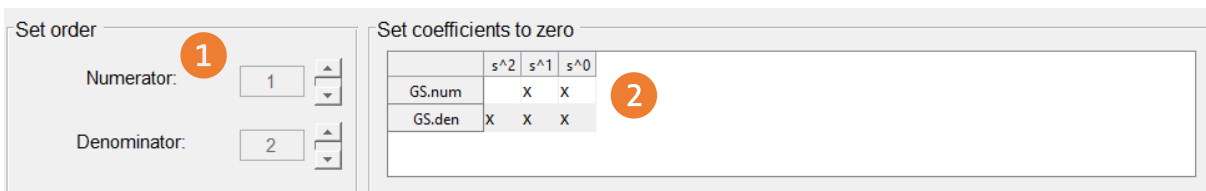


Abbildung 62: Identifikationseinstellung 3

- Einstellungsmöglichkeit für die Ordnung des Systems (PT<sub>1</sub>, PT<sub>2</sub>, IT<sub>1</sub>, DT<sub>1</sub>, usw.)
- Numerator = Zähler & Denominator = Nenner (1)
- Für die Projektarbeit II ist ein PT<sub>1</sub> -> Numerator = 0 und Denominator = 1 identifiziert worden



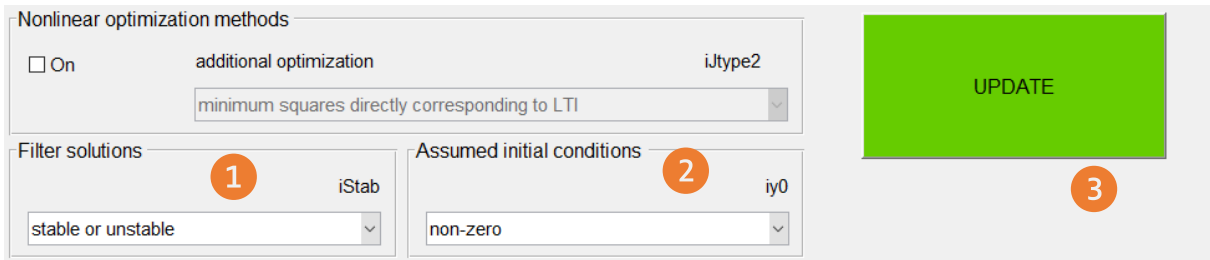


Abbildung 63: Identifikationseinstellung 4

- *Nonlinear optimization methods* bleiben unverändert
- Einstellungsmöglichkeit der Streckenidentifikation (stable, unstable % stable or unstable) (1)
- Hier lässt sich einstellen, ob die Messung bei Null oder einem Offset gegen Null starten soll (2)
- Sind alle Einstellungen getroffen, so kann die Identifikation der Strecke berechnet werden -> Klicken auf **UPDATE** (3)
- Zusätzlich lässt sich die Strecke aktualisieren, sobald eine Änderung an den Einstellungen vorgenommen wurde -> dazu nochmal auf **UPDATE** klicken

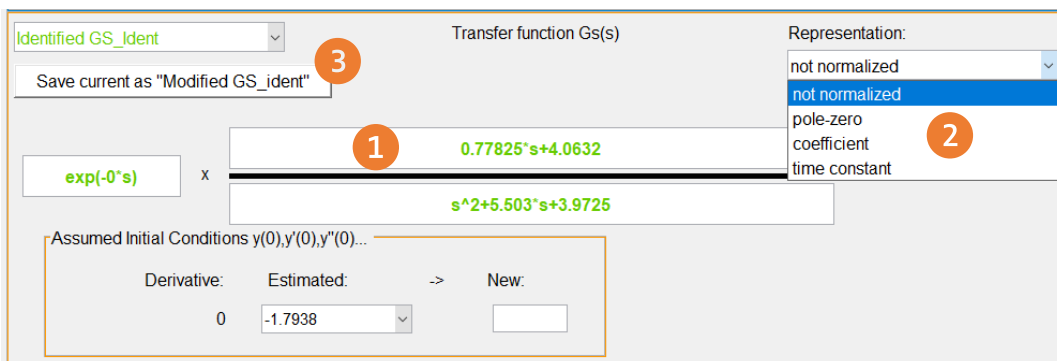


Abbildung 64: Identifikationseinstellung 5.1

- Nach *Update* wird die identifizierte Strecke dem Anwender angezeigt (1)
- unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten der Strecke (2)
- Zusätzlich ist es möglich, die Strecke zu modifizieren (3)
- Dabei wird die aktuelle Streckenfunktion gespeichert (3)

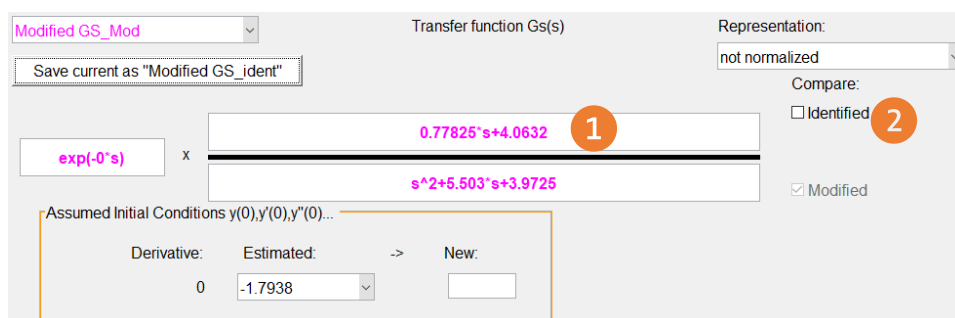


Abbildung 65: Identifikationseinstellung 5.2

- Nun erscheint die modifizierte Strecke in magenta (1)
- Um die identifizierte (grün) gemeinsam mit der modifizierten Strecke (magenta) zu betrachten, kann *Identified* aktiviert werden (2)

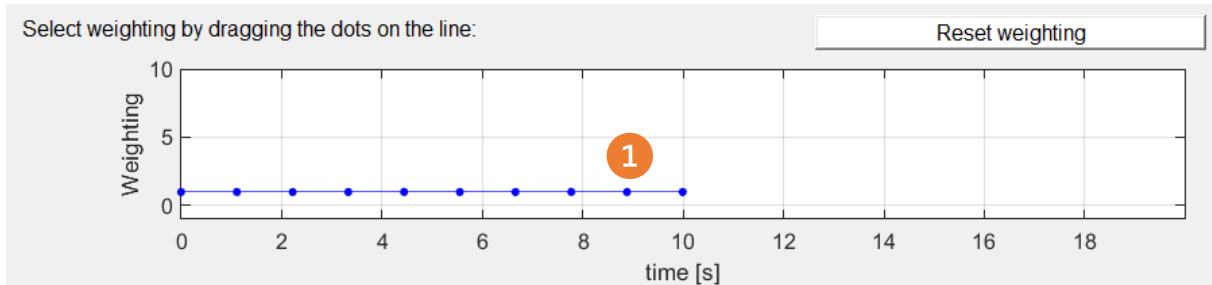


Abbildung 66: Identifikationseinstellung 6

- In diesem Fenster lassen sich Einstellungen zur Gewichtung vornehmen
- Dabei wird mit der Maus an den blauen Punkten die Einstellung geändert (1) -> linke Maustaste gedrückt halten

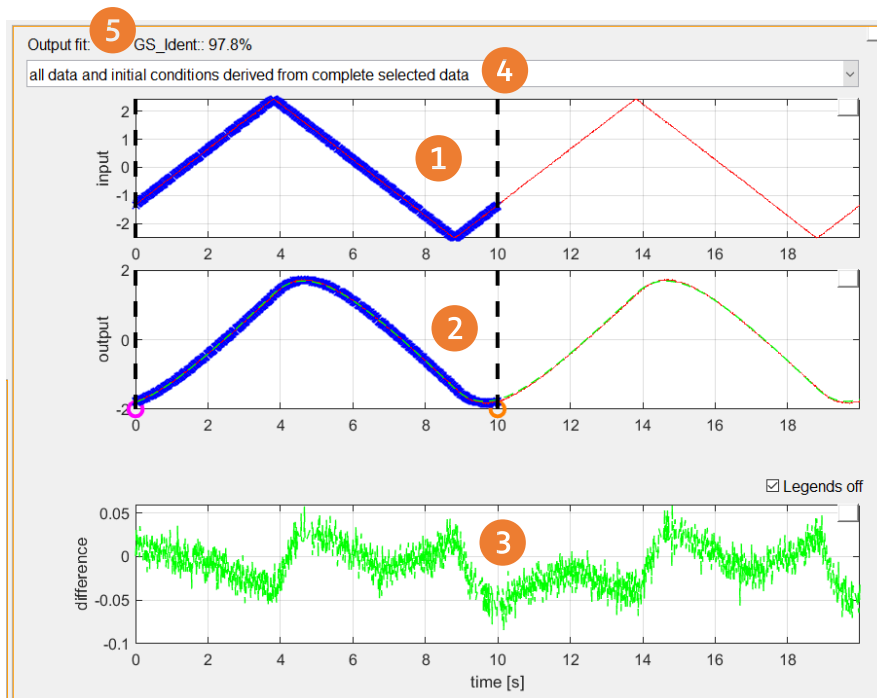


Abbildung 67: Identifikationseinstellung 7

- Anzeige der gemessenen Stellgröße (1)
- Anzeige der gemessenen Ausgangsgröße (rot) mit der identifizierten Strecke (grün) (2)
- Anzeige der Abweichung zwischen der realen und identifizierten Strecke (3)
- Einstellungsmöglichkeit zum Betrachten des gesamten oder eines Bruchteils des Verlaufs (4)
- prozentuale Übereinstimmung von identifizierter und realer Strecke

## Literaturverzeichnis

- [1] KT-Elektronic, 2012. *Microcontroller.* [Online]  
Available at: [https://www.mikrocontroller.net/attachment/218122/HC-SR04\\_ultraschallmodul\\_beschreibung\\_3.pdf](https://www.mikrocontroller.net/attachment/218122/HC-SR04_ultraschallmodul_beschreibung_3.pdf)
- [2] Anon., kein Datum *Farnell.* [Online]  
Available at: <https://de.farnell.com/sharp/gp2y0a41skof/distanzmesssensor/dp/1618431>
- [3] Anon., 2018. *Roboticlub.* [Online]  
Available at: [http://home.roboticlub.eu/de/examples/sensor/ir\\_distance](http://home.roboticlub.eu/de/examples/sensor/ir_distance)
- [4] Anon., kein Datum *sofatutor.* [Online]  
Available at: [https://www.sofatutor.com/mathematik/wahrscheinlichkeitsrechnung-und-stochastik/zufallsvariable-und-wahrscheinlichkeitsverteilung/normalverteilung?sofa\\_cn=\[T\]\\_Dynamic\\_topic\\_\(SP\)&gclid=EAlalQobChMIIsqeRgser6AIVEcDeCh2xVQknEAAAYASAAEgKMzFD\\_BwE](https://www.sofatutor.com/mathematik/wahrscheinlichkeitsrechnung-und-stochastik/zufallsvariable-und-wahrscheinlichkeitsverteilung/normalverteilung?sofa_cn=[T]_Dynamic_topic_(SP)&gclid=EAlalQobChMIIsqeRgser6AIVEcDeCh2xVQknEAAAYASAAEgKMzFD_BwE)
- [5] Fischer, S., 2019. *Mobile Temperaturreglung Teil 2.* Rosenheim: s.n.
- [6] Zentgraf, P. D.-I. P., kein Datum *Regelungstechnik I.* s.l.:s.n.