



**Modellierung, Simulation und Echtzeit-
Implementierung eines geregelten
Wasserstandssystems mit MATLAB/Simulink und
Mikrocontrollertechnik für praxisorientierte
Hochschuldemonstrationen im Rahmen der
regelungstechnischen Lehre**

Masterarbeit

im Studiengang Business and Systems Engineering

vorgelegt von

Denim Mike Hilz

Matrikelnummer: 2180518

E-Mail: denim-mike.hilz@stud.hshl.de

am 26.05.2025

an der Hochschule Hamm-Lippstadt

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Mirek Göbel

Zweitprüfer/in: Prof. Dr. Dmitrij Tikhomirov

Gender-Hinweis

Zur besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich, sowie divers verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Struktur der Arbeit	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Beispiele bestehender Wasserstandssysteme für Lehrzwecke.....	3
2.1.1	PID-basierte Wasserstandsregelung.....	3
2.1.2	Projekt 24: Wasserstandsregelung	4
2.1.3	Festo EduKit PA	5
2.2	Grundlagen der Wasserstandsregelung.....	6
2.2.1	Übertragungsfunktion des Wassertanks	6
2.2.2	Systemuntersuchung	7
2.2.3	Regler-Auswahl	8
2.3	Differenzdrucksensor MPX5010DP	10
3	Systementwurf und Umsetzung	12
3.1	Systementwurf.....	12
3.1.1	Regelkreis	12
3.1.2	Morphologischer Kasten und Konzeptskizze	13
3.2	Hardware- und Software-Spezifikation	15
3.2.1	Hardwarespezifikation.....	15
3.2.2	Softwarespezifikation.....	17
3.3	System Simulation	18
3.3.1	Bestimmung der Systemzeit.....	19
3.3.2	Wahl der Schrittweite in der Simulation.....	20
3.3.3	Regler-Auslegung.....	20
3.3.3.1	Anti-Windup-Maßnahmen.....	22
3.3.3.2	Auswahl der Regleranteile.....	23
3.4	Systemumsetzung.....	26
3.4.1	Rahmenkonstruktion.....	26
3.4.2	Komponenten	27
3.4.2.1	Wassertanksystem	27

3.4.2.2	Benutzereingabe_Hoehe	28
3.4.2.3	Benutzereingabe_Stoerung	30
3.4.2.4	Pumpe_Regelung	31
3.4.2.5	Pumpe_Stoerung	33
3.4.2.6	Regelung	34
3.4.2.7	Sensor	35
3.4.2.8	I2C_LCD_20x4	38
3.4.3	Systemintegration	39
3.4.4	Transport- / Präsentationswagen	39
4	Systemtest und Ergebnisse	41
4.1	Systemtest	41
4.2	Vergleich von Simulation und realer Hardware	44
4.3	Experimente	46
4.3.1	Filterung	46
4.3.2	Regelung	48
4.3.3	Störung	49
4.3.4	Langzeittest	50
4.4	Systemergebnisse	51
5	Fazit und Ausblick	53
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	53
5.2	Praktische Relevanz und Anwendung	53
5.3	Verbesserungspotential und Ausblick	54
Quellenverzeichnis		I
Anhang		III
A1	Simulation der Übertragungsfunktion	III
A2	Herleitung der Führungs- und Störübertragungsfunktion	III
A3	SVN-Link	IV
A4	Morphologischer Kasten und weitere Entwürfe	V
A5	Hardwarespezifikation	VII
A6	Simulation Parameterdatei	IX
A7	Simulation - KP1000 und KI1000 und Anti-Windup	IX

A8	System Parameterdatei.....	X
A9	Sensorkalibrierung und Curve-Fitter-Diagramm.....	XII
A10	I2C_LCD_20x4 MATLAB Code.....	XIII
A11	Anschlussplan des fertigen Systems	XIV
A12	Auflistung aller verwendeten Bauteile	XIV
A13	Präsentations- / Transportwagen	XVII
A14	System- und Abnahmetest	XVIII
A15	Systemergebnis Störung	XX
A16	Systemergebnisse verschiedener Reglerparameter.....	XX
A17	Systemergebnisse der Experimente	XXIII
A18	Softwareumsetzung des fertigen Systems.....	XXVI
A19	Abschließender Systemtest.....	XXXIV

Abkürzungsverzeichnis

DGL	Differentialgleichung
FDM	Fused Deposition Modeling
GI	Gleichung
HSHL	Hochschule Hamm-Lippstadt
PSM	Power Supply Module
PWM	Pulsweitenmodulation

1 Einleitung

Das folgende Kapitel legt die Grundlage für die Masterthesis, indem es die Motivation und Zielsetzung des Projektes beschreibt und die Struktur der Arbeit erläutert.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Regelungstechnik ist eine wichtige Kernkompetenz für angehende Ingenieure, da sie Grundlagen der Steuerung und Regelung technischer Prozesse beinhaltet. Die gelehrte Theorie lässt sich dabei gut durch praxisnahe Anwendungen wie MATLAB/Simulink und Mikrocontrollertechnik ergänzen.

Ein Wasserstandssystem bietet eine ideale Plattform, um die Theorie mit der Praxis zu verknüpfen. Studierende können zum einen die Modellierung und Simulation eines dynamischen Systems erlernen und zum anderen den Übergang von theoretischen Ergebnissen auf eine reale Hardwareumgebung nachvollziehen.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, ein geregeltes Wasserstandssystem für demonstrative Zwecke im Rahmen der regelungstechnischen Lehre zu entwickeln, welches die Modellierung, Simulation und Echtzeit-Implementierung umfasst. Dieses System soll es ermöglichen, die theoretischen Regelungsinhalte an der Hochschule Hamm-Lippstadt (HSHL) praxisnah zu veranschaulichen. Durch den Einsatz von MATLAB/Simulink und Mikrocontrollertechnik wird eine weitere Brücke zu den vermittelten Lehrinhalten geschlagen, da beide Technologien an der HSHL in den Vorlesungen zum Einsatz kommen.

1.2 Struktur der Arbeit

Die Masterarbeit ist in fünf Hauptkapitel gegliedert:

Kapitel 2 – Theoretische Grundlagen: Dieses Kapitel vermittelt zunächst einen Überblick über bestehende Systeme der Wasserstandsregelung und behandelt im Anschluss die relevanten theoretischen Grundlagen. Dazu zählen unter anderem die Herleitung der Übertragungsfunktion sowie die Auswahl des Reglers.

Kapitel 3 – Systementwurf und Umsetzung: Kapitel 3 beschreibt die Modellierung, Simulierung und Implementierung des Wasserstandssystems. Es werden die Simulation des Systems, die Auswahl und Entwicklung der Hardware- und Softwarekomponenten sowie die Integration zum Gesamtsystem vorgestellt.

Kapitel 4 – Systemtest und Ergebnisse: Dieses Kapitel dokumentiert den Test des realen Systems, sowie Experimente verschiedener Einstellungen. Es erfolgt zudem ein Vergleich zwischen simuliertem und realem Regelverhalten, wobei insbesondere das Verhalten des gewählten Reglers untersucht wird.

Kapitel 5 – Fazit und Ausblick: Abschließend werden die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und hinsichtlich ihres Nutzens für die praxisorientierte Hochschuldemonstration reflektiert. Potenzielle Erweiterungen und Optimierungen für den künftigen Einsatz im Hochschulkontext werden aufgezeigt.

2 Theoretische Grundlagen

Für die erfolgreiche Modellierung, Simulation und Implementierung ist ein fundiertes Verständnis der theoretischen Grundlagen unerlässlich. Dieses Kapitel gibt zunächst einen Überblick zu bereits bestehenden Systemen und deren Umsetzung. Darauf aufbauend werden die regelungstechnischen Prinzipien eines Wasserstandssystems aufgezeigt sowie die Systemuntersuchung und die Regler-Auswahl offengelegt.

2.1 Beispiele bestehender Wasserstandssysteme für Lehrzwecke

Im Folgenden werden drei bestehende Systeme vorgestellt, welche bei der regelungstechnischen Lehre Anwendung finden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich Komplexität, eingesetzter Komponenten, Benutzerinteraktion und Preis.

2.1.1 PID-basierte Wasserstandsregelung

Das in Abbildung 1 gezeigte Modell wird in einem Lehrbuch für Regelungstechnik erläutert und soll zum Nachbauen anregen. Eine 12 V Tauchpumpe (roter Pfeil) wird im Speichertank (rote Umrandung) zur Wasserförderung zwischen zwei Kunststoffbehältern verwendet. Die Messung erfolgt im Wassertank (blaue Umrandung) mit einem Ultraschallsensor (blauer Pfeil). Ein Raspberry Pi (grüner Pfeil) übernimmt die Steuerung [13, S. 214]. Die Ansteuerung der Pumpe erfolgt mittels MOSFET (oranger Pfeil) und Pulsweitenmodulation (PWM) [13, S. 128].

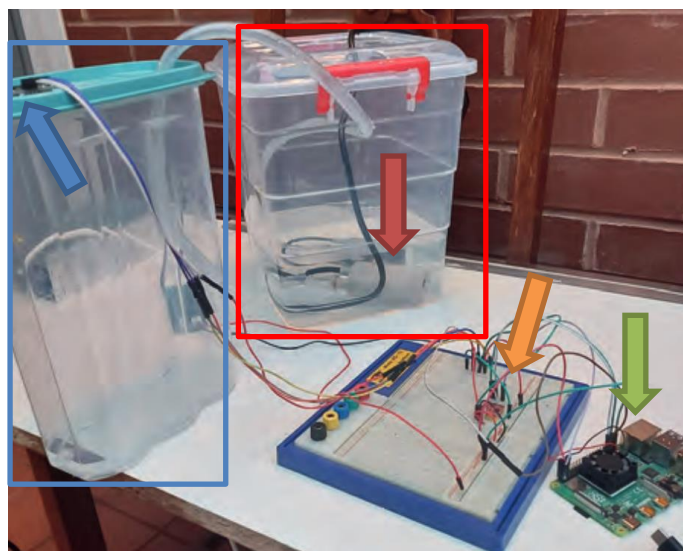


Abbildung 1: PID-basierte Wasserstandsregelung. Quelle: [13, S. 219]

Der Aufbau ist einfach gehalten und soll einen schnellen und kostengünstigen Nachbau ermöglichen. Benutzereingaben am Aufbau, etwa zur Einstellung von Sollhöhe oder Störung, sind nicht vorhanden und erfolgen rein softwareseitig.

2.1.2 Projekt 24: Wasserstandsregelung

Das Projekt 24 (Abbildung 2) wurde im Rahmen des Fachpraktikums Elektrotechnik an der HSHL im Wintersemester 2017/18 von Studierenden des Studiengangs Mechatronik durchgeführt.

Die Regelung des Wassertanks (oranger Pfeil) übernimmt ein Arduino Uno, welcher über einen Motortreiber eine Tauchpumpe (roter Pfeil) ansteuert. Die Sollhöhe des Wasserstands kann, anders als beim vorherigen System, durch ein Potentiometer (lila Pfeil) eingestellt werden. Die Erfassung der Ist-Höhe erfolgt über einen Differenzdrucksensor (blauer Pfeil) mittels einer Schlauchleitung in den Tank. Eine Störeinbringung ist über einen manuell verstellbaren Kugelhahn (gelber Pfeil) möglich.

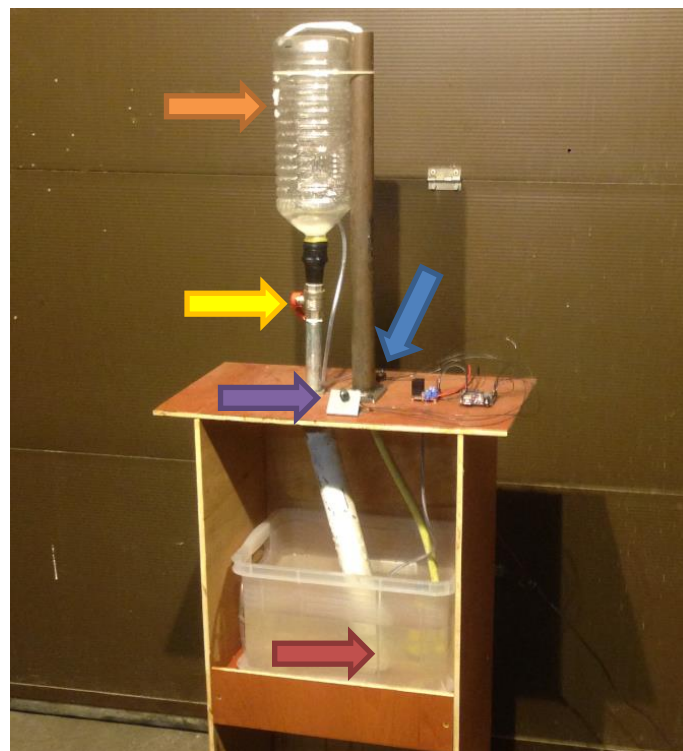


Abbildung 2: Projekt 24. Quelle: [3]

Durch die Möglichkeit, eine Störung in das System einzubringen, eignet es sich gut zur Veranschaulichung der Auswirkungen externer Einflüsse auf den Regelkreis. Die Umsetzung ist zum vorherigen Projekt deutlich zeitaufwendiger und kostenintensiver [3].

2.1.3 Festo EduKit PA

Das Festo EduKit PA (Abbildung 3) wurde speziell für Lehrzwecke entwickelt und ermöglicht eine praxisnahe Vermittlung von Regelungstechnik-Konzepten. Das System bietet zudem modulare Erweiterungsmöglichkeiten, siehe [9].

Das Kit verfügt über einen Ultraschallsensor (blauer Pfeil), zwei kapazitive Sensoren, einen Durchflusssensor sowie einen Drucksensor, welche bei Bedarf an- oder abgebaut werden können. Die Ansteuerung erfolgt über ein integriertes I/O-Board (grüner Pfeil) und erlaubt softwareseitig umfangreiche Visualisierungsmöglichkeiten sowie die Umsetzung und den Vergleich verschiedener Regelstrategien. Reglerparameter können über die Softwareoberfläche angepasst werden, zudem ist eine externe Störungssimulation möglich. Die Montage der einzelnen Komponenten auf einer Aluminium Profil Platte und an Aluminium Profil Stangen, ermöglicht eine Modularität bei gleichzeitig hoher Stabilität [10].

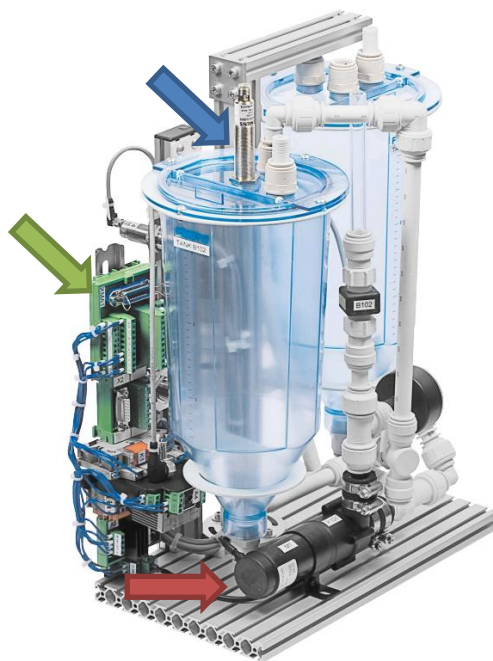


Abbildung 3: Festo EduKit PA. Quelle: [10].

Das EduKit PA bietet damit eine professionelle und flexible Lösung, ist jedoch mit einem auf Nachfrage genannten Preis im vierstelligen Bereich deutlich kostenintensiver.

Die Systeme geben einen ersten Überblick zu bereits umgesetzten Aufbauten und dienen als Orientierung für die Konzeptskizze in Kapitel 3.1.2.

2.2 Grundlagen der Wasserstandsregelung

Die vorgestellten Wasserstandsregelungssysteme arbeiten nach dem in Abbildung 4 gezeigten grundlegenden Aufbau. Die Regelung hat dabei das Ziel, den Füllstand eines Behälters oder Systems auf den vorgegebenen Sollwert zu bringen und halten zu können. Dies ist beispielsweise in der Industrie von zentraler Bedeutung, um Überläufe, Trockenläufe oder unzulässige Schwankungen in Behältern zu verhindern, die z. B. durch Störungen auftreten.

Die zentrale Komponente ist die Füllstandsregelung (LC, Level Control). Die Regelung beeinflusst über die Stellgröße u den Volumenstrom in den Behälter, um den Wasserstand auf die vorgegebene Sollhöhe w (z. B. $w = 1\text{ m}$) zu bringen und dort zu halten. Die aktuelle Ist-Höhe des Wasserstands wird als Regelgröße y erfasst, z. B. über einen Sensor. Gleichzeitig führt die Störung d , z. B. die Entnahme von Wasser, zu Abweichungen, die das Regelsystem ausgleichen muss, siehe [16, S. 12 f.].

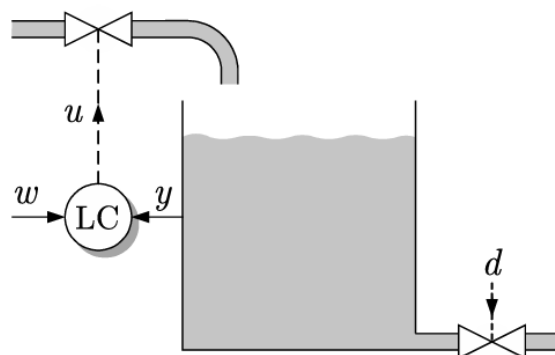


Abbildung 4: Beispielhafter Aufbau eines Wasserstandssystems. Quelle: [16, S. 12].

Die Entwicklung des Regelkreises in Kapitel 3.1.1, orientiert sich an dem beschriebenen Schema.

2.2.1 Übertragungsfunktion des Wassertanks

Für die Regler-Auswahl und die Simulation ist es wichtig, das Verhältnis vom Ausgangssignal zum Eingangssignal des Systems, also die Übertragungsfunktion, zu kennen [16, S. 266]. Der für die Umsetzung gewählte Wassertank besitzt eine zylindrische Form. Der Wasserstand im Tank wird direkt vom Volumenstrom der Pumpe beeinflusst. Die Übertragungsfunktion lässt sich somit aus der geometrischen Berechnung des Volumens des Wassertanks herleiten.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Übertragungsfunktion orientiert sich an der Vorlesung *Systemtheorie*, siehe [12, ID 102].

Die Volumenberechnung erfolgt gemäß [15, S. 225], nach folgender Formel:

$$V = A \cdot h. \quad (2.1)$$

Mit:

- V = Volumen des Wassers im Tank in m^3
- A = Querschnittsfläche des Tanks in m^2
- $h(t)$ = Wasserstand im Tank in m

Da sich der Wasserstand durch den Zu- bzw. Abfluss verändert, ergibt sich durch Ableitung der Formel 2.1 nach der Zeit die folgende Differentialgleichung (DGL):

$$\dot{V} = A \cdot \dot{h}. \quad (2.2)$$

Mit:

- \dot{V} = zeitliche Änderung des Volumens in $\frac{m^3}{s}$
- \dot{h} = zeitliche Änderung des Wasserstands in $\frac{m}{s}$

Mittels **Laplace-Transformation** ergibt sich die Gleichung (Gl):

$$\dot{V}(s) = A \cdot s \cdot h(s). \quad (2.3)$$

Da \dot{V} (andere Bezeichnung für den Volumenstrom Q) bereits eine Flussgröße ist, bleibt \dot{V} im Laplace Bereich stehen und wird nicht mit s multipliziert.

Die **Übertragungsfunktion** kann aus Gl 2.3 hergeleitet werden und ergibt sich aus dem Verhältnis von Ausgang zu Eingang:

$$G(s) = \frac{h(s)}{\dot{V}(s)} = \frac{1}{A \cdot s}. \quad (2.4)$$

2.2.2 Systemuntersuchung

Zur Untersuchung des Verhaltens der Regelstrecke, in diesem Fall des Wassertanks, wurde die Übertragungsfunktion (Gl 2.4) in Simulink implementiert. Um den Wasserstand $h(s)$ direkt in Abhängigkeit vom Eingang $\dot{V}(s)$ zu berechnen, lässt sich die Gleichung wie folgt umstellen:

$$h(s) = \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{s} \cdot \dot{V}(s). \quad (2.5)$$

Sie zeigt, dass der Wasserstand h das Integral des Volumenstroms \dot{V} ist, gewichtet mit dem Kehrwert der Querschnittsfläche A . Je größer die Fläche, desto langsamer verändert sich der Wasserstand bei gegebenem Zufluss.

Der Volumenstrom wird als Einheitssprung mit $1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ und einer Startzeit bei einer Sekunde simuliert. Die Gl 2.4 ist als Übertragungsfunktion in Simulink umgesetzt mit einer Querschnittsfläche A von 1 m (siehe Anhang A1).

Das Ergebnis in Abbildung 5 verdeutlicht, dass das neue Volumen zu dem bereits vorhandenen Volumen addiert wird und der Wassertank immer weiter vollläuft, bis er überlaufen würde. Die Regelstecke verhält sich somit wie ein Integrator, wodurch das System Instabilität aufweist, siehe [22, S. 113 f.].

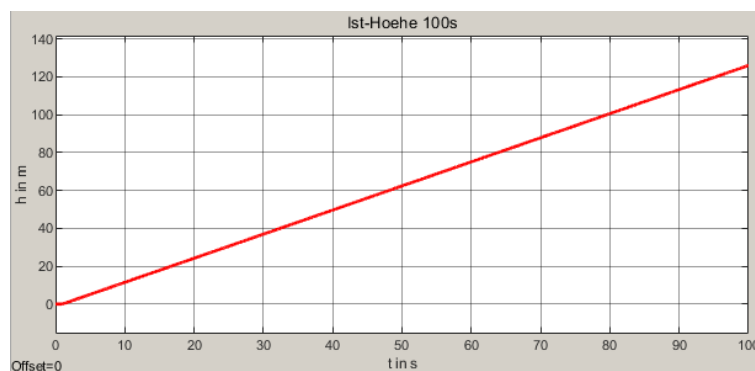


Abbildung 5: Wassertank Simulation

2.2.3 Regler-Auswahl

Die Regelung mittels PID-Regler findet in der Praxis sowie in der regelungstechnischen Lehre an der HSHL häufig Anwendung. Aufgrund dieser Relevanz wurde für das vorliegende Projekt eine Regelung mit dem PID-Regler ausgewählt. Im Folgenden ist für die PID-Anteile die Berechnung des stationären Endwertes x_{stat} der Führungsübertragungsfunktion G_W und der Störübertragungsfunktion G_Z bei einem Einheitssprung aufgezeigt.

Ziel der Untersuchung ist es herauszufinden, bei welcher Kombination der Regelanteile die Regelgröße im stationären Zustand exakt der Führungsgröße entspricht und äußere Störungen kompensiert werden. Das bedeutet,

- für G_W sollte im Idealfall $x_{stat} = 1$ gelten und
- für G_Z sollte im Idealfall $x_{stat} = 0$ gelten [23, S. 104 ff.].

Die Berechnungen für P, PI, PD und PID zeigen, dass nur PI und PID bei einem Einheitssprung die beiden Bedingungen erfüllen, siehe Anhang A2.

Zur Vereinfachung der Regler-Auslegung wurde sich im weiteren Verlauf für den PI-Regler entschieden. Die PI-Regeleinrichtung ermöglicht die Erreichung des vorgegebenen Sollwertes bei gleichzeitiger Kompensationsfähigkeit von auftretenden Störungen [23, S. 125].

Die Herleitung der Führungs- und Störübertragungsfunktion für den PI-Regler ist im Folgenden aufgezeigt und orientiert sich an dem Vorgehen aus der Lehrveranstaltung *Regelungstechnische Systeme*, siehe [11, ID 59 ff.].

Führungsübertragungsfunktion:

$$G_W = \frac{x}{w} = \frac{G_R \cdot G_S}{1 + G_M \cdot G_R \cdot G_S} \quad (2.6)$$

wobei $G_M = 1$; $G_S = \frac{1}{A \cdot s}$ und $G_R = (KP + \frac{KI}{s})$

$$\bullet \quad G_{WPI} = \frac{(KP + \frac{KI}{s}) \cdot \frac{1}{A \cdot s}}{1 + 1 \cdot (KP + \frac{KI}{s}) \cdot \frac{1}{A \cdot s}} = \frac{KP \cdot \frac{1}{A \cdot s} + KI \cdot \frac{1}{A \cdot s^2}}{1 + KP \cdot \frac{1}{A \cdot s} + KI \cdot \frac{1}{A \cdot s^2}} \cdot \frac{A \cdot s^2}{A \cdot s^2} = \frac{KP \cdot s + KI}{A \cdot s^2 + KP \cdot s + KI} \quad (2.7)$$

$$\bullet \quad x_{stat} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{WPI}(s) = \frac{KP \cdot 0 + KI}{A \cdot 0^2 + KP \cdot 0 + KI} = \frac{KI}{KI} = 1 \quad (2.8)$$

Störübertragungsfunktion:

$$G_Z = \frac{x}{z} = \frac{G_S}{1 + G_M \cdot G_R \cdot G_S} \quad (2.9)$$

wobei $G_M = 1$; $G_S = \frac{1}{A \cdot s}$ und $G_R = (KP + \frac{KI}{s})$

$$\bullet \quad G_{ZPI} = \frac{\frac{1}{A \cdot s}}{1 + 1 \cdot (KP + \frac{KI}{s}) \cdot \frac{1}{A \cdot s}} = \frac{\frac{1}{A \cdot s}}{1 + KP \cdot \frac{1}{A \cdot s} + KI \cdot \frac{1}{A \cdot s^2}} \cdot \frac{A \cdot s^2}{A \cdot s^2} = \frac{s}{A \cdot s^2 + KP \cdot s + KI} \quad (2.10)$$

$$\bullet \quad x_{stat} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{ZPI}(s) = \frac{0}{A \cdot 0^2 + KP \cdot 0 + KI} = \frac{0}{KI} = 0 \quad (2.11)$$

Das Systemverhalten bei geschlossenem Regelkreis kann anhand der Führungsübertragungsfunktion des P-Reglers aufgezeigt werden. Der P-Regler verstärkt lediglich und fügt keine eigene Dynamik hinzu [12, ID 129 f.].

Die Funktion ergibt sich wie folgt:

$$G_{WP} = \frac{KP \cdot \frac{1}{A \cdot s}}{1 + 1 \cdot KP \cdot \frac{1}{A \cdot s}} \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot s} = \frac{KP}{A \cdot s + KP} \quad (2.12)$$

Es zeigt sich, dass das Verhalten dem eines PT1-Systems mit $KP \triangleq KP$; $T \cdot s \triangleq A \cdot s$ und $1 \triangleq KP$ gleicht [12, ID 150 f.].

2.3 Differenzdrucksensor MPX5010DP

Zum besseren Verständnis, des in dieser Arbeit verwendeten Sensors, wird der Differenzdrucksensor MPX5010DP im Folgenden näher erläutert. Der MPX5010DP ist ein piezoresistiver Drucksensor, der den Differenzdruck zwischen den beiden Anschlüssen misst und ein analoges Signal ausgibt.

Funktionsweise:

Der Aufbau des Sensors ist in Abbildung 6 zu sehen. Der MPX nutzt zur Messung den piezoresistiven Effekt, um Druckänderungen in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Das Differenzdruck-Messelement (*Differential sensing element*) wird durch den anliegenden Druck an den Anschlüssen P1 und P2 verformt. Diese Verformung beeinflusst spezielle Dehnungsmessstreifen des Siliziumchips (*Die*), welche auf dem Messelement angebracht sind. Durch die Verformung kommt es zu einer Widerstandsänderung der Messstreifen, was zu einer Änderung der Ausgangsspannung führt.

Die Spannung ist proportional zum Differenzdruck zwischen den beiden Druckanschlüssen P_1 (Messanschluss) und P_2 (Referenzanschluss). Die Sensorkennlinie weist dementsprechend eine lineare Steigung auf. Diese ist abhängig von den folgenden Faktoren:

- P_1 steigt \rightarrow Membran nach innen gedrückt \rightarrow Ausgangsspannung steigt
- P_1 sinkt \rightarrow Membran nach außen gezogen \rightarrow Ausgangsspannung sinkt
- $P_1 = P_2 \rightarrow$ Keine Verformung der Membran \rightarrow Ausgangsspannung unverändert.

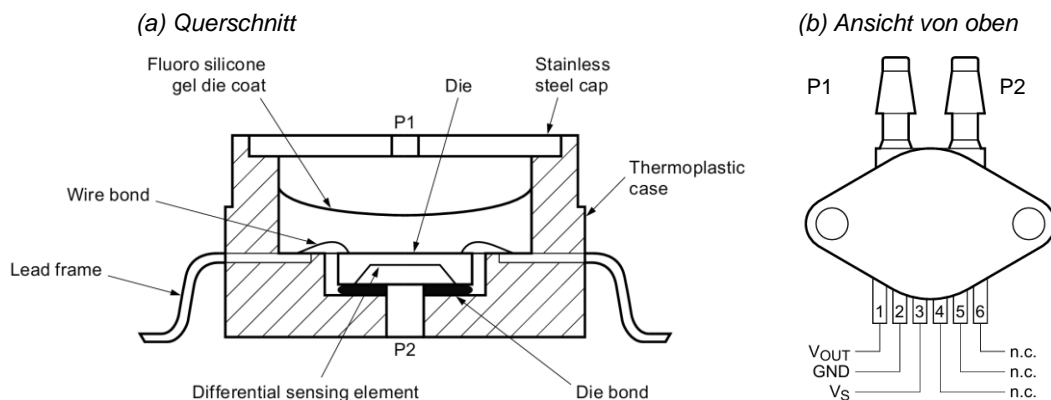


Abbildung 6: MPX5010DP Schnittansicht (a) und Draufsicht (b).

Quelle: [19], die Beschriftungen P1 und P2 wurden nachträglich ergänzt

Technische Merkmale:

- Versorgungsspannung: 5 V
- Ausgangsspannung: 0,2 – 4,7 V
- Messbereich: 0 – 10 kPa, entspricht 0 – 1,019 m H₂O
- Genauigkeit: ±5 % im Temperaturbereich 0 – 85 °C
- Reaktionszeit: 1 ms
- Empfindlichkeit: 4,413 mV / kPa H₂O

Anschlüsse:

Der MPX ermöglicht eine einfache Anbindung über 5 V und GND, sowie über einen analogen Eingang am Mikrocontroller zum Einlesen der Messwerte. Die Tabelle 1 gibt Aufschluss über die Anschlüsse des Sensors aus Abbildung 6b.

Tabelle 1: Anschlüsse des MPX5010DP

Anschluss	Bezeichnung	Beschreibung
1	<i>Vout</i>	Ausgangsspannung
2	<i>GND</i>	Masse
3	<i>Vs</i>	Versorgungsspannung (VCC)
4, 5, 6	<i>n. c.</i>	Anschlüsse sind nicht verbunden
P1	<i>Port 1</i>	Anschluss für die Druckmessung
P2	<i>Port 2</i>	Anschluss für die Referenzmessung

3 Systementwurf und Umsetzung

Basierend auf den dargelegten theoretischen Grundlagen, wird in diesem Kapitel die Modellierung, Simulation und Implementierung des Wasserstandssystems im Detail beschrieben. Dabei werden Spezifikation und Umsetzung der einzelnen Komponenten vorgestellt und die Regel-Auslegung mittels Simulation aufgezeigt.

3.1 Systementwurf

Der Systementwurf bildet die konzeptionelle Grundlage. Die Anforderungen an das System sind im Detail vorab festgelegt worden und können im SVN eingesehen werden, siehe Anhang A3. Die wichtigsten Anforderungen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 2: Auszug aus der Anforderungsliste

Anforderung
Die Wasserstandsmessung muss eine Genauigkeit von $\pm 5 \text{ mm}$ haben.
Das System muss, von der minimalen Wasserstandshöhe aus, die maximale Höhe in mindestens 60 Sekunden erreichen und mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \text{ mm}$ konstant halten.
Eine Störung von 90 %, muss innerhalb von 30 Sekunden ausgeglichen und die Sollhöhe wieder erreicht werden.
Das Hardwaredesign muss für den Einsatz im Rahmen der praxisorientierten Hochschuldemonstrationen ausgelegt sein.
Es muss eine Benutzerinteraktionsmöglichkeit geben, um den Wasserstand zu beeinflussen.
Es muss eine visuelle Anzeige des Wasserstandes und der Störung möglich sein.
Die Stromführung muss sicher sein und über einen Not-Aus-Schalter verfügen, der leicht zugänglich ist.

3.1.1 Regelkreis

Zur Veranschaulichung des Funktionsprinzips dient die schematische Darstellung des geschlossenen Regelkreises in Abbildung 7.

Der Benutzer stellt über einen Drehregler die gewünschte Sollhöhe h_{soll} (*Führungsgröße*) des Wassertanks (*Regelstrecke*) ein. Die Differenz d_h (*Regelfehler*) zwischen h_{soll} und der gemessenen Ist-Höhe h_{mess} (*Messgröße*) wird vom Arduino erfasst und über den Regler beeinflusst, um die Pumpen (*Aktor*) für den Zu- und Abfluss mit einer PWM (*Stellgröße 1*) anzusteuern. Der resultierende Volumenstrom \dot{V}_{stell} (*Stellgröße 2*) fließt in den Wassertank. Der Störvolumenstrom \dot{V}_{stoer} (*Störgröße*) beeinflusst durch eine

manuell eingestellte Störung den Wasserstand im Tank. Aus dem geregelten Zufluss und dem gesteuerten Abfluss ergibt sich die tatsächliche Ist-Höhe h_{ist} (Regelgröße), welche gemessen und von h_{soll} wieder subtrahiert wird. Ziel ist es, die eingestellte Sollhöhe trotz Störung stabil zu halten.

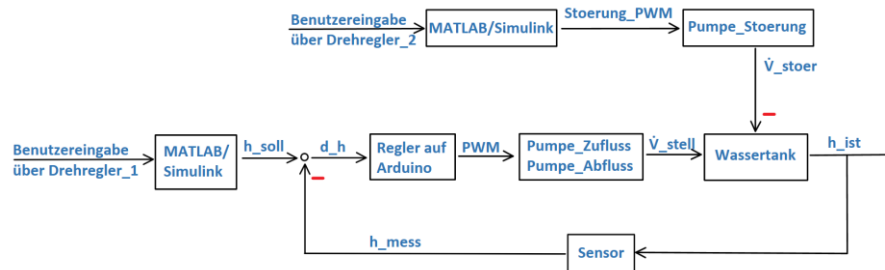


Abbildung 7: Schematischer Regelkreis des Wasserstandssystems. Quelle i.A.a. [16, S. 4 f.]

3.1.2 Morphologischer Kasten und Konzeptskizze

Bei der Planung wurden mehrere Optionen je Systemfunktion im morphologischen Kasten gegenübergestellt und zusammen mit verschiedenen Entwürfen bewertet, siehe Anhang A4. Die ausgewählten Optionen und der Auswahlgrund finden sich in der folgenden Abbildung 8. Kriterien für die Auswahl waren: *Kompatibilität* (Anbindung über Arduino und MATLAB), *Verfügbarkeit*, *Kosten* sowie *Anwenderfreundlichkeit* (z. B. für Besucher des MINT-Erlebnistag).

Aspekt	Ausgewählte Option	Auswahlgrund
Benutzerfeedback	Visuell Display	Ermöglicht klare visuelle Rückmeldung für Nutzer.
Benutzerinteraktion	Drehpotentiometer	Einfache, intuitive Sollwerteingabe durch manuelle Einstellung.
Ist-Höhe	Messung	Gefahr von Leer- oder Überlaufen wird eliminiert.
Mikrocontroller	Arduino Mega 2560	Viele Ein- und Ausgänge, kompatibel mit Simulink.
Pumpensteuerung	H-Brücke	Einfache 12V Ansteuerung von Gleichstrommotoren mittels PWM über Arduino.
Pumpentyp	Membranpumpe	Preiswerter Pumpentyp bei trotzdem sehr guter Förderleistung und Langlebigkeit.
Pumpleistung	1-2 l/min	Ideale Fördermenge um die ausgewählte max. Wassermenge im Tank in angemessener Zeit raus und rein zu pumpen.
Regler	PI-Regler	Ergibt sich aus der Systemuntersuchung und Reglerauswahl.
Regelparameter	Fester Wert	Einstellbare Reglerparameter können nachträglich sehr einfach implementiert werden wenn noch Zeit ist.
Sensor für Wasserstand	Differenzdrucksensor	Kompakt, günstig und direkt mit dem Arduino sowie MATLAB/Simulink auslesbar. Ist im Gegensatz zum Ultraschall und Schwimmsensor nicht so anfällig für Störung durch Wellen auf der Wasseroberfläche. Differenzdruck ist zudem unabhängig von einem schwankenden Umgebungsluftdruck.
Sicherheitseinrichtung	Notausschalter	Wichtig um die Pumpen bei Leckage oder ähnlichem schnell zu stoppen.
Sicherheitsmechanismen	Wassermengenbegrenzung	Somit ist kein Überlaufen möglich, z. B. durch Fehlmessungen bei einem Sensorausfall.
Software	MATLAB/Simulink	Ergibt sich aus den aufgestellten Anforderungen.
Sollhöhe	Einstellbar	Flexibel einstellbar über ein Potentiometer für Benutzerinteraktion und Erlebnis.
Störquelle	Pumpe	Ermöglicht eine gezielte, variable Störeinbringung.
Stromversorgung Pumpe	Netzstecker (12V)	Ergibt sich aus den aufgestellten Anforderungen und vereinheitlicht die Spannungsversorgung von Arduino und Pumpen.
Systemabgrenzung	Plexiglas-Gehäuse	Gehäuse ermöglicht gute Sichtbarkeit auf das System bei optimalem Schutz vor unautorisiertem Zugriff.
Systemhalterung	Aluminiumprofile & 3D-gedruckte Halterungen	Stabil und modular aufgrund der Profile und leicht anpassbar aufgrund von 3D-Druck.
Verkabelung	Lötplatine	Dauerhafte und stabile Verbindungen für hohe Zuverlässigkeit.
Wasser Abfluss	Von Boden mittels Rohr	Zugriff zum Tankboden muss von oben erfolgen, da in den Glasbehältern keine Löcher gebohrt werden können.
Wasser Zufluss	Von oben	Sichtbarer Zuflussweg für den Demonstrationseffekt.
Wasserbehälter	Glas	Robustes, langlebiges Material was leicht zu reinigen ist.
Wasserleitungen	Silikon-Schläuche	Beständiges und kostengünstiges Material bei gleichzeitig einfacher Implementierung.
Wassermenge max.	1.5-2l	Viele Glasbehälter der gewünschten Höhe von 0,30-0,45m bewegen sich zwischen der Literanzahl. Die Höhe der Wassertanks ist durch die Glaskuppel begrenzt, die an der HSHL bereits in fertiger Form vorliegt.

Abbildung 8: Ausschnitt aus dem morphologischen Kasten

Der folgende Entwurf (Abbildung 9) visualisiert den geplanten physikalischen Aufbau der Hardware auf Basis der ausgewählten Optionen und des ausgewählten Entwurfs und verdeutlicht die funktionale Anordnung.

Das System besteht aus zwei Glas-Zylindern (Primär- und Sekundärtank), die über Silikonschläuche, drei Pumpen, dem Sensor und einer interaktiven Benutzereingabe funktional miteinander verbunden sind.

Der Wasserzufluss erfolgt von oben und der Wasserabfluss über ein Rohr (roter Pfeil) vom Tankboden. Die Regelung des Wasserstands im Primärtank erfolgt über zwei Pumpen, wobei *Pumpe 1* den geregelten Wasserzufluss (blaue Leitungen) und *Pumpe 2* den geregelten Wasserabfluss (rote Leitungen) bewirkt.

Der Wasserstand im Primärtank wird über einen *Drucksensor* gemessen. Zwei *Drehpotentiometer* ermöglichen die Eingabe von Sollhöhe (grüner Knopf) und Störung (roter Knopf). Beide sind in einer Benutzerkonsole integriert und stehen dem Benutzer zur Verfügung. Die *Pumpe 3* wird direkt über das Potentiometer Störung angesteuert und bewirkt einen Wasserabfluss aus dem Primärtank. Auf einem *LCD-Display* werden die Sollhöhe, die aktuelle Ist-Höhe sowie die Störung dargestellt. Die Datenverarbeitung erfolgt mit einem Microcontroller, der über Motortreiber (H-Brücken) die Pumpen ansteuert.

Das System wird auf einem Aluminiumrahmen mit Plexiglas-Gehäuse montiert.

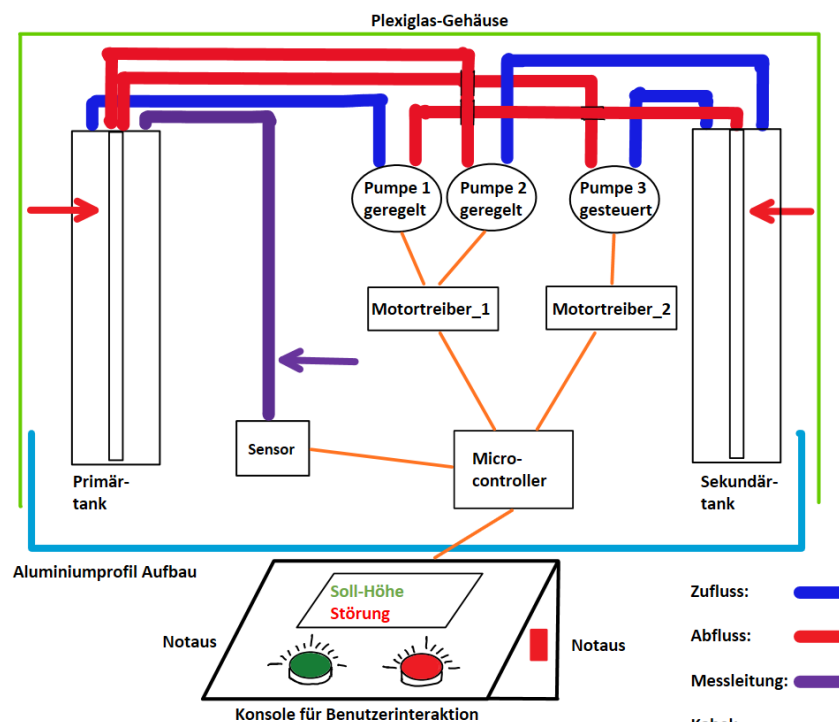


Abbildung 9: Konzeptskizze des Wasserstandssystems

3.2 Hardware- und Software-Spezifikation

Für die Umsetzung des Wasserstandssystems wurde das Gesamtsystem in die funktionalen Komponenten *Wassertanksystem*, *Benutzereingabe_Sollhöhe*, *Benutzereingabe_Störung*, *Pumpe_Regelung*, *Pumpe_Störung*, *Regelung*, *Sensor* und *I2C_LCD_20x4* unterteilt.

Die Spezifikation beschreibt die ausgewählte Hard- und Software sowie die Verbindung der Komponenten gemäß dem Systementwurf.

3.2.1 Hardwarespezifikation

Die Auswahl der Hardware erfolgte unter Berücksichtigung von Funktionalität, Kompatibilität und Zuverlässigkeit. Die folgende Abbildung zeigt den Anschlussplan von der Verkabelung und der Verbindung der Komponenten und ist im weiteren Verlauf zusammen mit den Spezifikationen näher erläutert.

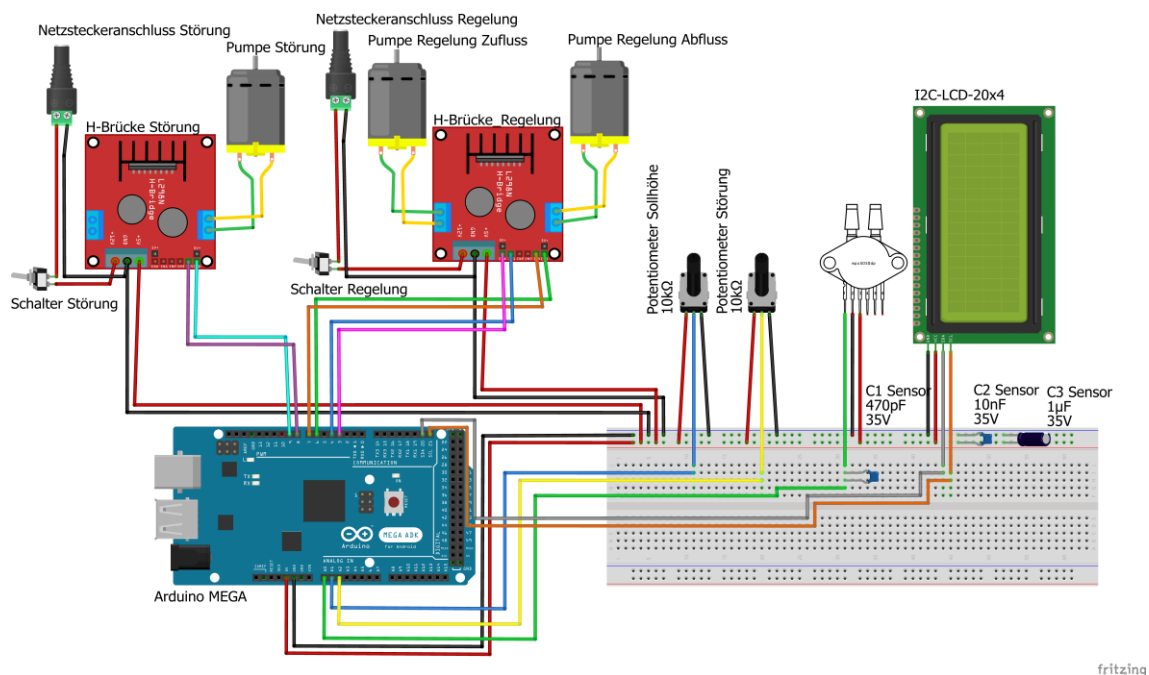


Abbildung 10: Fritzing Anschlussplan der Hardwarekomponenten

Wassertanksystem

Als Tanksystem kommen zwei zylindrische DURAN-Glasgefäße mit einem maximalen Volumen von 1,65 l zum Einsatz. DURAN-Glas zeichnet sich durch Robustheit und Transparenz aus, womit eine Langlebigkeit und visuelle Beobachtbarkeit des Systems erzielt werden [8, S. 5 ff.]. Der Wasserstand im Tank ist mit mindestens 0,05 m und maximal 0,30 m festgelegt, um ein Leer- und Überlaufen zu unterbinden.

Die Verbindung der beiden Tanks erfolgt über flexible Silikonschläuche, welche besonders beständig gegenüber Umwelteinflüssen sind [20, S. 59].

Benutzereingabe_Sollhöhe und Benutzereingabe_Störung

Für beide Komponenten wird dasselbe *RV16AF-20-15K-B10K* Drehpotentiometer mit jeweils $10\text{ k}\Omega$ verwendet. Es bietet eine präzise lineare Spannungsausgabe ($0 - 5\text{ V}$) bei einer Sollwertvorgabe (Höhe bzw. Störung). Die Anbindung an den Arduino erfolgt über die analogen Eingänge A1 (Sollhöhe) bzw. A2 (Störung), wobei die Versorgung über 5 V und *GND* realisiert wird.

Pumpe_Regelung & Pumpe_Störung

Für die benötigten Wasserpumpen wurden drei baugleiche *R385-Membranpumpen* ausgewählt, die jeweils über eine eigene H-Brücke vom Typ *SBC-MotoDriver2* per PWM angesteuert werden. Die Fördermenge wird laut [21] mit maximal $2 \frac{\text{l}}{\text{min}}$ angegeben.

Diese Kombination bietet eine kompakte Bauweise bei ausreichender Förderleistung, um die Glaszylinder in angemessener Zeit zu füllen oder zu leeren.

Regelung

Ein Arduino MEGA dient als Schnittstelle zwischen Hard- und Software und übernimmt als zentrale Steuereinheit die Verarbeitung von Benutzereingaben, Messwerten und der Regelung. Der MEGA bietet eine große Anzahl an *I/O-Pins*, eine hohe Speicherkapazität und ist mit MATLAB/Simulink kompatibel [2]. Die gezeigte Verkabelung auf dem Breadboard in Abbildung 10 wird im finalen Aufbau mit einer Lochrasterplatine umgesetzt.

Sensor

Zur Messung der Ist-Höhe wird der Drucksensor MPX5010DP verwendet. Aufgrund seiner genauen Messung, der guten Dokumentation sowie der einfachen Implementierung und Verwendbarkeit wurde sich für den Sensor entschieden, siehe Kapitel 2.3.

Im Aufbau misst er über eine Schlauchleitung zum Boden des Tanks den hydrostatischen Druck, aus dem in Simulink die Wasserhöhe berechnet werden kann.

Der Sensor ist mit dem analogen Eingang A0 des Arduino verbunden und wird, wie im Datenblatt beschrieben, hardwareseitig gefiltert. Im Projekt 24 (siehe 2.1.2) hat der Sensor gezeigt, dass er für die Wasserstandsmessung geeignet ist.

I2C_LCD_20x4

Für die visuelle Anzeige von Sollwert, Istwert und Störung wird ein LCD-Display mit vier Zeilen mit jeweils 20 Zeichen eingesetzt. Die Anbindung erfolgt durch I2C-Bus direkt über SDA und SCL des Arduino MEGA, siehe [6].

Eine detaillierte Übersicht aller verwendeten Bauteile inklusive technischer Spezifikationen und weiterer Auswahlbegründung ist im Anhang A5 zu finden.

3.2.2 Softwarespezifikation

Aufbauend auf den zuvor beschriebenen Hardwarekomponenten wurde in MATLAB/Simulink ein Softwaremodell (Abbildung 11) entworfen. Die softwareseitige Verbindung der Komponenten orientiert sich dabei stark an der Struktur der Hardware und ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3: Softwareseitige Verbindung der Komponenten

Signalname	Ausgangs-komponente	Eingangs-komponenten	Signalerklärung
h_mess	- Sensor (blauer Rahmen)	- Regelung (grüner Rahmen) - I2C_LCD_20x4 (oranger Rahmen)	Sollhöhe laut Benutzereingabe
h_soll	- Benutzereingabe_Hoehe (schwarzer Rahmen)	- Regelung (grüner Rahmen) - I2C_LCD_20x4 (oranger Rahmen)	Vom Sensor gemessene Ist-Höhe
Regelung_PWM	- Regelung (roter Rahmen)	- Pumpe_Regelung (grüner Rahmen)	PWM für die Pumpen der Regelung
Stoerung_Prozent	- Benutzereingabe_Stoerung (lila Rahmen)	- I2C_LCD_20x4 (oranger Rahmen)	Störung in Prozent
Stoerung_PWM	- Benutzereingabe_Stoerung (lila Rahmen)	- Pumpe_Stoerung (gelber Rahmen)	PWM für die Pumpe der Störung

Die Softwarearchitektur gliedert sich in drei Hauptbereiche zur besseren Orientierung:

- **Software_Regelung:** Enthält alle Komponenten für die Regelung.
- **Software_Stoerung:** Beinhaltet die softwareseitigen Funktionen zur Erzeugung der Störung.
- **I2C_LCD_Display:** Ermöglicht die visuelle Anzeige auf dem LCD-Display.

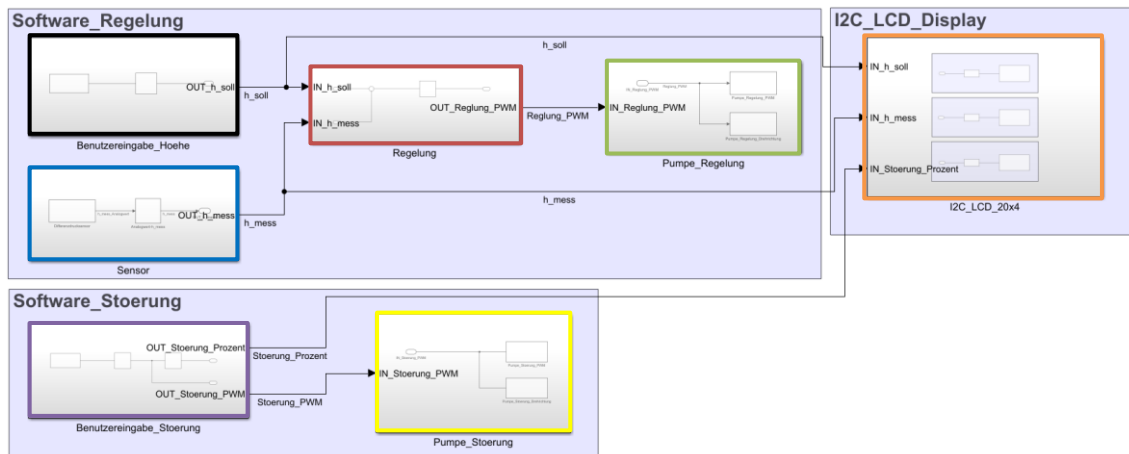


Abbildung 11: Softwareseitige Verbindung der Komponenten des Wasserstandssystems

Mit den festgelegten Hard- und Softwarekomponenten lässt sich das System in MATLAB/Simulink simulieren. Damit können Reglerparameter festgelegt und erste Rückschlüsse zu dem dynamischen Verhalten des Wasserstandssystems gewonnen werden.

3.3 System Simulation

Das in Abbildung 12 dargestellte Simulink-Modell umfasst alle wesentlichen Komponenten des realen Wasserstandssystems. Die Sollhöhe h_{soll} wird über einen Step-Block simuliert und von der gemessenen Ist-Höhe h_{mess} subtrahiert, wodurch der Regelfehler d_h berechnet wird. Der d_h wird in das Areal *Regler* geführt und mit dem P-Anteil (K_P) und I-Anteil (K_I) des Reglers multipliziert. Die entstandenen Werte werden anschließend im Sum-Block addiert.

Der daraus resultierende Regelwert PWM_{RG} ist die insgesamt PWM, über welche die Pumpleistung gesteuert wird. Laut MathWorks [18] stellt das Senden eines PWM-Wertes von 255 in Simulink eine Arbeitsleistung von 100 % dar. Dementsprechend erhält der Regelwert im Areal *Pumpe_Zu-_und_Abfluss* über einen Saturation-Block eine Stellgrößenbegrenzung von -255 bis 255 und wird anschließend gerundet.

Durch die Multiplikation mit dem *Pumpenfaktor* wird der aktuelle Volumenstrom V_{stell} bestimmt. Eine positive PWM bedeutet den Zufluss von Wasser und eine negative PWM den Abfluss, das Gleiche gilt für den Volumenstrom. Der Pumpenfaktor ergibt sich aus der Berechnung der Pumpleistung pro PWM-Wert:

- maximale Pumpleistung der R385 $2 \frac{l}{min} \approx 3,333\bar{3} \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$
- Pumpleistung für 1 PWM = $\frac{3,333\bar{3} \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{255} = \frac{1}{8500000}$. (3.1)

Über einen Sum-Block wird eine Störung V_{stoer} zugeschaltet, die vom Volumenstrom V_{stell} subtrahiert wird. Der resultierende Volumenstrom V_{zu} wird im Areal *Wassertank* mit der Übertragungsfunktion (Gl 2.4) multipliziert, um die Höhe zu berechnen. Die minimal festgelegte Wasserstandshöhe von $0,05 m$, wird anschließend noch dazu addiert. Der PT1-Filter nach Prof. Dr.-Ing. Mirek Göbel [11] bildet den Sensor ab, um Verzögerungen und Filtereffekte im Messsignal zu berücksichtigen. Die Frequenz ist basierend auf dem Komponententest des Sensors mit $1 Hz$ festgelegt, siehe 3.4.2.7. Die Parameterdatei findet sich unter Anhang A6.

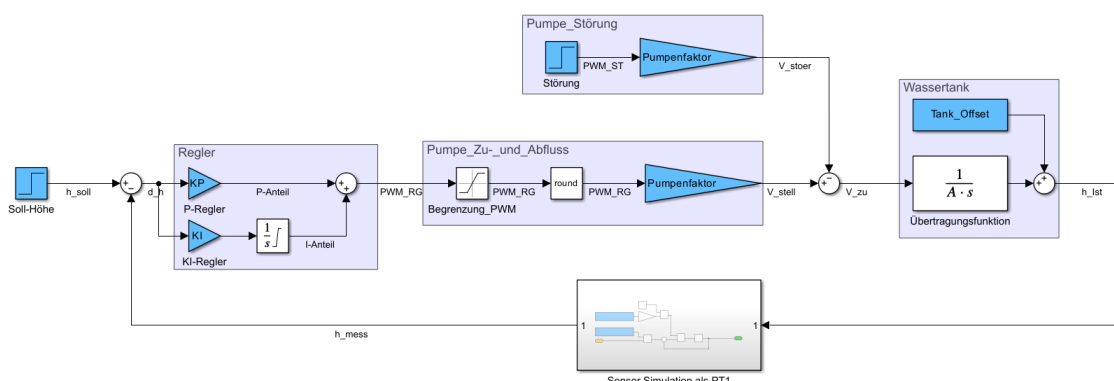


Abbildung 12 Simulink-Modell des simulierten Wasserstandssystems

3.3.1 Bestimmung der Systemzeit

Zur Bestimmung der Systemzeit wurde eine Simulation mit einer hohen Verstärkung von $KP = 100000$ durchgeführt, um die Reaktionszeit des Systems zu ermitteln. Die folgende Abbildung zeigt, dass die Ist-Höhe von $0,05 m$ bis zu der Sollhöhe von $0,30 m$ ca. $25,14 s$ benötigt (roter Rahmen). Der steile Anstieg zu Beginn, ist auf den PT1-Filter zurückzuführen.

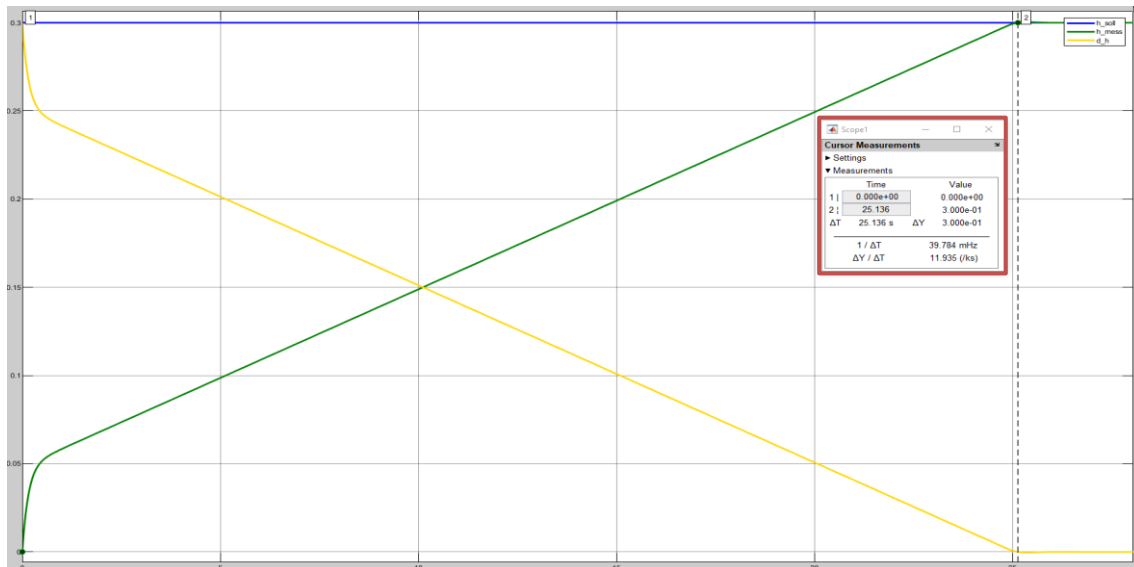


Abbildung 13: Systemzeit bei maximaler Verstärkung

Auch hier zeigt sich das PT1-Verhalten des Systems. Nach [22, S. 67] kann die Zeitkonstante T des Systems aus der Systemzeit wie folgt berechnet werden:

$$T = 25,14 \text{ s} \cdot 0,63 \approx 15,84 \text{ s.} \quad (3.2)$$

3.3.2 Wahl der Schrittweite in der Simulation

Laut [11, ID 186] sollte die Schrittweite für die Simulation mindestens ein Zehntel kleiner gewählt werden, als die kleinste im System auftretenden Zeitkonstante. So lässt sich die Dynamik des Systems hinreichend genau abbilden.

Basierend auf der bestimmten Zeitkonstante $T = 15,84 \text{ s}$ ergibt sich eine maximale zulässige Schrittweite von etwa

$$\Delta t_{max} < 0,1 \cdot 15,84 \text{ s} = 1,584 \text{ s.} \quad (3.3)$$

Um die Genauigkeit weiter zu erhöhen und die Sensorreaktionszeit von 1 ms zu berücksichtigen, wurde eine Schrittweite von $\Delta t = 0,01 \text{ s}$ gewählt.

3.3.3 Regler-Auslegung

Den Rahmen für die Regler-Auslegung bilden die folgenden zwei Anforderungen:

1. Das System muss, von der minimalen Wasserstandshöhe aus, die maximale Höhe in mindestens 60 s erreichen und mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \text{ mm}$ konstant halten.
2. Eine Störung von 90% muss innerhalb von 30 s ausgeglichen und die Sollhöhe wieder erreicht werden.

Um eine erste Näherung für den P-Anteil zu erhalten, kann die minimale Verstärkung KP_{min} berechnet werden, die erforderlich ist, um bei einem maximalen Regelfehler von $0,25\text{ m}$ (Differenz zwischen minimaler ($0,05\text{ m}$) und maximaler ($0,30\text{ m}$) Wasserstandshöhe) eine PWM von 255 zu erreichen. Die Berechnung der PWM für die Simulation sieht wie folgt aus:

$$PWM = d_h \cdot KP_{min}. \quad (3.4)$$

Zur Berechnung von KP_{min} wird die Formel umgestellt und die maximale PWM und der maximale Regelfehler eingesetzt:

$$KP_{min} = \frac{255}{0,25} = 1020. \quad (3.5)$$

An dieser Stelle ist anzumerken, dass der I-Anteil des PI-Reglers nicht betrachtet wird und diese Rechnung nur eine erste Einschätzung ermöglicht.

Auf Basis der Berechnung wurden die Regler Werte in der Simulation von $KP = 1000$ und $KI = 1000$ getestet. Die Simulation lief über 120 s , mit einer zugeschalteten Störung von 90% der maximalen PWM ab 60 s .

Die Testergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt. Im oberen Diagramm ist zu erkennen, dass die Ist-Höhe die Sollhöhe deutlich überschreitet, es kommt zu einem starken Überschwingen.

Das zweite Diagramm zeigt die beteiligten Volumenströme V_{stell} , V_{stoer} und V_{zu} . Es ist ersichtlich, dass ungefähr weitere 20 s lang nach dem erstmaligen Erreichen der Sollhöhe ein Zufluss V_{zu} erzeugt wird.

Der Grund dafür wird in den unteren beiden Diagrammen sichtbar: Während der P-Anteil mit steigender Ist-Höhe abnimmt, integriert der I-Anteil weiter bis ca. 4500 auf. Da der I-Anteil nur langsam über einen negativen Regelfehler abgebaut wird, bleibt die PWM zu lange positiv. Der P-Anteil wirkt dem zwar entgegen, kann den hohen I-Anteil aber nicht kompensieren.

Ab 60 s wird zusätzlich eine Störung V_{stoer} aktiviert. Diese trägt zunächst zur Senkung des Wasserstands bei. Jedoch wirkt auch hier der zuvor stark aufgebaute I-Anteil weiter und hält den Abfluss länger aktiv als nötig. Die Regelung reagiert träge, da der I-Anteil nicht schnell genug abgebaut wird und die Ist-Höhe fällt unter den Sollwert.

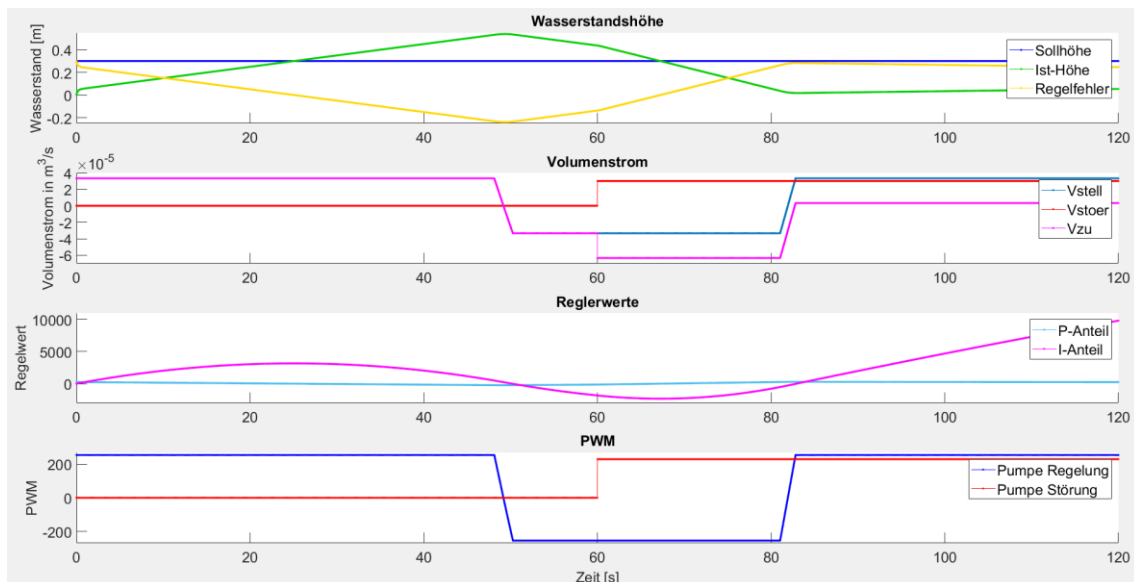


Abbildung 14: Simulation - KP1000 und KI1000

Es ist deutlich, dass aufgrund des I-Anteils die Anforderungen nicht erfüllt werden. Eine Reduzierung der Regelwerte hilft das Problem zu lösen, bewirkt aber auch, dass die Anforderungen im Rahmen der vorgegebenen Zeit nicht eingehalten werden. Das Problem ist somit der Integrator, welcher sich zu stark aufzieht, d. h. sein Ausgangswert wächst weiter, obwohl die Stellgröße bereits die maximal zulässige Grenze erreicht hat. Dies führt zu der erheblichen Verzögerung der Regler Reaktion.

In der Regelungstechnik wird dieses Verhalten als sogenanntes Windup bezeichnet und kann laut [1, S. 296] bei Reglern mit I-Anteil und Stellgrößenbeschränkung auftreten.

3.3.3.1 Anti-Windup-Maßnahmen

Da das Wasserstandssystem durch die maximal mögliche PWM-Ansteuerung von 255 eine Stellgrößenbeschränkung besitzt und mittels PI-Regler geregelt wird, stellt der Windup-Effekt ein reales Problem dar.

Um diese Verzögerungen zu vermeiden, existieren verschiedene Anti-Windup-Strategien. Eine einfache und zugleich effektive Methode ist die direkte Begrenzung des Integrator-Ausgangs. Dabei wird der Wert des Integrators auf den zulässigen Stellgrößenbereich von -255 bis 255 beschränkt.

Ohne eine Begrenzung des Integrators integriert sich dieser bei einem andauernden Regelfehler unkontrolliert auf. Sobald die Stellgröße jedoch ihre maximale Grenze erreicht hat, kann der Regler auf die tatsächliche

Systemdynamik nicht mehr reagieren, da der I-Anteil erst über eine längere Zeit wieder abgebaut werden muss. Die Regelung wird praktisch außer Kraft gesetzt und das System wird dadurch instabil bzw. unkontrollierbar, siehe [1, S. 297].

Die maximale PWM-Ansteuerung im System ist ohnehin auf 255 begrenzt, weshalb es nicht notwendig ist, dass der Integrator höhere Werte erreicht. Durch die Begrenzung wird sichergestellt, dass der Regler auch bei großen Regelfehlern kontrollierbar bleibt und sich die Stellgröße schnell und zuverlässig innerhalb der physikalisch gegebenen Grenzen bewegt. Die Umsetzung dieser Maßnahme lässt sich in Simulink direkt im Integrator-Block umsetzen.

Der Vergleich des Regelfehlers in dem folgenden Balkendiagramm bestätigt die positive Auswirkung der Maßnahme auf das System. Das Diagramm zeigt die aufsummierten absoluten Regelfehler über 120 s auf der y-Achse und den Kombinationen mit $KP = 1000$ und $KI = 1000$ auf der x-Achse.

Der Regelfehler mit Anti-Windup ist fast fünfmal geringer und bestätigt, dass die Maßnahme funktioniert und die Regelgüte erheblich verbessert wird. Das detaillierte Systemverhalten mit Anti-Windup findet sich im Anhang A7.

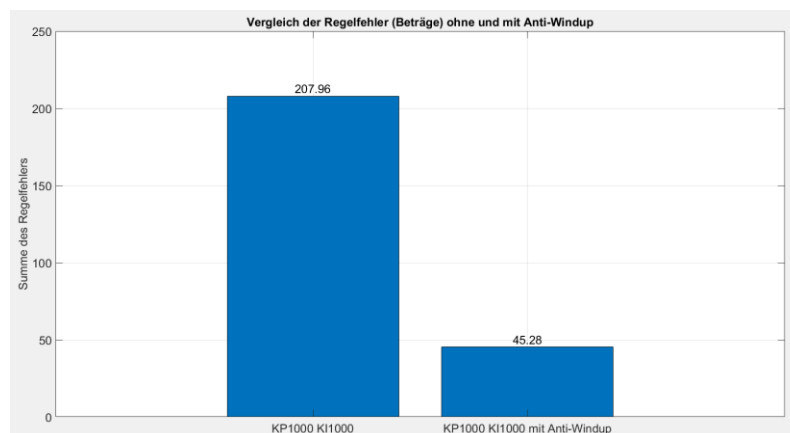


Abbildung 15: Simulation - Auswirkung von Anti-Windup auf den Regelfehler

3.3.3.2 Auswahl der Regleranteile

Für die abschließende Auswahl des PI-Reglers wurden verschiedene Kombinationen der Regleranteile KP und KI mit Anti-Windup untersucht. Abbildung 16 gibt einen Überblick an Reglerparametern von 100 bis 10000. Die Ergebnisse zeigen, dass niedrige Werte wie $KP = 100$ und $KI = 100$ zu starkem Überschwingen, langsamer Regelung und einer unzureichenden Störkompensation führen. Mit steigenden Werten verbessert sich das Regelverhalten deutlich: Bei $KP = 10000$ und $KI = 10000$ wird der Sollwert

schneller erreicht, allerdings mit Nachschwingen. Die Kombination $KP = 10000$ und $KI = 5000$ weist das beste Führungs- und Störverhalten auf.

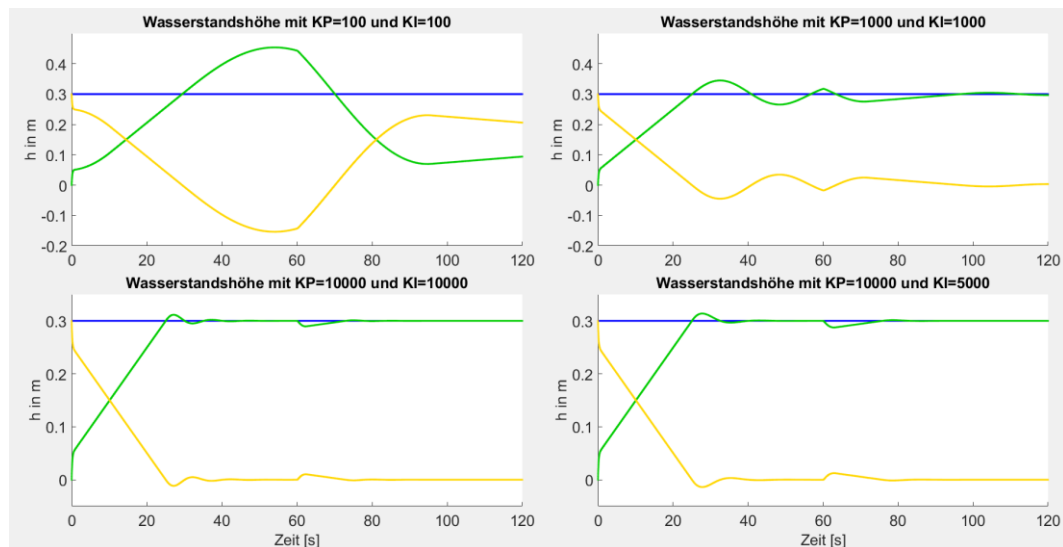


Abbildung 16: Simulation - Reglerauslegung

Die Ergebnisse werden durch die Betrachtung der Summe der Regelfehler validiert, siehe Abbildung 17. Auf der x-Achse sind die verschiedenen Reglerkombinationen dargestellt, auf der y-Achse die jeweilige Summe der Regelfehler. Die Kombination $KP = 10000$ und $KI = 10000$ erzielt mit 32,97 den geringsten Fehler, gefolgt von 33,54 bei $KP = 10000$ und $KI = 5000$. Mit $KP = 100$ und $KI = 100$ wird wenig überraschend ein sehr großer Regelfehler erzeugt. Obwohl bei $KI = 5000$ ein minimal höherer Fehler auftritt, zeigt die vorherige Analyse, dass das System damit weniger schwingt. Reale Einflüsse wie Pumpen- und Sensordynamik können zusätzlich Schwingungen verursachen, weshalb auf Basis dieser Vermutung die Parameter $KP = 10000$ und $KI = 5000$ für die weitere Umsetzung ausgewählt wurden.

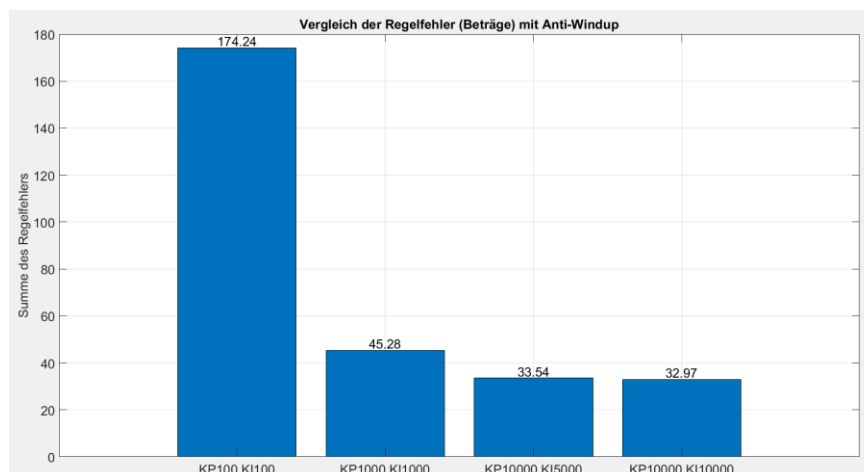


Abbildung 17: Simulation - Summe der Regelfehler verschiedener Reglerparameter

Das simulierte Systemverhalten mit Anti-Windup bei den Reglerparametern $KP = 10000$ und $KI = 5000$ ist in Abbildung 18 aufgezeigt. Das obere Diagramm zeigt, wie die Ist-Höhe die Sollhöhe innerhalb von 60 s erreicht, die Störung innerhalb von 30 s kompensiert wird und der Regelfehler auf 0 geht. Diagramm zwei und vier zeigen wie der Volumenstrom und die PWM leicht schwingen, sich aber sehr schnell beim Erreichen der Sollhöhe einpendeln.

Wird die Störung zugeschaltet, dauert es einige Sekunden bis sich der I-Anteil aufgezogen hat und die PWM der Regelung oberhalb der PWM der Störung liegt, wodurch der Volumenstrom positiv wird.

Diagramm drei verdeutlicht, dass der Integrator durch den hohen I-Anteil schnell aufintegriert und schnell abgebaut wird. Der Regelfehler wird somit nach kurzer Einschwingdauer Null und die Störung wird kompensiert. Die PWM der Pumpe Regelung wird gleich der PWM der Pumpe Störung, wodurch die Sollhöhe trotz Störung konstant gehalten wird.

Der hohe P-Anteil kann den begrenzten I-Anteil schnell kompensieren, wie in Sekunde 30 zu sehen (roter Kreis), und verhindert so zu starkes Überspringen.

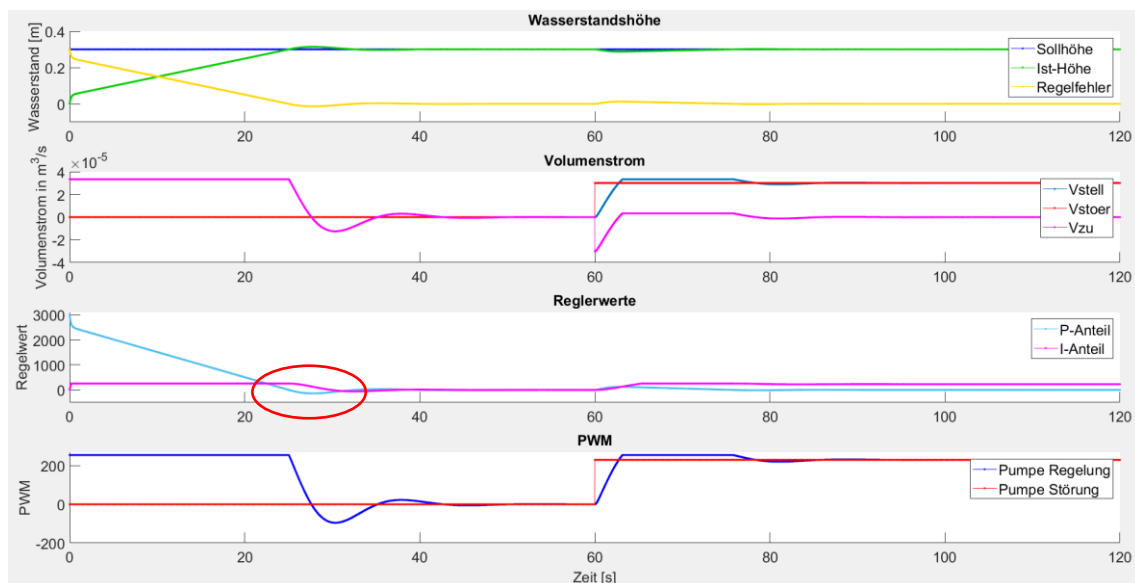


Abbildung 18: Simulation - Abschließendes Ergebnis mit $KP10000$ und $KI5000$

3.4 Systemumsetzung

In diesem Abschnitt wird die praktische Umsetzung des geplanten Konzepts beschrieben. Die Entwicklung der Komponenten erfolgte anhand der Simulation sowie der Komponentenspezifikation und wurde mittels dem Komponenten- und Integrationstest überprüft und angepasst. Eine detaillierte Dokumentation der Spezifikation und Testberichte ist im SVN einsehbar.

Die Verkabelung der elektronischen Komponenten erfolgt anhand Abbildung 10.

3.4.1 Rahmenkonstruktion

Die Rahmenkonstruktion dient als Träger für die entwickelten Komponenten und wurde im ITEM Engineering Tool geplant. Abbildung 19 zeigt den Vergleich zwischen dem entwickelten und umgesetzten Aufbau. Die einzelnen Profillängen sind im Anhang A12 hinterlegt.

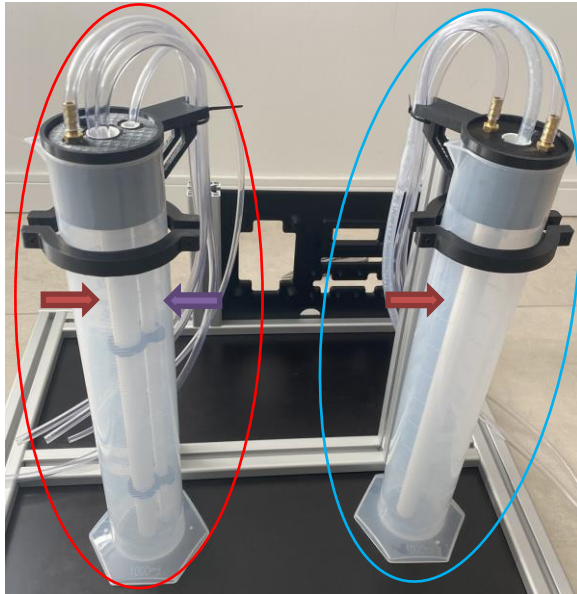
Grundstruktur des Rahmens: Die Basis besteht aus vier Aluminiumprofilen mit jeweils zwei Transportgriffen vorne und hinten. Die Maße betragen $755\text{ mm} \cdot 575\text{ mm}$ (ohne Griffe). Die Höhe des Aufbaus liegt bei 400 mm .

Innerer Aufbau: In die Profile sind zwei Holzplatten (blauer Rahmen) und eine 3D gedruckte Platte (oranger Rahmen) geschoben. Die gedruckte Platte ermöglicht die Befestigung der Platine, der H-Brücken und des Arduino und bietet so eine bessere Sichtbarkeit und einen Schutz bei einer Leckage.

Die vorderen Profile (grüne Pfeile) dienen zur Befestigung der Wassertanks und die hinteren Profile (lila Pfeile) zur Montage der gedruckten Platte.

Benutzerkonsole und Plexiglas-Gehäuse: Die Benutzerkonsole wird außen am Rahmen auf den Profilen montiert (grüne Umrandung). Das Plexiglas-Gehäuse ($570 \cdot 610 \cdot 555\text{ mm}$) ist an der HSHL Lippstadt bereits vorrätig und gibt die Maße für den Aluminiumrahmen vor. Es wird auf den 4 Basisprofilen aufgelegt und über 4 Halterungen (rote Umrandung (a)) an den Ecken in Position gehalten. Zur besseren Sichtbarkeit der vertikalen Platte, wurde der hintere Aufbau bei der Umsetzung nach rechts verschoben.

(a) Plastikzylinder mit Deckel und Leitungen



(b) Deckel, Distanzstücke und Rohre



Abbildung 20: Wassertanksystem

Die Komponententests zeigen, dass die Deckel einen guten Halt für die Schläuche bieten. Um zu verhindern, dass sich die Abfluss-Schläuche am Boden festsaugen, sind unten in die Rohre 3D gedruckte Distanzstücke eingesetzt, auf denen die Schläuche aufliegen, zu sehen in (b).

Die Wassermenge für das System mit Plastikzylindern ist auf 1,25 l begrenzt und ermöglicht eine maximale Höhe in einem der Tanks von 0,35 m. Dem System wird es erlaubt, leicht über zu schwingen ohne überzulaufen, siehe Kapitel 3.2.1.

3.4.2.2 Benutzereingabe_Hoehe

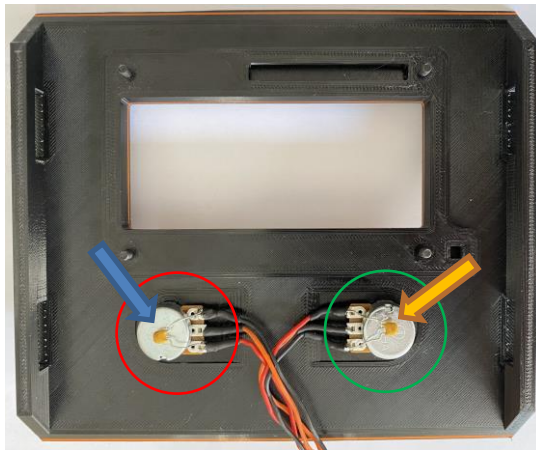
Hardware: Abbildung 21 zeigt die 3D gedruckte Benutzerkonsole, in welche das RV16AF zum Einstellen der Sollhöhe (grüne Umrandung) und der Störung (rote Umrandung) integriert ist. Die Beschriftung und ein Knopf weisen auf den Zweck sowie den Drehradius hin und erleichtern die Bedienung.

An das Potentiometer sind folgende Kabel gelötet:

VCC (rot) / GND (schwarz) / VOUT (orange)

Der Komponententest hat den Bedarf eines Kondensators zur Stabilisierung der Werte aufgezeigt. Zwischen VCC und GND wurde ein 100 nF Kondensator (oranger Pfeil) angelötet.

(a) Ansicht von unten



(b) Ansicht von oben



Abbildung 21: Deckel für die Benutzerkonsole mit Potentiometer

Software: Abbildung 22 zeigt die Umsetzung dieser Komponente in Simulink.

Die Werte werden über A1 des Arduinos in Simulink eingelesen. Neben dem Kondensator ist, basierend auf den Tests, mittels des MATLAB-Function-Block *Benutzereingabe_Hoehe_Mittelwert_Berechnung* eine Mittelwertfilterung über die letzten fünf Digitalwerte zur Glättung implementiert. Die Werte des ausgehenden Signals werden anschließend in dem 1-D Lookup Table *h_soll_Digitalwert-Sollhoehe* in Metern umgewandelt.

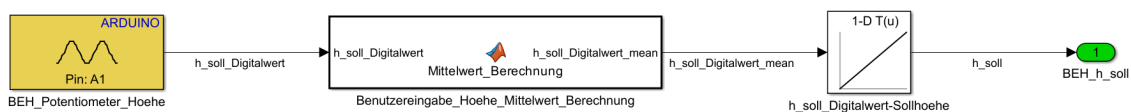


Abbildung 22: Softwareumsetzung der Komponente Benutzereingabe_Hoehe

Zusätzlich zur Filterung ist ein Offset von fünf Digitalwerten nach unten und nach oben hinterlegt, falls es zu kleinen Schwankungen der minimalen und maximalen Digitalwerte kommt. Der Wertebereich sieht dabei wie folgt aus und ist als Parameter in der Parameterdatei (siehe Anhang A8) hinterlegt:

$$\text{Digitalwert} \leq 5 \pm 0,05 \text{ m} \quad / \quad \text{Digitalwert} \geq 1018 \pm 0,30 \text{ m}$$

Messwerte: In Abbildung 23 sind die Messwerte des Potentiometers ohne Kondensator (rote Linie), mit Kondensator (blaue Linie) sowie mit Kondensator und Filterung (grüne Linie) aufgezeigt. Das Potentiometer wurde nicht gedreht.

Zu erkennen ist, dass bei der grünen Linie eine deutliche Glättung erzielt wird, wodurch der gewünschte Wert konstant gehalten wird.

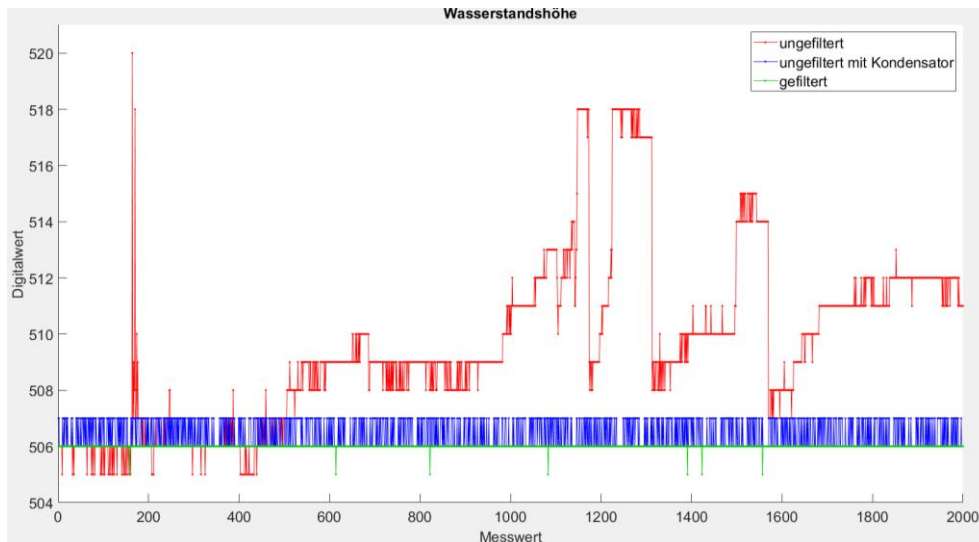


Abbildung 23: Vergleich der Messwerte des RV16AF Benutzereingabe_Hoehe

3.4.2.3 Benutzereingabe_Stoerung

Hardware: Das RV16AF zur Einstellung der Störung ist rechts in die Benutzerkonsole integriert (Abbildung 21 rote Umrandung). An das Potentiometer sind folgende Kabel gelötet:

VCC (rot) / GND (schwarz) / VOUT (orange)

Auch bei diesem Potentiometer hat der Komponententest den Bedarf eines 100 nF Kondensators (Abbildung 21 blauer Pfeil) zur Stabilisierung aufgezeigt.

Software: Die Umsetzung in Simulink ist fast identisch zur vorherigen Komponente.

Ebenfalls ist aufgrund der Testergebnisse über den MATLAB-Function-Block eine Mittelwertfilterung über die letzten fünf Digitalwerte implementiert. Die Werte werden in dem 1-D Lookup Table *Stoerung_Digitalwert-Prozent* in Metern umgewandelt und über einen Round-Block gerundet, um eine ganze Prozentzahl zu erhalten.



Abbildung 24: Softwareumsetzung der Komponente Benutzereingabe_Stoerung

Auch für den Wertebereich ist im Lookup Table ein Offset von fünf Digitalwerten nach unten und oben in der Parameterdatei hinterlegt und sieht wie folgt aus:

$$\text{Digitalwert} \leq 5 \triangleq 0\% \text{ Störung} / \text{Digitalwert} \geq 1018 = 100\% \text{ Störung}$$

Messwerte: In Abbildung 25 sind die Ergebnisse ohne Filterung (rote Linie) sowie mit Filterung und mit Rundung (grüne Linie) zu sehen. Auch hier liegt eine deutliche Glättung der Digitalwerte vor.

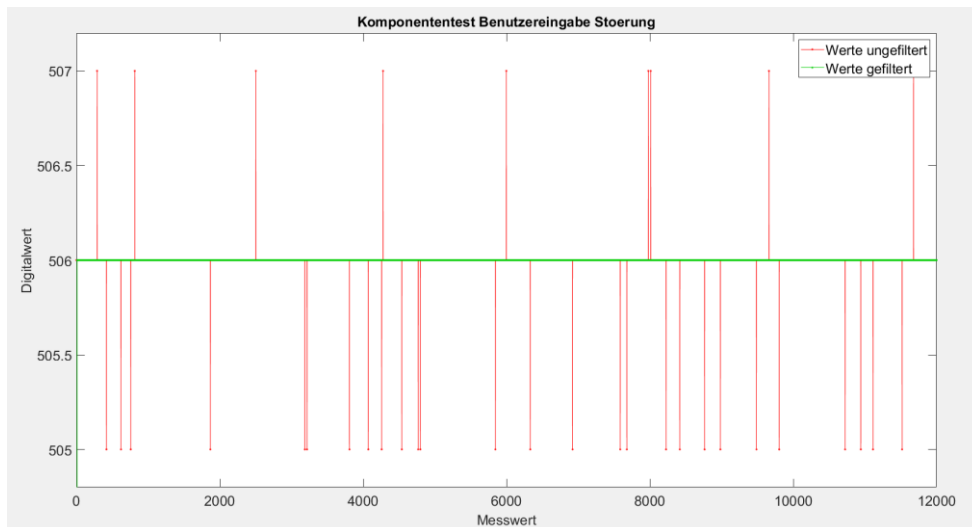


Abbildung 25: Vergleich der Messwerte des RV16AF Benutzereingabe_Störung

3.4.2.4 Pumpe_Regelung

Hardware: Die Pumpe für den geregelten Zufluss (rote Umrandung), den geregelten Abfluss (gelbe Umrandung) und der Störung (lila Umrandung) sind auf einem Halter montiert und mit der H-Brücke (grüne Umrandung) sowie dem Not-Aus-Schalter (blaue Umrandung) verbunden, siehe Abbildung 26. Der Halter wurde mittels 3D-Druckverfahren hergestellt und wird auf der Rahmenkonstruktion mit doppelseitigem Klebeband fixiert, was einen Austausch oder Versetzen ermöglicht.



Abbildung 26: Pumpen mit Halterung, H-Brücke und Not-Aus-Schalter

Bei der Überprüfung der Pumpleistung von den angegebenen $2 \frac{l}{min}$ hat sich gezeigt, dass die gepumpte Menge an Wasser stark variiert und zwischen $1,7 \frac{l}{min}$

und $2,1 \frac{l}{min}$ liegt. Gerade im Zusammenspiel zwischen Stör- und Zuflussmenge kann sich die Variation bemerkbar machen, wenn die entnommene Wassermenge größer als die zufließende Menge ist.

Software: In der Software (Abbildung 27) wird das eingehende Signal *Regelung_PWM* zuerst mittels Round-Block gerundet und anschließend über einen Abs-Block geführt. Eine ganzzahlige und positive PWM wird für die nachfolgende Zuordnung im Lookup Table benötigt. Bei den Komponententests hat sich herausgestellt, dass die Pumpen erst ab einer PWM von 71 anlaufen. Über den Lookup Table *Regelung_PWM-Offset* ist dementsprechend ein Offset von 71 hinterlegt. Die Zuordnung der Werte sieht folgendermaßen aus:

$$0\text{ PWM} = 0\text{ PWM} \quad / \quad 1\text{ PWM} = 71\text{ PWM} \quad / \quad 255\text{ PWM} = 255\text{ PWM}.$$

Das ausgegebene Signal *Regelung_PWM_Offset* wird in die beiden Switch-Blöcke *PR_PWM_>_0* und *PR_PWM_<=_0* weitergeleitet, um die korrekte Pumpe anzusteuern.

Kriterium für beide Switch-Blöcke, damit *Eingang 1* geschaltet wird, ist *Eingang 2 > Threshold* mit *Threshold* = 0 und *Eingang 2* \triangleq *PWM_Vergleich*.

Für den Parameter *PAR_PR_Vergleich_Switch* ist eine 0 hinterlegt, die durchgegeben wird bei *Eingang 2* \leq *Threshold*.

Zur Festlegung, wann welcher Switch welches Signal schaltet, wird das zuvor erwähnte Signal *PWM_Vergleich* benötigt. Dafür wird *Regelung_PWM_round* vor dem Abs-Block abgezweigt und in dem Vergleichsoperator *PR_Vergleichsoperator* verglichen. Durch einen positiven Regelfehler wird eine positive PWM und durch einen negativen Regelfehler eine negative PWM erzeugt. Der Ausgang des Vergleichsoperators sieht wie folgt aus:

- wenn $PWM > 0$, dann ist $PWM_Vergleich = 0$,
- wenn $PWM \leq 0$, dann ist $PWM_Vergleich = 1$,
- mit $PAR_PR_Vergleich_Vergleichsoperator = 0$.

Die Switch-Schaltung ermöglicht es, die Zufluss-Pumpe bei einer positiven PWM und die Abfluss-Pumpe bei einer negativen PWM anzusteuern.

Aufgrund von Fehlermeldungen hinsichtlich eines inkorrekten Datentyps und der Tatsache, dass der Arduino PWM-Block nur ganzzahlige Werte ausgeben kann, werden die Signale in eine 16-Bit-Ganzzahl umgewandelt.

Je nach Vergleichsergebnis wird die PWM entweder an das Areal *Regelung_PWM_Zufluss* oder das Areal *Regelung_PWM_Abluss* gegeben und über einen PWM- und Digital-Output wie folgt an die H-Brücke übermittelt:

- *Pumpe_Regelung_Zufluss*: PWM-Pin 3 und 4 für Zufluss Pumpe
- *Pumpe_Regelung_Abluss*: PWM-Pin 6 und 7 für Abfluss Pumpe.

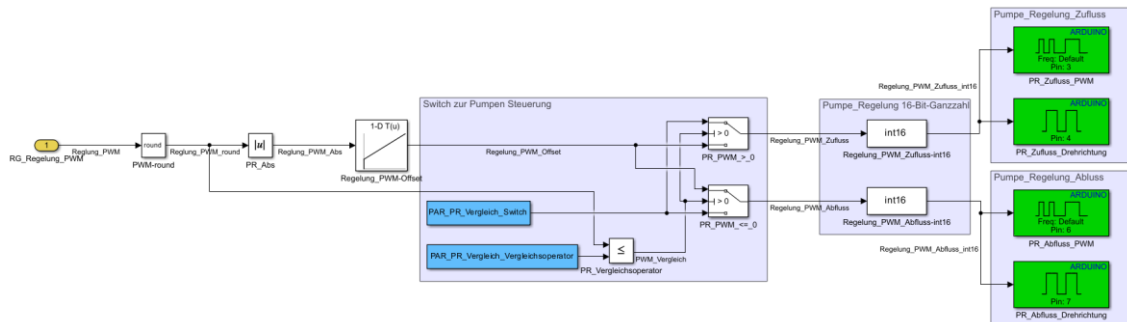


Abbildung 27: Softwareumsetzung der Komponente *Pumpe_Regelung*

3.4.2.5 Pumpe_Stoerung

Hardware: Die R385 (siehe Abbildung 26) für die Störung wird ebenfalls mit einer H-Brücke und einem Not-Aus-Schalter verbunden. Auch diese Pumpe weist Schwankungen von $1,7 \frac{l}{min}$ bis $2,1 \frac{l}{min}$ bei der geförderten Menge auf.

Software: Bei der softwareseitigen Umsetzung ist in Abbildung 28 zu sehen, wie das eingehende BUS-Signal *BES_Stoerung_Prozent*, über den 1-D Lookup Table *Stoerung_Prozent-PWM_Offset*, einem PWM-Wert zugeordnet wird. Auch hier ist ein Offset von 71 hinterlegt. Die Zuordnung sieht dabei wie folgt aus:

$$0 \% \triangleq 0 \text{ PWM} \quad / \quad 1 \% \triangleq 71 \text{ PWM} \quad / \quad 100 \% \triangleq 255 \text{ PWM}.$$

Im Areal *Pumpe_Stoerung 16-Bit-Ganzzahl* wird das Signal *Stoerung_PWM* ebenfalls in eine 16-Bit-Ganzzahl umgewandelt und anschließend über den Ausgang *PS_Pumpe_Stoerung_PWM* und *PS_Pumpe_Stoerung_Drehrichtung* über die PWM-Pins 8 und 9 des Arduino an die H-Brücke ausgegeben.

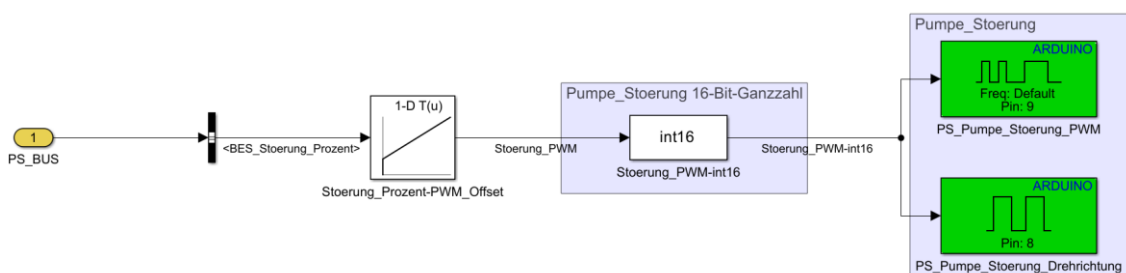


Abbildung 28: Softwareumsetzung der Komponente *Pumpe_Stoerung*

3.4.2.6 Regelung

Hardware: Für die Regelung kommt ein Arduino MEGA zum Einsatz, der den Regelfehler verarbeitet und daraus das PWM-Signal zur Ansteuerung der Pumpe generiert. Der Arduino ist mit den übrigen Komponenten verbunden und wird vertikal an der Druckplatte montiert, siehe Abbildung 19b. Die Verkabelung erfolgt gemäß dem zuvor definierten Schaltplan in Abbildung 10.

Software: Die Umsetzung der Regelung (Abbildung 29) ergibt sich aus der Simulation und bestimmt aus der Differenz zwischen h_{soll} und h_{mess} kontinuierlich den Regelfehler d_h . Dieser wird in einen P-Anteil und einen I-Anteil aufgeteilt. Der Regelfehler wird für den P-Anteil mit dem Parameter PAR_RG_KP und für den I-Anteil mit dem Parameter PAR_RG_KI multipliziert und über einen Integrator aufsummiert. Der Integrator ist entsprechend dem Anti-Windup auf Minimal- und Maximalwerte (-255 bis 255) beschränkt. Anschließend werden beide Anteile im Sum-Block zusammenaddiert. Der daraus entstandene Regelwert wird mittels eines Saturation-Blocks von -255 bis 255 begrenzt, um die korrekte Stellgröße für die Pumpe_Regelung zu erhalten. Das daraus resultierende Signal $Reglung_PWM$ wird aus der Komponente ausgegeben und für die Pumpensteuerung zur Verfügung gestellt.

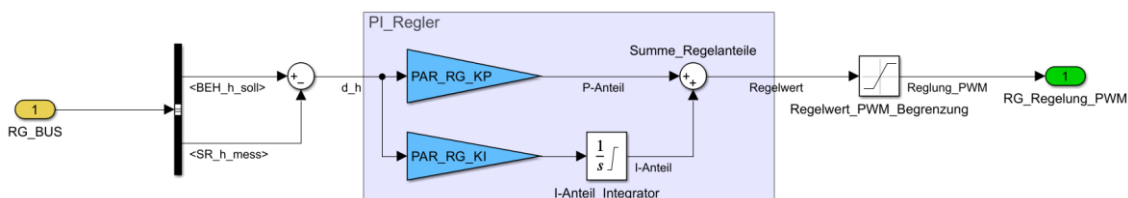


Abbildung 29: Softwareumsetzung der Komponente Regelung

Durch die Simulation des Systems konnte der Regler zuvor ausführlich getestet und in die Software übernommen werden. Die Parametrierung des Reglers ist entsprechend Kapitel 3.3.3.2 mit $KP = 10000$ und $KI = 5000$ festgelegt.

3.4.2.7 Sensor

Hardware: Die orange Halterung auf den folgenden Bildern wurde entworfen und 3D gedruckt. Sie ermöglicht eine sichere Montage für den MPX5010DP und bietet Schutz vor Wasser von oben und unten.

(a) Draufsicht



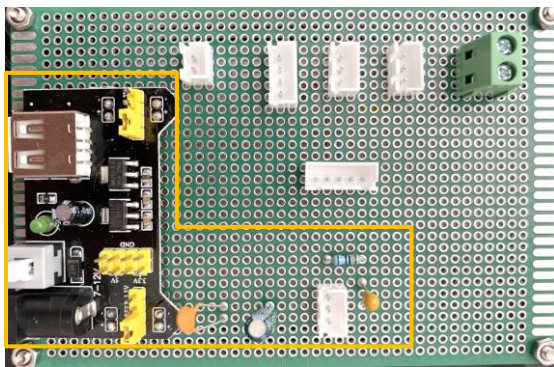
(b) Seitenansicht



Abbildung 30: MPX5010DP mit Halterung

Abweichend vom Anschlussplan haben die Tests gezeigt, dass eine zusätzliche Ausgangsfilterung nach AN1646 benötigt wird, um die Messwerte zu stabilisieren und das Sensorrauschen zu minimieren. Die Stromversorgung des Sensors ist vom Arduino entkoppelt worden und wird über ein Power Supply Module (PSM) bereitgestellt. Die umgesetzte Ausgangsfilterung auf der Lochrasterplatine ist in der folgenden Abbildung gelb umrandet.

(a) Ansicht von oben



(b) Ansicht von unten

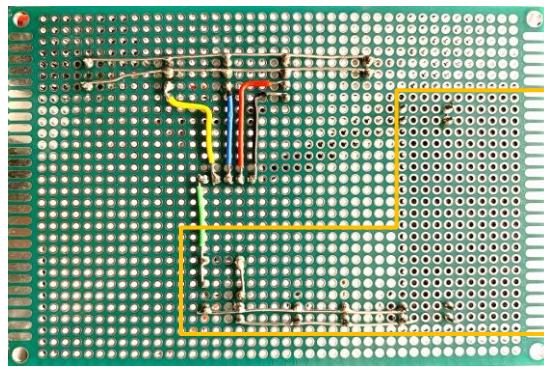


Abbildung 31: Lochrasterplatine

Die Umsetzung der Anpassungen führt zu einer signifikanten Reduzierung des Rauschens. Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse vor (S1) und nach (S3) der angepassten Ausgangsfilterung. Die Messwerte der Nullpunktmessung wurden um zwei Digitalwerte reduziert. Die Standardabweichung der Nullpunktmessung konnte von 0,5862 auf 0,039547 verbessert werden. Während die Spannungsversorgung vor der Entkoppelung (S2) um ein Bit schwankt, weist die Versorgung danach (S4) keine Schwankungen auf.

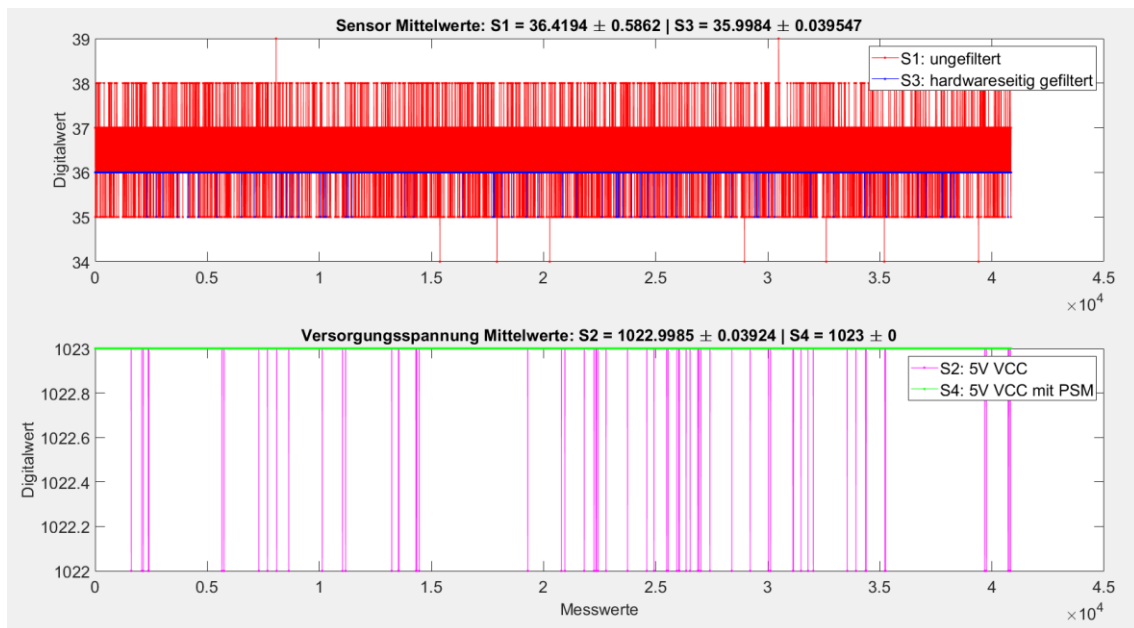


Abbildung 32: Vergleich von ungefilterten und gefilterten Sensormesswerten

Software: Basierend auf den Testergebnissen, ist zur Verbesserung der Messwertqualität eine zusätzliche Softwarefilterung in Form des PT1-Filter nach Prof. Dr.-Ing. Mirek Göbel (2023) implementiert, siehe [11].

Abbildung 33 zeigt die entwickelte Komponente. Das eingelesene Signal $h_mess_Digitalwert$ wird in den Filter geführt. Die Verstärkung des Filters ist auf 1 gesetzt, da eine Regelung in der Komponente nicht behandelt wird.

Nach der Filterung werden die Werte zusätzlich gerundet, um das Signal weiter zu glätten und eine bessere Zuordnung der jeweiligen Wasserhöhe zu ermöglichen. Die Zuordnung des Digitalwerts zur entsprechenden Höhe erfolgt mittels des 1D-Lookup Table $h_mess_Digitalwert_Ist_Hoehe$ und wird anschließend als h_mess ausgegeben.

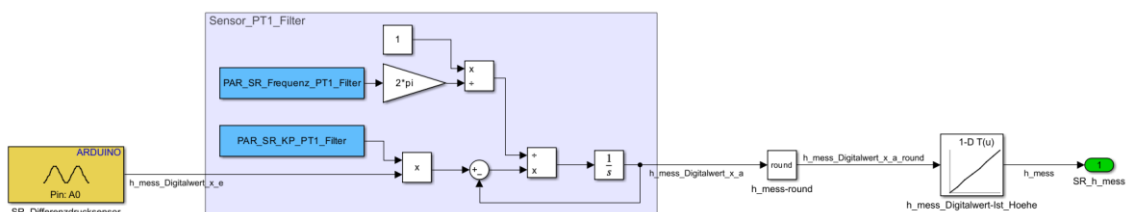


Abbildung 33: Softwareumsetzung der Komponente Sensor

Messwerte: Die Daten in der folgenden Abbildung verdeutlichen die Auswirkungen der Filterung. Das rote Signal in den vier Darstellungen zeigt die stark verrauschte Rohmessung des Sensors. Der Sensor wurde dafür an die Messleitung im Tank angeschlossen und der Tank mit Wasser befüllt. Dies wurde für eine Filterung von 0,1 Hz, 1 Hz, 1 Hz gerundet und 10 Hz durchgeführt.

Es zeigt sich, dass 1 Hz und 1 Hz gerundet die besten Ergebnisse erzielen, indem das Rauschen weiter unterdrückt und das Signal geglättet wird ohne ein zu großes *Delay* (z. Dt. Verzögerung) zu verursachen. Die Rundung nach dem Filter fängt dabei weitere Schwankungen ab.

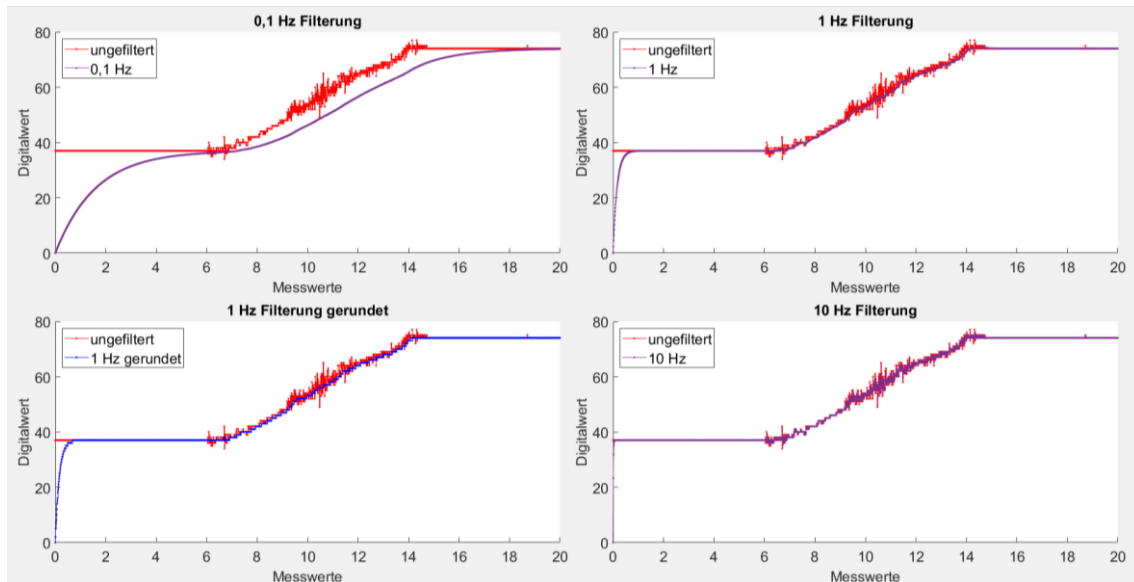


Abbildung 34: Vergleich verschiedener Filterfrequenzen

Zur Sensor-Kalibrierung sind die Digitalwerte der jeweiligen Wasserhöhe in einer Parameterdatei hinterlegt. Die Sensorkennlinie weist Werte von $0,00\text{ m}$ bis $0,35\text{ m}$, in $0,05\text{ m}$ Schritten auf. Tests zur Kalibrierung zeigten, dass der Sensor die tatsächliche Wasserhöhe im Tank mit einer Genauigkeit von $\pm 5\text{ mm}$ erfasst. Die im Aufbau gemessenen Werte wurden mithilfe des Curve-Fitter-Tools in MATLAB ausgewertet, um das Bestimmtheitsmaß R^2 zu ermitteln. Dabei ergab sich ein R^2 von $0,9994$, was eine nahezu perfekte Anpassung der Regressionslinie an die gemessenen Kalibrierdaten zeigt.

Obwohl der Sensor laut Herstellerdaten eine nahezu lineare Kennlinie aufweist, wurde die Kalibrierung bewusst im realen Aufbau durchgeführt, da Faktoren wie Schlauchlänge, Montagehöhe oder Luftblasen im System das Verhalten beeinflussen können. Ein R^2 nahe 1 zeigt, dass auch unter realen Bedingungen eine sehr zuverlässige Erfassung der Wasserhöhe möglich ist. Die vollständige Kalibrierung sowie das Diagramm sind in Anhang A9 dargestellt.

3.4.2.8 I2C_LCD_20x4

Hardware: Abbildung 35 zeigt das montierte Display in der Benutzerkonsole.

Die Verbindung erfolgt über ein 4-poliges Kabel mit einem Stecker an der I2C-Schnittstelle des Displays.

(a) Ansicht von unten



(b) Ansicht von oben



Abbildung 35: Deckel für die Benutzerkonsole mit LCD-Display

Software: Abbildung 36 zeigt die Umsetzung dieser Komponente in Simulink.

Die Werte von h_{soll} und h_{mess} werden mit dem Parameter `PAR_LCD_Millimeter` multipliziert, um eine Umrechnung von Metern in Millimeter vorzunehmen ($PAR_LCD_Millimeter = 1000$).

Die Erstellung des IO-Device-Builders, wurde anhand des Kapitels „Get Started with IO Device Builder“ im MATLAB Hilfe-Center durchgeführt, siehe [17]. Der dazugehörige Code ist im Anhang A10 einsehbar. Als Datenformat wurde `int16` gewählt, um Werte über 128 korrekt darzustellen. Daher erfolgt eine Konvertierung der Signale in 16-Bit-Ganzzahlen mithilfe des Data-Type-Conversion-Blocks.

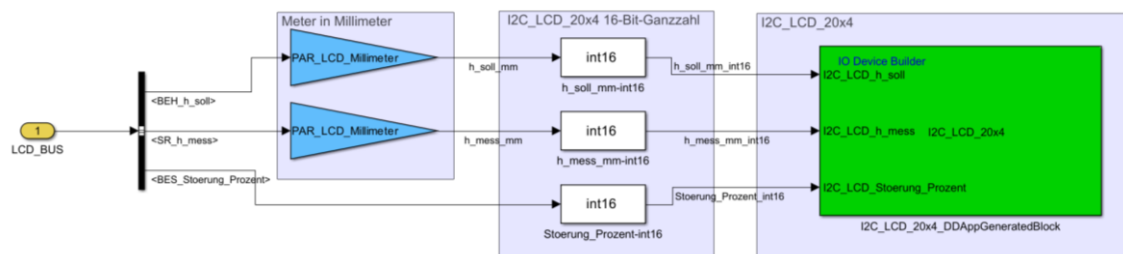


Abbildung 36: Softwareumsetzung der Komponente I2C_LCD_20x4

Für die I2C-Schnittstelle wird die *LiquidCrystal I2C* „Library“ von Frank de Brabander verwendet.

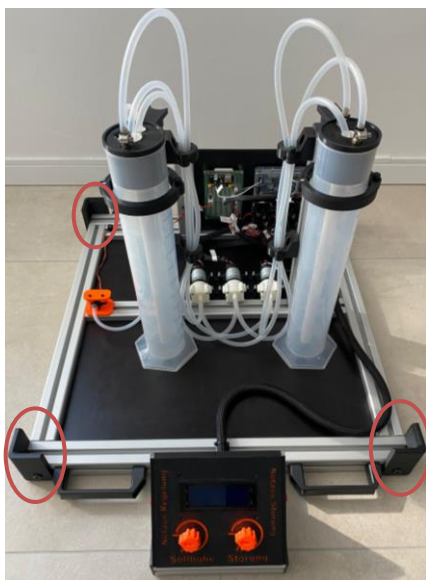
3.4.3 Systemintegration

Nach der Umsetzung der einzelnen Komponenten wurde das komplette Wasserstandssystem wie geplant zusammengesetzt (siehe Abbildung 37).

Die beiden Zylinder bilden ein geschlossenes Kreislaufsystem. Um Ablagerungen zu vermeiden, wird destilliertes Wasser verwendet. Die Schläuche sind entsprechend der Konzeptskizze verlegt und angeschlossen. Pumpen, Platine, H-Brücken und Arduino wurden wie vorgesehen befestigt. Der Sensor ist links neben dem Primärtank montiert. Alle Kabel sind beschriftet und wenn möglich mit Steckverbindern ausgestattet. Der zugehörige Anschlussplan ist im Anhang A11 zu finden.

Die Benutzerkonsole ist außerhalb des Plexiglas-Gehäuses montiert und die Notausschalter sind seitlich an der Konsole angebracht. Das Plexiglas-Gehäuse ist auf die Rahmenkonstruktion aufgelegt und wird an allen vier Kanten mittels Halter (rote Umrandung a und b) in Position gehalten.

(a) Rahmenaufbau



(b) Rahmenaufbau mit Plexiglas-Gehäuse

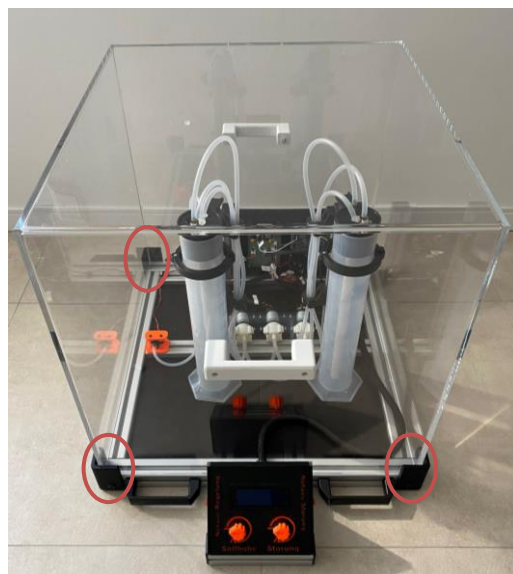


Abbildung 37: Umgesetztes Wasserstandssystem

3.4.4 Transport- / Präsentationswagen

Zusätzlich wurde für das Gesamtsystem ein Transport- und Präsentationswagen entworfen. Dieser wird aus Holz gefertigt und ist auch für künftige Projekte flexibel einsetzbar. Die Abbildung 38 stellt das CAD-Modell des Wagens dar und dient der Visualisierung. Zur besseren Übersichtlichkeit befindet sich die zugehörige technische Zeichnung im Anhang A13. Der Wagen wurde in CAD modelliert.

Lediglich die Rollen wurden zur besseren Detaillierung als fertige Modelle aus einer Online-Bibliothek integriert, siehe [4].

Der Entwurf basiert auf einer stabilen Rahmenkonstruktion aus runden Hölzern (70 mm) an den vier Ecken und rechteckigen Holzleisten (40 · 40 mm), kombiniert mit schwarz beschichteten Multiplexplatten für die Ablagen.

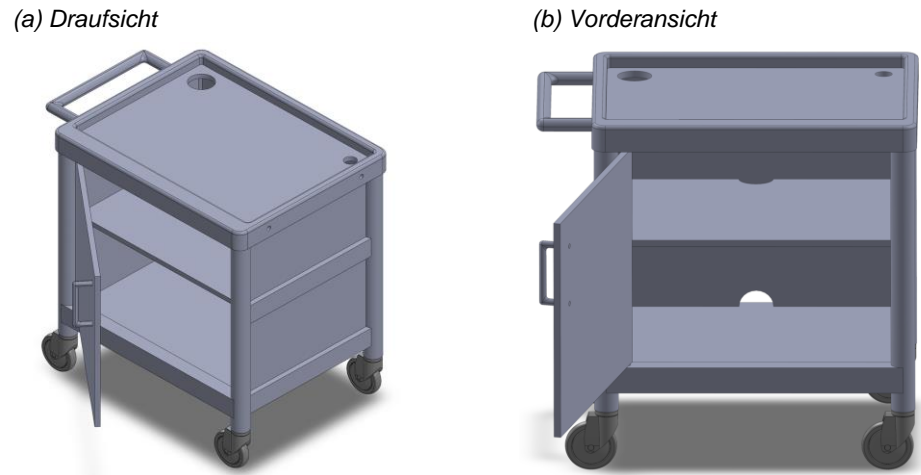


Abbildung 38: Transportwagen. Rollen Quelle: [4]

Die Merkmale des Wagens im Überblick:

Tabelle 4: Merkmale des Transport- / Präsentationswagens

Merkmal	Beschreibung
Außenmaße	Breite: 750 mm, Tiefe: 940 mm, Höhe mit Rollen: ca. 1000 mm
Auflagefläche	Die oberste Platte (630 mm · 860 mm) dient als robuste Montage- oder Auflagefläche, mit einem umlaufenden Rand (40 mm hoch).
Fächer	Zusätzlicher Stauraum für Zubehör, Werkzeuge oder Kabel.
Griff	Ein seitlicher Griff ermöglicht komfortables Manövrieren des Wagens.
Rahmen	Rundum verschlossen mit einer seitig angebrachten Tür.
Kabeldurchführungen	Zwei unterschiedliche Löcher mit Ø 50 mm und Ø 100 mm auf der Auflagefläche; sowie ein Loch auf Rückwandhöhe im oberen Fach und ein Loch in der Rückwand im unteren Fach.
Mobilität	Vier Rollen, von denen zwei lenkbar und mit Bremsen versehen sind.

Die Integration der Software- und Hardware-Komponenten zum Gesamtsystem konnte erfolgreich umgesetzt werden und ermöglicht umfangreiche Systemtests und Experimente. Eine Übersicht aller verwendeten Bauteile findet sich in Anhang A12. Die Ergebnisse daraus werden im nächsten Kapitel thematisiert.

4 Systemtest und Ergebnisse

Dieses Kapitel dokumentiert und analysiert die Tests des realen Systems, sowie den Vergleich zwischen simuliertem und realem Regelverhalten. Zudem werden weitere Experimente mit verschiedenen Einstellungen aufgezeigt. Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit vorgestellt. Der System- und Abnahmetest finden sich unter Anhang A14.

4.1 Systemtest

Die Systemtests wurden mit den ermittelten Parametern mit $KP = 10000$, $KI = 5000$ und 1 Hz durchgeführt, siehe Kapitel 3.3.3.2 und 3.4.2.7.

Regelung: Abbildung 39 zeigt die Daten des ersten Systemtests. In der linken oberen Grafik (Wasserstandshöhe) sind der zeitliche Verlauf von Sollhöhe, Ist-Höhe und Regelfehler dargestellt. Eine Sollhöhe von $0,30\text{ m}$ wird bei ca. Sekunde 15 (schwarze Strichlinie) eingestellt. Die Ist-Höhe folgt nach einer kurzen Verzögerung und schwingt über die Sollhöhe.

Trotz Anti-Windup muss sich der Integrator nach Erreichen der Sollhöhe noch abbauen, weshalb das System überschwingt und erst nach rund 70 s den Sollwert mit $\pm 5\text{ mm}$ erreicht.

Die Sensorwerte (obere rechte Grafik) zeigen, dass die Filterung das Rauschen reduziert. Abweichend zu den Komponententests wird ein *Delay* von bis zu 2 s erzeugt. Dies führt insgesamt zu trägerem Regelverhalten.

Der PI-Regler reagiert typisch: Wie die untere linke Abbildung zeigt, fällt der P-Anteil mit Annäherung an die Sollhöhe ab, während der I-Anteil aufintegriert und bei 255 limitiert ist. Der P-Anteil ist in der Lage, ausreichend gegenzusteuern. Das Anti-Windup funktioniert wie gewünscht.

Die rechte untere Grafik (PWM) zeigt, wie die Zufluss Pumpe (orange Linie) zu Beginn mit dem maximalen PWM-Wert angesteuert wird. Sobald die Sollhöhe erreicht ist, erfolgt mit einer leichten Verzögerung die Ansteuerung der Abflusspumpe (lila). Die Verzögerung ist damit zu begründen, dass die Steuerung der Pumpen mit dem positiven oder negativen PWM-Wert erfolgt. Da der I-Anteil und die Filterung eine Verzögerung erzeugen, wird diese auf die Pumpensteuerung übertragen. Die Störungspumpe (rot) bleibt deaktiviert, da keine Störung eingebracht wurde.

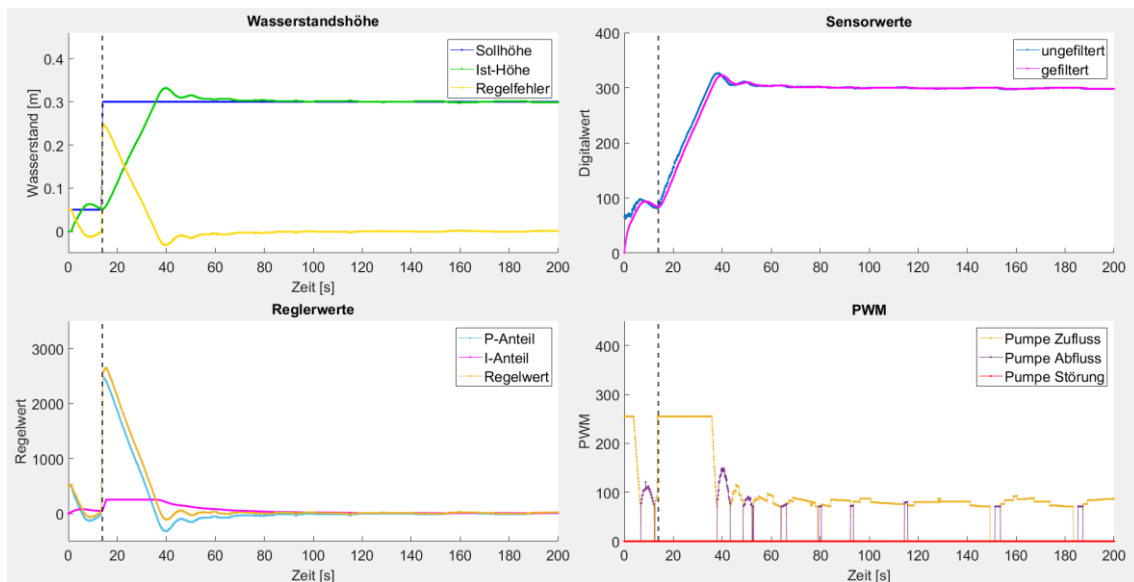


Abbildung 39: 1. Systemtest mit Anfahren der Soll-Höhe

Es scheint, dass sowohl die Druckmessung wie auch die Pumpen eine Totzeit oder zumindest eine Verzögerung der Reaktion bewirken, wodurch es zu Über- und Untersteuerungen kommt und das System immer etwas um die Sollhöhe schwankt. Dennoch kann das System die gewünschte Sollhöhe zuverlässig mittels Regelung erreichen.

Störung: Die Abbildung 40 zeigt die Auswirkungen der Einbringung einer Störung. Der gesamte zweite Systemtest findet sich unter Anhang A15. In der oberen linken Grafik ist ersichtlich, dass ab etwa Sekunde 70 eine Störung mit 90 % Intensität zugeschaltet wird. Der Wasserstand sinkt daraufhin kurzzeitig unter die Sollhöhe, bevor das System ab ca. Sekunde 81 erfolgreich gegenregelt. Ab etwa Sekunde 143 ist die Störung vollständig kompensiert.

Die obere rechte Grafik zeigt die Sensorwerte. Hier wird die Trägheit der Druckmessung deutlich. Während die Störung bei Sekunde 71,65 initialisiert wird, zeigt der Sensor erst ab Sekunde 72,55 einen sinkenden Wasserstand an. Es gibt somit eine zeitliche Verzögerung durch die Messung von fast einer Sekunde. Hinzu kommt eine weitere Verzögerung durch die Filterung.

In der unteren linken Grafik (Reglerwerte) wird die Reaktion des PI-Reglers ersichtlich: Nach der Initialisierung der Störung reagiert zunächst der P-Anteil schnell, während der I-Anteil langsam steigt. Hier zeigt sich das Zusammenspiel zwischen P- und I-Anteil und der Ist-Höhe. Der P-Regler ist allein nicht in der Lage die Ist-Höhe zu korrigieren. Erst mit dem I-Anteil ist eine Kompensierung der Störung möglich. Während der P-Anteil aufgrund des kleiner werdenden

Regelfehler sinkt, integriert sich der I-Anteil bei bestehendem Fehler weiter auf. Durch das aufintegrieren steigt der Gesamtregelwert weiter an und bringt das System zurück auf den Sollwert und hält es dort. Der dynamische Verlauf der Regleranteile bestätigt, dass die Störung aktiv ausgeglichen wird.

Die untere rechte Grafik („PWM“) verdeutlicht, wie der PWM-Wert der Pumpe Zufluss mit einer zeitlichen Verzögerung über den PWM-Wert der Pumpe Störung geregelt wird. Sobald die Sollhöhe erreicht ist, sollte der PWM-Wert von Störung und Zufluss gleich sein. Die ersichtlich höhere PWM und die ungewöhnlich lange Störkompensation deuten auf eine Ungleichmäßigkeit der Pumpen hin.

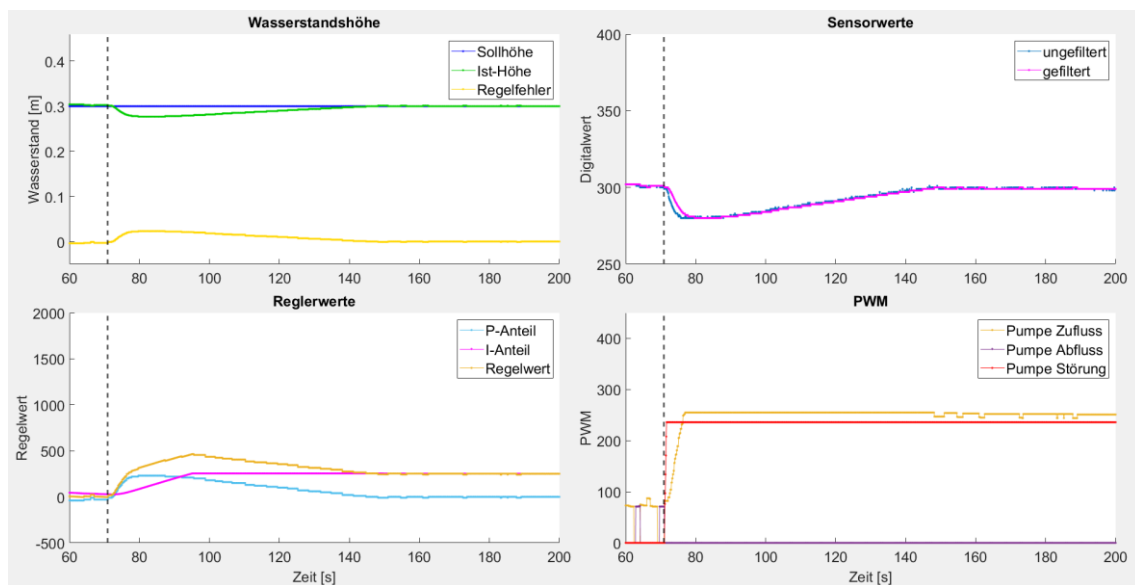


Abbildung 40: 2. Systemtest mit Störung

Der zweite Systemtest belegt, dass das System in der Lage ist, eine Störung zu kompensieren. Es zeigten sich jedoch auch hier mehrere Auffälligkeiten, die auf physikalische und systemtechnische Ursachen zurückzuführen sind.

So war neben dem *Delay* durch die Filterung die Störkompensation deutlich länger als erwartet. Ursachen können die im Test gemessenen Fördermengenabweichungen der Pumpen oder Druckeinflüsse in den Zu- und Abfluss-Leitungen sein.

Der Zufluss von oben erzeugt eine gewisse Totzeit im System und sorgt beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche für Wellenbewegungen, was vor allem bei niedrigen Wasserständen zu einer Verfälschung der Messwerte führt.

Zudem wurden kontinuierliche Schwankungen der gemessenen Ist-Höhe festgestellt, obwohl der reale Wasserstand visuell konstant blieb. Dies verweist auf eine Problematik in der Messkette.

Auch die installierten Not-Aus-Schalter funktionieren nur bedingt. Die 12 V Leistung wird getrennt, die Pumpen werden aber noch über 5 V vom Arduino mit geringerer Leistung weiter betrieben, sobald ein gewisser PWM-Wert erreicht ist.

Des Weiteren ging der Regelfehler nie auf 0, da es immer kleine Schwankungen des Wasserstands gab. Aus diesem Grund wurde nach den ersten beiden Systemtests eine Rundung des Regelfehlers auf drei Nachkommastellen softwareseitig integriert. Die Genauigkeit der Regelung wird damit auf einen Millimeter beschränkt, um unnötige Dynamiken zu vermeiden. Die nachfolgenden Tests und Experimente wurden mit dieser Anpassung durchgeführt.

4.2 Vergleich von Simulation und realer Hardware

Zur Validierung des entwickelten Regelungskonzepts wurden Messreihen am realen System durchgeführt und mit der Simulation verglichen. Die Ausgangsbedingungen waren in allen Fällen:

- Stoppzeit: Simulation 120 s, reales System 140 s
- Sollhöhe: 0,30 m; Start-Ist-Höhe: 0,05 m
- Störung: Simulation ab Sekunde 60 mit 90 %, reales System ab ca. Sekunde 70 stark steigend mit ca. 90 %
- Reglerparameter pro Testreihe:
 1. $KP = 10000$, $KI = 5000$
 2. $KP = 10000$, $KI = 10000$

Die Abbildung 41 zeigt den Vergleich der Sollhöhe, Ist-Höhe und Regelfehler der Simulation (rechte Seite) des realen Systems (linke Seite). Die umfassenden Ergebnisse finden sich in Anhang A16.

Das reale System reagiert im Vergleich zur Simulation deutlich träger und zeigt ausgeprägteres Überschwingen. Bei $KI = 10000$ tritt eine schnellere Reaktion der Sollwertänderung auf, allerdings auch mit stärkeren Schwingungen. Mit $KI = 5000$ schwingt das System dafür wesentlich länger oberhalb der Sollhöhe.

Bei der Störung zeigt $KI = 5000$ eine schnellere Kompensation als $KI = 10000$, obwohl ein höherer I-Anteil eine schnellere Kompensation erwarten lässt.

Überraschenderweise ist die Systemzeit im realen System mit $23,9\text{ s}$ ($KI = 5000$) und mit $21,9\text{ s}$ ($KI = 10000$) deutlich geringer als in der Simulation mit ca. 25 s ($KI = 5000$ und $KI = 10000$). Beides deutet erneut auf eine ungleichmäßige Fördermenge der Wasserpumpen hin.

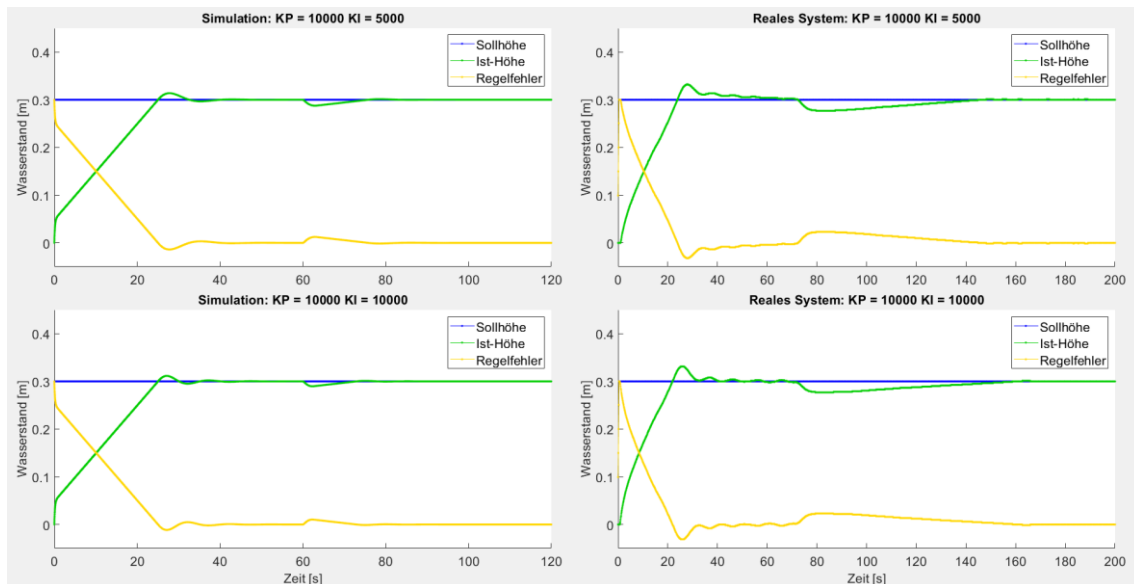


Abbildung 41: Vergleich von Simulation und realer Hardware bei verschiedenen Reglerkombinationen

Der Vergleich der aufsummierten Regelfehler verschiedener Reglerparameter in der folgenden Abbildung zeigt, dass sowohl in der Simulation als auch im realen System die Regelgüte mit steigenden KP- und KI-Werten höher ist.

Die Werte der Simulation sind dabei geringer als die des realen Systems. Das Ergebnis deckt sich mit der stärkeren Schwingung und der deutlich längeren gemessenen Zeit der Störkompensation.

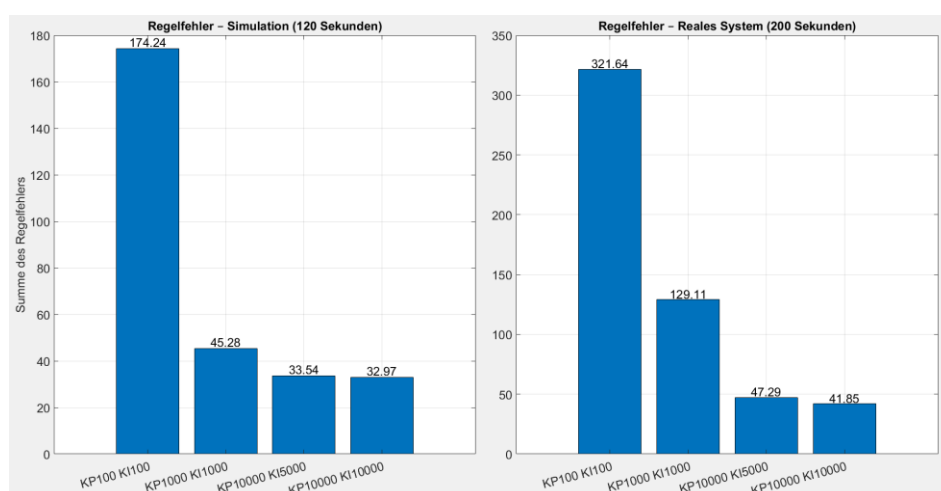


Abbildung 42: Vergleich der Regelfehler zwischen Simulation und realem System

Der Vergleich zeigt: Das Regelverhalten in der Simulation ist deutlich idealisierter als im realen System. Nichtlineare Effekte, wie eine ungleichmäßige

Pumpenleistung oder Verzögerungen, führen zu einem stärkeren Schwingen und einer verzögerten Störkompensation. Dennoch zeigt sich, dass hohe Werte von KP und KI eine verbesserte Regelgüte liefern. Der Vergleich der aufsummierten Regelfehler unterstreicht, dass $KI = 10000$ gegenüber $KI = 5000$ einen geringeren Fehler erzeugt, aber mit mehr Schwingungen verbunden ist, was im Sinne der Stabilität kritisch sein kann.

4.3 Experimente

Während der Systemtests zeigten sich verschiedene Auffälligkeiten, welche im Rahmen gezielter Experimente analysiert und ausgewertet wurden. Ziel war es, die Filterung des Sensorsignals, das Regelverhalten bei verschiedenen Reglerparametern sowie die Reaktion des Systems auf externe Störungen besser zu verstehen und die Ursachen für langfristige Abweichungen bei konstanter Sollhöhe zu identifizieren.

Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Optimierung. Die vollständigen Ergebnisse der Experimente finden sich im Anhang A17.

4.3.1 Filterung

Zur Überprüfung der ausgewählten Filterung wurde im Rahmen der Experimente der Einfluss unterschiedlicher Frequenzen auf das System untersucht. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung anhand der Sensorwerte dargestellt. Eine Filterung mit $0,1\text{ Hz}$ (oben links) erzeugt ein starkes *Delay* und die gefilterten Werte laufen der realen Entwicklung hinterher. Eine präzise Ermittlung der Wasserstandshöhe ist nicht möglich.

Abweichend zu den Testergebnissen in Kapitel 3.4.2.7, bewirkt die Filterung über 1 Hz (oben rechts) ein deutlich erkennbares *Delay*. Der Wasserstand kann zwar zuverlässig gemessen werden, das *Delay* wirkt sich jedoch negativ aus und führt zu einer verspäteten Reaktion und somit zu Schwingungen um die Sollhöhe.

Gleiches ergibt sich für eine Frequenz von 10 Hz (unten rechts). Hier werden hingegen auch kleinste Störungen erfasst, was zu einem unruhigeren Signal führt. Die hohe Empfindlichkeit führt zu unnötigen Regelaktivitäten (z. B. durch minimale Schwankungen oder elektrische Störungen).

Es zeigt sich, bei 5 Hz (unten links) ist eine sehr gute und zeitlich schnelle Annäherung der gefilterten Werte an die realen Messwerte erkennbar.

Der Regelfehler wird minimiert, da der Regler schneller auf Veränderungen reagieren kann, ohne eine zu große Empfindlichkeit aufzuweisen.

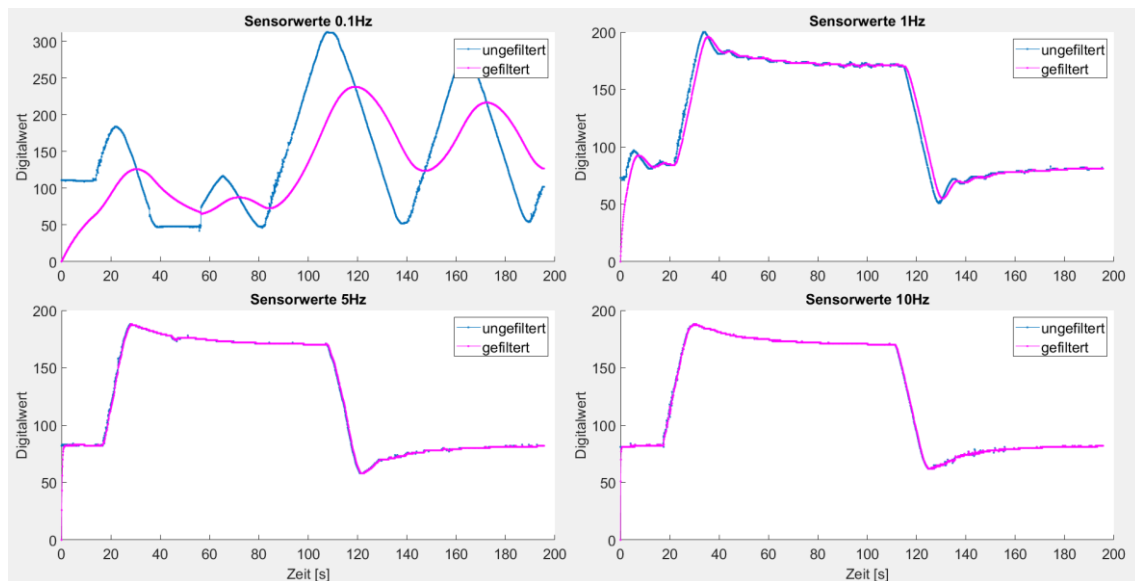


Abbildung 43. Vergleich verschiedener Filterfrequenzen bei KP10000 und KI5000

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass im Gegensatz zu den Tests der Einzelkomponente Sensor, eine Filterung mit 5 Hz im Gesamtsystem sinnvoller ist. Sie erlaubt eine präzise und stabile Regelung, ohne zu großes *Delay* und unnötige Verstärkung von Schwankungen.

Die folgende Abbildung zeigt, welche Reglerkombination bei 5 Hz eine höhere Regelgüte aufweist. Im Vergleich zu der 1 Hz Filterung, siehe Abbildung 42, bewirkt die höhere Frequenz einen geringeren Regelfehler. Wobei die Kombination $KP = 10000$ und $KI = 10000$ mit 34,40 noch immer unterhalb von $KP = 10000$ und $KI = 5000$ mit 37,68 liegt.

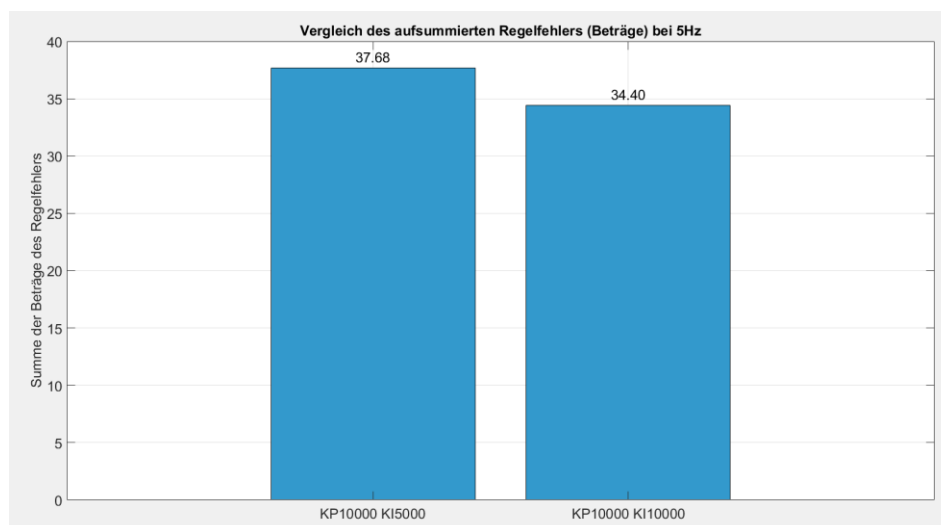


Abbildung 44: Regelfehler Vergleich bei 5 Hz

Es zeigt sich, dass bei 5 Hz mit $KP = 10000$ und $KI = 10000$ die höchste Regelgüte erzielt wird.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse, ist die Frequenz dauerhaft auf 5 Hz sowie die Reglerparameter auf $KP = 10000$ und $KI = 10000$ festgelegt. Alle weiteren Experimente und Tests wurden mit diesen Werten durchgeführt.

4.3.2 Regelung

Um die Regler-Auswahl in Kapitel 2.2.3 zu überprüfen, bietet sich der Vergleich des Systemverhaltens bei einem P-, PI- und PID-Regler am realen System an. Die Sollhöhe ist mit 0,30 m und die Ist-Höhe zu Beginn mit 0,05 m vorgegeben. Ab etwa 70 s ist in allen Fällen eine 90 % Störung eingebracht worden.

Beim P-Regler zeigt sich, wie bereits in Kapitel 2.2 und 3.3.1 beschrieben, das typische Verhalten eines PT1-Systems. Die Ist-Höhe nähert sich der Sollhöhe an und wird konstant gehalten. Bei der Störung reagiert der P-Regler, die entstandene Differenz gleicht er jedoch nicht aus. Eine bleibende Regelabweichung ist die Folge und bestätigt die Ergebnisse aus Kapitel 2.2.3.

Mit dem PI-Regler ($KI = 10000$) wird die Störung hingegen vollständig kompensiert. Die Ist-Höhe erreicht nach kurzem überschwingen die Sollhöhe und bleibt dort stabil.

Der PID-Regler (zusätzlich $KD = 0,5$) bringt im vorliegenden System keine sichtbare Verbesserung und ist, wie in Kapitel 2.2.3 festgestellt, nicht erforderlich.

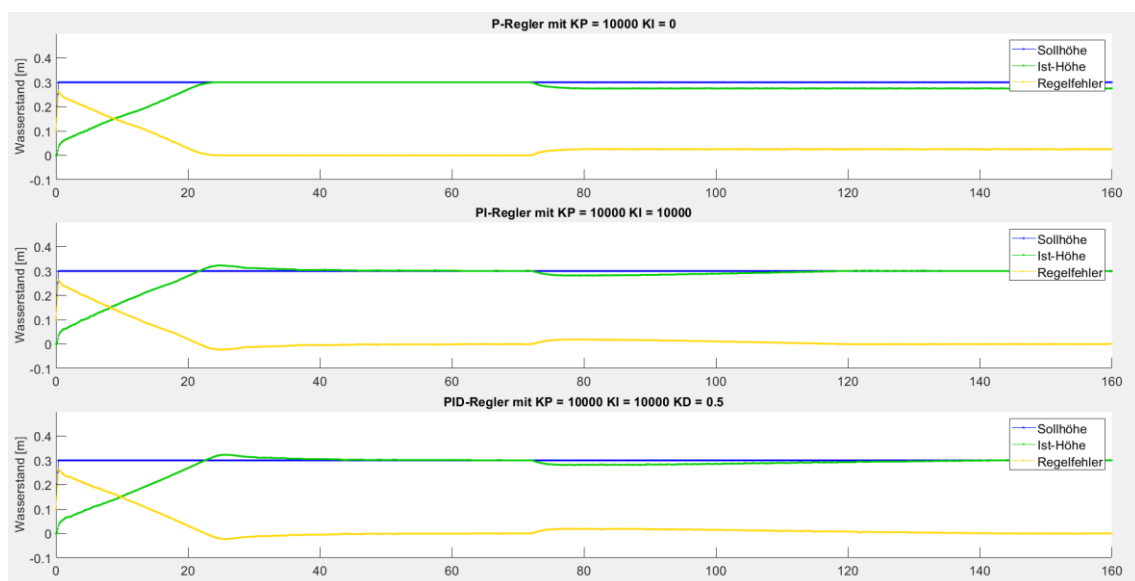


Abbildung 45: Systemverhalten bei P-, PI- und PID-Regler

4.3.3 Störung

Zur Analyse der Systemreaktion auf externe Störungen wurde zunächst die Sollhöhe von 0,30 m angefahren. Anschließend erfolgte die Erhöhung der Störgröße in sechs Stufen (20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 90 % und 100 %). Vor jeder Erhöhung wurde die Störung auf 0 % zurückgesetzt und gewartet, bis das System die Sollhöhe stabilisiert hatte.

Die Daten in Abbildung 46 zeigen verschiedene Störgrößen und bestätigen, dass das System in der Lage ist, die Störungen bis zu einem gewissen Maß erfolgreich zu kompensieren und die Sollhöhe konstant zu halten. Abweichend zu den Ergebnissen der Simulation, liegt die PWM der Zufluss-Pumpe immer leicht über der PWM der Stör-Pumpe.

Bei der sechsten Stufe mit einer 100 % Störung wird sichtbar, dass der maximale Abfluss der Störpumpe den maximal möglichen Zufluss übersteigt, was zu einem Absinken des Wasserstandes führt. Hier zeigt sich deutlich, dass eine Ungleichmäßigkeit in der geförderten Wassermenge der Pumpen vorliegt.

Daraus lässt sich schließen, dass das System Störungen über 90 % nicht mehr zuverlässig ausgleichen kann. Eine exakte Bestimmung der maximalen Kompensationsgrenze war jedoch nicht möglich, da die realen Fördermengen der Pumpen nicht direkt gemessen wurden. Faktoren wie Pumpencharakteristik, Gegendruck in den Leitungen sowie die Korrelation von PWM-Werten und Fördermenge der Pumpe scheinen den Volumenstrom erheblich zu beeinflussen.



Abbildung 46: Systemverhalten bei unterschiedlichen Störgrößen

4.3.4 Langzeittest

Wie bereits im Systemtest angemerkt, gab es Auffälligkeiten bei der Wasserstandsmessung. Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse eines Langzeittests über ca. 70 Minuten, bei dem das System zu Beginn auf eine Sollhöhe von 0,30 m geregelt und anschließend nicht weiter bedient wurde.

Im oberen Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass die Ist-Höhe über die Zeit kontinuierlich abnimmt. Dieses Verhalten wird im unteren Diagramm durch die ebenfalls leicht sinkenden Sensorwerte bestätigt. Es handelt sich hierbei nicht um eine Drift des Sensors, da der Wasserstand in der Messleitung über die Zeit zeigt. Der steigende Wasserstand war reproduzierbar und wurde mit mehreren Sensoren gleicher Bauart und unterschiedlichen Schlauchleitungen beobachtet.

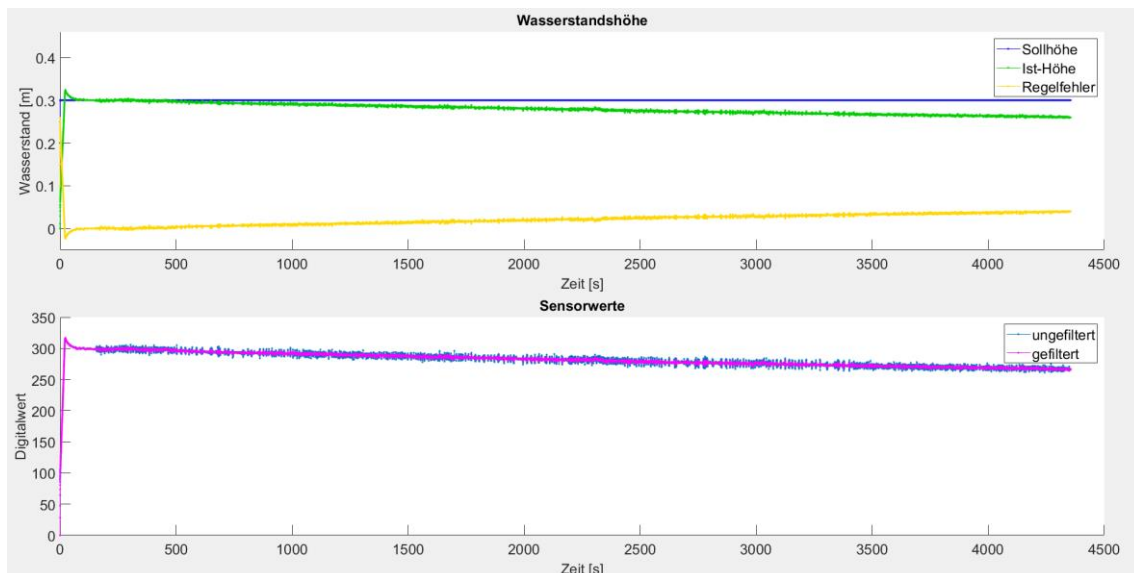


Abbildung 47: Langzeit der Sensorwerte

Der Verdacht liegt nahe, dass eine Undichtigkeit in der Messleitung vorliegt, wodurch Wasser nachströmt und der Druck im Schlauch sinkt. Der Drucksensor zeigt somit einen zu geringen Wasserstand an. Dieser Effekt führt auf Dauer dazu, dass das System annimmt, der Wasserstand würde sinken. Der Regler reagiert entsprechend und bewirkt einen Zufluss, obwohl gar kein realer Wasserverlust vorliegt. Eine exakte Lokalisierung der Undichtigkeit konnte im Rahmen der Tests nicht erfolgen.

4.4 Systemergebnisse

Das abschließende Systemergebnis umfasst alle Erkenntnisse und Änderungen, welche während der Systemtests und der Experimente erzielt und umgesetzt wurden. Hinsichtlich der Anforderungen kommen folgende Ergebnisse zustande:

Tabelle 5: Ergebnis der Anforderungen

Inhalt	Ergebnis
Die Wasserstandsmessung muss eine Genauigkeit von $\pm 5 \text{ mm}$ haben.	Eingeschränkt möglich aufgrund der Leckage in der Messleitung. Dennoch ist eine sehr genaue Kalibrierung von $\pm 5 \text{ mm}$ erzielt worden.
Das System muss, von der minimalen Wasserstandshöhe aus, die maximale Höhe in mindestens 60 Sekunden erreichen und mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \text{ mm}$ konstant halten.	Das System braucht mindestens 70 Sekunden, um von der minimalen Höhe aus, die maximale Höhe zu erreichen und mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \text{ mm}$ konstant zu halten.
Eine Störung von 90 %, muss innerhalb von 30 Sekunden ausgeglichen und die Sollhöhe wieder erreicht werden.	Eine Störung von 90 % wird von dem System in etwa 70 Sekunden kompensiert. Der Wert schwankt aufgrund ungleichmäßiger Fördermengen.
Das Hardwaredesign muss für den Einsatz im Rahmen der praxisorientierten Hochschuldemonstrationen ausgelegt sein.	Das Hardwaredesign ermöglicht den Einsatz im Rahmen der praxisorientierten Hochschuldemonstrationen. Das Plexiglas-Gehäuse schützt effektiv vor unautorisiertem Zugriff.
Es muss eine Benutzerinteraktionsmöglichkeit geben, um den Wasserstand zu beeinflussen.	Die Benutzerkonsole ermöglicht dem Benutzer die Sollhöhe und Störung manuell einzustellen.
Es muss eine visuelle Anzeige des Wasserstandes und der Störung möglich sein.	Das LCD-Display ermöglicht eine zuverlässige visuelle Wiedergabe der Sollhöhe (in mm), Ist-Höhe (in mm) und Störung (in %).
Die Stromführung muss sicher sein und über einen Not-Aus-Schalter verfügen, der leicht zugänglich ist.	Der Not-Aus-Schalter funktioniert nur bedingt. Die 12 V Spannung wird getrennt, die Pumpen werden aber noch über 5 V vom Arduino mit geringerer Leistung betrieben.

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der Systemuntersuchung und der Simulation dem realen System in einigen Bereichen ähnlich sind. So konnte bestätigt werden, dass das Systemverhalten PT1 entspricht und leicht überschwingt. Ebenso zeigen die Ergebnisse, dass die simulierte Anti-Windup Maßnahme im umgesetzten System funktioniert.

Zudem hat sich bestätigt, dass ein P-Regler nicht ausreicht, um Störungen zu kompensieren und es mit zunehmendem KI-Anteil mehr Schwingungen gibt.

Das System ist in der Lage, sämtliche Wasserstände anzufahren und Störungen bis 90 % zu kompensieren

Im Gegensatz zur Simulation zeigt das umgesetzte System deutlich mehr Schwankungen, welche durch Verzögerungen der Pumpen und Druckmessung entstehen. Auch der Zufluss von oben bewirkt weitere Schwankungen und beeinflusst die Messung. Als Resultat daraus liefern eine höhere Filterfrequenz mit einem höheren KI-Anteil ein deutlich besseres Ergebnis.

Probleme hinsichtlich der Undichtigkeit der Messkette und der Ungleichmäßigkeit der Pumpleistung schränken das System in Bezug zur Funktionalität und Störkompensation jedoch ein.

Die finale Software ist in Anhang A18 und ein umfassender Systemtest über einen längeren Zeitraum mit den umgesetzten Ergebnissen in A19 einsehbar.

5 Fazit und Ausblick

Abschließend werden die zentralen Erkenntnisse und Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst, hinsichtlich ihres Nutzens für die praxisorientierte Hochschuldemonstrationen reflektiert und potenzielle Erweiterungen und Optimierungen im Rahmen eines Ausblicks aufgezeigt.

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein geregeltes Wasserstandssystem entwickelt, aufgebaut und getestet. Dabei wurden Sensor und Potentiometer stabilisiert und kalibriert, Messwerte begutachtet und gefiltert und eine Benutzerkonsole zur manuellen Einflussnahme am System und Visualität von Messwerten entwickelt. Die Ergebnisse der Komponenten- und Systemtests zeigen, dass das Wasserstandssystem grundsätzlich stabil arbeitet:

Die Sollhöhe wird mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \text{ mm}$ erreicht und auch Störungen bis 90 % lassen sich erfolgreich kompensieren. Das Regelverhalten des PI-Reglers entsprach in den Grundzügen den Erwartungen aus der Simulation, wenn auch mit Abweichungen wie Totzeiten, *Delay* und schwankender Pumpenleistung.

Die ungleichmäßigen Förderleistung der Wasserpumpen wirkt sich ebenfalls negativ auf die Störkompensation aus. Während Störungen bis 90 % zuverlässig kompensiert werden konnten, kommt es vor, dass eine 100 % Störung zu einem dauerhaften Abfall des Wasserstands führt.

Langzeittests offenbarten zudem ein Problem bei der Zuverlässigkeit der Wasserstandsmessung. Über längere Zeiträume sinkt der gemessene Wasserstand kontinuierlich, obwohl der reale Wasserstand konstant bleibt.

5.2 Praktische Relevanz und Anwendung

Das entwickelte System eignet sich hervorragend für den Einsatz in der Hochschullehre. Es bietet eine anschauliche und interaktive Möglichkeit, Regelungstechnik sowie typische Effekte wie Überschwingen und Störkompensation mittels PI-Regler zu demonstrieren. Die Benutzerkonsole sowie das Display ermöglichen eine einfache Bedienung und klare Visualisierung der Prozessgrößen. Die stabile Rahmenkonstruktion, der offene und modulare

Aufbau zusammen mit dem Plexiglas-Gehäuse bieten Sicherheit, schnelle Reparatur- oder Austauschmöglichkeit sowie eine gute Sicht auf die Pumpen, den Sensor, die Elektronik und die stattfindenden Prozesse der Regelung.

Damit ist das System technisch funktionsfähig und kann durch direkten Kontakt mit der Materie zum Verständnis der Regelungstechnik beitragen.

5.3 Verbesserungspotential und Ausblick

Trotz der weitgehenden Zielerreichung gibt es Ansatzpunkte zur Optimierung:

Benutzergesteuerte Reglerparameter: Die Möglichkeit, Reglerparameter direkt über das Interface einzustellen oder die Regelung temporär zu deaktivieren, würde die Nutzbarkeit in der Lehre deutlich erhöhen.

Berücksichtigung realer Totzeiten in der Simulation: Eine Erweiterung der Simulationsmodelle um Totzeiten und Verzögerungen würde zu einer realistischeren Vorhersage des Systemverhaltens führen und eine bessere Festlegung der Reglerparameter ermöglichen.

Überarbeitung der Elektrik: Die Not-Aus-Schalter sollten überarbeitet werden, damit die Pumpen nicht über die 5 V des Arduinos betrieben werden.

Verlustfreie Messkette: Die Beseitigung der Undichtigkeiten in der Messleitung ist essenziell für den stabilen Langzeitbetrieb.

Wasserzufluss: Die Zufluss-Leitungen zum Tankboden legen und mit einem Rückschlagventil an der Pumpe versehen. Somit kann die Totzeit und die Verfälschung der Messwerte durch Wellenbewegungen reduziert werden.

Insgesamt stellt das Projekt ein funktionales, vielseitiges Lehrsystem dar, welches mit geringem Mehraufwand durch den modularen Aufbau und die Anwendung von 3D-Druck weiter verbessert und ausgebaut werden kann. Es bietet eine solide Grundlage für den Einsatz in Hochschuldemonstrationen.

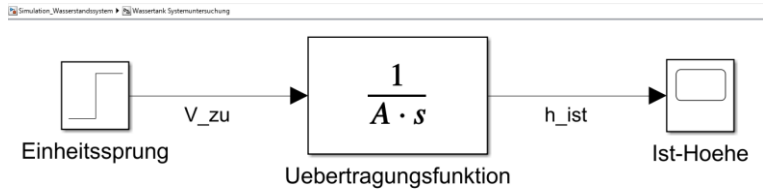
Quellenverzeichnis

- [1] Adamy, J.: Nichtlineare Systeme und Regelungen. Springer-Verlag, 2025. – ISBN 978-3-662-70666-4
- [2] Arduino: Datenblatt Arduino Mega 2560 rev3. Arduino.cc, 2024. – URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- [3] Brandt, H.; Eidhoff, M.: Projekt 24: Wasserstandsregelung – HSHL Mechatronik. – URL: https://wiki.hshl.de/wiki/index.php/Projekt_24:_Wasserstandsregelung
- [4] CADENAS GmbH: 3DFindit – Digital Twin Datenbank. – URL: <https://www.3dfindit.com/de/> (zugegriffen am 8. Mai 2025)
- [5] Conrad Electronic: Datenblatt: Drehpotentiometer RV16AF-20-15K-B10K. – URL: <https://www.conrad.de/de/p/potentiometer-service-rv16af-20-15k-b10k-3-rv16af-20-15k-b10k-dreh-potentiometer-1-gang-mono-0-125-w-1-st-1644142.html> (Zugegriffen: 10. Mai 2025)
- [6] Conrad Electronic: Datenblatt: Joy-it SBC-LCD20x4 Display-Modul 11.4 cm (4.5 Zoll) 20 x 4 Pixel. – URL: <https://www.conrad.de/de/p/joy-it-sbc-lcd20x4-display-modul-11-4-cm-4-5-zoll-20-x-4-pixel-passend-fuer-entwicklungskits-raspberry-pi-arduino-1503752.html>
- [7] Conrad Electronic: Datenblatt: Joy-it SBC-MotoDriver2 Entwickler-Platine 1 St. – URL: <https://www.conrad.de/de/p/joy-it-sbc-motodriver2-entwickler-platine-1-st-1573541.html>
- [8] DWK Life Sciences GmbH: DURAN Labor-Glaskatalog. – URL: https://www.dwk.com/resources?resource_type=E-Catalogs (Zugegriffen: 8. Mai 2025)
- [9] Festo: Prozessautomatisierung | Festo DE. – URL: https://www.festo.com/de/de/e/technische-bildung/lernloesungen/prozessautomatisierung-id_1709274
- [10] Festo Didactic SE: Festo: Project World Skills - WorldSkills package. Apr. 2024. – URL: https://www.festo.com/us/en/p/edukit-pa-basic-id_PROD_DID_549822 (Zugegriffen: 29. Jan. 2025)
- [11] Göbel, M.: Regelungstechnische Systeme: Vorlesung. Hochschule Hamm-Lippstadt, 2023.
- [12] Göbel, M.: Systemtheorie: Vorlesung. Hochschule Hamm-Lippstadt, 2023.

- [13] Ibrahim, D.: PID-basierte digitale Regelungstechnik mit Raspberry Pi und Arduino Uno. 2023. – ISBN 978-3-895-76539-1
- [14] item Industrietechnik GmbH: ITEM Engineeringtool. – URL: <https://de.item24.com/kundenloesungen/konfiguratoren/> (Zugegriffen: 8. Apr. 2025)
- [15] Kersten, P.: Mechanik – smart gelöst: Einstieg in die Physik mit Wolfram/Alpha, MATLAB und Excel. Springer-Verlag, 2017. – ISBN 978-3-662-53706-0
- [16] Lunze, J.: Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen. Springer-Verlag, 2020. – ISBN 978-3-662-60746-6
- [17] MathWorks: Get Started with IO Device Builder – MATLAB & Simulink. – URL: https://de.mathworks.com/help/simulink/supportpkg/arduino_ug/io-device-builder.html
- [18] MathWorks: PWM - Generate pulse width modulated signal on analog output pin - Simulink. – URL: https://de.mathworks.com/help/simulink/supportpkg/arduino_ref/pwmcommon.html
- [19] NXP Semiconductors: MPX5010-MPXV5010-MPVZ5010 – Datenblatt. 2024. – URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5010.pdf>
- [20] Reichelt Chemietechnik GmbH + Co.: THOMAFLUID THE BEST: Schläuche aus Elastomeren und Kunststoffen. – URL: <https://www.rct-online.de/de/listing/index/sCategory/4585> (Zugegriffen: 8. Mai 2025)
- [21] RobotShop Europe: 6-12V R385 DC Membranpumpe. – URL: <https://eu.robotshop.com/de/products/6-12v-r385-dc-membranpumpe>
- [22] Tieste, K.-D.; Romberg, O.: Keine Panik vor Regelungstechnik! Erfolg und Spaß im Mystery-Fach des Ingenieurstudiums. Springer-Verlag, 2011. – ISBN 978-3-8348-8160-1
- [23] Zacher, S.; Reuter, M.: Regelungstechnik für Ingenieure: Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen. Springer-Verlag, 2024. – ISBN 978-3-658-45897-3

Anhang

A1 Simulation der Übertragungsfunktion



A2 Herleitung der Führungs- und Störübertragungsfunktion

Führungsübertragungsfunktion

P-Regler

- $$G_{WP} = \frac{KP \cdot \frac{1}{A \cdot s}}{1 + 1 \cdot KP \cdot \frac{1}{A \cdot s}} \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot s} = \frac{KP}{A \cdot s + KP}$$
- $$x_{stat} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{WP}(s) = \frac{KP}{A \cdot 0 + KP} = \frac{KP}{KP} = 1$$

PD-Regler

- $$G_{WPD} = \frac{(KP + KD \cdot s) \cdot \frac{1}{A \cdot s}}{1 + 1 \cdot (KP + KD \cdot s) \cdot \frac{1}{A \cdot s}} \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot s} = \frac{KP + KD \cdot s}{A \cdot s + KP + KD \cdot s}$$
- $$x_{stat} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{WPD}(s) = \frac{KP + KD \cdot 0}{A \cdot s + KP + KD \cdot 0} = \frac{KP}{KP} = 1$$

PID-Regler

- $$G_{WPID} = \frac{(KP + \frac{KI}{s} + KD \cdot s) \cdot \frac{1}{A \cdot s}}{1 + 1 \cdot (KP + \frac{KI}{s} + KD \cdot s) \cdot \frac{1}{A \cdot s}} = \frac{\frac{KP}{A \cdot s} + \frac{KI}{A \cdot s^2} + \frac{KD}{A}}{1 + \frac{KP}{A \cdot s} + \frac{KI}{A \cdot s^2} + \frac{KD}{A}} \cdot \frac{A \cdot s^2}{A \cdot s^2} = \frac{KP \cdot s + KI + KD \cdot s^2}{A \cdot s^2 + KP \cdot s + KI + KD \cdot s^2}$$
- $$x_{stat} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{WPID}(s) = \frac{KP \cdot 0 + KI + KD \cdot 0^2}{A \cdot 0^2 + KP \cdot 0 + KI + KD \cdot 0^2} = \frac{KI}{KI} = 1$$

Störübertragungsfunktion

P-Regler

- $$G_{ZP} = \frac{\frac{1}{A \cdot s}}{1 + 1 \cdot KP \cdot \frac{1}{A \cdot s}} \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot s} = \frac{1}{A \cdot s + KP}$$
- $$x_{stat} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{ZP}(s) = \frac{1}{A \cdot 0 + KP} = \frac{1}{KP} \neq 0$$

PD-Regler

- $$G_{ZPD} = \frac{\frac{1}{A \cdot s}}{1 + 1 \cdot (KP + KD \cdot s) \cdot \frac{1}{A \cdot s}} \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot s} = \frac{1}{A \cdot s + KP + KD \cdot s}$$
- $$x_{stat} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{ZPD}(s) = \frac{1}{A \cdot s + KP + KD \cdot 0} = \frac{1}{KP} \neq 0$$

PID-Regler

- $$G_{ZPID} = \frac{\frac{1}{A \cdot s}}{1 + 1 \cdot (KP + \frac{KI}{s} + KD \cdot s) \cdot \frac{1}{A \cdot s}} = \frac{\frac{1}{A \cdot s}}{1 + \frac{KP}{A \cdot s} + \frac{KI}{A \cdot s^2} + \frac{KD}{A}} \cdot \frac{A \cdot s^2}{A \cdot s^2} = \frac{s^2}{A \cdot s^2 + KP \cdot s + KI + KD \cdot s^2}$$
- $$x_{stat} = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G_{ZPID}(s) = \frac{0^2}{A \cdot 0^2 + KP \cdot 0 + KI + KD \cdot 0^2} = \frac{0}{KI} = 0$$

A3 SVN-Link

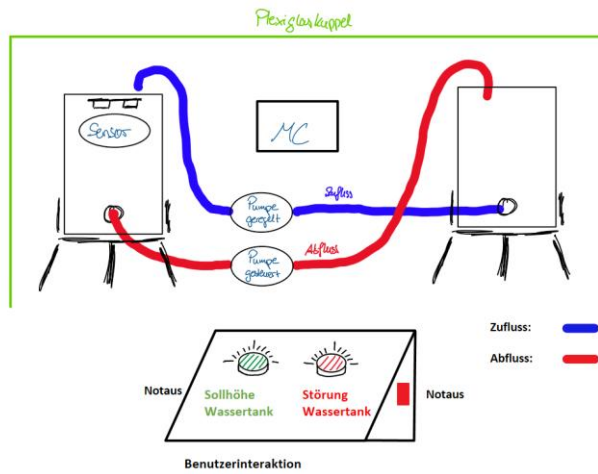
https://svn.hshl.de/svn/HSHL_Projekte/trunk/Regelung_WassertanksH%C3%B6henstand

A4 Morphologischer Kasten und weitere Entwürfe

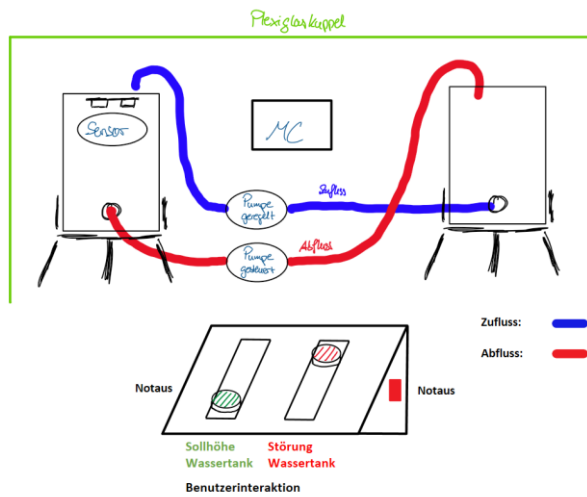
Morphologischer Kasten

Aspekt	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4	Option 5	Auswahlgrund
Benutzerfeedback	ohne	Akustisch	Visuell Display	Visuell LED Zustände		Ermöglicht klare visuelle Rückmeldung für Nutzer.
Benutzerorientierung	Drehpotentiometer	Drucksensor	Taster			Einfache, intuitive Softwareeinstellung durch manuelle Einstellung.
Ist-Höhe	Messung	Messung und manuelle Einstellung				Gefahr von Leer- oder Überlaufen wird eliminiert.
Mikrocontroller	Arduino Mega 2560	Arduino Uno R3	ESP32	Raspberry Pi		Viele Ein- und Ausgänge, kompatibel mit Simulink.
Pumpensteuerung	H-Bridge	MOSFET	Motor Controller Board	PWM-Signal über Arduino		Einfache 12V Ansteuerung von Gleichstrommotoren mittels PWM über Arduino.
Pumpentyp	Kolbenpumpe	Kreiselpumpe	Membranpumpe	Peristaltikpumpe	Tauchpumpe	Preiswerter Pumpentyp bei trotzdem sehr guter Förderleistung und Langlebigkeit.
Pumpleistung	bis 1 l/min	1-2 l/min	2-3 l/min	3-4 l/min		Ideale Fördermenge um die ausgewählte max. Wassermenge im Tank in angemessener Zeit raus und rein zu pumpen.
Regler	P-Regler	PI-Regler	PID-Regler			Ergibt sich aus der Systemuntersuchung und Reglerauswahl.
Regelparameter	Einstellbar	Fester Wert				Einstellbare Regelparameter können nachträglich sehr einfach implementiert werden wenn noch Zeit ist.
Sensor für Wasserstand	Differenzdrucksensor	Drucksensor	Kapazitiver Sensor	Schwimmensor	Ultraschallsensor	Kompakt, günstig und direkt mit dem Arduino sowie MATLAB/Simulink austauschbar. Ist im Gegensatz zum Ultraschall und Schwimmersensor nicht so anfällig für Störung durch Wellen auf der Wasseroberfläche. Differenzdruck ist zudem unabhängig von einem schwankenden Umgebungsdruck.
Sicherheitseinrichtung	keine	Notauschalter				Wichtig um die Pumpen bei Leckage oder ähnlichem schnell zu stoppen.
Sicherheitsmechanismen	kein Sicherheitsmechanismus	Überlaufschutz	Wassermengenbegrenzung			Somit ist kein Überlaufen möglich, z. B. durch Fehlmessungen bei einem Sensorausfall.
Software	Arduino IDE	MATLAB Code	MATLAB/Simulink			Ergibt sich aus den aufgestellten Anforderungen.
Sollhöhe	Einstellbar	Fester Wert				Flechteil einstellbar über ein Potentiometer für Benutzerinteraktion und Erlebnis.
Störquelle	Abschventil	Kugelhahn	Pumpe			Ermöglicht eine gezielte, variable Störerebringung.
Stromversorgung Pumpe	Batterie	Netzstecker (12V)	Netzstecker (24V)	USB-Stromversorgung (5V)		Ergibt sich aus den aufgestellten Anforderungen und vereinfacht die Spannungsversorgung von Arduino und Pumpen.
Systembegrenzung	Keine Abgrenzung	Gaskuppel	Glasscheibe	Plexiglas-Gehäuse	Plexiglasscheibe	Gehäuse ermöglicht gute Sichtbarkeit auf das System bei optimalem Schutz vor unautorisiertem Zugriff.
Systemhalterung	Aluminiumprofile	Holz	Metallgehäuse	3D-gedruckte Halterungen		Stabil und modular aufgrund der Profile und leicht anpassbar aufgrund von 3D-Druck.
Verabelung	Lötlötatine	Steckbrett (breadboard)	Steckverbinder			Dauerhafte und stabile Verbindungen für hohe Zuverlässigkeit.
Wasser Abfluss	Von Boden mittels Rohr	Von unten				Zugriff zum Tankboden muss von oben erfolgen, da in den Glasbehältern keine Löcher gebohrt werden können.
Wasser Zufluss	Von oben über ein Rohr	Von oben	Von unten			Sichtbarer Zuflussweg für den Demonstrationseffekt.
Wasserbehälter	Edelstahl	Glas	Kunststoff			Robustes, langlebiges Material was leicht zu reinigen ist.
Wasserleitungen	Messing-Rohrleitungen	PVC-Rohrleitungen	PVC-Schläuche	Silikon-Schläuche		Beständiges und kostengünstiges Material bei gleichzeitig einfacher Implementierung.
Wassermenge max.	0-0.5l	0.5-1l	1-1.5l	1.5-2l	2-2.5l	Viele Glasbehälter der gewünschten Höhe von 0.30-0.45m bewegen sich zwischen der Literanzahl. Die Höhe der Wassertranks ist durch die Gaskuppel begrenzt, die an der HSH bereits in fertiger Form vorliegt.

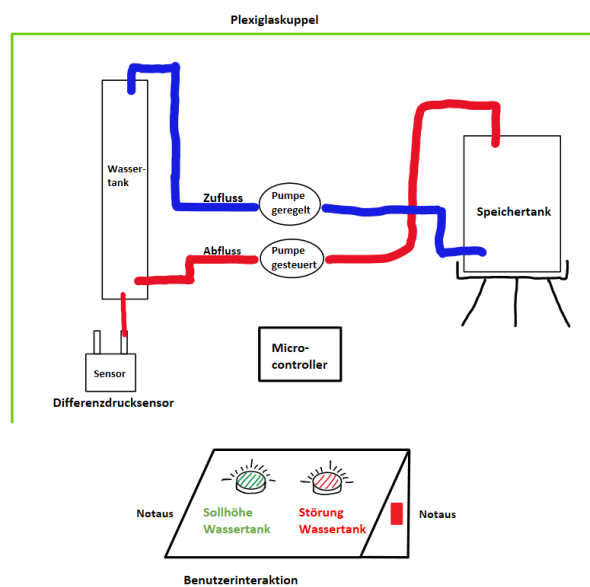
Entwurf 1



Entwurf 2



Entwurf 3



A5 Hardwarespezifikation

Wassertanksystem:

Komponente	Wassertanksystem
Hardware	Mehrzweckzylinder aus DURAN-Glas
Auswahlgrund	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Robustheit und Beständigkeit • transparent, ermöglicht gute Sicht
Technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Durchmesser (außen): 0,08 m • Höhe: 0,4 m • maximales Volumen von 1,65 l <p>Quelle: [8], S. 5ff.</p>
Komponente	Benutzereingabe_Hoehe und Benutzereingabe_Stoerung:
Hardware	Drehpotentiometer „RV16AF-20-15K-B10K“
Auswahlgrund	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Anbindung über Arduino und Simulink • Präzise lineare Einstellung von Werten • einstellen von Funktionen über einen Drehknopf ist für viele intuitiv
Technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> • 10 kΩ linear • Lebensdauer über 15000 Rotationen • Spannungsausgabe 0 – 5 V <p>Quelle: [5]</p>
Komponente	Pumpe_Regelung und Pumpe_Stoerung
Hardware	R385-Membranpumpe
Auswahlgrund	<ul style="list-style-type: none"> • kompakte Bauweise • hohe Leistungsfähigkeit und Robustheit trotz kompakter Größe • Steuerung über eine H-Brücke mittels PWM
Technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Fördermenge: ca. 2 $\frac{l}{min}$ • Betriebsspannung: 6 – 12 V • Stromaufnahme: < 1 A <p>Quelle: [21]</p>

Hardware	SBC-MotoDriver2 H-Brücke
Auswahlgrund	<ul style="list-style-type: none"> • PWM-kompatibel • separate Steuerung von zwei Gleichstrommotoren
Technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Antriebsstrom: 2 A • Antriebsspannung: 5 – 35 V • Stromaufnahme: < 1 A <p>Quelle: [7]</p>
Komponente	Regelung
Hardware	Arduino MEGA 2560
Auswahlgrund	<ul style="list-style-type: none"> • mehr Speicherkapazität gegenüber kleineren Arduinos • hohe Anzahl an I/O • PWM-Fähigkeit • Kompatibilität mit Simulink
Technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> • 16 analoge Eingänge und 54 digitale I/Os <p>Quelle: [2]</p>
Komponente	Sensor
Hardware	MPX5010DP Drucksensor
Auswahlgrund	<ul style="list-style-type: none"> • gute Dokumentation hinsichtlich Anwendung • präzise Messung des Drucks • einfache Konnektivität mit dem Arduino • wurde bereits in Projekt 24 (Kapitel 2.1.2) erfolgreich eingesetzt • ein Ultraschallsensor im Niedrigpreissegment hat wahrscheinlich aufgrund der schmalen und hohen Wassertanks zu viele Störquellen
Technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> • siehe Kapitel 2.3
Komponente	I2C_LCD_20x4
Hardware	SBC-LCD20x4 Display-Modul
Auswahlgrund	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Konnektivität dank I2C-Schnittstelle • kompatibel mit Arduino und MATLAB/Simulink
Technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> • 4 Zeilen mit jeweils 20 Zeichen • Versorgungsspannung: 5 V • Anschluss über SDA und SCL <p>Quelle: [6]</p>

A6 Simulation Parameterdatei

```

*****
%
% Modul:          WS_Simulation_Wasserstandssystem_Parameterdatei.m
%
% Datum:          16. März 2025
%
% Implementierung: MATLAB R2023b
%
% Toolbox:        Simulink Support Package for Arduino Hardware
%
% Autor:          Denim Mike Hilz
%
% Bemerkung:      Material abgeschlossen
%
% Letzte Änderung: 21. April 2025
%
*****

% clear all, close all, clc

%% Simulink Datei
% open('WS_Simulation_Wasserstandssystem')

%% Parameter Regelung PID
KP          = 10000;          % 1020 Minimales KP für max. PWM
KI          = 5000;

%% Parameter Störung
PWM_stoer   = 230;          % PWM der Pumpe Störung bei 90%

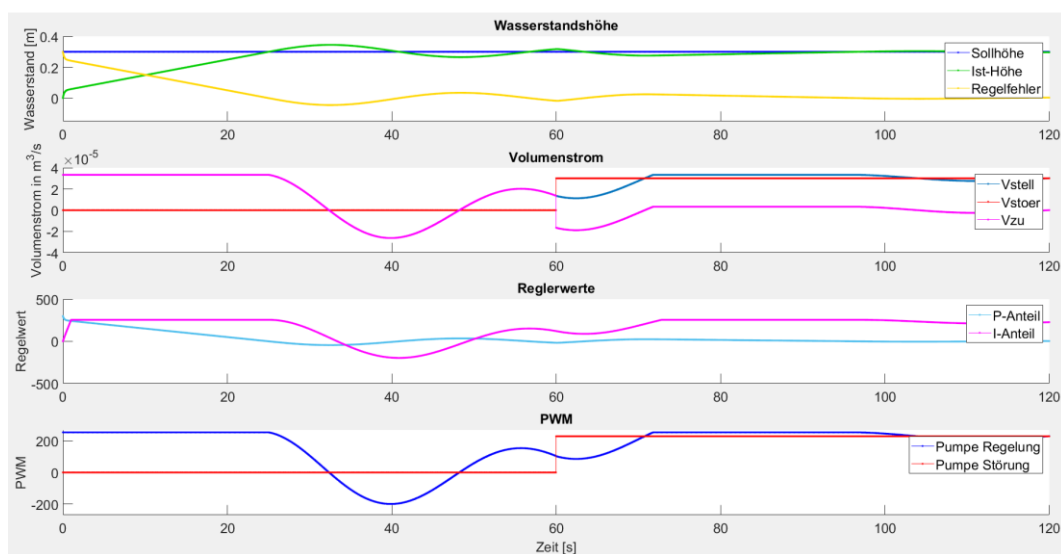
%% Parameter Tank
d           = 0.065;          % in Meter
A           = (d^2*pi)/4;     % in Quadratmeter
h_soll      = 0.30;           % in Meter
Tank_Offset = 0.05;           % in Meter

%% Parameter Pumpe
Pumpe_Faktor = 1/7650000;     % m^3/s = 2.0l/min

%% Parameter Sensor
PAR_SR_KP_PT1_Filter = 1;
PAR_SR_Frequenz_PT1_Filter = 1; % in Hz

```

A7 Simulation - KP1000 und KI1000 und Anti-Windup



A8 System Parameterdatei

```
*****
%
%
% Modul:          WS_Hilz_2180518_Wasserstandssystem_Parameterdatei.m
%
%
% Datum:          27. April 2025
%
%
% Implementierung: MATLAB R2023b
%
%
% Toolbox:        Simulink Support Package for Arduino Hardware
%
%
% Autor:          Denim Mike Hilz
%
%
% Bemerkung:      Material abgeschlossen
%
%
% Letzte Änderung: 18. Mai 2025
%
%
*****

% clear all, close all, clc

%% Simulink Datei
% open('WS_Hilz_2180518_Wasserstandssystem_Software')

%% Parameter Benutzereingabe_Hoehe
PAR_BEH_h_soll          = [0.05;0.30];          % Einstellbare Wasserhöhen in
Metern

PAR_BEH_h_soll_Digitalwert = [5;1018];          % Zuordnung zu Digitalwerten
für die Sollhöhe

%% Parameter Benutzereingabe_Stoerung
PAR_BES_Stoerung_Digitalwert = [0;4;5;1018];    % Digitalwerte der Störgröße
PAR_BES_Stoerung_Prozent    = [0;0;1;100];      % Zuordnung der Digitalwerte
zu prozentualer Störgröße

%% Parameter Pumpe_Regelung
PAR_PR_Regelung_PWM        = [0;1;255];         % Bereich der PWM-Ausgabe zur
Ansteuerung der Pumpe
PAR_PR_Regelung_PWM_Offset = [0;71;255];        % PWM-Kennlinie mit Offset, um
Totzone zu vermeiden
```

```

PAR_PR_Vergleich_Switch          = 0;                % Vergleichswert im Switch-
Block

PAR_PR_Vergleich_Vergleichsoperator = 0;            % Vergleichsoperatorwert für
PR_Vergleichsoperator

%% Parameter Pumpe_Stoerung

PAR_PS_Stoerung_Prozent          = [0;1;100];        % Bereich der möglichen
Störgrößen in Prozent

PAR_PS_Stoerung_PWM              = [0;71;255];        % Zuordnung Störgröße zu PWM-
Ausgangssignal

%% Parameter Regelung

PAR_RG_KP                        = 10000;            % Proportionalanteil des
Reglers

PAR_RG_KI                        = 10000;            % Integralanteil des Reglers

PAR_RG_Interator_Hoehe          = 0.34;            % Zurücksetzen des Integrators
bei Wasserhöhe von 0.34 m

%% Parameter Sensor

PAR_SR_KP_PT1_Filter            = 1;                % Verstärkung des PT1-Filters

PAR_SR_Frequenz_PT1_Filter      = 5;                % Frequenz des PT1-Filters in
Hz

PAR_SR_h_mess_Digitalwert       = [38;82;126;170;214;258;299;336];    % Digitalwerte
des Drucksensors des entsprechenden Wasserstands

PAR_SR_h_mess                   = [0;0.05;0.10;0.15;0.20;0.25;0.30;0.35]; % Zugehörige
reale Wasserstände in Metern

%% Parameter I2C_LCD_20x4

PAR_LCD_Millimeter              = 1000;            % Multiplikationsfaktor zur
Umrechnung von Metern in Millimeter für die Anzeige

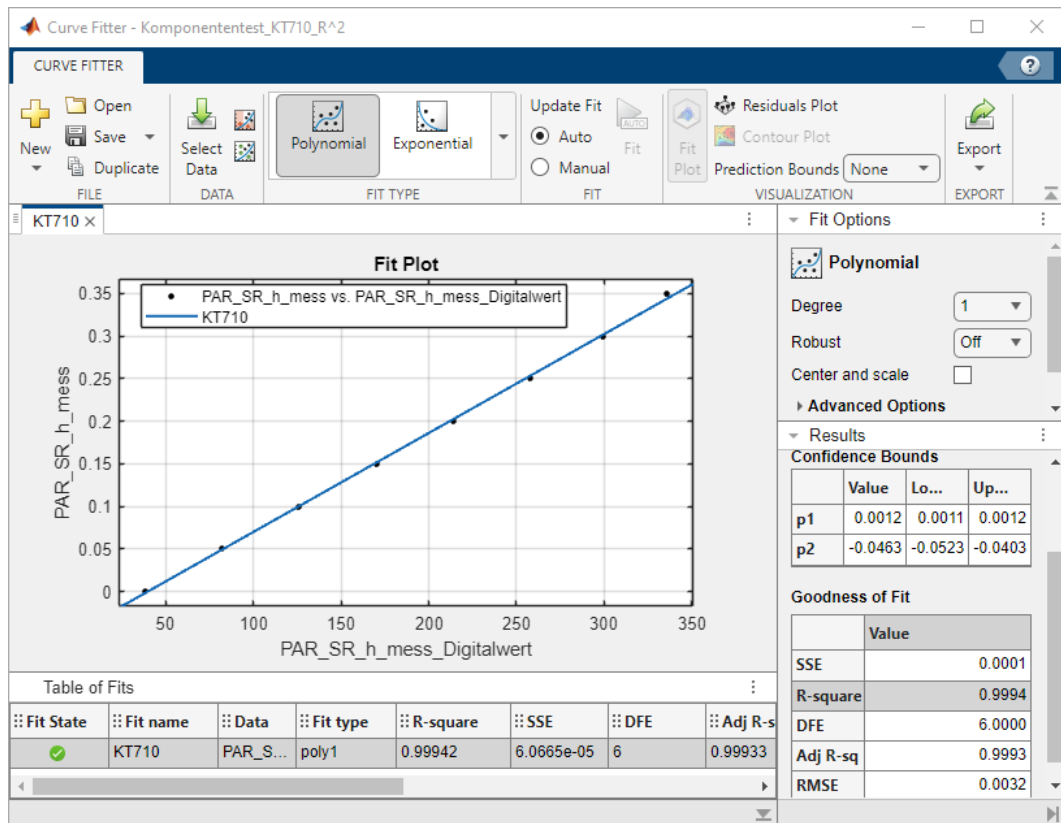
```


A9 Sensorkalibrierung und Curve-Fitter-Diagramm

Sensorkalibrierung

Kalibrierung MPX5010DP					
Letzte Änderung: 23.04.2025					
Meter (0,05er Schritte)	1. Messung	2. Messung	3. Messung	Mittelwert	Mittelwert gerundet
0	38	37	38	37,66666667	38
0,5	84	80	83	82,33333333	82
0,1	129	123	125	125,66666667	126
0,15	170	169	172	170,33333333	170
0,2	215	217	209	213,66666667	214
0,25	258	260	255	257,66666667	258
0,3	301	299	296	298,66666667	299
0,35	337	338	332	335,66666667	336

Curve-Fitter



A10 I2C_LCD_20x4 MATLAB Code

```
#include "D:\MATLAB\library\I2C_LCD_20x4.h"

// Bibliotheken einbinden

#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Bibliothek für die Steuerung von I2C-LCDs
#include <Wire.h>               // Bibliothek für die I2C-Kommunikation

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // Angabe von Adresse (0x27) und Größe 20x4 des
Displays

void setupFunctionI2C_LCD_20x4(){
    lcd.init();           // LCD initialisieren
    lcd.backlight();       // Schaltet die Hintergrundbeleuchtung ein
}

// I2C_LCD_h_soll int16 [1,1]
// I2C_LCD_h_mess int16 [1,1]
// I2C_LCD_Stoerung_Prozent int16 [1,1]

void stepFunctionI2C_LCD_20x4(int16_T I2C_LCD_h_soll,int size_vector_a,int16_T
I2C_LCD_h_mess,int size_vector_b,int16_T I2C_LCD_Stoerung_Prozent,int size_vector_c){

    // Text auf dem Display anzeigen in der Zeile 0

    lcd.setCursor(0, 0); // Zeile 0, Spalte 0
    lcd.print("----Wassertank----"); // Überschrift

    // Text auf dem Display anzeigen in der Zeile 1

    lcd.setCursor(1, 1); // Zeile 1, Spalte 1
    lcd.print("Sollhoehe:"); // Textausgabe

    lcd.setCursor(13, 1); // Zeile 1, Spalte 13
    lcd.print(" "); // Textausgabe von 4 Leerzeichen, welche die vorherigen Werte an
dieser Stelle überschreiben

    lcd.setCursor(13, 1); // Zeile 1, Spalte 13
    lcd.print(I2C_LCD_h_soll); // Ausgabe des ersten Inputs

    lcd.setCursor(17, 1); // Zeile 1, Spalte 17
    lcd.print("mm"); // Textausgabe

    // Text auf dem Display anzeigen in der Zeile 2

    lcd.setCursor(1, 2); // Zeile 2, Spalte 1
    lcd.print("Ist-Hoehe:"); // Textausgabe

    lcd.setCursor(13, 2); // Zeile 2, Spalte 13
    lcd.print(" "); // Textausgabe von 4 Leerzeichen, welche die vorherigen Werte an
dieser Stelle überschreiben

    lcd.setCursor(13, 2); // Zeile 2, Spalte 13
    lcd.print(I2C_LCD_h_mess); // Ausgabe des zweiten Inputs

    lcd.setCursor(17, 2); // Zeile 2, Spalte 17
    lcd.print("mm"); // Textausgabe

    // Text auf dem Display anzeigen in der Zeile 3

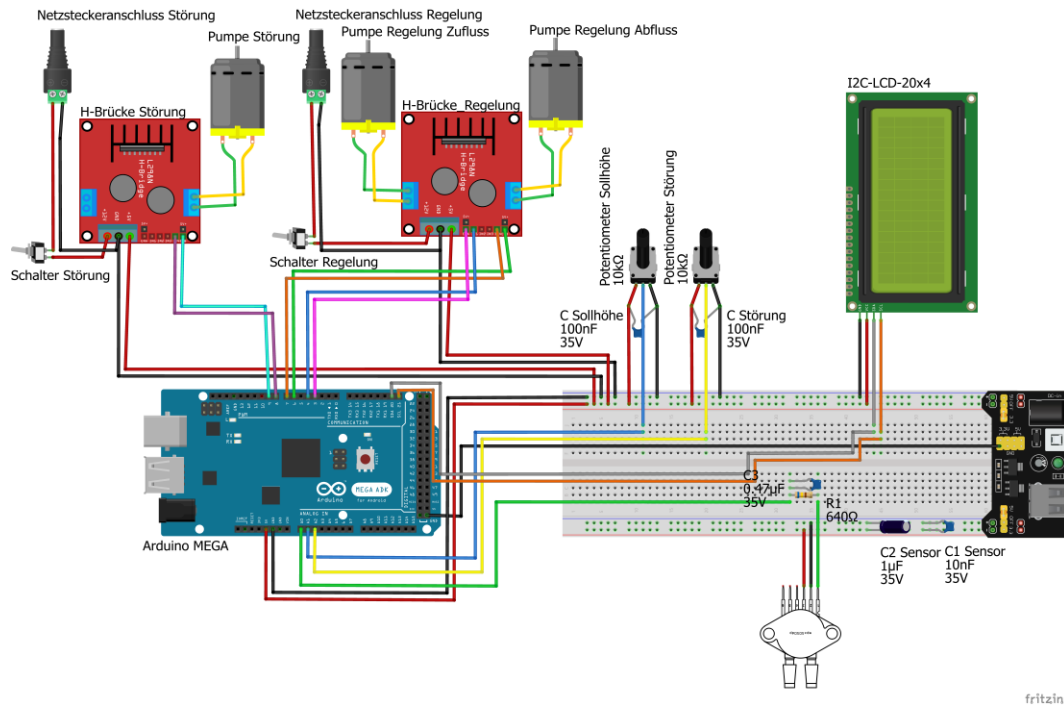
    lcd.setCursor(1, 3); // Zeile 3, Spalte 1
    lcd.print("Stoerung:"); // Textausgabe

    lcd.setCursor(13, 3); // Zeile 3, Spalte 13
    lcd.print(" "); // Textausgabe von 4 Leerzeichen, welche die vorherigen Werte an
dieser Stelle überschreiben

    lcd.setCursor(13, 3); // Zeile 3, Spalte 13
    lcd.print(I2C_LCD_Stoerung_Prozent); // Ausgabe des dritten Inputs

    lcd.setCursor(17, 3); // Zeile 3, Spalte 17
    lcd.print("%"); // Textausgabe }
```

A11 Anschlussplan des fertigen Systems



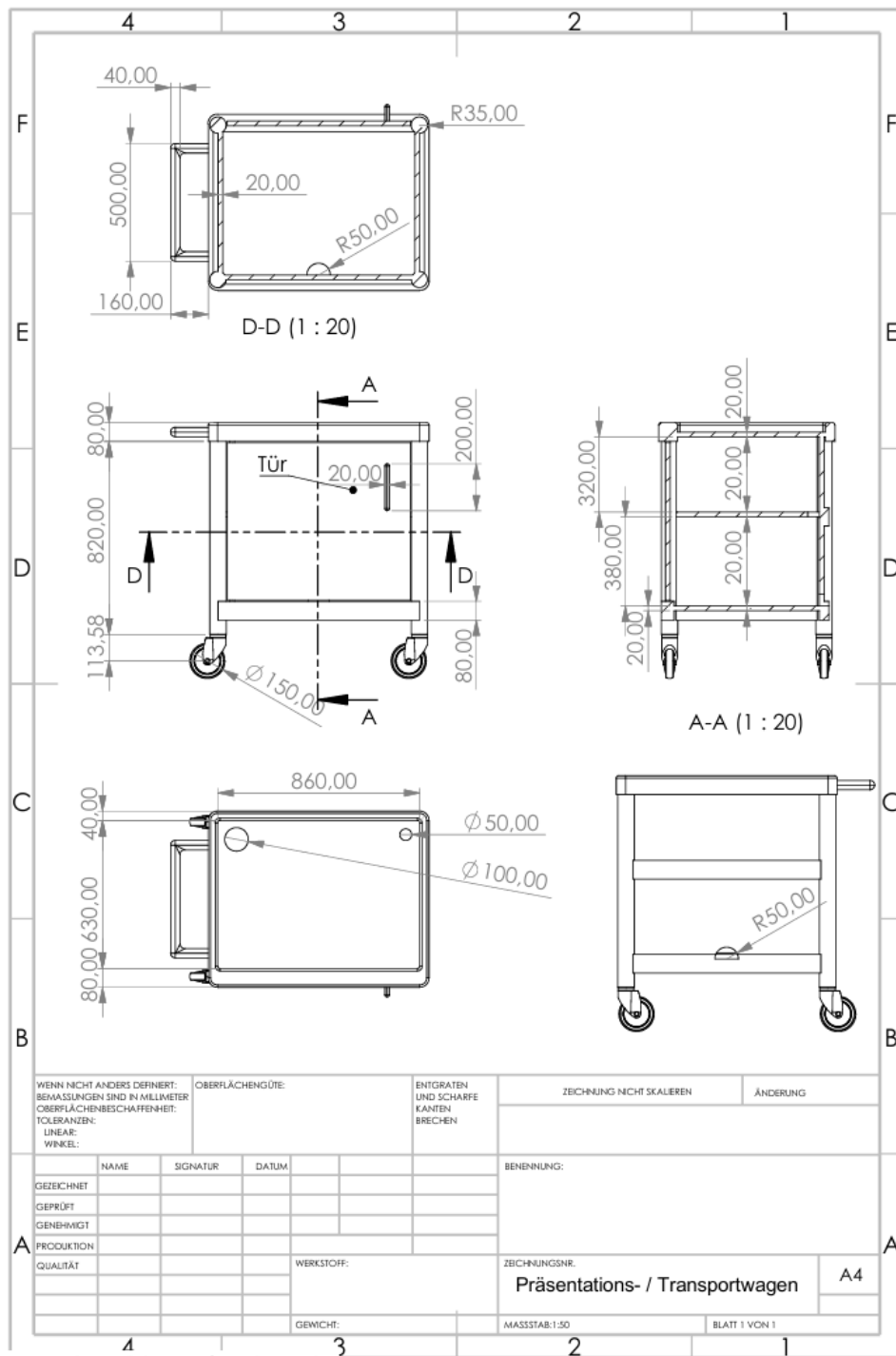
A12 Auflistung aller verwendeten Bauteile

Bauteil	Anzahl	Bezugsquelle
Aluminiumprofil 40-40 100 mm	2	HS HL
Aluminiumprofil 40-40 170 mm	1	HS HL
Aluminiumprofil 40-40 200 mm	2	HS HL
Aluminiumprofil 40-40 360 mm	2	HS HL
Aluminiumprofil 40-40 495 mm	2	HS HL
Aluminiumprofil 40-40 535 mm	2	HS HL
Aluminiumprofil 40-40 575 mm	2	HS HL
Arduino MEGA	2	https://www.reichelt.de/de/de/shop/produkt/arduino_mega_2560_atmega_2560_usb-119696
Filament Orange	1	https://www.prusa3d.com/de/produkt/prusament-petg-prusa-orange-1kg/
Filament schwarz	1 kg	https://www.prusa3d.com/de/produkt/prusament-petg-matte-black-1kg/
Gehäuse für Arduino MEGA 2560 R3	2 kg	https://www.reichelt.de/de/de/shop/produkt/gehaeuse_fuer_arduino_mega2560_r3-

		192131?PROVID=2788&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA4rK8BhD7ARIsAFe5LXlvxuoOSKWIRN_m6NqxYgNobtKeSla1MtforIAMyRlsae76_4ZM64aAqWxEALw_wcB#closemodal
Glaszylinder	1	https://de.vwr.com/store/product?keyword=216-0274
Griffe	2	https://amzn.eu/d/03f8lvv
JST-SM Steckverbinderset	4	https://amzn.eu/d/7KYs8jo
JST-XH Steckverbinderset	1	https://amzn.eu/d/8PEooZS
Kabelschlauch gewebt	1	https://amzn.eu/d/87ColxT
Kondensator 0,47 µF	1	HS HL
Kondensator 1 µF	1	HS HL
Kondensator 100 nF	1	HS HL
Kondensator 10 nF	2	HS HL
LCD-Display	1	https://www.conrad.de/de/p/joy-it-sbc-lcd20x4-display-modul-11-4-cm-4-5-zoll-20-x-4-pixel-passend-fuer-entwicklungskits-raspberry-pi-arduino-1503752.html?searchType=SearchRedirect
Lochrasterplatine 80·120mm	1	https://amzn.eu/d/dAQiBbb
Schraubklemme	1	https://www.reichelt.de/de/de/shop/produkt/oetbare_schraubklemme_-_2-pol_rm_5_mm_90_-292680?PROVID=2788&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAqL28BhCrARIsACYJvkeRvSjs0fZCahULR8ho3NhBEmCkEdYllrOaDEUM1t8l5HvkMAiqGnlaAh3ZEALw_wcB
Membranpumpe R385	1	https://amzn.eu/d/0xhyRZk
Messingstutzen	3	Baumarkt
Motortreiber	3	https://www.conrad.de/de/p/joy-it-sbc-motodriver2-entwickler-platine-1-st-1573541.html?hk=SEM&WT.mc_id=google_pla&hk=SEM&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=DE+-+PMAX+-+NonBrand+-+HighSeller&utm_id=21937516534&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAqL28BhCrARIsACYJvkfEvXOFRIYoL6CVf4frlfkHE-bClh4WFxniUb-h9lhNm-ymQaAQoywaAl97EALw_wcB
Netzstecker	2	https://www.reichelt.de/de/de/shop/produkt/s-teckernetzteil_24_w_12_v_2_a-293281
Not-Aus-Schalter	4	https://amzn.eu/d/0xhyRZk
Plastiktank	2	https://amzn.eu/d/2pVOZ7s

Potentiometer RV16AF	2	https://www.conrad.de/de/p/potentiometer-service-rv16af-20-15k-b10k-3-rv16af-20-15k-b10k-dreh-potentiometer-1-gang-mono-0-125-w-1-st-1644142.html?hk=SEM&WT.mc_id=google_pla&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=DE+-+PMAX+-+Brand+-+All+products&utm_id=21116787988&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAqL28BhCrARIsACYJvkdXv3YxqrjVh_aWSnq9i28_ikcUXfriaVn6EyYuyut5rRr1PVUvOk4aAm9bEALw_wcB&refresh=true
Power Supply Module	2	https://www.az-delivery.de/products/mb102-breadboard?variant=6126543470619
Rundrohr PVC	1	Baumarkt
Rundrohr PVC	Ø 19,5 mm	Baumarkt
Schlauchschellen 6-12mm	Ø 11,5 mm	Baumarkt
Schraubenset	9	https://www.amazon.de/dp/B0CKF1RP4D?ref=ppx_yo2ov_dt_b_fed_asin_title&th=1
Sensor MPX5010DP	1	https://www.conrad.de/de/p/nxp-semiconductors-mpx5010dp-drucksensor-1-st-0-kpa-bis-10-kpa-print-1182870.html?searchType=SearchRedirect
Silikonschlauch 3·6mm	1·1,05m	https://amzn.eu/d/9xqyahW
Silikonschlauch 6·8mm	1·1,05m	https://de.vwr.com/store/product?keyword=216-0273
Silikonschlauch 6·8mm	3·1,10m	https://de.vwr.com/store/product?keyword=216-0274
Steckeradapter	3·0,80m	https://amzn.eu/d/7NhIrfj
Türdichtung	2	Baumarkt
Widerstand 640 Ω	1	HSHL

A13 Präsentations- / Transportwagen



SOLIDWORKS Lehrprodukt. Nur für Lehrzwecke.

A14 System- und Abnahmetest

Systemtest

Testbericht: Systemtest des Wasserstandssystems

Durchgeführt von: Dennis Hitz
Durchgeführt am: 03.05.2025
Vorbereitungen: MATLAB/Simulink gestartet -> Parameterdatei geladen -> System mit Wasser befüllt

Testfall-ID	Testfall-Name	Anforderung-ID	Vorgehensweise und Eingänge	Aktoren	Erwartetes Ergebnis	Ist-Ergebnis	Bewertung	Kommentar
5T101	Wasserstands-System		- Frische Montage des Systems		- Frische Montage des Systems bedient auf der Rahmenkonstruktion.	- Frische Montage des Systems bedient auf der Rahmenkonstruktion.	I: O.	
5T102	Dichtigkeit		- Frische Montage des Systems	System befüllen und über mehrere Tage stehen lassen.	Das System zeigt kein Anzeichen einer Leckage an der Wasseroberfläche.	Das System zeigt kein Anzeichen einer Leckage an der Wasseroberfläche.	I: O.	
5T103	Pumpen-Gehäuse		- Frische Montage des Systems		Das Gehäuse steht sicher auf dem System und schließt vor unbefugtem Zugriff.	Das Gehäuse steht sicher auf dem System und schließt vor unbefugtem Zugriff.	I: O.	
5T104	Display		- Frische Montage des Systems		Auf dem Display werden die Werte korrekt übermittelt und angezeigt.	Auf dem Display werden die Werte korrekt übermittelt und angezeigt.	I: O.	
5T105	Parametermeter		- Parameterdatei geladen - Monitor und Tune		Beim drücken der Parametermeter-Schaltfläche werden auf dem Display die entsprechenden Werte der 12 V werden unterbrochen. Die Pumpen laufen allerdings noch über die 5V vom Arduino bei einer maximalen PWM. Die Nachschubmenge ist aber deutlich geringer. Demos zeigt dies eine Problematik auf.	Beim drücken der Parametermeter-Schaltfläche werden auf dem Display die entsprechenden Werte der 12 V werden unterbrochen. Die Pumpen laufen allerdings noch über die 5V vom Arduino bei einer maximalen PWM. Die Nachschubmenge ist aber deutlich geringer. Demos zeigt dies eine Problematik auf.	I: O.	
5T106	Not-Aus-Schalter		- Frische Montage des Systems - Parameterdatei geladen - Monitor und Tune - System mit Wasser befüllt		Es gibt keine Schwankungen bei dem Sensor- oder Positionenwert.	Es gibt keine Schwankungen bei dem Sensor- oder Positionenwert.	I: O.	Sensor-Messleistung fällt sich noch immer mit Wasser. Berührt nach 15 min past die kalibrierung nicht mehr.
5T107	Wertstabilität		- Frische Montage des Systems - Parameterdatei geladen - Monitor und Tune - System mit Wasser befüllt		Die Pumpen werden korrekt angesteuert und pumpen das Wasser entsprechend der Regelung.	Die Pumpen werden korrekt angesteuert und pumpen das Wasser entsprechend der Regelung.	I: O.	
5T108	Pumpen-Regelung		- Frische Montage des Systems - Parameterdatei geladen - Monitor und Tune - System mit Wasser befüllt		Die Pumpe wird korrekt angesteuert und pumpt das Wasser entsprechend der eingestellten Störung aus dem Primärbehälter ab.	Die Pumpe wird korrekt angesteuert und pumpt das Wasser entsprechend der eingestellten Störung aus dem Primärbehälter ab.	I: O.	
5T109	Pumpe-Störung		- Frische Montage des Systems - Parameterdatei geladen - System mit Wasser befüllt		Das System handelt ca. 35 Sekunden, um von der minimalen zu maximalen Höhe zu fahren.	Das System handelt zwischen 12-24 Sekunden, um von der minimalen zu maximalen Höhe zu fahren.	I: O.	Die aktuellen Geschwindigkeit, Stand unmittelbar mit der höchsten maximalen Pumpenleistung von 2,1 l/min zusammen.
5T110	Systemzustand		- Frische Montage des Systems - Parameterdatei geladen - Monitor und Tune - System mit Wasser befüllt		Die eingeregnete Soll-Höhe 0,20 m wird über die Regelung in dem gewünschten Zeitraum von 30 Sekunden ausgeglichen.	Die eingeregnete Soll-Höhe 0,20 m wird über die Regelung in dem gewünschten Zeitraum von 30 Sekunden ausgeglichen (siehe Abbildung 1).	I: O.	
5T111	Regelung der Pumpe durch Soll-Höhe-Vorgabe	A004	- Frische Montage des Systems - Parameterdatei geladen - System mit Wasser befüllt		Die eingeregnete Soll-Höhe 0,20 m wird über die Regelung in dem gewünschten Zeitraum von 30 Sekunden ausgeglichen.	Die eingeregnete Soll-Höhe 0,20 m wird über die Regelung in dem gewünschten Zeitraum von 30 Sekunden ausgeglichen (siehe Abbildung 1).	I: O.	Das System braucht länger als die Simulation und schwingt immer ein bisschen hin und her und der Regelgeber wird etwas überfordert. Die Nachschubmenge ist aber nicht so hoch wie in der Simulation und einer 100% hinausgerollt durch die Pumpen. Mögliche Lösung ist ein zurücksetzen des I-Anteils bei Erreichen der Sollhöhe, um den Regelgebers auf 3 Nachkommastellen und schneller Filterung der Messwerte.
5T112	Ausgleich der Störung	A005	- Frische Montage des Systems - Parameterdatei geladen - Monitor und Tune - System mit Wasser befüllt		Eine Störung von 90% wird über die Regelung in dem gewünschten Zeitraum von 30 Sekunden ausgeglichen.	Eine Störung von 90% wird über die Regelung in dem gewünschten Zeitraum von 30 Sekunden ausgeglichen (siehe Abbildung 2).	I: O.	- Eventuell ist die Schwankung in der Zufuhrmenge der Pumpen dafür verantwortlich. So wird aus 90% Störung eventuell immer mal wieder 100% im Vergleich zur Zufuhrs-Pumpe. - I-Anteil erhöhen damit die Störung schneller ausgeglichen wird.
5T113	Überprüfung der minimalen und maximalen Füllhöhe	A015	- Frische Montage des Systems - Parameterdatei geladen - Monitor und Tune - System mit Wasser befüllt		Das System ist auf die minimale und maximale Füllhöhe begrenzt.	Das System ist auf die minimale und maximale Füllhöhe begrenzt.	I: O.	Schwankungen durch Regel ist möglich und erlaubt. Durch die Wassermengenbegrenzung läuft das System nicht über. Zu Füllhöhe von 0,34 Meter zurückgesetzt wird.
5T114	Reaktion bei Pumpen aus- und einschalten		- Frische Montage des Systems - Parameterdatei geladen - Monitor und Tune - System mit Wasser befüllt - Soll-Höhe 0,05 Meter - Soll-Höhe 0,30 Meter	Pumpen ausschalten für: - 5 Sekunden - 30 Sekunden - 60 Sekunden - 2 min	Bei aus- und einschalten der geeigneten Pumpen arbeitet das System nach dem einschalten normal weiter.	Bei aus- und einschalten der geeigneten Pumpen arbeitet das System nach dem einschalten normal weiter.	I: O.	Durch das Vorfahren kommt es nicht zum Überalligen Auslösen des Integrators.
5T115	Reaktion bei Sensorausfall		- Parameterdatei geladen - Monitor und Tune - System mit Wasser befüllt - Soll-Höhe 0,05 Meter - Soll-Höhe 0,30 Meter	Sensor ausschalten für 2 min.	Wenn der Sensor ausfällt, führt die Regelung höchstens den Minimal- oder Maximalwert an.	Wenn der Sensor ausfällt, führt die Regelung höchstens den Minimal- oder Maximalwert an.	I: O.	Durch die Wassermengenbegrenzung auf 2,25 l/min das System nicht überlaufen trotz einer permanenten Regelabweichung.

Testbericht: Abnahmetest des Wasserstandssystems-A1-F46D3AA1-F35

Durchgeführt von: Denim Hilz

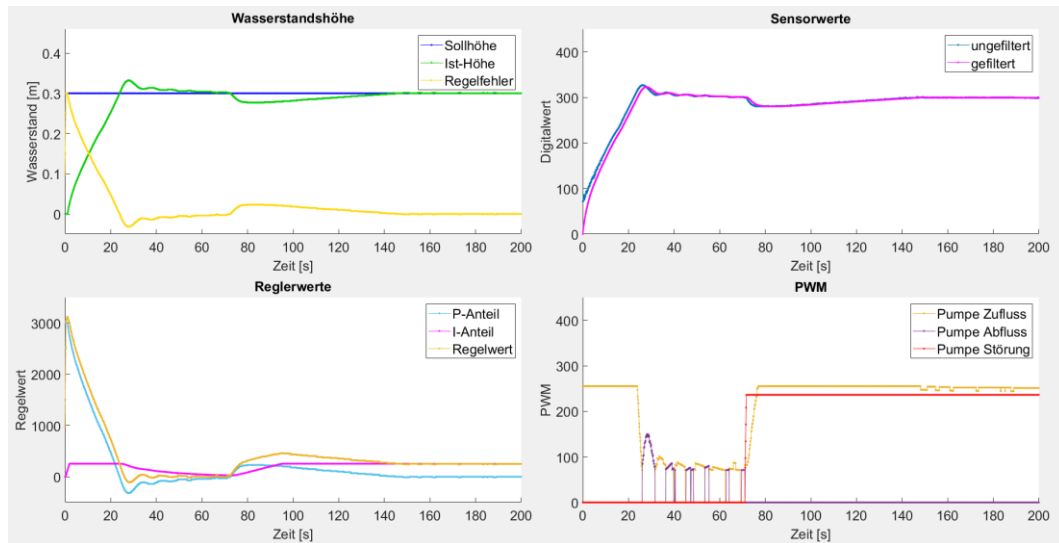
Durchgeführt am: 12.05.2025

Vorbereitungen: Komponententest, Integrationstest und Systemtest durchgeführt -> Anforderungsliste gegenprüfen mit Ergebnissen

Testfall-ID	Anforderungs-ID	Inhalt der Anforderung	Ergebnis der Anforderung nach Systemumsetzung	Bewertung	Kommentar
AT101	A001	Entwicklung und Aufbau eines Wasserstandssystems, das über eine Mikrocontroller-basierte Regelung und MATLAB/Simulink gesteuert wird.	Entwicklung und Aufbau eines Wasserstandssystems, das über eine Mikrocontroller-basierte Regelung und MATLAB/Simulink gesteuert wird.	I.O.	
AT102	A002	Robuste Wasserstandsregelung, dass den Wasserstand stabil und zuverlässig hält, selbst bei Störungen durch externe Einflüsse.	Robuste Wasserstandsregelung, dass den Wasserstand stabil und zuverlässig hält, selbst bei Störungen durch externe Einflüsse.	siehe Kommentar	-Das System arbeitet zuverlässig mit Ausnahme des Sensors. Aufgrund der Decklage am Schlauch verändern sich die Werte mit der Zeit.
AT103	A003	Die Wasserstandsmessung muss eine Genauigkeit von 15 mm haben.	Die Wasserstandsmessung muss eine Genauigkeit von 15 mm haben.	I.O.	-Lässt sich sehr genau kalibrieren, nur auf Dauer veränderten sich die Werte wegen der Decklage.
AT104	A004	Das System muss, von der minimalen Wasserstandshöhe aus, die maximale Höhe in mindestens 60 Sekunden erreichen und mit einer Genauigkeit von 15 mm konstant halten.	Das System braucht ca. 70 Sekunden.	n. I. O.	-Die längere Zeit wurde für ein geringeres Überschwängen und ein besseres Anfahren der Sollhöhe in Kauf genommen.
AT105	A005	Eine Störung von 90%, muss innerhalb von 30 Sekunden ausgeglichen und die Sollhöhe wieder erreicht werden.	Das System braucht ca. 70 Sekunden.	n. I. O.	-Die längere Zeit wurde für ein geringeres Überschwängen und ein besseres Anfahren der Sollhöhe in Kauf genommen.
AT106	A006	Es muss eine Möglichkeit geben, um den Wasserstand zu beeinflussen.	Es muss eine Möglichkeit geben, um den Wasserstand zu beeinflussen.	I.O.	
AT107	A007	Echtheit gegen MATLAB/Simulink Simulation und Modellierung des Regelungs-systems, sowie zur späteren Implementierung auf dem Mikrocontroller.	Spätere Implementierung in MATLAB/Simulink Simulation und Modellierung des Regelungs-systems, sowie zur späteren Implementierung auf dem Mikrocontroller.	I.O.	
AT108	A008	Benutzerfreundlichkeit und Sicherheit, um das System auf einem Hochschulerbenstag vorführen zu können.	Benutzerfreundlichkeit und Sicherheit, um das System auf einem Hochschulerbenstag vorführen zu können.	I.O.	
AT109	A009	Simulation muss in MATLAB/Simulink erfolgen.	Simulation muss in MATLAB/Simulink erfolgen.	I.O.	
AT110	A010	Es muss eine Regelung sein.	Es muss eine Regelung sein.	I.O.	
AT111	A011	Es soll eine Echtheit in der Implementierung geben.	Es soll eine Echtheit in der Implementierung geben.	I.O.	
AT112	A012	Ein Mikrocontroller muss zur Implementierung der Software verwendet werden.	Ein Mikrocontroller muss zur Implementierung der Software verwendet werden.	I.O.	
AT113	A013	Für die Regelung muss ein Sensor verwendet werden.	Für die Regelung muss ein Sensor verwendet werden.	I.O.	
AT114	A014	Es müssen zwei Behälter benutzt werden. Einen geregelten Wassertank und einen Speichertank die fest montiert sind.	Es müssen zwei Behälter benutzt werden. Einen geregelten Wassertank und einen Speichertank die fest montiert sind.	I.O.	
AT115	A015	Ein Überlaufschutz soll integriert werden, um das Überlaufen eines Tanks zu verhindern.	Ein Überlaufschutz soll integriert werden, um das Überlaufen eines Tanks zu verhindern.	I.O.	-Überlaufen kam bei einer Wassermengenbegrenzung nicht zustande. Wassermenge für Plastikfänger auf 1,25 l begrenzt.
AT116	A016	Die Wasserpumpen müssen über eine PWM angesteuert werden.	Die Wasserpumpen müssen über eine PWM angesteuert werden.	I.O.	
AT117	A017	Die Stromführung muss sicher sein und über einen Not-Aus-Schalter verfügen der leicht zugänglich ist.	Die Stromführung muss sicher sein und über einen Not-Aus-Schalter verfügen der leicht zugänglich ist.	siehe Kommentar	-Not-Aus-Schalter funktionieren nur bedingt, da die Pumpen über 2V vom Arduino weiter betrieben werden
AT118	A018	Das System muss robust sein, um einen längeren Betrieb zu gewährleisten.	Das System muss robust sein, um einen längeren Betrieb zu gewährleisten.	n. I. O.	-Das System arbeitet zuverlässig mit Ausnahme des Sensors. Aufgrund der Decklage am Schlauch verändern sich die Werte mit der Zeit.
AT119	A019	Ein Sicherheitsmechanismus muss das austretenden Wasser auffangen oder stoppen wird.	Ein Sicherheitsmechanismus muss das austretenden Wasser auffangen oder stoppen wird.	siehe Kommentar	-Zahnmechanik wirkt als Damm
AT120	A020	Die Wartung und Reset Möglichkeit vor Ort muss gewährleistet werden.	Die Wartung und Reset Möglichkeit vor Ort muss gewährleistet werden.	I.O.	
AT121	A021	Das Hardwaredesign muss für den Einsatz im Rahmen der praktisorientierte Hochschuldemonstrationen ausgelegt sein.	Das Hardwaredesign muss für den Einsatz im Rahmen der praktisorientierte Hochschuldemonstrationen ausgelegt sein.	I.O.	
AT122	A022	Es muss eine Benutzerinteraktionsmöglichkeit geben, um den Wasserstand zu beeinflussen.	Es muss eine Benutzerinteraktionsmöglichkeit geben, um den Wasserstand zu beeinflussen.	I.O.	
AT123	A023	Es muss eine visuelle Anzeige des Wasserstandes und der Störung möglich sein.	Es muss eine visuelle Anzeige des Wasserstandes und der Störung möglich sein.	I.O.	
AT124	A024	Eine durchsichtige Abgrenzung soll vor unbefugten Zugriff schützen.	Eine durchsichtige Abgrenzung soll vor unbefugten Zugriff schützen.	I.O.	
AT125	A025	Der Arduino muss über eine geeignete Spannungsquelle betrieben werden.	Der Arduino muss über eine geeignete Spannungsquelle betrieben werden.	I.O.	
AT126	A026	Die Pumpen sollen mit 12V betrieben werden können.	Die Pumpen sollen mit 12V betrieben werden können.	I.O.	
AT127	A027	Das Projekt muss anhand des V-Modells umgesetzt und dokumentiert werden.	Das Projekt muss anhand des V-Modells umgesetzt und dokumentiert werden.	I.O.	
AT128	A028	Es muss ein Verdichtungsplan mit Fritzing erstellt werden.	Es muss ein Verdichtungsplan mit Fritzing erstellt werden.	I.O.	
AT129	A029	Die Masterarbeit soll im HSKL-WMI dokumentiert werden.	Die Masterarbeit soll im HSKL-WMI dokumentiert werden.	siehe Kommentar	-Zum Zeitpunkt des Test nicht umgesetzt

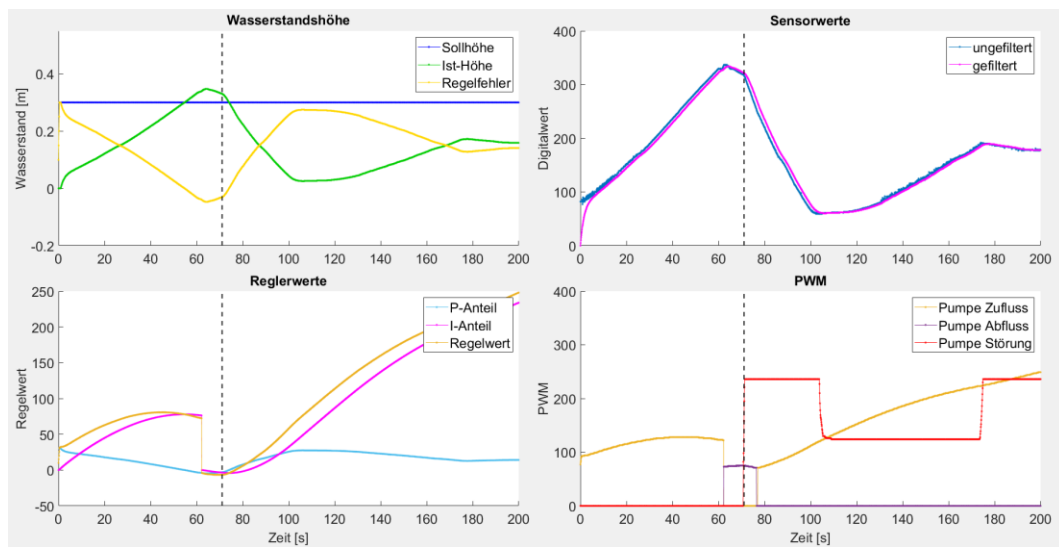
Abnahmetest

A15 Systemergebnis Störung

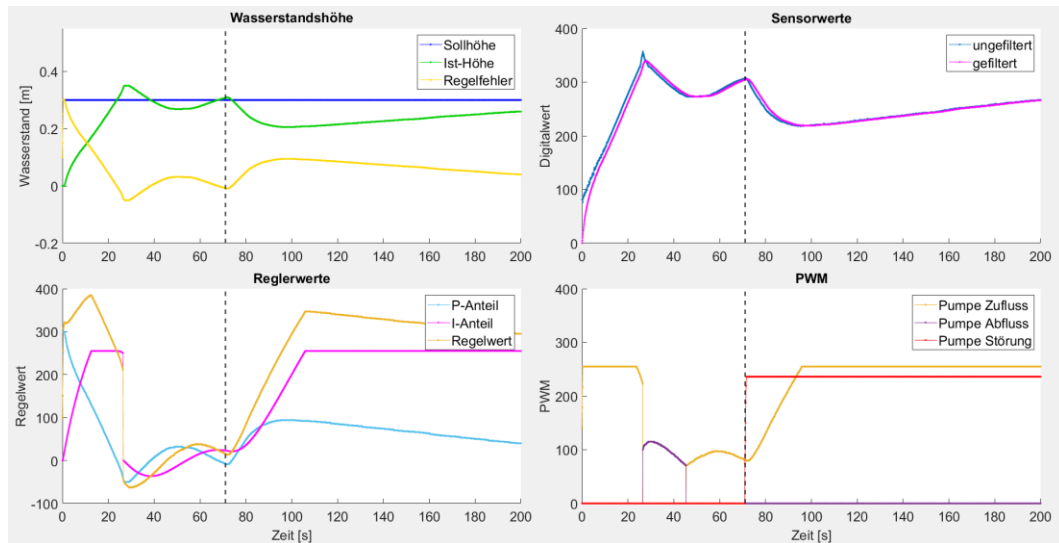


A16 Systemergebnisse verschiedener Reglerparameter

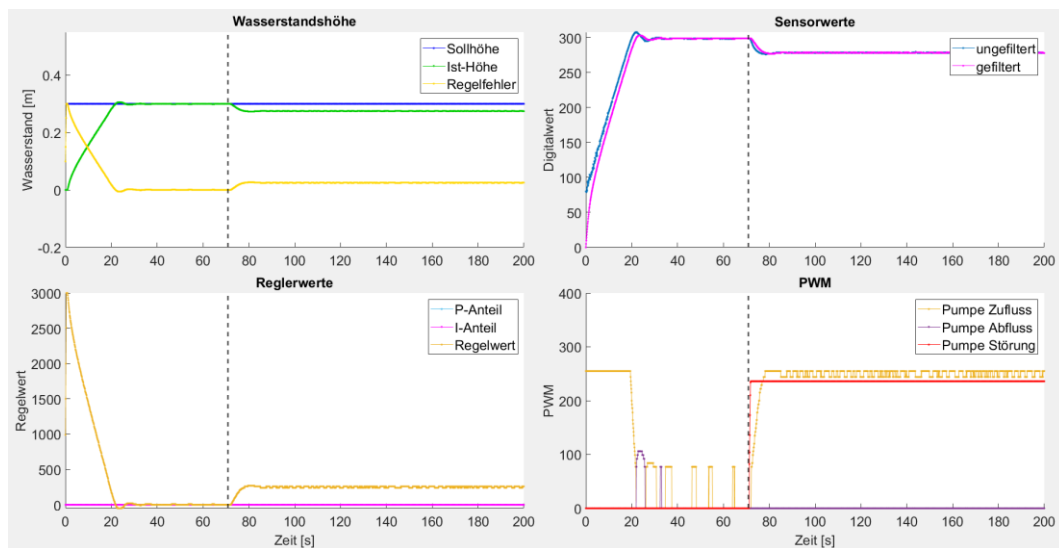
$K_P = 100$ und $K_I = 100$ mit 1 Hz



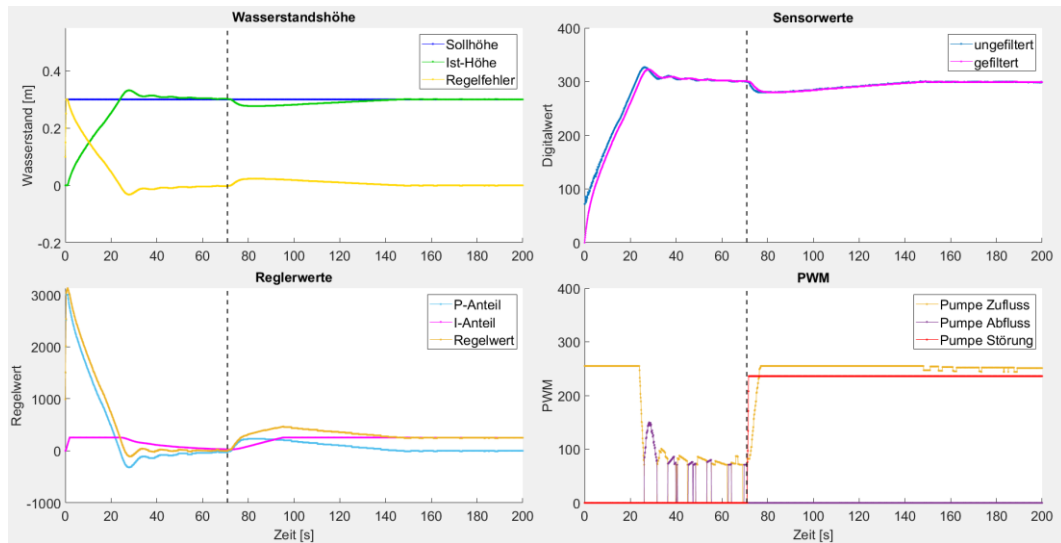
$KP = 1000$ und $KI = 1000$ mit 1 Hz



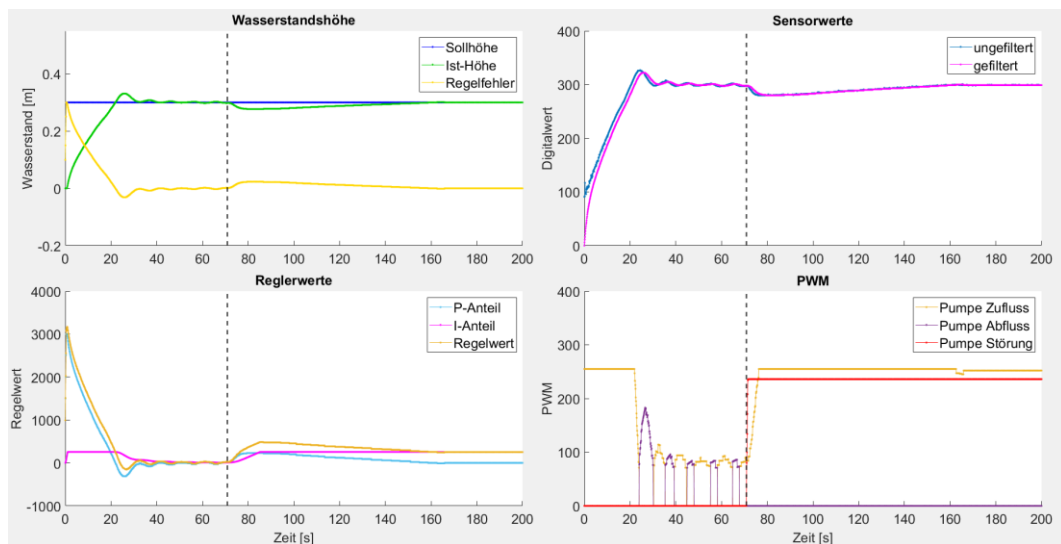
$KP = 10000$ und $KI = 0$ mit 1 Hz



$KP = 10000$ und $KI = 5000$ mit 1 Hz



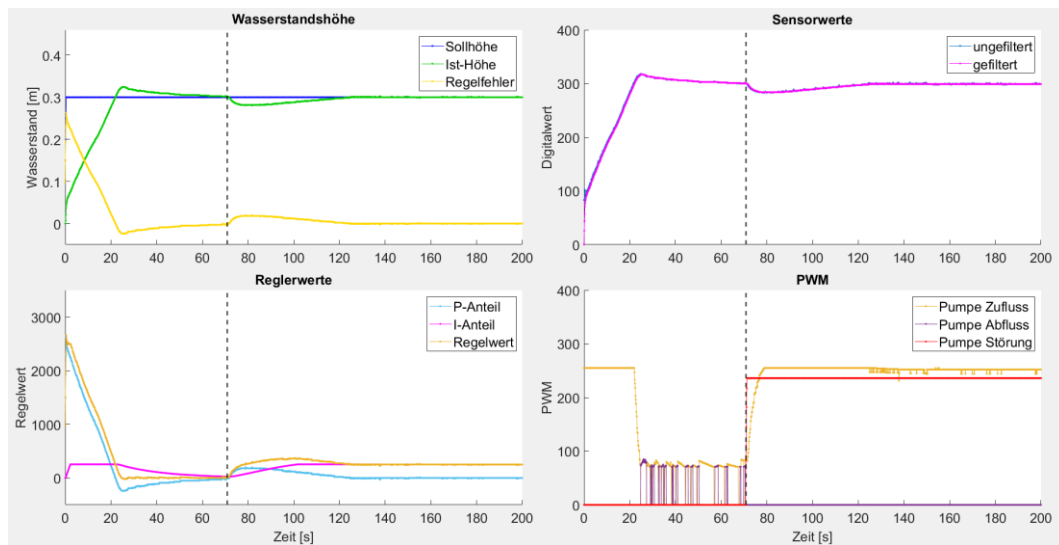
$KP = 10000$ und $KI = 10000$ mit 1 Hz



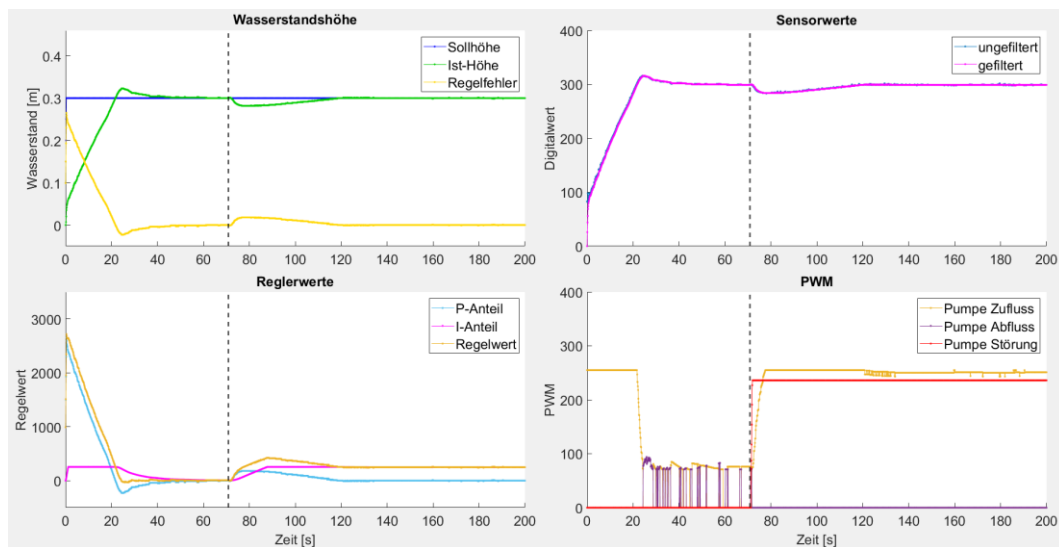
A17 Systemergebnisse der Experimente

Filterung

$KP = 10000$ und $KI = 5000$ mit 5 Hz

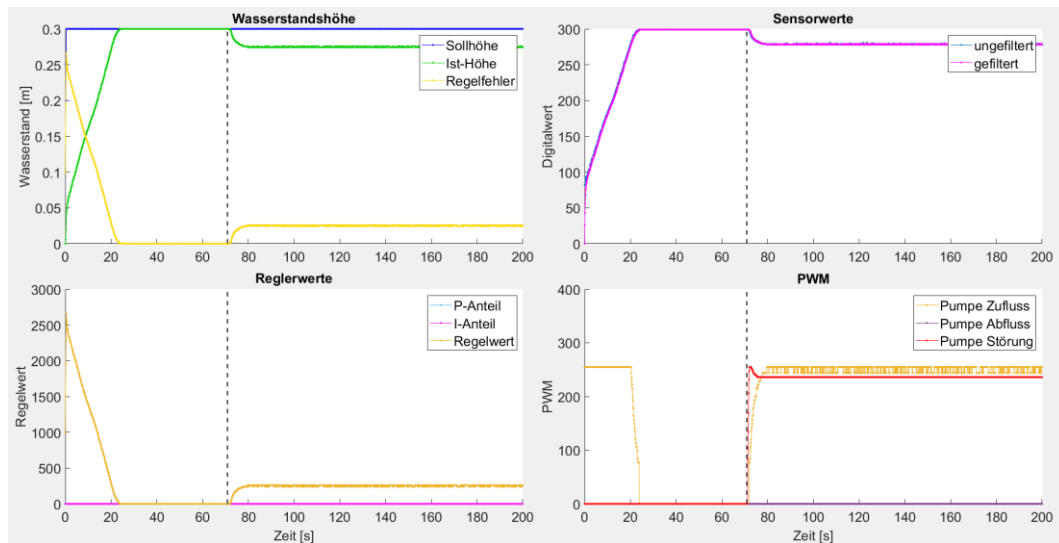


$KP = 10000$ und $KI = 10000$ mit 5 Hz

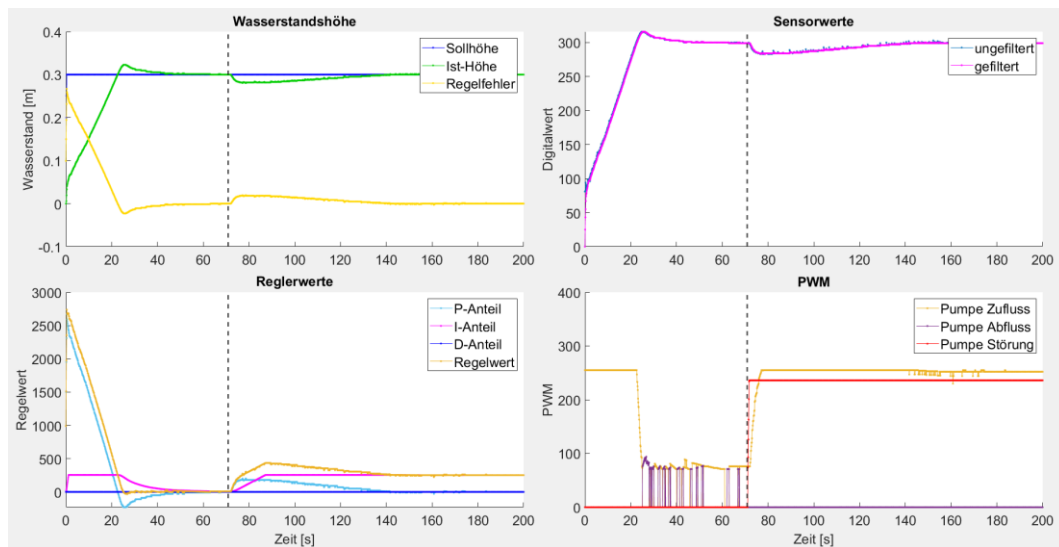


Regelung

$K_P = 10000$ und $K_I = 0$ mit 5 Hz

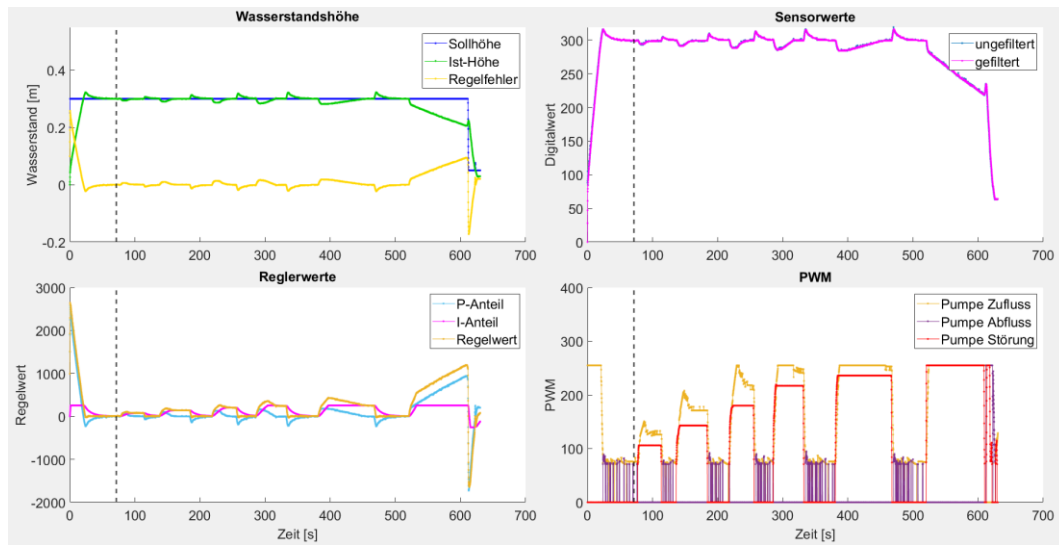


$K_P = 10000$, $K_I = 10000$, $K_D = 0$ und $T = 0,1$ mit 5 Hz



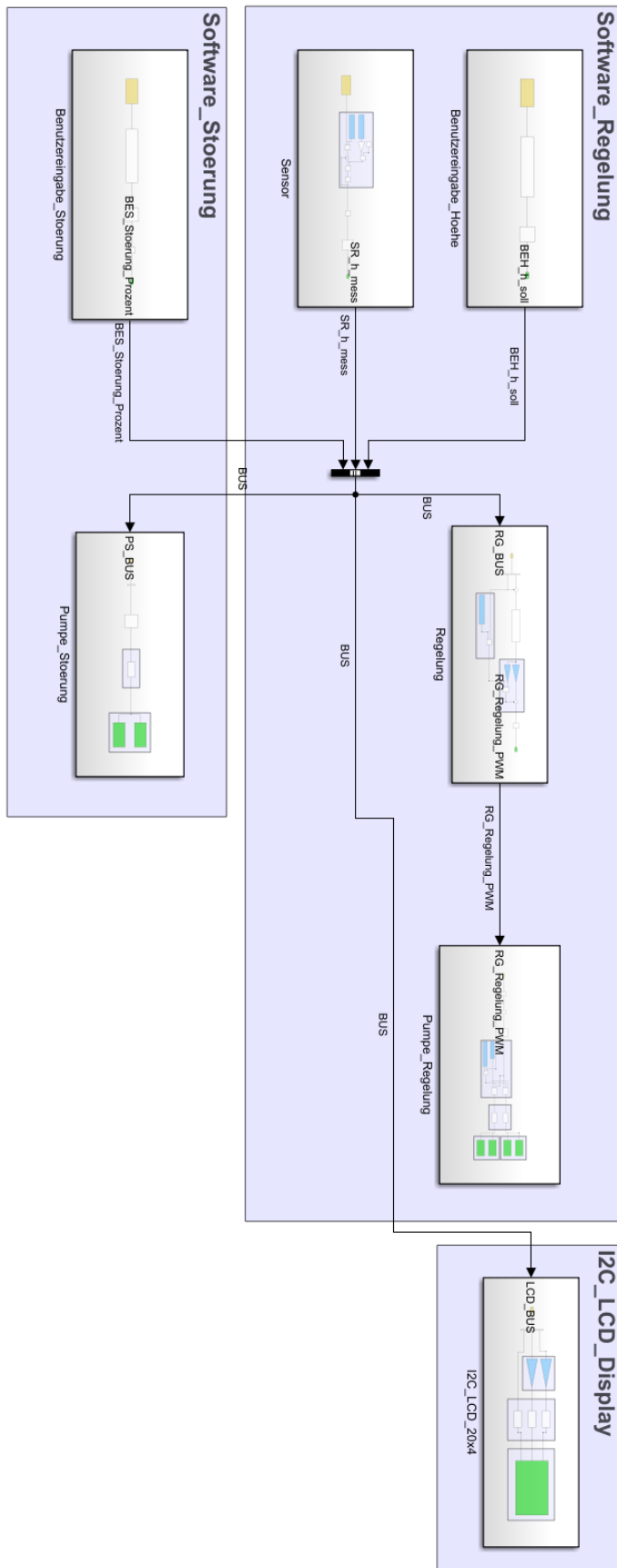
Störung

$KP = 10000$ und $KI = 10000$ mit 5 Hz

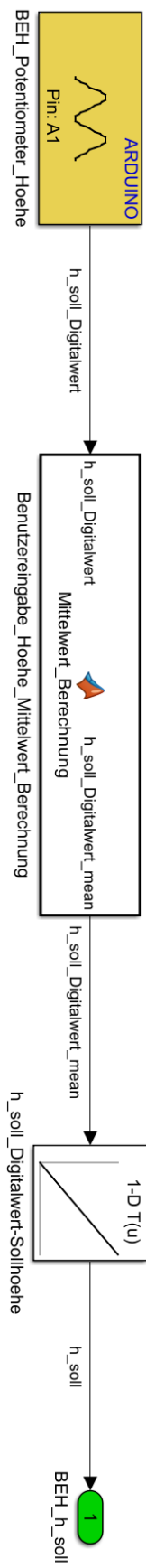


A18 Softwareumsetzung des fertigen Systems

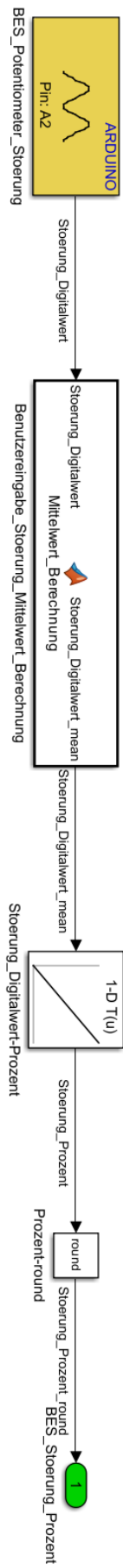
Gesamtsystem



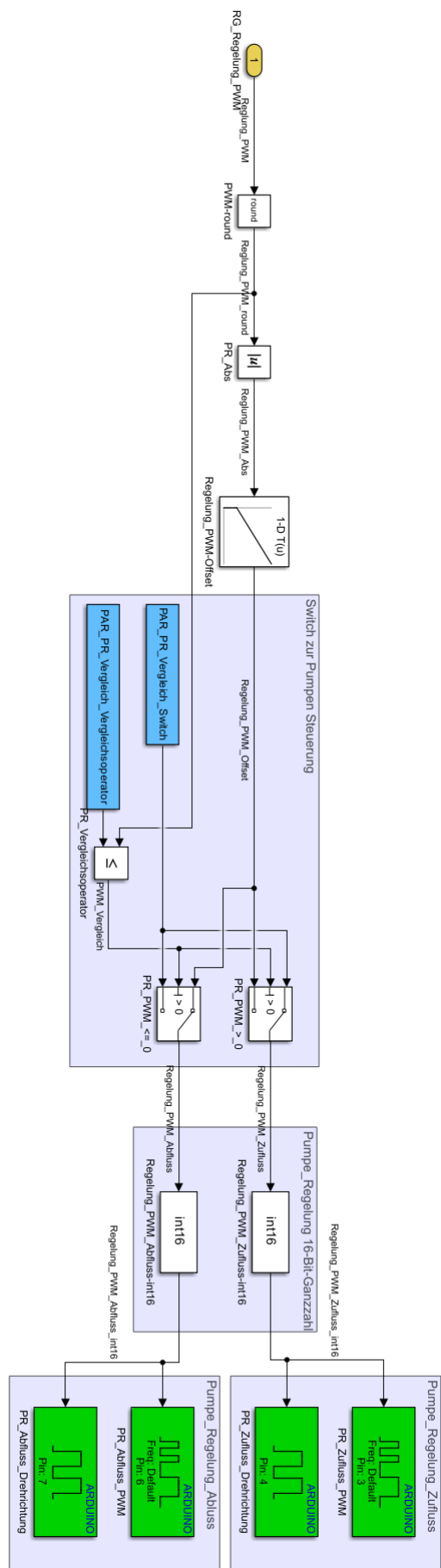
Benutzereingabe_Hoehe



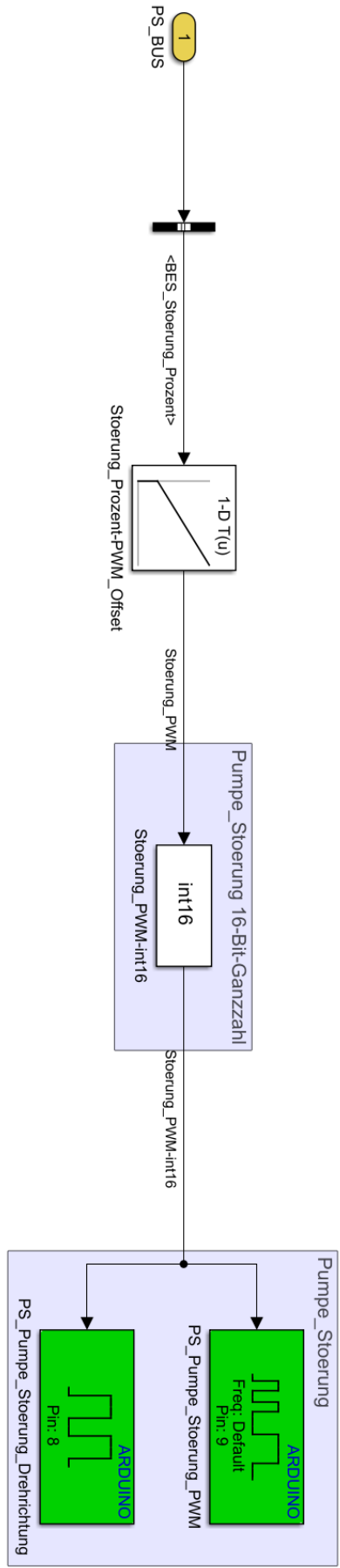
Benutzereingabe_Stoerung



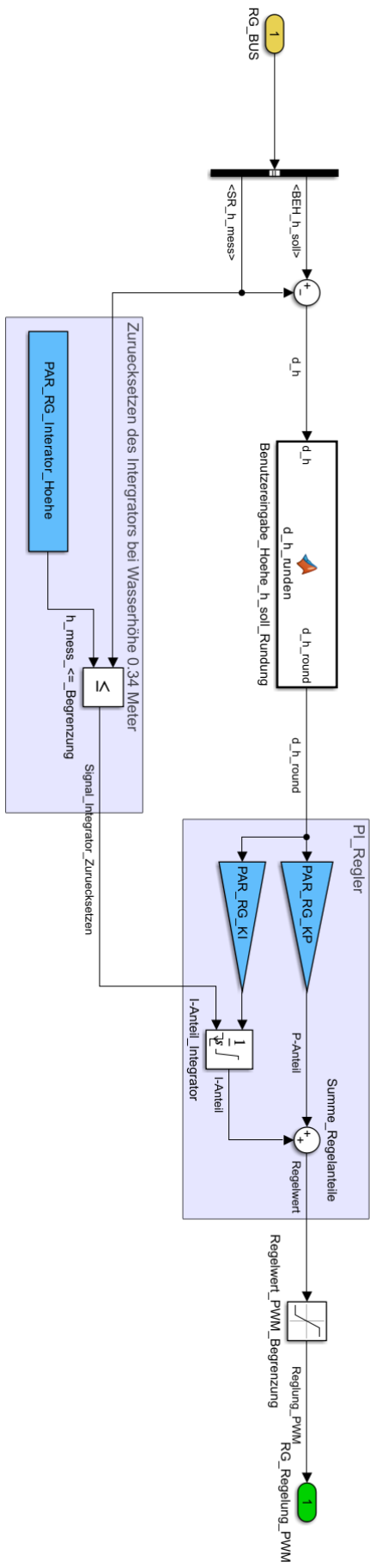
Pumpe_Regelung



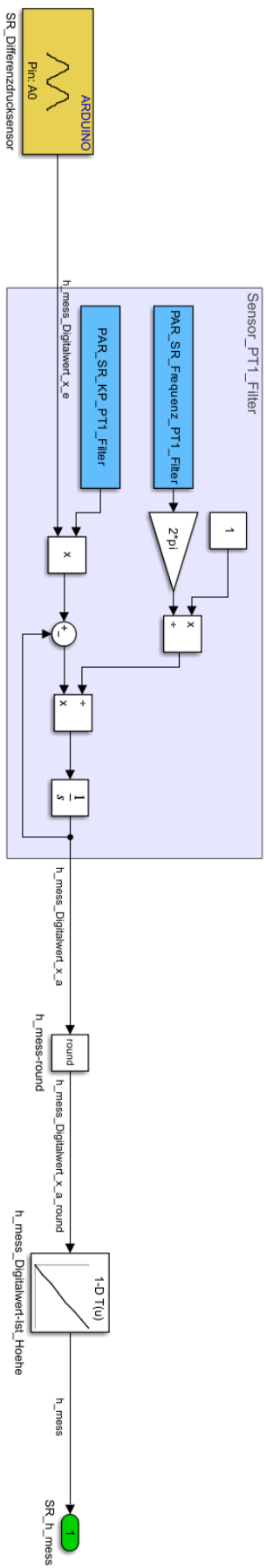
Pumpe_Stoerung

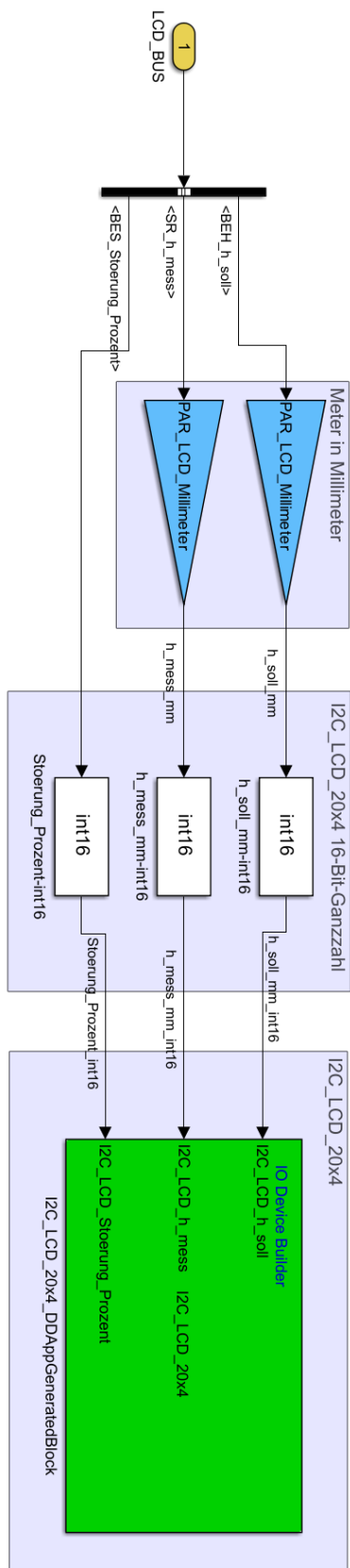


Regelung

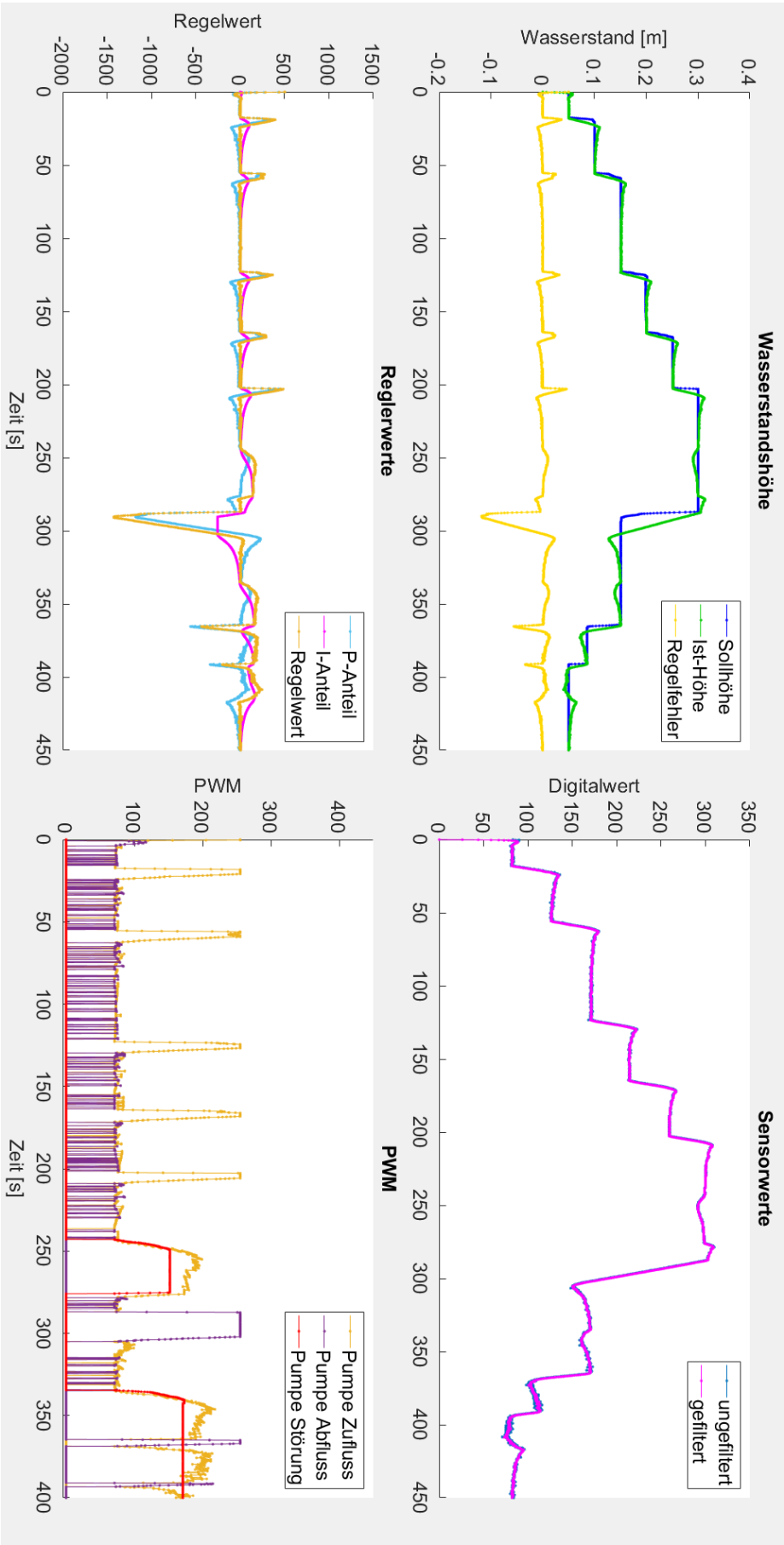


Sensor





A19 Abschließender Systemtest



Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Wörtlich übernommene Sätze und Satzteile sind als Zitate belegt, andere Anlehnungen hinsichtlich Aussage und Umfang unter Quellenangabe kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und ist auch noch nicht veröffentlicht.

Lippstadt, 26.05.2025

Ort, Datum

Denim Hitz

Unterschrift