

Sommersemester 2022



Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Bachelor of Science (B.Sc.)

Bachelorarbeit zum Thema:

**Betriebssoftwareentwicklung mit MATLAB®-MicroPython-Schnittstelle und
Verbesserung einer geregelten Zweikreis-Espressomaschine**

*Operating Software Development Based on a MATLAB®-MicroPython Interface and Improvements of
a Controlled Dual Circuit Espresso Machine*

Name, Vorname Budnick, Jan
E-Mail: jan.budnick@hm.edu/jan.budnick99@gmail.com
Matrikelnummer: 07152319
Studiengang Maschinenbau Bachelor
Studiengruppe MBB7
Unter Betreuung von: Dipl. Ing. Armin Rohnen

Abgabedatum: 08.08.2022

Selbständigkeitserklärung

Hiermit wird erklärt, dass die Arbeit mit obigem Thema selbständig verfasst und noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt wurde. Weiterhin sind keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel verwendet und wörtliche sowie sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet worden.

Neufahrn bei Freising, den 07.08.2022


Unterschrift

Kurzfassung/Abstract

Der nachfolgende Bericht dokumentiert die im SoSe2022 erzielten Fortschritte an der Labortechnischen Espressomaschine. Dies beinhaltet sowohl Software- als auch Hardwarefortschritte. Die Arbeit soll dabei die Einarbeitung eines Nachfolgers erleichtern. Um dies zu erreichen werden die Komponenten (Software und Hardware) kurz vorgestellt, deren Herausforderungen erörtert und dann implementierte und zu implementierende Lösungen beschrieben. Die meisten dieser Herausforderungen sind Stand jetzt noch nicht in der Tiefe untersucht. Auch die Software wird aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit lediglich oberflächlich in Struktur und Funktionalität beschrieben. Um ein tieferes Verständnis der Software zu erlangen, kann die intensiv kommentierte Software gelesen werden. Das Ziel dieser Arbeit ist, einen automatisierten Kaffeebezug zu ermöglichen. Dafür wurden verschiedene Regler implementiert (Durchfluss-, Mischtemperatur-, Füllstands- und Heizregler). Dieses Ziel konnte erreicht werden, jedoch sind Regelgüte und Reglergeschwindigkeit noch stark ausbaufähig und es bedarf daher weiterer Forschung.

The following thesis documents the progress made in the summer semester 2022 regarding the “Labortechnische Espressomaschine” (Laboratory Espresso Machine). This includes both advances in software and hardware. This report aims to simplify the familiarisation with the topic for any successor. To achieve this each of the components (software and hardware) is briefly described. Furthermore, challenges regarding the components are documented. Where possible implemented solutions are noted and otherwise viable solutions to be implemented described. Many of these challenges have not been analysed in depth. Similarly, the written software is only described in its structure and functionality. A more in-depth description would be beyond the scope of this report. Should an in-depth understanding be desired, then the extensively commented Software can be read. The target of the work done is primarily an automated dispensing of coffee. To this extent a variety of controllers have been implemented (flow, supplied water temperature, water level and heating controller). This target has been achieved. However, the quality and speed of the controllers still need to be significantly improved to meet the demands and further research on the topic is required.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
ADC	Analog Digital Converter (Analog zu Digitalwandler)
DAC	Digital Analog Converter (Digital zu Analogwandler)
I²C	Inter-Integrated-Circuit (Ein Serieller Datenbus für die Kommunikation zwischen Schaltungsteilen)
MCU	Microcontroller Unit (Mikrocontroller)
NI	National Instruments™
NTC	Negative Temperature Coefficient (Negativer Temperaturkoeffizient, symbolisch für ein Temperatursensor mit sinkendem Widerstand bei steigender Temperatur)
PWM	Pulse Width Modulation (Pulsweitenmodulation)
REPL	Read Eval Print Loop (Lesen Ausführen Schreiben Schleife, Interaktive Kommandozeile in MicroPython)
SSR	Solid State Relay (Halbleiterrelais)

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erklärung
ADC	1	Durch den ADC bereitgestellten Messwert (0-4095)
C	verschiedene	Messwertoffset eines Sensors
k_D	1	Verstärkungsfaktor des D-Anteil im PID-Regler
k_I	1	Verstärkungsfaktor des I-Anteil im PID-Regler
k_P	1	Verstärkungsfaktor des P-Anteil im PID-Regler
p₁₆	mbar	Gemessener Druck des 16-bar Sensors
p₄	mbar	Gemessener Druck des 4-bar Sensors
Q_W	kJ	Benötigte Wärmemenge zum Aufheizen des Wassers im Kessel
t_{AK}	min	Benötigte Zeit zum Aufheizen Kessels ohne Inhalt
t_{AW}	min	Benötigte Zeit zum Aufheizen des Wassers im Kessel
T_L	°C	Gemessene Wassertemperatur des Leitwertensors
T_M	°C	Mischwassertemperatur (am Mischertemperatursensor)
V_D	mV	Dosierventilansteuerspannung
V_E	mV	Gemessene Spannung an einem Eingang der Spannungsmessplatine
V_{E_{max}}	mV	Maximal messbare Spannung an einem Eingang der Spannungsmessplatine
σ_L	$\frac{mS}{cm}$	Gemessener Wasserleitwert des Leitwertensors

Inhalt

Selbständigkeitserklärung	II
Kurzfassung/Abstract	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelzeichen	IV
1 Einführung	1
2 Stand der Entwicklung.....	2
3 Aufbau der Labortechnischen Espressomaschine.....	3
3.1 Magnetventile	3
3.2 Pumpe	4
3.3 Dosierventil	5
3.4 Kesselheizelement.....	6
3.5 Weitere hydraulische Komponenten	7
3.6 Temperatursensoren vom Typ NTC.....	8
3.7 Vorkalibrierte Sensoren mit Spannungsausgabe (inkl. Füllstand).....	9
3.8 Flowmeter	11
4 Betrieb der Maschine (Software)	12
4.1 MATLAB® App im Überblick	13
4.2 Kommunikation und Befehlsausführung.....	14
4.3 Messwertglättung	15
4.4 Füllregler.....	17
4.5 Heizregler	18
4.6 Durchflussregler/Flowregler.....	19
4.7 Mischwassertemperaturregler.....	21
4.8 Programme (switch app.program)	24
4.9 Manueller Modus	24
4.10 Automatischer Modus.....	26
5 Zusammenfassung und Ausblick	28
Abbildungsverzeichnis.....	i
Anhangsverzeichnis.....	ii
Literaturverzeichnis.....	iii
Anhang	iv

1 Einführung

Im Zuge verschiedener studentischer Projekte und Kooperationen wurden mehrere Espressomaschinen entwickelt. Wichtiger Bestandteil aller Modelle ist die Parametrierbarkeit. Diese ist vor allem wichtig, um das Hauptziel der Maschinen zu ermöglichen: Das Abbilden verschiedener Maschinen in einer.

Um dies zu erreichen, besitzen diese Maschinen verschiedene Modifikationen gegenüber marktüblichen Modellen. Sie haben eine unbeheizte Brühgruppe. Die Brühgruppe besteht aus Kunststoff mit geringer Wärmekapazität, um dem Wasser möglichst wenig Energie zu entziehen. Dies ermöglicht verschiedene Wasserbezugstemperaturen, ohne auf das Aufheizen oder Abkühlen der Brühgruppe zu warten. Die unterschiedlichen Temperaturen werden durch einen dosierbaren Mischer in der Bezugsstrecke ermöglicht. Zusätzlich werden Wasserdruck und Durchfluss (Flowrate) durch eine drehzahlge-regelte Zahnradpumpe einstellbar. Das heiße Wasser wird durch einen Wärmetauscher, in Form einer Wasserwendel, bereitgestellt. Diese befindet sich in einem Wasserkessel, der für die Dampfbereitstellung verwendet wird.

Um verschiedene Maschinen abbilden zu können werden Regler benötigt. Die ersten Regler werden in dieser Arbeit beschrieben. Dies beinhaltet eine Füllstands- und Heizregelung für den Kessel sowie eine Durchfluss- und Temperaturregelung für das bezogene Kaffee- und Teewasser.

Betrieb und Bedienung der Maschinen werden über ein STM32F411RE (im weiteren MCU genannt) und eine grafische Oberfläche realisiert. Die MCU steuert Aktorik und liest Sensorik mittels Maschinenbefehlen aus. Diese werden in der Programmiersprache MicroPython ausgeführt. Die grafische Oberfläche (fortan App genannt) wird in MATLAB® APPDESIGNER realisiert (auf einem separaten Gerät). Diese nimmt die Messwerte der MCU entgegen, verarbeitet sie und zeigt sie dem Nutzer an. Zusätzlich laufen Regler und Programme (z.B. Kaffeebezug) in der App. Die Interaktion des Nutzers wird durch verschiedene Bedienelemente wie Knöpfe, Schalter und Bearbeitungsfelder ermöglicht. Nachdem die App Regler und Programme abgearbeitet hat, übergibt diese die Aktorenbefehle an die MCU mittels serieller Kommunikation.

Das Objekt dieser Arbeit ist vorrangig die Labortechnische Espressomaschine. Die Entwicklung einer Betriebssoftware inkl. Regler zum Bezug von Kaffee ist das Ziel dieser Arbeit. Im Zuge dessen werden auch Probleme untersucht und einige physische Anpassungen vorgenommen. Dort, wo es an Zeit oder Mittel mangelt, werden passende Lösungsideen bereitgestellt. Es wird dabei nicht auf jedes Detail eingegangen. Vielmehr versucht diese Arbeit einen Überblick über die abgeleiteten Arbeiten und die Herangehensweise zu geben. Im Vordergrund stehen die Untersuchung und Lösung von Problemen. Genauso wird die entwickelte Software nicht im Detail erklärt, sondern die Aufgabe untersucht, ein Ansatz erklärt und Verbesserungsmöglichkeiten präsentiert. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sind übertragbar auf die anderen Modelle. Auch die Software lässt sich an die anderen Modelle anpassen.

2 Stand der Entwicklung

Zu Beginn der Arbeiten befindet sich die Labortechnische Espressomaschine in einem fortgeschrittenen Zustand bezüglich Konstruktion und Aufbau. Die notwendigen Komponenten sind größtenteils montiert und angeschlossen. Einige weitere Komponenten werden im Zuge der Bachelorarbeit montiert und angeschlossen. Einige Komponenten dagegen wurden fehlerhaft oder unzureichend montiert und werden im Zuge der Arbeiten ausgetauscht. Manche Komponenten sind defekt und müssen ebenfalls ausgetauscht werden. Dies liegt jedoch außerhalb des Umfangs dieser Arbeit und wird daher nicht weiter behandelt.

Die Maschine wird über eine STM32F411RE gesteuert. Da das STM32 teilweise unzureichende Funktionalität und nicht genug Ein- und Ausgänge bereitstellt, wird dieses auf eine Erweiterungsplatine (im weiteren Basisplatine) aufgesteckt. Außerdem werden auf diese Basisplatine Messkarten aufgesetzt zum Verarbeiten und Filtern von Messsignalen. Diese Messsignale werden dann als analoge Spannung im Bereich 0-3,3 V an eines der ADC-Pins der MCU angelegt. Die gesamte Elektronik wurde bereits im Vorhinein entwickelt. Sie ist für den Umfang der Arbeit fertig und ausreichend. Es werden lediglich einige Sensoren ausgetauscht oder hinzugefügt.

Der Zustand der Software für die Labortechnische Espressomaschine befindet sich zum Startzeitpunkt in einem Anfangszustand. Die grundlegenden Befehle zur Ansteuerung von Sensoren und Aktoren sind bereits in [41] zusammengefasst. In diesem Bericht ist die Schnittstelle zwischen MCU und Bediensoftware (MATLAB® App) ebenfalls definiert. Diese ist notwendig, da auf der MCU vorerst nur grundlegende Befehle ausgeführt werden sollen. Steuerung, Regelung und Bedienung werden über ein separates Gerät realisiert. Auf diesem Gerät läuft eine MATLAB® App, welche die notwendigen Befehle durch serielle Kommunikation an die MCU überträgt. Diese App enthält zum Startzeitpunkt die Verbindung mit der MCU und Initialisierung einiger Sensoren und Aktoren. Außerdem sind einige grafische Elemente bereits realisiert. Diese müssen überarbeitet und erweitert werden. Einige der Bedienelemente verfügen bereits über einen Code, der bei Interaktion ausgeführt wird. Dieser ist unfertig und ungeeignet für die Programmiersystematik dieses Berichtes und muss aus diesen Gründen überarbeitet und erweitert werden.

Für den Betrieb der Espressomaschine werden Regler benötigt. Es liegt eine Arbeit [21] zu Reglern an einem vorherigen Aufbau vor. Diese sind allerdings auf Grund der Veränderungen im Aufbau nicht übertragbar und wurden nicht realisiert. Die Regler müssen demnach neu entworfen, implementiert und geprüft werden.

3 Aufbau der Labortechnischen Espressomaschine

Der Aufbau der Labortechnischen Espressomaschine ähnelt zwar dem Aufbau anderer Maschinen, unterscheidet sich jedoch in der genauen Umsetzung. Meist sind diese Unterschiede auf die Parametrierbarkeit zurückzuführen. Der physische Aufbau und dessen einfache Ansteuerung werden in diesem Kapitel beschrieben.

Grundlegend kann die Labortechnische Espressomaschine als Zweikreiser klassifiziert werden. Die Maschine besitzt einen kombinierten Dampf- und Wasserkessel, in dem Wasser erhitzt und Dampf erzeugt wird. Dieses Wasser wird nicht direkt für den Wasserbezug verwendet. Stattdessen wird ein Wärmetauscher verwendet, um heißes Wasser für den Wasserbezug bereitzustellen. Ein Überblick in Form eines Hydraulikplanes kann dem Anhang (Anhang 1 und 2) entnommen werden.

3.1 Magnetventile

Der Fluss von Flüssigkeiten in der Maschine wird durch Magnetventile gesteuert. Diese haben zwei Zustände: bestromt und unbestromt. Im Falle der verbauten 2/2-Wegeventile bedeutet dies geöffnet und geschlossen. Die verbauten 3/2-Wegeventile können nur zwischen zwei Pfaden schalten aber nicht komplett sperren.

Nach der Wasserwendel sollen 3/2-Wegeventile angeschlossen werden. Die Wasserwendel ist ein spiralförmiger Wärmetauscher, der sich im Dampfkessel befindet. Aufgrund des Ventiltyps kann die Wasserwendel nicht gesperrt werden. Dies bedeutet, dass sich auch in der Wasserwendel Dampf bildet und somit das Wasser verdrängt. Beim nächsten Bezug gibt es demnach eine signifikante Verzögerung, bis Druck und Durchfluss den Sollwert erreichen. Darüber hinaus ist die Temperaturmessung durch Dampf und Luftblasen im Wasser ungenau.

Dieses Problem wurde temporär gelöst durch Austausch des ersten 3/2-Wegeventils durch 2 normal-sperrende 2/2-Wegeventile. Dadurch kann sich Druck in der Wasserwendel aufbauen und somit kein Dampf entstehen (solange die Wasserwendel gefüllt ist).

Diese temporäre Lösung ist suboptimal, da sie einen erhöhten Steuerungsaufwand (mehr Software und Teile) und keinen physischen Schutz gegen Überdruck bietet. Der Tausch bedeutet ein extra Magnetventil. Auch eine extra Ansteuerung wird benötigt. Es müssen zusätzliche Leitung verlegt werden und die Ansteuerelektronik muss erweitert werden. Zusätzlich ist der Softwaresteuerungsaufwand höher, da der Überdruckschutz nicht mehr implizit im System enthalten ist. Das Wasser dehnt sich beim Erhitzen aus. Dies kann aufgrund mangelnder Expansionsmöglichkeit schnell zu hohem Druck führen und diese Expansion muss somit durch Regelung kompensiert werden. Hierzu gibt es drei Möglichkeiten. Erstens: Verbinden von Wasserwendel mit dem Festwasseranschluss beim ersten Aufheizen und nach einem Wasserbezug. Zweitens: kurzes Verbinden der Wasserwendel und dem Überlauf, beim Erreichen des Siedepunktes und nach einem Wasserbezug. Dies erlaubt minimale Dampfbildung, in dessen Raum das Wasser dann expandieren kann. Drittens: Verbindung von Wasserwendel und Kessel beim Aufheizen und kurz nach dem Bezug von Wasser. Theoretisch sollte die Temperatur im Kessel nicht geringer sein als in der Wasserwendel, sodass der Dampfdruck dort höher sein sollte. Dies hätte zur Folge, dass Wasserexpansion möglich ist aber keine Dampfbildung. Verbinden bedeutet in diesen Fällen, das Öffnen der notwendigen Ventile. Zusätzlich zum Öffnen und Warten, erfordert die temporäre Lösung, dass vor einem Wasserbezug der Pumpendruck aufgebaut werden muss.

Jedes dieser Möglichkeiten bietet Nachteile. Zu erstens: Der Festwasseranschluss muss mindestens 1,6 bar Druck aufbringen, im Idealfall mehr (2 bar). Zu zweitens: Es muss lang genug gewartet werden, dass sich definitiv Dampf gebildet hat. Dies kann zu signifikanten Dampfmengen führen, welche sich negativ auf den nächsten Bezug auswirken. Zu drittens: Kleine lokale Druckunterschiede führen zu einem Teilentleeren der Wasserwendel in den Boiler. Der Boiler füllt sich nach jedem Bezug weiter auf. Dies bedeutet, dass nur wenige Bezüge möglich sind, bevor der Boiler geleert werden muss. Es wird daher erstens umgesetzt, da es sich am wenigsten auf den Kaffeebezug auswirkt. Zweitens kann durch einige Anpassungen implementiert werden. Alle drei Lösungen haben den Nachteil, dass bei unvorhergesehenem Abschalten sich starker Überdruck in der Wasserwendel bilden kann.

Eine optimale Lösung wird unter Verwendung von Überdruckventilen erzeugt. Eine davon ist besonders preiswert und hat keinen Einfluss auf den maximalen Druck in der Brühgruppe. Zusätzlich werden Teile verwendet, die einfach bezogen und eingebaut werden können. Dazu wird die temporäre Lösung zurückgebaut. Es befindet sich somit wieder ein 3/2-Wegeventil nach der Wasserwendel. Im unbestromten Zustand führt dieses zum Überlauf. Im bestromten Zustand führt das Ventil zum Wasserbezug. Das Überdruckventil wird nach dem Magnetventil auf dem Weg zum Überlauf so eingesetzt, sodass es den Weg zum Überlauf bis zu einem gewissen Druck sperrt. Solange das Magnetventil unbestromt ist, verhindert das Überdruckventil die Dampfbildung. Sobald Pumpendruck anliegt, öffnet das Überdruckventil und Wasser kann in den Überlauf fließen. Dafür ist ein Öffnungsdruck von etwa 2 bar notwendig. Ein entsprechendes Ventil kann bei AVS-Römer bestellt werden (Öffnungsdruck 2,5 bar). Die Funktionalität existiert auch in Kombination mit Unterdruckschutz in Form eines Multifunktionsventils (Öffnungsdruck 3,5 bar). Ein Nachteil dieser Lösung ist die Verdampfung bei noch zu geringem Gegendruck beim Kaffeebezug. Dieser Nachteil kann durch eine Drossel nach der Wasserwendel und/oder vor der Brühgruppe reduziert werden. Es ist zu beachten, dass diese Drosseln den Volumenstrom begrenzen und einen Druckabfall verursachen. Die Drosseln müssen demnach entsprechend der Anforderungen dimensioniert werden. Der notwendige Druckaufbau vor Ventilöffnung kann entfallen, wenn ein Rückschlagventil in den Frischwasseranschluss gesetzt wird.

Die Magnetventile werden mit 230 V 50 Hz geschaltet. Die Bestromung wird durch jeweils ein SSR geschaltet. Die SSRs werden auf der SSR-Insel gebündelt. Die Steuersignale kommen von einem MCP23017-Expander, welcher durch die MCU gesteuert wird. Das Schalten einzelner Ventile und die Initialisierung des MCP23017 ist in [41] dargelegt.

3.2 Pumpe

Zur Regelung des Wasserstroms wird eine steuerbare Pumpe verwendet. Die verbaute Pumpe ist eine Fluid-O-Tech FG300 mit 4 mm Zahnrädern. Es ist eine Getriebepumpe bzw. eine Zahnradbepumpe mit einem Verdrängungsvolumen von 0,3 ml/U. Die Versorgungsspannung der Pumpe beträgt 24 V. Die Ansteuerung erfolgt über ein analoges Spannungssignal von 0-5 V. Spannungen unter 0,3 V werden als 0 V gewertet. Das Spannungssignal wird durch die Leistungselektronik der Pumpe in eine geregelte Drehzahl gewandelt. Der Umwandlungsfaktor beträgt $1 \text{ mV} = 1 \text{ U/min}$. [65] Die 0-5 V werden durch einen DAC in Form eines MCP4725-Bausteins erzeugt. Dieser kommuniziert über I²C mit der MCU. Ein Beispielcode ist in [41] dargelegt.

Die Pumpe weist einige suboptimale Charakteristiken auf. Die angesprochene Schwellenspannung von 300 mV bedeutet ein minimales Fördervolumen von 1,5 ml/s (ohne Gegendruck). Die Pumpe läuft bei dieser Drehzahl besonders beim Anlaufen unruhig. Es ist somit empfehlenswert, Werte jenseits von 500 mV zu verwenden. Zusätzlich verhält sich der Volumenstrom bei konstanter Ansteuerspannung

steifer (konstanter) als gewünscht. Der Druck steigt bei Drosselung des Volumenstroms schnell an. Bei einem Versuch konnten etwa 12 bar Druckerhöhung im Nullförderbetrieb bei 2200 mV festgestellt werden (siehe Anhang 12).

Es kann durch einige Modifikationen Einfluss auf diese Charakteristiken genommen werden. Dies beinhaltet vor allem Drosseln. Aktiv steuerbare Elemente erlauben wesentlich feinere Einstellmöglichkeiten und eine größere Bandbreite von Druck und Durchfluss. Aktive Elemente sorgen jedoch für signifikante Kostenerhöhung. Eine Festdrossel direkt nach der Pumpe eignet sich nicht, da sie entweder bei niedrigem Durchfluss kaum Einfluss nimmt oder den Durchfluss stark begrenzt. Eine steuerbare Drossel könnte den Durchfluss fein dosieren bis hin zu Nullförderung. Gleichzeitig sind große Durchflüsse und minimaler Druckabfall möglich.

Eine weitere Modifikation ist die Installation eines Pumpenbypasses. Dieser verbindet Pumpenein- und -ausgang durch eine Drossel. Auch dieser erbringt die besten Resultate mit aktiver Steuerung. Er kann jedoch auch mit einer Festdrossel betrieben werden. Durch diesen würde sich der Volumenstrom zwischen Bypass und Bezug aufteilen. Dies würde einer weicheren Pumpenkennlinie entsprechen (weniger Durchfluss bei gleicher Drehzahl und Druck). Wenn die Bypassdrossel richtig ausgewählt wird, würde sich dies nicht negativ auf den maximalen Druck und Durchfluss auswirken, da genug Leistungsreserve vorliegt. Bei Verwendung eines Bypasses ist die Platzierung eines Rückschlagventiles notwendig. Dies verhindert eine Stromflussumkehrung, sodass Frischwasser nicht aufgrund des Festwasserdrucks an der Pumpe vorbeifließen kann. Damit der Bypass gut funktionieren kann, braucht dieser Gegendruck. Der Bypass ist somit für geringen Fluss bei geringem Gegendruck (des Kaffeemehls) ungeeignet. Das bedeutet auch, dass der Bypass hohen Festwasserdruck bei geringem Gegendruck nicht kompensieren kann.

Da die Pumpe derzeit einen Druck bereitstellen kann, der den zugelassenen Druck einiger verbauter Komponenten übersteigt, ist die Installation eines Überdruckventils ratsam. Dieses kann auch im Bypassformat installiert werden, muss dann aber einen Absolutdruckvergleich durchführen.

Zusätzlich zu der minimal möglichen Drehzahl wird in der Programmierung eine minimal sinnvolle Drehzahl verwendet. Diese hat die Aufgabe Pumpe und Ventile zu schonen, wenn diese geschlossen werden. Darüber hinaus wird sie verwendet, um Pumpendruck aufzubauen, bevor die Ventile geöffnet werden. Dies ist besonders dann wichtig, wenn der Festwasseranschluss den Dampfdruck in der Wasserwendel nicht kompensieren kann.

3.3 Dosierventil

Zur Regelung vom Mischverhältnis (heiß und kalt) des bezogenen Wassers wird ein steuerbares Dosierventil verwendet. Dieses kann den Drosselquerschnitt anpassen. Es wird im Kaltwasserstrang platziert. Zusammen mit einer Festdrossel im Heißwasserstrang bildet sich ein Drosselverhältnis, welches das Mischverhältnis beeinflusst. Bei konstantem Durchfluss und Drosselöffnungsgrad bleibt das Mischverhältnis konstant.

Verbaut ist aktuell eine Drossel des Typen EFC 11-958 des Herstellers AVS-Römer. Diese lässt sich ähnlich wie die Pumpe mit einem analogen Spannungssignal steuern. Das Spannungssignal kann Werte zwischen 0 und 10 V annehmen. Das Signal steuert den Öffnungsgrad des Dosierventils, wobei 0 V komplett geschlossen und 10 V komplett offen bedeuten. [68]

Im Betrieb hat sich das Dosierventil als zu langsam herausgestellt. Im Datenblatt des Herstellers sind Ansprechzeiten von <150 ms, Verstellzeiten von bis zu <700 ms und Totzeiten nach dem Verstellen von <400 ms, das ergibt in ungünstigen Fällen Zykluszeiten von über einer Sekunde. [68]

3.4 Kesselheizelement

Zum Heizen des Wassers im Kessel/Boiler wird eine 230 V elektrisch isolierte Widerstandsheizspirale verwendet. Die Heizspirale hat eine nominelle Leistung von 1800 W. Um die Heizspirale mit verminderter Leistung betreiben zu können, wird die Spannung an der Heizspirale mit PWM moduliert. Dafür wird ein XSSR (ähnlich SSR) verwendet. Das XSSR wird von einem PWM-Pin der MCU angesteuert. Das Signal wird vorher zusätzlich durch die Basisplatine und die SSR-Insel geleitet. Geschaltet wird das PWM-Signal mit 8 Hz. Die effektive Spannung kann über den Tastgrad eingestellt werden. Eine genauere Übersicht zum Ansteuern des XSSR ist in [41] dargelegt.

Wasser tendiert dazu Wasserschichten verschiedener Temperaturen zu bilden. Diese Schichtung entsteht besonders bei Temperaturänderungen und konnte bereits in vorherigen Arbeiten beobachtet werden [21]. Diese Schichten müssen aufgebrochen und vermischt werden, um eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen. Dafür kommen an der Labortechnischen Espresso-Maschine zwei Methoden in Frage. Das Wasser im Boiler kann im Kreis gepumpt werden. Dafür wird tendenziell kaltes Wasser von unten nach oben in den Kesseleinlass gepumpt. Dies geht nur in einem begrenzten Umfang. Die Pumpe darf nur bis 95 °C Mediumtemperatur betrieben werden und ab 55 °C nur noch mit verminderter Last [65]. Die Zweite Methode sorgt durch Aufkochen bzw. Dampfbildung für Durchmischung. Dafür bleibt der Dampfhahn bei Erreichen der Siedetemperatur etwa 12 Sekunden länger offen.

Die Zeit bis zur Betriebsfähigkeit ist von Interesse. Sie sollte möglichst gering sein, damit der Nutzer nicht lange warten muss. Aus diesem Grund wurde die Zeit bis zum Erreichen des Betriebsdrucks bei der Entschichtungsmethoden untersucht. Es konnte dabei kein signifikanter Unterschied zwischen den Aufheizzeiten ermittelt werden. Beide Methoden haben von etwa 25 °C bis etwa 125 °C (1300 mbar) 12,5 min benötigt. Der einzige sichtbare Unterschied ist im Temperaturverlauf zu erkennen. Beim Umpumpen bleibt die Temperatursteigerung konstant. Beim Aufkochen ist der gemessene Temperaturanstieg etwas geringer, steigt dann jedoch ab etwa 70 °C stark an (siehe Anhang 13 und 14).

Diese Aufheizzeit ist etwas höher als erwartet, kann jedoch mit einer Überschlagsrechnung in der Tendenz bestätigt werden. Der Kessel hat einen Wasserinhalt von etwa 2,4 L (folglich etwa 2,4 kg) und ein Gesamtvolumen von 3,6 L. Wasser hat eine Wärmekapazität von $4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ [66]. Multipliziert man die Wärmekapazität mit der Wassermasse und der Temperaturdifferenz zwischen Ausgangs- und Endzustand, ergibt sich die notwendige Wärmemenge zum Aufheizen des Wassers zu:

$$Q_W = 2,4 \text{ kg} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (125 - 25) ^\circ\text{C} = 1008 \text{ kJ} \quad (1)$$

Teilt man die Wärmemenge durch die Heizleistung (1,8 kW) und wandelt durch $\frac{1}{60}$ zu Minuten um, erhält man die Aufheizzeit des Wassers (t_{AW}):

$$t_{AW} = \frac{1008 \text{ kJ}}{1,8 \frac{\text{kW}}{\text{s}}} \cdot \frac{1}{60 \frac{\text{min}}{\text{s}}} = 9,33 \text{ min} \quad (2)$$

Auch der Stahlkessel nimmt Wärme auf. Für die Überschlagsrechnung wurde ausschließlich die Masse des Kessels inklusive Deckel verwendet. Für die Wärmekapazität wurde ein typischer Wert für Stahl von $0,48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ [66] angenommen. Die notwendige Aufheizzeit des Kessels (t_{AK}) wird dann ähnlich berechnet:

$$t_{AK} = \frac{1,3 \text{ kg} \cdot 0,48 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (125 - 25)^\circ\text{C}}{1,8 \text{ kW} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 0,58 \text{ min} \quad (3)$$

Die Summe beider Aufheizzeiten ergibt etwa 10 Minuten. Dazu kommen Wärmeverluste am Boiler. Dieser ist zwar gut isoliert, aber nicht vollständig. Zusätzlich entsteht durch den Dampf und die Leitung geringer Wärmeverlust. Es wurden auch nicht alle Wärmekapazitäten mit einbezogen (z.B. Isoliermaterial und Durchsteckverbinder). Hinzukommt ein gewisser Wärmeverlust, da beim Erreichen des Siedepunktes die Wasserwendel kurz durchgepumpt wird. Bezieht man den Punkt mit ein, dass durch nicht perfekt eingestellten Füllstandssensoren mehr als 2,4 L im Boiler sein könnten, können die 12,5 Minuten bestätigt werden.

Im Betrieb ist aufgefallen, dass sich Temperaturschichtungen auch nach Erreichen des Betriebspunktes bilden können. Dies geschieht vor allem bei einem Wasserbezug und ist besonders auffällig bei längeren Wasserbezügen. Dieses Phänomen wurde noch nicht weiter untersucht. Diese Schichtungen lösen sich jedoch bei jedem erneuten Erhitzen des Kessels langsam auf.

3.5 Weitere hydraulische Komponenten

Zu den im vorherigen Abschnitt genannten Komponenten kommen sicherheitsrelevante Bauteile. Diese beinhalten derzeit ein Überdruckventil und ein Unterdruckventil am Dampfkessel. Hinzukommt ein Unterdruckventil im Wasserstrang der Wasserwendel.

Zusätzlich sind Festdrosseln verbaut. Diese sind in den vorherigen Unterkapiteln bereits beschrieben. Die Drossel im Heißwasserstrang bedarf jedoch weiterer Untersuchung. Die Drossel wird benötigt, um zusammen mit dem Dosierventil das Mischverhältnis einstellen zu können. Demnach ist der gewählte Drosselquerschnitt ausschlaggebend für die minimal erreichbare Mischtemperatur. Hierbei gilt: **desto** kleiner der Drosselquerschnitt, desto geringere Mischtemperaturen sind möglich. Ein kleiner Drosselquerschnitt bedeutet gleichzeitig eine gröbere Temperatureinstellung, da der Temperatureinstellbereich größer ist. Ein kleiner Drosselquerschnitt beschränkt zudem den maximalen Durchfluss. Im ursprünglichen Zustand mit einer Drossel von 0,6 mm ohne weitere Drosseln ist ein Durchfluss von etwa 20 ml/s möglich (bei komplett offenem Dosierventil). Die Drossel im Heißwasserstrang muss demnach unter folgenden Gesichtspunkten ausgewählt werden: minimale Bezugstemperatur und gewünschter maximaler Durchfluss. Es ist zu beachten, dass bei gleicher Drosseleinstellung sich verschiedene Mischtemperaturen einstellen, wenn sich der Durchfluss ändert. Auch über ein Dosierventil mit größerem Durchmesser sollte nachgedacht werden, für weniger Druckverlust.

Der derzeitige Aufbau enthält eine 0,6 mm Drossel im Heißwasserstrang und eine 0,8 mm Drossel im Mischwasserstrang, um Blasenbildung besonders im Überlauf zu reduzieren, der keinen Gegendruck erzeugt. Zusätzlich ist zu Experimentierzwecken eine manuell verstellbare Drossel als Bypass installiert. Diese wird im Betrieb derzeit um 2 Umdrehungen Offen geöffnet.

3.6 Temperatursensoren vom Typ NTC

Zum Erfassen der meisten Temperaturen in der Espressomaschine werden NTCs verwendet. Diese verringern ihren Widerstand zu höheren Temperaturen. Im Gegensatz zu PT100 (Platinwiderstand mit 100 Ω) ist das Verhältnis von Temperatur zu Widerstand nicht linear und wird durch Fertigungstoleranzen beeinflusst. Es ist somit eine **Kalibrierkurve** notwendig. Diese Kalibrierkurve kann entweder berechnet oder vermessen werden. Eine vermessene Kalibrierkurve ist bei präziser Methodik genauer. Alternativ kann eine gerechnete Kennlinie durch Messungen nachkalibriert werden.



Unabhängig der Methode muss der zu kalibrierende Sensor mit einem bereits kalibrierten Sensor verglichen werden. Dafür müssen beide Sensoren auf die gleiche Temperatur gebracht werden. Im Kontext der Espressomaschine gibt es zwei sinnvolle Möglichkeiten. Möglichkeit eins ist die Kalibrierung im offenen Gefäß. Dabei werden beide Sensoren in ein offenes Gefäß platziert mit Wasser. Dieses wird entweder mit kochendem Wasser gefüllt, welches langsam abkühlt oder mit einer Heizplatte langsam erhitzt. Wichtig ist hierbei, dass das Wasser stets gerührt wird, um Temperaturunterschiede zu vermeiden. Außerdem ist wichtig, dass die Sensoren das Gefäß nicht berühren. Die zweite Möglichkeit ist die Kalibrierung im Volumenstrom. Hierfür ist ein aufwendigerer Aufbau notwendig, etwa ein Pumpenprüfstand, welcher beide Sensoren mit Wasser bei einer konstanten Temperatur durch- bzw. umströmt. Unabhängig der Messmethode sind zusätzlich mindestens ein bis zwei Wiederholungen der Kalibriermessung durchzuführen. Es ist vor jedem Messpunkt zu prüfen, dass sich die Sensoren im Beharrungszustand befinden.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden berechnete Kennlinien verwendet. Diese werden von Dipl. Ing. Armin Rohnen zur Verfügung gestellt [67]. Im Zuge der Arbeit wurde auch die Feinkalibrierung der berechneten Kennlinien versucht. Dafür wurde die Methode mit offenem Gefäß (abkühlend) mangels funktionierendem Pumpenprüfstand verwendet. Es wurden zwei NTCs kalibriert. Eines vom Hersteller OMRON in der Ausführung NTC 10 k Ω und eins von AVS-Römer Typ NTC10-S85. Beide Sensoren zeigten bei Raumtemperatur die korrekte Temperatur an. Bei 90 °C zeigte das OMRON-NTC etwa 2 °C zu wenig an, das AVS-Römer-NTC etwa 4 °C. Die Wiederholungsgenauigkeit beträgt beim OMRON-NTC maximal 0,3 °C, beim AVS-Römer-NTC maximal 1,5 °C. Die Temperaturabweichungen haben eine lineare bis quadratische Form (siehe Anhang 7-10). Da die Abweichungsmechanismen nicht bekannt sind und beim AVS-Römer Sensor nicht genug Messwerte vorliegen, um die quadratische Natur zweifelsfrei zu bestätigen, wurden lineare Anpassungen der Kalibrierkurven durchgeführt. Der Unterschied linearer und quadratischer Anpassungen ist minimal.

Die kalibrierten Kurven wurden anschließend im Betrieb mit einem anderen vorkalibrierten AVS-Römer Sensor verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass der vorkalibrierte Sensor signifikant andere Werte angezeigt hat, sodass auf die berechneten Kalibrierkurven zurückgegangen wurde. Der vorkalibrierte Sensor zeigte bei 84 °C 10 °C weniger als das OMRON-NTC und 8 °C weniger als das AVS-Römer NTC an. Da der vorkalibrierte Sensor zwischen den beiden NTCs liegt, lassen sich diese Unterschiede nicht mit Wärmeverlust erklären. Der Sensor kommt vorkalibriert mit ± 1 °C, sodass ein Temperaturunterschied von 8-10 °C sehr signifikant ist (siehe Anhang 11). Das OMRON-NTC misst mit der feinkalibrierten Kennlinie bei 1300 mbar Dampfdruck etwa 127 °C. Das sind nur 2 °C zu viel. Es erscheint somit als könnte auch der vorkalibrierte Sensor nicht stimmen. Es müssen somit zwingend alle Sensoren an einem Prüfstand kalibriert bzw. getestet werden. An der Wiederholungsgenauigkeit, besonders des umschlossenen AVS-Römer-NTC, ist zu erkennen, dass die Methode mit offenem Gefäß zu ungenau ist. Zum gleichen Schluss kommt auch die Arbeit, auf der diese aufbaut [21].

Die NTCs werden mit integrierter Auswertelektronik verarbeitet. Diese wandelt den Widerstand des NTCs direkt in eine Spannung um, welche von einem 0-3,3 V ADC (12-Bit) auf der MCU ausgewertet

wird. Da alle Messungen und Feinkalibrierungen, mit dieser integrierten Auswertelektronik inkl. Umwandlungsfaktoren durchgeführt wurden, sind auch dessen Messungenauigkeiten enthalten. Auch von hier könnten die Abweichungen zwischen den Sensoren kommen.

3.7 Vorkalibrierte Sensoren mit Spannungsausgabe (inkl. Füllstand)

Zusätzlich zu den NTCs kommen bereits kalibrierte Sensoren mit eingebauter Auswertelektronik. Diese Sensoren geben einen Messwert in Form einer Spannung aus. Die ADC-Eingänge der MCU messen nur in einem Bereich von 0-3,3 V. Die Sensoren haben einen Ausgangsbereich von 0-4,5 V bzw. 5 V. Die Spannung muss demnach reduziert und zusätzlich gefiltert werden. Dafür wird eine Spannungsmessplatine verwendet, die als Tiefpass und Spannungsteiler agiert.

Da der Spannungsteiler aufgrund Bauteiltoleranzen von den theoretischen Werten abweicht, muss dieser durchgemessen werden. Dafür werden mit einem Referenzspannungsgerät verschiedene Spannungen angelegt, durch den ADC gemessen und zurückgerechnet. In allen Fällen (alle Eingänge) wurde ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Spannungsabweichung gemessen. Die Abweichung lag im schlechtesten Fall zwischen 6 mV (bei 0 V Referenz) und -22 mV (bei 4,4 V Referenz). Das bedeutet, dass die Messunsicherheit bei 500 mV bereits weniger als 1% beträgt. Die Messunsicherheit ist somit in den meisten Fällen unerheblich, da Spannungen größer 500 mV gemessen werden. Da die Kalibrierkurven jedoch schon vorliegen werden diese auch angewendet (siehe Anhang 3-6).

Alle vorkalibrierten Sensoren sind vom Hersteller AVS-Römer. Dies beinhaltet zwei Drucksensoren, einen mit bis zu 4 bar und einen mit bis zu 16 bar messbarem Druck. Hinzukommt ein Leitwertsensor, welcher den Leitwert des Frischwassers und dessen Temperatur misst. Dieser wurde auch für den Temperaturabgleich im Betrieb der NTCs verwendet. Die beiden Drucksensoren haben einen Spannungsoffset von 500 mV, sodass sie bei 0 bar 500 mV ausgeben. Bei maximalem Druck geben diese 4,5 V aus. Das Verhältnis zwischen Spannung und Druck ist laut Hersteller im ganzen Bereich linear. Der Leitwert- und Temperatursensor hat einen Spannungsbereich von jeweils 0-5 V. Auch dieser hat über den ganzen Bereich ein lineares Verhältnis zwischen Messwert und Spannung. Bei der Temperaturmessung ergeben 0-5 V Spannung 0-140 °C. 0-5 V Spannung ergeben in der Leitwertmessung $0,2 \frac{mS}{cm} - 20 \frac{mS}{cm}$. [68]

Der 0-4 bar Drucksensor ist verbaut, um den Boilerdruck zu messen. Dafür ist er an der Spannungsmessplatine an einem 4,5 V-Eingang verbaut. Dieser wandelt ein Spannungssignal von 0-4,5 V in 0-3,3 V um. Dies wird vom ADC in einen Wert zwischen 0-4095 umgewandelt. Bei genauerer Betrachtung würde 4,5 V 4096 entsprechen, mit 12-Bit ist die größte abbildbare Zahl jedoch 4095. Der ADC-Wert kann somit in einen Spannungswert an der Messplatine durch:

$$V_E [mV] = \frac{ADC}{4096} * V_{Emax} [mV] \quad (4)$$

umgewandelt werden.

Für die Umwandlung von ADC-Wert zu Messwert wird der ADC-Wert in eine Eingangsspannung umgewandelt, mit einem Spannung-zu-Messwert-Umrechnungsfaktor (K_{SMU}) multipliziert und anschließend zum Offset (C) addiert:

$$Messwert = K_{SMU} \cdot V_E + C = K_{SMU} \cdot \frac{ADC}{4096} \cdot V_{Emax} + C \quad (5)$$

Der Drucksensor hat einen Offset von 500 mV. Die restlichen 4 V können auf 4 bar aufgeteilt werden, sodass gilt 1 V = 1 bar bzw. 1 mV = 1 mbar. Das bedeutet der Sensor hat einen Offset von -500 mbar. Die Umwandlung des Drucksensors (ohne Kalibrierung) erfolgt unter Verwendung von (5) zu:

$$\begin{aligned} p_4 [\text{mbar}] &= 1 \frac{\text{mbar}}{\text{mV}} \cdot \frac{\text{ADC}}{4096} \cdot 4500 \text{ mV} - 500 \text{ mbar} \\ &= 4500 \text{ mbar} \cdot \frac{\text{ADC}}{4096} - 500 \text{ mbar} \end{aligned} \quad (6)$$

Für den verbauten 0-16 bar Sensor gilt Ähnliches, wie für den 0-4 bar Sensor. Gleiche Spannungspegel bei vierfachem Maximaldruck bedeutet der Spannung-zu-Messwert-Umwandlungsfaktor ist 4-mal so groß (1 mV = 4 mbar). Der Offset beträgt demnach -2000 mbar anstatt -500 mbar. Ebenfalls zu beachten ist, dass der 16 bar Sensor an einem 5 V-Eingang angeschlossen ist. Wendet man (5) an, ergibt sich der gemessene Druck des 16 bar Sensors (p_{16}) zu:

$$\begin{aligned} p_{16} [\text{mbar}] &= 4 \frac{\text{mbar}}{\text{mV}} \cdot \frac{\text{ADC}}{4096} \cdot 5000 \text{ mV} - 2000 \text{ mbar} \\ &= 20000 \text{ mbar} \cdot \frac{\text{ADC}}{4096} - 2000 \text{ mbar} \end{aligned} \quad (7)$$

Der Umwandlungsfaktor von Spannung (5 V-Eingang) zu Temperatur beträgt $\frac{140}{5000} \frac{^\circ\text{C}}{\text{mV}}$. Die gemessene Temperatur am Leitwertsensor (T_L) ergibt sich nach (5) zu:

$$T_L [^\circ\text{C}] = \frac{140}{5000} \frac{^\circ\text{C}}{\text{mV}} \cdot \frac{\text{ADC}}{4096} \cdot 5000 \text{ mV} = 140 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \frac{\text{ADC}}{4096} \quad (8)$$

Der Leitwertsensor kann maximal $20 \frac{\text{mS}}{\text{cm}}$ messen, mit einem Offset von $0,2 \frac{\text{mS}}{\text{cm}}$. Der Umwandlungsfaktor von Spannung (5 V-Eingang) zu Leitwert beträgt demnach $\frac{19,8 \frac{\text{mS}}{\text{cm}}}{5000 \text{ mV}}$. Unter Verwendung von (5) wird der Leitwert (σ_L) berechnet zu:

$$\sigma_L \left[\frac{\text{mS}}{\text{cm}} \right] = \frac{19,8 \frac{\text{mS}}{\text{cm}}}{5000 \text{ mV}} \cdot \frac{\text{ADC}}{4096} \cdot 5000 \text{ mV} + 0,2 \frac{\text{mS}}{\text{cm}} = 19,8 \frac{\text{mS}}{\text{cm}} \cdot \frac{\text{ADC}}{4096} + 0,2 \frac{\text{mS}}{\text{cm}} \quad (9)$$

Aufgrund der beobachteten Unstimmigkeiten bei der Temperaturmessung, ist es sinnvoll auch die Drucksensoren mit einer Referenzmessung zu vergleichen, sodass Sicherheit darüber besteht, dass die Sensoren die richtigen Werte anzeigen und dass die Umwandlung fehlerfrei erfolgt.

Der Füllstandssensor funktioniert nach dem Prinzip der Kurzschlussdetektion. Dafür werden zwei Elektroden verwendet. Eine Elektrode ist ein metallischer Stab, welcher in den Kessel hineinragt. Die zweite Elektrode ist der Kessel. Ist der Wasserstand hoch genug, werden beide Elektroden durch das Wasser verbunden und der Kurzschluss wird detektiert (Wasser leitet aufgrund der enthaltenen Ionen leicht). Im Betrieb einer anderen espressomaschine ist aufgefallen, dass wenn das Wasser kocht, der Füllstand hin und wieder null wird. Der Füllstand ist demnach nur eindeutig messbar, wenn nicht geheizt wird. Die Ansteuerung des Füllstandssensor ist in [41] dokumentiert.

3.8 Flowmeter

Beim Bezug von Espresso ist die bezogene Menge Wasser von Interesse. Unter anderem aus diesem Grund wird die Durchflussrate/Flowrate gemessen. Dazu kommt ein Digmesa NANO Brass mit 1 mm Düse zum Einsatz. Dieses erzeugt laut Datenblatt pro ml Durchfluss 39,9 Impulse [69]. Diese Impulse werden direkt von der MCU verarbeitet. Diese hohe Auflösung erlaubt einerseits sehr genaue Messungen, andererseits misst man ebenfalls Pulsation mit. Da das Flowmeter die Richtung nicht unterscheiden kann, kann ein Scheinfluss gemessen werden. Ein Teil dieses Flusses kann Blindfluss sein, welcher nur hin und her fließt. Wenn man die Getriebepumpe in bestimmte Betriebspunkte mit Nullförderung bringt, wird dies besonders ersichtlich. Dann wird ein Durchfluss angezeigt, obwohl dieser bei geschlossenen Ventilen nicht zustande kommen kann. Da dieses Phänomen stark vom Aufbau abhängt, kann es nicht immer beobachtet werden und entsteht in verschiedenen Betriebspunkten. Wie ausgeprägt dieser Pulsationseffekt auf die gemessene Durchflussmenge ist, konnte noch nicht untersucht werden. Ein Abgleich des Flowmeter ist somit sinnvoll. Ein vorläufiger Abgleich wurde mit einer Waage durch Jonas Naumann durchgeführt und hat ergeben, dass die App etwa 10 % mehr Durchfluss anzeigt als die Waage [persönliche Kommunikation, 26.07.2022].

Die Genauigkeit des Flowmeters, in Kombination mit einem pulsierenden Motor, führt zu sprunghaften Durchflusswerten. In seltenen Fällen sind diese Sprünge das Vielfache des aktuellen Durchflusswertes. Zur Verifizierung der Funktionalität von Flowmeter und MCU wurden Parallelmessungen über die MCU und eine externe NI-Messkarte durchgeführt (NI-Messung bereitgestellt durch Dipl. Ing. Armin Rohnen [70]). Die NI-Messkarte hat ähnlich wie ein Oszilloskop den Spannungsverlauf aufgenommen. Dies erfolgte über 20 Sekunden bei konstanter Pumpendrehzahl. Der Spannungsverlauf hat ergeben, dass das Flowmeter saubere Impulse erzeugt. Die normalen Schwankungen im Bereich von etwa 10-20 % konnten in beiden Messmethoden beobachtet werden. Die sporadischen Durchflussspitzen mit dem Mehrfachen des Momentanwertes konnten nicht in den NI-Messungen reproduziert werden. Es ist nicht gesichert, ob diese demnach durch die MCU verursacht werden, oder ob diese immer zwischen den NI-Messungen entstanden sind und demnach nicht aufgenommen werden konnten.

Die Pulsation der Pumpe kann prinzipiell durch Dämpfung in der Strecke (z.B. Rohrleitung) reduziert werden. Um dies zu untersuchen, wurde das Flowmeter aus dem Frischwasserstrang, kurz hinter der Pumpe entfernt und stattdessen im Mischwasserstrang platziert. Dies führte zu keiner Reduzierung der Pulsation mit messbarer Signifikanz. Die Platzierung im Mischwasser reduziert jedoch die messbaren Zustände, z.B. ist die Kesselfüllgeschwindigkeit dann nicht mehr messbar. Aus beiden Gründen wird das Flowmeter weiterhin kurz nach der Pumpe im Frischwasser platziert.

4 Betrieb der Maschine (Software)

Die einfache und einzelne Ansteuerung der Sensoren und Aktoren wurde im letzten Kapitel beschrieben. Diese Bauteile werden anschließend über ein Softwaregerüst so miteinander verkoppelt, dass ein Kaffeebezug möglich ist.

Wie im Kapitel Stand der Technik dargelegt, besteht das System aus zwei gekoppelten Gliedern. Für beide wird Software benötigt. Auf der MCU werden Messwerte eingelesen und vorverarbeitet. Diese Messwerte werden in einem definierten Takt an das zweite Glied übertragen (Übertragungstakt). Das zweite Glied ist in diesem Fall ein PC mit einer MATLAB®-Instanz. Der Übertragungstakt lässt sich mit einem Prescaler beeinflussen. Dies erlaubt öfter Messwerte auszulesen (Timertakt) als diese übertragen werden. Die Programmierung der MCU geschieht mit MicroPython, einer objektorientierten Programmiersprache, welche die Programmierung deutlich vereinfacht. Außerdem bietet sie die sogenannte REPL. Diese erlaubt es Befehle an die MCU während der Laufzeit zu schicken, sodass diese in Echtzeit ausgeführt werden. Das Ergebnis wird anschließend sofort zurückgesendet. Der ausgeführte Befehl wird ebenfalls zurückgesendet.

In der MATLAB®-Instanz wird die Steuerung und Regelung der Espressomaschine vorgenommen. Nachdem die Verbindung mit der MCU aufgebaut und initialisiert wurde, wird der Übertragungstakt genutzt, um den MATLAB®-Code zyklisch abuarbeiten. In jedem Zyklus werden zuerst die Messwerte umgewandelt und angezeigt. Danach laufen die sicherheitskritischen Regler (Füllstands- und Heizregler). Anschließend wird das derzeit aktive Programm (z.B. Kaffeebezug) weiterbearbeitet. Teil des aktiven Programms kann der Aufruf des Fluss- und Mischwassertemperaturregler sein. Zuletzt werden die gewünschten Aktorenbefehle an die MCU übertragen.

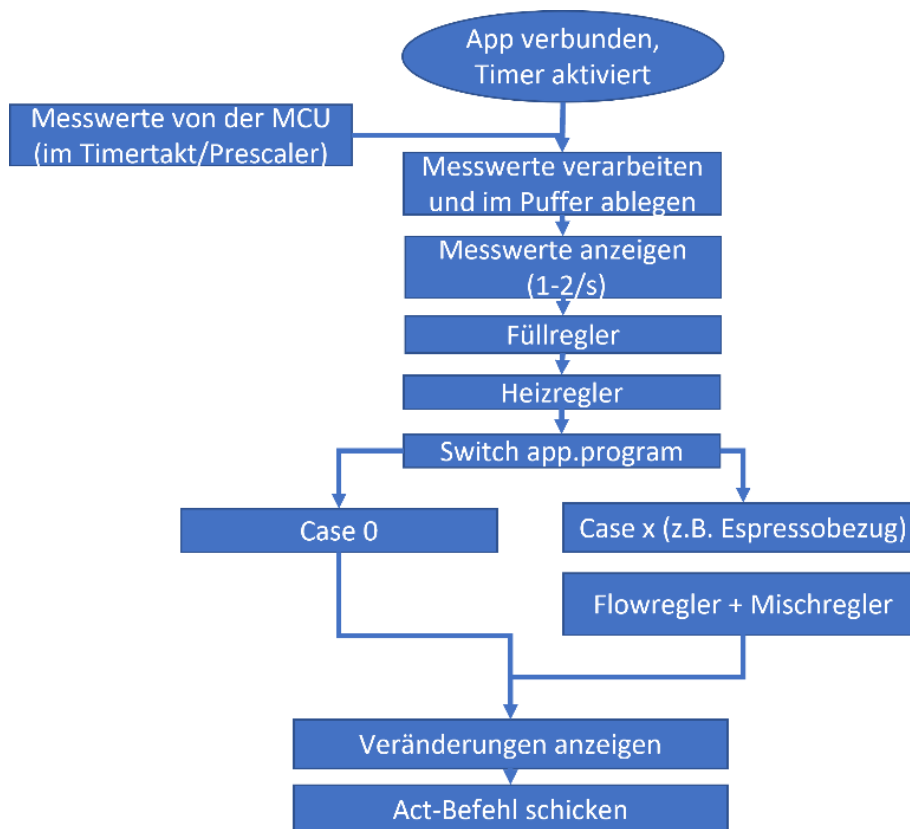


Abbildung 1: Vereinfachter typischer Ablauf in der App bei Messwernerkenntnis

4.1 MATLAB® App im Überblick

Die Bediensoftware für die Espressomaschine wird derzeit über den MATLAB® Appdesigner erstellt. Dieser vereinfacht die Erstellung einer graphischen Oberfläche und erlaubt den Zugriff auf viele in MATLAB® enthaltene Funktionalitäten. Auf eine genaue Erklärung der Funktionsweise wird verzichtet, da es genug frei verfügbares Material hierzu gibt. Stattdessen wird ein kurzer Überblick über die Funktionsweise der geschriebenen App gegeben.

Die Ausführung von Programmcode in der App wird von sogenannten Callbacks gesteuert. Callbacks sind Funktionen, die bei Vorliegen eines gewissen Zustands, einem Trigger/Bedingung, aufgerufen werden. Diese Trigger können entweder von der graphischen Oberfläche, durch andere Eingabegeräte oder von innerhalb des Programmcodes kommen. Weitere Funktionen können ebenfalls verwendet werden, müssen dann jedoch von einem Callback aufgerufen werden.

Es existieren zwei einzigartige Callbacks namens „StartupFcn/automatisieren“ und „UIFigureCloseRequest“. Diese werden beim Starten und vor dem Schließen der App durchgeführt. In „automatisieren“ werden die Kennlinien für die NTCs eingelesen. In der „UIFigureCloseRequest“ wird der Messwerttimer deaktiviert, falls dieser noch läuft. Außerdem werden alle Aktoren zurückgesetzt. Anschließend werden Mess-, Befehls-, und Fehlerspeicher in externe Dateien gespeichert. Zuletzt wird die App durch Löschung geschlossen.

Die meistverwendete Art des Callbacks löst bei der Änderung eines Benutzeroberflächenelementes aus. Dies beinhaltet eine Vielzahl von verschiedenen Elementen, von Schaltern und Knöpfen bis hin zu Schreibfeldern und Schiebern. Diese werden vorrangig verwendet, um Variablen aus dem Hauptprogrammablauf zu beeinflussen. Dadurch kann z.B. das gewünschte Programm oder die gewünschte Heizleistung geändert werden. Diese Art des Callbacks wird auch für das Verbinden und Initialisieren der MCU verwendet. Der Verbindungscallback wird durch die Betätigung eines Knopfes gestartet. Die Kommunikation läuft über serielle Kommunikation. Dafür wird ein „Serialport-Objekt“ wie in [41] beschrieben angelegt. Außerdem wird wie in [40] beschrieben, eine Funktion angelegt, welche ausgeführt wird, wenn das Ende einer Zeile am Eingangspuffer der seriellen Kommunikation detektiert wird. Diese Funktion arbeitet den Eingangspuffer dann ab. Zusätzlich zum Aufbau einer Verbindung wird Sensorik und Aktorik auf der MCU initialisiert. Dies ist besonders bei den externen Modulen (den MCPs) günstig, da Fehler über die REPL direkt angezeigt werden. Zuletzt und primär wird diese Art des Callbacks verwendet, um den Zustand der Maschine zu verändern oder dessen Änderung anzufordern. Folglich wird bei vielen Schaltern ein Skript aufgerufen, welches prüft, ob die Zustandsänderung erlaubt ist und diese dann anfordert.

Die Verarbeitung des Eingangspuffers ist die letzte Art des verwendeten Callbacks. Die einkommende Nachricht wird basierend auf dem Inhalt verarbeitet. Wird ein Fehler detektiert, wird dieser in den Fehlerspeicher geschrieben und angezeigt. Befehle werden im Kommandopuffer gespeichert und angezeigt. Werden die Messwerte detektiert, werden diese verarbeitet, im Messwertpuffer gespeichert und angezeigt. Anschließend wird das Hauptprogramm einmal ausgeführt. Dies beinhaltet den Aufruf des Füll- und Heizreglers sowie den Aufruf der „Programme“. Programme bezieht sich hier auf die durch den Nutzer wählbaren Abläufe (z.B. Espresso Bezug). Sowohl die Programme als auch die Art der Eingangspufferverarbeitung wird über eine eigene „switch(case)“-Anweisung verarbeitet. Dieses führt bei jedem Aufruf, je nach Zustand (case), einen bestimmten Teil des Programmcodes aus. Nachdem die „switch“-Anweisungen durchgelaufen sind, wird der neue Zustand der Aktoren angezeigt und die Aktoren durch einen Sammelbefehl gestellt.

4.2 Kommunikation und Befehlsausführung

Die Kommunikation zwischen MCU und angeschlossenem PC/App ist begrenzt und hat sich im Betrieb als Fehleranfällig herausgestellt. Aus diesem Grund ist es wichtig die Kommunikation so kurz wie möglich zu halten. Außerdem ist es unerlässlich Fehler zu erkennen und zu beheben. Die Kommunikation PC zu MCU läuft über die REPL, welche mit einer Baudrate von 115200 Baud, (einem Startbit), einem Stoppbit und 8 Datenbits arbeitet [71]. Da die MCU über einen virtuellen COM-Port (RS-232 Standard [72]). angeschlossen ist entspricht das 115200 Bits/s. Das bedeutet es können maximal 11520 Chars/s gesendet und empfangen werden. Es sollten jedoch signifikant weniger sein, da MATLAB® während der Verarbeitung des Ein- und Ausgangspuffer die Abarbeitung des restlichen Programms unterbricht [73]. Außerdem werden Befehle bestätigt, indem diese zurückgeschickt werden, sodass sowohl Eingangs und Ausgangsleitung belegt werden. Fehlermeldungen reduzieren zudem die verfügbare Kommunikationszeit.

Die MCU nutzt die Kommunikation primär, um Messwerte zu übertragen. Um die Messwerte gegenüber der APP eindeutig zu identifizieren, bekommen diese das Präfix „M!“. Es werden insgesamt 10 Messwerte übertragen, 7 davon liegen in ADC-Form vor, das bedeutet 4 Zahlen. Dazu kommt ein Füllstand (eine Zahl). Außerdem wird die Flowrate und die Impulsmenge übertragen, dafür werden weitere 6 Chars benötigt. Zwischen den Messwerten kommen 9 Kommata zur Trennung. Die 45 Chars könnten somit theoretisch 256-mal je Sekunde übertragen werden. Die Messwerte werden anschließend durch „*string2num*“ (MATLAB®-Anweisung) in der App aufgetrennt und verarbeitet.

Da die MCU Befehle wie sie in [21] beschrieben sind bereits 20 Chars oder länger sind und bestätigt werden, brauchen diese zusätzlich die halbe Kommunikationszeit (Vergleich Messwerte). Müssten in einem Takt 6 Befehle und die Messwerte übertragen werden, wäre dementsprechend nur noch ein Viertel des Taktes möglich. Das entspricht nur noch 64-mal je Sekunde. Zusätzlich wird das Senden der Befehle in der Funktion ausgeführt, welche den Eingangspuffer abarbeitet. Es ist nicht gesichert, wie die App unterbrochen wird durch das Befehlsecho. Es ist somit sinnvoll, alle Befehle zu bündeln und in einer Zeile an die MCU zu schicken, welche diese aufschlüsselt. Dies ist durch die Funktion „*act*“ auf der MCU implementiert. Diese bekommt als Argumente die DAC-Werte für Pumpe und Dosierventil, den Tastgrad des Heiz-PWM in Prozent und eine fünfstellige Zahl für das Pin-Register des MCP23017 übermittelt. Die Länge dieses Befehls entspricht der ungefähren Länge der anderen Befehle. Das Pin-Register wird als Dezimalzahl übermittelt und entspricht einer 16-Bit Zahl, jedes Bit entspricht einem Pin. Diese Zahl entsteht, indem der gewünschte Zustand des Pins (1 oder 0) mit der Wertigkeit des Pins multipliziert wird und zu den anderen dazu addiert wird. Die Wertigkeit entspricht 2 hoch Index des Pins im 16 Bit Register, startend bei 0. Sollte z.B. der 3. Pin im Register A (demnach Index 2) aktiviert werden, wird der zu übertragenden Zahl 4 hinzugefügt.

Es kommt bei der Kommunikation gelegentlich zu Problemen. Manchmal fehlen Teile eines Befehls oder zwei Befehle werden anteilig zusammengefügt. Die Entstehungsmechanismen sind trotz Untersuchungen nicht bekannt. Es wird hypothetisiert, dass das Senden eines Befehls unterbrochen wird und dann entweder nicht oder an falscher Stelle weitergeführt wird. Dies gibt meist eine Fehlermeldung, welche durch die App erkannt werden kann. Anschließend wird der „*act*“-Befehl erneut gesendet. Da im Gegensatz zum Ansatz alle Befehle einzeln zu schicken, alle Aktoren gleichzeitig gestellt werden, ist trotzdem ein gesicherter und bekannter Zustand gegeben. Ein wesentlich gefährlicherer Fehler ist, wenn die REPL „...“ sendet. Die REPL wartet auf Eingabe. Es wird angenommen, dass dies eintritt, wenn ein Befehl so abgeschnitten wird, dass die Klammer nicht geschlossen wird. Wird dies detektiert muss die Klammer geschlossen werden, ansonsten kommt es zu einem Deadlock (Befehle können nicht mehr übertragen werden). Bei zu hoher Messwertübertragungsfrequenz lässt sich dieser

Fehler nicht mehr auflösen. Prinzipiell kommt es zu weniger Fehlern bei niedrigerer Messwertübertragungsfrequenz, aber ausgeschlossen werden sie nicht. Aus diesem Grund sind eine Fehlerstatusleuchte und ein Fehlerpuffer in der App eingebaut.

Es sind zusätzlich zu den Sicherheiten in der App auch Sicherheiten auf der MCU eingebaut. Es wird vor der Befehlsausführung (durch die „act“-Funktion) geprüft, ob der Druck in der Brühgruppe über 12 bar liegt. Ist dies der Fall, wird die Pumpe ausgeschaltet. Zusätzlich wird der gleiche Mechanismus in der Timerfunktion verwendet, um Überdruckschutz bei Kommunikationsverlust zu gewährleisten. Ebenfalls wird in der Timerfunktion geprüft, ob der Kesseldruck über 1700 mbar liegt. Ist dies der Fall wird die Heizspirale ausgeschaltet. Solange sie nicht durch die „act“-Funktion wieder angeschaltet wird, bleibt sie auch aus.

4.3 Messwertglättung

Die von den Sensoren ausgegebenen Messwerte schwanken zu sehr, um mit ihnen schnelle schwingungsarme Regler zu betreiben. Rudimentäre Filterung der Sensorspannungen werden auf der Spannungsmessplatine durch einen Tiefpassfilter vorgenommen. Darüber hinaus sind besonders bei der Mischwassertemperatur und beim Durchfluss starke Schwankungen zu erkennen. Die Temperatur schwankt meist über mehrere Messwerte, während sich der Durchfluss sprunghaft ändert.

Die Temperaturschwankungen können relativ einfach durch einen gleitenden Mittelwert geglättet werden. Ein Mittelwert aus 10 Werten hat sich in der Praxis bewährt. Bei einer typischen Timerfrequenz von 20 Hz (Standardwert) hat der Messwert demnach eine effektive Verzögerung von 0,5 s, bis er voll wirkt. Dies ist angesichts der Geschwindigkeit von Strecke und Aktoren ein annehmbarer Wert, und ist länger als die meisten Messspitzen. Um auch die restlichen Messwerte etwas zu glätten, wird das gleiche Verfahren auf die anderen Messwerte angewendet. Ausnahme hierzu bilden der Füllstand und die Flowrate.

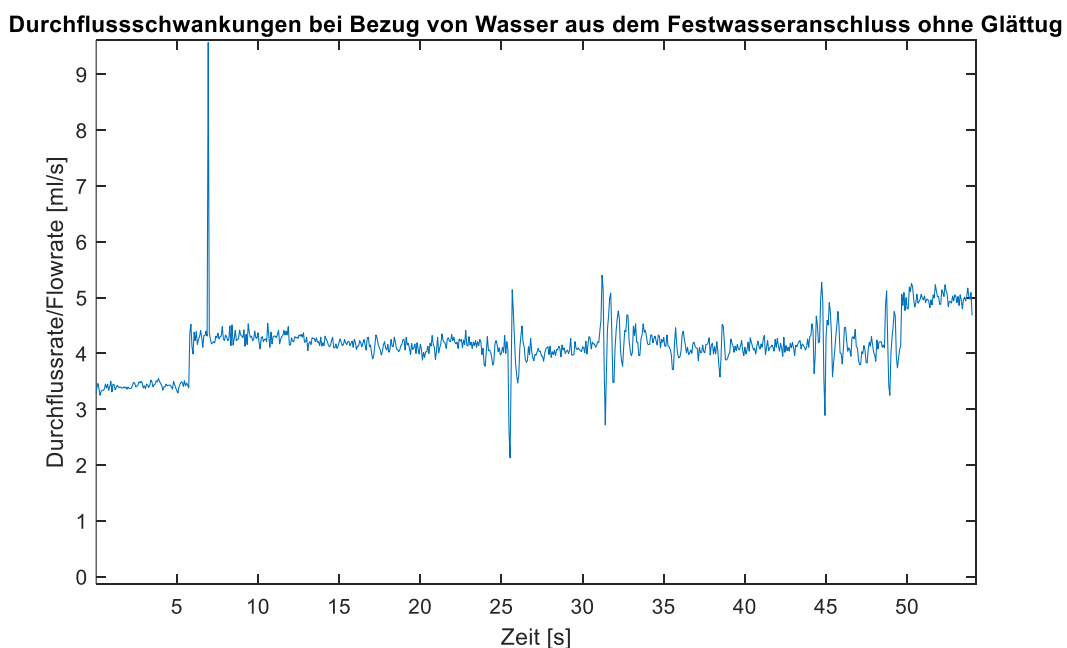


Abbildung 2: Typischer Durchflussratenverlauf bei konstanter Pumpenansteuerspannung. Ersichtlich sind stationäre Schwankungen, Schwankungsspitzen und abklingende Schwingungen des Drehzahlregler.

Die Flowrate ist deutlich sprunghafter mit Ausreißern, sodass hier Filterung und Glättung notwendig ist. Hinzukommt, dass die Messwertaufnahme nicht durch den Timertakt gesteuert wird, sondern durch den Messwert (die Flowrate) selbst. Wie **Abb. 2** zu entnehmen ist, schwankt die Flowrate kurzfristig im Bereich 10-20 %. Des Öfteren sind auch abklingende Schwingungen zu sehen. Diese haben in **Abb. 2** eine Amplitude über einem ml. Durch den konstanten Vorzeichenwechsel der Abweichung lässt sich diese durch Mittelwertbildung einfach glätten. Diese Schwingungen kann man auch hören, die Pumpe klingt dann als würde sie sich „verschlucken“. Es wird angenommen, dass dieses Verhalten durch Druckänderung des Festwasseranschlusses entsteht. Diese Druckänderung führt zu einem Drehzahlsprung der Pumpe, dessen Drehzahlregler dadurch anfängt zu schwingen.

Der Bezug von Wasser aus einem Tank ist noch nicht ausreichend untersucht. Erste Untersuchungen haben ergeben, dass die grundlegenden Schwankungen von 10-20 % erhalten bleiben, das schwingende Verhalten konnte jedoch nicht beobachtet werden.

Durchflussschwankungen bei Bezug von Wasser aus dem Festwasseranschluss 20er Mittelwert

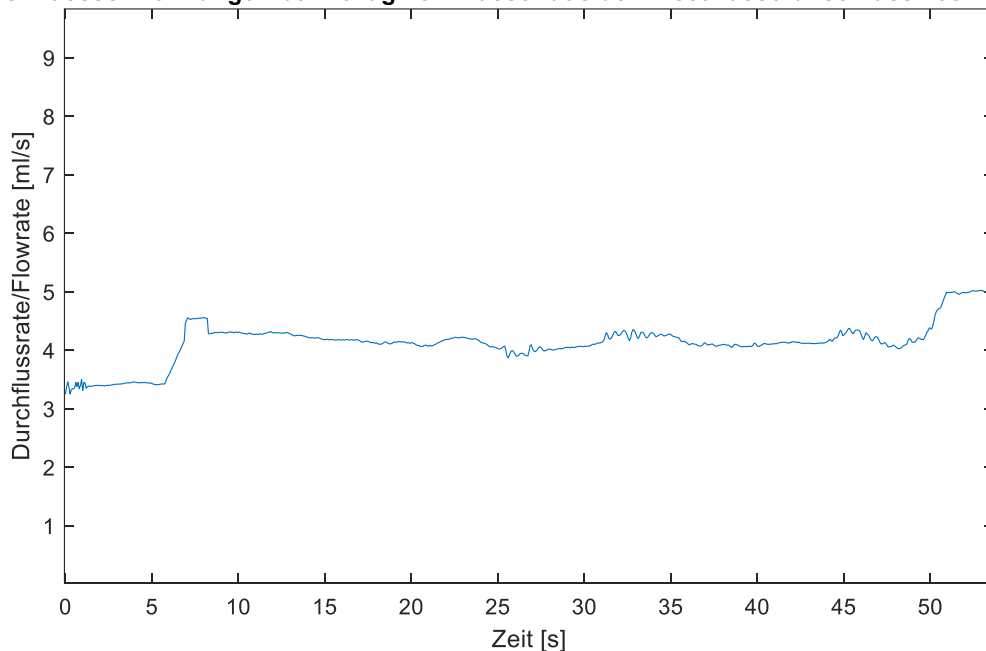


Abbildung 3: Graph zur Demonstration der möglichen Glättungseigenschaften und den damit verbundenen Verzögerungen. Zusätzlich wird der Effekt unzureichender Spitzenfilterung illustriert.

Um den genannten Glättungseffekt zu zeigen, wurde beispielhaft ein 20er Mittelwert gebildet. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf kaum noch springt und nur über längere Zeit schwankt. Gleichzeitig ist bei etwa 8 Sekunden eine Stufe, die durch den extremen Sprung verursacht wurde. Dieser Sprung muss demnach komplett rausgefiltert werden. Außerdem sieht man bei Sekunde 6 eine Rampe anstatt eines sprunghaften Anstiegs. Dies zeigt nochmal deutlich die Verzögerung, die durch die Mittelwertbildung verursacht wird. Ein 20er Mittelwert hat sich in der Praxis bewährt. 10er Mittelwerte haben nicht genug geglättet, 30er verursachen zu hohe Verzögerung (bei 1 ml/s). Es ist zu beachten, dass die Verzögerung und Glättungseigenschaften abhängig von der Durchflussrate sind. Es werden etwa 40 Messwerte pro ml erzeugt. Bei 1 ml/s ist die Verzögerung 0,5 s, bei 10 ml/s ist sie schon zu vernachlässigen. Die Länge der Mittelwertbildung muss demnach auf den primären Einsatzzweck abgestimmt werden.

Es wurden verschiedene Methoden zur Filterung der Peaks und der Störungen ausprobiert. Da es sich um digitale Filterung auf der MCU handelt, sind die Möglichkeiten limitiert. Erstens ist die Rechenzeit kritisch und zweitens ist man durch die verfügbaren MicroPython-Module beschränkt. Eine Möglichkeit sind Finite Impulse Response (FIR) Filter. Diese funktionieren ähnlich wie ein Mittelwert mit

Gewichtungsfaktoren. Die Filterung funktioniert jedoch nur mit Signalen mit konstanter Abtastrate richtig. Das bedeutet, dass der Timertakt verwendet werden muss. Dieser hat eine Frequenz von 20 Hz. Aufgrund des Nyquistlimits sind somit nur Frequenzen bis 10 Hz auflösbar und filterbar. In der Praxis hat diese Filtermethode keinen erkennbaren Mehrwert gegenüber einem einfachen Mittelwert gleicher Länge geboten. Zusätzlich sind einige Gewichtungsfaktoren negativ, sodass es bei Sprüngen zu negativen Durchflussraten kommen kann.

Da die verfügbaren MicroPython Module zu keinem Erfolg geführt haben, wird eine selbst entwickelte Lösung verwendet. Die Durchflussrate wird berechnet aus der Zeit zwischen zwei Impulsen des Flowmeter. Es wird bei jedem Impuls des Flowmeters die Durchflussrate berechnet. Diese wird mit dem derzeitigen Mittelwert verglichen. Übersteigt die Durchflussrate eine bestimmte relative und absolute Toleranz, wird der Messwert verworfen. Ist dies nicht der Fall wird der Wert in ein 20er Vektor eingetragen und der Mittelwert berechnet. Eine Ausnahme für diese Filterung bilden Messwerte bei einem Mittelwert von unter 0,1 ml/s, diese füllen direkt den ganzen Messwertpuffer auf. Dies ist notwendig, da bei Ventilöffnung impulsartige Ströme fließen, die dazu führen, dass die Messwerte dauerhaft rausgefiltert werden. Dies liegt daran, dass die relative Toleranz noch zu gering ist und die absolute Toleranz geringer ist als der Sollwertsprung. Da dieser Sprung bei Ventilöffnung sehr ausgeprägt ist, wird dessen Wirkung durch ein Vorfaktor von 0,25 auf den eingetragenen Messwert abgemildert. Eine Verbesserung der Filterung ließe sich somit durch Verwendung des Sollwertes als Toleranzglied anstatt des Mittelwertes erreichen. Der Mittelwert muss sofort berechnet werden, da die Timerfunktion keine Float-Berechnungen kann. Es werden ohne Durchfluss keine Impulse generiert, sodass keine neuen Messwerte generiert werden. Aus diesem Grund muss vor Übertragung der Messwerte an die App geprüft werden, ob Impulse generiert wurden. Ist dies nicht der Fall, wird eine Null übertragen und eine Null in den Durchflussratenvektor eingetragen.

Es wurden zusätzlich Untersuchungen durch Dipl. Ing. Armin Rohnen durchgeführt, um die Schwankungen am Flowmeter bezüglich Frequenz und Amplitude zu verstehen. Dabei hat sich ergeben, dass vor allem Schwankungen mit der gleichen Frequenz wie die Drehzahl oder Vielfachem dessen dominant sind. Aus dieser Untersuchung ging demnach auch hervor, dass eine Mittelung mindestens eine Umdrehung der Pumpe beinhalten muss, am besten ganzzahlige Vielfache dessen. [70] Bei 0,3 ml/U laut Pumpendatenblatt [65] und 39,9 Impulsen pro ml wären mindestens 12 Messwerte zur Mittelung notwendig. Addiert man darauf noch eine Toleranz, sind die bereits erwähnten 20 Werte für einen Mittelwert plausibel. Die Untersuchung brachte außerdem hervor, dass ein linearer Regressionsansatz die Dynamik des Messwertes besser abbildet als ein gleitender Mittelwert [70]. Die Dynamik besser abzubilden, bedeutet gleichzeitig schlechtere Glättung. Eine weitere Verbesserung der Filterung ließe sich durch adaptive Mittelwertlänge erreichen. Bei hoher Durchflussrate werden mehr Messwerte erzeugt, sodass auch mehr Messwerte zur Glättung verwendet werden können.

4.4 Füllregler

Für einen sicheren Betrieb der Espressomaschine muss die Heizspirale mit Wasser benetzt sein, wenn diese heizt. Auch die Wasserwendel profitiert davon, dauerhaft von Wasser umschlossen zu sein. Aus diesem Grund muss im Betrieb ein Regler dauerhaft den Füllstand überprüfen und gegebenenfalls nachfüllen. Damit dies problemfrei geht, müssen einige Zustände überprüft werden. Dies ist durch eine Reihe verschiedener *If*-Abfragen gelöst. Zuerst wird geprüft, ob der Regler an sein soll, ob gefüllt werden muss und ob gefüllt werden darf. Ob gefüllt werden darf muss geprüft werden, da sonst die Ausführung von Programmen unterbrochen wird oder gerade geheizt wird. Während des Heizens ist der Füllstandsmesswert nicht immer stabil. Sind die ersten Anforderungen gegeben, wird der Kesseldruck

geprüft. Liegt dieser unter 200 mbar handelt es sich wahrscheinlich um das erste Füllen, sodass beim Füllen die Luft aus dem Boiler gelassen werden muss. Wenn der Druck höher ist, wird Pumpendruck aufgebaut und die Magnetventile geöffnet. Ist der Füllstand erreicht, wird die Pumpe kurz auf die minimal notwendige Pumpendrehzahl reduziert und dann die Ventile geschlossen. Dies dient einerseits, um Pumpe und Ventile zu schonen und andererseits, um den Boiler etwas zu überfüllen, damit bei Vibrationen der Füllstand nicht umherspringt. Da das Wasser beim Aufheizen expandiert, wird beim ersten Füllen kürzer überfüllt als im Betrieb. Dieses Überfüllen erlaubt zusätzlich längeren Dampfbezug ohne Nachfüllen. Während des Nachfüllens wird außerdem eine Wächtervariable „nachfuellungErfolgt“ eins gesetzt, um das Heizen und Programmaufruf (z.B. Espresso Bezug) zu unterbinden. Sollte der Füllregler während eines Nachfüllvorgangs ausgeschaltet werden, wird die Pumpendrehzahl auf das Minimum reduziert, kurz gewartet und anschließend alle Ventile geschlossen.

4.5 Heizregler

Die Espressomaschine hat einen kombinierten Dampf- und Heißwasserkessel. Das Wasser im Kessel wird nur als Wärmespeicher für den Wärmetauscher und zur Dampferzeugung verwendet. Der Dampfdruck ist dabei der wichtigste Faktor und Sicherheitsrelevant. Der Druck lässt sich darüber hinaus besser Regeln und ein gewisser Dampfdruck ergibt eine gewisse Wassertemperatur. Aus diesen Gründen wird die Heizleistung primär über den Dampfdruck geregelt.

Die zwei gängigsten Regler sind 2-Punktregler und PID-Regler. Der 2-Punktregler ist besonders einfach, sowohl zu implementieren als auch von der notwendigen Rechenzeit. Da der Dampfdruck nicht so genau geregelt werden muss ist ein 2-Punktregler ausreichend. Zusätzlich ist der 2-Punktregler auch robuster, da er keine Probleme mit Wind-Up hat.

Der Heizregler ist ähnlich wie der Füllregler mit einer Reihe von *If*-Abfragen ausgeführt. Zuerst wird geprüft, ob der Regler aktiv ist, ob der Füllstand in einer der letzten fünf Takte voll war, ob der Füllregler aktiv ist und ob dieser nicht nachfüllt. Die letzten drei dieser Anforderungen existieren, um sicherzustellen, dass die Heizspirale immer benetzt ist. Während des Siedens ist die Füllstandsanzeige nicht immer stabil. Um ein ständiges Ausschalten der Heizspirale und Nachfüllen zu verhindern, wird geprüft, ob der Füllstand in den letzten fünf Takten mindestens einmal voll war. Somit ist sichergestellt, dass die Heizspirale bei viel zu niedrigen Füllstand (Fehlerzustand) ausgeht. Diese Überprüfung ist Dank der vorherigen Anforderungen jedoch nur in Extremfällen oder Fehlerzuständen notwendig. Der Füllregler wird zuerst ausgeführt und würde normalerweise das Wasser erst auffüllen, bevor er das Heizen erlaubt, indem „nachfuellungErfolgt“ eins gesetzt wird. Das bedeutet vor jedem Heizvorgang wurde der Füllstand geprüft. Da die Füllstandsregelung jedoch beim Heizen und Programmen (z.B. Espresso Bezug) unterdrückt wird, könnte es bei sehr langem Dampfbezug ohne die Füllstandsüberprüfung zu einem Heizen ohne ausreichenden Füllstand kommen.

Sind die Anforderungen erfüllt, wird der Kesseldruck geprüft. Ist dieser mindestens 50 mbar unter dem Sollwert, wird die Heizspirale mit der an einem Schieber eingestellten Heizleistung eingeschaltet. Während des Heizens wird mit einer Variablen das Nachfüllen unterdrückt, da die Messung nicht zwingend stabil ist. Wird der Sollwert überschritten, wird die Heizleistung auf null reduziert. Nach der Drucküberprüfung wird geprüft, ob entschichtet werden muss oder nicht. Dies geschieht über die Variable „tempRegeln“ welche bis zum ersten Erreichen des Siedepunktes nach Einschalten des Reglers eins bleibt. Im gleichen Schritt wird außerdem geprüft mit welchem Modus entschichtet werden soll. Dies kann durch einen Schalter eingestellt werden. Sollten die Anforderungen am Anfang nicht erfüllt sein,

wird die Heizleistung ebenfalls auf null reduziert. Dies dient primär, um die Heizspirale auszuschalten, wenn der Regler mitten im Heizen während eines Programmes ausgemacht wird.

Die Entschichtungsmethoden sind als Programme implementiert, sodass während des Entschichtens keine anderen Programme laufen können. Beide Methoden funktionieren nach den beschriebenen Prinzipien bis zum Erreichen des Siedepunktes. Danach wird die Wasserwendel 12 Sekunden bei geringer Pumpenleistung durchgespült. Dies dient zum einen zum Auffüllen der Wasserwendel und zum Entfernen von Luft, sollte welche vorhanden sein. Zum anderen wird das heiße Kesselwasser aus Pumpe und Leitungen gespült. Da dadurch die Temperatur im Kessel etwas runter gehen kann und ein Hin- und Herspringen zwischen den Zuständen unerwünscht ist, wird die Variable „kocht“ beim Erreichen des Siedepunktes eins gesetzt. Nachdem die Spülung abgeschlossen ist, wird „tempRegeln“ null gesetzt und zum Programm 9 gewechselt, in dem der Temperatursgleich der Wasserwendel abgewartet wird. Ein Wasserbezug ist ab jetzt möglich, der Dampfbezug muss noch einige Sekunden abgewartet werden (da dieser die Wasserwendel nicht nutzt). Zur Sicherheit beim Ein- und Ausschalten des Heizreglers während des Entschichtens ist eine *If*-Abfrage eingebaut, welche Programm 3/4 ordentlich verlässt und zu Programm 9 wechselt (Temperatursgleich).

Im Aufheizprozess zeigt der Drucksensor manchmal stark schwankende Werte im Bereich über 100 mbar an. Die genaue Ursache für dieses Problem konnte noch nicht ermittelt werden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass es an Wasser im Drucksensor liegt. Dieses Wasser wird beschleunigt und im Drucksensor abgebremst. Dieses Problem tritt selten auf und konnte durch Entfernen des aufgebauten Wassers bisher gelöst werden.

4.6 Durchflussregler/Flowregler

Beim Bezug eines Espressos werden vor allem immer wieder die Parameter Druck und Durchfluss genannt. Ein einfacher Espresso sollte bei einer Durchflussrate von 1 ml/s erfolgen (25 ml in 25 s) [74]. Dafür ist ein Durchflussregler notwendig. Die Regelgröße ist die Durchflussrate. Die Stellgröße ist Pumpendrehzahl bzw. dessen Ansteuerspannung in mV. Die Regelgröße hat ihren primären Arbeitspunkt bei 1 ml/s mit einer gewünschten maximalen Regelabweichung von $\pm 0,1$ ml/s. Der Regler soll zusätzlich eine möglichst hohe Bandbreite haben, um andere Espressomaschinen abzubilden.

Ein PID-Regler ist einfach, vielseitig und stationär genau. Er ist demnach gut geeignet für diese Regelaufgabe. Es ist nicht zu empfehlen den Regler mit einem Streckenmodell zu optimieren. Dies liegt besonders daran, dass die Strecke sich im Entwicklungsprozess immer wieder ändert und auch abhängig vom Kaffeemahlgrad und Sieb ist. Zudem ist der Entwurf eines Modells sehr aufwendig. Dies liegt vor allem auch an der geringen Abtastrate und der dementsprechend notwendigen Zeitdiskretisierung des Modells. Stattdessen ist es empfehlenswert einen Regler zu implementieren und dann diesen experimentell einzustellen. Für die Einstellung gibt es verschiedene Methoden. Man kann die Reglerverstärkungen so anpassen, dass der Regler in Dauerschwingung gerät und daraus die optimalen Reglerverstärkungen ermitteln [75]. Alternativ kann man jede Reglerverstärkung einzeln optimieren und anschließend feinjustieren [76]. In dieser Arbeit wurde die zweite Methode in einem ersten Versuch angewendet. Das Reglerverhalten ist noch nicht optimal und muss nach Streckenoptimierung weiter verbessert werden.

Der PID-Regler verwendet den Regelfehler (Sollwert - Istwert), um daraus die Stellgröße zu berechnen. Jedes der Buchstaben steht für eine andere Methode den Regelfehler zu verarbeiten. Jedes dieser Methoden hat einen eigenen Verstärkungsfaktor. P steht für proportional. Dieser Verstärkungsfaktor wirkt direkt auf den Regelfehler und ist wichtig für Sollwertsprünge. I steht für Integral. Dieser

Verstärkungsfaktor wirkt auf das Integral des Regelfehlers und ist wichtig für stationäre Genauigkeit. In einem zeitdiskreten System ist das einfachste und schnellste Verfahren zur Integralbildung das Eulerverfahren. Dies bedeutet die Addition des Produktes von Regelfehler und Abtastzeit. D steht für Differenzierer. Dieser Verstärkungsfaktor wird auf die Ableitung des Regelfehlers angewendet und sorgt typischerweise für besserer Dämpfung. In einem zeitdiskreten System kann die Ableitung am einfachsten durch $\frac{(Neu - Alt)}{Abtastzeit}$ berechnet werden.

Aus den ersten Einstellversuchen können einige Schlüsse gezogen werden. Der Festwasseranschluss ist die erste Herausforderung. Der anliegende Druck von etwa 2 bar führt zu einem Kaffeebezug mit einer Durchflussrate höher als 1 ml/s. Erst wenn das Kaffeemehl aufgequollen ist, bereitet es ausreichend Widerstand, um die Pumpe zuschalten zu können. Das Zuschalten der Pumpe bereitet das nächste Problem. Die Pumpe hat eine minimale Drehzahl (abgesehen von 0) von 300 U/min, sodass beim anfänglichen Zuschalten die Durchflussrate springt und die Pumpe wieder abschaltet. Dieses Phänomen wiederholt sich bis bei der gewünschten Durchflussrate eine Drehzahl größer als die minimale einstellt. Darüber hinaus sorgt die Kombination aus Drucksprüngen und Schwingungsfähigen Drehzahlregler (der Pumpe) zu Schwingungen. Da diese Schwingungen durch einen P-Anteil in der Strecke verstärkt werden, kann der P-Anteil des Durchflussreglers nicht zu groß werden. Außerdem konnte festgestellt werden, dass der D-Anteil bisher entweder kaum einen Einfluss auf das Einschwingverhalten hatte oder bei höherer Verstärkung Schwingungen verursacht. Dies wird wesentlich darauf zurückgeführt, dass die Glättung nicht so gut ist, wie in dem MATLAB®-Beispiel dargestellt und durch die Regelung verschlechtert wird. Die entstehenden hochfrequenten Schwankungen werden durch Ableitung besonders verstärkt.

Durch Einstellversuche sind erste Empfehlungen für konkrete Reglerverstärkungen entstanden. Diese sind abhängig von der Einsatzart. Ist ein Durchfluss gefordert, der anfangs nur durch den Festwasserdruck bereitgestellt werden kann, reicht ein Verstärkungsfaktor des I-Anteil von 1000-2000. Soll eine Durchflussrate eingestellt werden, welche die Fähigkeiten des Festwasseranschlusses übersteigt oder wird ein Tank verwendet empfiehlt sich $k_p=240$ und $k_i=500-750$. Diese Kombination reagiert Anfangs schneller auf Sprünge braucht jedoch länger, um die stationäre Verstärkung zu erreichen und schwingt mehr. Die gewünschte Genauigkeit $\pm 0,1$ ml/s bei 1 ml/s kann mit den gegebenen Parametern und ausreichend Gegendruck meist erreicht werden, wobei bei P-Anteil der erste Überschwinger diese Toleranz oft übersteigt. Der Regler braucht bei einem Sollwertsprung einige Sekunden bis zum Erreichen der stationären Genauigkeit. Um dies zu verbessern, müsste die Messwertglättung verbessert werden oder die Abtastrate erhöht werden. Wenn in Zukunft mit einer Verstelldrossel zur Volumenstromregelung gearbeitet wird, würde sich zudem eine Vorsteuerung anbieten, da am Anfang eines Espresso bezuges des Kaffeemehl keinen signifikanten Widerstand bietet. Durch diese Vorsteuerung könnte der P-Anteil stark reduziert werden.

Die Durchflussregelung ist durch eine Funktion implementiert. Dieser wird der Sollwert, die Reglerverstärkungen und ein Drehzahllimit der Pumpe übergeben. Die daraus resultierende Pumpendrehzahl wird direkt abgespeichert. Das Drehzahllimit dient vor allem zur Absicherung gegen Überdruck im experimentellen Betrieb. Die Durchflussregelung der Programme ist derzeit so implementiert, dass die Reglerverstärkungen und der Sollwert aus Eingabefeldern der Bedienoberfläche entnommen werden.

4.7 Mischwassertemperaturregler

Die Mischwassertemperaturregelung ist ähnlich der Durchflussregelung mit einem PID-Regler implementiert. Auch dieser ist als Funktion ausgelagert. Dieser wird ein Sollwert, ein Vorsteuerwert und die Reglerverstärkungen übergeben. Die Funktion speichert daraufhin eine Dosierventilansteuerspannung ab. Regelgröße ist die Mischwassertemperatur. Stellgröße ist die Dosierventilansteuerspannung. Die gewünschte Regelgenauigkeit beträgt $\pm 0,5$ °C und die Einschwingzeit 3 Sekunden. Der einstellbare Bereich muss mindestens 82-98 °C beinhalten.

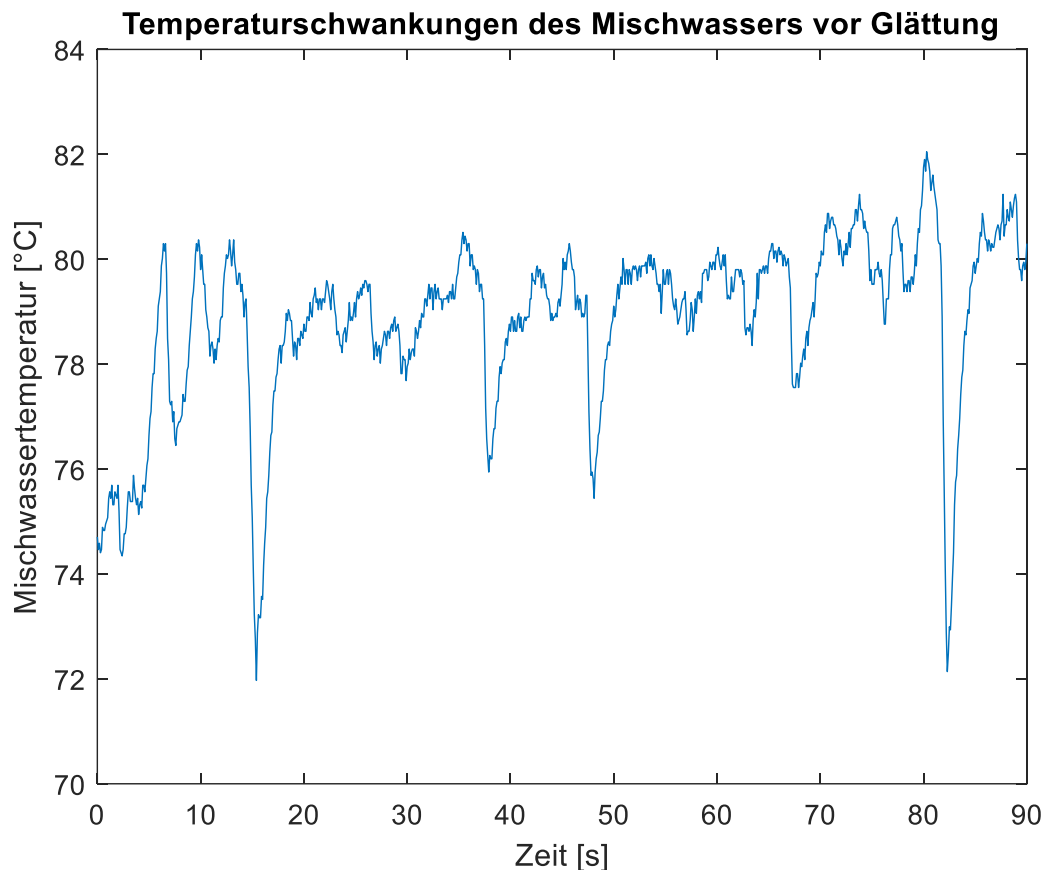


Abbildung 4: Beispielhafter Verlauf der Mischwassertemperatur mit Blasenbildung und ohne Glättung

Einem schnellen und präzisen Regler wirken mehrere Herausforderungen entgegen. Die gemessene Mischtemperatur schwankt ungeglättet stark. Dafür gibt es mehrere Hypothesen. Erstens Luft oder Dampfblasen, bei unzureichendem Wasserdruck. Zweitens nicht ausreichende Durchmischung des Mischwassers. Das Mischwasser wird auf Stoß miteinander durchmischt. Trotz dessen konnte beobachtet werden, wie bei niedriger Kesseltemperatur und geschlossenem Dosierventil wesentlich weniger ausgeprägte Schwankungen aufgetreten sind. Somit ist davon auszugehen, dass sich wärmere und kältere Regionen bilden. Drittens Wärmeverlust und Wärmekapazitäten verursachen Temperaturverluste zwischen Mischwassermessstelle und Brühgruppe. Die dauerhaften Wärmeverluste sind im Beharrungszustand nur für einige °C zuständig. Die Wärmekapazitäten verursachen einen weitaus größeren Temperaturabfall, welcher am Ende eines Espresso bezuges auch noch 10 °C betragen kann. Viertens ist die Trägheit des Dosierventils welche bereits in dessen Unterkapitel beschrieben wurde. Fünftens ist die Trägheit des Temperatursensors (siehe Anhang 15).

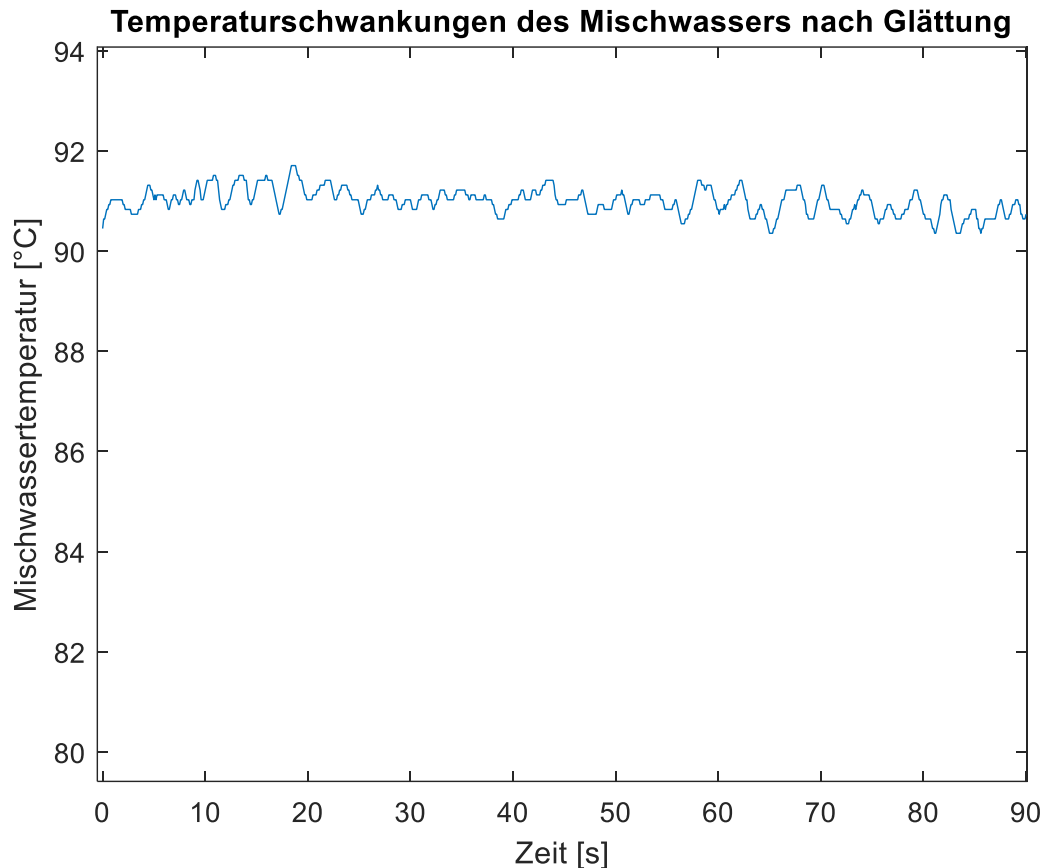


Abbildung 5: Diagramm zur Demonstration der durch Glättung und Blasenreduktion erreichbaren Messwertverbesserung

Diese Probleme können durch Glättung und andere Positionierung des Temperatursensors verbessert werden. Den Effekt der Glättung kann in **Abb. 5** erkannt werden. Die Schwankungen gehen von bis zu 10 °C runter auf 2 °C. Dies kann weiter verbessert werden, indem der Temperatursensor weiter weg von der Mischstelle bewegt wird. Dazu wurde eine Verschiebung von 5 cm nach dem Mischer hinzu 25 cm hinter der Mischstelle vorgenommen. Dies hat auch den positiven Effekt geringerer Wärmeverluste nach der Messtelle. Dieser Effekt ist sehr begrenzt, da nur etwas Rohrlänge (Kunststoff) eliminiert wird. Da der Effekt recht gering ist, wird angenommen, dass ein signifikanter Teil des Wärmeverlustes durch die Magnetventile (Messing) hervorgerufen wird. Dieser Effekt könnte reduziert werden durch Magnetventile aus Kunststoff z.B. von AVS-Römer.

Das Verschieben des Temperatursensors hat einen negativen Effekt auf die Schnelligkeit des Mischertemperaturreglers. Dies wird verursacht durch das größere Rohrvolumen zwischen Mischer und Temperatursensor. Bei einem Innendurchmesser von 4 mm und einer Länge von 25 cm befinden sich etwa 3 ml im Rohr. Bei einer gewünschten Durchflussrate von 1 ml/s wären das 3 s Verzögerung. Die weit entfernte Platzierung des Temperatursensors ist somit keine dauerhafte Lösung. Stattdessen wird ein zweiter Temperatursensor in der Brühgruppe dauerhaft notwendig sein. Der Mischertemperatursensor sollte dann möglichst nah an die Mischstelle für reduzierte Totzeit. Gleichzeitig muss Platz für die Durchmischung sein oder die Durchmischung verbesserte werden.

Aufgrund der Trägheiten im System wird eine Vorsteuerung verwendet. Dadurch wird der Regler in der Sprungantwort schneller und neigt weniger zu Wind-Up. Wind-Up beschreibt das Phänomen, dass sich der I-Anteil über das notwendige Maß aufzieht, aufgrund Verzögerungen im System. Wind-Up bedeutet auch immer stärkeres Überschwingen. Der Vorsteuerwert ist primär abhängig von der gewünschten Mischertemperatur (T_M), der Durchflussrate und der Kesseltemperatur. Da dies einen

Dreidimensionalen Kennraum ergibt, wird sich bei der ersten Implementation auf die gewünschte Temperatur beschränkt. Die Durchflussrate wird festgesetzt auf 3 ml/s. Die Kesseltemperatur wird auf 125 °C festgesetzt. Durch sequenzielle Erhöhung der Dosierventilansteuerspannung (V_D) und warten auf Beharrungszustand wird eine Ausgleichsgerade aufgenommen. Diese Gerade wurde ermittelt zu:

$$V_D[\text{mV}] = 26307 \text{ mV} - 243,2 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} \cdot T_M [^\circ\text{C}] \quad (10)$$

Diese Vorsteuergerade kann auch für einen Vorlauf verwendet werden. In den Leitungen befindet sich meist kaltes Wasser, welches erst durchgespült werden muss. Damit sich das Dosierventil nicht langsam in Stufen auf den richtigen Wert einstellt und sich dabei zu weit aufzieht, wird das Dosierventil mit dem Vorsteuerfaktor (multipliziert mit einem Vorfaktor) statisch geöffnet, bis die gewünschte Temperatur erreicht wird. Anschließend wird der Regler zugeschaltet. Zuvor wird das Mischwasser nicht in die Brühgruppe geleitet, sondern in den Überlauf. Dies erlaubt am Anfang mit erhöhter Durchflussrate durchzuspülen. Dazu wird ein statischer Pumpenwert verwendet, da der genaue Durchfluss nicht wichtig ist.

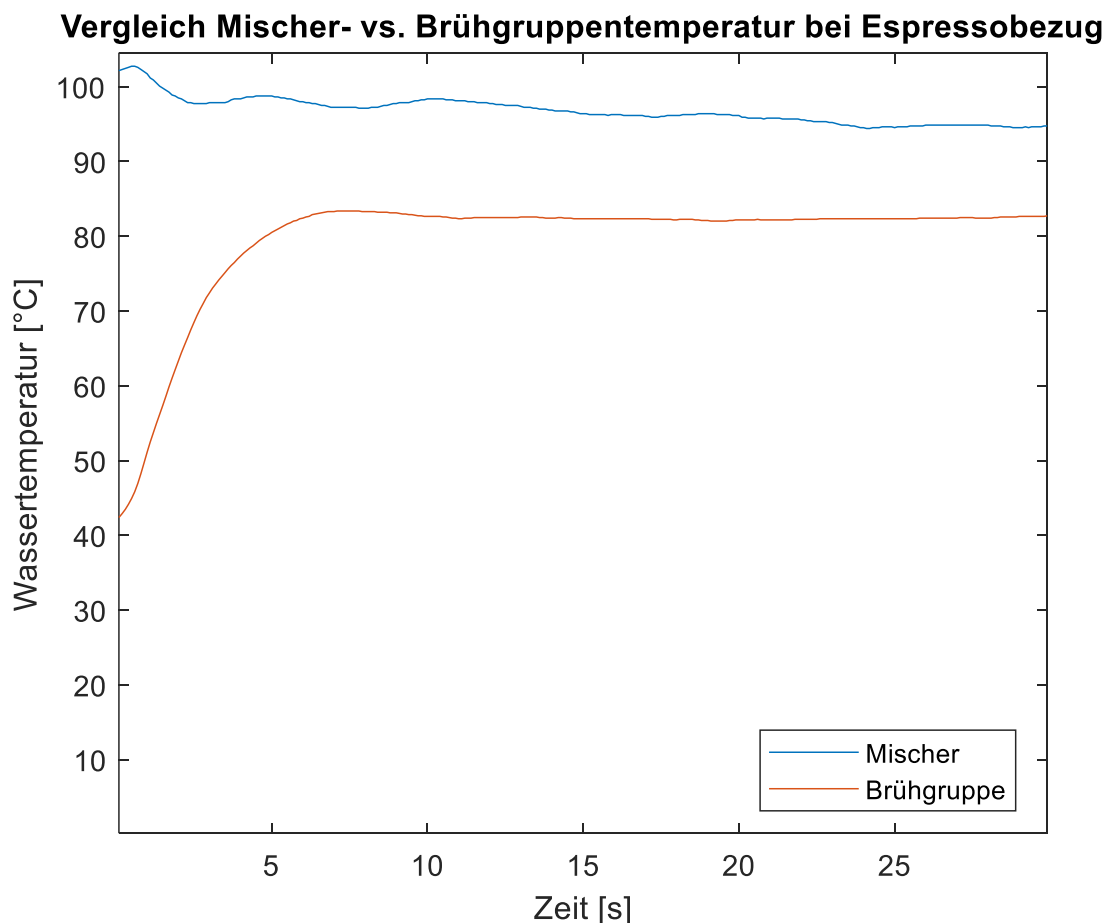


Abbildung 6: Verlauf von Mischer- und Brühgruppentemperatur, zur Illustration der Wärmeverluste und des Reglerverhaltens. Die Solltemperatur beträgt 90 °C, wobei in den ersten 5-10 s mit 100 °C und anschließend 95 °C Mischertemperatur gearbeitet wird, um Wärmeverluste zu kompensieren.

Die Kombination aus Vorlauf und Versteuerung ergibt ein annehmbares Überschwingverhalten. Dies gekoppelt mit den Wärmeverlusten bedeutet, dass der Regler nicht erst warten muss, bis die Temperatur sich eingeregelt hat. Stattdessen kann der Bezug direkt auf die Brühgruppe gewechselt werden. Es dauert auch damit noch etwa 6 Sekunden, bis Wasser in die Brühgruppe geleitet wird und weitere

15-20 Sekunden bis die gewünschte Genauigkeit von $\pm 0,5$ °C annähernd erreicht wird. Die erreichbare Genauigkeit und Schnelligkeit ist abhängig von der Durchflussrate. Eine höhere Pumpendrehzahl am Anfang würde z.B. die Durchspülzeit reduzieren. Eine generelle Reduzierung der Leitungslänge würde die Spülzeit reduzieren. Ein schnelleres Dosierventil würde die Reglergeschwindigkeit und Güte ebenfalls anheben. Dies ist bereits in Planung. Zuletzt kann man sehen, dass der Temperatursensor zwar nicht langsam ist aber auch etwa 6 Sekunden braucht, um dem Temperaturverlauf folgen zu können, dies ist vor allem in der Anfangsphase wichtig, da es hier durch den großen Temperaturunterschied zu Verzögerung kommt. Das bedeutet gleichzeitig, dass ein Einschwingen in den gewünschten 3 Sekunden schon aufgrund der Sensorträgheit nicht funktioniert.

Für den Mischwassertemperaturregler sind erste Anhaltswerte für die Reglerverstärkung verwendbar. Auch bei diesem Regler ist der D-Anteil derzeit nicht hilfreich, da er entweder keinen signifikanten Einfluss hat oder zu Schwingungen führt. Für k_I und k_P werden 50 empfohlen.

4.8 Programme (switch app.program)

Das Verhalten der Maschine, abgesehen von den Reglern, ist ähnlich einem Zustandsautomaten. Die Maschine bleibt in einem Zustand, bis eine Bedingung erfüllt ist und wechselt dann in den nächsten Zustand. Der zugehörige Code wird in jedem Durchlauf erneut aufgerufen. Der Zustand wird in der Variable „app.program“ numerisch abgespeichert. Der zugehörige Code wird durch eine „switch(case)“-Anweisung zugeordnet. Ein Zustandswechsel kann entweder durch eine interne Bedingung, etwa ein Zählerüberlauf oder ein Grenzwertüberschreiten sein oder eine externe Bedingung, etwa das Umlegen eines Schalters.

Die Implementierung in einer „switch“-Anweisung hat die Vorteile der einfachen Erweiterbarkeit, kürzerer Rechenzeit und der Maschinenzustand ist zu jeder Zeit bekannt. Wenn ein Programm/Zustand hinzugefügt werden soll, muss der Code meist nicht stark abgeändert werden. Das Programm bekommt eine Zahl zugewiesen und kann einfach angehängt werden. 0-9 wird typischerweise für Basisfunktionen verwendet, 10-19 für den Manuellen Modus und 20-29 für den Automatischen Modus. Die Ausführungszeit kann durch Fragmentierung der Programme verbessert werden. Anstatt immer wieder die gleichen *If*-Abfragen auszuführen, werden diese auf mehrere Zustände aufgeteilt, welche hintereinander aufgerufen werden. Die Fragmentierung erlaubt auch die Wiederverwendung von Zuständen. Der Kaffeebezug wird z.B. in einem ersten Schritt initialisiert und in einem zweiten ausgeführt. Der Ausgleichsprozess ist nach vielen Programmen gleich, nur die Zeit ist verschieden, sodass dieser Zustand wiederverwendet wird.

Ein wichtiger Zustand ist der Ausgangszustand (0), dieser gibt an, dass die Maschine in einem ausgeglichenen Zustand ist. In diesen Zustand kehrt die Maschine immer wieder zurück. Der Zustand ist vor allem wichtig, um zu wissen, dass ein sicherer Zustand erreicht ist.

4.9 Manueller Modus

Der Manuelle Modus wird charakterisiert durch die Möglichkeit des Nutzers direkt auf die Aktoren zu wirken. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Absicherung reduziert ist, um den Nutzer nicht zu stark zu beschränken. Der Manuelle Modus beinhaltet jedoch schon einige Sicherheiten, um die Beschädigungsmöglichkeiten zu reduzieren. Im manuellen Modus gibt es zusätzlich den „Manual Overwrite“, welcher noch direkteren Zugriff auf die Aktoren gibt. Damit können alle Aktoren angesteuert werden,

unabhängig vom aktuellen Programm. Der Manuelle Modus ist somit in der aktuellen Implementation primär für Debugging und Experimentieren gedacht.

Der Manuelle Modus enthält bereits zwei Regler, da diese Sicherheitsrelevant sind. Dies ist der Heizregler und der dafür notwendige Füllregler. Beide sind notwendig, um ein Heizen bei zu hohem Druck oder ohne Wasser zu verhindern. Die Heizleistung die der Heizregler verwendet ist einstellbar. Auch die Pumpenleistung des Füllreglers ist einstellbar. Da der „Manual Overwrite“ auf die Ventile zugreift, funktioniert der Füllregler in diesem Modus nicht mehr, bzw. kann nicht nachfüllen. Der Heizregler funktioniert weiterhin, sodass es trotzdem nicht zu Überdruck oder Heizen ohne Wasser kommt. Trotzdem wird empfohlen den Füll- und Heizregler vor Betätigen des „Manual Overwrite“ zu deaktivieren.

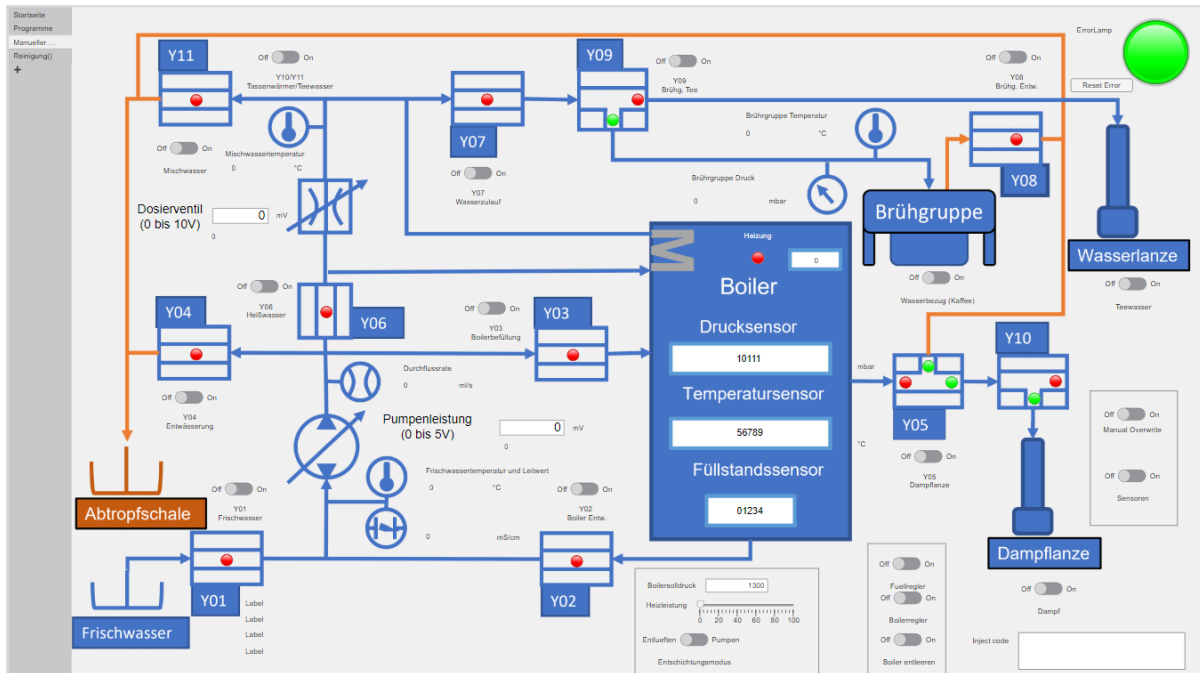


Abbildung 7: Übersicht über die Bedienoberfläche im Manuellen Modus

Der Manuelle Modus enthält, wie in **Abb. 7** zu erkennen, eine Visualisierung der Espressomaschine, sodass die Aktoren und Sensoren während der Laufzeit angezeigt werden. Die Symbole sind an hydraulische Symbole angelehnt. Die Ventile bilden ihren inneren Aufbau nach. Nach dem Verbindungsaufbau auf der Startseite wird zum Manuellen Modus durch einen Knopf oder klicken auf den entsprechenden Reiter gewechselt. Die Maschine lässt sich starten, indem die Sensoren aktiviert werden. Anschließend wird der Füllstandsregler und Boiler/Heizregler gestartet. Damit diese richtig funktionieren muss eine Pumpenansteuerspannung und Heizleistung eingestellt werden.

Der Bezug von Wasser über die Brühgruppe, den Überlauf oder die Teewasserlanze und Dampf ist über die entsprechenden Schalter möglich. Beim Umlenken eines Schalters wird geprüft, ob die Maschine in einem sicheren Zustand ist aus dem geschaltet werden darf. Im Falle des Wasserbezuges ist das, wenn ein anderer Wasserbezug durchgeführt oder beendet wird, ein Ausgleichsprozess läuft oder kein Programm läuft (case 0). Beim Dampfbezug wird die Wasserwendel nicht verwendet, sodass ein Warten auf Ausgleich nach einem Wasserbezug notwendig ist. Da nach einem Espresso Bezug oftmals Milch aufgeschäumt wird, ist diese Wartezeit auf 6 Sekunden begrenzt. Um die Überprüfung zu implementieren, wird ein Skript aufgerufen bei Betätigung eines Schalters. Sollte die Maschine in keinem der sicheren Zustände sein, schnellt der Schalter zurück. Ähnliche Skripte sind auch für die anderen Schalter implementiert. Da der Manuelle Modus unter anderem für Bugfixing und Experimentieren gedacht ist, sind nicht alle Schalter abgesichert. Es ist z.B. möglich die Timerfunktion zu deaktivieren

(Programmdurchlauf und Messwerte werden deaktiviert) bevor ein sicherer Zustand erreicht ist, dies ist im Automatischen Modus nicht möglich, da sämtliche Aktorzustände dabei erhalten bleiben.

Der Manuelle Modus enthält zwei Elemente zum Auswerten und Debuggen. Es sind 4 Textzeilen enthalten, um die MCU-Antworten zu dokumentieren. Diese werden durchrolliert. Dies bietet die Möglichkeit live zu sehen, welche Befehle an die MCU geschickt werden und welche Fehlermeldungen entstehen. Reichen diese 4 Zeilen nicht aus, kann zurück auf die Startseite gewechselt werden, auf der sich 10 Zeilen befinden. Zusätzlich gibt es eine Statusleuchte, welche bei Erkennen eines Fehlers Rot wird, um den Nutzer zu alarmieren. Da Fehlermeldungen nicht nur vereinzelt auftreten und normalerweise durch Sicherheitsmechanismen gelöst werden können, kann die Leuchte zurückgesetzt werden.

4.10 Automatischer Modus

Der Automatische Modus wird charakterisiert durch die Verwendung von Reglern. Dies bedeutet auch, dass ein Eingriff des Nutzers während des Bezuges (Dampf oder Wasser) nicht mehr notwendig ist. Der Modus befindet sich in einem ausbaufähigen Zustand. Ein Bezug läuft noch nicht komplett automatisiert ab. Der Kaffeebezug muss vorher durch die gewünschten Temperatur- und Durchflussratenollwerte charakterisiert werden und der Bezug durch Betätigen eines Schalters wieder beendet. Das Ein- und Ausschalten der Maschine wird über einen einzigen Schalter gelöst. Die Messwerte sind im Automatischen Modus weniger wichtig, sodass diese nur aufgelistet werden. Während eines Wasserbezuges ist es durch Aktivierung im Code auch möglich, die Mischwassertemperatur und Durchflussrate als Diagramm darzustellen. Die Auffrischung der Messwerte und der Diagramme wird aufgrund Lesbarkeit und Rechenzeit nur ein bis zwei Mal die Sekunde durchgeführt.

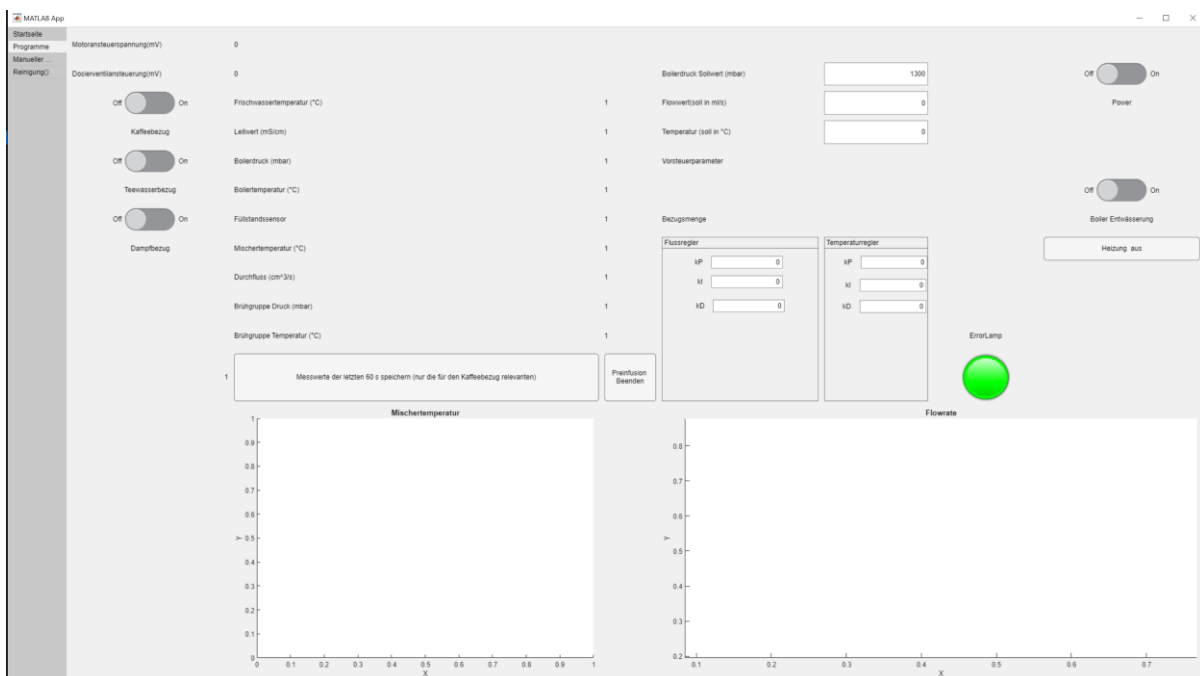


Abbildung 8: Übersicht über die Bedienoberfläche im Automatischen Modus

Im Automatischen Modus ist der Wasserbezug über die Brühgruppe und die Teewasserlanze sowie der Dampfbezug möglich. Da die Durchflussrate beim Teewasserbezug derzeit weniger wichtig ist, wird mit einer statischen hohen Pumpendrehzahl gearbeitet. Die Teewassertemperatur ist wichtig, sodass der Mischwassertemperaturregler aktiv ist. Der Bezug über die Brühgruppe verläuft ähnlich verwendet

jedoch den Durchflussregler. Zusätzlich gibt es bei dem Bezug über die Brühgruppe einen zusätzlichen Zustand mit dem Namen Preinfusion. Dieser Zustand wird verwendet, um den Espresso-Bezug in zwei Phasen aufzuteilen, in denen verschiedene Sollwerte verwendet werden. Die Temperatur während der Preinfusion ist 10 °C über dem Sollwert, um die Wärmekapazitäten in der Preinfusion besser zu kompensieren. Auch nach der Preinfusion bleibt die geregelte Temperatur 5 °C über dem Sollwert, um Wärmeverluste zu kompensieren. Außerdem wird dem Nutzer beim Wasserbezug die Menge des bezogenen Wassers angezeigt. Am Ende der Preinfusion wird dieser Wert zurückgesetzt, sodass nur die tatsächlich bezogene Wassermenge angezeigt wird. Der Dampfbezug erfolgt analog zum Dampfbezug im Manuellen Modus.

Zum Einschalten der Maschine im Automatischen Modus, muss nur der Powerschalter umgelegt werden. Es werden dann Werte für Heizleistung und Pumpe (für Füllen, Leeren und Umpumpen) hinterlegt. Diese Werte können jederzeit im Reiter „Manueller Modus“ abgeändert werden. Ausgemacht werden kann die Maschine auf gleiche Art und Weise. Vorher wird durch das Programm geprüft, ob ein Ausschalten erlaubt ist. Dies ist nur im Zustand 0 möglich. Da in diesem Zustand die Heiz- und Füllregler noch an sind, gibt es die Möglichkeit vorher den Heizregler zu deaktivieren und den Boiler zu leeren. Es ist zu beachten, dass nach Deaktivieren der Regler, diese erst reaktiviert werden, durch An- und Ausschalten des Powerschalters.

Auch der Automatische Modus ist zur Erforschung von Espresso-Parametrierung geeignet. Aus diesem Grund wurde ein Knopf hinzugefügt, der die wichtigsten Daten der letzten 60 Sekunden in einer durchnummerierten Datei abspeichert. Darin werden Mischertemperatur, Brühgruppentemperatur, Brühgruppendruck und Durchflussrate gespeichert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die erste Implementation eines Espresso bezuges ist nun möglich. Die Parameter beim Kaffeebezug können entweder manuell durch den Nutzer während des Kaffeebezuges eingestellt werden oder durch Angeben von Wunschparameter größtenteils automatisiert eingestellt werden. Das System kann durch PID-Regelung Durchfluss und Mischwassertemperatur regeln. Regelung, die auf dem Druck basiert fehlt bisher. Da der Druck für die Preinfusion wichtig ist, ist auch die Preinfusion nur rudimentär angelegt.

Damit ein Espresso bezug möglich ist, wird weitere Unterstützungssoftware, wie Füll- und Heizregler benötigt. Der Heizregler ist als 2-Punktregler implementiert, soll jedoch als PID-Regler implementiert werden. Auch ein modifizierter Zustandsautomat wurde programmiert, um die Programmabläufe zu realisieren und einfach erweiterbar zu gestalten.

Auch die Hardware wurde angepasst. Es wurden Ventile ausgetauscht, um Verdampfung in der Wasserwendel zu verhindern. Da dies jedoch nicht ideal ist wurde eine zukünftige Lösung erdacht, um zum alten System zurückkehren zu können. Es wurde defekte Hardware ausgetauscht, falsch eingebaute Komponenten korrigiert und neue Komponenten hinzugefügt. Zum Beispiel wurde ein Temperatursensor nahe der Brühgruppe platziert, um Temperaturverluste zu erkunden. Außerdem wurden Drosseln an verschiedenen Orten platziert, um deren Effekt zu untersuchen. Für die beste Einstellbarkeit der Durchflussrate eignet sich ein einstellbares Dosierventil direkt nach der Pumpe. Die finale Platzierung der verschiedenen Drosseln muss noch untersucht und ausgearbeitet werden. Die richtige Drossel für den Heißwasserstrang muss ausgewählt werden, um ein Optimum zwischen möglicher Durchflussrate und möglichen Temperaturen zu erreichen. Die Platzierung von Drosseln nach dem Mischer muss untersucht werden. Ein Optimum aus möglichen Durchflussraten und Druck muss erreicht werden und gleichzeitig Dampf bildung in der Wasserwendel bei unzureichendem anderweitigem Gegen druck, verhindert werden.

Eine rudimentäre Verarbeitung und Glättung der Messwerte wurde implementiert, wobei diese noch nicht zufriedenstellend ist. Besonders das Abbilden der Dynamik des Systems ist noch mangelhaft. Hier könnte Abhilfe durch einen Regressionsansatz gegeben werden. Dies würde gleichzeitig auch erlauben mehr Messwerte zur Glättung zu verwenden und würde somit die Glättung verbessern. Zudem sind die Sensoren alle noch nicht kalibriert und abgeglichen. Dies ist unbedingt notwendig, damit nicht nur relative, sondern auch absolute Aussagen getroffen werden können.

Fluss- und Mischwassertemperaturregler sind in einfacher Form implementiert, müssen jedoch noch besser eingestellt werden. Für schnellere und genauere Regler sind vor allem Verbesserungen der Messwertgüte und Strecke notwendig. Zum Beispiel muss die Positionierung von Mischer und Mischertemperatursensor optimiert werden. Außerdem wäre die Verwendung des Brühgruppentemperatursensors für den Mischwassertemperrauregler günstig. Hier würde sich zum Beispiel eine Kaskadenregelung anbieten. Zudem sollte auch eine Streckenanalyse durchgeführt werden, damit die Grenzen des Möglichen besser verstanden werden. Dies beinhaltet z.B. das Verhalten der Pumpe zu untersuchen. Sowohl ein Durchfluss-Druck-Kennfeld als auch genauere Untersuchungen der Dynamik sind hilfreich. Auch die Sprungantwort der Temperatursensoren muss untersucht werden. Die Temperaturverluste und deren Ursprung müssen genauer untersucht werden, z.B. indem ein Temperatursensor an verschiedenen Stellen platziert wird. Diese Streckenanalyse sollte sowohl für Festwasseranschluss als auch Bezug aus einem Tank unternommen werden, da die Unterschiede zwischen Tank- und Festwassernutzung noch unzureichend untersucht sind.

Es sind einige Programme wie Tee- und Kaffeewasserbezug sowie Dampfbezug implementiert. Diese müssen jedoch noch fertiggestellt werden. Der Kaffeebezug braucht z.B. noch Presets und ein automatisches Beenden. Der Dampfbezug braucht noch eine Softopen- und -close-Funktion, in der der Dampfbezug über ein Dosierventil gesteuert wird. Die notwendigen und das bestehende Dosierventil müssen zudem durch verbesserte ausgetauscht werden und dessen Ansteuerung implementiert. Außerdem müssen weitere Programme implementiert werden, z.B. Reinigungsprogramme.

Zudem sollten die beschriebenen Kommunikationsprobleme weiter untersucht werden und eine Lösung erarbeitet werden. Dies könnte jedoch ein komplettes Umschreiben der App benötigen. Als solches ist es sinnvoll auch die Programmierung so anzupassen, dass mehrere MCUs gleichzeitig verwendbar sind und Multithreading unterstützt wird. Dies ist einerseits für die Ansteuerung der Schrittmotoren für die Dosierventile notwendig und würde gleichzeitig erlauben Prozesse auf einem dedizierten Kern laufen zu lassen, sodass diese weniger anfällig gegenüber Unterbrechungen wie Interrupts sind.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachter typischer Ablauf in der App bei Messwerterkennung.....	12
Abbildung 2: Typischer Durchflussratenverlauf bei konstanter Pumpenansteuerspannung. Ersichtlich sind stationäre Schwankungen, Schwankungsspitzen und abklingende Schwingungen des Drehzahlregler.....	15
Abbildung 3: Graph zur Demonstration der möglichen Glättungseigenschaften und den damit verbundenen Verzögerungen. Zusätzlich wird der Effekt unzureichender Spitzenfilterung illustriert.	16
Abbildung 4: Beispielhafter Verlauf der Mischwassertemperatur mit Blasenbildung und ohne Glättung.....	21
Abbildung 5: Diagramm zur Demonstration der durch Glättung und Blasenreduktion erreichbaren Messwertverbesserung.....	22
Abbildung 6: Verlauf von Mischer- und Brühgruppentemperatur, zur Illustration der Wärmeverluste und des Reglerverhaltens. Die Solltemperatur beträgt 90 °C, wobei in den ersten 5-10 s mit 100 °C und anschließend 95 °C Mischertemperatur gearbeitet wird, um Wärmeverluste zu kompensieren.	23
Abbildung 7: Übersicht über die Bedienoberfläche im Manuellen Modus	25
Abbildung 8: Übersicht über die Bedienoberfläche im Automatischen Modus.....	26

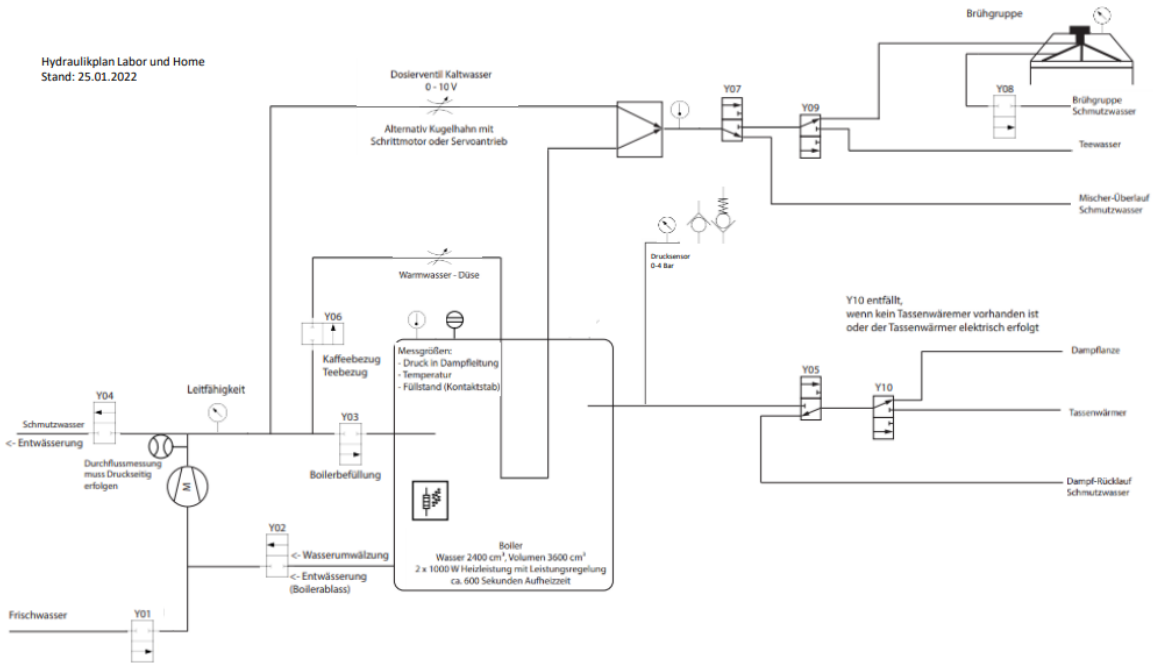
Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Hydraulikplan zu Beginn des Projektes (Stand: 25.01.2022) [64].....	iv
Anhang 2: Hydraulikplan Mitte des Projektes (stand 08.04.2022) [64].....	iv
Anhang 3: Rohdaten und Rechenwerte zur Spannungskalibrierung der Spannungsmessplatine der Eingänge In1-In3.....	v
Anhang 4: Spannungsabweichungskennlinie (Spannung Messplatine - Referenzspannung) des Eingangs In3.....	v
Anhang 5: Spannungsabweichungskennlinie (Spannung Messplatine - Referenzspannung) des Eingangs In2.....	vi
Anhang 6: Spannungsabweichungskennlinie (Spannung Messplatine - Referenzspannung) des Eingangs In1.....	vi
Anhang 7: Rohdaten und Rechenwerte zur Mischertemperaturkalibrierung (AVS-Römer-NTC)	vii
Anhang 8: Kennlinie (lineare Regression) der Temperaturabweichung des AVS-Römer-NTC	vii
Anhang 9: Rohdaten und Rechenwerte zur Kesseltemperaturkalibrierung (Omron-NTC)	viii
Anhang 10: Kennlinie (lineare Regression) der Temperaturabweichung des Omron-NTC	ix
Anhang 11: Rohdaten zur Überprüfung der Kalibrierung der NTCs. Wasser wurde aus dem Kessel gelassen und in die Brühgruppe gefördert. Dabei wurde immer gewartet, bis sich eine Beharrungstemperatur einstellt.....	ix
Anhang 12: Untersuchung des sich einstellenden Druck bei Nullförderung der Fluid-O-Tech FG304. Die erste Stufe entspricht einer Ansteuerspannung von 500 mV. Jede folgende Stufe +100 mV. Die letzte Stufe von 2200 mV wurde im zweiten Versuch erreicht. (Drucksensor nicht geeicht)	x
Anhang 13: Aufheizkurve der Labortechnischen espressomaschine im Entschichtungsmodus Entlüften.....	xi
Anhang 14: Aufheizkurve der Labortechnischen espressomaschine im Entschichtungsmodus Umpumpen.....	xii
Anhang 15: Untersuchung des Reaktionsverhalten des AVS-Römer Temperatursensors	xiii

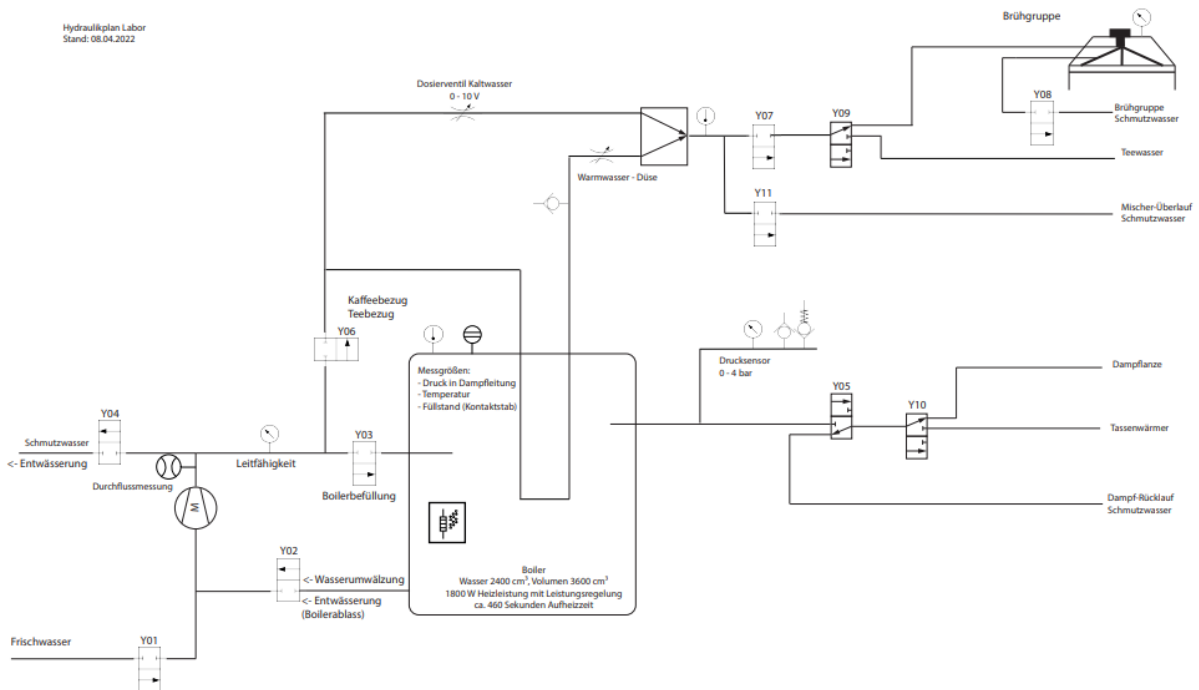
Literaturverzeichnis

Siehe <https://moodle.hm.edu/course/view.php?id=19383>

Anhang



Anhang 1: Hydraulikplan zu Beginn des Projektes (Stand: 25.01.2022) [64]

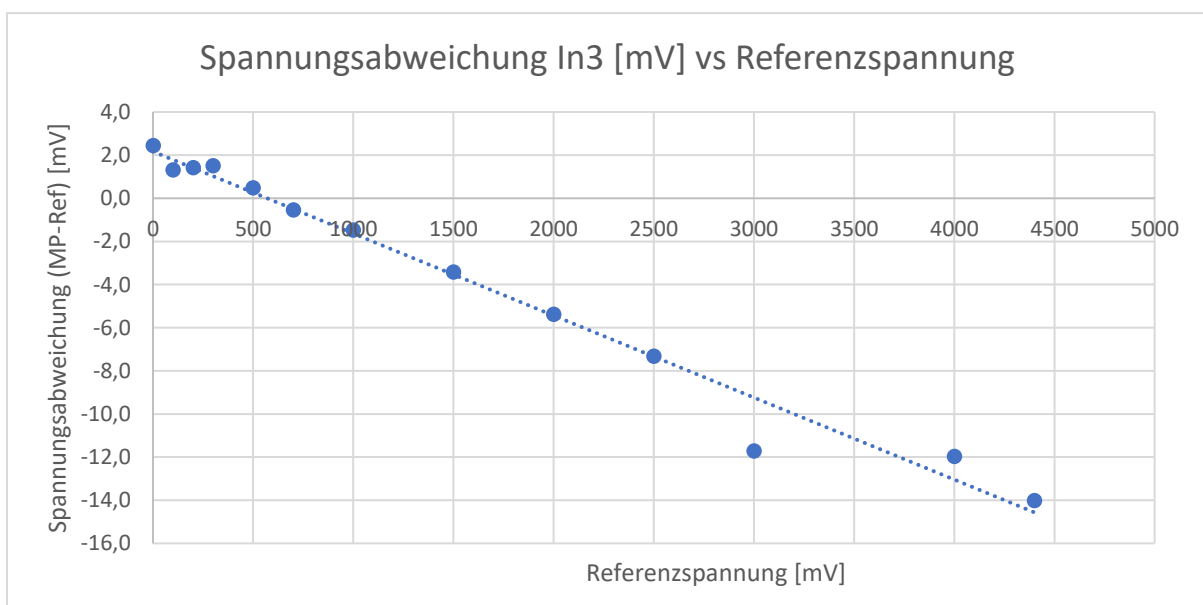


Anhang 2: Hydraulikplan Mitte des Projektes (stand 08.04.2022) [64]

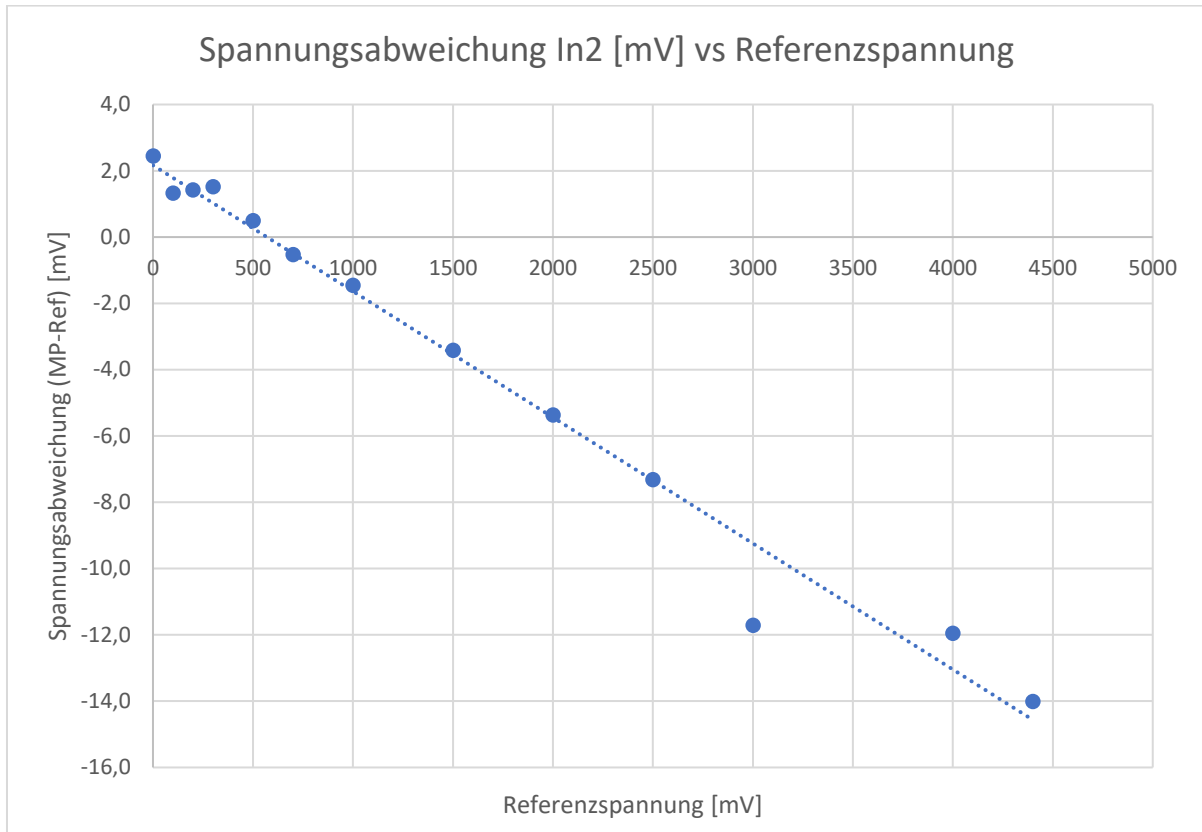
Rohdaten und Rechenwerte zur Spannungskalibrierung der Spannungsmessplatine In1-In3

Ref [mV]	In1 (Drucksensor)					In2 (Temperatur)					In3 (Leitwert)				
	adc1	adcso11	Spannung am mC [mV]	gerechnete Spannung an der Messplatine (MP) [mV]	delta (MP-Ref) [mV]	adc2	adcso12	mC2 [mV]	MP2 [mV]	delta2 [mV]	adc3	adcso13	mC3 [mV]	MP3 [mV]	delta3 [mV]
0	5	0	4,0	5,5	5,5	2	0	1,6	2,4	2,4	2	0	1,6	2,4	2,4
100	95	91	76,5	104,4	4,4	83	82	66,9	101,3	1,3	83	82	66,9	101,3	1,3
200	185	182	149,0	203,2	3,2	165	164	132,9	201,4	1,4	165	164	132,9	201,4	1,4
300	276	273	222,4	303,2	3,2	247	246	199,0	301,5	1,5	247	246	199,0	301,5	1,5
500	457	455	368,2	502,1	2,1	409	410	329,5	499,3	-0,7	410	410	330,3	500,5	0,5
700	638	637	514,0	700,9	0,9	573	573	461,6	699,5	-0,5	573	573	461,6	699,5	-0,5
1000	910	910	733,2	999,8	-0,2	817	819	658,2	997,3	-2,7	818	819	659,0	998,5	-1,5
1500	1362	1365	1097,3	1496,3	-3,7	1225	1229	986,9	1495,4	-4,6	1226	1229	987,7	1496,6	-3,4
2000	1815	1820	1462,3	1994,0	-6,0	1634	1638	1316,5	1994,6	-5,4	1634	1638	1316,5	1994,6	-5,4
2500	2267	2276	1826,4	2490,6	-9,4	2041	2048	1644,4	2491,5	-8,5	2042	2048	1645,2	2492,7	-7,3
3000	2717	2731	2189,0	2985,0	-15,0	2447	2458	1971,5	2987,1	-12,9	2448	2458	1972,3	2988,3	-11,7
4000	3625	3641	2920,5	3982,5	-17,5	3266	3277	2631,3	3986,8	-13,2	3267	3277	2632,1	3988,0	-12,0
4400	3985	4005	3210,6	4378,1	-21,9	3591	3604	2893,1	4383,5	-16,5	3593	3604	2894,8	4386,0	-14,0

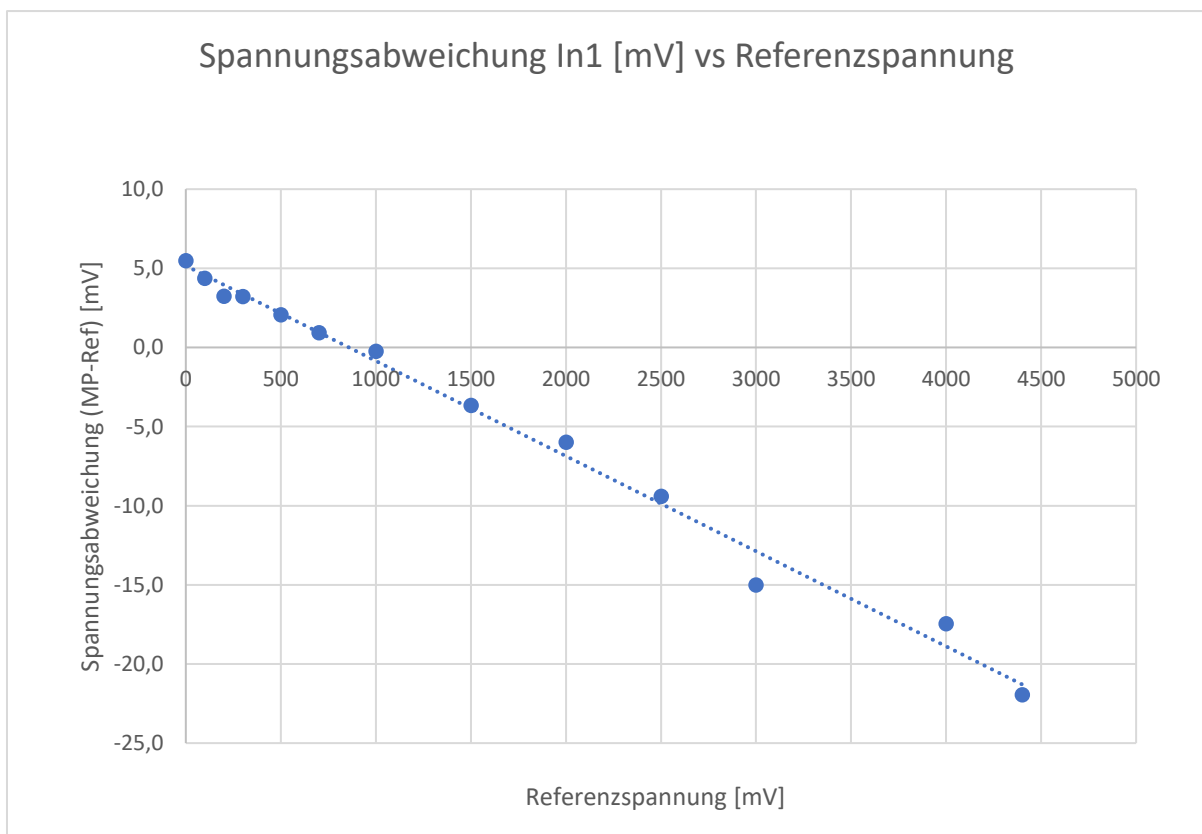
Anhang 3: Rohdaten und Rechenwerte zur Spannungskalibrierung der Spannungsmessplatine der Eingänge In1-In3



Anhang 4: Spannungsabweichungskennlinie (Spannung Messplatine - Referenzspannung) des Eingangs In3



Anhang 5: Spannungsabweichungskennlinie (Spannung Messplatine - Referenzspannung) des Eingangs In2

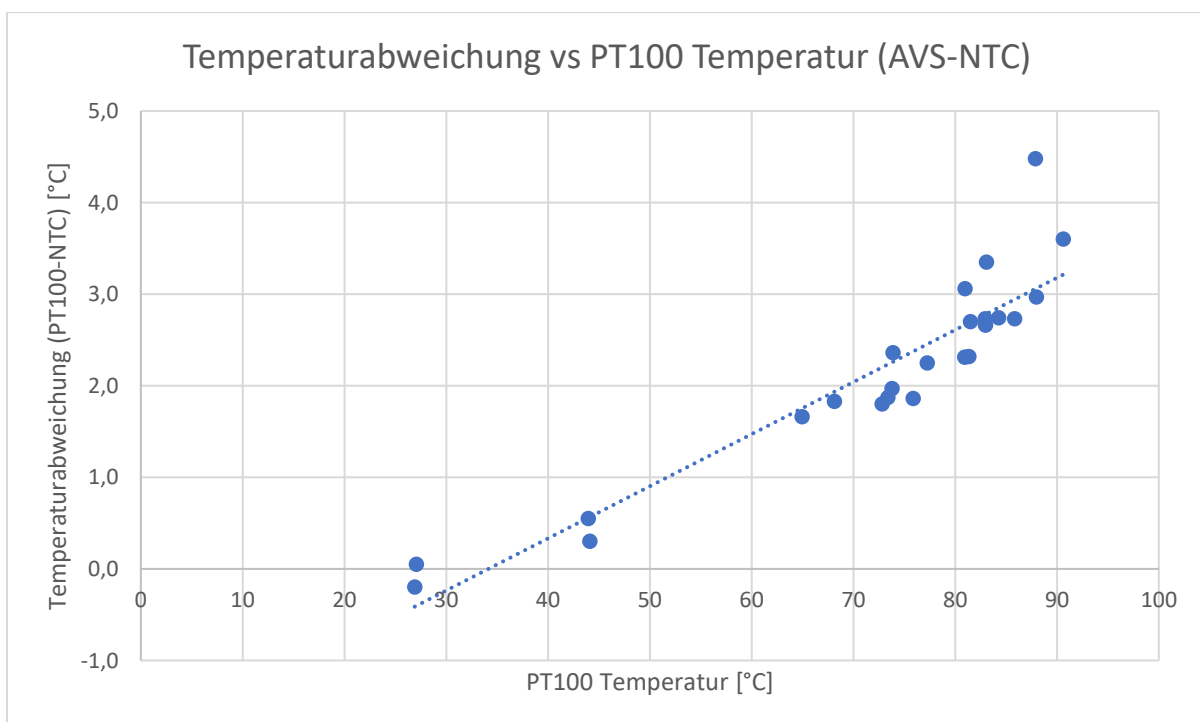


Anhang 6: Spannungsabweichungskennlinie (Spannung Messplatine - Referenzspannung) des Eingangs In1

Rohdaten und Berechnungen zur Mischertemperaturkalibrierung

Mischertemperatur [°C]	PT100-Temperatur [°C]	Deltatemperatur [°C]
27,10	26,90	-0,20
27,00	27,05	0,05
43,40	43,95	0,55
43,80	44,10	0,30
63,30	64,96	1,66
66,30	68,13	1,83
71,00	72,80	1,80
71,50	73,37	1,87
71,80	73,77	1,97
71,50	73,86	2,36
74,00	75,86	1,86
75,00	77,25	2,25
78,60	80,91	2,31
77,90	80,96	3,06
79,00	81,32	2,32
78,80	81,50	2,70
80,20	82,93	2,73
80,30	82,96	2,66
79,70	83,05	3,35
81,50	84,24	2,74
83,10	85,83	2,73
83,40	87,88	4,48
85,00	87,97	2,97
87,00	90,60	3,60

Anhang 7: Rohdaten und Rechenwerte zur Mischertemperaturkalibrierung (AVS-Römer-NTC)

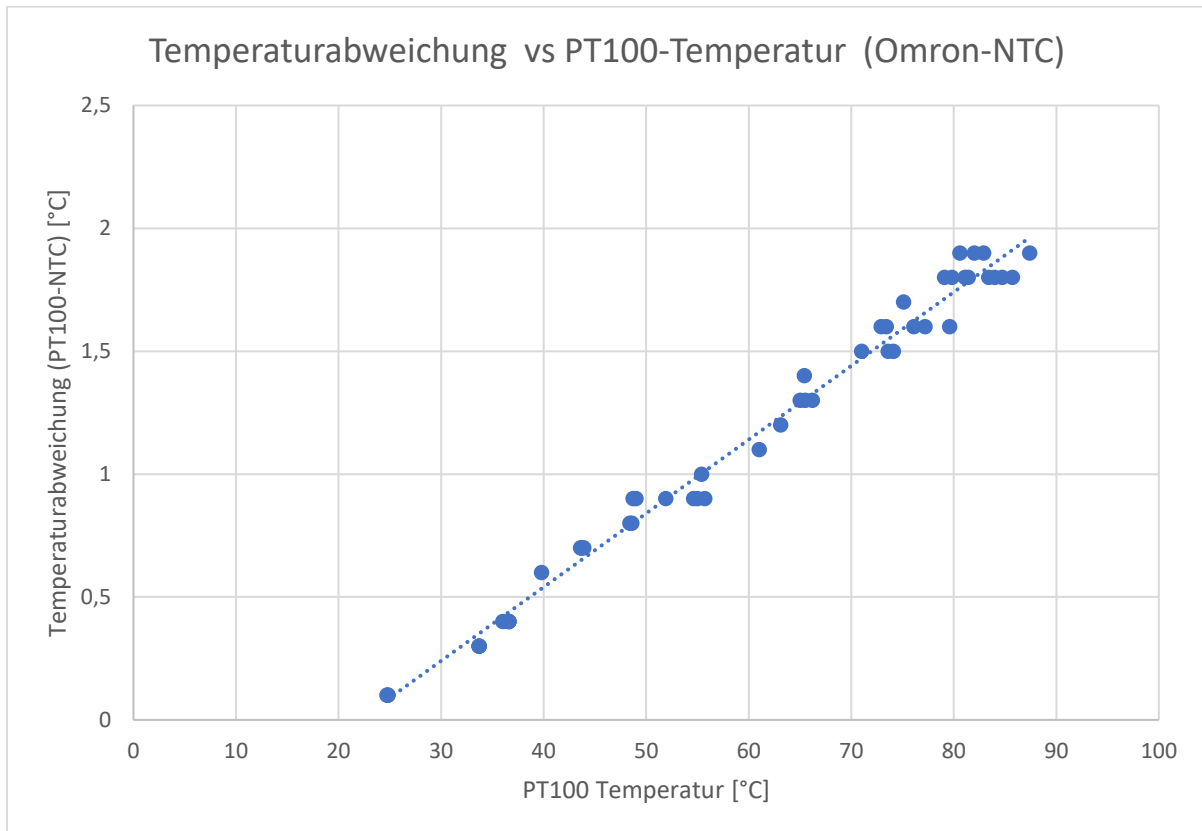


Anhang 8: Kennlinie (lineare Regression) der Temperaturabweichung des AVS-Römer-NTC

Rohdaten und Berechnungen zur Kesseltemperaturkalibrierung

Omron Temperatur [°C]	PT100-Temperatur [°C]	Deltatemperatur [°C]
24,6	24,7	0,1
24,7	24,8	0,1
24,7	24,8	0,1
33,4	33,7	0,3
33,4	33,7	0,3
33,4	33,7	0,3
35,6	36	0,4
36,2	36,6	0,4
36,2	36,6	0,4
36,2	36,6	0,4
39,2	39,8	0,6
42,9	43,6	0,7
43	43,7	0,7
43	43,7	0,7
43,2	43,9	0,7
47,6	48,4	0,8
47,8	48,6	0,8
47,8	48,7	0,9
48,1	49	0,9
51	51,9	0,9
53,7	54,6	0,9
54,1	55	0,9
54,4	55,4	1
54,8	55,7	0,9
59,9	61	1,1
61,9	63,1	1,2
63,7	65	1,3
64	65,4	1,4
64,2	65,5	1,3
64,9	66,2	1,3
69,5	71	1,5
71,3	72,9	1,6
71,8	73,4	1,6
72,1	73,6	1,5
72,6	74,1	1,5
73,4	75,1	1,7
74,5	76,1	1,6
75,6	77,2	1,6
77,3	79,1	1,8
78	79,6	1,6
78	79,8	1,8
78,7	80,6	1,9
79,3	81,1	1,8
79,6	81,4	1,8
80,1	82	1,9
81	82,9	1,9
81,6	83,4	1,8
82,2	84	1,8
82,9	84,7	1,8
83,9	85,7	1,8
85,5	87,4	1,9

Anhang 9: Rohdaten und Rechenwerte zur Kesseltemperaturkalibrierung (Omron-NTC)

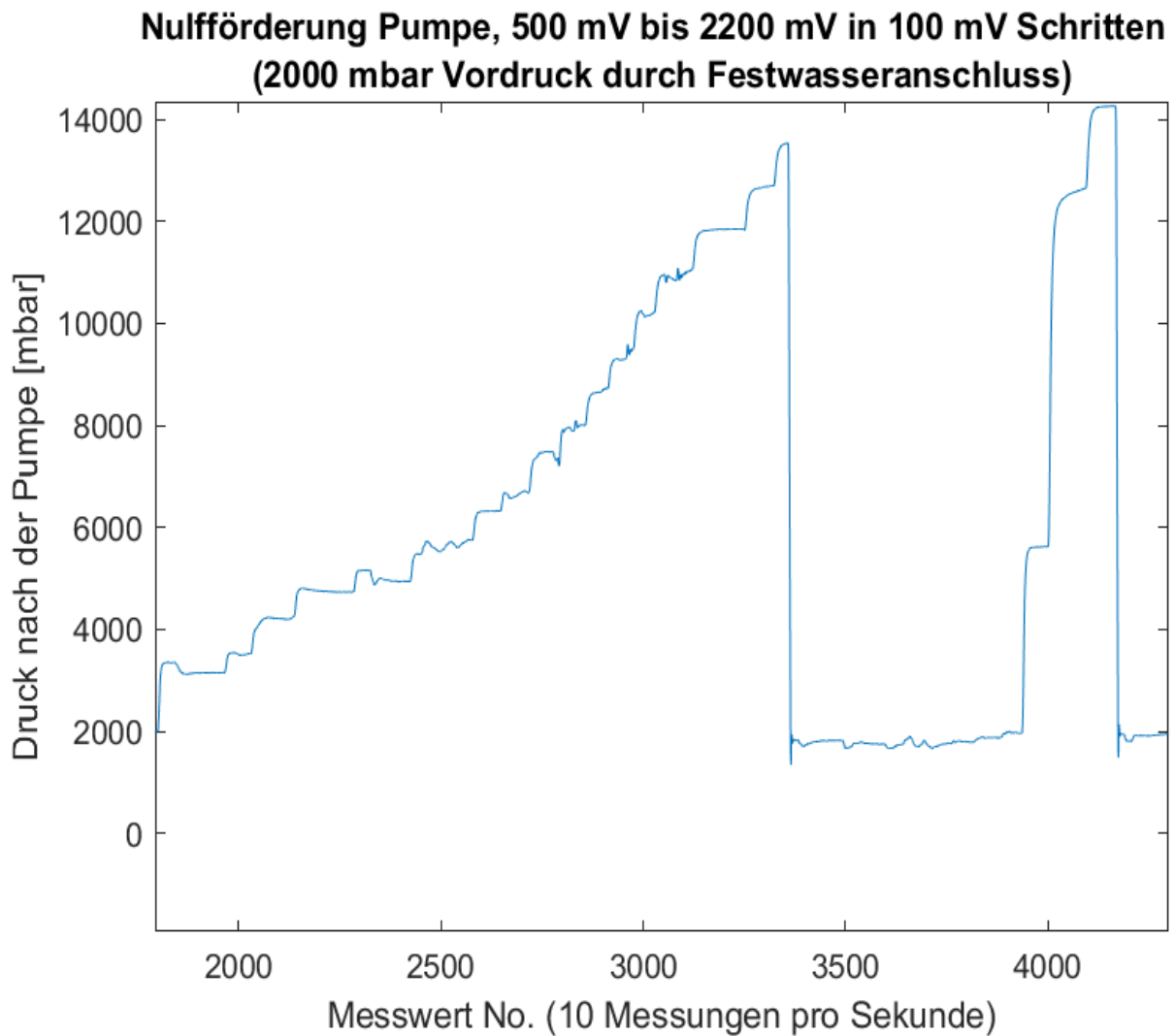


Anhang 10: Kennlinie (lineare Regression) der Temperaturabweichung des Omron-NTC

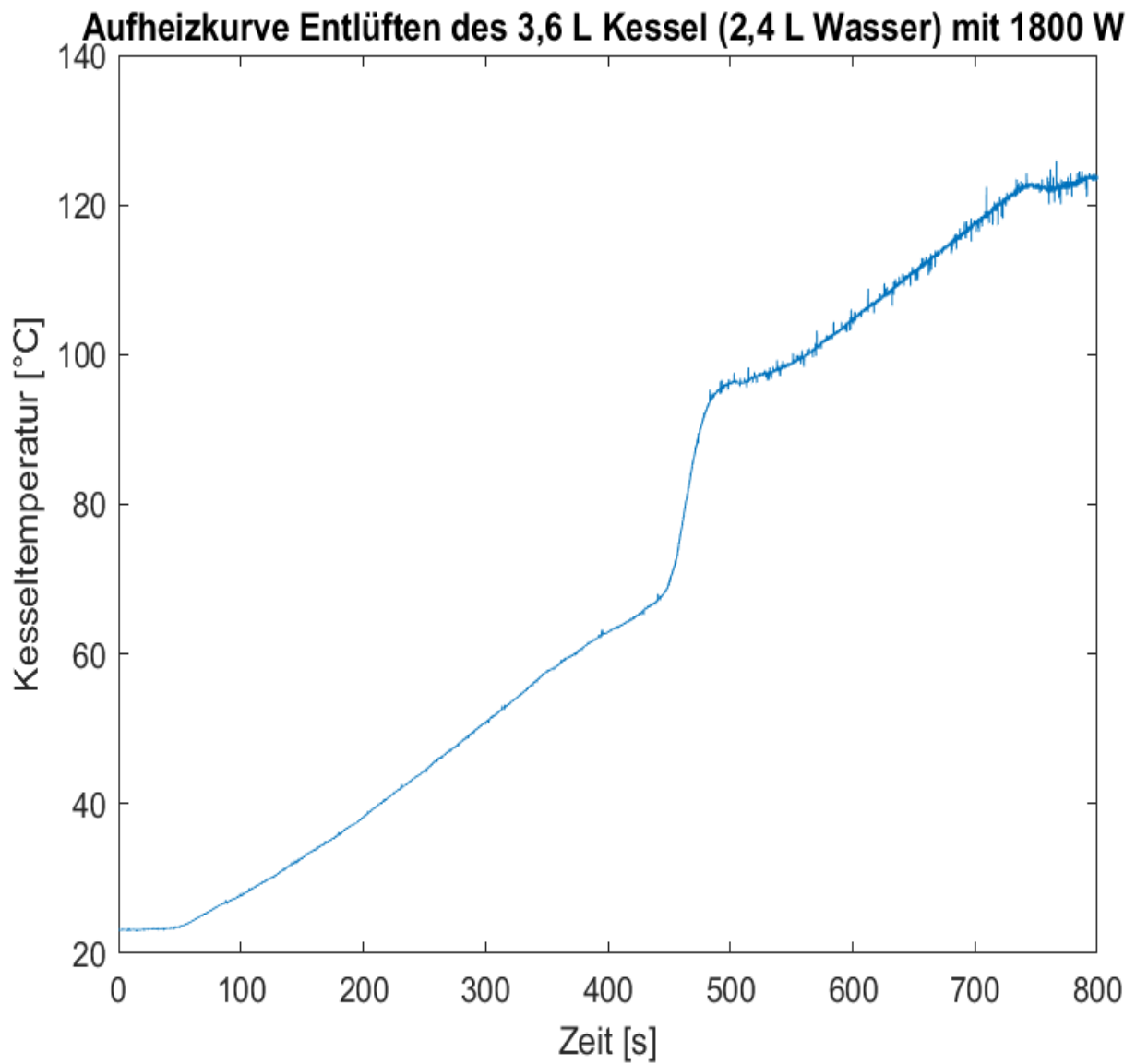
Vergleich selbst kalibrierte Sensoren vs. vorkalibrierter Leitwertsensor

Kesseltemperatur [°C]	Temperatur Leitwertsensor [°C]	Mischwassertemperatur [°C]	Temperatur Brühgruppen [°C]
31,9	30,4	31,3	31,2
56	51	54,2	53,4
76,8	69,1	75	73,8
94	84,2	92,2	90,7

Anhang 11: Rohdaten zur Überprüfung der Kalibrierung der NTCs. Wasser wurde aus dem Kessel gelassen und in die Brühgruppe gefördert. Dabei wurde immer gewartet, bis sich eine Beharrungstemperatur einstellt.

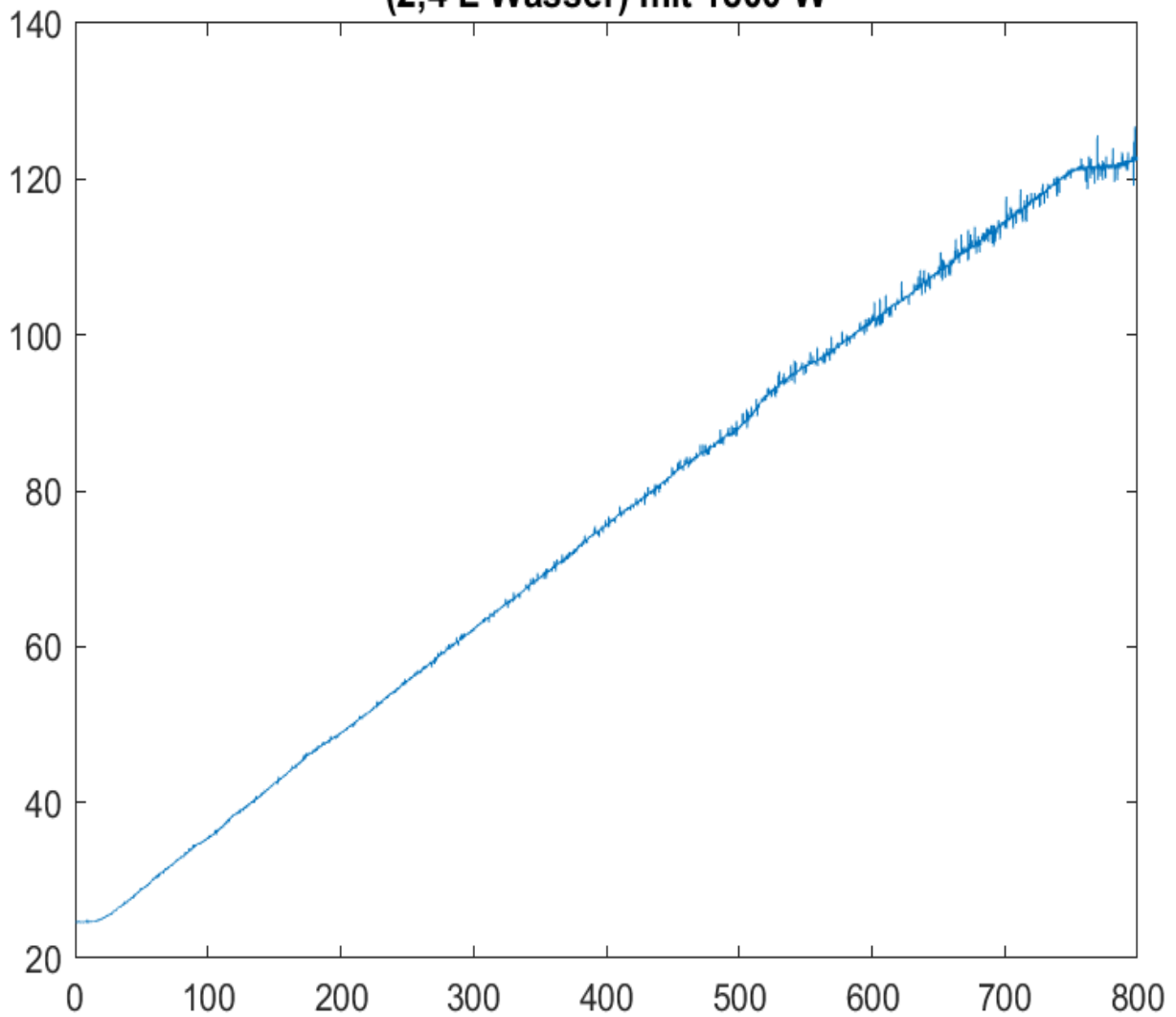


Anhang 12: Untersuchung des sich einstellenden Druck bei Nullförderung der Fluid-O-Tech FG304. Die erste Stufe entspricht einer Ansteuerspannung von 500 mV. Jede folgende Stufe +100 mV. Die letzte Stufe von 2200 mV wurde im zweiten Versuch erreicht. (Drucksensor nicht geeicht)

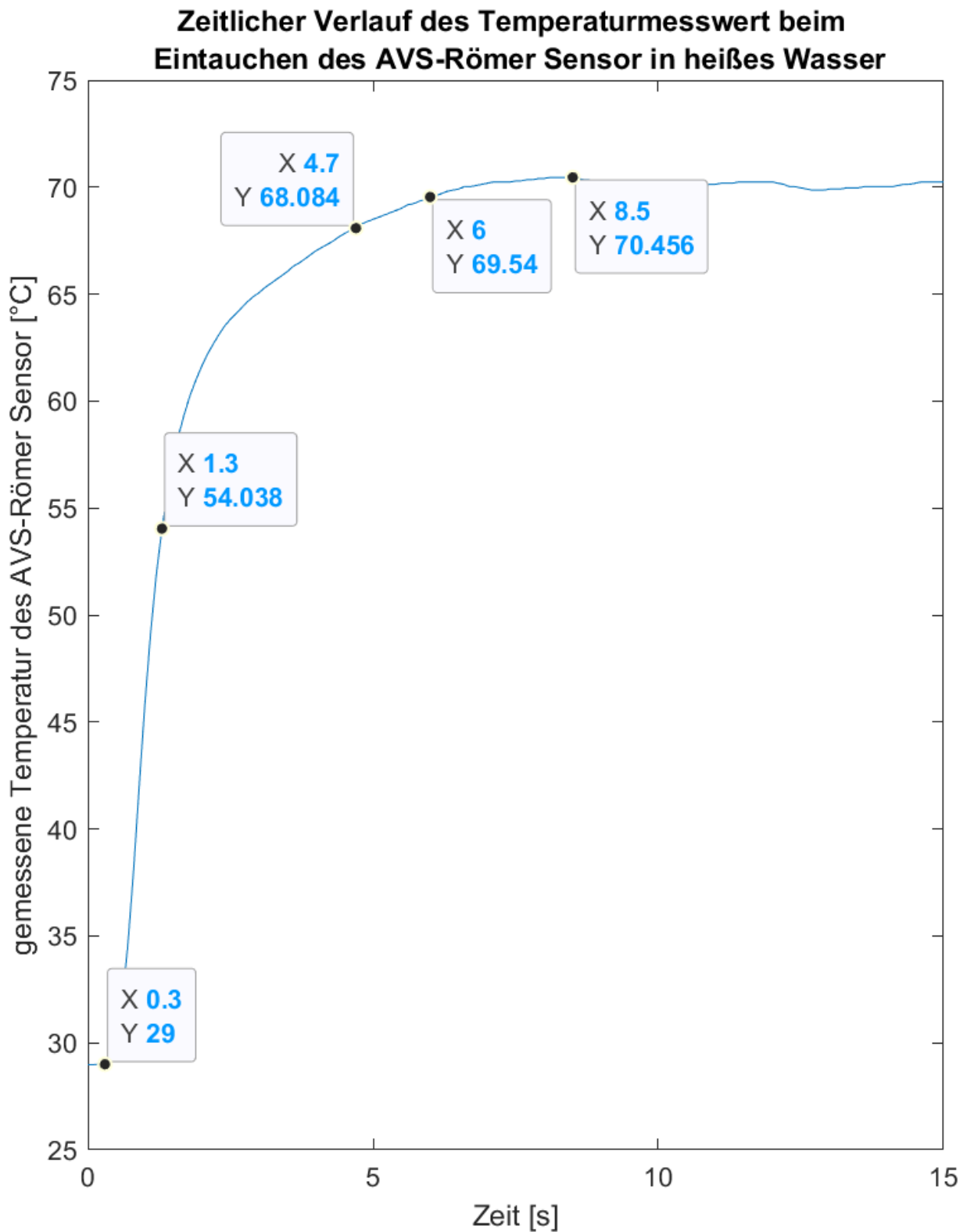


Anhang 13: Aufheizkurve der Labortechnischen Espressoemaschine im Entschichtungsmodus Entlüften

Aufheizkurve Umpumpen (15 ml/s) des 3,6 L Kessel (2,4 L Wasser) mit 1800 W



Anhang 14: Aufheizkurve der Labortechnischen Espressoemaschine im Entschichtungsmodus Umpumpen



Anhang 15: Untersuchung des Reaktionsverhalten des AVS-Römer Temperatursensors