



PROJEKTARBEIT
ENTWICKLUNG EINES KALIBRIERSYSTEM FÜR
DRUCK UND TEMPERATURSENSOREN

Verfasser		
Name	E-Mail	Matrikelnummer
Korbinian Ass	k.ass@hm.edu	29579118
Valentin Sachmann	vsachman@hm.edu	22472818
Simon Schmetz	schmetz@hm.edu	11497718

Studiengang: Luft- und Raumfahrttechnik (B.Sc.)
Studiengruppe: LRB-5
Projektbetreuer: Dipl.-Ing. Armin Rohnen, LbA
Abgabetermin: 28.02.2020

Abstract

Gegenstand dieser Projektarbeit ist die Entwicklung eines Prüfstandes und Prozesses zur Kalibrierung von Druck- und Temperatursensoren, sowie zugehöriger elektronischer Bauteile anhand von Referenzmesswerten. Da die zu kalibrierende Technik in Geräten des Projektes Espressomaschine des Verbundlabors für Fahrzeugtechnik, Akustik und Dynamik eingesetzt wird, wurde weitestgehend auf Komponenten zurückgegriffen, die bereits in vorherigen Teilen des Projektes verwendet wurden.

Subject of this thesis is the development of a calibration rig and calibration process to calibrate sensors and electronic equipment based on reference values, which are used for pressure and temperature measurement. Since the calibrated gear will be used in machinery of the so-called Project Espresso Machine by the Laboratory Association Automotive Engineering, Dynamics and Acoustics, components, that were already established in previous project thesis are used as much as possible.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
1 Verzeichnis der Formelzeichen.....	5
2 Verzeichnis der Abkürzungen.....	6
3 Einleitung.....	7
4 Kalibrierung durch Referenzsensoren	8
5 Kalibriersystem Grundstruktur	9
6 Hardware	10
6.1 Hydraulik	10
6.1.1 Wasserwechsel.....	10
6.1.2 Messstränge	12
6.1.2.1 Druckstrang.....	12
6.1.2.2 Temperaturstrang.....	14
6.1.3 Gesamtsystem Hydraulik.....	15
6.2 Boiler	16
6.2.1.1 Boileranschlüsse	16
6.2.1.2 Boilerisolierung.....	16
6.3 Integration der Sensoren	17
6.3.1 Berechnungsmodell.....	19
6.3.2 Resultat der Festigkeitsabschätzung.....	19
6.3.3 Konstruktive Umsetzung	20
6.4 Rahmenstruktur	21
Boilerintegration im Rahmen.....	22
6.4.1 Ventilstreben.....	23
6.4.2 Messbalkone	23
7 Elektrik.....	24
7.1 Funktionsprinzip Elektriksystem	24
7.2 Elektrikaufbaukonzept	27
7.2.1 Baugruppe Steuerung.....	27
7.2.2 Baugruppe Sensorik.....	27
7.2.3 Sonstige Module.....	28
7.3 Notauskonzept	28
7.4 Aktueller Stand der Elektrik	29

8	Software.....	29
8.1	MATLAB® Graphical User Interface (Benutzeroberfläche)	30
8.1.1	Startseite	30
8.1.2	Kalibriermodus	31
8.1.3	Wasserwechselmodus.....	32
8.1.4	Manueller Modus	33
8.1.5	Datenansicht	34
8.2	Regelung.....	35
8.2.1	Temperaturregelung	36
8.2.2	Druckregelung	37
8.2.3	Umsetzung	39
8.3	Datenverarbeitung.....	39
8.3.1	Datenbereitstellung.....	39
8.3.1.1	Raspberry Pi	40
8.3.1.2	NI-Messkarte.....	40
8.3.2	Datenübergabe.....	40
8.4	Kalibriervorgang	41
9	Testprogramm	42
10	Zusammenfassung und Ausblick	44
11	Abbildungsverzeichnis	46
12	Tabellenverzeichnis	46
13	Quellenverzeichnis	46
13.1	Literatur.....	46
13.2	Online	47
14	Anhang.....	48
14.1	Festigkeitsabschätzung	48
14.2	Hydraulikplan	55

1 Verzeichnis der Formelzeichen

Tabelle 1.1: Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	$[mm^2]$	Fläche
A_K	$[mm^2]$	Fläche der Kupplung
A_S	$[mm^2]$	Fläche des Sensors
A_r	$[mm^2]$	Fläche der Röhre
c	$[m/s]$	Strömungsgeschwindigkeit
D_A	$[mm]$	Außendurchmesser
D_i	$[mm]$	Innendurchmesser
D_m	$[mm]$	Mittlerer Durchmesser
F	$[N]$	Kraft
F_K	$[N]$	Kraft auf Kupplung
F_S	$[N]$	Kraft auf Sensor
p	$[bar], [Pa], \left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Druck
$p_{dynamisch}$	$[bar], [Pa], \left[\frac{N}{mm^2}\right]$	dynamischer Druck
$p_{statisch}$	$[bar], [Pa], \left[\frac{N}{mm^2}\right]$	statischer Druck
p_{total}	$[bar], [Pa], \left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Totaldruck
R	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Werkstofffestigkeit, allgemein
s	$[mm]$	Wandstärke
\dot{V}	$\left[\frac{l}{h}\right]$	Volumenstrom
π	$[-]$	Kreiszahl $\approx 3,14$

ρ	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Dichte
$\sigma_{A,Y}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Axialspannung in y-Richtung
$\sigma_{A,Z}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Axialspannung in z-Richtung
$\sigma_{max,I}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Summe der Spannung an Position 1
$\sigma_{max,II}$	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Summe der Spannung an Position 2
σ_p	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Tangentialspannung

2 Verzeichnis der Abkürzungen

AC	Wechselstrom
A/D-Wandler	Analog-Digital-Umsetzer
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa (aus dem Lateinischen „ungefähr“)
CSV	comma-separated values
DC	Gleichstrom
Dipl.-Ing.	Diplom Ingenieur
GUI	Graphical User Interface, grafische Benutzeroberfläche der Software
LbA	Lehrkraft für besondere Aufgaben
NI	National Instruments
NTC	engl. Negative Temperature Coefficient Thermistor, Heißleiter
PA12	Polyamid 12, thermoplastischer Kunststoff
PID-Regler	Regler mit Proportionalitäts, Integral und Derivat Anteil
PWM	Pulsweitenmodulation
SSR	Solid State Relais
USB	Universal Serial Bus
Vgl.	vergleiche

3 Einleitung



Das Verbundlabor für Fahrzeugtechnik, Akustik und Dynamik der Hochschule München hat insbesondere beim Nutzerkreis der Genießer und Kaffeeexperten einen speziellen Bedarf für Siebträger-Espressomaschinen ausgemacht. Bei diesen Maschinen wirken sich verschiedene Konstruktionsmerkmale auf Zubereitungsparameter wie Brühzeit, -temperatur oder Druck und dadurch auf den Geschmack aus. Da die Konstruktion für eine Maschine spezifisch ist, ist damit auch der Espressogeschmack einer Maschine typisch. An der Hochschule München entstand deshalb die Idee, Kaffeemaschinen zu entwickeln, bei welchen alle Zubereitungsparameter einstellbar sind. Dies ermöglicht den Maschinen einen nach Belieben beeinflussbaren Geschmack zu erzeugen. Zu diesem Zweck werden in die Maschinen unterschiedliche Sensoren und Messelektronik integriert.

Für die Reproduzierbarkeit des Geschmacks ist es nötig, Prozessparameter möglichst genau zu erfassen. Da jedoch Herstellungstoleranzen bei Sensoren und Elektronik desselben Typs zu einer Streuung der Messergebnisse führen, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um diese Abweichungen und die damit einhergehenden Schwankungen zwischen den individuellen Komponenten zu reduzieren. Aus dieser Problematik resultiert die Aufgabe dieser Projektarbeit, einen Prüfstand und Prüfprozess zur Kalibrierung der für das Forschungsprojekt der technischen Beeinflussbarkeit von Kaffee verwendeten Druck- und Temperatursensoren auf Basis der Referenzsensorkalibrierung zu entwickeln. Hierfür Als Grundlage hierfür wird ein Pumpenprüfstand genutzt, der unter anderem bei Messungen im Rahmen studentischer Praktika des Labors zum Einsatz kommt. Darüber hinaus werden neben der zu kalibrierenden Elektronik, soweit möglich Komponenten in dem Prüfstand verbaut, die bereits bei der Entwicklung der Kaffeemaschine verwendet werden. Hierzu zählen unter anderem Boiler für die Aufbereitung von Heißwasser mit zugehöriger Steuerungselektrik, Magnetventile und Halbleiterrelais (engl.: solid state relays), sowie ein Raspberry Pi 3B Einplatinencomputer.

Im Folgenden werden zunächst die Baugruppen Hydraulik, Elektrik, Rahmen und deren erläutert, die zusammen mit dem Projektbetreuer als Lösungsansatz für die Projektarbeit definiert wurden.

Darauf folgt eine Beschreibung von Software und des Graphical User Interfaces (GUI), die den späteren Nutzern die Bedienung des Prüfstandes durch MATLAB® erklärt und den Kalibrierprozess darlegt.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung des Projekts und ein Ausblick über weitere Entwicklungen oder Maßnahmen im Rahmen des Kalibrierungsprozesses.

4 Kalibrierung durch Referenzsensoren

Die Sensoren werden durch den Vergleich zwischen zu kalibrierendem und Referenzsensor kalibriert. Dieser Vergleich wird durchgeführt, in dem die Referenzsensoren und die zu kalibrierenden Sensoren über einen definierten Zeitraum derselben Prozessgröße ausgesetzt werden.

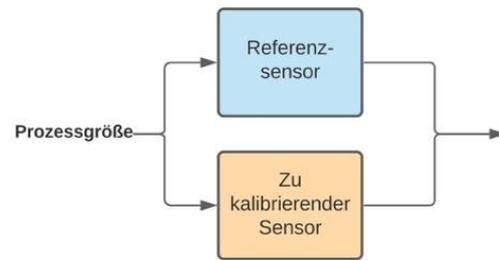


Abbildung 1: Prinzip Kalibrierung durch Referenzsensoren

Hierbei wird von beiden Sensoren abhängig von der Prozessgröße an den Drucksensoren eine elektrische Spannung und an den Temperatursensoren ein geänderter Widerstand abgegeben. Im Fall des Referenzsensors können diese gemessenen elektrischen Größen in eine Kennlinie eingesetzt werden, um die korrespondierende Prozessgröße auszulesen. Eine Sensorkennlinie beschreibt daher also für einen bestimmten Sensor den Zusammenhang von abgegebener elektrischer Größe und zugehöriger Prozessgröße wie Temperatur und Druck. Für die Referenzsensoren ist diese zu Beginn der Kalibrierung bereits mit großer Präzision bekannt und kann daher für die Bestimmung der zum Zeitpunkt herrschenden Prozessgröße verwendet werden.

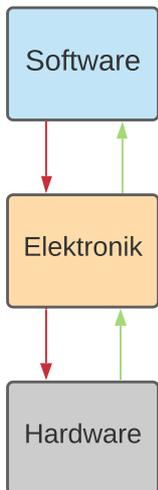
Ziel der Kalibrierung ist eine solche Kennlinie auch für die zu kalibrierenden Sensoren zu generieren. Da durch die Kennlinie der Referenzsensoren die aktuelle Prozessgröße, mit der zum gleichen Zeitpunkt vom zu kalibrierenden Sensor abgegebene elektrische Größe in Verbindungen gebracht werden kann, kann ein Wertepaar aus eben dieser Prozessgröße und elektrischer Größe erzeugt werden. Werden nun über einen definierten Messbereich wie eine Druck- oder Temperaturspanne verschiedenen Messpunkte mit Abständen nacheinander angefahren, lässt sich eine Datensatz aus Wertepaaren für den zu kalibrierenden Sensor erzeugen. Werden diese Wertepaare in ein Koordinatensystem der elektrischen Größe über der Prozessgröße eingetragen, lassen sich daraus Wegpunkte einer Kurve erkennen. Mittels Interpolation kann nun aus diesen Wertepaaren eine Definitionslückenlose Sensorkennlinie für den zu kalibrierende Sensor erzeugt werden.

Diese Kennlinie kann im Anschluss in die Verwendungsstelle des entsprechenden Sensors integriert werden und ermöglicht so das Erfassen der Prozessgrößen durch den kalibrierten Sensor auf Basis der abgegebenen elektrischen Größen.

Das Erfassen der elektrischen Größen geschieht durch die Sensoren mit zugehörigen Messplatinen. Da diese Messplatinen als Elektronikbauteile genauso wie die Sensoren gewissen Schwankungen innerhalb der Fertigungstoleranzen ausgesetzt sind, ist im Kalibrierprozess zu beachten, einen Sensor jeweils mit der für diesen Sensor designierten Messplatine zusammen zu kalibrieren. Die Kalibrierung gilt somit ausschließlich für die jeweilige Sensor und Platine Kombination.

5 Kalibriersystem Grundstruktur

Um den beschriebenen Kalibriervorgang realisieren zu können, wurde ein Kalibrierstand entwickelt, der sich in die drei Untergruppen Software, Elektrik und Hardware untergliedern lässt.



Die Software stellt hierbei als Systemsteuerungs- und Auswertungszentrale die Interaktionsebene für die Kalibrierenden dar. Die von der Software erzeugten Systemsteuerungsanweisungen werden an die Elektrik übergeben, um von dort das Hydrauliksystem bzw. die Hardware anzusprechen. Das Hydrauliksystem ist hierbei für die Realisierung der gewünschten Prozessgrößen an den Sensoren verantwortlich. Die Hardware wurde darüber hinaus durch ein Aufbausystem an ein Gerüst angebracht. Die aus den Systemsteuerungsanweisungen resultierenden Änderungen der Zustandsgrößen im Hydrauliksystem werden wiederum von der Messelektronik an den Sensoren in der Hardware ausgelesen und an die Software übergeben, um dort zur Sensorkennlinie verarbeitet zu werden.

Abbildung 2:
Grundstruktur Kalibriersystem

Die einzelnen Komponenten der Untergruppen Software, Elektronik und Hardware werden im Folgenden beginnend mit der Hydraulik erläutert.

6 Hardware

Die Hardware des Kalibriersystems unterteilt sich in die Untergruppen des Hydrauliksystems, der Boiler Hardware, der konstruktiven Integration der Sensoren in das Hydrauliksystem und die Rahmenstruktur des Prüfstandes. Das Hydrauliksystem wurde hierbei mit zwei separaten Messsträngen für Druck und Temperatur, sowie mit zwei Ventilen für das externe Ansaugen und Entleeren realisiert. In dieses System wurde der Boiler durch die entsprechenden Anschlüsse, Sensoren und eine Isolierung ergänzt und eingebunden. Für die Sensoren wurden darüber hinaus Gehäuse konstruiert, um diese ebenso an die Hydraulik anzuschließen. Das daraus resultierende Hydrauliksystem wurde mittels Vierkantprofilen in eine Würfelstruktur mit Balkonen für die Messstrecken gebracht. Die folgenden Kapitel erläutern diese Umsetzung im Detail.

6.1 Hydraulik

Wie in Kapitel Kalibriersystem Grundstruktur beschrieben, werden durch die Hydraulik die gewünschten Bedingungen an den Sensoren hergestellt.

Die Temperatursensoren müssen für ihren späteren Einsatz in einem Temperaturbereich von Raumtemperatur bis ca. 90[°C] kalibriert werden. Das hierfür nötige Warmwasser wird mit einem Boiler aufbereitet, der in ähnlicher Bauform in den Espressomaschinen integriert wird.

Da der Betriebsdruck in den späteren Maschinen bei bis zu 9 [bar] liegt, müssen die Drucksensoren in einem Bereich von Atmosphärendruck bis ca. 10 [bar] kalibriert werden. Dazu wird der Volumenstrom im Prüfstand gezielt mit einem einstellbaren Drosselventil reguliert und verschiedene Druckniveaus im Betriebsbereich zur Erfassung einer Kennlinie erzeugt.

Der Volumenstrom im Prüfstand wird durch eine Flügelzellenpumpe erzeugt, die über eine verschiebbliche Kardanwelle mit einem Elektromotor angetrieben wird. Über diese Pumpe und zusätzlicher Ventile kann dem Kreislauf außerdem Wasser zugeführt oder abgelassen werden.

6.1.1 Wasserwechsel

Um die gewünschten Bedingungen an den Sensoren herzustellen wird demineralisiertes Wasser genutzt. Um den Prüfstand mit diesem befüllen zu können, oder wenn nicht mehr gebraucht, entleeren zu können, muss das hydraulische System entsprechend gestaltet werden. In vorangegangenen Versuchen anderer Projekt- und Abschlussarbeiten hat sich dabei die Befüllung und Entleerung durch Öffnungen im Boiler nur unter dem Einfluss der Schwerkraft als zu zeitintensiv herausgestellt. Aus diesem Grund erfolgt die Versorgung des Prüfstandes mit Wasser durch eine Pumpe. Tests im Labor haben ergeben, dass die Pumpe des bestehenden Prüfstandes ohne Probleme in der Lage ist, Flüssigkeiten von Fußbodenniveau bis auf

Tischhöhe (ca. 1m) zu saugen. Somit wurde das untenstehende Wasserwechselsystem mit der Prüfstandpumpe als Kernstück vorgesehen.

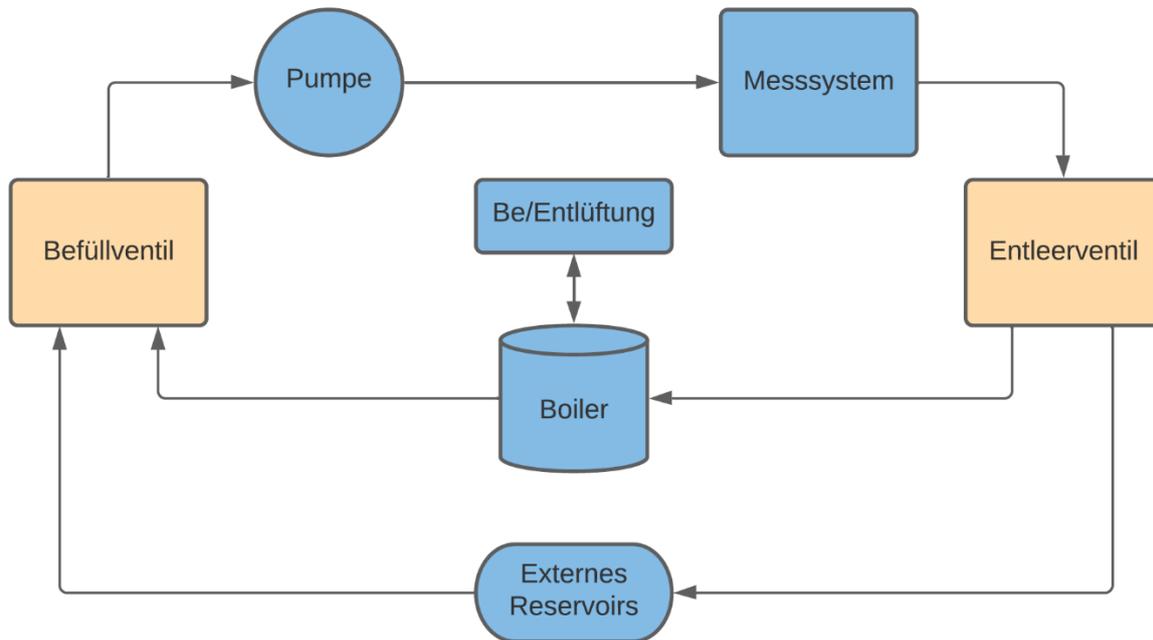


Abbildung 3: Schema des Schaltungsteiles zur Befüllung und Entleerung des Prüfstandes

Auf der Saugseite der Pumpe ist ein 3/2-Wegeventil als Befüllventil integriert. Mit diesem kann ausgewählt werden, ob aus einem externen Vorrat Wasser in das System gepumpt wird, oder aus dem internen Boiler gesaugt wird. Analog dazu wurde ebenfalls ein 3/2-Wegeventil in der Rücklaufleitung kurz vor dem Boiler platziert. Mit diesem kann die Entleerung des Prüfstandes in ein Gefäß oder das Fördern zurück in den Boiler gesteuert werden. Diese Konfiguration erlaubt nicht nur den Wasserwechsel und Betrieb im geschlossenen Kreislauf über den Boiler, sondern auch eine kontinuierliche Versorgung von außerhalb. So ist eine Spülung oder die Durchführung eines Praktikums im Rahmen von Lehrveranstaltungen für Schwingungsanalyse ohne großen Aufwand möglich.

Ein 2/2-Wegeventil an der Oberseite des Boilers dient bei der Füllung oder dem Ablassen als Ent- bzw. Belüftung. Luft kann über das Ventil aus dem Hydraulikkreis verdrängt oder nachströmen, ohne die Sicherheitsventile des Boilers zu betätigen.

Das 3/2-Wegeventil kann unter gewissen Umständen Probleme bereiten, da nicht alle Anschlüsse druckdicht schließen (hier wäre eigentlich ein Verweis auf Moodle nötig). Deshalb muss im weiteren Projektverlauf die Eignung des verwendeten Ventils insbesondere als Befüllventil erprobt werden. Eine Alternative Schaltung mit 2/2 Wegeventilen wurde in Plan MMM5-000-000-02 (Anhang 12.2) beigefügt.



6.1.2 Messstränge

Für die Druckregulierung im Kreislauf wird ein elektronisch vorgesteuertes Dosierventil der AVS Römer GmbH & Co. KG wiederverwendet. Die Verwendung dieser Drossel ist allerdings aufgrund der internen Elektronik nur bis zu einer Wassertemperatur von 80[°C] möglich. Für die Kalibrierung der Sensoren werden jedoch höhere Temperaturen benötigt, weshalb Druck- und Temperatursensoren in unterschiedlichen Strängen untergebracht wurden, zwischen denen mit einem 3/2-Wegeventil umgeschaltet werden kann. Hierdurch kann der Betrieb der Drossel mit zu heißem Wasser vermeiden werden.

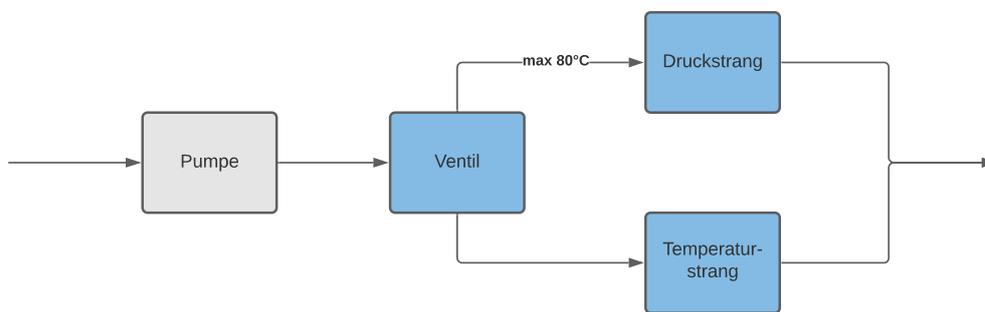


Abbildung 4: Schema der Messstränge

6.1.2.1 Druckstrang

Für die Erzeugung der verschiedenen Druckniveaus wird der Volumenstrom der Pumpe durch ein elektronisch vorgesteuertes Dosierventil gedrosselt.

Zur Bestimmung des Referenzdruckes werden Sensoren verwendet, die sich in ihrer Bauform von den Druckgebern unterscheiden, die kalibriert werden müssen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Bauform und dadurch auch der andere Strömungsquerschnitt an den Messstellen Einfluss auf das Messergebnis nehmen. Die Problematik wird ersichtlich, wenn man die Zusammensetzung des Gesamtdruckes betrachtet, der sich bei Systemen mit vernachlässigbaren Höhendifferenzen, aus dem statischen und dynamischen Druck ergibt und die Gesamtenergie bezüglich des Druckes widerspiegelt:

$$p_{total} = p_{statisch} + p_{dynamisch} \quad (6.1)$$

nach $p_{statisch}$ auflösen

$$p_{statisch} = p_{total} - p_{dynamisch} \quad (6.2)$$

mit der Gleichung für den dynamischen Druck

$$p_{dynamisch} = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \quad (6.3)$$

Und bei einem konstantem Volumenstrom \dot{V}

$$\dot{V} = A \cdot c \quad (6.4)$$

erhält man für die Strömungsgeschwindigkeit

$$c = \frac{\dot{V}}{A} \quad (6.5)$$

Einsetzen in $p_{dynamisch}$ und in $p_{statisch}$ liefert

$$p_{statisch} = p_{total} - \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{A}\right)^2 \quad (6.6)$$

Durch den Zusammenhang (6.5) wird deutlich, dass sich unterschiedliche Geometrien auf die Strömungsgeschwindigkeit und über den dynamischen Druck (6.3) auf die Messung des statischen Druckes auswirken (6.6).

Deshalb wurde der Druckstrang so gestaltet, dass die Drucksensoren in einem Abzweig platziert werden, in welchem die Strömung gestaut werden kann und durch das ruhende Medium ($c = 0$ bzw. $\dot{V} = 0$) der Einfluss der unterschiedlichen Geometrien eliminiert wird. Durch das Stauen der Strömung können zudem Druckverluste vermieden werden. Diese würden sonst durch Rohrreibung und Einbauverlusten an Bögen und Kanten mit Diffusor- oder Düsenwirkung weitere Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung verursachen (vgl. Hakenesch, 2014, S.216).

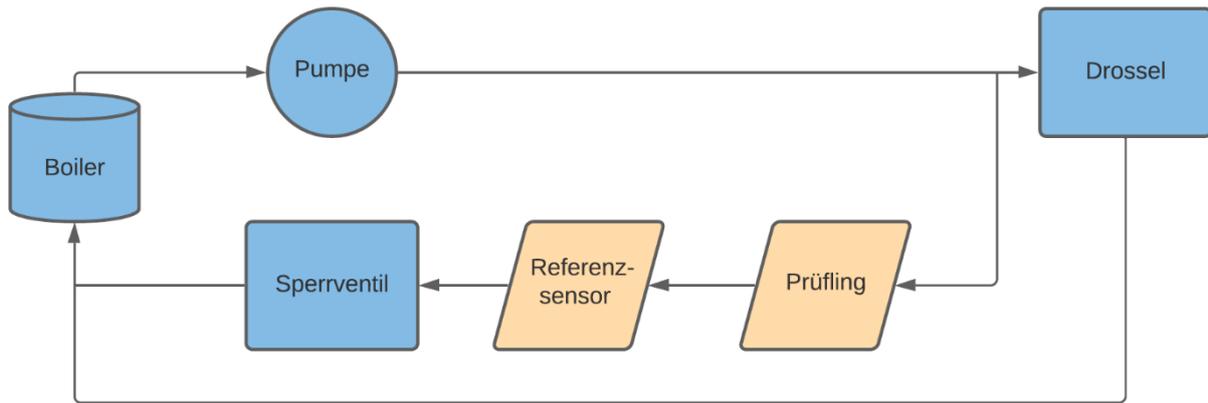


Abbildung 5: Schema des Druckstranges

Obwohl bei der Kalibrierung keine Durchströmung benötigt wird, ist der Abzweig über ein Sperrventil am Ende spülbar. Das Spülen ermöglicht, nach dem Einbau eines neuen Prüflings die Entlüftung des Abzweiges. Auf diese Weise werden schwingende Luftsäulen, die von der Pumpe angeregt werden und zu Druckspitzen in der Nähe der Sensoren führen können, vermieden.

Das Ventil zum Sperren des Abzweiges hinter den Sensoren wurde als 2/2-Wegeventil mit offener Ruhestellung gewählt, um zu gewährleisten, dass bei einer störungsbedingten Abschaltung des Prüfstandes durch das zurückfallen der Strangweiche in Ruhestellung bei einer völlig geschlossenen Drossel kein Überdruck im Druckstrang eingesperrt wird.

Da sich die Beschaffung des bevorzugten 2/2-Ventils im Laufe des Projektes allerdings schwierig gestaltet, wird für den ersten Aufbau eine manuelle Alternative verwendet.

6.1.2.2 Temperaturstrang

Wie zu Beginn des Kapitels Messtränge beschrieben, werden die Temperatursensoren in einem separaten Strang untergebracht. Hierdurch kann der Kontakt der elektronischen Drossel im Druckstrang mit zu heißem Wasser vermieden werden.

Bei der Gestaltung des Temperaturstranges wird zunächst angenommen, dass durch überwiegende Verwendung von Kunststoffteilen der Temperaturverlust durch freie Konvektion vernachlässigbar gering bleibt. So ist die Umsetzung des Stranges als einfache Reihenschaltung von Referenzsensor und zu kalibrierenden Sensor möglich. Die geringen Temperaturverluste, die in Realität dennoch auftreten, können durch ständige Zirkulation des Wassers und Energiezufuhr über den Boiler kompensiert werden.

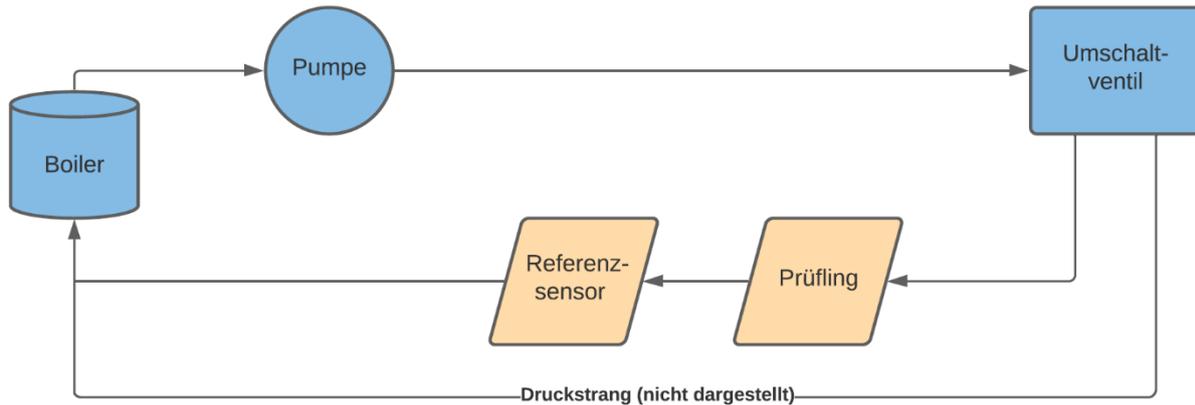


Abbildung 6: Schema des Temperaturstranges

6.1.3 Gesamtsystem Hydraulik

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Teilfunktionen lässt sich das hydraulische Gesamtsystem des Prüfstandes ableiten. Im rechten Teil der Abbildung (Abb. 7) finden sich hierbei die Komponenten des Wasserwechsels. Analog dazu finden sich im linken Teil die für die Kalibrierung verwendete Messstränge für Temperatur und Druck mit dem Umschaltventil als Verstellmöglichkeit.

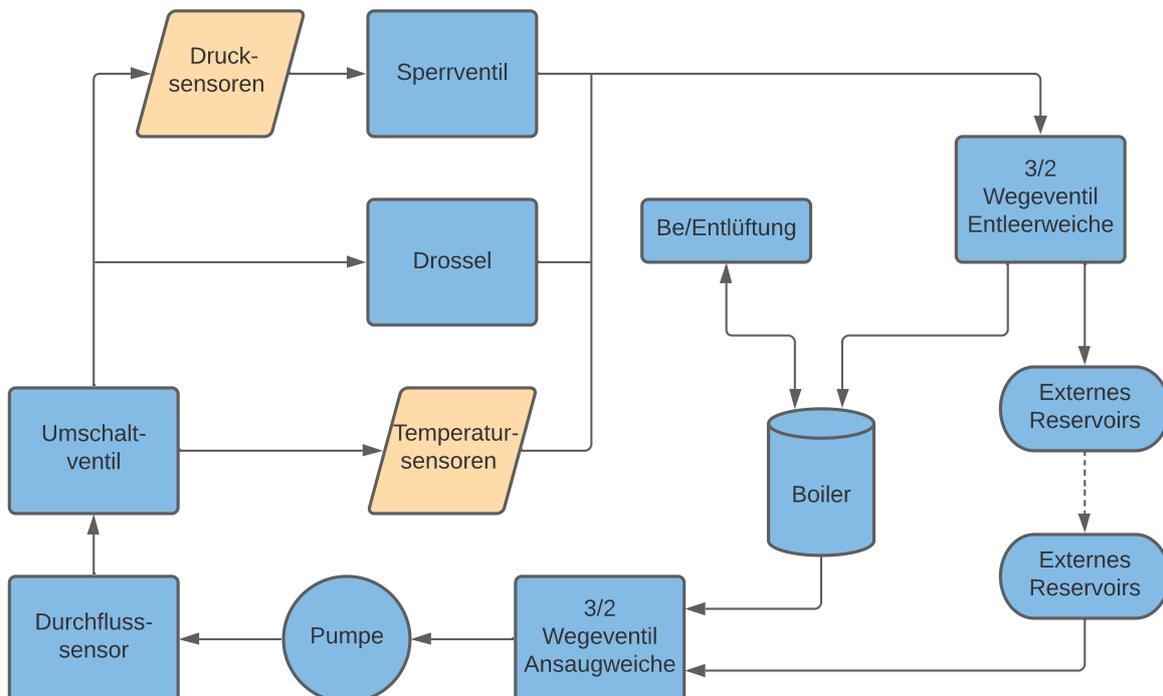


Abbildung 7: Gesamtsystem Hydraulik

Die Kombination der Funktionen Wasserwechsel und Messstrangwahl ermöglicht so geringe Rüst- und Nebenzeiten des Prüfstandes im Kalibrierprozess bei gleichzeitig hoher Flexibilität. Das System kann darüber hinaus bei Bedarf um Komponenten wie weitere Prüflinge ergänzt

werden. Es bietet so eine Grundlage, für die im Verlauf des Projekts der technischen Beeinflussbarkeit von Kaffee für die Kalibrierung zusätzlich entstehenden Anforderungen. Der Hydraulikplan genaue **MMM5-000-000-02 des Aufbaus ist im Anhang 12.2** zu finden.



6.2 Boiler

Der Boiler stellt als Tank den zentralen Knotenpunkt des Hydrauliksystems dar und ist darüber hinaus für den Wärmeeintrag in das System verantwortlich. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden verfügt er über eine Anzahl von Sensorik und Hardwareelementen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

6.2.1.1 Boileranschlüsse

Anmerkung Vorabgabe: hier werden bis zur finalen Abgabe Bilder der Ober- und Unterseite des Boilers ergänzt und beschriftet. Anhand der Ergänzungen wird der Abschnitt entsprechend noch umformuliert.

Die am Boiler angeschlossenen Elemente lassen sich in die Untergruppen der Sensorik und der Hydraulikkomponenten unterteilen.

Im Rahmen der Hydraulik wurde der Anschluss für die Belüftung mit Hilfe eines Adapters von M12 auf G1/8 realisiert, der das Anschließen einer metallischen Schlauchklemme ermöglicht. Auf Grund von Temperaturbeständigkeit wurde sich hierbei für die metallische Schlauchklemme und gegen einen Schnellverschluss aus Kunststoff entschieden. Darüber hinaus befindet sich im Kreismittelpunkt des Boilers der Anschluss für die Wasserrückführung des Hydrauliksystems. Um den Boiler vor unerwünschten Druckzuständen zu schützen sind auf der Oberseite Über- und Unterdruckventile angebracht. Diese werden ergänzt durch einen Druck-, einen Temperatur- und einen Füllstandssensor zur Erfassung der Prozessgrößen im Boiler

Analog zur Belüftungsleitung wurde für den Boiler Ablauf auf der Unterseite aus Gründen der Temperaturbeständigkeit eine Schlauchklemme aus Metall gewählt. Darüber hinaus ist auf der Unterseite ein automatischer Überhitzungsschutz integriert.

6.2.1.2 Boilerisolierung

Um die Abwärme aus dem Hydrauliksystems zu verringern und gleichzeitig das Berühren der heißen Boileroberfläche durch Bedienende des Kalibrierstandes zu verhindern, wurde an den Boiler eine Isolierung auf Basis des Selbstklebenden Isoliermaterials Armaflex® XG-99/EA angebracht.

Hierzu wurden zwei Ringe aus dem Isoliermaterial jeweils unten und oben mit dem um den Boiler gelegten Hauptring des Isoliermaterials durch eine Klebung verbunden. Die an beiden

Enden auf Scherung belastete Klebungen stabilisieren so den Hauptisolerring. Hierbei wurden die Ringe an den Enden jeweils aus dem Vollen geschnitten und erfordern daher keine Klebung.

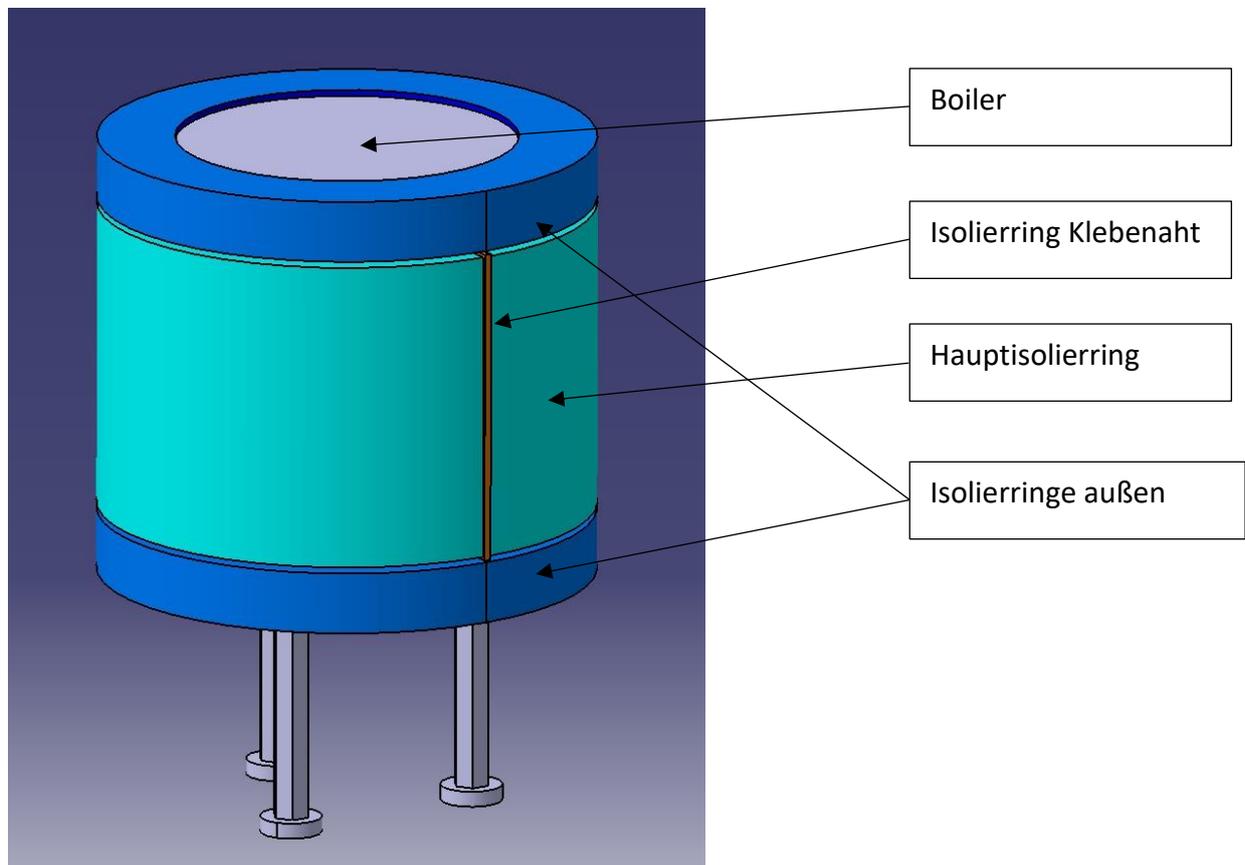


Abbildung 8: Boiler mit Isolierung

6.3 Integration der Sensoren

Am Prüfstand müssen verschiedene Sensoren an das Hydrauliksystem angeschlossen werden, die der Übersicht in Tabelle 6.1 entnommen werden können. Nur ein Teil dieser Sensoren ist mit dem Schnellkupplungssystem ausgestattet, welches mit dem im Projekt verwendeten Kunststoffschlauch mit Außendurchmesser 6[mm] kompatibel ist. Deswegen werden für die Integration von Sensoren mit Gewinden als Schnittstelle Gehäuse genutzt. Diese Gehäuse weisen einerseits einen Anschlussmöglichkeit für den Sensor auf, andererseits ermöglichen sie über Adapter den Anschluss der Schläuche. Die Vorgehensweise, um die Festigkeit für diese Bauteile abzuschätzen, wird im Folgenden erläutert. Ziel dabei ist es, zu prüfen, ob die Gehäuse als Kunststoffteile mittels 3D-Druckverfahren hergestellt werden können. Hierbei spielen einerseits die leichte Beschaffbarkeit durch eine Vielzahl von Dienstleistern, andererseits die guten isolierenden Eigenschaften von Kunststoffteilen eine ausschlaggebende Rolle.

Anmerkung: Muss noch aktualisiert werden

Tabelle 6.2: Sensorübersicht

Hersteller	Bezeichnung	Prozessgröße	mechanische Schnittstelle	Verwendung
a) Referenzsensoren und Steuerung				
B+B	0627 0495 / Pt1000	Temperatur	G1/8"	Referenzwert für Kalibrierung
B+B	0550 1192007 / Drucktransmitter	Druck	G1/4"	Referenzwert für Kalibrierung
Sensorshop24.de	Einschraubtemperaturfühler 100mm	Temperatur	G1/4"	Überwachung der Boilertemperatur
b) Prüflinge				
AVS-Römer	IPS-958P3-6FF-04-S8 / Drucksensor	Druck	Schnellkupplung AD 6mm	Prüfling für Espressomaschinen
AVS-Römer	ITS-955P3-6PF-X04-NTC10-S85	Temperatur	Schnellkupplung AD 6mm	Prüfling für Espressomaschinen
AVS-Römer	ITS-958P3-6PF-NTC10	Temperatur	Schnellkupplung AD 6mm	Prüfling für Espressomaschinen
Sensorshop24.de	Einschraubtemperaturfühler 50mm	Temperatur	G1/4"	Prüfling für Espressomaschinen
	Drucksensor	Druck	M6	Prüfling Messsystem
	Drucksensor Kunststoff	Druck	M6	Prüfling Messsystem
	NTC-Sensor	Temperatur	M6	Prüfling Messsystem

6.3.1 Berechnungsmodell

Um einen geeigneten Werkstoff für die Gehäuse finden zu können, müssen Aussagen über die auftretenden Lasten getroffen werden. Besonders zu beachten gilt es dabei, dass diese Gehäuse nicht nur die mechanischen Lasten ertragen müssen, sondern dabei von Wasser durchströmt werden, das Temperaturen von bis zu 90[°C] aufweisen und Einfluss auf die Werkstoffkennwerte nehmen kann.

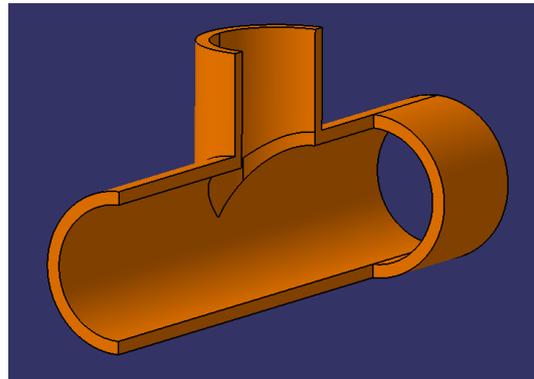


Abbildung 9: Modell der dünnwandigen Rohre

Es wird angenommen, dass die Lasten, die aus dem Innendruck in den Leitungen resultieren, von dünnwandigen Rohren getragen werden. Diese Betrachtung erlaubt eine Abschätzung der auftretenden Kräfte mit Hilfe der Kesselformel (vgl. Gross et al., 2017, S.56f).

Zusätzlich zu den Lasten in den Umfangsrichtungen verursacht der Druck auch Kräfte in die axialen Richtungen. Er wirkt an den Enden der Röhren auch auf die Flächen der Sensoren und Kupplungsadapter, die dort eingeschraubt werden.

Für die Festigkeitsabschätzung wird dann die kritische Stelle am Modell gesucht. Der Querschnitt, bei dem die geometrisch addierten Kräfte bezogen auf die dortige Fläche die betragsmäßig größte Spannung verursachen.

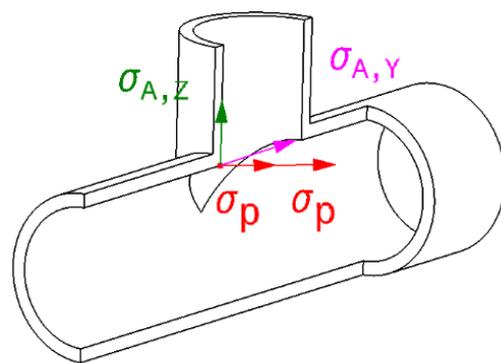


Abbildung 10: Spannungen am kritischen Querschnitt

Die daraus resultierende Spannung wird anschließend mit dem Sicherheitsfaktor zwei multipliziert, der im Armaturenbau bei wechselnden Belastungen und variierenden äußeren Einflüssen anzuwenden ist (vgl. Wagner, 2018, S.160).

Hieraus ergibt sich die Spannung, welche ein Werkstoff bei den vorherrschenden Temperaturen mindestens ertragen muss.

6.3.2 Resultat der Festigkeitsabschätzung

Die Ausführliche Berechnung wurde als Anhang 12.1 angefügt. An dieser Stelle werden nur die individuellen Bedingungen und Ergebnisse nach dem zuvor beschriebenen Modell zusammengefasst.

Bei der Kalibrierung von Drucksensoren treten Drücke bis zu 10 [bar] auf, die unter Einbezug der Sicherheit eine Festigkeit in der Größenordnung von 20 [N/mm²] erfordern. Darüber hinaus ist zunächst vorgesehen, die Druckkalibrierung nur durch die maximal zulässige Wassertemperatur der Drossel von 80[°C] zu beschränken.

Unter diesen Bedingungen konnte kein Kunststoff mit ausreichender Festigkeit gefunden werden, der in angemessenem preislichem Rahmen und zeitnah verfügbar ist. Darum werden Gehäuse für Drucksensoren zugekauft oder aus metallischem Werkstoff gefertigt.

Bei der Temperaturkalibrierung werden Temperaturen von 90[°C] erreicht. Über den Druck, der sich bei einem Volumenstrom einstellt, der eine konstante Temperatur an den Sensoren ermöglicht, lässt sich zunächst keine genaue Aussage treffen. Mit den zurzeit frei zugänglichen Informationen lässt sich jedoch abschätzen, dass der im 3D-Druck verfügbare Kunststoff Polyamid 12 (PA12) im oberen Temperaturspektrum bereits bei geringem Druck von 2 [bar] (resultierende Spannung mit Sicherheit ≈ 4 [N/mm²]) Dehnungen aufweist, die deutlich über den Dehnungen von Metallen (vgl. campusplastic.com) liegen.

Aus diesem Grund und da sich für die Geometrien der Temperatursensoren keine sicher passenden Gehäuse zukaufen lassen, werden auch die Gehäuse für die Temperaturegeber aus Metall gefertigt. Die hohe Wärmeleitfähigkeit wird hier zu Gunsten der Sicherheit in Kauf genommen. Im anfänglichen Betrieb können dann mit Hilfe der Metallgehäuse Druckmessungen bei der Temperaturkalibrierung durchgeführt werden. Mit diesen Ergebnissen und spezifischeren Werkstoffkennwerten können dann Alternativen aus Kunststoff gesucht werden, welche durch ihre isolierenden Eigenschaften das Kalibrieren erleichtern.

6.3.3 Konstruktive Umsetzung

Für den Referenzdrucksensor konnte ein passendes T-Stück von AVS-Römer bestellt werden. Der Sensor wird darin mit Flüssigdichtmasse verschraubt und kann durch die Schnellkupplungen am Adapter einfach mit dem Schlauchsystem verbunden werden.

Für den Referenztemperatursensor wurde ein einfaches Gehäuse aus Edelstahl konstruiert. Der Sensor wird wieder mit Flüssigdichtmittel darin verschraubt. Seitlich eingeschraubt werden ebenfalls Schnellkupplungen von den AVS-Römer mit G1/8" Gewinden. Nuten an der Oberseite sollen die Montage des Gehäuses am Rahmen des Tiefstandes mit Kabelbindern ermöglichen und einen sicheren Halt gewährleisten.

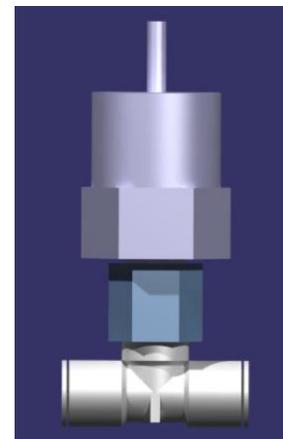


Abbildung 11: Drucksensor in T-Stück

Zur Kalibrierung der Einschraubfühler mit einer Länge von 50 [mm] wurde ein Gehäuse vorgesehen, in das das Wasser stirnseitig eintritt und im rechten Winkel dazu wieder austritt. Diese Geometrie verbessert die Umströmung des Fühlers, sorgt für eine gleichmäßige Erwärmung und verhindert das Absetzen großer Luftmengen, die die Prüfung negativ beeinflussen. Da diese Sensoren regelmäßig kalibriert werden, werden sie nicht mit Flüssigdichtmasse montiert. Da für diesen Vorgang kein hoher Druck erwartet wird, wird eine Flachdichtung montiert, die bei der Dichtelemente arcus GmbH mit den Maßen 13,2x17,4x2,6 passend beschafft werden kann. Mit dieser Methode wird die Verschwendung von Dichtmittel und Reinigungsaufwand beim Wechsel der Prüflinge vermieden.

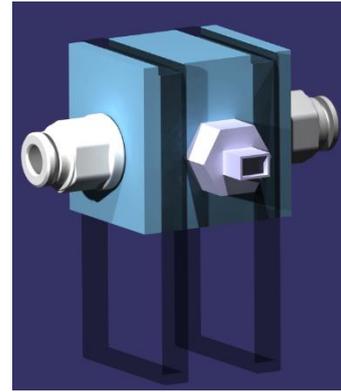


Abbildung 12: Gehäuse für Referenztemperaturgeber

Für die Projektarbeit Erstellung eines Messsystems wurde ebenfalls ein Adapter erstellt. Dieser ist prinzipiell aufgebaut wie die Variante für Einschraubfühler, weicht lediglich in den Maßen des Sensorgewindes ab. Da nur eine geringe Anzahl an Prüflingen kalibriert werden muss, werden hierfür keine Dichtungen gekauft, sondern auf das Flüssigdichtmittel zurückgegriffen.

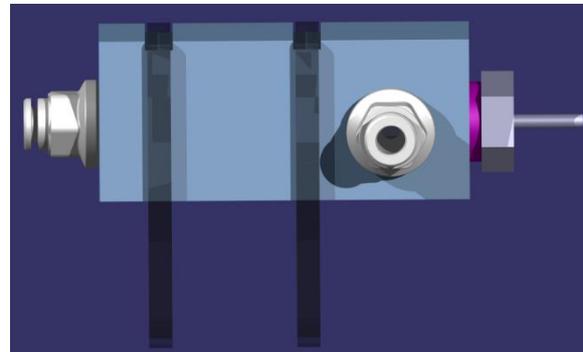


Abbildung 13: Gehäuse zur Prüfung von Sensoren mit Messspitze

Als Material für alle Gehäuse wurde **der Edelstahl X2CrNiMo17-12-2 vorgesehen**, da er den Materialien der meisten Sensoren sehr ähnlich ist. Dadurch soll Kontaktkorrosion unter den warmen und feuchten Bedingungen vermieden werden. Er weist außerdem mit einer Streckgrenze von 200 [N/mm²] eine ausreichend hohe Festigkeit auf (vgl. Wittel et al, 2017, S.8).

6.4 Rahmenstruktur

Um dem Hydrauliksystem die notwendige Struktur im Aufbau und der Installation zu geben, wurde für diesen Zweck ein Rahmensystem entwickelt, dass abgesehen von der Pumpe alle Komponenten der Hydraulik einbindet. Da die Pumpe zu einem separaten Prüfstand mit teilweise anderen Betriebsanforderungen gehört, wurde diese zunächst nicht fest in den Kalibrierstand eingebunden. Da sich die Zu- und Ableitung der Pumpe ohne Schwierigkeiten Anbringen und entfernen lassen, kann so der Pumpenprüfstand ohne größeren Aufwand für weitere Verwendungszwecke genutzt werden.

Der Aufbau dieses Rahmensystems wird modular durch die Verwendung von MayTec® 30x30 mm 4F SP Aluminium-Profilen realisiert. Diese werden mit Nutsteinen und Schrauben durch Winkel verbunden. Herzstück des Aufbaus ist ein Quader, in das die verschiedenen hydraulischen Untergruppen entsprechend Ihrer Funktion integriert wird. Die Untergruppen werden hierbei in den Boiler, die Ventilstreben und die Sensorbalkone unterteilt. Verbunden werden diese Untergruppen extern und intern durch eine Anzahl von AVS Römer® Winkeln mit Schnellsteckverbindungen für einen Schlauchdurchmesser von 6 mm.

Um dabei die umgebenden Aufbauten vor Wasserschäden bei Leckagen schützen zu können, wird dem gesamten System eine in der Gastronomie handelsübliche GN2/1 Edelstahlwannen mit 40 mm Tiefe untergelegt. Im Falle eines Lecks des Hydrauliksystems ist so ein kontrolliertes Auffangen des austretenden Wassers sichergestellt.

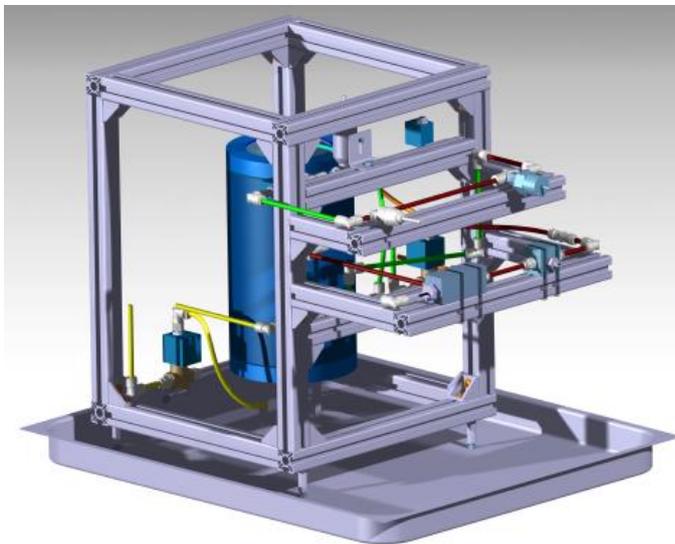


Abbildung 14: Gesamtüberblick über das CAD-Modells des Prüfstandes

Boilerintegration im Rahmen

Da der Boiler aus Wärmeausdehnungs- und Ressourcengründen statisch unterbestimmt auf drei Beinen stehend in das System integriert wird, wird dieser so mittig im Quader positioniert, dass ein allgemeiner geometriegebener Schutz gegen unbeabsichtigte Stöße und Rempeler von außen gewährleistet ist. Gleichzeitig sorgt diese Geometrie auch für einen Schutz der Bedienenden, vor den im Betrieb heißen Oberflächen des Boilers. Durch die am Boiler angebrachten langen Beine ist dieser und insbesondere die angeschlossene Elektrik mit einem entsprechenden Sicherheitsabstand von der Auslaufwanne versehen.

6.4.1 Ventilstreben

Die Ventile werden größtenteils an im Rahmen eingebrachten Querstreben befestigt. Durch die Anbindung im Quaderahmen wird hierdurch ein gut strukturiertes Schaltzentrum für das Hydrauliksystem geschaffen. Ausnahme ist hierbei die Ansaugweiche, die aus Gründen der Position der Pumpe relativ zum Rest des Hydrauliksystems auf der Rückseite des Prüfstands befestigt wird. Abgesehen von einer Struktur in der Ventilinstallation sorgt diese Form der Aufhängung durch die Trennung vom Arbeitsbereich der Kalibrierung für einen geometrischen Schutz vor den mit 230 Volt elektrisch angesteuerten Ventilen. Als mögliche Erweiterung des Prüfstands kann dieser Schutz noch durch das Anbringen einer Plexiglasplatte oder einer Platte aus einem anderen Plattenmaterial zwischen Ventilaufhängung und Messbalkonen ergänzt werden

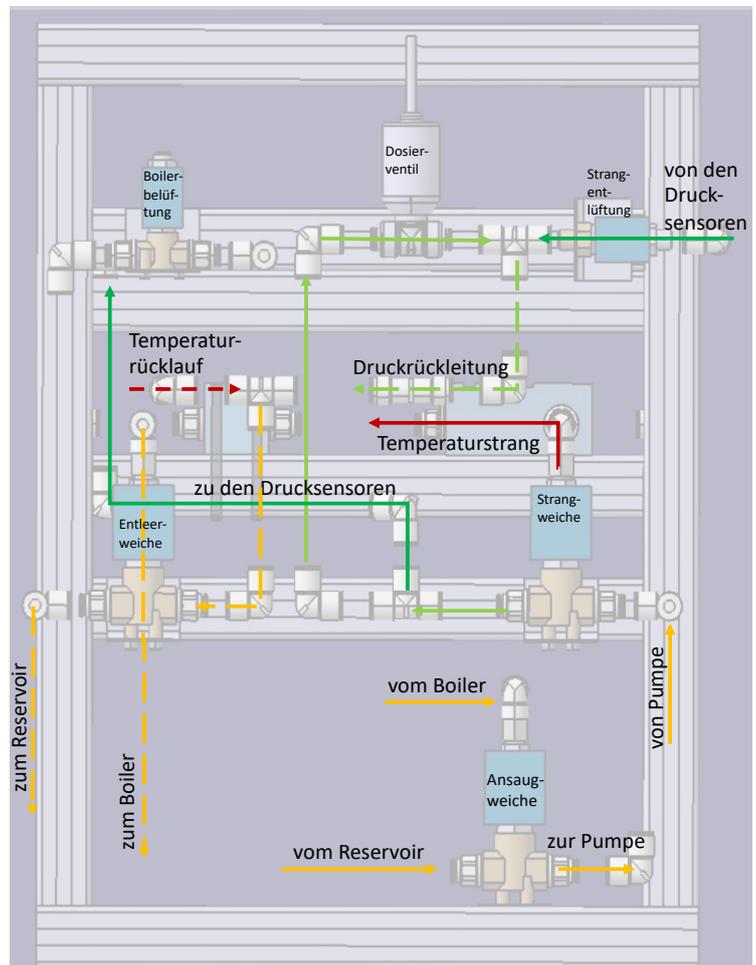


Abbildung 15: Übersicht Ventilstreben und Durchflussschema

6.4.2 Messbalkone

Das Hauptaugenmerk bei der Positionierung der Messstrecken liegt auf der guten Erreichbarkeit, um einen angenehmen Wechsel der Sensoren im Kalibrierprozess zu ermöglichen. Die Messstrecken werden daher mit zwei Messbalkonen (Abb. 15) vom Innenleben des Kalibrier-systems getrennt und in einer für die Kalibrierenden angenehmen Höhe angebracht. Es wurden hierbei separate Balkone für den Temperatur- und Druckmessstrang gewählt, um eine klare Trennung der Messstrecken zu erreichen. Diese separaten Messbalkone werden sowohl in unterschiedlichen Höhen als auch in unterschiedlichen Tiefen angebracht. Insbesondere die unterschiedliche Tiefe soll hierbei die Messstrecken vor ungewünschten gegenseitigen Einflüssen im Betrieb wie beispielsweise durch spritzendes Wasser schützen.

Bei der Positionierung der Balkone ist zu darüber hinaus zu beachten, dass der Temperaturmessbalkon als unterer Balkon über der maximalen Füllstandshöhe des Boilers liegen muss, um ein Auslaufen des Boilers durch die unterschiedlichen Höhenniveaus bei einer zum Sensorwechsel offenen Messstrecke über die Öffnungen zu verhindern.

7 Elektrik

Die Elektronik ist das Bindeglied zwischen der Software und der Hydraulik. Sie stellt die Rohdaten für die Software zur Verfügung und wandelt die Programmbefehle der Software in elektrische Impulse und somit in Aktionen um. Hierzu werden die von anderen Projekten entwickelten Platinen und Baugruppen genutzt. Bevor ein logisches Konzept zur Gruppierung der dieser Komponenten entwickelt werden kann, ist es wichtig zunächst das Zusammenwirken dieser zu definieren.

7.1 Funktionsprinzip Elektriksystem

Im Mittelpunkt der Elektrik steht die Basisplatine, welche die Steueraufgaben übernimmt. Hierzu hat diese mehrere digitale und analoge Ausgänge. Bis zu 10 Digitalausgänge der Basisplatine sind zur Schaltung der Solid State Relais (SSR)-Inseln, fünf Ausgänge werden pro Insel benötigt. Da für den Kalibrierstand zunächst nur fünf Ventile über SSR Inseln geschaltet werden, wird nur eine Insel benötigt. **Da unter Umständen mehr Ventile benötigt werden, werden dennoch zwei Inseln verbaut.** (vgl. Krzavic 2020 S. 15 und S. 21f)

Die SSR-Insel hat außerdem drei ungeschaltete 230 V Anschlüsse und dient damit als Verteiler. An Insel 1 wird die Stromquelle, ein **24 [V]** DC Trafo und Insel 2 angeschlossen. An Insel 2 werden zusätzlich noch der Heizregler sowie der Pumpenmotor angeschlossen. Die 5 geschalteten Ausgänge, schalten mit 230 [V] AC die Magnetventile. (vgl. Krzavic 2020 S. 21f)

Zwischen der SSR-Insel 1 und der Stromquelle wird zudem noch der Notausschalter geschaltet. Dies dient dazu im Bedarfsfall die Stromversorgung zum gesamten Prüfstand zu unterbrechen.

Die beiden analogen Ausgänge der Basisplatine übernehmen die Steuerung des Heizreglers sowie die des Dosierventils zur Steuerung des Drucks, mittels eines konstanten Steuersignals zwischen 0 [V] und 10 [V]. Der Heizregler gibt die entsprechende Leistung an die Heizelemente weiter und das Dosierventil schließt abhängig von der anliegenden Spannung.

Die Basisplatine gibt darüber hinaus ein Pulsweitenmodulationssignal (PWM Signal) und 24[V] DC zur Steuerung und Versorgung des Pumpenmotors aus. Der aktuelle Pumpenmotor wird jedoch lediglich vom PWM Signal gesteuert und bezieht zunächst seine Spannungsversorgung von einem externen Netzteil, da dieser keine 24[V] DC benötigt. An die Basisplatine können darüber hinaus noch direkt ein Durchflusssensor und 2 Füllstandsmesser angebunden werden. (vgl. Krzavic 2020 S. 17f)

Versorgt wird die Platine vom bereits genannten 24[V] DC Trafo und stellt damit auch die Spannungsversorgung für zwei Aufsteckplatinen. Diese werden über je einen 8 Pin-Header angeschlossen.

Die beiden Aufsteckplatinen dienen zum Auslesen der Sensoren. Diese liegen in Form einer NTC Messwertplatine, an die bis zu 4 NTCs angeschlossen werden können und eine

Spannungsteilerplatine, an die bis zu zwei Drucksensoren und ein Füllstandsmesser angeschlossen werden können vor. (vgl. Krzavic 2020 S. 16ff und S. 25)

Ferner kommuniziert die Basisplatine mit einem Raspberry Pi. Sie versorgt diesen mit 5,1 [V] DC und leitet die digitalen Rohdaten der Sensoren an ihn weiter. Im Gegenzug dient der Raspberry Pi als Schnittstelle zwischen Laptop und Basisplatine. Der Laptop ruft die auf dem Raspberry Pi hinterlegten Rohdaten ab, vergleicht dieses mit den eingestellten Sollwerten und ändert daraus resultierend die Einstellungen für die Pumpe, die Heizelemente und Ventile, die über den Raspberry Pi wieder an die Basisplatine weitergeben werden.

Die Hauptaufgabe des Laptops ist das Verknüpfen der Messwerte der NTCs und Drucksensoren mit den Daten der Referenzsensoren. Diese sind über eine Platine, die der Signalaufbereitung dient, an einer Auslesekarte von National Instruments (NI) angeschlossen, welcher per USB am Laptop angeschlossen ist.

Bei den zu kalibrierenden Komponenten handelt es sich um die NTCs in Kombination mit der NTC Messwertplatine und den Drucksensoren zusammen mit der Spannungsteilerplatine. Hier ist ebenfalls wichtig zu vermerken an welchem Anschluss die Sensoren während der Kalibrierung angeschlossen sind. Diese Hardware Kette muss durchlaufen und kalibriert werden, um bauteilbedingte Schwankungen zu verhindern

Wichtig ist außerdem, dass alle elektrisch leitende Bauteile an eine Schutzleitersammelstelle anzuschließen sind.

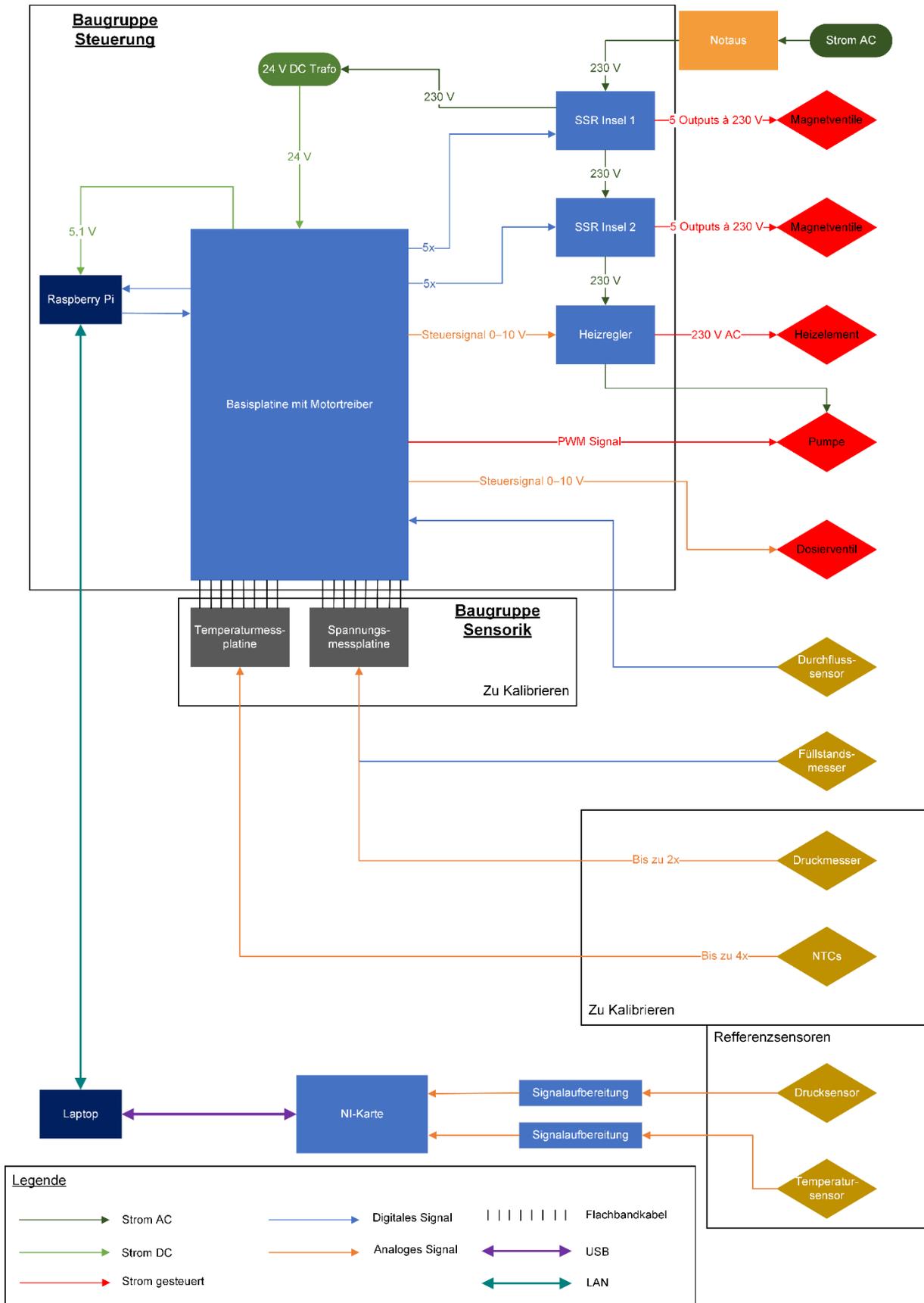


Abbildung 16: Aufbauplan der Elektrik

7.2 Elektrikaufbaukonzept

Aus den im Funktionsprinzip Elektriksystem genannten Zusammenhängen, sowie der Aufgabenstellung der Kalibrierung der Temperatur- und Drucksensoren und deren Ausleseplatinen, ergeben sich die Baugruppen der Steuerung und die der Sensorik, sowie die weiteren Module für den Betrieb des Systems. Im Folgenden wird auf diese drei Gruppen näher eingegangen.

7.2.1 Baugruppe Steuerung

Bei der ersten Baugruppe, genannt Steuerung, handelt es sich um Komponenten, die nach dem Aufbau des Prüfstandes nicht mehr regelmäßig umgebaut werden müssen. Diese Baugruppe beinhaltet die Basisplatine, die SSR-Inseln, den Heizregler und den Raspberry Pi.



Es ergibt daher Sinn, die Basisplatine, die Halbleiterrelais und den Heizregler auf eine gemeinsame Grundplatte zu montieren. Der Raspberry Pi wird direkt auf die Basisplatine geschraubt und mittels eines Flachbandkabel mit ihr verbunden.

Außerdem sollte in einem möglichen Folgeprojekt zum Schutz sämtliche Platinen der Baugruppe, die Grundplatte in einem Gehäuse verbaut werden, um sie vor möglichen Undichtigkeiten des Wasserkreislaufs sowie Personen vor Stromschlägen zu schützen. Aufgrund der unbekanntem Wärmeentwicklung der Platinen muss in diesem Schutzgehäuse auch Platz für einen nachrüstbaren Lüfter eingeplant werden.

7.2.2 Baugruppe Sensorik

Die zweite Baugruppe, genannt Sensorik, besteht aus Komponenten, die möglichst gut zugänglich sein sollten, da diese oft ausgetauscht werden oder für den Sensorwechsel zugänglich sein müssen. Hierzu zählen die NTC Messwertplatine und die Spannungsteilerplatine.

Da es sich bei der NTC Messwertplatine und der Spannungsteilerplatine um Aufsteckplatinen für die Basisplatine handelt, würden sich diese normalerweise auf dieser aufgesteckt befinden und wären somit schlecht zugänglich. Darüber hinaus könnte häufiges Wechseln der Aufsteckplatinen mit der Zeit zu Ermüdungserscheinungen an den Anschlüssen der Basisplatine führen. Beide Probleme lassen sich mit einem Flachbandkabel als Verlängerung lösen.

Die Gruppe Sensorik wird ebenfalls auf einer gemeinsamen Grundplatte montiert und wird sich im Gesamtaufbau möglichst weit oben befinden, um eine gute Erreichbarkeit zu ermöglichen und die offenen Platinen vor potenziellen Wasserlecks zu schützen. Verbunden werden sollten die beiden Baugruppen mittels zweier acht Pin-Flachbandkabel. Das Ende des Flachbandkabels für die Baugruppe Sensorik könnte dabei in der Grundplatte Enden bzw. an ihr befestigt sein, um die Messplatinen möglichst einfach einstecken zu können.

7.2.3 Sonstige Module

Laptop, NI-Karte sowie die benötigten Labornetzteile für den Pumpenmotor und die 24[V] DC Spannungsversorgung des Prüfstands werden möglichst nah am restlichen Aufbau platziert. Da diese aber auch noch für andere Projekte benötigt werden, werden sie nicht fest verbaut. Es wird jedoch darauf zu geachtet, dass die Anschlusskabel der Referenzsensoren und der Spannungsversorgung des A/D-Wandlers gut zugänglich sind.

7.3 Notauskonzept

Um im Notfall den Prüfstand und seine Bediener zu schützen, muss dieser schnell und zuverlässig ausgeschaltet werden können. Es ist daher wichtig, dass der Notaus immer gut erreichbar ist und verlässlich funktioniert.

Da jedoch unter Umständen nicht der gesamte Prüfstand deaktiviert und der damit zusammenhängende Datenverlust vermieden werden soll, musste hierfür eine entsprechende Lösung gefunden werden.

Um dies zu berücksichtigen ist der Notaus zweigeteilt aufgebaut, mit einem Teil Hardware und einem weiteren Teil Software.

Der erste Teil, „Hardware“, besteht aus dem Physischen Notausbutton, der die 230 V AC Stromversorgung des gesamten Prüfstands unterbricht und somit sämtliche Systeme sofort deaktiviert.

Da dies unter Umständen eine übertriebene Maßnahme darstellt, wenn beispielsweise lediglich die Heizregelung außerhalb ihrer angedachten Parameter arbeitet und es bei einer plötzlichen Stromabschaltung zu einem Datenverlust kommt, gibt es zusätzlich noch den Teil „Software“.

Der Teil „Software“ ist in die Bediensoftware integriert. Ein Softwarebutton wird im laufenden Betrieb immer angezeigt und schaltet im Bedarfsfall sofort die Leistungsvorgaben für die Pumpe und das Heizelement auf null. Außerdem wird das Regelventil, mit dem der Druck im System kontrolliert wird, vollständig geöffnet, um diesen möglichst schnell abzubauen. Zudem werden alle weiteren Ventile in ihre Normalstellung geschaltet. Dies ist für die meisten Störfälle im System wie einem Fehler in der Regelung oder einer plötzlich auftretenden Undichtigkeit, mehr als ausreichend und vermeidet Datenverlust sowie einen Neustart des Prüfstands.

Durch diese duale Lösung ist es möglich entsprechend der Situation eine angemessene Entscheidung treffen zu können.

Näheres zur Umsetzung des Notaus in der Software ist im Kapitel 8.3.2 Datenübergabe nachzulesen.

7.4 Aktueller Stand der Elektrik

Aufgrund von Verzögerungen bei den Platinen, müssen beide Grundplatten noch geplant und gefertigt werden. Bei der Grundplatte Steuerung fehlen noch die Maße der Schutzleitersammelstelle und bei der Sensorik die Abmessungen des Steckers der Flachbandkabel. Daraus resultierend fehlt die Montage der Platinen sowie ihre Verkabelung untereinander und mit den Sensoren.

8 Software

Die Software ist auf zwei Geräte aufgeteilt. Der Raspberry Pi steuert die Elektronik des Prüfstands und protokolliert die Daten der zu kalibrierenden Sensoren. Hierzu befinden sich auf ihm einige Python Skripte die zum Teil automatisch ablaufen und zum Teil vom Laptop aus gestartet werden. Dieser Teil der Software wird in der Abbildung unter dem Oberbegriff Raspberry Datentransfer dargestellt. Die darauf laufende Python Skripte wurden vom Projektbetreuer Dipl.-Ing. Rohnen LbA zur Verfügung gestellt.

Auf dem Laptop wird ein MATLAB® Code ausgeführt, der im MATLAB® App Designer geschrieben wurde und dabei mehrere Programmuntergruppen enthält. Einerseits stellt er die Benutzeroberfläche zur Bedienung des Prüfstands und der Kalibrierung bereit. In dieser Oberfläche werden die Sollzustände der Hardware und der Prozessgrößen definiert. Als zweite Programmgruppe befindet sich die Regelung für den Druck und die Temperatursysteme im Code. Hier werden für die beiden Prozessgrößen die Soll und Ist-Werte abgeglichen und daraus Stellwerte für die diese beeinflussenden Stellgrößen wie Heizleistung oder Drosselventilstellung ermittelt. Gemeinsam mit den binären Stellgrößen wie beispielsweise den Wegeventilstellungen werden die Stellwerte über den Raspberry Datentransfer an die Hardware übergeben. Es ist hierbei zu beachten, dass es sich bei dieser Abfolge im realen Code nicht um die lineare Aneinanderreihung handelt, wie sie in MATLAB® Graphical User Interface (Benutzeroberfläche) Abbildung 17: Softwareübersicht dargestellt ist. Die Abbildung soll hierbei primär bei der qualitativen Erläuterung der Zusammenhänge helfen.

Aus den veränderten Stellgrößen in der Hardware können veränderte Prozessgrößen resultieren. Diese werden über die Sensoren an die Datenverarbeitung übergeben. Wie im Funktionsprinzip Elektriksystem beschrieben, werden hierbei die Daten der zu kalibrierenden Sensoren zunächst vom Raspberry Pi ausgelesen und von dort aus an die Datenverarbeitung weitergeleitet. Parallel dazu werden die Daten der Referenzsensoren über die NI-Messkarte direkt an die Datenverarbeitung übergeben und die jeweils neusten als aktuelle Daten sofort der Regelung als Ist-Werte zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus werden alle Daten mit einem Zeitstempel versehen um sie für den jeweiligen Zeitpunkt in eine Datenmatrix Zusammenfassen zu können. Diese Datenmatrix wird im Rahmen des Programmteils der Datenverarbeitung verwendet um die Daten für die Benutzeroberfläche zur Anzeige des aktuellen Prüfstandstatus, wie auch für die Generierung der Sensorkennlinien bereit zu stellen. Auf die in ihren Zusammenhängen erläuterten Programmgruppen wird im Folgenden näher eingegangen.

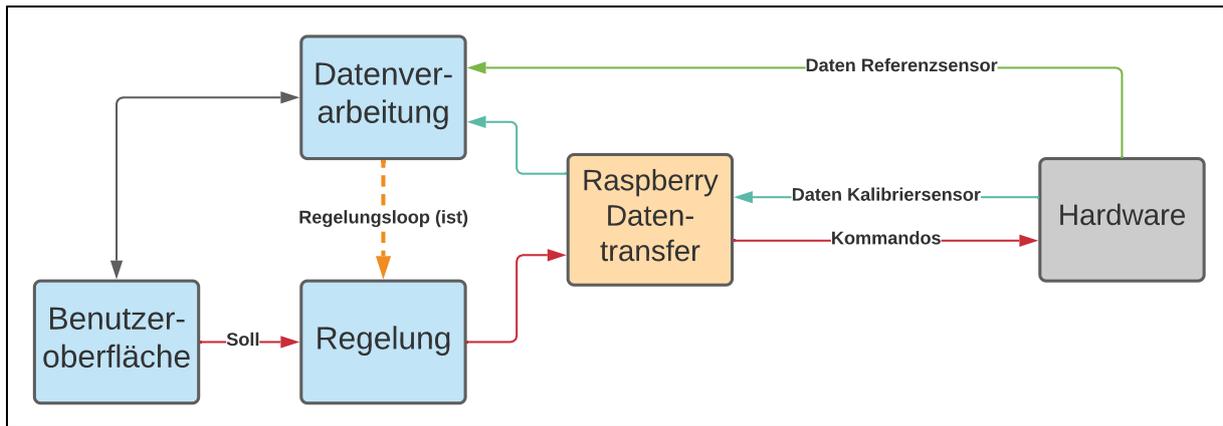


Abbildung 17: Softwareübersicht

8.1 MATLAB® Graphical User Interface (Benutzeroberfläche)

Ziel des Graphical User Interface (GUI) ist eine einfache Bedienung des kompletten Prüfstandes. Der Benutzer soll sich ohne große Einweisung zurechtfinden können. Die Kalibrierung soll mittels einer Checkliste geführt ablaufen und für den Fall von baulichen Veränderungen sollte der Code möglichst modular geschrieben sein und sich somit gut erweitern oder abändern lassen.

Um Darstellungsprobleme zu vermeiden wird die Oberfläche auf die Displaygröße und Auflösung des im Labor vorhanden Laptops optimiert.

8.1.1 Startseite

Wird das Programm gestartet, öffnet sich zunächst die Startseite, auf welcher links die aktuellen Daten der Referenzsensoren und der Verbindungsstatus mit dem Raspberry Pi angezeigt werden. Rechts können die vier verschiedenen Teilmodule der Software gestartet werden. Bei den vier Teilmodulen handelt es sich um den Kalibriermodus, den manuellen Modus, den Wasserwechsel und die Datenansicht. Unten befindet sich, wie auch auf den genannten Seiten, der Notausbutton. Dieser Schaltet die Leistung von Pumpe und Heizelementen auf null und die Ventile in ihre Normalposition.

Resetten lässt sich der Notaus mit dem „Notaus Reset“. Dieser befindet sich nur auf der Startseite und im Programmabschnitt manueller Modus.



Abbildung 18: GUI Startseite

8.1.2 Kalibriermodus

Die Oberfläche des Kalibriemodus besteht aus drei Teilen: Der Checkliste, den Einstellungen für die Kalibrierung und der Anzeige der aktuellen Daten. Zum Starten der Kalibrierung muss zunächst die Checkliste abgearbeitet werden. Der nachfolgende Punkt in der Checkliste kann immer erst nach Bestätigen des vorherigen abgehakt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Reihenfolge eingehalten wird, da das Programm nicht erkennen kann, ob sich wirklich an die Vorgaben gehalten wird. Um eine unabsichtliche Änderung der Seriennummern zu verhindern werden diese nach Bestätigung gesperrt. Erst nach erfolgreicher Verbindung mit dem Raspberry Pi lässt sich Kalibriervorgang starten. Einstellungen zur Kalibrierung lassen sich jederzeit bis vor dem Start anpassen. Hier kann der geschlossene Kreislauf mit Boiler oder der Offene mittels Reservoirs gewählt werden.

Inkompatible Einstellungskombinationen führen dazu, dass andere Optionen deaktiviert werden. So führt zum Beispiel die Auswahl des offenen Kreislaufs dazu, dass keine Temperaturkalibrierung möglich ist, da sich in diesem Kreislauf kein Heizelement befindet.

Darüber hinaus soll ausgewählt werden können, ob die Kalibrierung vollkommen automatisch ablaufen soll oder man manuell die anzufahrenden Kalibrierpunkte angibt.

Hierzu kann bei entsprechender Auswahl nach Start die gewünschte Zieltemperatur oder der gewünschte Zieldruck bei „Anzufahrender Kalibrierpunkt“ eingegeben werden und mittels „Punkt anfahren“ bestätigt werden. Wurde der gewünschte Punkt erreicht und wird entsprechend der Vorgaben des Prüfers gehalten, kann der Kalibrierpunkt gesetzt werden. Dies führt dazu, dass ein Durchschnittswert der vergangenen 5 Sekunden generiert und mit dessen Hilfe,

eine Kennlinie interpoliert wird. Bei jedem neuen Kalibrierpunkt wird die Kennlinie neu interpoliert.

Für die automatische Kalibrierung muss noch ein passender Algorithmus geschrieben werden, der erkennt, ob sich die Parameter stabil an einem der vorgegebenen Kalibrierpunkten befinden und dann den Kalibrierpunkt setzt.

Die Daten der Kennlinie und des Kalibrierprozesses lassen sich jederzeit mittels „Daten sichern“ speichern. Nach beendigen der Kalibrierung lässt sich der Raspberry Pi ausschalten. Dies sollte aber nur geschehen, wenn im Anschluss der Prüfstand abgeschaltet wird. Nach Beendigung der Checkliste lässt sich diese resetten und der nächste Sensor kann kalibriert werden.

Sollte sich zu heißes Wasser am Referenztemperaturfühler befinden, lässt sich aus Sicherheitsgründen keine Druckkalibrierung starten. Da aber unter Umständen das Wasser im Restlichen Kreislauf deutlich kühler ist, kann die Option „Hydraulikkreislauf durchpumpen“ gewählt werden. Dies startet die Pumpe, um das Wasser des Hydrauliksystems umzuwälzen und schaltet die Ventile entsprechend der „Kreislaufwahl“.

Stoppen lässt sich die Pumpe mittels „STOP“

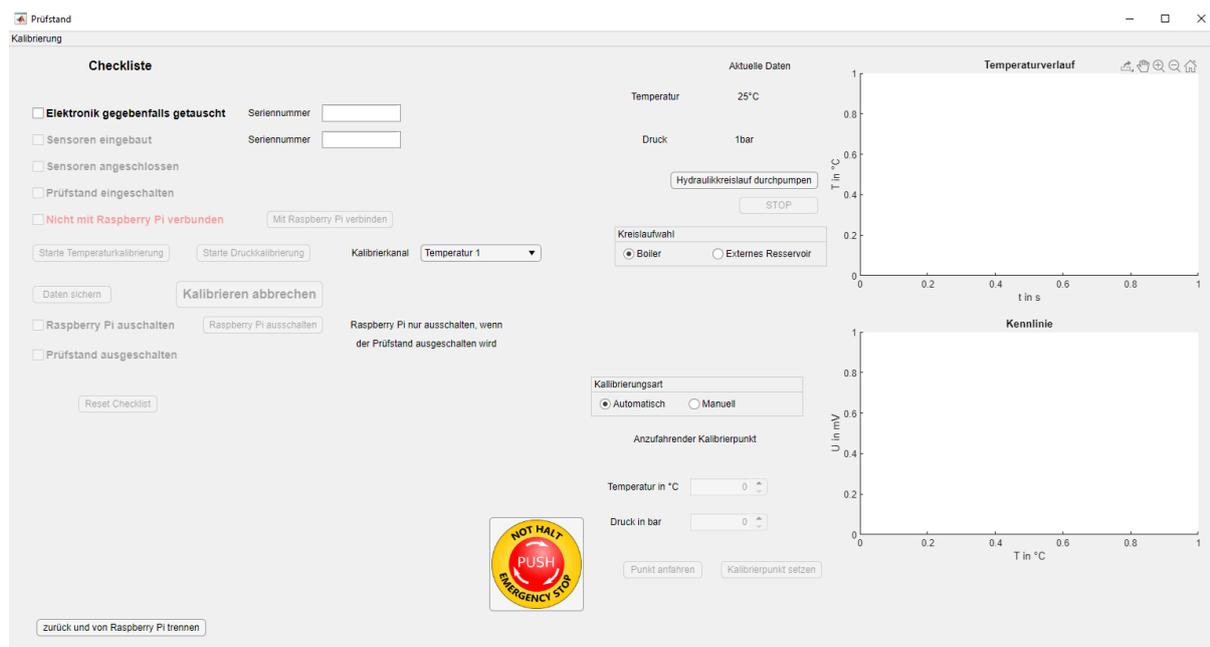


Abbildung 19: GUI Kalibriermodus

8.1.3 Wasserwechselmodus

Der Wasserwechsel hat einen ähnlichen Aufbau wie der Kalibriermodus. Es gibt ebenfalls eine Checkliste, welche erst abgearbeitet werden muss, bevor die verschiedenen Programmpunkte freigeschaltet werden. Zur Auswahl stehen die Möglichkeiten „Wasser auffüllen“ und „Wasser ablassen“. Wasser auffüllen bewirkt, dass das Belüftungsventil geöffnet wird und Wasser vom Externen Reservoir angesaugt wird und in den Boiler gepumpt wird. Wasser ablassen hingegen öffnet ebenfalls das Belüftungsventil. Hierbei wird jedoch das Wasser aus dem Boiler

angesaugt und ins Externe Reservoir gepumpt. Wenn „Gesamtsystem spülen“ gewählt wird, bleibt das Belüftungsventil geschlossen und das Wasser wird vom Externen Reservoir angesaugt und auch wieder dort oder in ein zweites separates Reservoir ausgeleitet. Alle drei Vorgänge nutzen den Temperaturstrang. Gestoppt werden können die Abläufe mittels des Buttons „STOP“.

Rechts können zu jeder Zeit die aktuelle Wassertemperatur und Druck abgelesen werden und die Füllstandsanzeige soll hier integriert werden. Die Integration der Füllstandsanzeige steht zum Zeitpunkt des Projektendes noch aus, da unbekannt ist, in welcher Form der Raspberry Pi die dafür benötigten Daten ablegt. Des Weiteren werden die aktuellen Ventilstellungen angezeigt, welche automatisch gewählt werden abhängig vom gewünschten Programm

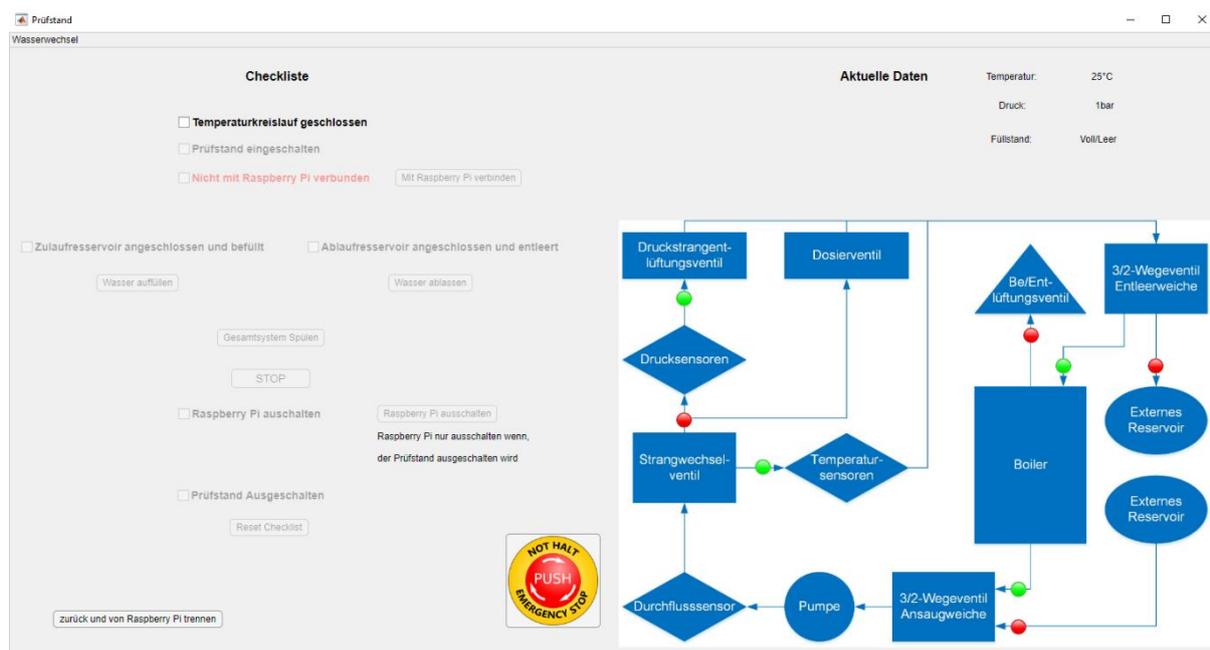


Abbildung 20: GUI Wasserwechsel

8.1.4 Manueller Modus

Im manuellen Modus können alle Einstellungen vom Bedienenden frei gewählt werden.

Temperatur, Durchfluss und Druck können einzeln eingestellt werden und es ist wählbar, ob die Ansteuerung „Wertgesteuert“ oder „Leistungsgesteuert“ erfolgen soll. „Wertgesteuert“ bedeutet, dass ein Sollwert vorgegeben wird und die Regelung versucht diesen zu erreichen und zu halten. „Leistungsgesteuert“ bedeutet, es wird ein prozentualer Wert der maximal verfügbaren Leistung gegeben und dieser wird dann unabhängig von der aktuellen Temperatur, Druck oder Durchfluss gehalten. Mittels „Daten übernehmen“ werden die eingegeben Daten übernommen und verarbeitet.

Durch vier Tabs lassen sich nach Wahl entweder der Temperatur-, Durchfluss- oder der Druckverlauf der letzten 90 Sekunden oder aber die Ventilsteuerung anzeigen. Die Ventilsteuerung zeigt zum einen die aktuelle Ventilstellung an (grün bedeutet geöffnet, rot geschlossen), zum

anderen lassen sich die Ventile hier schalten. Sämtliche Einstellungen zeigen nur Wirkung, wenn man sich zuvor mit dem Raspberry Pi verbunden hat.

Zur Übersicht über die Auswirkungen der Regelung, kann noch wahlweise die eingestellte Leistung der Heizung, des Motors oder der Drossel für die Vergangenen 60 Sekunden angezeigt werden.

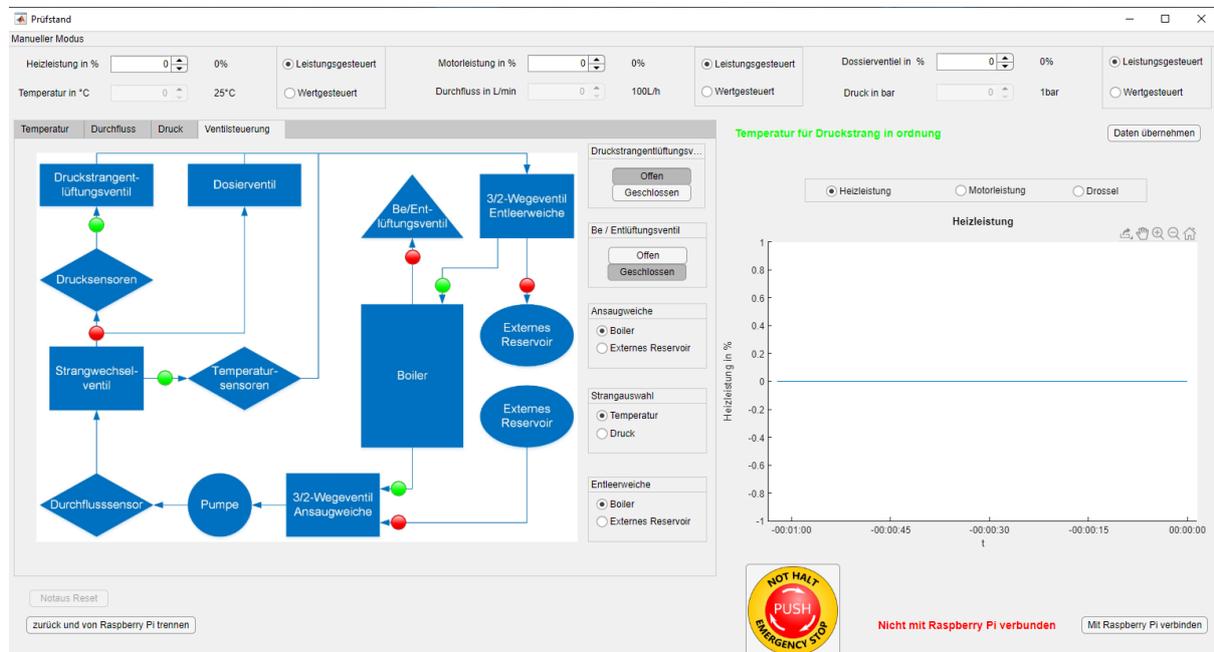


Abbildung 21: Manueller Modus

Noch nicht voll funktionsfähig ist hier der Wechsel zwischen „Leistungsgesteuert“ und „Wertgesteuert“, da die benötigte Regelung für einen Wertgesteuerten Betrieb noch fehlt. Darüber hinaus ist die Anzeige des Durchflusses noch nicht funktionsfähig, da zum Zeitpunkt des Projektendes unbekannt ist in welcher Form die Durchflussdaten vom Raspberry Pi übertragen werden.

8.1.5 Datenansicht

Die Datenansicht dient dazu sich Kennlinien von vorangegangenen Kalibrierungen erneut anzeigen zu lassen. Hierzu öffnet sich ein Fenster zum Auswählen der Datei mittels „Neue Kennlinie laden“. Es werden im Anschluss die Kennlinie, das Datum der Erstellung der Kennlinie, der Benutzte Datenkanal bzw. Anschluss, sowie die Seriennummern angezeigt. Um nicht versehentlich die Seriennummer zu ändern sind die Felder der Seriennummern gesperrt bis zum Betätigen des „Seriennummer ändern“ Buttons. Mittels „Speichern“ werden die Daten übernommen. Die Datei der aktuell angezeigten Kennlinie kann mittels „Löschen“ und einer anschließenden Bestätigung gelöscht werden.

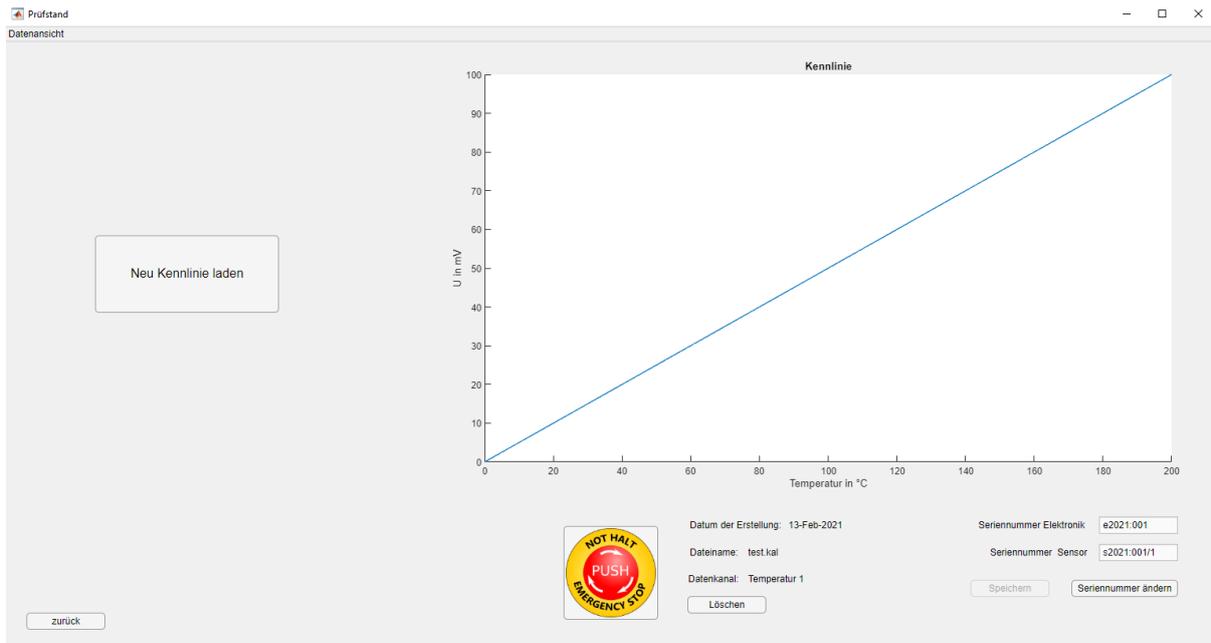


Abbildung 22: Datenansicht

8.2 Regelung

Für eine präzise und zeiteffiziente Kalibrierung ist es erforderlich, dass das Kalibriersystem die Prozessgrößen Druck und Temperatur an den verschiedenen Messpunkten ohne große Überschwingungen oder Schwankungen anfahren und halten kann. Die für das Projekt definierte Anforderung ist hierbei, die Prozessgröße über 5 Sekunden konstant halten zu können. Zu diesem Zweck muss eine Closed-Loop Regelung für diese Parameter entwickelt werden. Da die Ist-Größen des Regelungsloops aus den direkt an MATLAB® übergebenen Daten der Referenzsensoren entstehen, muss die Regelung darüber hinaus in den MATLAB® Code eingebunden werden. Hier wird sie entsprechend an die Benutzeroberfläche und Datenverarbeitung für die

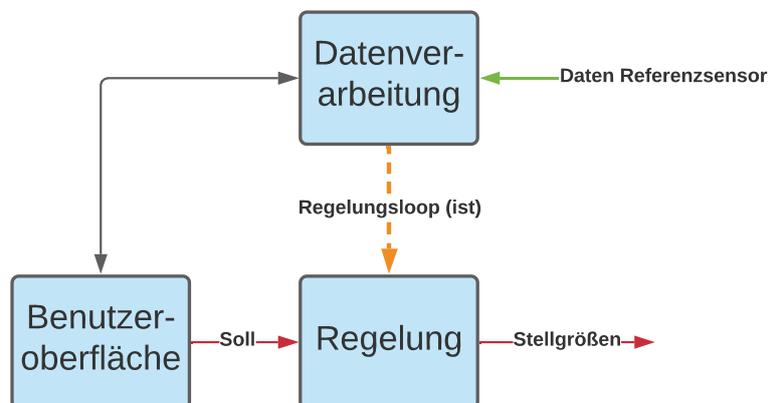


Abbildung 23: Regelung Schematisch

jeweiligen Inputgrößen angebunden.

Da die Regelung die beiden Prozessgrößen Druck und Temperatur regeln soll, unterteilt sich die Regelung entsprechend in die Anteile Druck- und Temperaturregelung. Im Folgenden sollen nun die den beiden Regelungen zu Grunde liegenden Überlegungen dokumentiert und Vorschläge für das weitere Vorgehen gemacht werden.

8.2.1 Temperaturregelung

Das zu regelnde System der Temperaturregelung unterteilt sich in drei Komponenten. Die zu bestimmende Stellgröße stellt die Heizleistung der Heizspule angegeben in % dar, die zu regelnde Prozessgröße die an den Referenzsensoren abgenommene Temperatur. Zwischen der Stellgröße und der Prozessgröße liegt das Thermodynamische System der Hydraulik, welches durch einen dauerhaften Wärmestrom in die Umgebung für eine kontinuierliche Verlustenergie im System sorgt.

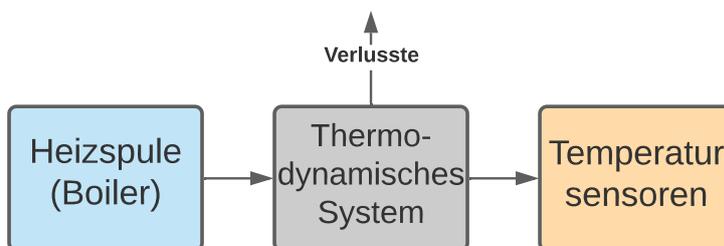


Abbildung 24: Thermodynamisches System der Hydraulik

Bei der Regelung des Systems gilt es verschiedene das System kennzeichnende Faktoren zu beachten. Die genannte Verlustwärme muss dem System kontinuierlich über die Heizspule zugeführt werden, um eine die Messpunkte jeweils über die geforderten 5 Sekunden konstant halten zu können. Darüber hinaus weist das System durch die im Verhältnis zur Heizleistung große Wassermasse im hydraulischen System eine große Trägheit auf. Dementsprechend reagiert die Temperatur nur langsam auf sich ändernde Stellgrößen. Diese Trägheit zeichnet sich abgesehen von der allgemeinen Temperaturänderungsgeschwindigkeit noch insbesondere durch große Tot- und Übergangszeiten aus. Die Totzeit stellt hierbei die Zeit dar, die ab Beginn einer durch die Stellgröße eingebrachten Heizleistung bis zur tatsächlichen Änderung der Prozessgröße an den Sensoren vergeht. Die Übergangszeit beschreibt im Anschluss die Zeit, in der von der ersten Veränderung im System zum Erreichen eines konstanten Temperaturgradienten übergegangen wird. Eine qualitative Veranschaulichung des Systemverhaltens kann hierzu die Analyse der Sprungantwort für die Boilerregelung aus der Abschlussarbeit von Felix Müller (vgl. Müller, 2020, S47ff) zu Rate gezogen werden. Bei dem dort vermessenen System handelt es sich um ein Strukturell sehr ähnliches, bei dem lediglich Änderungen am hydraulischen System wie die Boilerisolierung und der neue Messstreckenaufbau zu anderen Thermodynamischen Systemgrößen geführt hat.

Als weiterer Faktor in der Temperaturregelung ist die ungleichmäßige Erwärmung des Wassers im System bei ausgeschalteter Pumpe zu beachten. Da die Temperatur an den Sensoren

abgenommen wird, die Wärme der Heizspule jedoch im Boiler eingebracht wird, kann sich bei **fehlender Durchmischung des Systems**, eine große Ungleichmäßigkeit der Prozessgröße über das gesamte hydraulische System einstellen.



Diese drei Faktoren bilden die in der Theorie angenommen Grundeigenschaften, die bei der Definition eines Reglers mit der notwendigen Präzision ohne unangebrachte Komplexität beachtet werden müssen. Um jedoch das tatsächliche Systemverhalten ermitteln zu können, muss die Übertragungsfunktion experimentell am aufgebauten Prüfstand bestimmt werden. Hierbei kann analog zu der von Felix Müller in Kapitel 6. Boilertemperaturregelung (vgl. Müller, 2020, S45ff) beschriebenen Erfassung der Sprungantwort und Ermittlung der Übertragungsfunktion vorgegangen werden.

Ferner kann der im Rahmen dieser Abschlussarbeit erarbeitete Boilerregelcode in MATLAB® übertragen und mit auf Basis der neuen Übertragungsfunktion angepassten Regelparameter erprobt werden. Da es sich bei diesem Boilerregelcode ursprünglich um eine Festwertregelung für den Temperaturbereich 98 – 120 [°C] handelt, ist hierbei insbesondere zu prüfen, ob sich die Schwankungen beim Halten eines Messpunktes im zulässigen Bereich befinden.

Sollte hierbei die Erkenntnis gewonnen werden, dass der von Felix Müller für die Boilertemperaturregelung (vgl. Müller, 2020, S47ff) umgesetzte PD- Regler (Regler mit Proportionalitäts und Derivatanteil) den Anforderungen einer Kalibrierung nicht zur Genüge entspricht, kann dieser um einen Integralteil zum Ausgleich der kontinuierlichen Verlusstenergie des thermodynamischen Systems ergänzt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass durch die hohe Trägheit des Systems, eine große Gefahr der Übersättigung im Integralteil des Reglers besteht. Sollte sich dieser jedoch als nötig Erweisen, muss der Regler um einen zusätzlichen Algorithmus zum Sättigungsschutz ergänzt werden. Denkbar wäre hier, abhängig vom Regelfehler mit variablen Regelparametern zu arbeiten und auf diesem Weg den Integralteil erst in der Nähe der Zielgröße zu aktivieren. Dies in Kombination mit einer Sättigungsbegrenzung könnte hierbei die Präzision des Reglers erhöhen.

Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den hier angestellten Überlegungen lediglich um theoretische Ansätze handelt, deren Validität zunächst am realen System erprobt werden müssen. Dies Erprobung stellt daher auch die Grundlage für das weitere Vorgehen im Bereich der Temperaturregelung dar.



8.2.2 Druckregelung

Im Fall der Druckregelung teilt sich das zu regelnde System in vier relevante Komponenten auf. Besonders ist hierbei, dass es mit der Pumpendrehzahl und der Drosselventilöffnung zwei unabhängige Stellgrößen zur Veränderung der Prozessgröße Druck existieren. Zwischen den beiden Stellgrößen wird Druck, abgenommen. Dieser wird dabei zusätzlich von den Reibungsbedingten Verlusten im fluidmechanischen System der Hydraulik beeinflusst.

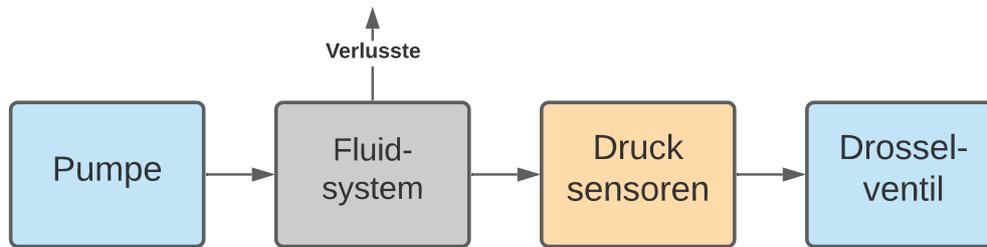


Abbildung 25: Drucksystem der Hydraulik

Im Zusammenhang mit der Druckregelung gilt es zunächst das System auf einen Freiheitsgrad zu beschränken um eine entsprechend gut regelbares System zu erhalten.

Die Reibungsbedingten Verluste hingegen können aller vorraussicht nach bei der Auslegung der Regelung vernachlässigt werden, da diese bei Kalibrierdrücken von bis zu 10 bar einen Verhältnismäßig kleinen Fehler hervorrufen sollten. Darüber hinaus ist für die Kalibrierung das präzise halten eines Messpunktes wichtiger als das präzise erreichen eines bestimmten Wertes. Das Gleichmäßige halten eines Wertes ist daher also wichtiger als der eigentliche Wert.

Im Gegensatz zum thermodynamischen System zeichnet sich der Druck im Hydrauliksystem durch seine hohe dynamik aus. Das heißt die Prozessgröße reagiert also schnell auf Änderungen in den Stellgrößen. Diese Dynamik findet sich unter anderem in den von der Pumpe beim Fördern erzeugten Impulsen als ein gewisses amplitudisches Rauschen wieder.

Wie auch bei der Temperaturregelung müssen diese Vermutungen zunächst durch Experimente am aufgebauten System getestet werden.

Unabhängig vom Systemverhalten muss jedoch für die Umsetzung der Regelung im Rahmen eines verhältnismäßigen Aufwands zunächst einer der beiden Freiheitsgrade des Systems beschränkt werden. Eine Möglichkeit hierfür stellt das fixieren der Pumpendrehzahl auf eine willkürliche Drehzahl dar, durch die der Druck ausschließlich über das Drosselventil gesteuert werden kann. Hierbei kann im Rahmen der Versuche zur Bestimmung des Systemverhaltens zunächst eine Drehzahl experimentell ermittelt werden, die gleichzeitig einen guten Durchfluss durch das Hydrauliksystem, wie auch eine gute Steuerbarkeit des Druckanstiegs durch das Drosselventil ermöglicht. Darüber hinaus ließe sich der Einfluss der Drehzahl auf die von der Pumpe erzeugten Impulse beobachten und auf die minimierung der Druckamplituden und damit den Einfluss auf die Druckmessung hin optimieren.

Sollte auf Basis des Systemverhaltens ein Regler mit Derivatanteil Verwendung finden, ist hierbei zusätzlich auf den möglichen Einfluss der Impulse zu achten. In diesem Fall dürfen die Zeitabstände der Ableitung des Regelfehlers nicht zu klein gewählt werden, um ein Ableiten des durch die Pumpe erzeugten Rauschens zu verhindern. Würde dies nicht verhindert, kann das hochfrequente Rauschen der Pumpenimpulse durch die starken Steigungen im Derivatteil verstärkt werden und zu einem Schwingen der Stellgröße führen.

Eine alternative Möglichkeit zur Begrenzung des Rauscheinflusses wäre hierbei das Einführen eines frequenzblockenden Filters der die Einflussnahme der Pumpenfrequenz auf das Derivat verhindert.

Wie auch schon bei der Temperaturregelung müssen auch hier Aspekte wie das Rauschen der Pumpe unter den realen Bedingungen betrachtet werden, um Ihre Gewichtung bei der Definition einer Regelung bewerten zu können.



8.2.3 Umsetzung

Die Grundlage des weiteren Vorgehens besteht aus der Ermittlung der realen Systemverhalten beider Systeme. Auf basis der daraus entstehenden Übertragungsfunktionen können Simulinkmodelle erstellt werden, anhand derer die Einflüsse der gewählten Regelung veranschaulicht werden. Auf diesem Weg lassen sich erste Abschätzungen für beispielsweise die Wahl der Regelparameter von Reglern mit Proportionalitäts, Integral oder Derivatteil (PID-Regler) treffen.

Auf Basis dieser Abschätzungen können im Anschluss die ermittelten Regelungen an den dafür vorgesehenen Stellen im Code des MATLAB® GUI integriert und am aufgebauten System erprobt und angepasst werden.

Insbesondere für die Temperaturregelung eignet sich hierbei die Abschlussarbeit von Felix Müller (vgl. Müller 2020, S45f) als Leitfaden für dieses Vorgehen.

8.3 Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung besteht aus zwei Teilen, zum einen aus der Datenbereitstellung, welche die Daten der Referenzsensoren ausließt und die gespeicherten Daten der zu kalibrierenden Sensoren vom Raspberry Pi abholt und so aufbereitet, dass andere Programmabschnitte diese Nutzen können.

Der zweite Teil, ist die Datenübergabe. Hier werden die von anderen Programmteilen bereitgestellten Parameter für den Prüfstand in Befehle für den Raspberry Pi umgewandelt und an ihn gesendet.

8.3.1 Datenbereitstellung

Um vom MATLAB® GUI mit der Hardware kommunizieren zu können, müssen drei Routinen für die Kommunikationen mit Raspberry Pi und NI-Messkarte programmiert werden. Diese sind nötig für das Übergeben der Steuerbefehle an den Raspberry Pi, das Auslesen der Daten der zu kalibrierenden Sensoren vom Raspberry Pi und das Auslesen der Referenzsensoren aus der NI-Messkarte. Der Aufbau dieser Routinen wird im Folgenden erläutert.

8.3.1.1 Raspberry Pi

Um die Daten vom Raspberry Pi nach MATLAB® zu übertragen wird in MATLAB® zunächst kontrolliert, ob man mit dem Raspberry Pi verbunden ist. Wenn dies der Fall ist, startet MATLAB® auf dem Raspberry Pi ein Python Skript, welches die CSV-Datei mit allen Werten seit der letzten Lesung, ausliest und an MATLAB® übergibt. Im Zuge dessen, wird die CSV-Datei vom Python Skript geleert. Die an MATLAB® übergebenen Daten werden nun sortiert und zu der schon vorhandenen Datenmatrix hinzugefügt. Sollte es noch keine Matrix geben, wird diese erstellt. Auf diese Matrix können im Anschluss die anderen Programmteile zugreifen.

Zum Aktuellen Zeitpunkt werden nur die Spannungsdaten für Temperatur und Druck übertragen. Später müssen hierrüber jedoch auch noch Durchfluss und Füllstand des Boilers übertragen werden. Da der benutzte Quellcode, wenn auch mit einigen Anpassungen von einem bereits existierenden Programm stammt, welches zwar nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet, jedoch nicht dieselben Daten wie in diesem Projekt überträgt, ist es erforderlich den aktuellen Code zuerst zu testen und ein Format für die CSV-Datei festzulegen und dann den Code entsprechend zu erweitern.

Die oben beschriebene funktionsweise entspricht der Funktion „raspberry_get“.

8.3.1.2 NI-Messkarte

Die Datenabfrage der NI-Messkarte soll in der Funktion „ni_card_get“ realisiert werden. Sie läuft in einem Scheduler im Hintergrund ab Programmstart mit. Realisiert wird die Datenabfrage vorrausichtlich mittels eines MATLAB® Plug-ins für die NI-Messkarte. Nach Ermittlung der Rohdaten in Form der Spannungen, die an den Referenzsensoren anliegen, müssen diese noch mittels Kennlinien in Temperatur in [°C] und Druck in [bar] umgewandelt werden. Diese werden in eine Matrix eingepflegt. Bei jeder Abfrage der Daten, wird zu dem noch ein Zeitstempel generiert, der in eine separate Matrix geschrieben wird. Dies geschieht, da es bei der Programmierung des Dummys nicht gelang verschiedene Datentypen in dieselbe Matrix zu schreiben.

Im Moment existiert nur ein Dummy der Funktion, da eine Programmierung nur zusammen mit der Hardware erfolgen kann.

8.3.2 Datenübergabe

Die Datenübergabe befindet sich in der Funktion „raspberry_put“. Sie startet ebenfalls bei Programmstart und läuft mittels Scheduler im Hintergrund. Bei jedem durchlauf kontrolliert sie zunächst, ob eine Verbindung zum Raspberry Pi besteht. Sollte dies der Fall sein, wird als nächstes die Stellung des Notaus überprüft.

Wenn alles in Ordnung ist, wird erst kontrolliert, ob sich Leistungswerte geändert haben und nur im Fall einer Änderung wird auf dem Raspberry Pi das entsprechende Python Skript mit den neuen Parametern aufgerufen. Gleiches gilt für die Ventile. Dies hat den Vorteil, dass unnötige Befehle auf dem Raspberry Pi nicht ausgeführt werden, was für einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil sorgt.

Sollte der Notaus jedoch ausgelöst worden sein, werden alle Vorgaben ignoriert und stattdessen voreingestellte Parameter benutzt, die die Leistung der Pumpe und des Heizelements auf null schalten. Außerdem werden sämtliche Ventile stromlos geschaltet woraufhin diese in ihre Normalposition gehen.

8.4 Kalibriervorgang

Die Kalibrierung findet auf der Oberfläche Kalibriermodus statt. Nach Abarbeiten der Checkliste ist es möglich die Kalibrierung zu starten. Dies bewirkt, dass zunächst die Einstellungen, die während der Kalibrierung nicht mehr geändert werden dürfen, gesperrt werden. Im zweiten Schritt erfolgt die Schaltung der Ventile entsprechend der Kreislaufwahl.

Im Anschluss muss je nachdem ob eine Temperatur oder Druckkalibrierung erfolgen soll die passende Regelung als Scheduler gestartet werden, außerdem werden die beiden Matrizen, in denen die Daten zur Erstellung der Kennlinie erforderlich sind, geleert.

Im manuellen Modus fährt die Regelung den Punkt an, der unter „Anzufahrender Kalibrierpunkt“ eingegeben wurde und mittels „Punkt anfahren“ bestätigt wurde. Nach Erreichen des gewünschten Kalibrierpunkts, liegt es nun am Prüfer mittels des Verlaufdiagramms zu beurteilen, ob die gewünschten Werte nun mit der geforderten Präzision über einen Zeitraum von 5 Sekunden gehalten werden. Ist dies der Fall, kann der Kalibrierpunkt gesetzt werden.

Dies startet zunächst die Funktion „kalibrierpunkt_setzen“. Als erstes wird ermittelt, wie viele Einträge in die Datenmatrizen, in denen die Werte der Referenzsensoren und der zu kalibrierenden Sensoren gespeichert sind, in den vergangenen fünf Sekunden hinterlegt wurden. Im zweiten Schritt werden dann daraus resultierend die Durchschnittswerte über die letzten fünf Sekunden gebildet. Die für die Interpolation der Kennlinie nötigen Ergebnisse werden dann in zwei Datenmatrizen hinzugefügt.

Hiernach wird die Funktion „kennlinie_generieren“ gestartet. Diese generiert zunächst einen Vektor mit 4096 Elementen von 0 bis 4095 in Schritten der Schrittgröße 1. Dies entspricht dem möglichen messbaren Spannungsbereich von 0 bis zu +4095[mV] des eingesetzten AD-Wandlers. Danach wird mithilfe einer in MATLAB® integrierten Interpolationsfunktion und den Matrizen, die beim Kalibrierpunkt setzen erzeugt wurden, jedem Spannungswert des zuvor erzeugten Vektors eine bestimmte Temperatur in [°C] oder ein Druck in [bar] zugewiesen. Das Ergebnis, die erstellte Kennlinie wird dann in einer neuen Matrix gespeichert.

Nach Beendigung der Funktion „kennlinie_generieren“ wird die erstellte Kennlinie als Graph im Kennliniendiagramm dargestellt.

Der automatische Modus soll ähnlich ablaufen. Es wird beim Start der Kalibrierung ein Scheduler im Hintergrund gestartet. Die anzufahrenden Kalibrierpunkte sind hier jedoch bereits im Code hinterlegt und werden automatisch an die Regelung übergeben. Das Erkennen ob die Schwankungen um den gewünschten Kalibrierpunkt klein genug sind, um kalibrieren zu können, obliegt einem Algorithmus, der sich zum Beispiel die Standardabweichung oder Durchschnittswerte zu Nutze macht. Dieser Algorithmus muss in Verbindung mit der Hardware programmiert werden. Dies ist noch nicht geschehen, da der entsprechende Code in Verbindung mit der Hardware geschrieben werden muss.

Wird jedoch erkannt, dass die Schwankungen innerhalb der gewünschten Parameter liegen, werden dieselben Befehle ausgeführt, wie wenn manuell der Kalibriepunkt gesetzt würde. Nach dem der letzte voreingestellte Kalibrierpunkt kalibriert wurde, werden automatisch der Scheduler und die Kalibrierung beendet.

Speichern lässt sich die Kennlinie sowohl während der laufenden Kalibrierung als auch nach ihrer Beendigung. Hierzu öffnet sich nach Auswahl des entsprechenden Buttons zunächst ein Fenster, in dem Name und Speicherort, der Kennlinie gewählt werden muss. Alle Daten die Gespeichert werden sollen werden zunächst in ein cell-array überführt und dann als Datei mit CSV-Format gespeichert.

Damit ist der Kalibrierprozess abgeschlossen. Der Raspberry Pi und der Prüfstand können nacheinander ausgeschaltet werde.

9 Testprogramm

Da sich im Rahmen der Projektarbeit sowohl der Zugang zur Hardware als das Bestellen und Fertigen dieser als schwierig erwiesen hat, konnte nur eine sehr begrenzte Anzahl an Tests durch die Projektgruppe durchgeführt werden. Um das Nachholen der erforderlichen Tests für Folgeprojekte zu erleichtern, wurde daher ein Testprogramm erarbeitet. Das Testprogramm umfasst hierbei die nötigen Tests zur Ermittlung der realen Funktionalität des Prüfstandes, so wie Versuche, die für die Weiterentwicklung des Prüfstandes als Grundlage dienen sollen.

Tabelle 9.1: Testprogramm

Feature/Testobjekt	Geprüft am	Geprüft von
Hardware		
Prüfung Wegeventile auf Funktion und Dichtheit: <ol style="list-style-type: none"> 1. 3/2 Wegeventil Ansaugweiche 2. 3/2 Wegeventil Strangwechsel 3. 2/2 Druckstrangentlüftungsventil 4. 3/2 Wegeventil Entleerweiche 5. 2/2 Be/Entlüftungsventil 		
Prüfung Dosierventil bezüglich Druckregulierung		

Prüfung Sensoreinbindungen und Adapter auf Dichtheit		
Test des Überdruckventils des Boilers		
Test des Unterdruckventils des Boilers		
Test des Überhitzungsschutz des Boilers		

Elektrik		
Testen der Kommunikation zwischen den Elektrikkomponenten		
Prüfen der Kommunikation zwischen Elektrik und Hardwarekomponenten: <ol style="list-style-type: none"> 1. Ansprechen der Ventile 2. Auslesen der Sensorik 		
Testen des Physischen Not-Aus		

Software		
<i>Grundsystem/Graphical User Interface</i>		
Testen der Kommunikation zwischen MATLAB® und Raspberry Pi		
Testen der Datenabfrage von MATLAB® an NI-Messkarte		
Testen des Software Not-Aus		
Testen der Wegeventilansprache für: <ol style="list-style-type: none"> 1. 3/2 Wegeventil Ansaugweiche 2. 3/2 Wegeventil Strangwechsel 3. 2/2 Druckstrangentlüftungsventil 4. 3/2 Wegeventil Entleerweiche 5. 2/2 Be/Entlüftungsventil 		
Testen der Pumpensteuerung		
Testen der Heizleistungssteuerung		
Testen der Drucksteuerung durch Ansteuerung des Dosierventils		
Prüfen der Sensorauslesung für: <ol style="list-style-type: none"> 1. Referenz Temperatur 2. Prüfling Temperatur 3. Referenz Druck 4. Prüfling Druck 5. Durchflussrate 6. Boilerfüllstand 		
Prüfen der Systemansteuerung und Sensorauslesung in den Softwareteilen: <ol style="list-style-type: none"> 1. Startseite 2. Kalibrieren 3. Wasserwechsel 4. Manueller Modus 		
Ermittlung der Pumpendrehzahlabhängigen		

Durchflussrate.		
-----------------	--	--

Regelung		
Ermittlung der Pumpendrehzahlabhängigen Druckschwingungen im Druckmessstrang für die Regelung		
Prüfen des Druckverhaltens in Abhängigkeit des Drosselventils bei verschiedenen Pumpendrehzahlen.		
Ermittlung der Sprungantwort des thermodynamischen Systems der Hydraulik zur Ermittlung einer Übertragungsfunktion des Systems für die Regelung		
Ermittlung der Sprungantwort des Drucks in der Hydraulik zur Ermittlung einer Übertragungsfunktion des Systems für die Regelung		

Datenverarbeitung		
Generierung einer Kennlinie im Kalibriermodus der Software durch manuelles setzen der Messpunkte		
Laden einer Kennlinie in der Software im Datenansicht Modus		

10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes zur Kalibrierung von Druck Temperatursensoren wurden trotz der durch die Corona Situation herausfordernden Projektbedingungen die Grundsteine für ein Kalibriersystem für das Forschungsprojekt der technischen Beeinflussbarkeit der Geschmackssache Kaffee gelegt. Grundlage für das Kalibriersystem war hierbei ein bestehender Pumpenprüfstand im **Verbundlabor Fahrzeugtechnik, Akustik und Dynamik**. Auf das Ziel eines durch Teilautomatisierung und gute Raumnutzung einfach bedienbaren Kalibrierstandes wurde durch die Inhalte der Projektarbeit kontinuierlich hingearbeitet.

Im Bereich der Hardware wurde hierfür ein Hydrauliksystem mit zwei Messsträngen und automatischer Befüll- und Entleerfunktion ausgelegt, welches entsprechend des Bedarfs modular um weitere Komponenten ergänzt werden kann. In das System wurden Sensoren und Boiler eingebunden und in eine Rahmenstruktur integriert, die eine gute und sichere Bedienung des Kalibriersystems ermöglicht.

Die für das Kalibriersystem vorgesehene Elektrik wurden die Zusammenhänge der verschiedenen Komponenten erarbeitet und basierend auf den gewonnen Erkenntnissen Konzepte zur Positionierung der Komponenten zueinander und zum Gesamtsystem der Kalibrierung erstellt.

Für die Steuerung des Systems wurde im MATLAB® App Designer eine Software erstellt. Im Rahmen dieser Software wurde ein Graphical User Interface mit den verschiedenen Bedienmodi Kalibrierung, Wasserwechsel, Manueller Modus und Dateneinsicht programmiert. Darüber hinaus wurden die Grundlagen für eine Druck und Temperaturregelung sowie die

Datenverarbeitung zur Generierung der für die Kalibrierung zentralen Kennlinien erzeugt. Den genannten Systemen wurde ein Testprogramm beigelegt, um die durch die Projektsituation ausstehenden Tests für Folgeprojekte zu strukturieren.

Im Rahmen des Projekts sind jedoch eine Anzahl von für einen Vollfunktionsfähigen Prüfstand erforderlichen Tasks nicht abgeschlossen worden. Die Hardware wurde im Rahmen der Projektarbeit abschließend definiert, konnte jedoch bis zum Zeitpunkt der Projektdokumentationsabgabe nicht vollständig gefertigt und aufgebaut werden. Im Bereich der Elektrik muss im Weiteren auf Basis des Elektrikkonzepts ein Schaltplan für die Verbindungen der Komponenten untereinander erzeugt werden. Die hierfür konstruierten Elektrikgrundplatten müssen angepasst und bei Bedarf um ein Schutzgehäuse ergänzt werden.

Die Software enthält verschiedenen Dummy Codeelemente für Teile der Regelung, Datenübernahme und Datenverarbeitung. Die Software muss um die fehlenden Funktionen erweitert werden, um die volle angestrebte Funktionalität zu erhalten.

Eine genauere Beschreibung der offenen Tasks findet sich in den jeweils zugehörigen Kapiteln der Projektdokumentation.

Basis aller weiterführender Entwicklung hin zu einem vollständigen Kalibrierstand ist die Ermittlung der Funktionsfähigkeit der vorhandenen Systeme auf Basis von Experimenten am aufgebauten System. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen der Software ein besonderes Augenmerk auf den primär für Systemtests erstellten Manuellen Modus gelegt, um die Durchführung von Tests zu erleichtern. Anhand der aus den Versuchen gewonnen Daten können die weiteren Schritte zur Vervollständigung des Kalibrierstandes ermittelt werden.

Diese Projektarbeit ist daher als Grundlage für folgende Projekte zur Komplettierung des Kalibrierstandes zu sehen. Werden im weiteren Verlauf die fehlenden Bausteine erfolgreich in die dafür vorgesehenen Lücken integriert, kann das Kalibriersystem mit seiner angestrebten Funktionalität in den Kalibrierbetrieb für das Forschungsprojekt der technischen Beeinflussbarkeit der Geschmackssache Kaffee eintreten.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip Kalibrierung durch Referenzsensoren	8
Abbildung 2: Grundstruktur Kalibriersystem	9
Abbildung 3: Schema des Schaltungsteiles zur Befüllung und Entleerung des Prüfstandes ...	11
Abbildung 4: Schema der Messstränge.....	12
Abbildung 5: Schema des Druckstranges	14
Abbildung 6: Schema des Temperaturstranges	15
Abbildung 7: Gesamtsystem Hydraulik	15
Abbildung 8: Boiler mit Isolierung.....	17
Abbildung 9: Modell der dünnwandigen Rohre.....	19
Abbildung 10: Spannungen am kritischen Querschnitt	19
Abbildung 11: Drucksensor in T-Stück	20
Abbildung 12: Gehäuse für Referenztemperaturgeber	21
Abbildung 13: Gehäuse zur Prüfung von Sensoren mit Messspitze	21
Abbildung 14: Gesamtüberblick über das CAD-Modells des Prüfstandes	22
Abbildung 15: Ven	23
Abbildung 16: Aufbauplan der Elektrik	26
Abbildung 17: Softwareübersicht.....	30
Abbildung 18: GUI Startseite	31
Abbildung 19: GUI Kalibriermodus.....	32
Abbildung 20: GUI Wasserwechsel	33
Abbildung 21: Manueller Modus	34
Abbildung 22: Datenansicht	35
Abbildung 23: Regelung Schematisch	35
Abbildung 24: Thermodynamisches System der Hydraulik	36
Abbildung 25: Drucksystem der Hydraulik.....	38

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Verzeichnis der Formelzeichen.....	5
Tabelle 6.1: Sensorübersicht	18
Tabelle 9.1: Testprogramm	42

13 Quellenverzeichnis

13.1 Literatur



Hakenesch, Peter (2014):
Strömungsmechanik für Dummies, 1. Auflage, Weinheim, WILEY-VCH Verlag

Gomeringer, Roland / Max Heinzler/ Roland Kilgus/ Volker Menges/ Friedrich Näher/ Stefan Oesterle/ Claudius Scholer/ Andreas Stephan/ Falko Wieneke (2014):
Tabellenbuch Metall, 46. Auflage, Haan-Gruiten, Verlag Europa Lehrmittel

Gross, Dietmar/Werner Hauger/Jörg Schröder/ Wolfgang Wall (2017):
Technische Mechanik2, 13. Auflage, Berlin, Springer Vieweg

Krzavic, Dino (2020):
Bachelorarbeit Entwicklung einer Systemsteuerung einer Espressomaschine

Müller, Felix (2020):
Entwicklung zweier Temperaturregelungen (Folgeregelungen) mithilfe von Python und MATLAB®, Abschlussarbeit

Schaeffler (Hrsg.)/ Harald Meerkam (2014):
Technisches Taschenbuch,2. Auflage, Herzogenaurach,Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG

Wagner, Walter (2018):
Festigkeitsberechnungen im Apparate- und Rohrleitungsbau, 9.Auflage, Würzburg, Vogel Business Media

Wittel, Herbert/ Dieter Jannasch/ Joachim Voßiek/ Christian Spura, 2017:
Roloff/Matek Maschinenelemente Tabellenbuch, 23. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden

13.2 Online

Campusplastic.com:
<https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/VES-TAMID%C2%AE+L1723+black+9%252E7624/Evonik+Operations+GmbH/66/b0b022d3>,
12.02.2021

14 Anhang

14.1 Festigkeitsabschätzung

Drucksensorgehäuse

Als Berechnungsgrundlage dient das unter Kapitel 5.1.4.1 erläuterte Modell auf Basis der Kesselgleichung.

Die Kesselgleichungen beruhen auf den Theorien der dünnwandigen Schalen (vgl. Wagner, 2018, S.22), weshalb diese Formeln für Rohre mit einem Durchmesser Verhältnis von

$$\frac{D_A}{D_i} \leq 1,2 \quad (9.2)$$

anwendbar sind (vgl. Schaeffler/ Meerkam, 2014). Mit Hilfe dieses Verhältnisses lässt sich aus dem Innendurchmesser, der von Sensoren und Schnellkupplungen vorgegeben wird, ein Außendurchmesser und mittlerer Durchmesser bestimmen, welcher für die Kesselgleichungen benötigt wird. (Innendurchmesser entspricht hier dem Kernlochdurchmesser von G=1/4“. Nach DIN ISO 228-1 bedeutet das 11,445 [mm] (vgl. Gomeringer et al., 2014, S.208)).

Aus (9.1) ergibt sich der Außendurchmesser zu

$$D_A = D_i \cdot 1,2 = 11,445 \text{ [mm]} \cdot 1,2 = 13,734 \text{ [mm]}$$

Mit Außen- und Innendurchmesser erhält man den mittleren Durchmesser

$$D_m = \frac{D_A + D_i}{2} \quad (9.3)$$

$$= \frac{13,734 \text{ [mm]} + 11,445 \text{ [mm]}}{2} = 12,59 \text{ [mm]}$$

und die Wandstärke

$$s = D_m - D_i \quad (9.4)$$

$$= 12,59 \text{ [mm]} - 11,445 \text{ [mm]} = 1,15 \text{ [mm]}$$

Durch den beschränkten Messbereich der Referenzsensoren wird der spätere Systemdruck auf maximal 10 [bar] begrenzt werden, was $p=1 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ entspricht.

Eingesetzt in die Kesselgleichung nach Gross et al.

$$\sigma_p = \frac{p \cdot D_m}{2 \cdot s} \quad (9.5)$$

(vgl. Gross et al., 2017, S.56f) ergibt sich die maximale Tangentialspannung aus dem Innendruck zu

$$\sigma_p = \frac{1 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \cdot 12,59 \text{ [mm]}}{2 \cdot 1,15 \text{ [mm]}} = 5,47 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Durch den Druck wirken allerdings auch Kräfte auf die ebenen Stirnflächen der eingeschraubten Schlauchkupplungen und des Sensors, welche über die Gewinde auf das Gehäuse übertragen und dieses zusätzlich unter mechanische Spannung setzen. Deshalb müssen diese zunächst auch betrachtet werden.

Allgemein ist der Druck definiert als:

$$p = \frac{F}{A} \quad (9.6)$$

$$F = p \cdot A \quad (9.7)$$

Die Stirnfläche A_s des Sensors entspricht einer Kreisfläche mit dem D_i als Durchmesser

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} \quad (9.8)$$

$$A_s = \frac{D_i^2 \pi}{4} = \frac{(11,445 \text{ [mm]})^2 \pi}{4} = 102,88 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Die Fläche der Kupplungen A_K ergibt sich ebenfalls aus einem Kreis, aber abzüglich der Fläche der Öffnung für den Schlauch mit dem Durchmesser D_s .

$$A_K = \frac{(D_i^2 - D_s^2) \pi}{4} = \frac{(11,445 \text{ [mm]}^2 - 6,0 \text{ [mm]}^2) \pi}{4} = 74,6 \text{ [mm]}^2$$

Aus diesen Flächen und dem Betriebsdruck lassen sich die Kräfte mit Hilfe von Gleichung (9.6) zu

$$F_S = p \cdot A_s = 1 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \cdot 102,88 \text{ [mm}^2\text{]} = 102,88 \text{ [N]}$$

$$F_K = p \cdot A_K = 1 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \cdot 74,6 \text{ [mm]}^2 = 74,6 \text{ [N]}$$

berechnen. Mit der Fläche der dünnwandigen Röhren

$$A_r = \frac{(D_A^2 - D_i^2) \cdot \pi}{4} = \frac{[(13,734 \text{ [mm]})^2 - (11,445 \text{ [mm]})^2] \cdot \pi}{4} = 45,27 \text{ [mm}^2\text{]}$$

ergibt sich aus der Kraft auf den Sensor eine axiale Spannung in z-Richtung

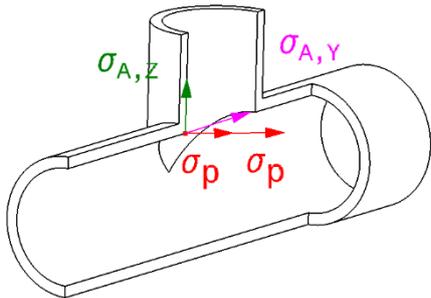
$$\sigma_{A,z} = \frac{F_S}{A_r} = \frac{102,88 \text{ [N]}}{45,27 \text{ [mm}^2\text{]}} = 2,27 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

und aus der Kraft auf die Kupplungen eine axiale Spannung in y-Richtung

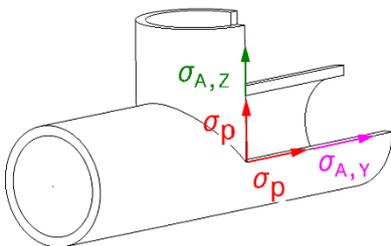
$$\sigma_{A,Y} = \frac{F_K}{A_r} = \frac{74,6 \text{ [N]} \text{ [N]}}{45,27 \text{ [mm}^2\text{]}} = 1,65 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

Die Spannungen können an zwei Positionen zu besonders großen resultierenden Spannungen führen:

Position 1: Die Tangentialspannungen zeigen in dieselbe Richtung



Position 2: Die Spannungen stehen im rechten Winkel aufeinander



Entsprechend ihrer Lage werden die Spannungen geometrisch addiert:

$$\sigma_{max,I} = \sqrt{(2 \cdot \sigma_p)^2 + \sigma_{A,Z}^2 + \sigma_{A,Y}^2} \quad (9.9)$$

$$= \sqrt{\left(2 \cdot 5,47 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]\right)^2 + \left(2,27 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]\right)^2 + \left(1,65 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]\right)^2} = 11,29 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\sigma_{max,II} = \sqrt{(\sigma_p + \sigma_{A,Z})^2 + (\sigma_p + \sigma_{A,Y})^2} \quad (9.10)$$

$$= \sqrt{\left(5,47 \left[\frac{N}{mm^2}\right] + 2,27 \left[\frac{N}{mm^2}\right]\right)^2 + \left(5,47 \left[\frac{N}{mm^2}\right] + 1,65 \left[\frac{N}{mm^2}\right]\right)^2} = 10,52 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$$

Somit tritt die maximale und damit dimensionierende Spannung mit $\sigma_{max,I} \approx 11 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$ an Position 1 des Drucksensorgehäuses auf.

Nach (Wagner, 2018, S.160) ist beim Apparatebau für den Betrieb mit unterschiedlichen Lasten und äußeren Einflüssen eine zweifache Sicherheit üblich. Das bedeutet ein Werkstoff für Gehäuse zur Druckkalibrierung muss eine Festigkeit

$$R = 2 \cdot \sigma_{max,I} \quad (9.11)$$

$$= 2 \cdot 11 \left[\frac{N}{mm^2}\right] = 22 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$$

aufweisen.

Temperatursensorgehäuse

Der Druck bei der Temperaturkalibrierung ist zurzeit noch unbekannt. Deshalb erfolgt zunächst die Bestimmung der geometrischen Größen für die Spannungsberechnung. Anschließend werden die Gleichungen, wie sie auch für das Druckgehäuse genutzt wurden, zur Berechnung der maximalen Spannung als Funktion des Druckes aufgestellt. Mit Hilfe von MATLAB® lassen sich diese Funktionen für einen gewünschten Druckbereich plotten. Anhand des Diagramms können Trends erkannt und Größenordnungen beurteilt werden.

Geometrische Größen zum Einsetzen in die Kesselgleichung:

Sensor und Kupplungen mit G 1/8" Gewinden => $D_I=8,566$ (vgl. Gomeringer, 2014, S.208)

$$D_A = D_I \cdot 1,2 = 8,566 \text{ [mm]} \cdot 1,2 = 10,28 \text{ [mm]}$$

$$D_m = \frac{D_A + D_i}{2} = \frac{10,28 \text{ [mm]} + 8,566 \text{ [mm]}}{2} = 9,42 \text{ [mm]}$$

$$s = D_m - D_i = 9,42 \text{ [mm]} - 8,566 \text{ [mm]} = 1,15 \text{ [mm]}$$

$$A_s = \frac{D_i^2 \pi}{4} = \frac{(8,566 \text{ [mm]})^2 \pi}{4} = 57,63 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_K = \frac{(D_i^2 - D_s^2) \pi}{4} = \frac{(8,566 [mm]^2 - 6,0 [mm]^2) \pi}{4} = 29,36 [mm]$$

$$A_r = \frac{(D_A^2 - D_i^2) \cdot \pi}{4} = \frac{[(10,28[mm])^2 - (8,566[mm])^2] \cdot \pi}{4} = 25,37[mm^2]$$

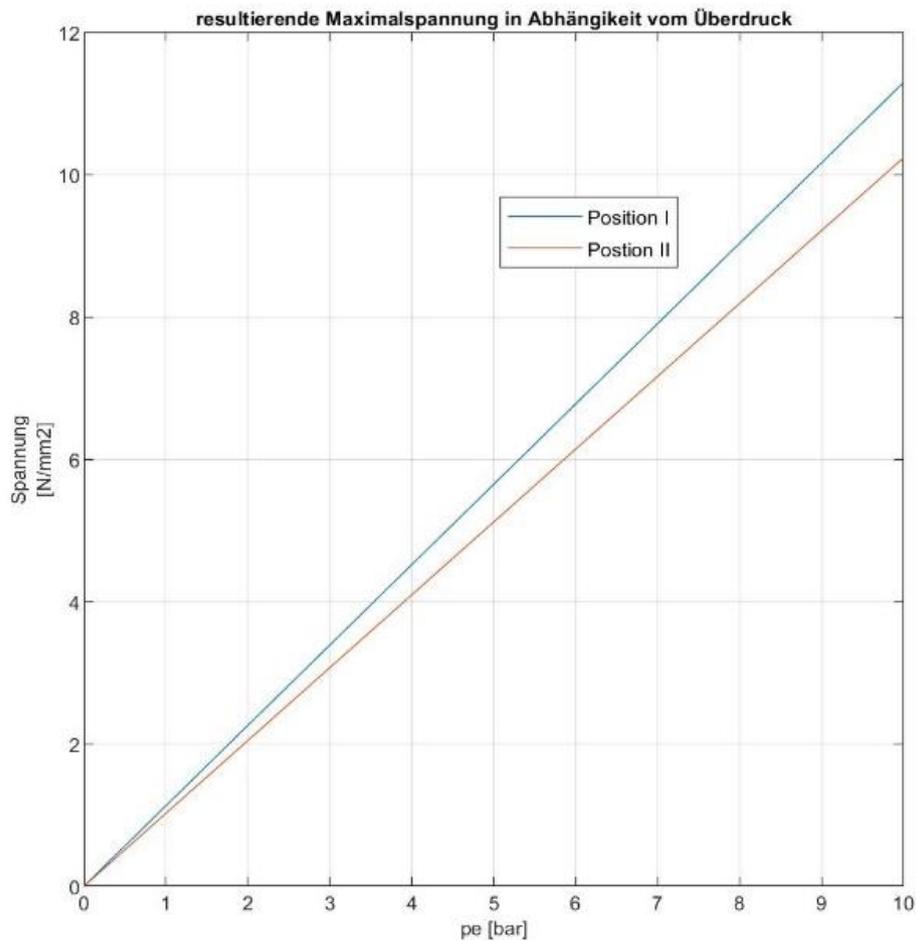
$$\sigma_p(p) = \frac{p \cdot 9,42}{2 \cdot 1,15}$$

$$\sigma_{A,Z}(p) = \frac{F_s}{A_r} = \frac{p \cdot A_s}{A_r} = \frac{p \cdot 57,63}{25,37}$$

$$\sigma_{A,Y}(p) = \frac{F_K}{A_r} = \frac{p \cdot 29,36}{25,37}$$

$$\sigma_{max,I}(p) = \sqrt{(2 \cdot \sigma_p)^2 + \sigma_{A,Z}^2 + \sigma_{A,Y}^2} = \sqrt{\left(2 \cdot \frac{p \cdot 9,42}{2 \cdot 1,15}\right)^2 + \left(\frac{p \cdot 57,63}{25,37}\right)^2 + \left(\frac{p \cdot 29,36}{25,37}\right)^2}$$

$$\sigma_{max,II}(p) = \sqrt{\left(\frac{p \cdot 9,42}{2 \cdot 1,15} + \frac{p \cdot 57,63}{25,37}\right)^2 + \left(\frac{p \cdot 9,42}{2 \cdot 1,15} + \frac{p \cdot 29,36}{25,37}\right)^2}$$



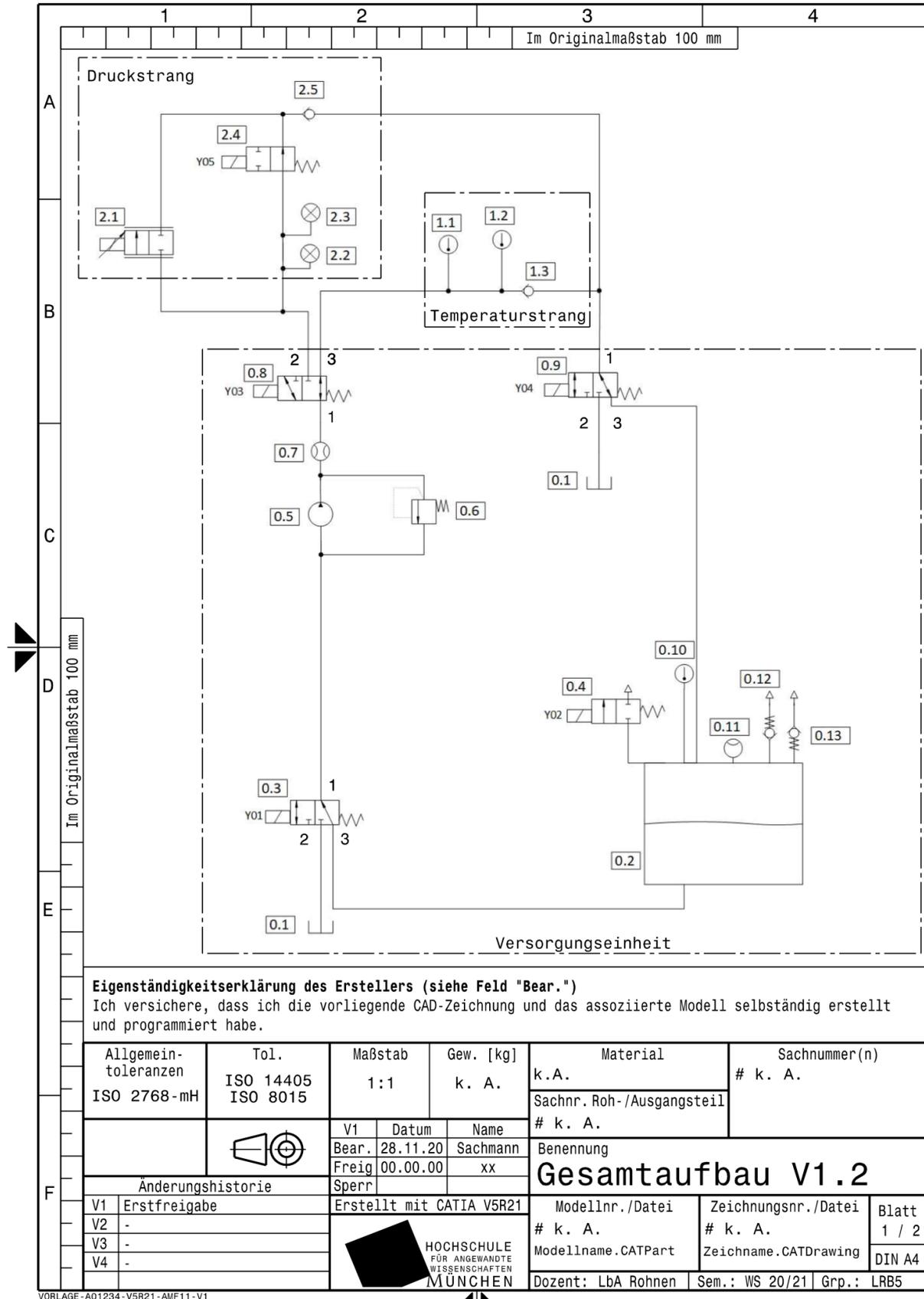
Das Diagramm zeigt nur die Abhängigkeit der Spannung vom Druck. Eine Sicherheit wurde dabei nicht miteinbezogen.

Gehäuse für zu prüfenden Einschraubtemperatursensor und Projekt Messsystem

Hier kann sich auf die vorherigen Rechnungen gestützt werden. Die Bohrungen weisen wie der Drucksensor ein G1/4“ Gewinde auf. Bei den Kupplungen wird auf das gleiche Maß zurückgegriffen, um die Fertigung einfach zu halten. Dadurch ergebend sich aus dem Druck die gleichen Kräfte wie zuvor. Der asymmetrische Aufbau sorgt zwar dafür, dass sich die Kräfte im Gehäuse nicht gegenseitig kompensieren und über Verbindungselemente ausgeleitet werden müssen, das Gehäuse steht deshalb dennoch unter den Gleichen Spannungen.

Eine Bewertung der Ergebnisse wird in Kapitel 5.1.4.2 geschildert.

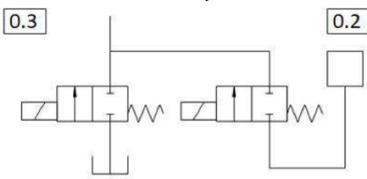
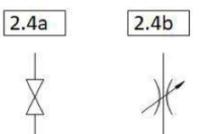
14.2 Hydraulikplan



Eigenständigkeitserklärung des Erstellers (siehe Feld "Bear.")
 Ich versichere, dass ich die vorliegende CAD-Zeichnung und das assoziierte Modell selbständig erstellt und programmiert habe.

Allgemeintoleranzen ISO 2768-mH	Tol. ISO 14405 ISO 8015	Maßstab 1:1	Gew. [kg] k. A.	Material	Sachnummer(n)
				k. A.	# k. A.
				Sachnr. Roh-/Ausgangsteil	# k. A.
				Benennung	
				Gesamtaufbau V1.2	
Änderungshistorie		Sperr		Modellnr./Datei	Zeichnungsnr./Datei
V1	Erstfreigabe	Erstellt mit CATIA V5R21		# k. A.	# k. A.
V2	-			Modellname.CATPart	Zeichname.CATDrawing
V3	-			Dozent: LbA Rohnen	Sem.: WS 20/21
V4	-			Grp.: LRB5	Blatt 1 / 2
		HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN MÜNCHEN		DIN A4	

VORLAGE-A01234-V5R21-AMF11-V1

1	2	3	4																																																																		
Im Originalmaßstab 100 mm																																																																					
A	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Positionsnummer</th> <th style="width: 35%;">Bezeichnung</th> <th style="width: 50%;">Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.1</td><td>Tank</td><td>externes Reservoir</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>Behälter</td><td>Boiler</td></tr> <tr><td>0.3</td><td>3/2-Wegeventil</td><td>Umschaltventil Befüllen/Boiler</td></tr> <tr><td>0.4</td><td>2/2-Wegeventil (nc)</td><td>Boilerbe-/entlüftung</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>Pumpe</td><td></td></tr> <tr><td>0.6</td><td>Druckbegrenzungsventil</td><td>Pumpeninternes Umgehungsventil</td></tr> <tr><td>0.7</td><td>Durchflussgeber</td><td></td></tr> <tr><td>0.8</td><td>3/2-Wegeventil</td><td>Umschaltventil Druck-/ Temperaturstrang</td></tr> <tr><td>0.9</td><td>3/2-Wegeventil</td><td>Umschaltventil Entleeren/ Boiler</td></tr> <tr><td>0.10</td><td>Temperatursensor</td><td>Boilertemperatur</td></tr> <tr><td>0.11</td><td>Füllstandsgeber</td><td></td></tr> <tr><td>0.12</td><td>Rückschlagventil</td><td>Überdruckventil</td></tr> <tr><td>0.13</td><td>Rückschlagventil</td><td>Antivakuumventil</td></tr> <tr><td>1.1</td><td>Temperatursensor</td><td>Referenztemperatur</td></tr> <tr><td>1.2</td><td>Temperatursensor</td><td>zu kalibrierender Sensor</td></tr> <tr><td>1.3</td><td>Rückschlagventil</td><td></td></tr> <tr><td>2.1</td><td>Proportionalventil</td><td>vorgesteuerte Drosselung im Druckstrang</td></tr> <tr><td>2.2</td><td>Drucksensor</td><td>Referenzdruck</td></tr> <tr><td>2.3</td><td>Drucksensor</td><td>zu kalibrierender Sensor</td></tr> <tr><td>2.4</td><td>2/2-Wegeventil (no)</td><td>Sperrventil zur statischen Druckmessung</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>Rückschlagventil</td><td></td></tr> </tbody> </table>			Positionsnummer	Bezeichnung	Beschreibung	0.1	Tank	externes Reservoir	0.2	Behälter	Boiler	0.3	3/2-Wegeventil	Umschaltventil Befüllen/Boiler	0.4	2/2-Wegeventil (nc)	Boilerbe-/entlüftung	0.5	Pumpe		0.6	Druckbegrenzungsventil	Pumpeninternes Umgehungsventil	0.7	Durchflussgeber		0.8	3/2-Wegeventil	Umschaltventil Druck-/ Temperaturstrang	0.9	3/2-Wegeventil	Umschaltventil Entleeren/ Boiler	0.10	Temperatursensor	Boilertemperatur	0.11	Füllstandsgeber		0.12	Rückschlagventil	Überdruckventil	0.13	Rückschlagventil	Antivakuumventil	1.1	Temperatursensor	Referenztemperatur	1.2	Temperatursensor	zu kalibrierender Sensor	1.3	Rückschlagventil		2.1	Proportionalventil	vorgesteuerte Drosselung im Druckstrang	2.2	Drucksensor	Referenzdruck	2.3	Drucksensor	zu kalibrierender Sensor	2.4	2/2-Wegeventil (no)	Sperrventil zur statischen Druckmessung	2.5	Rückschlagventil	
Positionsnummer	Bezeichnung	Beschreibung																																																																			
0.1	Tank	externes Reservoir																																																																			
0.2	Behälter	Boiler																																																																			
0.3	3/2-Wegeventil	Umschaltventil Befüllen/Boiler																																																																			
0.4	2/2-Wegeventil (nc)	Boilerbe-/entlüftung																																																																			
0.5	Pumpe																																																																				
0.6	Druckbegrenzungsventil	Pumpeninternes Umgehungsventil																																																																			
0.7	Durchflussgeber																																																																				
0.8	3/2-Wegeventil	Umschaltventil Druck-/ Temperaturstrang																																																																			
0.9	3/2-Wegeventil	Umschaltventil Entleeren/ Boiler																																																																			
0.10	Temperatursensor	Boilertemperatur																																																																			
0.11	Füllstandsgeber																																																																				
0.12	Rückschlagventil	Überdruckventil																																																																			
0.13	Rückschlagventil	Antivakuumventil																																																																			
1.1	Temperatursensor	Referenztemperatur																																																																			
1.2	Temperatursensor	zu kalibrierender Sensor																																																																			
1.3	Rückschlagventil																																																																				
2.1	Proportionalventil	vorgesteuerte Drosselung im Druckstrang																																																																			
2.2	Drucksensor	Referenzdruck																																																																			
2.3	Drucksensor	zu kalibrierender Sensor																																																																			
2.4	2/2-Wegeventil (no)	Sperrventil zur statischen Druckmessung																																																																			
2.5	Rückschlagventil																																																																				
B	<p>* nc: normally closed -in Ruhstellung geschlossen no: normally open – in Ruhstellung geöffnet</p>																																																																				
C	<p>Alternative, falls 3/2-Ventil nicht dicht hält</p>  <p>Ersatz, solange 2.4 nicht lieferbar</p> 																																																																				
D	Im Originalmaßstab 100 mm																																																																				
E	<p>Eigenständigkeitserklärung des Erstellers (siehe Feld "Bear.") Ich versichere, dass ich die vorliegende CAD-Zeichnung und das assoziierte Modell selbständig erstellt und programmiert habe.</p>																																																																				
F	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Allgemeintoleranzen ISO 2768-mH</td> <td style="width: 15%;">Tol. ISO 14405 ISO 8015</td> <td style="width: 10%;">Maßstab 1:1</td> <td style="width: 10%;">Gew. [kg] k. A.</td> <td style="width: 20%;">Material k.A. Sachnr. Roh-/Ausgangsteil # k. A.</td> <td style="width: 30%;">Sachnummer(n) # k. A.</td> </tr> </table>	Allgemeintoleranzen ISO 2768-mH	Tol. ISO 14405 ISO 8015	Maßstab 1:1	Gew. [kg] k. A.	Material k.A. Sachnr. Roh-/Ausgangsteil # k. A.	Sachnummer(n) # k. A.	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center;">V1</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Datum</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">Name</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Bear.</td> <td style="text-align: center;">28.11.20</td> <td style="text-align: center;">Sachmann</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Freig</td> <td style="text-align: center;">00.00.00</td> <td style="text-align: center;">XX</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Sperr</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>	V1	Datum	Name	Bear.	28.11.20	Sachmann	Freig	00.00.00	XX	Sperr			<p>Benennung Gesamtaufbau V1.2</p>																																																
Allgemeintoleranzen ISO 2768-mH	Tol. ISO 14405 ISO 8015	Maßstab 1:1	Gew. [kg] k. A.	Material k.A. Sachnr. Roh-/Ausgangsteil # k. A.	Sachnummer(n) # k. A.																																																																
V1	Datum	Name																																																																			
Bear.	28.11.20	Sachmann																																																																			
Freig	00.00.00	XX																																																																			
Sperr																																																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 15%;">Änderungshistorie</th> <th style="width: 85%;">Sperr</th> </tr> <tr> <td>V1</td> <td>Erstfreigabe</td> </tr> <tr> <td>V2</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>V3</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>V4</td> <td>-</td> </tr> </table>		Änderungshistorie	Sperr	V1	Erstfreigabe	V2	-	V3	-	V4	-	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Erstellt mit CATIA V5R21</td> <td style="width: 20%;">Modellnr./Datei # k. A.</td> <td style="width: 20%;">Zeichnungsnr./Datei # k. A.</td> <td style="width: 30%;">Blatt 2/ 2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Modellname.CATPart</td> <td>Zeichname.CATDrawing</td> <td>DIN A4</td> </tr> </table>			Erstellt mit CATIA V5R21	Modellnr./Datei # k. A.	Zeichnungsnr./Datei # k. A.	Blatt 2/ 2		Modellname.CATPart	Zeichname.CATDrawing	DIN A4																																															
Änderungshistorie	Sperr																																																																				
V1	Erstfreigabe																																																																				
V2	-																																																																				
V3	-																																																																				
V4	-																																																																				
Erstellt mit CATIA V5R21	Modellnr./Datei # k. A.	Zeichnungsnr./Datei # k. A.	Blatt 2/ 2																																																																		
	Modellname.CATPart	Zeichname.CATDrawing	DIN A4																																																																		
																																																																					

VORLAGE -A01234-V5R21-AMF11-V1

