

Hochschule für angewandte Wissenschaften München

Fakultät für Maschinenbau, Fahrzeugtechnik,  
Flugzeugtechnik

Labor für Maschinendynamik



## **BACHELOR-THESIS**

Entwicklung einer labortechnischen Mehrkreis- und  
Mehrkessel-Espressomaschine

Development of a laboratory multi-circuit and  
multi-vessel espresso machine

Betreuer: Dipl.-Ing. Armin Rohnen, LbA

Bearbeiter: Kilian Stach

Matrikelnummer: 05236012

Studiengang Maschinenbau

Eingereicht am: 06.02.2018

## Kurzfassung/ Abstract

In der vorliegenden Bachelorarbeit wurde in Kooperation mit der *Kaffeewerkstatt München* der Prototyp einer labortechnischen Mehrkreis- und Mehrkessel-Espressomaschine entwickelt. Daran lassen sich Wassertemperatur, Brühdruck und Gewicht einer Espressoextraktion messtechnisch erfassen, was bei handelsüblichen Siebträgermaschinen in diesem Umfang bisher nicht möglich ist. Da im Labor für Maschinendynamik der Hochschule München zu diesem Thema noch keine Grundlagenforschung betrieben wurde, musste zunächst ein hydraulisches, messtechnisches und elektronisches Konzept erstellt werden. Darauf aufbauend entstand schließlich der Prototyp. Dieser soll zukünftig dazu dienen, den Zusammenhang zwischen Esspressogeschmack und den relevanten Parametern Temperatur, Druck und Gewicht erforschen zu können. Sobald diesbezüglich ausreichend Rückschlüsse gezogen werden konnten, kann der Prototyp zu einer serienreifen, marktfähigen Siebträger-Espressomaschine weiterentwickelt werden.

In this bachelor thesis, the prototype of a laboratory multi-circuit and multi-vessel espresso machine was developed in cooperation with *Kaffeewerkstatt München*. Its water temperature, brew pressure and the weight of an espresso extraction can be detected by measurement, which is currently not possible with commercial portafilter machines to this extent.

As the Laboratory for Machine Dynamics of the *Munich University of Applied Sciences* has not done any basic research on this topic yet, it was necessary to start with drawing up a hydraulic, metrological and electronic concept. Based on this, the prototype was created.

In future, this will serve to investigate the correlation between espresso taste and the relevant parameters of temperature, pressure and weight. As soon as sufficient conclusions have been drawn, the prototype can be further developed into a marketable portafilter espresso machine ready for serial production.

## Formelverzeichnis

$a$	[ $mm$ ]	Nahtdicke
$A$	[ $mm^2$ ]	Fläche
$b$	[ $mm$ ]	Breite
$B$	[–]	B-Wert (NTC)
$c_1$	[ $mm$ ]	Zuschlag für Waddickenunterschreitung
$c_2$	[ $mm$ ]	Abnutzungszuschlag
$c_p$	$\left[ \frac{J}{kgK} \right]$	Spezifische Wärmekapazität
$C$	[–]; [ $nF$ ]	Berechnungsbeiwert; Kapazität
$C_n$	$\left[ \frac{mV}{V} \right]$	Nennwert
$D$	[ $mm$ ]	Durchmesser
$E$	[ $kg$ ]	Last
$F$	[ $N$ ]	Kraft
$G$	[–]	Verstärkungsfaktor
$h$	[ $mm$ ]; $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$	Höhe; spezifische Enthalpie
$I$	[ $A$ ]	Strom
$K$	[–]	Festigkeitsbeiwert/ -kennwert
$l$	[ $mm$ ]	Länge
$I_W$	[ $mm^4$ ]	Flächenträgheitsmoment
$m$	[ $kg$ ]; [ $g$ ]	Masse
$M$	[ $Nmm$ ]	Moment
$n_{LC}$	[–]	Anzahl der Teilungswerte
$p$	[ $bar$ ]; [ $Pa$ ]	Druck
$P$	[ $W$ ]	Leistung
$Q$	[ $J$ ]	Wärmemenge
$R$	[ $\Omega$ ]	Widerstand
$R_e$	$\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	Streckgrenze
$R_m$	$\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	Zugfestigkeit
$R_{pX,0}$	$\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$	X %-Dehngrenze
$R_{theta}$	$\left[ \frac{K}{W} \right]$	Wärmewiderstand
$S$	[–]	Sicherheitsbeiwert
$t$	[ $mm$ ]; [ $s$ ]	Wanddicke; Zeit
$T$	[ $K$ ]	Temperatur
$U$	[ $V$ ]	Elektrische Spannung

$v$	$[-]$	Ausnutzungsfaktor
$V$	$[m^3]; [V]$	Volumen; elektrische Spannung (amerikanische Bezeichnung)
$\alpha$	$[-]; \left[\frac{1}{K}\right]$	Nahtgüte; Temperaturkoeffizient
$\Delta$	$[-]$	Differenz
$\vartheta$	$[^{\circ}C]$	Temperatur
$\kappa$	$[-]$	Spannungsverhältnis
$\rho$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Dichte
$\sigma$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]; [MPa]$	Mechanische Spannung; Festigkeit

## Abkürzungsverzeichnis

A #	Eingang Nr. # (Multiplexer)
AC	Alternating Current – Wechselstrom
ADDR	Adresse
AD(W)	Analog-Digital(-Wandler)
AIN	Analogeingang
BG	Brühgruppe
CAD	Computer Aided Design
CS	Case-sink – Gehäuse-Kühlkörper
DC	Direct Current – Gleichstrom
DMS	Dehnmessstreifen
D #	Drucksensor Nr. #
FEM	Finite-Elemente-Methode
FSR	Full Scale Range – Gesamter Wertebereich
F #	Sicherung Nr. #
FS #	Füllstandssensor Nr. #
GND	Ground
GPIO	General Purpose Input/Output
G #	Wägezelle Nr. #
H	High-Pegel
HS	Heat sink – Kühlkörper
HEX	Hexadezimal
INA	Instrumentenverstärker INA128 (Texas Instruments)
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
JC	junction-to-package – Sperrschicht zu Gehäuse
L	Low-Pegel
LSB	Least-Significant-Bit
MUX	Multiplexer
NTC	Negative Temperature Coefficient
PID	Proportional Integral Derivative
PS	Maximal zulässiger Druck (im Betrieb)
Ref	Referenzpin
RP	Pull-Up-Widerstand
RPi	Raspberry Pi
PTFE	Polytetrafluorethylen
R #	Widerstand Nr. #
S	Sperrschicht
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data

SMD	Surface-Mount Device – oberflächenmontiertes Bauelement
STL	Standard Tessellation Language (Dateiformat)
S #	Adresse #, Schalter #
TB	Tabelle
T #	Temperatursensor Nr. #; Transistor Nr. #
VDD	Versorgungsspannung
V #	Ventil Nr. #

## Indizes

a	Außen
A	Auflager A, Teilerpunkt A, Auflage
AB	Differenz zwischen den Punkten A und B
ADJ	Adjust
b	Biege (Biegung)
B	Boden, Auflager B, Teilerpunkt B
Brüh	Brühboiler
C	Lagerstelle C
CC	Positive Versorgung
CS	Case-sink – Gehäuse-Kühlkörper
D	Deckel
D #	Diode Nr. #
Dampf	Dampfboiler
e	Berechnungs(-druck), Versorgung
E	Espresso
EE	Negative Versorgung
Eff	Effektiv
ges	Gesamt
G	Verstärkung
HS	Heat sink – Kühlkörper
i	Innen
IN	Instrumentenverstärker (Eingang)
JC	junction-to-package – Sperrschicht zu Gehäuse
lim	Grenz-
m	Mittel
min	Minimum
M	Mantel
Max	Maximal
NTC	Sensor (NTC)
o	Obere
O, OUT	Ausgang
PS	Maximal (im Betrieb)
Pt	Sensor (Pt-100)
REF	Referenz
S	Sperrschicht
Sch	Schwellend
SS	Spitzenspannung
t	Tangential
T	Temperatursensor, Tasse

TE	Tasse und Espresso
u	Untere
V	Verlust, Verdampfung
W	Wand
WZ	Wägezelle
X	Koordinatenrichtung X
Y	Koordinatenrichtung Y
Z	Koordinatenrichtung Z, Zusatz
zul	Zulässig
0 (Zahl)	Ausgangs-
1K2A	Sensor (NTC 1K2A)
833	Sensor (TS-NTC-833)
⊥	Senkrecht



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung/ Abstract .....	I
Formelverzeichnis .....	II
Abkürzungsverzeichnis .....	IV
Indizes .....	VI
Inhaltsverzeichnis .....	VIII
1 Einleitung und Aufgabenstellung .....	1
2 Konzeption einer Espressomaschine mit Siebträger .....	3
2.1 Konzept zum mechanischen Grundgerüst .....	3
2.2 Hydraulisches Konzept .....	4
2.2.1 Wasserversorgung und Pumpe .....	7
2.2.2 Brühwasserkreis: Vorwärmboiler .....	7
2.2.3 Brühwasserkreis: Hauptbrühboiler .....	8
2.2.4 Brühwasserkreis: Heißwasserbezug .....	8
2.2.5 Brühwasserkreis: Brühgruppen .....	8
2.2.6 Dampfkreis .....	9
2.2.7 Hydraulische Verbindung der Komponenten .....	10
2.2.8 Ventile .....	10
2.3 Messtechnisches Konzept .....	10
2.3.1 Konzeption der Messkette .....	10
2.3.2 Messung der Temperaturen .....	11
2.3.3 Messung der Drücke .....	12
2.3.4 Messung der Gewichte .....	12
2.4 Elektrisches Konzept .....	13
2.4.1 Steuerung – Raspberry Pi 3 .....	13
2.4.2 Steuerung – Relaisplatine .....	14
2.4.3 Herstellung der Platinen .....	15
2.4.4 Heizelemente .....	15
2.4.5 Elektrische Sicherheit und Berührungsschutz .....	16

2.4.6	Stromversorgung.....	16
3	Entwicklung des Prototyps einer labortechnischen Espressomaschine .....	16
3.1	Konstruktion mechanischer Grundgerüste .....	17
3.1.1	Konstruktion eines Gehäuses für die labortechnische Espressomaschine .....	17
3.1.2	Konstruktion eines externen Gerüsts für die elektronischen Komponenten .....	18
3.2	Entwicklung der hydraulischen Komponenten .....	20
3.2.1	Entwurf der Boiler in der Espressomaschine .....	20
3.2.1.1	Auslegung der Materialstärken sowie der Schweißnähte.....	21
3.2.1.2	Festigkeitsnachweis der Boilerkomponenten sowie der Schweißnähte.....	23
3.2.1.3	Aufheizzeiten der Heizelemente .....	29
3.2.1.4	Technische Prüfung der Boiler .....	31
3.2.2	Modifikation der E61-Brühgruppe .....	32
3.2.3	Modifikation des Siebträgers .....	33
3.2.4	Absicherung der Boiler .....	34
3.3	Messtechnik in der labortechnischen Espressomaschine.....	34
3.3.1	Aufbau der Messketten für die Messplatinen.....	34
3.3.2	Temperaturmessung .....	38
3.3.2.1	Temperaturmessplatine .....	38
3.3.2.2	Widerstandsthermometer Pt-100.....	40
3.3.2.3	NTC-Temperatursensor <i>1K2A1B</i> .....	44
3.3.2.4	Präzisions-Temperatursensor <i>TS-NTC-833</i> .....	46
3.3.2.5	Kalibrierung der Temperatursensoren .....	48
3.3.3	Druckmessung .....	49
3.3.3.1	Gehäusekonstruktion der Drucksensoren.....	49
3.3.3.2	Elektronische Auslegung der Drucksensoren .....	50
3.3.4	Entwicklung der Wägeeinheit .....	53
3.3.4.1	Mechanische Auslegung der Wägeeinheit.....	55
3.3.4.2	Kräfte in der Wägezelle .....	58

3.3.4.3	Zusatzlagerung der Tassenauflage .....	59
3.3.4.4	Elektronischer Aufbau der Wägeeinheit .....	60
3.4	Elektronik in der labortechnischen espressomaschine .....	63
3.4.1	Übersichtsschaltplan der espressomaschine .....	63
3.4.2	Spannungsversorgungen .....	65
3.4.2.1	Stabilisierte 5 V-Spannungsversorgung .....	65
3.4.2.2	Symmetrische Spannungsversorgung .....	67
3.4.3	Raspberry Pi .....	69
3.4.4	Erweiterung der GPIOs des Raspberry Pis .....	70
3.4.5	Füllstandsüberwachung .....	72
3.4.6	Relaisplatine .....	74
3.4.7	Steuern und Regeln .....	74
3.4.8	Herstellung der Platinen .....	75
4	Beschreibung des Versuchsaufbaus .....	78
5	Ergebnisse .....	78
6	Interpretation .....	78
7	Ausblick .....	79
8	Abgeleitete To-do-Liste .....	81
9	Abbildungsverzeichnis .....	XI
10	Literaturverzeichnis .....	XIII
11	Anhang .....	XVII
11.1	Allgemeines .....	XVII
11.2	Datenblätter .....	XVII
11.3	Eagle Files und Stromlaufpläne .....	XVIII
11.4	Fertigung .....	XVIII
11.5	Stücklisten .....	XIX
11.6	CAD-Modelle .....	XIX

## 1 Einleitung und Aufgabenstellung



Archäologische Funde weisen darauf hin, dass die Früchte des Kaffeebaums bereits vor 14000 Jahren in Zentralafrika verzehrt wurden. Als Ursprungsland des Kaffees wird die äthiopische Provinz Kaffa betrachtet. Von hier aus verbreiteten sich die beiden bekanntesten Kaffeearten *Coffea arabica* (Arabica-Kaffee) und *Coffea canephora* (Robusta-Kaffee) auf der ganzen Welt.

Ende des 10. Jahrhunderts lassen sich erste schriftliche Hinweise für die Zubereitung eines Getränks aus Kaffeekirschen finden, das als Heilmittel sowie für spirituelle Zwecke verwendet wurde. Zu Beginn des 12. Jahrhunderts gelangte der erste Kaffee schließlich nach Europa. In den folgenden Jahrhunderten stieg die Kaffeefachfrage stets weiter an und es entstand ein weltweiter Handel, der bis heute anhält [Rich17].

Der erste Kaffee war ein Aufgussgetränk, bei dem zerstoßene Bohnen in heißes Wasser gegeben wurden. Um Kaffeesatz im fertigen Getränk zu vermeiden, wurden im Laufe der Zeit unterschiedliche Filtersysteme für Kaffeekannen entwickelt. In Italien bereitete man Kaffee seit Ende des 19. Jahrhunderts mit Hilfe von Dampfdruck zu. Angelo Moriondo ließ sich hierzu 1884 eine Apparatur patentieren, bei der Wasser in einem Boiler erhitzt und mit dem dadurch entstandenen Dampfdruck Kaffee extrahiert werden konnte [Mori84]. Basierend auf diesem Prinzip entwickelte Luigi Bezzera die erste Siebträgermaschine mit der es möglich war, einzelne Tassen Kaffee herzustellen. Das 1901 erhaltene Patent verkaufte er 1904 an Desiderio Pavoni, der das Modell *Ideale* herausbrachte und dieses anschließend kontinuierlich weiterentwickelte.

Da bei dieser Zubereitungsart das Wasser bis über den Siedepunkt erhitzt wurde, verbrannten die im Kaffee enthaltenen ätherischen Öle und das Getränk schmeckte bitter. Dieses Überhitzungsproblem umging die Firma *Gaggia* ab 1946 durch den Bau einer Spannfederkolbenmaschine. Dabei wird zum Vorspannen der Feder ein Hebel betätigt, das aufgeheizte Wasser gelangt in eine Kompressionskammer und wird mit einem Druck von etwa 10 bar durch das Kaffeemehl gepresst, sobald sich die Feder entlastet. Da der Druck von nun an mechanisch aufgebaut werden konnte, war eine starke Erhitzung des Wassers nicht mehr nötig.

Die nächste bedeutende Neuerung in der Historie der Siebträger-Espressomaschine lieferte die *Faema E 61*. Bei diesem Modell wurde der Druck nicht mehr mit einem Handhebel, sondern über eine Pumpe erzeugt [Vale58]. Ein weiteres Novum dieser Maschine war der Einsatz eines Wärmetauschers, mithilfe dessen das kalte Wasser durch den Heizkessel geführt und dabei auf Brühtemperatur erhitzt wurde. Dieses zweikreisige System ist noch bis heute in vielen Gastronomiemaschinen sowie in hochwertigen Modellen für den Privatgebrauch vorzufinden [Tsan12]. Die Weiterentwicklung der zwei Kreise lieferte *La Marzocco* 1970 mit der Einführung der Serie *GS (Gruppo Saturo)*. Anstatt das Wasser indirekt über den Heizkessel zu erhitzen, wurden bei

dieser Espressomaschine zwei unabhängig voneinander temperierbare Boiler genutzt. Dabei war der eine für die Erhitzung des Brühwassers und der andere für die Erzeugung von Dampf zuständig [Serie GS].

Bis heute werden die Maschinen verschiedenster Hersteller ständig verbessert, um dem Anwender die Handhabung zu erleichtern, die Reproduzierbarkeit des erzeugten Espressos zu erhöhen und seinen Geschmack zu optimieren. So wird beispielsweise bei den Maschinen von *Slayer* ein spezielles Nadelventil in den Wasserkreislauf integriert, um die Durchflussmenge des Wassers zu begrenzen [Pref14]. In den Geräten von *La Marzocco* wird das Druckprofil auf den Espresso angepasst, abgespeichert und beim Bezug abgerufen [Strada EP]. Ebenso ermöglicht die Temperatursteuerung und -stabilisierung mittels PID-Regelung (proportional integral derivative) die individuelle Anpassung und Kontrolle der Temperaturen in den jeweiligen Kesseln [ECM]. Eine komplette Steuerung und Überwachung ergebnisbeeinflussender Faktoren ist bisher jedoch noch nicht möglich.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist daher die Entwicklung eines Prototyps einer labortechnischen Siebträger-Espressomaschine, die als messtechnische Basis für zukünftige Untersuchungen bei der Zubereitung von Espresso dienen soll. Vor allem die Beeinflussung sensorischer Eigenschaften von Espresso durch Variation maschineninterner Parameter kann daran genauer erforscht und die Kaffeezubereitung auf diese Weise weiter optimiert werden.

Die Maschine wird mit zwei Kreisen sowie mehreren Boilern ausgestattet und weist damit die gängigen Grundmerkmale einer Espressomaschine im Hochpreissegment auf. Mithilfe umfangreicher Messtechnik können Wassertemperatur, Wasserdruck sowie die Masse eines Espressos erfasst werden.

Da für die vorliegende Arbeit keinerlei Ausgangskonzepte im Labor für Maschinendynamik der Hochschule München zur Verfügung stehen, müssen nach einer ausführlichen Recherchephase grundlegende mechanische, hydraulische, messtechnische und elektronische Entwürfe erstellt und ausgearbeitet werden. Auf dieser Basis werden mechanische Baugruppen wie das Gerüst für die Espressomaschine sowie die Boiler entwickelt und konstruiert. Für die gesamte Messtechnik müssen Messketten und deren Bauteile festgelegt werden, um daraus anschließend Schaltpläne zu entwerfen und die entsprechenden Platinen herzustellen. Gleiches gilt für elektronische Baugruppen, die weitere Funktionen in der Espressomaschine übernehmen. Komponenten, die zugekauft werden können, müssen ebenfalls spezifiziert werden.

Nach der Forschungsphase für den „perfekten“ Espresso soll die Maschine in Zusammenarbeit mit der *Kaffeewerkstatt München* zur Serienreife weiterentwickelt werden.

## 2 Konzeption einer Espressomaschine mit Siebträger

Die labortechnische Espressomaschine soll den üblichen Umfang an Funktionen gängiger Espressomaschinen vorweisen (siehe Abschnitt 1). Ihre Hauptaufgabe ist das Herstellen von Espresso. Zur Definition der technischen Ausgangsdaten für den optimalen Espresso werden die Vorgaben des *Istituto Nazionale Espresso Italiano* (INEI) verwendet [INEI06]. Die wichtigsten Parameter für die Konzeption der Maschine können Tabelle 1 entnommen werden.

Bezeichnung	Wert
Ausgangstemperatur des Wassers aus der Brühgruppe	88 °C ± 2 °C
Eingangswasserdruck	9 bar ± 1 bar
Durchflusszeit	25 Sekunden ± 5 Sekunden
Milliliter in der Tasse (inklusive Crema)	25 ml ± 2,5 ml
Gewicht des Kaffeemehls	7 g ± 0,5 g

Tabelle 1: Espresso-Parameter nach INEI

In gängigen Espressomaschinen gibt es zudem zwei weitere wichtige Nebenfunktionen: Einerseits soll heißes Wasser entnommen werden können, das zum Herstellen von Espressovarianten oder zum Brühen von Tee benötigt wird. Die Wassertemperatur soll der Ausgangstemperatur eines Espressos entsprechen. Andererseits muss Dampf bereitgestellt werden, um Milch aufschäumen und somit diverse Kaffeegetränke zubereiten zu können.

### 2.1 Konzept zum mechanischen Grundgerüst

Das Grundgerüst des Prototyps wird aus *MayTech*-Profilen mit einer Kantenlänge von 30 mm aufgebaut. Die Profile werden mit zugehörigen Schnellverbindern zusammengefügt. Diese Kombination ermöglicht zukünftig eine rasche Anpassung an sich eventuell ändernde Positionierungen einzelner Komponenten.

Front- und Bodenplatte der Maschine werden aus einem Stahlblech gefertigt. An der Vorderseite werden alle Bedienelemente wie die beiden Brühgruppen (BG), die Hähne für Dampf- und Heißwasserbezug sowie die Bezugstaster angebracht. Die Brühgruppen werden aufgrund ihres hohen Gewichts zusätzlich mit Profilen verschraubt. Auf der Bodenplatte werden die Boiler, der Pumpenmotor und die Wägezellen befestigt.

Für alle weiteren Seiten der Maschine sind Acrylglascheiben vorgesehen. Sie ermöglichen einen Einblick ins Innere und verhindern zudem unbefugten Zugriff von außen.

Abbildung 1 zeigt das mechanische Grundgerüst der Espressomaschine mit den Grundmaßen ohne Seitenverkleidungen. Die dargestellten Abmaße ergeben sich aus dem Platzbedarf der Einzelkomponenten.

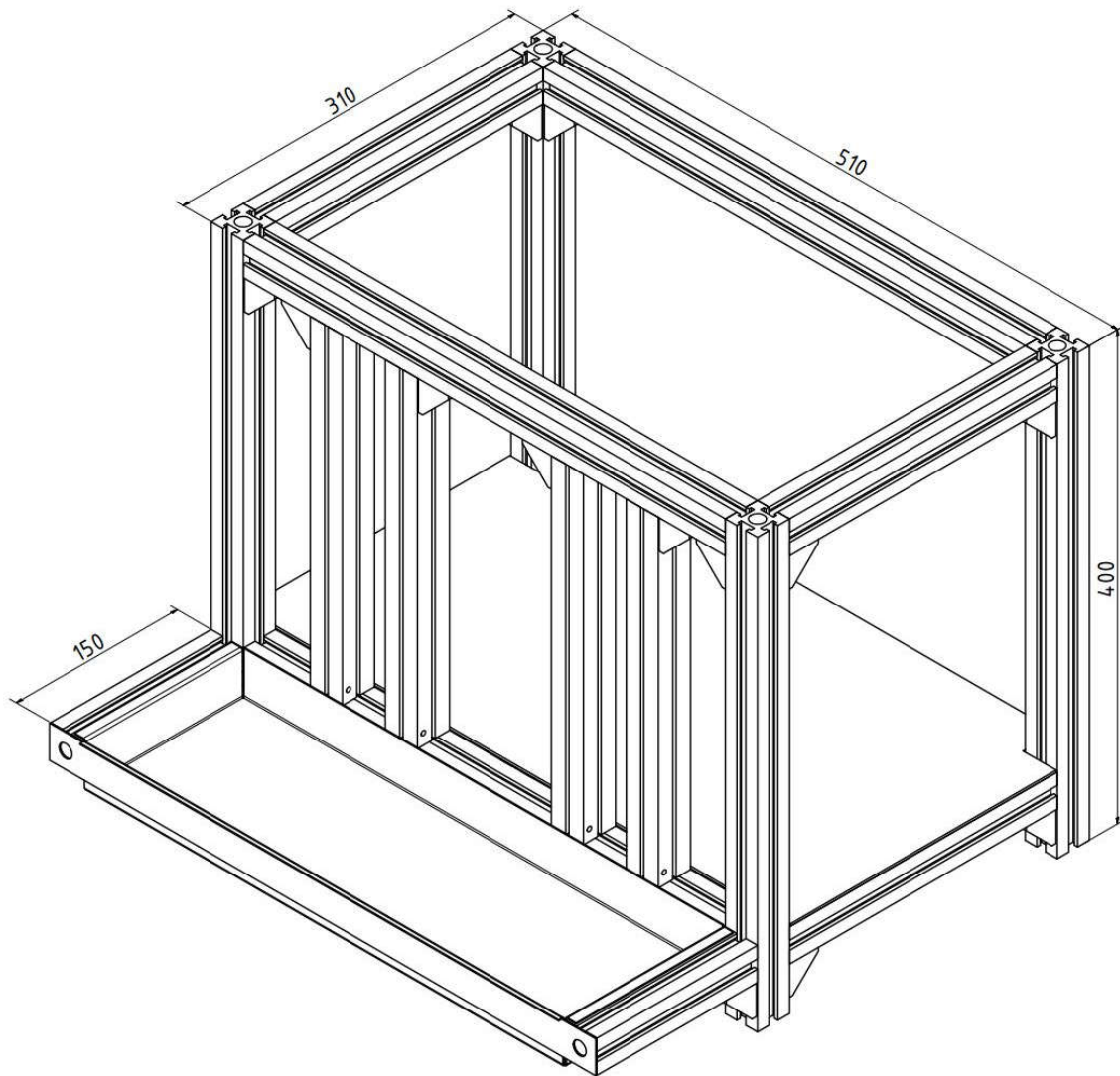


Abbildung 1: Mechanisches Grundgerüst der Espressomaschine

## 2.2 Hydraulisches Konzept

Um in der labortechnischen Siebträgermaschine Espresso, heißes Wasser und Dampf zu generieren, werden zwei separate Wasserkreise aufgebaut. Hintergrund hierfür ist, dass zwei unterschiedliche Temperaturen benötigt werden: Espresso und Heißwasser haben die gleiche Soll-Temperatur von 88 °C, weshalb sie einen gemeinsamen Kreislauf bilden. Dampf wird hingegen mit einer Soll-Temperatur von etwa 120 °C aus dem zweiten Kreislauf entnommen. Somit können die Temperaturen getrennt voneinander geregelt werden, was über neu erstellte PID-Regelkreise erfolgen soll.

Eine schematische Übersicht dieses zweikreisigen Maschinenkonzepts zeigt Abbildung 2. Auf die Konzeptionierung der einzelnen Komponenten wird in den folgenden Abschnitten detaillierter eingegangen.

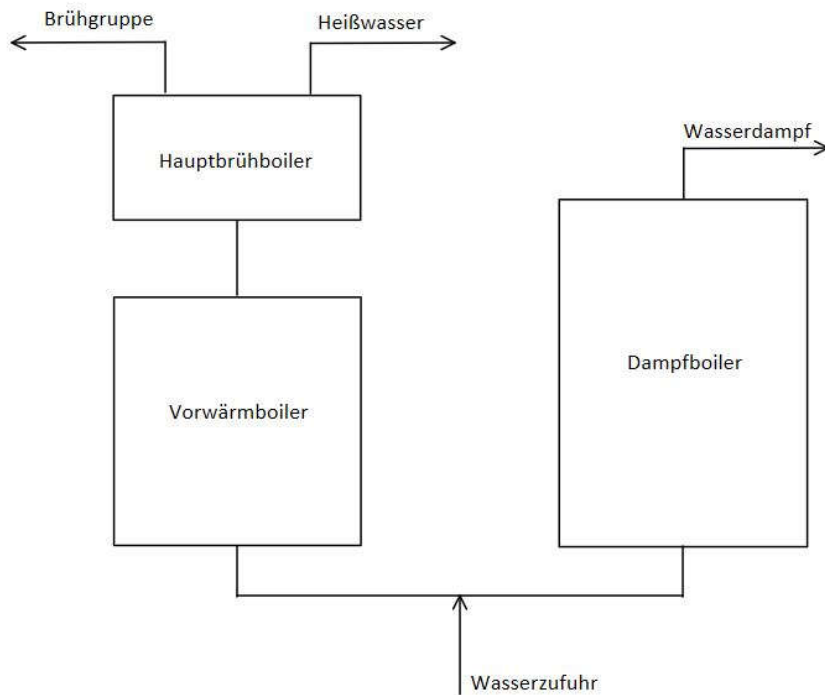
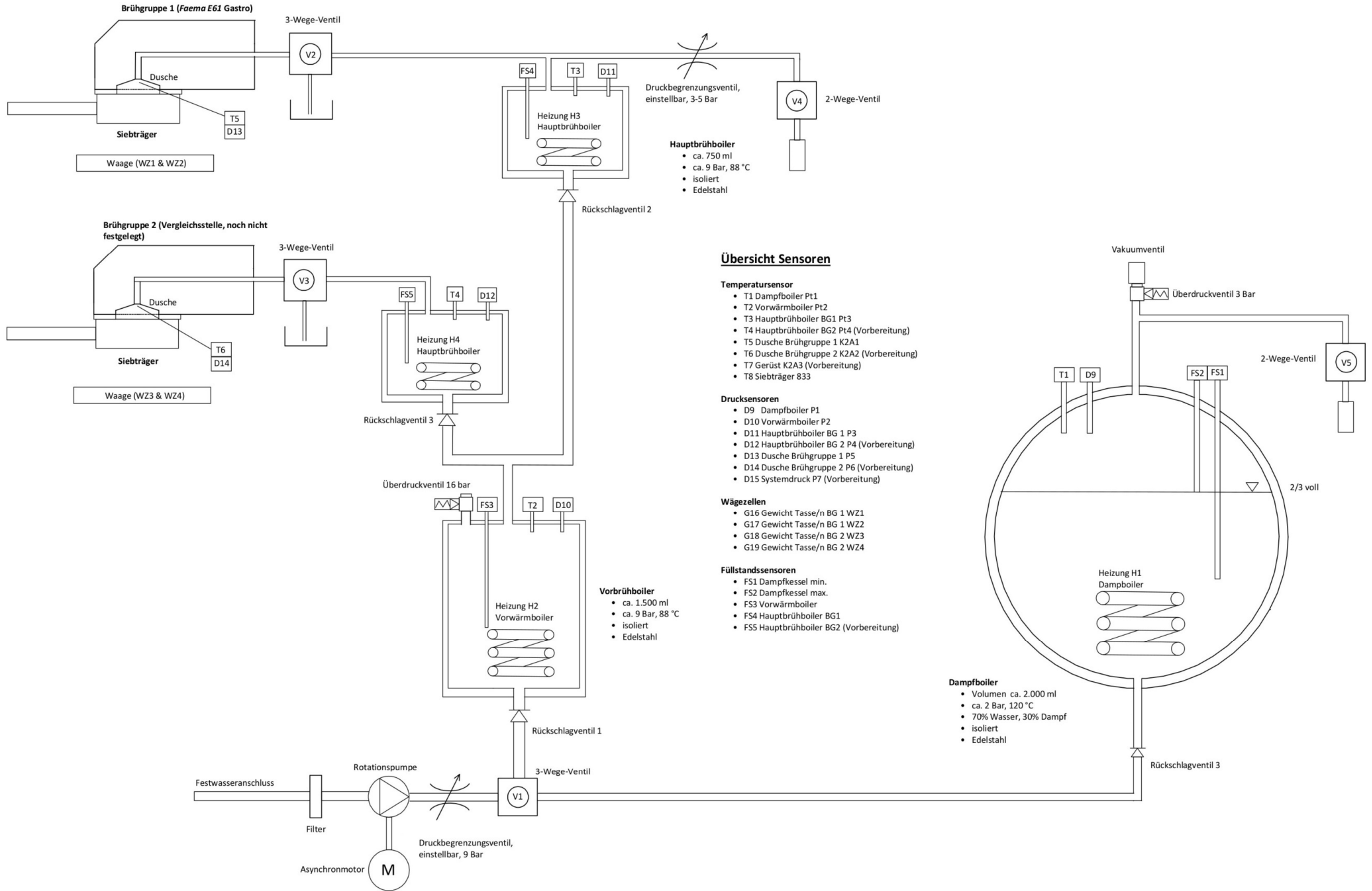


Abbildung 2: Schematische Übersicht über das Prinzip einer zweikreisigen espressomaschine

Abbildung 3 zeigt eine ausführliche Darstellung des hydraulischen Gesamtkonzepts der labortechnischen espressomaschine, in die zusätzlich elektronische, messtechnische sowie sicherheitskritische Komponenten aufgenommen wurden.

In den folgenden Abschnitten werden Bezüge zu den jeweiligen Komponenten aus Abbildung 3 hergestellt. Zur besseren Lesbarkeit sind diese in Klammern gesetzt.





**Übersicht Sensoren**

- Temperatursensoren**
  - T1 Dampfboiler Pt1
  - T2 Vorwärmboiler Pt2
  - T3 Hauptbrühboiler BG1 Pt3
  - T4 Hauptbrühboiler BG2 Pt4 (Vorbereitung)
  - T5 Dusche Brühgruppe 1 K2A1
  - T6 Dusche Brühgruppe 2 K2A2 (Vorbereitung)
  - T7 Gerüst K2A3 (Vorbereitung)
  - T8 Siebträger 833
- Drucksensoren**
  - D9 Dampfboiler P1
  - D10 Vorwärmboiler P2
  - D11 Hauptbrühboiler BG 1 P3
  - D12 Hauptbrühboiler BG 2 P4 (Vorbereitung)
  - D13 Dusche Brühgruppe 1 P5
  - D14 Dusche Brühgruppe 2 P6 (Vorbereitung)
  - D15 Systemdruck P7 (Vorbereitung)
- Wägezellen**
  - G16 Gewicht Tasse/n BG 1 WZ1
  - G17 Gewicht Tasse/n BG 1 WZ2
  - G18 Gewicht Tasse/n BG 2 WZ3
  - G19 Gewicht Tasse/n BG 2 WZ4
- Füllstandssensoren**
  - FS1 Dampfboiler min.
  - FS2 Dampfboiler max.
  - FS3 Vorwärmboiler
  - FS4 Hauptbrühboiler BG1
  - FS5 Hauptbrühboiler BG2 (Vorbereitung)

- Vorbrühboiler**
- ca. 1.500 ml
  - ca. 9 Bar, 88 °C
  - isoliert
  - Edelstahl

- Hauptbrühboiler**
- ca. 750 ml
  - ca. 9 Bar, 88 °C
  - isoliert
  - Edelstahl

- Dampfboiler**
- Volumen ca. 2.000 ml
  - ca. 2 Bar, 120 °C
  - 70% Wasser, 30% Dampf
  - isoliert
  - Edelstahl

Abbildung 3: Übersicht des hydraulischen Gesamtkonzepts

### 2.2.1 Wasserversorgung und Pumpe

Aufgabe der Pumpe ist es, beide Wasserkreisläufe mit dem benötigten Wasser zu versorgen und den Grunddruck, der zur Erzeugung von Espresso benötigt wird, aufzubauen.

In der labortechnischen Espressomaschine wird eine Rotationspumpe verbaut. Ihre Vorteile sind, verglichen mit Membranpumpen, ein ruhiger Lauf sowie eine konstante, hohe Förderleistung. Durch die hohe Förderleistung steigt der Druck schnell auf den Sollwert an. Da der von der Pumpe generierte Druck jedoch höher ist als nötig, wird er über eine in die Pumpe integrierte Druckbegrenzung reduziert. Ziel ist dabei ein Wert von etwa 9 bar. Die Feinregulierung des geförderten Massenstroms sowie des Förderdrucks erfolgt über ein Ventil innerhalb der Brühgruppen [Kaff08].

Ein Asynchronmotor treibt die Rotationspumpe an, die dazu direkt auf der Welle des Motors befestigt wird. Vor der Pumpe ist ein Filter anzubringen, der den Mineraliengehalt des zugeführten Wassers senkt und Unreinheiten entfernt. Auf diese Weise soll verhindert werden, dass Komponenten wie Boiler oder Brühgruppen verkalken beziehungsweise Schmutzpartikel das Espressomehl verunreinigen. Die exakten Angaben der eingesetzten Pumpe können dem Datenblatt in Anhang 11.2 entnommen werden.

Hinter der Pumpe wird ein 3-Wege-Ventil (V1) installiert, das den Wasserfluss in den Brühwasserbeziehungsweise in den Dampfkreis leitet. Um eine konstante Versorgung der Brühgruppe zu gewährleisten und gleichzeitig die Überfüllung des Dampfboilers zu verhindern, muss sichergestellt werden, dass stets nur einer der beiden Zweige von der Pumpe versorgt wird. Die Durchflussrichtung, die das Ventil freigibt, hängt davon ab, welcher Wasserkreis neues Wasser benötigt. In neutraler Stellung soll dieses Ventil den Fluss in Richtung der Boiler blockieren. Die Steuerung aller Ventile erfolgt über Relais (siehe Abschnitt 2.4.2).

### 2.2.2 Brühwasserkreis: Vorwärmboiler

Nachdem das Wasser durch das 3-Wege-Ventil (V1) gelangt ist, wird es in einen Vorwärmboiler gepumpt, der als Heißwasserreservoir dient und die anschließende Temperierdauer im Hauptbrühboiler verkürzt. Der Vorwärmboiler weist dabei ein Volumen von etwa 1,5 Litern auf. Das Fassungsvermögen ist so gewählt, dass maximal zwei Hauptbrühboiler mit einem jeweiligen Volumen von circa 0,75 Liter versorgt werden können. Zudem sollen bei reinem Heißwasserbezug auch größere Wasserentnahmemengen sicher abgedeckt werden. Der Rückfluss in das vorherige System wird durch den Einbau eines Rückschlagventils unterbunden. In diesem ersten Boiler wird das Wasser mithilfe eines Heizelements auf eine Temperatur von etwa 85 °C erhitzt und durch die Pumpe ein Druck von ungefähr 9 bar erzeugt. Eine detaillierte Berechnung der resultierenden Aufheizzeit erfolgt in Abschnitt 3.2.1.3. Sowohl der Druck als auch die Temperatur im Inneren des Kessels werden über


passende Sensoren (D10) und (T2) erfasst. Zusätzlich ist eine Sonde (FS3) integriert, die den minimalen Wasserstand überwacht. Diese Maßnahme ist nötig, um die Heizung vor Überhitzung zu schützen, sollte sie nicht vollständig von Wasser umgeben sein. Um einen zu hohen Druck im Kesselinneren zu vermeiden, ist ein Überdruckventil vorgesehen, das sich bei einem Druck von 16 bar öffnet und dadurch ein Bersten des Boilers unterbindet.

### 2.2.3 Brühwasserkreis: Hauptbrühboiler

Der Vorwärmboiler versorgt den Hauptbrühboiler mit vortemperiertem Wasser. Damit kein Wasser aus dem Hauptbrühboiler in den Vorwärmboiler zurücklaufen kann, ist auch an dieser Stelle ein Rückschlagventil zu installieren. Das Volumen des Hauptbrühboilers soll etwa 0,75 Liter betragen, was dem Mittelwert gängiger Dualboilermaschinen entspricht [Kaff16]. Im Hauptbrühboiler wird das Wasser auf die finale Brühtemperatur von  $88\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  gebracht. Zusätzlich werden Temperaturverluste, die auf dem Weg des Wassers vom Vor- zum Hauptbrühboiler entstehen, durch Nachtemperieren ausgeglichen. Um die Temperatur im Boiler stabil regeln zu können, muss diese über einen Sensor (T3, T4) aufgenommen und der gewonnene Wert an einen *Raspberry Pi* (RPI) weitergegeben werden. Das im Kessel verbaute Heizelement wird über den RPI mittels programmierter PID-Regelung angesteuert und heizt das Wasser auf. In Abschnitt 3.2.1.3 erfolgt die Berechnung der resultierenden Aufheizzeit.

Der Druck im Hauptbrühboiler soll weiterhin dem Grunddruck der Pumpe entsprechen (9 bar) und wird von einem Drucksensor (D11, D12) gemessen. Aus zuvor genannten Gründen wird auch in diesem Boiler der minimale Füllstand (FS4, FS5) des Wassers überwacht.

### 2.2.4 Brühwasserkreis: Heißwasserbezug

Zum Herstellen von Espressovarianten soll auch die Entnahme von Heißwasser aus dem Hauptbrühkessel möglich sein, da das Wasser im Inneren dieses Kessels bereits die gewünschte Temperatur aufweist. Um den Systemdruck von 9 bar zu reduzieren, ist ein einstellbares Druckbegrenzungsventil anzubringen. Mit diesem kann ein Wasserdruck zwischen 3 und 5 bar eingestellt werden, was in etwa dem Druck in haushaltsüblichen Wasseranschlüssen entspricht. Der Wasserdruck liegt konstant an einem 2-Wege-Ventil (V4) an, das sich durch Betätigung eines Schalters öffnet; es kann Wasser bezogen werden. 

### 2.2.5 Brühwasserkreis: Brühgruppen

Vom Hauptbrühboiler aus gelangt das heiße Wasser in die Brühgruppe. Hier wird der Siebträger mit dem gemahlene Espressoehl eingespannt. Zusätzlich ist die Brühgruppe für die gleichmäßige Verteilung des Wassers auf dem Mehl zuständig.

Bei der labortechnischen Espressomaschine sollen zukünftig zwei unterschiedliche Brühgruppenkonzepte verglichen werden können. Aufgrund der hohen Komplexität von Brühgruppen werden diese zugekauft. Die erste Brühgruppe ist die Gastronomie-Variante der *FAEMA E61*. Im Vergleich zur Standardausführung wird diese, anstelle einer mechanischen Betätigung, über ein magnetisches Ventil gesteuert. Für die spätere Erweiterung der Espressomaschine wird bei der Konstruktion die mögliche Anbringung einer zweiten Brühgruppe berücksichtigt. Das genaue Modell wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch noch nicht final festgelegt. Für jede Brühgruppe wird ein 3-Wege-Ventil (V2, V3) benötigt. Bei Betätigung eines Bezugstasters wird das 3-Wege-Ventil der Brühgruppe geöffnet und die Pumpe gestartet. Der Durchfluss des heißen Wassers zum Siebträger ist somit möglich. Nach Erreichen der gewünschten Espressomenge schaltet sich der Pumpenmotor ab und das Ventil gibt den Durchfluss zur Auffangschale frei. Dadurch wird der Druck im Siebträger auf den Umgebungsdruck abgesenkt und der Siebträger kann ausgespannt werden. Anschließend schaltet das Ventil in Neutralposition und blockiert die Wasserzufuhr zur Brühgruppe.



#### 2.2.6 Dampfkreis

Nachdem das Wasser in den Dampfzweig geflossen ist, gelangt es in den Dampfboiler, der ebenfalls durch ein Rückschlagventil gegen Wasserrückfluss abgesichert ist. Aus einer Übersichtstabelle gängiger Dualboiler-Espressomaschinen [Kaff16] wurde ein mittleres Dampfboilervolumen von etwa 1,9 Litern ermittelt, das in der labortechnischen Espressomaschine ebenfalls Verwendung finden soll. Der Dampfboiler wird zu zwei Dritteln mit Wasser gefüllt. Das letzte Drittel des Volumens wird vom erzeugten Wasserdampf eingenommen. Eine erste Sonde (FS2) überwacht die maximale Füllstandshöhe. Fällt der Wasserstand unter einen Wert von 1,26 Litern, wird zeitverzögert die Pumpe gestartet, um diesen zu erhöhen. Eine zweite Sonde (FS1) prüft die minimale Füllmenge und gibt die Heizungssteuerung erst frei, wenn die Heizung mit Wasser bedeckt ist (vgl. Abschnitt 2.2.2). Diese soll das Wasser auf Siedetemperatur bringen, wodurch ein Teil des Wassers verdampft. Durch den Druckanstieg erhöht sich zugleich die Siedetemperatur. Bei einer angestrebten Siedetemperatur von 120 °C wird ein Dampfdruck von 1,985 bar erreicht [Lang17]. Temperatur und Druck werden mittels Sensoren (T1 und D9) gemessen und an den *Raspberry Pi* weitergegeben, wobei die Temperatur über eine programmierte PID-Regelung konstant gehalten wird.



Durch die Betätigung eines Schalters wird ein 2-Wege-Ventil (V5) geöffnet, das den Dampfdruck aus der Dampfzweig freigibt. Um ausreichende Sicherheit am Dampfboiler zu gewährleisten, sind ein Überdruck- und ein Vakuumventil anzubringen: Das Überdruckventil begrenzt den Druck im Kessel auf maximal 3 bar. Das eingebaute Vakuumventil verhindert ein Implodieren des Kessels, wenn der Dampf abkühlt und ein Unterdruck im Kessel entsteht.

### 2.2.7 Hydraulische Verbindung der Komponenten

Die Verbindung der einzelnen Komponenten des Brühwasser- und Dampfkreises werden im labortechnischen Prototyp mittels Polytetrafluorethylen-Schläuchen (PTFE) vorgenommen. Sie weisen einen Außendurchmesser von 6 mm sowie einen Innendurchmesser von 4 mm auf und können unkompliziert auf die benötigte Länge zugeschnitten werden. Aufgrund ihrer Flexibilität ist zudem eine leichte Verlegung im Gerät gewährleistet. Der Anschluss an die einzelnen Elemente geschieht durch spezielle Kupplungen, die an einem Ende ein 1/8-Zoll-Schraubgewinde und am anderen eine Klemmverbindung für Schläuche haben. Die Leitungsführung zwischen den Komponenten kann Abbildung 3 entnommen werden.

### 2.2.8 Ventile


Zur Steuerung des Wasserflusses innerhalb der espressomaschine werden verschiedene Ventile benötigt. In Tabelle 2 findet sich eine Auflistung aller verbauten Ventile mit Angaben zu deren Art sowie den Richtungen, in die sie geschaltet werden können. Die entsprechenden Datenblätter sind dem Anhang 11.2 zu entnehmen.

Nr.	Bezeichnung	Art	Richtungen
V1	3-Wege-Ventil Abzweigung Dampf	Wechsler	Dampfkreis – Heißwasserkreis – gesperrt
V2	3-Wege-Ventil BG 1	Wechsler	BG – Auffangschale – gesperrt
V3	3-Wege-Ventil BG 2 (Vorbereitung)	Wechsler	BG – Auffangschale – gesperrt
V4	2-Wege-Ventil Bezug Heißwasser	Öffner	Heißwasserhahn – gesperrt
V5	2-Wege-Ventil Bezug Dampf	Öffner	Dampfhahn – gesperrt

Tabelle 2: Übersicht der verbauten Ventile

Alle Ventile werden über eine separate Relaisplatine geschaltet, die ihre Steuersignale vom *Raspberry Pi* erhält. Eine nähere Erläuterung findet sich in Abschnitt 2.4.2.

## 2.3 Messtechnisches Konzept

Voraussetzung für die Reproduzierbarkeit eines hergestellten espressos ist die vorherige Messung der drei relevanten Parameter Temperatur, Druck und Gewicht des espressos. Die dabei gewonnenen Werte dienen als Grundlage zur Regelung der Maschinenparameter. 

Eine ausführliche Auflistung der verwendeten Sensoren bietet der Messstellenplan in Anhang 11.1. In den folgenden Unterabschnitten werden die jeweiligen Messstellen kurz aufgeführt.

### 2.3.1 Konzeption der Messkette

Um die physikalischen Größen Temperatur, Druck und Kraft verarbeiten zu können, wird eine Messkette aufgebaut. Sie ermöglicht die Umwandlung eines nichtelektrischen Signals in ein elektrisches Signal. Dabei müssen vier Schritte in folgender Reihenfolge durchgeführt werden:

1. Aufnahme der Signale mittels Sensoren, die ebenfalls das physikalische in ein elektrisches Signal konvertieren
2. Pegelanpassung des Messsignals im Verstärker
3. Auswählen des Signals durch einen Multiplexer (MUX)
4. Generieren eines digitalen Signals im Analog-Digital-Wandler (ADW)

Das digitalisierte Ausgangssignal dieser Messkette kann nun zur Verarbeitung an den *Raspberry Pi* weitergeleitet werden [Part16]. Der strukturelle Aufbau dieser Messkette ist Abbildung 4 zu entnehmen.

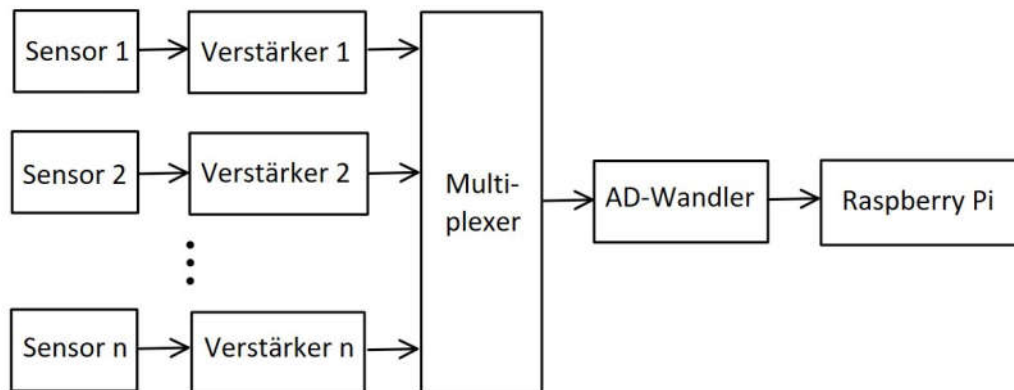


Abbildung 4: Messkette der Espressomaschine

Auf die verwendeten Sensoren sowie den Instrumentenverstärker INA128, den Multiplexer CD74HCT4051E und den AD-Wandler ADS1015 der Firma *Adafruit* wird in Kapitel 3.3 näher eingegangen. Die abschließende Verarbeitung der Signale im *Raspberry Pi* wird Gegenstand nachfolgender Arbeiten sein.

Für die Auslegung der Messstellen wurden idealisierte Werte für die Teilkomponenten angenommen. Da die Bauteile jedoch Toleranzen aufweisen, müssen die Messstellen beim Aufbau kalibriert werden.

### 2.3.2 Messung der Temperaturen

Die Temperatur ist der erste Parameter, der vom System gemessen wird. Ziel ist dabei, die Werte in den jeweiligen Boilern konstant halten zu können. Die Stabilisierung erfolgt über eine programmierte PID-Regelung, die die jeweiligen Heizelemente ansteuert. Im Regler können Grenzwerte für die zu erzielende Brühtemperatur hinterlegt werden. So kann beispielsweise durch Einstellen einer Maximaltemperatur das Verbrennen des Kaffeemehls verhindert werden. Zudem können über die Temperaturmessung eine Überhitzung des Systems erkannt und mögliche Gegenmaßnahmen, wie die Abschaltung der Heizelemente, eingeleitet werden.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der benötigten Messstellen sowie der verwendeten Temperatursensoren.

Bezeichnung	Messtelle	Art des Thermoelements
T1	Dampfboiler	Kabelfühler Pt100
T2	Vorwärmböiler	Kabelfühler Pt100
T3	Hauptbrühboiler BG 1	Kabelfühler Pt100
T4	Hauptbrühboiler BG 2	Kabelfühler Pt100 (Vorbereitung)
T5	BG 1; nah an Dusche	NTC Temperatursensor 1 k $\Omega$
T6	BG 2; nah an Dusche	NTC Temperatursensor 1 k $\Omega$ (Vorbereitung)
T7	Gerüst/ Gehäuse	NTC Temperatursensor 1 k $\Omega$
T8	Siebträger	Präzisions-Temperatursensor TS-NTC-833,50 k $\Omega$

Tabelle 3: Übersicht der Temperaturmessstellen

### 2.3.3 Messung der Drücke

Neben der Temperatur ist der Druck der zweite Parameter, der überwacht wird.

Um einen ausreichend trockenen Dampf zum Aufschäumen von Milch herzustellen, wird im Dampfboiler ein Druck von 2 bar angestrebt.

Der richtige Druck im Brühweig ist elementar für die Qualität des erzeugten Espressos, da je nach anliegendem Druck unterschiedliche Geschmacksstoffe aus dem Espressomehl gelöst werden.

Für die erste Ausbaustufe, die Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, soll zunächst eine Überwachung des unregelmäßigen Druckverlaufs vorgenommen werden.

Zusätzlich kann über die Messung des Drucks sichergestellt werden, dass dieser in den jeweiligen Kesseln nicht zu hoch wird. Somit können Schäden durch Bersten der druckführenden Komponenten vermieden werden, was durch eine programmierte Abschaltung realisiert wird.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der benötigten Messstellen und der verwendeten Drucksensoren.

Bezeichnung	Messtelle	Art des Drucksensors
D9	Dampfboiler	Edelstahldrucksensor
D10	Vorwärmböiler	keramischer Drucksensor
D11	Hauptbrühboiler BG 1	keramischer Drucksensor
D12	Hauptbrühboiler BG 2	keramischer Drucksensor (Vorbereitung)
D13	BG 1; nah an Dusche	keramischer Drucksensor
D14	BG 2; nah an Dusche	keramischer Drucksensor (Vorbereitung)
D15	Systemdruck; nach Pumpe	keramischer Drucksensor (Vorbereitung)

Tabelle 4: Übersicht der Druckmessstellen

### 2.3.4 Messung der Gewichte

Die erzeugte Menge an Espresso im Verhältnis zur Bezugszeit bestimmt den proportionalen Koffeingehalt im fertigen Getränk. Deshalb wird das Gewicht des erzeugten Espressos in der Tasse gewogen. Über Wägezellen und eine damit verbundene Plattform wird die eingeleitete Kraft gemessen, woraus das Gewicht beziehungsweise das Volumen berechnet werden kann. So lässt sich

bestimmen, ob sich ein einfacher oder ein doppelter Espresso in der Tasse befindet. Außerdem soll später eine Sicherheitsroutine gegen Überlaufen der Tassen integriert werden. Tabelle 5 zeigt die dafür benötigten Messstellen und die verwendeten Wägezellen.

Bezeichnung	Messtelle	Art der Wägezelle
G16	Gewicht Tasse/n BG 1	Plattform Wägezelle H10A
G17	Gewicht Tasse/n BG 1	Plattform Wägezelle H10A
G18	Gewicht Tasse/n BG 2	Plattform Wägezelle H10A
G19	Gewicht Tasse/n BG 2	Plattform Wägezelle H10A

Tabelle 5: Übersicht der Gewichtsmessstellen

## 2.4 Elektrisches Konzept

Im nachfolgenden Kapitel wird das elektrische Konzept der labortechnischen Espressomaschine vorgestellt. Hierbei müssen alle nötigen Vorkehrungen getroffen werden, die ein Zusammenspiel der elektronischen und elektromechanischen Komponenten ermöglichen. Zudem wird auf wichtige Sicherheitsvorkehrungen aus elektronischer Sicht sowie auf die Herstellung der Platinenprototypen eingegangen.

### 2.4.1 Steuerung – Raspberry Pi 3

Zur Steuerung und Regelung der gesamten Espressomaschine wird ein *Raspberry Pi 3 Modell B* verwendet. Dieser Mikrocomputer soll die Eingangs- und Messsignale überwachen, auswerten, weiterverarbeiten und entsprechende Steuersignale an die Ausgänge senden. Diese Signale sind zum Beispiel nötig, um den Espresso zu starten, einen Kessel zu befüllen oder das Wasser aufzuheizen. Alle erforderlichen Ein- und Ausgangssignale können Tabelle 6 entnommen werden. Die Programmierung des *Raspberry Pi* ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, sondern wird zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen weiterführender wissenschaftlicher Arbeiten an der Fakultät 03 der Hochschule München erfolgen.



Eingänge	Kürzel	Ausgänge	Kürzel
eine Tasse BG 1 beziehen	S1	Bit 1 für MUX	S0
zwei Tassen BG 1 beziehen	S2	Bit 2 für MUX	S1
BG 1 spülen	S3	Bit 3 für MUX	S2
eine Tasse BG 2 beziehen	S4	Bit 4 für MUX	E
zwei Tassen BG 2 beziehen	S5	Heizung Dampfkessel	H1
BG 2 spülen	S6	Heizung Vorwärmboiler	H2
Temperatur 1: Dampfboiler	T1	Heizung Hauptbrühboiler BG 1	H3
Temperatur 2: Vorwärmboiler	T2	Heizung Hauptbrühboiler BG 2	H4
Temperatur 3: Hauptboiler BG 1	T3	Pumpenmotor	M
Temperatur 4: Hauptboiler BG 2	T4	3-Wege-Ventil	V1
Temperatur 5: BG 1	T5	3-Wege-Ventil	V2
Temperatur 6: BG 2	T6	3-Wege-Ventil	V3
Temperatur 7: Gerüst/ Gehäuse	T7	2-Wege-Ventil	V4
Temperatur 8: Siebträger	T8	2-Wege-Ventil	V5
Druck 1: Dampfboiler	D9		
Druck 2: Vorwärmboiler	D10		
Druck 3: Hauptbrühboiler BG 1	D11		
Druck 4: Hauptbrühboiler BG 2	D12		
Druck 5: BG 1	D13		
Druck 6: BG 2	D14		
Druck 7: Systemdruck	D15		
Kraftsensor 1: BG 1	G16		
Kraftsensor 2: BG 1	G17		
Kraftsensor 1: BG 2	G18		
Kraftsensor 2: BG 2	G19		
Füllstandsensor 1: Dampfboiler min.	FS1		
Füllstandsensor 2: Dampfboiler max.	FS2		
Füllstandsensor 3: Vorwärmboiler	FS3		
Füllstandsensor 4: Hauptbrühboiler BG 1	FS4		
Füllstandsensor 5: Hauptbrühboiler BG 2	FS5		
AD-Wandler			

Tabelle 6: Übersicht der Ein- und Ausgänge der labortechnischen Espressoemaschine

#### 2.4.2 Steuerung – Relaisplatine

Da alle Magnetventile, die Heizelemente sowie der Asynchronmotor der Rotationspumpe eine Spannung von 230 V und einen wesentlich höheren Strom als die Kleinspannungskomponenten benötigen, müssen separate Relais eingesetzt werden. Mit ihrer Hilfe wird es möglich, Verbraucher mit höherer Leistung zu schalten. Alle Relais werden auf einer eigenen Trägerplatte befestigt. Vom *Raspberry Pi* gelangt ein Steuersignal zu einer zusätzlich entworfenen Erweiterungsplatine. Hier wird

die 5 V-Spannung sowie der sehr kleine Strom so angehoben, dass die Relais angesteuert werden können.

Eine Übersicht der zu schaltenden Bauteile sowie der Schaltspannungen stellt Tabelle 7 dar; ausführlichere Angaben zu den Verbrauchern und den zugehörigen Relais finden sich in Anhang 11.1.

Relais-Nr.	zu schaltendes Bauteil	Schaltspannung
R1	3-Wege-Ventil BG 1	230 V
R2	3-Wege-Ventil BG 2 (Vorbereitung)	230 V
R3	2-Wege-Ventil Bezug Dampf	230 V
R4	2-Wege-Ventil Bezug Heißwasser	230 V
R5	3-Wege-Ventil Abzweigung Dampf	230 V
R6	Heizung Dampfboiler	230 V
R7	Heizung Vorheizboiler	230 V
R8	Heizung Brühboiler BG 1	230 V
R9	Heizung Brühboiler BG 2 (Vorbereitung)	230 V
R10	Pumpenmotor (ungeregelt)	230 V

Tabelle 7: Übersicht der zu steuernden Relais

#### 2.4.3 Herstellung der Platinen

Für die Espressomaschine müssen diverse Platinen angefertigt werden. Dabei sollen Funktionsgruppen zusammengefasst werden, um sie bei Bedarf leicht wechseln zu können. Folgende Platinen müssen als Prototypen gefertigt werden:

- Platine zur Temperaturmessung
- Platine zur Druckmessung
- Platine zur Messung der Kräfte
- Platine zur Füllstandsüberwachung
- Platine für die symmetrische  $\pm 5$  V-Spannungsversorgung
- Platine für die stabilisierte 5 V-Spannungsversorgung

Um einen einfachen Zugang zu den einzelnen Komponenten zu ermöglichen, werden alle Platinen des Prototyps auf einer externen Acrylglasplatte befestigt. Durch die externe Platzierung der elektronischen Bauteile wird zudem die Abfuhr thermischer Energie verbessert.

#### 2.4.4 Heizelemente

Zum Aufheizen des Wassers im Dampfboiler sowie in allen Boilern für den Espresso Bezug werden Heizelemente benötigt. In der labortechnischen Espressomaschine sollen korrosionsbeständige Edelstahl-Heizelemente des Herstellers *Espresso Coffee Machines Manufacture GmbH (ECM)* eingesetzt werden. Die Elemente geben bei 230 V Versorgungsspannung eine Heizleistung von 1400 W ab und weisen eine Eintauchtiefe von 87 mm auf. Dieses Maß gibt auch die Mindesthöhe der

Boiler vor.

Alle Heizungen werden über die Relaisplatine aus Kapitel 3.4.6 angesteuert. In Abschnitt 3.2.1.3 finden sich genaue Berechnungen zu den theoretischen Aufheizzeiten des Wassers in den Boilern.

#### 2.4.5 Elektrische Sicherheit und Berührungsschutz

Wie bereits in Kapitel 2.1 erläutert, wird durch die Acrylglasverkleidung ein unbefugtes Eingreifen in die Maschine unterbunden. Die Espressomaschine fällt in Schutzklasse I, weshalb berührbare leitende Bauteile mit dem Schutzleiter verbunden werden müssen [DIN61140].



Ebenso müssen Überspannungen und Kurzschlüsse am Gerät verhindert werden. Dazu werden entsprechende Sicherungen in der Steuereinheit angebracht.

#### 2.4.6 Stromversorgung

Da die Komponenten unterschiedliche Eingangsspannungen benötigen, wird es in der labortechnischen Espressomaschine verschiedene Spannungsversorgungen geben.

Zwei Schaltnetzteile wandeln 230 V Wechselspannung (AC) in 12 V Wechsel- beziehungsweise 12 V Gleichspannung (DC) um. Aus 12 V AC wird eine  $\pm 5$  V Gleichspannung für die Versorgung der Instrumentenverstärker generiert. Mit der positiven Spannung werden zudem die Brückenschaltungen gespeist. 12 V DC werden auf 5 V reduziert und zusätzlich stabilisiert, um eine möglichst geringe Restwelligkeit zu erzielen. Mit diesen 5 V werden alle anderen Komponenten auf den Platinen sowie der *Raspberry Pi* mit Spannung versorgt.

### 3 Entwicklung des Prototyps einer labortechnischen Espressomaschine

In den folgenden Abschnitten werden alle notwendigen Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben, die in der Konzeption grundlegend umschrieben wurden, konkretisiert. Zugekaufte Komponenten wurden bereits im Konzept erläutert und werden daher nicht weiter beschrieben. Abbildung 5 zeigt das CAD-Modell des entwickelten Siebträgermaschinen-Prototyps (STEP-Datei im Anhang 11.6). Eine durchnummerierte Montagezeichnung der gesamten Maschine ist zusammen mit den entsprechenden Stücklisten im Anhang hinterlegt.

Aus Gründen besserer Lesbarkeit werden im Entwicklungsteil Indizes und Nummerierungen abschnittsweise neu vergeben. Sind Schaltpläne, Layouts, Datenblätter, Stücklisten oder Fertigungszeichnungen nicht explizit erwähnt, so befinden sie sich im zugehörigen Teil des Anhangs.

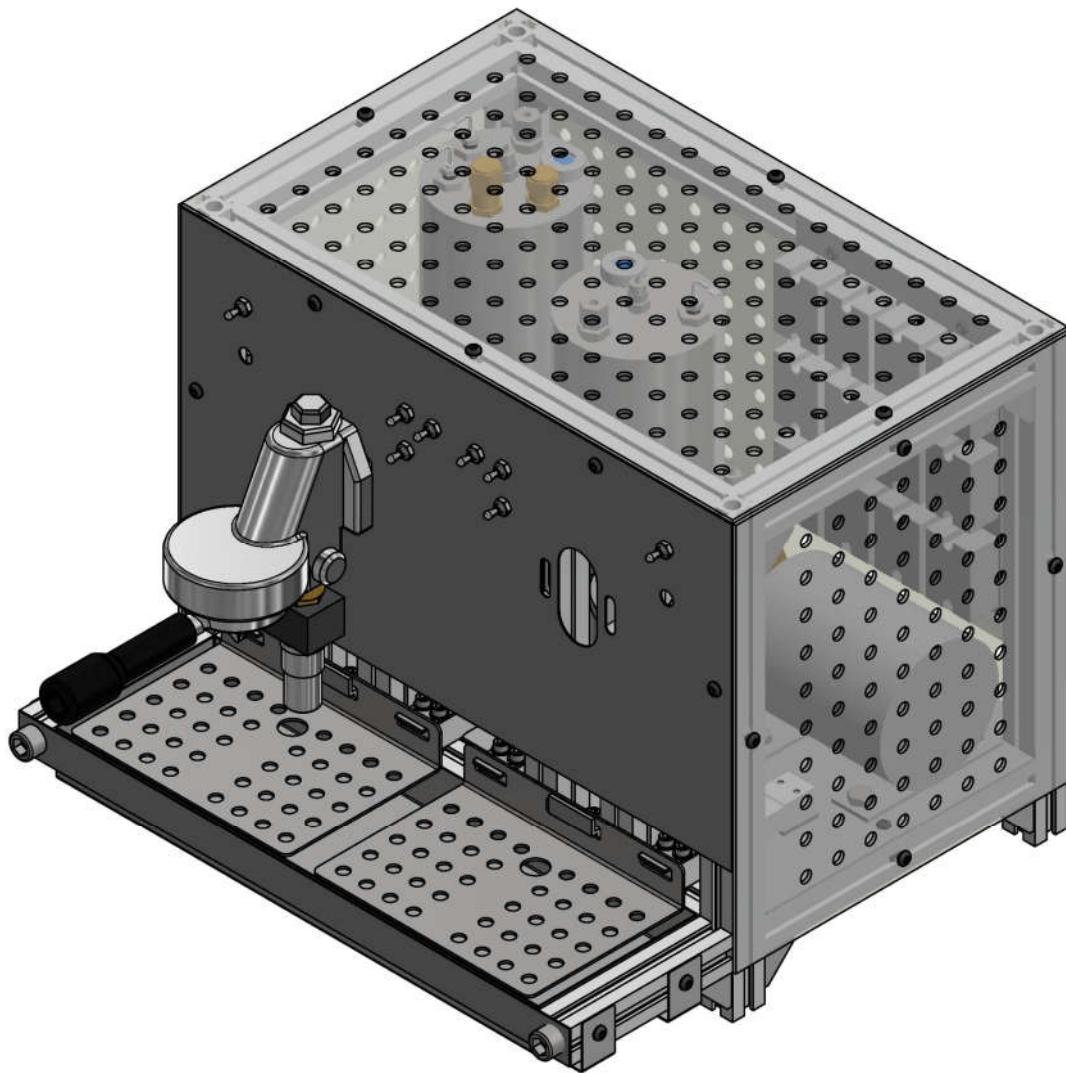


Abbildung 5: CAD-Modell der labortechnischen Siebträger-Espressomaschine

### 3.1 Konstruktion mechanischer Grundgerüste

In den folgenden beiden Abschnitten werden der Aufbau des Gehäuses für die labortechnische Espressomaschine sowie die externe Befestigungsmöglichkeit der Elektronik beschrieben.

#### 3.1.1 Konstruktion eines Gehäuses für die labortechnische Espressomaschine

In Abbildung 6 ist das mechanische Grundgerüst der labortechnischen Siebträger-Espressomaschine dargestellt. Die *KTH*-Aluminiumprofile (1) werden auf die jeweils nötige Länge zugeschnitten und mithilfe des Winkelverbindingssatzes *2828 F/F* (2) zusammengefügt. Dieser Satz besteht aus einem Verbindungswinkel, der mit einer Hammermutter und einer zugehörigen Schraube in den Nuten der Profile befestigt wird. An der linken und rechten Seite, der Rückwand sowie an der Oberseite der Maschine werden Verkleidungen aus Acrylglas (3) angebracht. Zur besseren Luftzirkulation innerhalb der Maschine werden diese mit Löchern versehen. Die Front (4) und der Boden (5) bestehen aus einem Stahlblech, das jeweils mit den nötigen Bohrungen zur Befestigung der Baugruppen versehen

wird. Alle Verkleidungsteile werden über Hutmuttern und zugehörige Schrauben mit den Profilen verbunden. An der Vorderseite des Gerüsts befindet sich zudem der Rahmen (6) zur Aufnahme der Abtropfschale. Seine Seiten bestehen aus KTH-Profilen, den vorderen Abschluss bildet ein Blechstreifen (7). Zur Abstützung der Auffangschale werden zwei Bügel (8) aus Stahlblech angefertigt und mit Hutmuttern an den Profilen montiert. Fertigungszeichnungen sind in Anhang 11.4 hinterlegt.

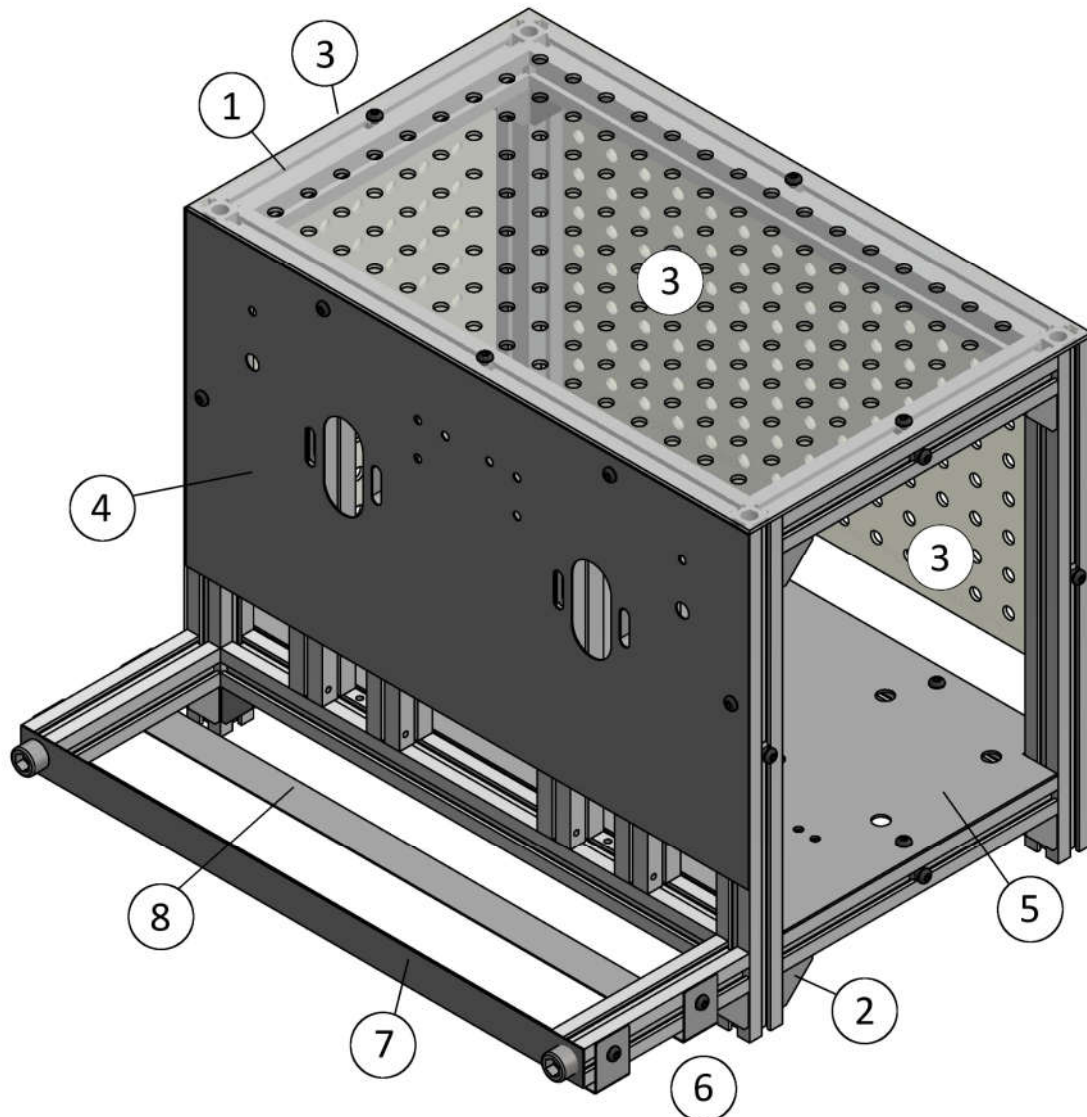


Abbildung 6: Mechanisches Grundgerüst der labortechnischen espressomaschine

### 3.1.2 Konstruktion eines externen Gerüsts für die elektronischen Komponenten

Zur Befestigung aller elektronischen Komponenten wie Platinen und Netzteile wird ein externes Gerüst benötigt, das in Abbildung 7 fertig bestückt dargestellt ist (STEP-Datei im Anhang 11.6).

Als Grundplatte dient eine Acrylglasplatte (1), auf die die Füllstandsüberwachungsplatine (2) sowie die Spannungsversorgungen aus Eigenfertigung (3) geschraubt werden. Verlängerungsmuttern (4) sorgen für den nötigen Abstand zwischen den Platinen und der Acrylglasplatte. Die beiden Hutschienennetzteile (5) werden über eine 35 mm-Hutschiene (6) ebenfalls auf der Grundplatte

fixiert. Mithilfe lasergesinterter Rahmen (vgl. Abbildung 8 (7)) werden sämtliche Mess- und Expanderplatinen sowie der *Raspberry Pi* mit der Grundplatte verbunden. Aus Darstellungsgründen werden die Platinen sowie der *Raspberry Pi* lediglich als Platzhalter (8) abgebildet. Die Platinen können sowohl untereinander als auch mit der Spannungsversorgung über ein 40-poliges Flachbandkabel (9) zusammengeschlossen werden. Alle anderen Komponenten werden wie im Übersichtsschaltplan unter 3.4.1 beziehungsweise im ausführlichen Schaltplan der Maschine (Anhang 11.3) dargestellt, verbunden.

Zur Fertigung der Platinenhalterrahmen mittels Lasersinterverfahren im Verbundlabor KCA der Hochschule München muss das CAD-Modell als STL-Datei (*Standard Tessellation Language*) aufbereitet werden. Neben den vorgegebenen Konstruktionsrichtlinien für das Lasersinterverfahren ist zudem darauf zu achten, dass die Gewinde auskonstruiert sind und nicht als graphische Darstellung vorliegen. Das fertige STL-Modell befindet sich in Anhang 11.6.

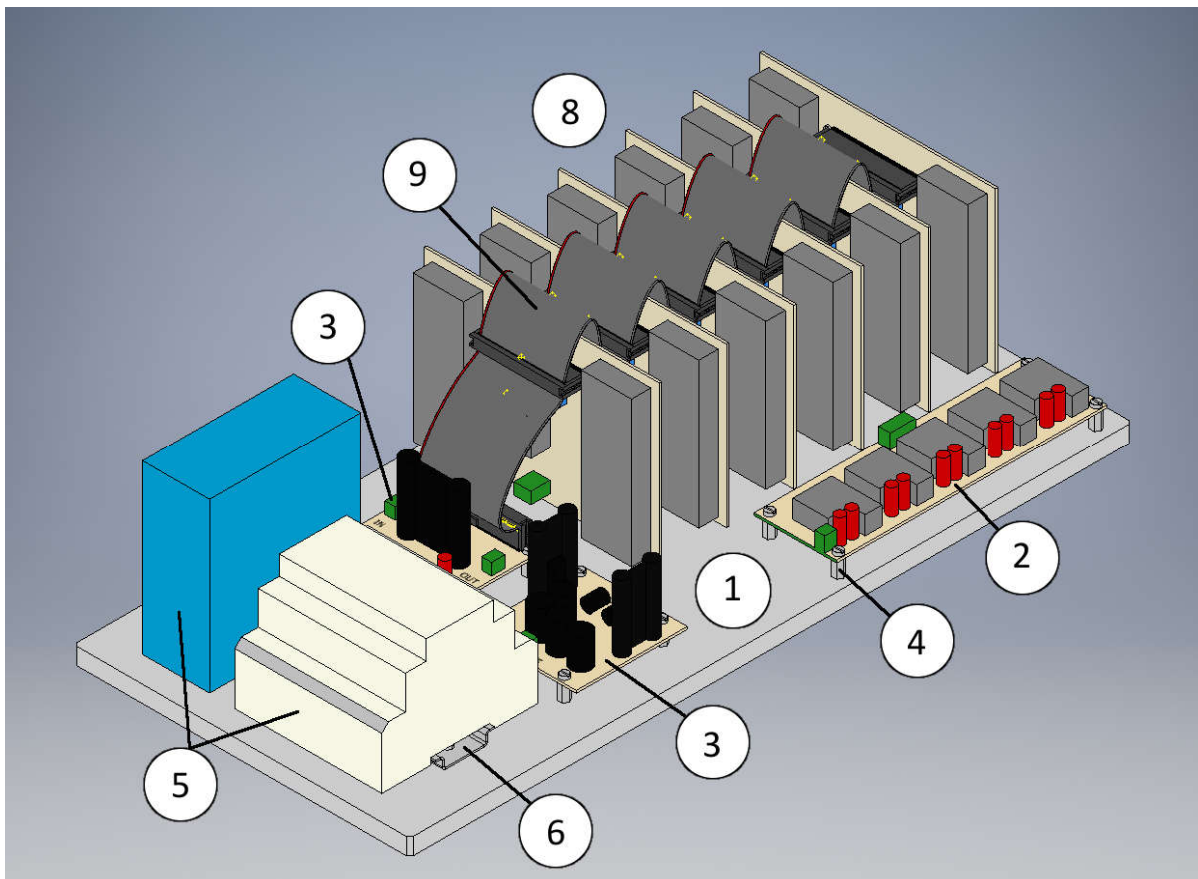


Abbildung 7: Externes Gerüst für die elektronischen Komponenten (Vorderansicht)



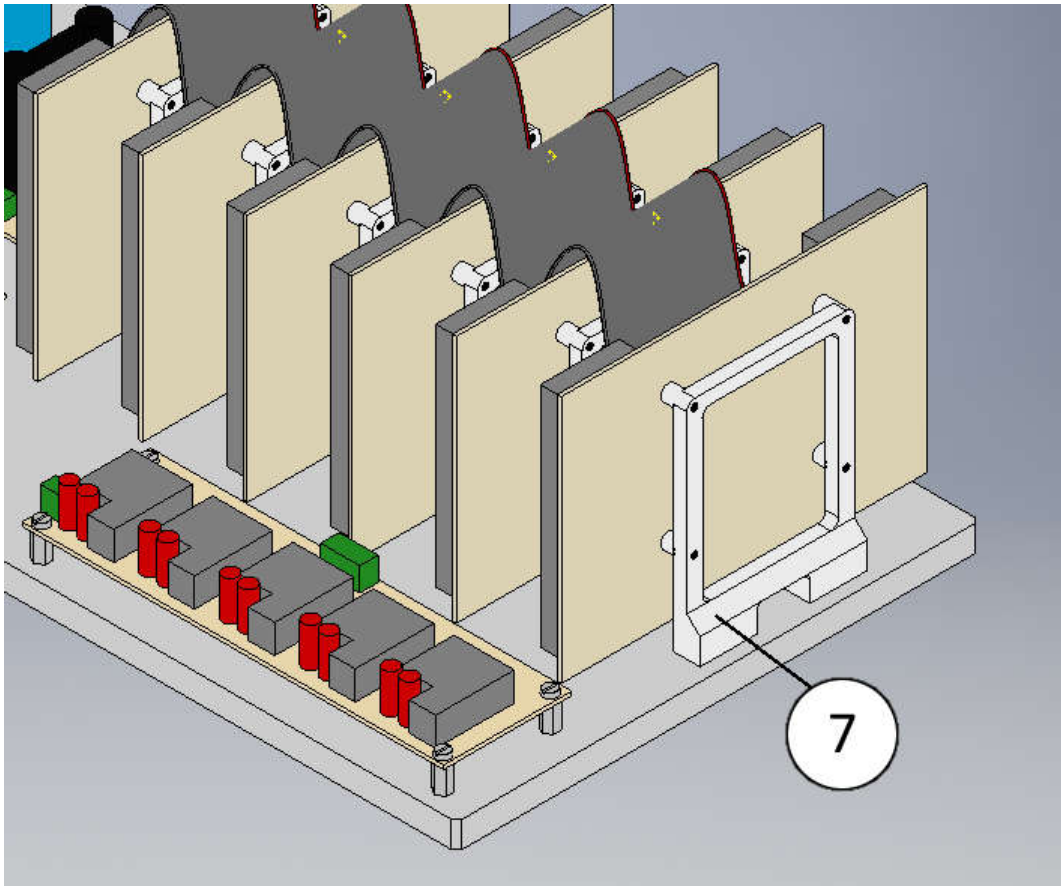


Abbildung 8: Externes Gerüst für die elektronischen Komponenten (Rückansicht)

### 3.2 Entwicklung der hydraulischen Komponenten

Diverse hydraulische Komponenten wie Magnet- oder Sicherheitsventile werden aus wirtschaftlichen Gründen zugekauft und müssen in die labortechnische Espressomaschine integriert werden. Falls zugehörige Datenblätter verfügbar sind, werden diese im Anhang hinterlegt. Artikelnummern sowie Hersteller- oder Lieferantennamen sind in den Stücklisten vermerkt. Komponenten, die von Grund auf neu konstruiert werden müssen sowie zu modifizierende Bauteile, werden im Folgenden genauer erläutert.

#### 3.2.1 Entwurf der Boiler in der Espressomaschine

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, verfügt die Espressomaschine über mehrere Boiler mit verschiedenen Volumina und Temperaturanforderungen. Um den Fertigungsaufwand möglichst gering zu halten, sollen diese aus Rohrstücken mit angeschweißten Böden, Deckeln und Befestigungsfüßen bestehen, die wiederum mit der Grundplatte verschraubt werden. Um die Fixkosten bei der Materialbeschaffung niedrig zu halten, sind die Rohrdurchmesser für alle Boiler einheitlich gewählt. Ziel ist es gleichartige Boiler zu verbauen, deren Volumina durch Variation der Höhe angepasst werden können. Zudem sollen auch die Deckel möglichst ähnlich sein, angepasst an den jeweiligen Verwendungszweck. Als Material für die Boiler wurde der austenitische Stahl X6CrNiMoTi17-12-2 (Werkstoffnummer 1.4571) ausgewählt. Dieser zeichnet sich durch sehr gute

Schweißbeignung aus: Aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehalts ist nach dem Schweißen keine Wärmebehandlung nötig und zusätzlich verhindern Titankarbide eine mögliche interkristalline Korrosion. Außerdem sorgt der hohe Chromgehalt von 12 % (in Lösung) für die Korrosionsbeständigkeit des Stahls. Laut Wittel wird der gewählte Stahl in der Lebensmittelindustrie verwendet und eignet sich zur Herstellung von Heizkesseln [RM2]. Bei der Auswahl der Rohrdurchmesser für die Boiler wird sowohl auf eine möglichst kompakte Bauweise, als auch auf die Einhaltung der nötigen Mindesthöhe, die durch die Heizelemente vorgegeben ist, Wert gelegt. Wie bereits im Konzept erläutert, gibt es in der Labormaschine einen Dampf-, einen Vorwärm- und einen Hauptbrühboiler. Die wichtigsten Abmessungen der Boiler können Tabelle 8 entnommen werden. Weitere Angaben finden sich bei den Fertigungszeichnungen im Anhang.

Boilerbezeichnung	Durchmesser	Wandstärke Rohr	Höhe	Volumen	Solltemperatur
Dampfboiler	114,3 mm	3,6 mm	238 mm	1,9 l	120 °C
Vorwärmboiler	114,3 mm	3,6 mm	188 mm	1,5 l	88 °C
Hauptbrühboiler	114,3 mm	3,6 mm	118 mm	0,75 l	88 °C

Tabelle 8: Übersicht wichtiger Boilerparameter

### 3.2.1.1 Auslegung der Materialstärken sowie der Schweißnähte

Der sich anschließenden Berechnung liegen folgende relevante Kennwerte für den Stahl

X6CrNiMoTi17-12-2 laut TB 1-1 [RM2] zugrunde:

- Zugfestigkeit  $R_m$ : min.  $500 \frac{N}{mm^2}$
- Streckgrenze  $R_e$ : min.  $200 \frac{N}{mm^2}$
- Zug-/ Druckwechselfestigkeit  $\sigma_{zd WN}$ :  $200 \frac{N}{mm^2}$
- Biegewechselfestigkeit  $\sigma_{b WN}$ :  $250 \frac{N}{mm^2}$



Die nachfolgenden Formeln, Daten und Tabellenangaben wurden aus *Roloff/ Matek Maschinenelemente* entnommen [RM1, RM2].

Da dünnwandige Druckbehälter aus zweidimensionalen Flächentragwerken bestehen und nicht den im Maschinenbau üblichen eindimensionalen Linienträgern entsprechen, ist eine Berechnung der erforderlichen Wanddicken der Mäntel und Böden auf Grundlage der AD 2000-Merkblätter nötig. Dabei wird die Schweißnahtfestigkeit über den Festigkeitsbeiwert  $K$  und den Ausnutzungsfaktor  $v$  sichergestellt. Die Berechnungsregeln gelten für überwiegend ruhende Beanspruchung unter innerem Überdruck [RM1, RM3].

Zunächst erfolgt die Berechnung der nötigen Wanddicke für die Rohre der Boiler.

Die Formel für die erforderliche Wanddicke  $t$  bei zylindrischen Druckbehälter-Mänteln gilt für



$D_a/D_i \leq 1,2$ . Mit  $D_a = 114,3$  mm und  $D_i = 107,1$  mm ergibt sich ein Wert von  $1,07 \leq 1,2$ . Daraus folgt, dass Gl. 1 verwendet werden kann.

$$t_W = \frac{D_a * p_e}{2 \frac{K}{S} v + p_e} + c_1 + c_2 \quad \text{Gl. 1}$$

Mit folgenden Werten wird Gl. 1 berechnet:

Der äußere Manteldurchmesser  $D_a$  ist 114,3 mm. Der Berechnungsdruck  $p_e$  muss größer sein als der maximal zulässige Druck (PS). Um dies zu berücksichtigen, wird ein Zuschlag von 50 % angenommen, was dem hydrostatischen Prüfdruck aus der EU-Druckgeräterichtlinie entspricht [DGRL]. Mit einem maximal zulässigen Druck  $PS_{Brüh} = 16$  bar für den Vorwärm- sowie den Hauptbrühboiler und dem Zuschlag folgt für  $p_{e\ Brüh}$  ein Wert von 24 bar. Für den Dampfboiler wird das Maximum des zulässigen Drucks auf 3 bar festgelegt, woraus sich ein Berechnungsdruck  $p_{e\ Dampf}$  von 4,5 bar ergibt. In Tabelle 6-15 findet sich für den Festigkeitskennwert  $K$  für den Stahl 1.4571 eine Dehngrenze  $R_{p1,0\ 100}$  von  $218 \frac{N}{mm^2}$  (bei 100 °C) und bei 150 °C ein  $R_{p1,0\ 150}$  von  $206 \frac{N}{mm^2}$ . Nach Tabelle 6-17 ist der Sicherheitsbeiwert  $S$  für Walz- und Schmiedestähle mit 1,5 gegeben. Für nahtlose Bauteile gilt ein Ausnutzungsfaktor  $v$  von 1,0. Der benötigte Zuschlag für die Wanddickenunterschreitung  $c_1$  kann bei austenitischen Stählen gleich Null gesetzt werden. Da der verwendete austenitische Stahl korrosionsbeständig ist, beträgt der Abnutzungszuschlag  $c_2$  ebenfalls Null.

Damit alle Boiler die gleiche Wandstärke aufweisen, wird jeweils der maximale Wert für  $p_e$  ( $p_{e\ Brüh}$ ) und der minimale Wert für  $K$  ( $R_{p1,0\ 150}$ ) verwendet. Dies entspricht der größtmöglichen Belastung. Setzt man alle gewählten Werte in Gl. 1 ein, so ergibt sich für die erforderliche Wanddicke  $t_W$  ein Wert von 0,99 mm. Zusätzlich wird in der Literatur darauf hingewiesen, dass „[...] die kleinste Wanddicke nahtloser, geschweißter oder hartgelöteter Mäntel [...] unter Innendruck [...] mit 2 mm festgelegt [ist]“ [RM1]. Da beim ausgewählten Lieferanten nicht alle verfügbar sind, wird im Prototyp ein Rohr mit der Wandstärke 3,6 mm verwendet.

Nun wird mit Gl. 2 die erforderliche Wanddicke der Böden beziehungsweise der Deckel bestimmt. Beide sollen die gleiche Stärke aufweisen, weshalb hier nur exemplarisch die Berechnung des Bodens erläutert wird.

$$t_B = C * D * \sqrt{\frac{p_e * S}{K}} + c_1 + c_2 \quad \text{Gl. 2}$$

Hierbei ist der Berechnungsbeiwert  $C$ , nach Tabelle 6-18 [RM2] und Bild 6-50c [RM1], gleich 0,40. Der Berechnungsdurchmesser  $D$  wurde wie in Bild 6-50c erläutert ausgewählt und entspricht somit dem Innendurchmesser  $D_i$  (107,1 mm) des verwendeten Rohres. Alle anderen Parameter stimmen mit denen, die bei der Berechnung der Rohrwände verwendet wurden, überein. Für den

Berechnungsdruck  $p_e$  und den Festigkeitskennwert  $K$  wird ebenfalls der Maximal- beziehungsweise Minimalwert gewählt. Daraus ergibt sich eine minimal erforderliche Stärke der Böden  $t_B$  von 5,66 mm.

Da die Boilerböden und -deckel jedoch Durchgangsbohrungen für diverse Anschlüsse aufweisen, wurde  $t_B$  mit einem Aufschlag von rund 100 % versehen. Die tatsächliche Stärke der Böden beträgt damit 12 mm.

Im letzten Schritt wird die Abmessung der Schweißnähte für die Boiler festgelegt. Laut Wittel werden die Mäntel und Böden von Druckbehältern ausschließlich durch Stumpfnähte verbunden. In der Annahme, dass diese Nähte durchgeschweißt sind, entspricht die rechnerische Nahtdicke  $a$  der Dicke  $t$  der zu verbindenden Bauteile. Sind die Bauteile unterschiedlich dick, wird das kleinere Maß  $t_{min}$  verwendet [RM1]. Somit beträgt die nötige Nahtdicke der Boiler 3,6 mm.

### 3.2.1.2 Festigkeitsnachweis der Boilerkomponenten sowie der Schweißnähte

Der Druckbehälter ist dreidimensional sowie mehrfach überbestimmt, sodass er sich mit den gängigen Methoden der Festigkeitslehre ohne vorherige Vereinfachung nicht berechnen lässt. Daher wird in der folgenden Betrachtung das System stark vereinfacht. Um die berechneten Ergebnisse zu validieren, wird es zudem mithilfe einer FEM-Belastungsanalyse in *Autodesk Inventor* überprüft.

Für den analytischen Nachweis der Schweißnähte sind folgende Berechnungen nötig:

Die resultierende innere Kraft  $F_{iB}$  auf die Böden der Boiler und die resultierende Kraft  $F_{iM}$  auf die Mantelfläche wird durch Umstellen der Druckformel  $p = \frac{F}{A}$  zu

$$F_i = p * A \quad \text{Gl. 3}$$

gebildet.

Für den Innendruck wird erneut  $p_{e \text{ Brüh}}$  verwendet. Als Fläche  $A_{iB}$  wird die Innenseite der Böden genutzt, da hier der Innendruck anliegt. Die Flächen werden idealisiert ohne Bohrungen angenommen, da sich hierdurch ein höherer Wert für die Fläche ergibt. Dies entspricht der maximal möglichen Kraft. Die Innenfläche der Böden ergibt sich aus

$$A_{iB} = \frac{\pi * D_i^2}{4} = \frac{\pi * 107,1 \text{ mm}^2}{4} = 9010 \text{ mm}^2 \quad \text{Gl. 4}$$

Für  $p_{e \text{ Brüh}}$  gleich 24 bar sowie das aus Gl. 4 in Gl. 5 eingesetzte Ergebnis bedeutet dies:

$$F_{iB} = 24 * 10^5 \text{ Pa} * 9010 \text{ mm}^2 = 21624 \text{ N} \quad \text{Gl. 5}$$

Die Mantelinnenfläche für den Vorbrühboiler resultiert aus

$$A_{iM} = D_i * \pi * h = 107,1 \text{ mm} * \pi * 164 \text{ mm} = 55180 \text{ mm}^2 \quad \text{Gl. 6}$$

In Gl. 3 eingesetzt beträgt die resultierende Kraft  $F_{iM}$  132432 N

Durch Vereinfachung der Böden auf einen dünnen Balken können die Kräfte in den Verbindungspunkten berechnet werden. Der Balken ist an beiden Enden fest eingespannt (vgl. Abbildung 9) und die resultierende Druckkraft greift in dessen Mitte an. Nach dem Freischneiden können die Auflagerkräfte wie folgt gebildet werden (vgl. Abbildung 10):

$$\Sigma F_y = 0 = -F_{ADy} + F_i + -F_{BDy} \quad \text{Gl. 7}$$

$$F_i = F_{ADy} + F_{BDy} \quad \text{Gl. 8}$$

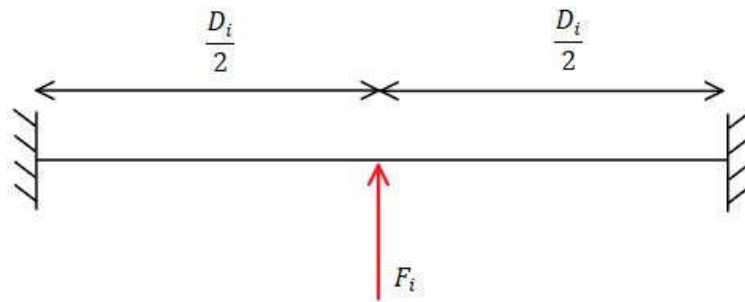


Abbildung 9: Auf einen Balken reduziertes Deckelement

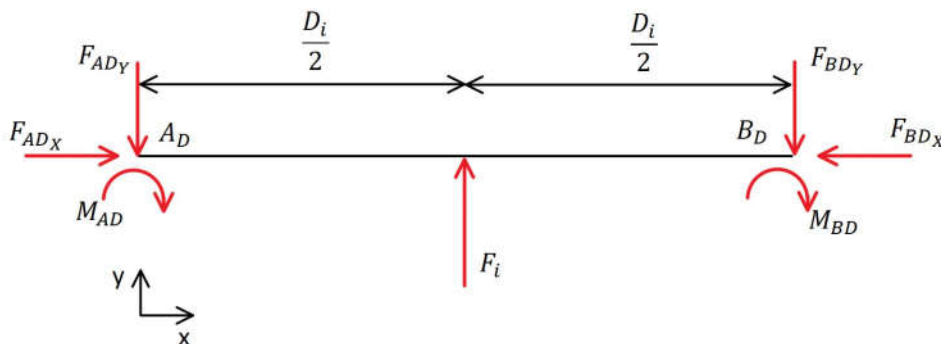


Abbildung 10: Freischnitt von Abbildung 1

Aufgrund der Symmetrie des Balkens wird eine gleichmäßige Kraftverteilung auf beide Lager angenommen:

$$F_{ADy} = F_{BDy} \quad \text{Gl. 9}$$

In Gl. 5 eingesetzt folgt daher:

$$F_{ADy} = \frac{F_i}{2} \quad \text{Gl. 10}$$

Nach Einsetzen der resultierenden Kraft  $F_{iB}$  in Gl. 10 ergibt sich die Reaktionskraft  $F_{ABy}$  zu 10.812 N.

Die analoge Berechnung des Mantels ergibt  $F_{AMy}$  gleich 66216 N.

Mit Gl. 11 wird die auftretende Zug-Druck-Spannung senkrecht zur Schweißnaht  $\sigma_{\perp zd}$  berechnet:

$$\sigma_{\perp zd} = \frac{F_{ADy}}{\Sigma(a * l)} \quad \text{Gl. 11}$$

Dabei ist

- $a = 3,6 \text{ mm}$  und
- $l = D_i * \pi = 107,1 \text{ mm} * \pi = 336,46 \text{ mm}$ .

Daraus folgt für die Schweißnahtspannung aus Richtung der Bodenfläche  $\sigma_{\perp z d B} = 8,93 \text{ MPa}$  und für die Spannung aus Richtung der Mantelfläche  $\sigma_{\perp z d M} = 27,33 \text{ MPa}$ . Die aus der Druckbelastung auf die Mantelfläche resultierenden Spannungen verteilen sich gleichmäßig auf die Schweißnähte an Deckel und Boden, weshalb die Nahtlänge in Gl. 11 doppelt eingeht. Im nächsten Schritt kann das Biegemoment auf die Schweißnähte ermittelt werden. Hierzu wird das Balkensystem aus Abbildung 10 aufgrund seiner Symmetrie bei  $\frac{D_i}{2}$  geteilt. Der neue Freischnitt ist in Abbildung 11 ersichtlich.

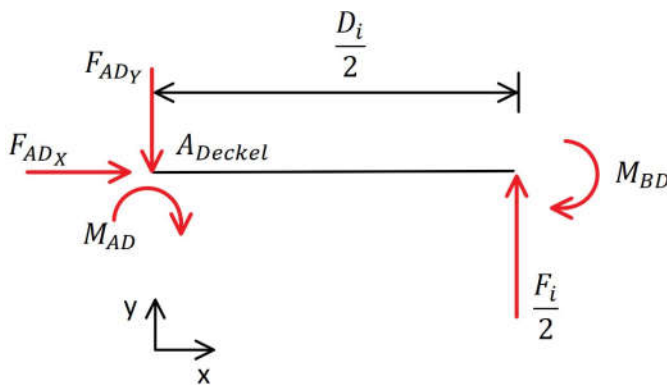


Abbildung 11: Freischnitt eines halben Deckels

Mit dem Momentengleichgewicht um den Punkt A

$$\Sigma M_A = 0 = M_A - \frac{F_i}{2} * \frac{D_i}{2} + M_B \quad \text{Gl. 12}$$

unter der Bedingung, dass  $M_A = M_B$  sowie aufgelöst nach dem Moment  $M_A$

$$M_A = F_i * \frac{D_i}{8} \quad \text{Gl. 13}$$

ergibt sich ein Biegemoment von 289491 Nmm.

Mit den Momenten auf die Naht kann die senkrechte Biegespannung  $\sigma_{\perp b}$  bestimmt werden (vgl. Gl. 14).

$$\sigma_{\perp b} = \frac{M}{I_W} y \quad \text{Gl. 14}$$

Das Flächenträgheitsmoment  $I_W$  wird mit der Annahme für einen rechteckigen Querschnitt der Breite  $b = D_i$  und der Höhe  $h = 12 \text{ mm}$  folgendermaßen berechnet:

$$I_W = \frac{bh^3}{12} = \frac{107,1 \text{ mm} * 12 \text{ mm}^3}{12} = 15422,4 \text{ mm}^4 \quad \text{Gl. 15}$$

Der Abstand  $y$  von der neutralen Faser zur Randfaser beträgt im Deckel 6 mm.  $M$  entspricht den Momenten  $M_A$  beziehungsweise  $M_B$ . Setzt man die ermittelten Werte in Gl. 14 ein, ergibt sich ein  $\sigma_{\perp b}$  von 112,6 MPa. Insgesamt wirken Normalspannungen aus Zug-Druck- und Biegespannungen von

$$\sigma_{ges} = \sigma_{\perp zd B} + \sigma_{\perp zd M} + \sigma_{\perp b} = 148,86 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 16}$$

auf eine Schweißnaht.

Nun werden die auftretenden Spannungen mit der zulässigen Spannung  $\sigma_{w zul}$  verglichen. Sie wird errechnet durch

$$\sigma_{w zul} = \alpha_W * \frac{R_e}{S_M} \quad \text{Gl. 17}$$

- $\alpha_W$ : ist für 1.4571 nicht angegeben, daher wird der Wert zu 0,85 für durchgeschweißte Nähte mit nicht nachgewiesener Nahtgüte gewählt
- $R_e$ : nach TB 1-1: 200 MPa
- $S_M = 1,1$

In Gl. 17 eingesetzt ergibt sich für das verwendete Material eine zulässige Spannung von 154 MPa.

Daraus folgt, dass  $\sigma_{ges} \leq \sigma_{w zul}$  ist und die Naht der Belastung standhält.

Um die obigen Ergebnisse zusätzlich zu verifizieren, wurde eine Belastungsanalyse mithilfe der Finiten-Elemente-Methode durchgeführt. Die Analyse erfolgt am Vorbrühboiler, da hier aufgrund des höheren Prüfdrucks größere Spannungen zu erwarten sind.

Dazu wurden die Innenflächen mit dem Prüfdruck  $p_{e Brüh} = 24 \text{ bar}$  beaufschlagt. Als feste Einspannung dienen die Standfüße, wodurch sich der Boiler frei in alle Richtungen ausdehnen kann. Die Ergebnisse der Analyse, maximale von-Mises-Spannungen von 148,9 MPa an den Schweißnähten sowie durchschnittliche Minimalspannungen von circa 10,2 MPa, sind Abbildung 12 zu entnehmen. Diese ermittelten Werte liegen unterhalb der zulässigen Schweißnahtspannung  $\sigma_{w zul}$  von 154 MPa. Somit konnte gezeigt werden, dass die Sicherheit der Schweißnähte an den Boilern gegeben ist und gut mit den analytisch berechneten Werten übereinstimmt.



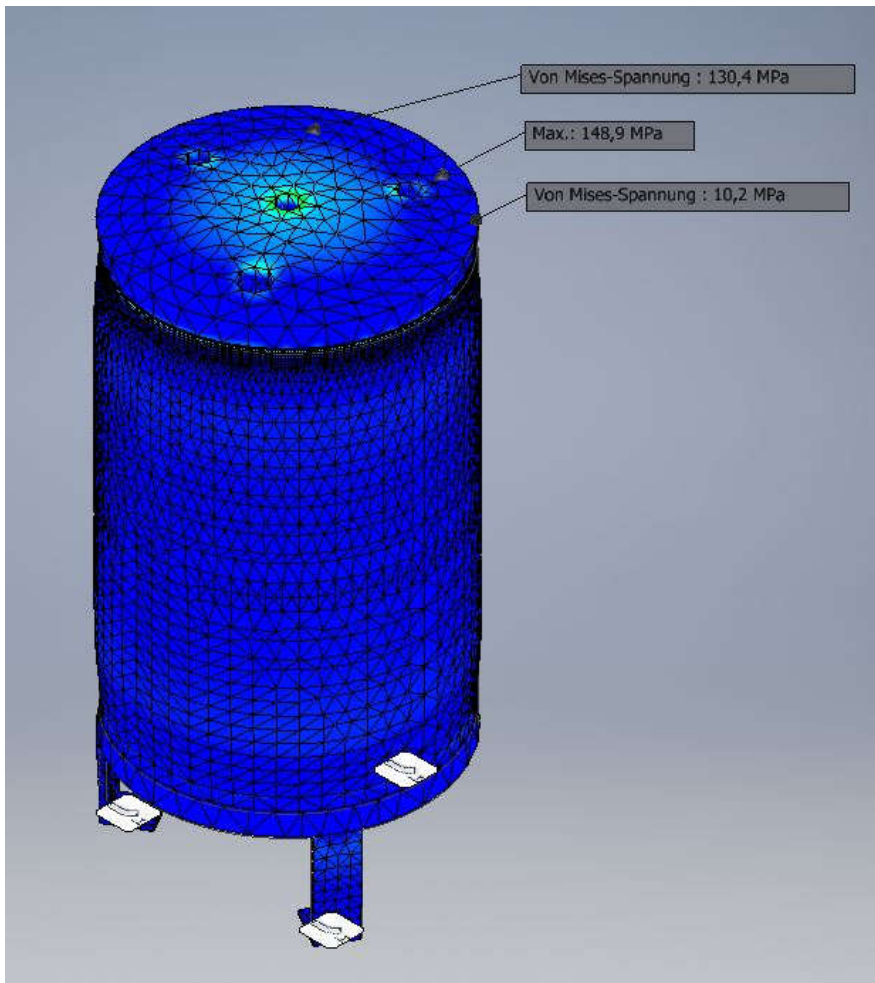


Abbildung 12: von-Mises-Spannungen bei einer Belastung von 24 bar

Zudem soll die Dauerfestigkeit der Böden, der Deckel und des Mantels auf analytischem Weg nachgewiesen werden.

Da zur Erstellung einer Wöhlerkurve eine Vielzahl an Versuchen nötig sind, wird an dieser Stelle ein vereinfachtes *Smith*-Diagramm (vgl. Abbildung 14) angefertigt, das nur wenige charakteristische Kennwerte des Werkstoffs benötigt. Diese Werte können dem ersten Abschnitt beziehungsweise TB 1-1 entnommen werden. Die Erstellung des Smith-Diagramms erfolgt gemäß den Ausführungen nach Niemann [Niem01].

Um den gegebenen Belastungsfall zu ermitteln, wird das Spannungsverhältnis  $\kappa$  aus der auftretenden Oberspannung  $\sigma_o$  und der Unterspannung  $\sigma_u$  gebildet:

$$\kappa = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad \text{Gl. 18}$$

Der maximal auftretende Druck im Betrieb der Espressomaschine liegt bei  $PS_{Brüh} = 16$  bar. Setzt man diesen Wert in Gl. 5 ein, so ergibt sich eine neue resultierende Kraft  $F_{iB PS}$  von 14416 N. Um das passende Moment zu bestimmen wird  $F_{iB PS}$  in Gl. 13 eingesetzt. Unter Berücksichtigung der Symmetrie hat dies an den Einspannungen ein Moment  $M_{A PS}$  von 192994,2 Nmm zur Folge. Die

zugehörige Biegespannung an den Böden bei Betriebsdruck kann mittels Gl. 14 bestimmt werden.  $I_W$  entspricht dem in Gl. 15 ermittelten Wert:

$$\sigma_{tb PS} = \frac{192994,2 \text{ Nmm}}{15422,4 \text{ mm}^4} * 6 \text{ mm} = 75,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Gl. 19}$$

Mit der Kesselformel

$$\sigma_{tM} = \frac{D_i * PS}{2 * t} \quad \text{Gl. 20}$$

kann die tangentielle Spannung auf den Behältermantel berechnet werden. Nach dem Einsetzen der entsprechenden Werte ergibt sich eine Spannung von 23,8 MPa.

Da hier idealisierte Bedingungen vorliegen, werden die Ergebnisse mit der FEM-Analyse verglichen. Die auftretenden Spannungen in der Mantelfläche entsprechen in etwa denen der Kesselformel (vgl. Abbildung 13). Der Deckel weist aufgrund von Bohrungen eine geringere Fläche auf, weswegen sich die Ergebnisse der Berechnung von denen der Analyse unterscheiden. Wie in Abbildung 13 ersichtlich, wurden hier Spannungen von maximal 59,64 MPa ermittelt.

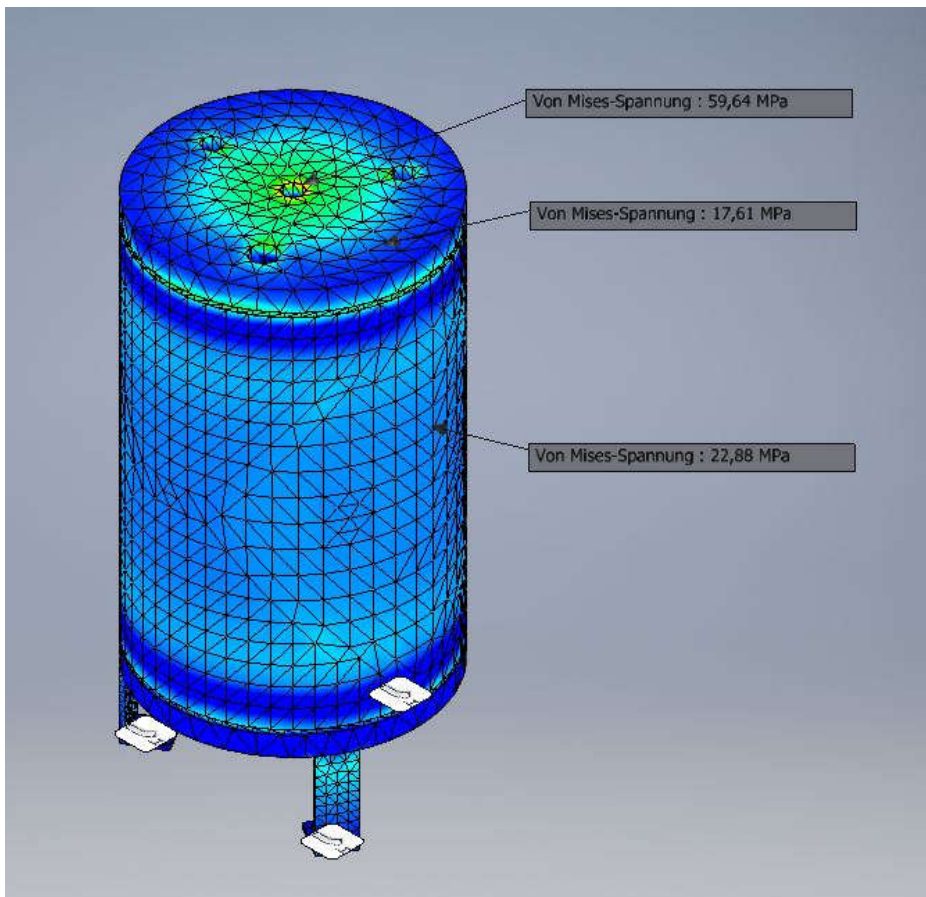


Abbildung 13: von-Mises-Spannungen im Deckel und Mantel des Boilers

Die Untergrenze der Spannung  $\sigma_U$  ist dann erreicht, wenn im Inneren des Boilers kein Druck (0 bar) anliegt, wodurch  $\sigma_U$  dann ebenfalls gleich Null ist. Setzt man  $\sigma_U$  gleich 0 in Gl. 18 ein, ergibt sich für

das Spannungsverhältnis  $\kappa$  ebenfalls Null, was einer dynamisch rein schwellender Beanspruchung entspricht [RM1]. Nun kann die Mittelspannung  $\sigma_m$  wie in Gl. 21 bestimmt werden.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_o}{2} \quad \text{Gl. 21}$$

Für  $\sigma_o$  wird die in Gl. 19 ermittelte Spannung  $\sigma_{tb\ PS}$  (75,1 N/mm<sup>2</sup>) eingesetzt, da dies der höhere Wert der berechneten Spannungen ist. Der mittlere Spannungswert  $\sigma_m$  ist damit 37,55 N/mm<sup>2</sup>.

Vergleicht man nun die auftretende mittlere Spannung aus den Berechnungen und die zulässigen Spannungsamplituden aus dem vereinfachten *Smith*-Diagramm aus Abbildung 14, so stellt man fest, dass eine maximale Schwellspannung  $\sigma_{zd\ Sch}$  von 200 N/mm<sup>2</sup> nicht überschritten wird. Eine ausreichende Sicherheit ist somit gegeben.

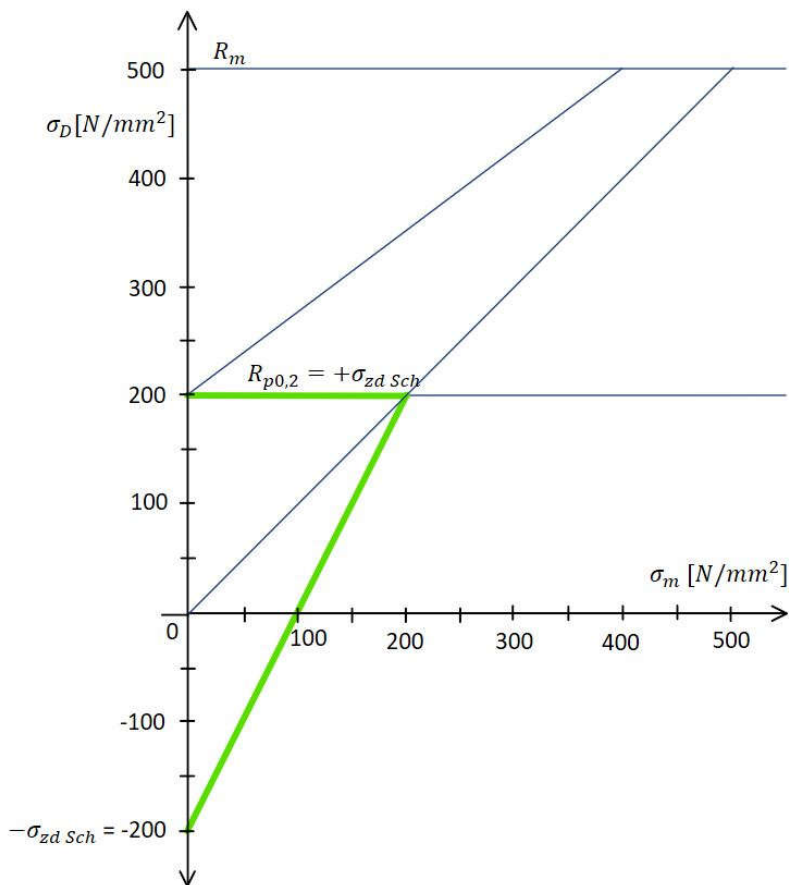


Abbildung 14: Smith-Diagramm für 1.4571

### 3.2.1.3 Aufheizzeiten der Heizelemente

Für die Benutzerfreundlichkeit der labortechnischen Espresso-Maschine stellt die Aufheizzeit einen nicht zu vernachlässigenden Faktor dar. Als Aufheizzeit wird im Folgenden der Zeitraum vom Einschalten der Maschine bis zum erstmöglichen Bezugszeitpunkt bezeichnet. Der Bezugszeitpunkt ist erreicht, sobald die Wassertemperatur in allen Boilern mit der jeweiligen Zieltemperatur übereinstimmt.



Um die Aufheizzeit bestimmen zu können, muss zunächst die dem Wasser sowie dem Behälter zuzuführende Wärmemenge über Gl. 22 berechnet werden. Dafür werden die Außenwände der Boiler als adiabat angenommen.

$$Q = c_{p,Wasser} * m_{Wasser} * \Delta T + c_{p,Stahl} * m_{Stahl} * \Delta T + Q_{Verdampfung} \quad \text{Gl. 22}$$

Die zu realisierende Temperaturdifferenz ergibt sich aus der Zieltemperatur abzüglich der für die Berechnung angenommenen Ausgangstemperatur von 15 °C. Für die beiden Boiler gelten damit folgende Werte:

- $\Delta T_{Vorbrühboiler} = 65 \text{ K}$
- $\Delta T_{Hauptbrühboiler} = 78 \text{ K}$
- $\Delta T_{Dampfboiler} = 110 \text{ K}$

Nach Dobrinski variiert die Wärmekapazität von Wasser  $c_{p,Wasser}$  im Temperaturbereich von 4 °C bis 99,5 °C lediglich um einen Prozentpunkt und kann deshalb in guter Näherung als konstant angesehen werden [Dobr10]. Für die weitere Berechnung wird  $c_{p,Wasser}$  gleich 4186 J/kgK gewählt. Im Dampfboiler wird ein Dampfmasseanteil von 33,3 % angestrebt, wobei die benötigte Verdampfungsenthalpie bezüglich der zuzuführenden Wärmemenge berücksichtigt werden muss. Laut Kramer beträgt die Verdampfungsenthalpie für Wasser  $\Delta h_V$  gleich 2257 kJ/kg bei einer Temperatur von 100 °C [Kram02]. Aufgrund des erhöhten Drucks im Boiler steigt die Siedetemperatur an und der restliche Wasseranteil wird als flüssig angenommen.

Ein Aufheizen der stählernen Tanks ist unvermeidbar, weshalb die aufgenommene Wärmemenge des Stahls mit einer Wärmekapazität von  $c_{p,Stahl}$  gleich 400 J/kgK [DIN4108] nicht vernachlässigt werden kann.

Für die Berechnung der enthaltenen Wassermasse werden die Tanks als maximal gefüllt vorausgesetzt. Unter Vorgabe der Dichte des Wassers von  $\rho_{Wasser}$  gleich 1000 kg/m<sup>3</sup> kann seine Masse nach Gl. 23 bestimmt werden:

$$m_{Wasser} = \rho_{Wasser} * V_{Boiler} \quad \text{Gl. 23}$$

Daraus ergeben sich die nachfolgend dargestellten Werte:

- $m_{Wasser, Vorbrühboiler} = \frac{1,48 \text{ l}}{1000 \text{ l/m}^3} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,48 \text{ kg}$
- $m_{Wasser, Hauptbrühboiler} = 0,85 \text{ kg}$
- $m_{Wasser, Dampfboiler} = 1,92 \text{ kg}$

Die Volumina der Stahltanks werden aus den CAD-Modellen abgeleitet und mit der Dichte des Werkstoffs von  $\rho_{Stahl}$  gleich 8000 kg/m<sup>3</sup> multipliziert. Für die Boiler ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Massen der Teilkomponenten sowie das Gesamtgewicht eines kompletten Kessels.

Komponente	Vorbrühboiler	Hauptbrühboiler	Dampfboiler
Deckel	0,929 kg	0,929 kg	0,888 kg
Boden	0,817 kg	0,812 kg	0,817 kg
Rohr	1,703 kg	1,002 kg	2,203 kg
Gesamtgewicht	3,449 kg	2,743 kg	3,908 kg

Tabelle 9: Übersicht der Massen der Boiler

Im Vorbrüh- sowie im Hauptbrühboiler ist die benötigte Verdampfungswärme gleich Null und die gesamte zuzuführende Wärmemenge berechnet sich nach Gl. 22 zu  $Q_{ges, Vorbrühboiler}$  gleich 492,4 kJ und  $Q_{ges, Hauptbrühboiler}$  gleich 363,1 kJ.

Beim Dampfbrühboiler wird zunächst mithilfe von Gl. 24 die Verdampfungswärme bestimmt.

$$Q_{Verdampfung} = \frac{m_{Wasser, Dampfboiler}}{3} * \Delta h_V \quad \text{Gl. 24}$$

Mit  $Q_{Verdampfung}$  gleich 1444,5 kJ berechnet sich die gesamte zuzuführende Wärmemenge im Dampfboiler  $Q_{ges, Dampfboiler}$  zu 2500,5 kJ. Die Aufheizzeiten ergeben sich unter Verwendung von Gl. 25 mit einer gegebenen maximalen Heizleistung  $P_{Heiz}$  von 1400 W und sind zudem in Tabelle 10 aufgelistet.

$$t_{Heiz} = \frac{Q_{ges}}{P_{Heiz}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \quad \text{Gl. 25}$$

Boiler	$t_{Heiz}$	$t_{Heiz}$
Dampfboiler	1789,1 s	29,77 min
Vorbrühboiler	351,7 s	5,86 min
Hauptbrühboiler	259,4 s	4,32 min

Tabelle 10: Übersicht der Aufheizzeiten der Boiler

Aufgrund der Ergebnisse zur Dauer des Aufheizvorgangs, ist die Aufheizzeit des Dampfboilers der limitierende Faktor für den erstmöglichen Bezugszeitpunkt nach Einschalten der Maschine. Um Wärmeverluste an die Umgebung zu minimieren ist es sinnvoll, eine zusätzliche Isolierschicht um die Boiler anzubringen.

#### 3.2.1.4 Technische Prüfung der Boiler

Nach Diagramm 5 der EU-Druckgeräterichtlinie fallen alle Druckbehälter in der labortechnischen Espresso-Maschine unter Kategorie I, wodurch Artikel 4 Absatz 3 der Richtlinie zur Geltung kommt. In diesem Artikel wird beschrieben, dass „Druckgeräte und Baugruppen, die höchstens die Grenzwerte nach Absatz 1 Buchstaben a, b und c sowie Absatz 2 erreichen, [...] in Übereinstimmung mit der in einem Mitgliedstaat geltenden guten Ingenieurpraxis ausgelegt und hergestellt werden [müssen], damit gewährleistet ist, dass sie sicher verwendet werden können“ [DGRL]. Diese Auslegung wurde in den Abschnitten 3.2.1.1 und 3.2.1.2 vorgenommen.

Trotz analytischer und simulativer Ermittlung der Boilersicherheit soll im Anschluss an die Fertigung eine technische Prüfung durchgeführt werden. Hierzu wurde eine zusätzliche Anleitung erstellt, in der die zerstörungsfreie Prüfung der Schweißnähte nach Norm sowie die Druckprüfung der Boiler beschrieben ist (vgl. Anhang 11.1). Durch dieses Prüfverfahren wird sichergestellt, dass die Boiler während des Betriebs nicht bersten und somit kein Anwender zu Schaden kommt.

### 3.2.2 Modifikation der E61-Brühgruppe

Als erste Brühgruppe der labortechnischen Espressoemaschine wurde die Gastronomie-Variante der *E61* von *Faema* ausgewählt. Sie unterscheidet sich von der ursprünglichen Variante mit mechanischer Betätigung und federgesteuertem Druckaufbau insofern, dass der Wasserkreis über ein elektrisch angesteuertes Magnetventil (6) freigegeben wird. Abbildung 15 zeigt eine Schnittzeichnung der *E61*-Brühgruppe mit den zusätzlichen Bohrungen für die Befestigung des Temperatursensors (1) und des Drucksensors (2). Ziel ist es, die beiden Parameter messtechnisch so nah wie möglich am Austrittspunkt des Wassers erfassen zu können. Dazu bietet sich der Hohlraum oberhalb der Spritzdüse (3) an, da sich hier auch die Zugangsbohrung des Brühwassers befindet und ausreichend Platz für weitere Zugänge vorhanden ist. Die Spritzdüse verteilt das heiße Wasser ringförmig in die sich darunter befindende Dusche (4), die mit der Siebträgerdichtung (5) fixiert wird.

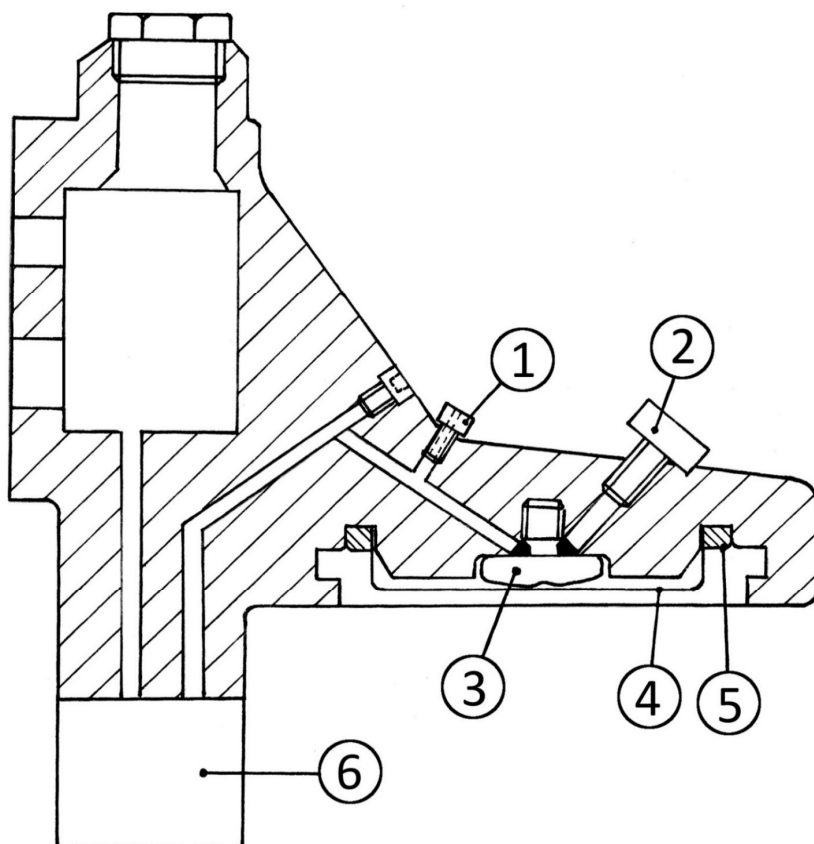


Abbildung 15: Schnittzeichnung der E61-Brühgruppe mit den nötigen Modifikationen

Der Drucksensor wird mit dem Gehäuse aus Abschnitt 3.3.3.1 an der Brühgruppe verschraubt. Wie in Abbildung 16 zu erkennen ist, wird für die Befestigung des NTC *1K2A1B* (1) eine handelsübliche Schraube (2) modifiziert. Durch eine Bohrung in der Mitte der Schraube können die Zuleitungen (3) des Sensors geführt werden. Diese werden mithilfe eines temperatur- und wasserbeständigen Klebstoffs in der Bohrung (4) verklebt. Dabei ist darauf zu achten, dass zwischen den Leitungen kein elektrischer Kurzschluss auftritt. Zudem darf die Sensorperle keinen thermischen Kontakt zur Schraube aufweisen. Andernfalls würde über diesen Kontakt Wärme vom Sensor abgeleitet und die Messung verfälscht werden.

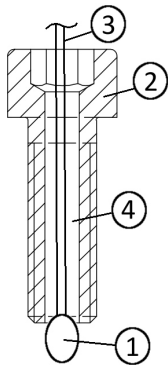


Abbildung 16: Modifizierte Schraube für die Temperaturmessung in der Brühgruppe

### 3.2.3 Modifikation des Siebträgers

Um die Temperatur möglichst nah am ESPRESSOPULVER messen zu können, wird der zugekaufte Siebträger modifiziert (vgl. Abbildung 17). Dazu werden sowohl der Siebträger (1) als auch das Sieb (2) mit einer Bohrung versehen, durch die der Temperatursensor *NTC-833* (3) gesteckt werden kann. Die Anschlussleitungen (4) werden durch den Handgriff (5) nach außen und weiter zur Temperaturmessplatine geführt. Der Sensor ist, ebenso wie bei der modifizierten Schraube, mit einem temperatur- und wasserbeständigen Klebstoff in der Bohrung zu verkleben. Hier muss erneut auf eine korrekte Montage geachtet werden, um unverfälschte Messergebnisse zu erhalten. Die exakte Position der Sensorperle und ihr möglicher Einfluss auf den Herstellungsprozess des ESPRESSOS müssen in zukünftigen Arbeiten genauer untersucht werden.

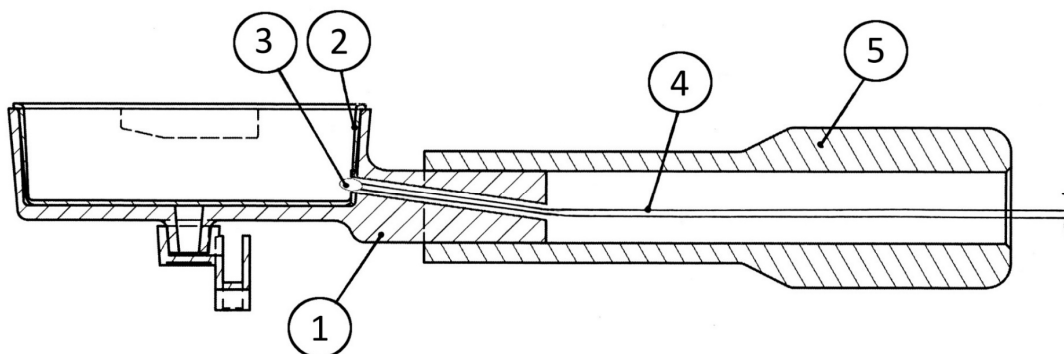


Abbildung 17: Modifikation des Siebträgers

### 3.2.4 Absicherung der Boiler

Zur Absicherung des Dampfboilers kommen zwei Arten von Sicherheitsventilen zum Einsatz.

Das Anti-Vakuum-Ventil schützt den Dampfboiler vor dem Zusammenziehen, falls bei der Abkühlung des Kessels ein Unterdruck entsteht: In diesem Fall öffnet sich das Ventil und der Innendruck des Boilers kann sich dem Umgebungsdruck anpassen.

Das Überdruckventil hingegen gibt den Druck automatisch frei, sobald dieser den Auslösedruck des Ventils (2 bar) im Inneren des Dampfboilers überschreitet.

In allen Brühboilern soll über die Messung des Drucks eine Sicherheitsabschaltung mittels Software erfolgen, die in nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten programmiert werden muss.

Zur weiteren Absicherung ist an allen Kesseln eine Befestigungsmöglichkeit für ein Einschraubthermostat vorgesehen. Dieses unterbricht bei Erreichen einer durch das Bauteil festgelegten Temperatur automatisch die Spannungsversorgung des Heizelements, wodurch eine Überhitzung der Boiler verhindert wird.

### 3.3 Messtechnik in der labortechnischen espressomaschine

Die umfangreiche Messtechnik der labortechnischen espressomaschine stellt das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zu anderen auf dem Markt befindlichen Siebträgermaschinen dar.

In den folgenden Abschnitten wird der Aufbau der Messketten für die Temperatur-, Druck- und Gewichtsmessung näher erläutert sowie ausgearbeitet. Hierbei wird jeweils auf die elektronische Seite der Messketten, wie die Sensortypen und den Aufbau der Messbrücken, eingegangen. Zusätzlich werden mechanische Bauteile, die für die Ausführung der Messungen notwendig sind, näher beschrieben und konstruiert.

#### 3.3.1 Aufbau der Messketten für die Messplatten

Alle Messketten in der labortechnischen espressomaschine sind nach dem gleichen Schema aufgebaut (vgl. Abbildung 4) und beginnen mit den Sensoren, die in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet werden. Da sich die Ausgangsspannungen der Sensoren teilweise im Mikrovoltbereich ändern, ist deren Verstärkung für eine sinnvolle Weiterarbeit nötig. Deshalb werden bei Brückenschaltungen oder Thermoelementen häufig Instrumentenverstärker eingesetzt, da sie eine hohe Genauigkeit und Stabilität aufweisen [INA].

Es werden Instrumentenverstärker des Typs *INA128* von *Texas Instruments* verbaut, wobei für jeden Sensor ein eigener Verstärker vorzusehen ist. Beim *INA128* handelt es sich um einen Differenzverstärker, der mit einer Eingangsschutzschaltung sowie Eingangspufferverstärkern versehen ist. Da dadurch keine Eingangsimpedanzangleichung benötigt wird, eignen sich die Verstärker dieses Typs besonders für Messaufgaben. Weitere Vorteile sind ein sehr niedriger Gleichspannungsoffset, geringe Drift, wenig Rauschen und eine gute Gleichtaktunterdrückung [INA].

Mit einem Widerstand  $R_G$  zwischen Pin 1 und 8 des ICs kann ein Verstärkungsfaktor von 1 bis 10.000 eingestellt werden. Damit dieser stufenlos auf die jeweilige Anwendung angepasst werden kann, wird er als Potentiometer ausgeführt. Der allgemeine Verstärkungsfaktor  $G$  des INA 128 kann mit Gl. 26 berechnet werden:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad \text{Gl. 26}$$

Der verwendete Instrumentenverstärker arbeitet bereits ab einer Versorgungsspannung von  $\pm 2,25$  V und verbraucht einen Ruhestrom von circa 2 mA. In der labortechnischen espressomaschine werden die INAs mit einer Spannung von  $\pm 5$  V (V+ und V- -Pin) aus der symmetrischen Spannungsversorgung betrieben (vgl. 3.4.2), um positive sowie negative Eingangsspannungen verstärken zu können. Da die Eingänge des ADW keine Absolutspannungen unter 0 V verarbeiten können, müssen die Instrumentenverstärker und deren Eingangsspannungen so gewählt werden, dass sich eine positive Ausgangsspannung innerhalb der Aussteuerungsgrenzen einstellt. Bei diesen Grenzen ist zu beachten, dass die maximal mögliche, verstärkte Ausgangsspannung des INAs  $U_O$  vom Ausgangsstrom abhängig ist. Der Eingangswiderstand (6 M $\Omega$ ) des nachgeschalteten AD-Wandlers begrenzt diesen Strom auf 833  $\mu$ A. Laut Datenblatt reduziert sich U+ dadurch um circa - 0,7 V und U- um + 0,2 V und schränkt den nutzbaren Bereich von  $U_O$  auf - 4,8 V bis + 4,3 V ein.



Damit Spannungseinbrüche am IC (*integrated circuit*) vermieden werden, sollen Blockkondensatoren mit einer Kapazität von 0,1  $\mu$ F möglichst nah an den beiden Versorgungsspannungseingängen des Bausteins implementiert werden.

Der Ref-Pin des Verstärkers wird mit der Masse verbunden, wodurch sich der Wert des Verstärkerausgangs auf das Massepotential bezieht. Jeder Verstärkerausgang ist mit einem Eingang des Multiplexers verbunden. Die zu erwartende Ausgangsspannung  $U_O$  am Instrumentenverstärker ergibt sich aus Gl. 27:

$$U_O = G * (U_{IN}^+ - U_{IN}^-) \quad \text{Gl. 27}$$

Tabelle 11 bietet eine Übersicht der Anschlüsse des Instrumentenverstärkers.

Pin-Nr.	Pin-Bezeichnung	Beschreibung
1	$R_G$	Anschluss Verstärkungswiderstand
2	$V_{IN}^-$	negativer Eingang
3	$V_{IN}^+$	positiver Eingang
4	V-	negative Versorgung
5	Ref	Referenzpunkt
6	$V_O$	Ausgang
7	V+	positive Versorgung
8	$R_G$	Anschluss Verstärkungswiderstand

Tabelle 11: Übersicht der Pinbelegung am INA128

Vom Ausgang des INA128 gelangt die verstärkte Spannung zum 8-Kanal-Multiplexer des Typs 74HC4051. Diese Bauteile sind digital angesteuerte Analogschalter mit hoher Schaltgeschwindigkeit und geringer Leistungsaufnahme, mit denen sich analoge Spannungen schalten lassen.

Insgesamt hat der verwendete Multiplexer acht Eingänge (A0 bis A7). Somit ist es möglich, bis zu acht Sensoren beziehungsweise Instrumentenverstärker an einem MUX-Ausgang durchzuschalten. Die einzelnen Eingänge werden über ein 3-Bit-Register angewählt. Dazu werden die Pins 9, 10 und 11 des MUX über den *Raspberry Pi* auf Low (L) beziehungsweise High (H) gesetzt und anschließend über ein Low-Signal an Pin 6 (enable) aktiviert. In Abschnitt 3.4.3 wird genauer auf die Verbindung des MUX zum RPi eingegangen. Tabelle 12 bietet eine Übersicht der Eingangszustände zu den jeweils angesteuerten Kanälen, die aus dem Datenblatt des Multiplexers übernommen wurden. Eine Übersicht der Pinbelegung kann Tabelle 13 entnommen werden [MUX]. Über Pin 3 wird die zu messende Spannung nun an den Analog-Digital-Wandler (ADW) weitergeleitet.

Eingangszustände				Kanal
Enable	S2	S1	S0	
L	L	L	L	A0
L	L	L	H	A1
L	L	H	L	A2
L	L	H	H	A3
L	H	L	L	A4
L	H	L	H	A5
L	H	H	L	A6
L	H	H	H	A7
H	X	X	X	---

Tabelle 12: Übersicht der Kanäle für die Multiplexer (X: Signal muss nicht beachtet werden)

Pin-Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
1	A4	Eingang
2	A6	Eingang
3	A	Ausgang zum AD-Wandler
4	A7	Eingang
5	A5	Eingang
6	$\bar{E}$	enable (aktivieren)
7	$V_{EE}$	negative Spannungsversorgung
8	GND	Masse
9	$V_{CC}$	positive Spannungsversorgung
10	A2	Eingang
11	A1	Eingang
12	A0	Eingang
13	A3	Eingang
14	S0	Adressauswahl
15	S1	Adressauswahl
16	S2	Adressauswahl

Tabelle 13: Übersicht der Pinbelegung am Multiplexer

In der labortechnischen Espressomaschine wird ein Analog-Digital-Wandler-Modul von *Adafruit* verwendet. Dabei handelt es sich um eine fertig aufgebaute Platine, bei der der 12-Bit-AD-Wandler des Typs *ADS1015* bereits um die nötige Zusatzbeschaltung ergänzt wurde.

Der AD-Wandler misst die Differenzspannung zwischen den Eingängen AIN 0 und AIN 1, vergleicht die eingehende, analoge Spannung mit einer intern erzeugten Referenzspannung und gibt anschließend ein zur Eingangsspannung proportionales Digitalsignal aus. Die erreichbare Auflösung entspricht dem Least Significant Bit (LSB) und wird dabei auf den gesamten Wertebereich (FSR) bezogen. Dabei entspricht ein LSB der Spannungsänderung, die zu eine Änderung des Bits mit dem niedrigsten Stellenwert führt [Part16]. Das LSB kann wie folgt berechnet werden (Gl. 28):

$$LSB = \frac{FSR}{2^{12}}$$



Gl. 28

Am AD-Wandler kann eine Abtastrate von bis zu 3,3 kHz eingestellt werden. Diese muss vom Master (*Raspberry Pi*) verarbeitet werden können. Da der hier verwendete I<sup>2</sup>C-Bus (*Inter-Integrated Circuit*) im Standard-Modus eine Übertragungsgeschwindigkeit von 100 kHz aufweist, kann der AD-Wandler mit voller Geschwindigkeit arbeiten [ADS1015].

Damit eine Kommunikation zwischen dem *Raspberry Pi* und den AD-Wandlern über den I<sup>2</sup>C-Bus möglich ist, werden jeweils die SDA-, SCL- und GND-Pins miteinander verbunden.

Jedem AD-Wandler muss eine eindeutige Adresse auf dem Datenbus zugeteilt sein, weshalb eine elektrische Verbindung zwischen dem ADDR-Pin und dem VDD-, GND-, SDA- oder dem SCL-Pin



hergestellt wird. Somit ist es möglich, dass der *Raspberry Pi* mit bis zu vier AD-Wandlern des Typs *ADS1015* kommuniziert. Die sich daraus ergebenden Hexadezimal (HEX)-Adressen sowie die zugeordnete Messplatine können Tabelle 14 entnommen werden. Exemplarisch wird in Abbildung 18 die Verschaltung des Multiplexers und des AD-Wandlers zum *Raspberry Pi* dargestellt.

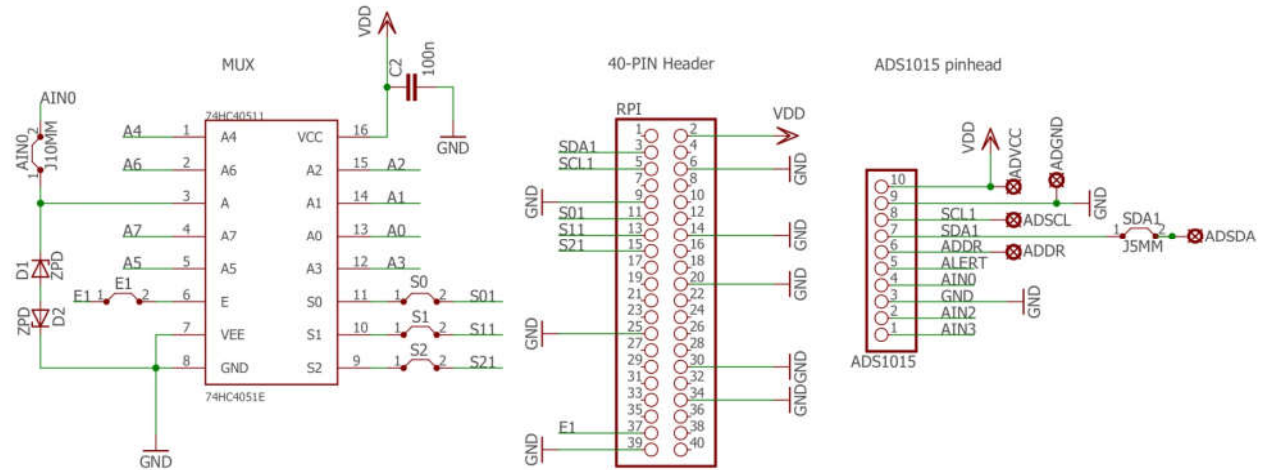


Abbildung 18: Verschaltung Multiplexer und AD-Wandler der Messkette

ADDR-Pin	Adresse (binär)	Adresse (HEX)	Messplatine
Ground	1001000	0x48	Temperatur
VDD	1001001	0x49	Druck
SDA	1001010	0x4A	Wägung
SCL	1001011	0x4B	frei

Tabelle 14: Adressvergabe der AD-Wandler

### 3.3.2 Temperaturmessung

Zur Messung aller Temperaturen finden im Prototyp der Espresso-Maschine insgesamt drei verschiedene Sensortypen Verwendung.

In den Boilern kommen Pt-100-Widerstandsthermometer zum Einsatz, in den Brühgruppen sowie am Gerüst der NTC-Tempersensor *1K2A1B* (*Negative Temperature Coefficient*) und im modifizierten Siebträger der Präzisions-Tempersensor *TS-NTC-833*. Auf die Art der Verbauung der beiden NTC sowie auf die Funktionsweise der Sensoren wird in den Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 näher eingegangen. Alle Messfühler werden an der Temperaturmessplatine angeschlossen.

#### 3.3.2.1 Temperaturmessplatine

Der grundsätzliche Aufbau der Temperaturmessplatine entspricht dem aus Abschnitt 3.3.1, wobei der Multiplexer und der AD-Wandler um die Temperatursensoren ergänzt werden.

Da ohmsche Widerstände nicht direkt gemessen werden können, müssen die Temperaturfühler in eine sogenannte *Wheatstone*-Messbrücke (vgl. Abbildung 19) integriert werden. Mit diesem

Schaltungsaufbau können Widerstände zwischen 1  $\Omega$  und 10 M $\Omega$  mit einer Grenzabweichung von etwa 0,1 % gemessen werden [Part16]. Durch die Parallelschaltung von zwei Spannungsteilern ist es möglich die Spannung zwischen den beiden Teilerpunkten A und B zu messen.

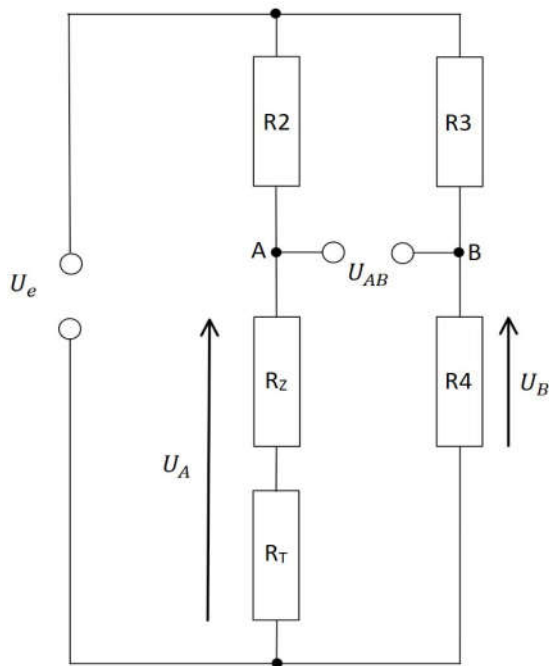


Abbildung 19: Vollbrückenschaltung für die Temperaturmessung

Zur Auslegung der Widerstände der *Wheatstone*-Brücke kann die theoretische Spannung an den Punkten A und B mittels Gl. 29 und Gl. 30 bestimmt werden. Dabei ist  $U_e$  die Versorgungsspannung und entspricht + 5 V. Die Widerstände R2 und R3 sind Metallschichtwiderstände mit einem festen Wert, R4 wird als Potentiometer ausgeführt und dient zum Abgleich der Brückenschaltung. Der temperaturabhängige Widerstand  $R_T$  wird mit einem zusätzlichen Widerstand  $R_Z$  an der verbleibenden Position eingesetzt. Mit Hilfe von  $R_Z$  und R2 wird der Strom durch  $R_T$  begrenzt, da er sonst zusätzlich erwärmt werden würde, was eine Verfälschung des Messergebnisses zur Folge hätte. Die konkreten Werte der zusätzlichen Widerstände R2, R3, R4 und  $R_Z$  sind vom verwendeten Temperatursensor abhängig und werden in den zugehörigen Abschnitten aufgeführt.

Subtrahiert man nun die zwei Spannungen an den Punkten A und B, so erhält man die unverstärkte Differenzspannung  $U_{AB}$  (vgl. Gl. 36) der beiden Spannungsteiler.

Zur Weiterverarbeitung der Spannungen wird  $U_A$  mit dem positiven Eingang ( $V_{IN}^+$ ) und  $U_B$  mit dem negativen Eingang ( $V_{IN}^-$ ) des Instrumentenverstärkers verbunden sowie um den Faktor  $G$  verstärkt (vgl. Gl. 27). Der Verstärkungsfaktor ist ebenfalls vom eingesetzten Temperaturwiderstand abhängig und wird in den folgenden Abschnitten berechnet.

$$U_A = U_e * \frac{R_T + R_Z}{R_T + R_Z + R2} \quad \text{Gl. 29}$$

$$U_B = U_e * \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad \text{Gl. 30}$$

$$U_{AB} = U_A - U_B \quad \text{Gl. 31}$$

Tabelle 15 bietet eine Übersicht der Anschlüsse an der Messplatine, der verbundenen Multiplexereingänge sowie des Einsatzortes der Temperatursensoren. Zur Festlegung der AD-Wandler-Adresse auf der Temperaturmessplatine wird der Adress-Pin mit dem GND-Pin verbunden, was der Hexadezimal-Adresse 0x48 entspricht. Abbildung 20 zeigt den bestückten Prototyp der Temperaturmessplatine.

Sensor	Platinenanschluss	Eingang MUX	Einsatzort
Pt 100	Pt1	A4	Dampfboiler
Pt 100	Pt2	A6	Vorbrühboiler
Pt 100	Pt3	A7	Hauptbrühboiler BG 1
Pt 100	Pt4	A5	Hauptbrühboiler BG 2
NTC-1K2A1B	K2A1	A2	BG 1; nah an der Dusche
NTC-1K2A1B	K2A2	A1	BG 2; nah an der Dusche
NTC-1K2A1B	K2A3	A0	Gerüst/ Gehäuse
NTC-833	833	A3	Siebträger

Tabelle 15: Übersicht der Anschlüsse, MUX-Eingänge und Einsatzort der Temperatursensoren

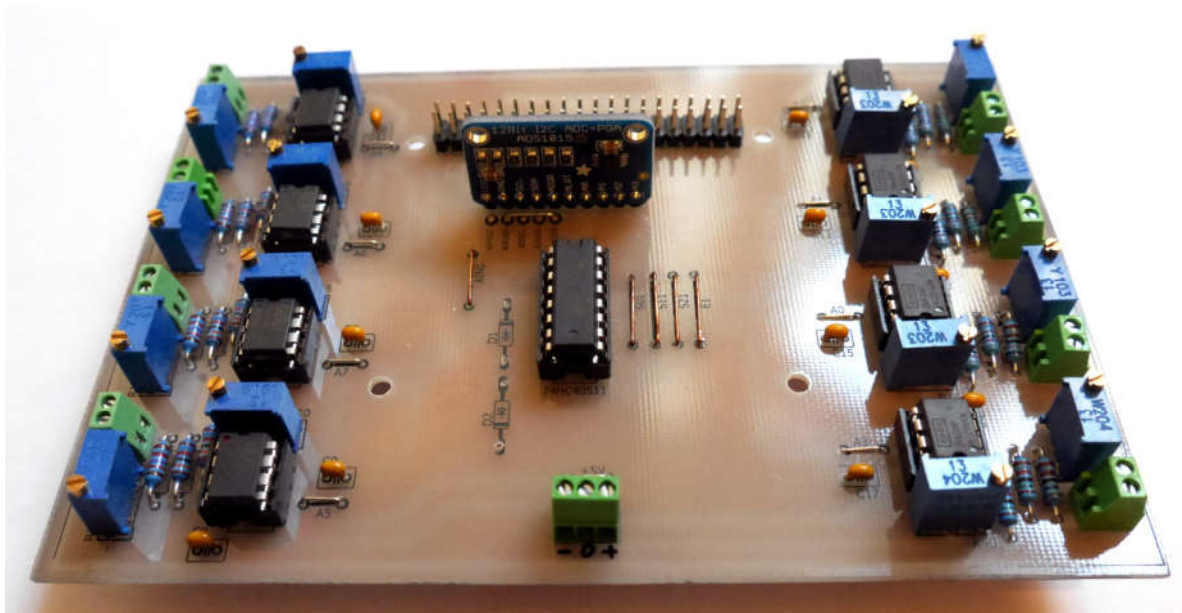


Abbildung 20: Bestückter Prototyp der Temperaturmessplatine

### 3.3.2.2 Widerstandsthermometer Pt-100

In allen Boilern wird das Platin-Widerstandsthermometer Pt-100 eingesetzt. Bei diesen Sensoren handelt es sich um Kaltleiter. Das bedeutet, dass diese den elektrischen Strom bei niedrigen Temperaturen besser leiten als bei hohen. Vorteile dieses Sensors sind eine fast lineare Kennlinie, eine hohe Genauigkeit sowie eine gute Langzeitstabilität [Heri18].

Der Temperaturwiderstand der Firma *B+B Sensors* ist fest in eine 50 mm lange Edelstahlhülse mit einem Durchmesser von 6 mm eingebettet. Die Schutzart des Platin-Sensors ist laut Datenblatt IP65 (*Ingress Protection*). Dies bedeutet nach DIN EN 60529, dass der Sensor einen vollständigen Schutz gegen Berührung aufweist, staubdicht sowie vor Strahlwasser aus beliebigem Winkel geschützt ist [DIN60529]. Die Edelstahlhülse wird mit einer passenden Klemmverschraubung von *B+B Sensors* im Boilerdeckel angebracht. Das mit der Messhülse verbundene Silikonkabel kann bis zu einer Umgebungstemperatur von 180 °C verwendet werden.

Beim Thermometer Pt-100 handelt es sich um ein passives Bauteil, dessen elektrischer Widerstand temperaturabhängig ist. Den Zusammenhang zwischen der Messtemperatur  $\vartheta$  und dem Widerstand des Sensors  $R_{Pt}$  zeigt Gl. 32:

$$R_{Pt}(\vartheta) = R_{Pt0} [1 + \alpha_{Pt}(\vartheta - \vartheta_0)] \quad \text{Gl. 32}$$

Der Widerstandswert  $R_{Pt0}$  liegt bei der Referenztemperatur  $\vartheta_0$  (0 °C) bei 100 Ω. Im Bereich von 0 °C bis 100 °C ist der mittlere Temperaturkoeffizient  $\alpha_{Pt}$  mit 0,00385 K<sup>-1</sup> angegeben. Da in den Boilern jedoch eine Temperatur von bis zu 130 °C gemessen werden soll, werden die Widerstandswerte über 100 °C aus der Widerstandstabelle gemäß DIN EN 60751 entnommen [DIN60751]. Aus der Berechnung sowie der Erweiterung der Werte ergibt sich für den Bereich von 0 °C bis 130 °C eine lineare Widerstands-Temperaturkurve, die in Abbildung 21 dargestellt ist.

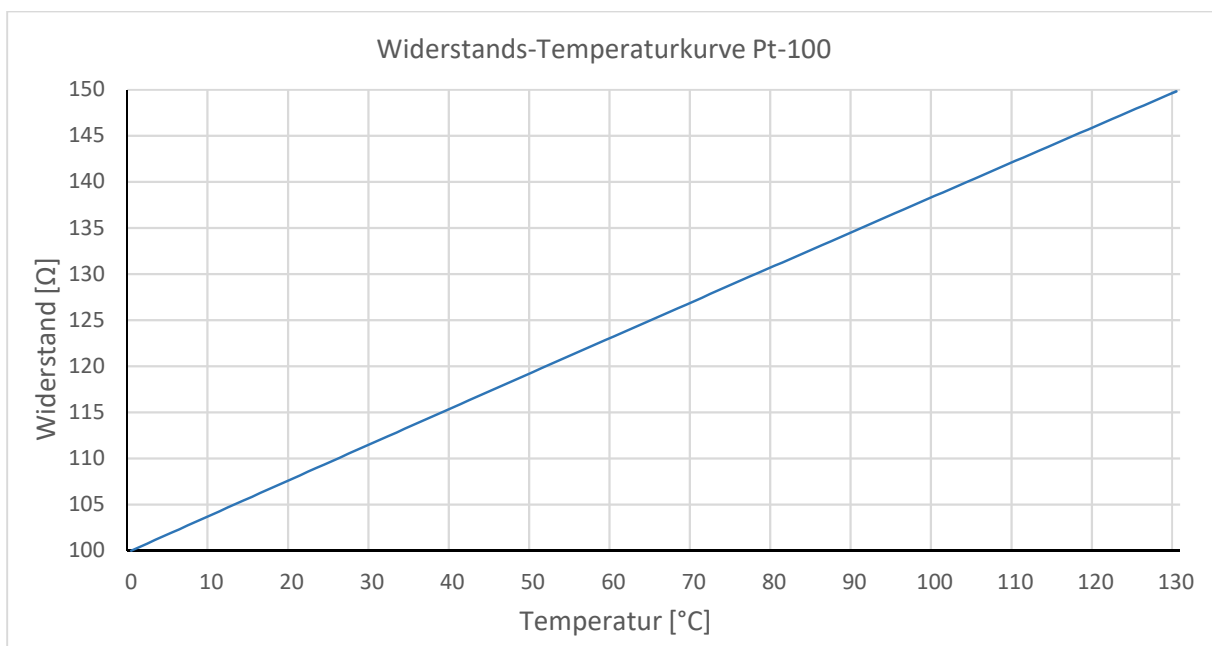


Abbildung 21: Temperatur-Widerstandskurve für das Widerstandsthermometer Pt-100

Anhand der vorgegebenen Widerstandswerte des Pt-100 können nun die zusätzlichen Widerstände der Messbrücke bestimmt werden.

Da der Messstrom im Temperaturfühler laut Datenblatt zwischen 0,3 mA und 1 mA liegen soll, kann mithilfe des ohmschen Gesetzes ein notwendiger Widerstand im Bereich von 5 kΩ bis 16,7 kΩ

berechnet werden. Der Platinfühler weist jedoch Widerstandswerte von  $100 \Omega$  bis circa  $150 \Omega$  auf, weshalb ein Ergänzungswiderstand mit dem Fühler in Reihe zu schalten ist. Der zusätzliche Widerstand  $R_{Z Pt}$  hat einen gewählten Wert von  $12,7 \text{ k}\Omega$ . Für die Widerstände  $R_{2 Pt}$  sowie  $R_{3 Pt}$  (vgl. Abbildung 19) wurde ein Wert von  $13 \text{ k}\Omega$  festgelegt.

Der Temperaturmessbereich aller Pt-100-Fühler wurde von  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  festgelegt und entspricht damit in etwa der Raumtemperatur bis hin zur maximalen Temperatur des Dampfboilers. Mit diesen Vorgaben kann der Nullpunkt der Temperatur-Differenzspannungsgeraden über das Potentiometer  $R_{4 Pt}$  (eingestellter Wert:  $12805,85 \Omega$ ) nun so voreingestellt werden, dass er bei  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  liegt. Aus diesen Widerstandsvorgaben ergibt sich im Messbereich eine unverstärkte Differenzspannung  $U_{AB Pt}$  von  $4,2849 \text{ mV}$ .

Um die Auflösung des AD-Wandlers im Rahmen seiner technischen Möglichkeiten optimal nutzen zu können, wird die Spannung so verstärkt, dass der resultierende Spannungswert bei Raumtemperatur bei  $0 \text{ mV}$  und bei  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  bei  $+4000 \text{ mV}$  liegt. Der Bereich bis  $+4096 \text{ mV}$  wird nicht voll ausgenutzt, da sonst die Gefahr besteht, dass das Ausgangssignal des Instrumentenverstärkers an den Messbereichsgrenzen übersteuert und der AD-Wandler falsche Werte liefert. Aus dem festgelegten Auflösungsbereich und  $U_{AB Pt}$  ergibt sich ein Verstärkungsfaktor  $G_{Pt}$  von  $933,5$  für die Platinsensoren. Wird Gl. 26 nach  $R_{G Pt}$  umgestellt (Gl. 33), kann der Wert des Widerstands  $R_{G Pt}$  für den Verstärkungsfaktor des INA bestimmt werden. Er beträgt  $53,62 \Omega$ , was am Verstärkerpotentiometer R5 eingestellt wird.

$$R_{G Pt} = \frac{50 \text{ k}\Omega}{G_{Pt} - 1} \quad \text{Gl. 33}$$

Die daraus resultierende Gerade, die den Zusammenhang der Differenzspannung in Abhängigkeit der Temperatur darstellt, kann Abbildung 22 entnommen werden. Ausführliche Daten sind in Anhang 11.1 hinterlegt. Die damit verbundenen Werte liefern die Grundlage für eine weitere softwaretechnische Kalibrierung, die nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit ist.



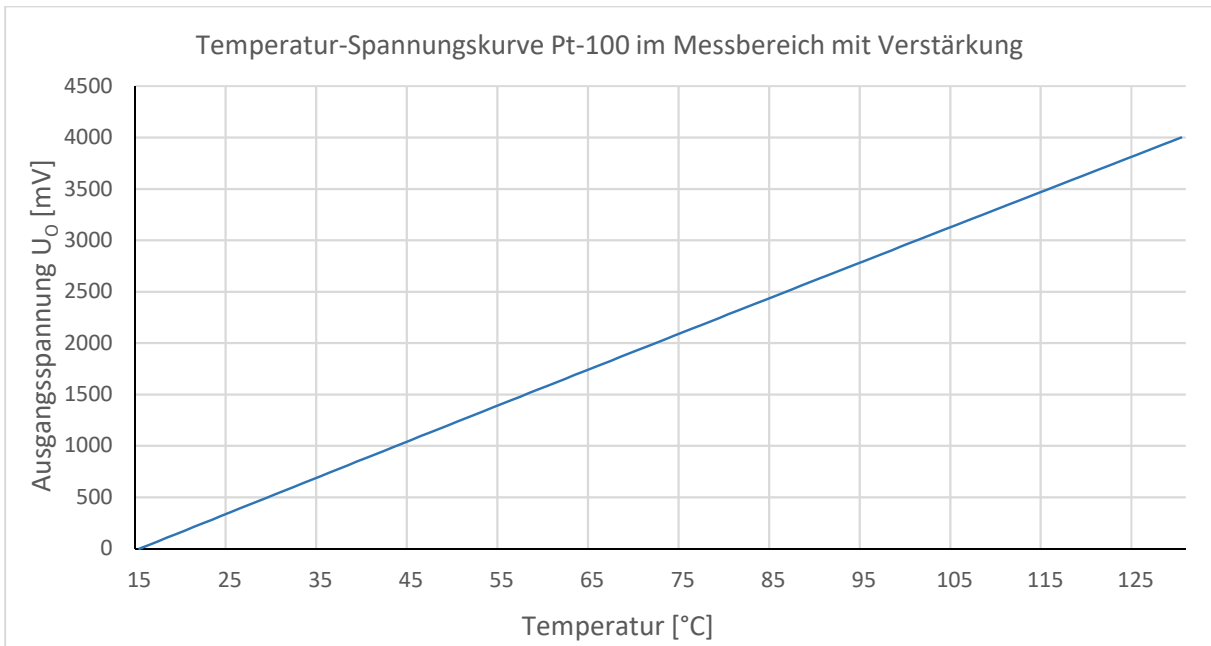


Abbildung 22: Temperatur-Spannungskurve Pt-100 im Messbereich mit Verstärkung

Einen Ausschnitt aus dem Schaltplan der Temperaturmessplatine für einen Pt-100-Widerstandsfühler zeigt Abbildung 23. R1 entspricht dem Ergänzungswiderstand, am Stecker PT1 wird der Temperaturfühler angeschlossen. Der vollständige Schaltplan befindet sich in Anhang 11.3.

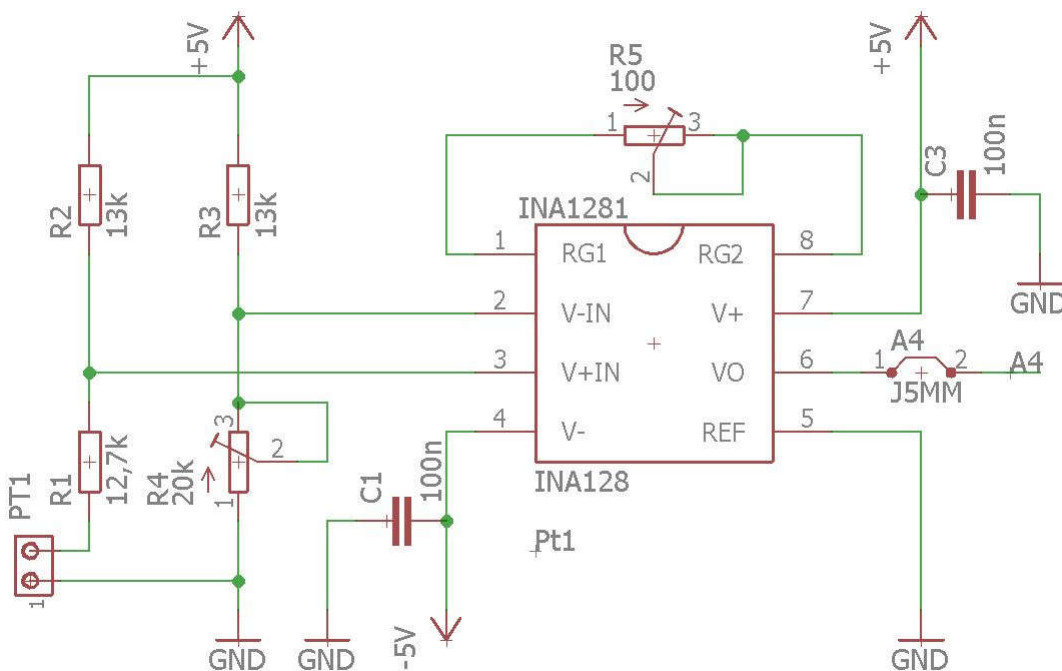


Abbildung 23: Ausschnitt der Temperaturmessplatine Pt-100

Der Temperaturfühler weist laut Datenblatt die Toleranzklasse B auf; der dabei entstehende Messfehler kann wie in Gl. 34 dargestellt berechnet werden.

$$\Delta\vartheta = 0,3 K + 0,005 * |\vartheta - \vartheta_0|$$

Gl. 34

Die maximale Abweichung im verwendeten Temperaturbereich kann zu 0,95 °C ermittelt werden. Da der Temperaturfühler und die Widerstände in der *Wheatstone'schen*-Brückenschaltung Toleranzen aufweisen, muss die Brücke kalibriert werden (vgl. Abschnitt 3.3.2.5).

### 3.3.2.3 NTC-Temperatursensor 1K2A1B

Die NTC-Temperatursensoren 1K2A1B werden von *Measurement Specialties* hergestellt (Vertrieb durch *B+B Sensors*) und in den Duschen der Brühgruppen sowie am Gerüst verbaut. Die Einbringung in die erste Brühgruppe wird unter 3.2.3 näher beschrieben. Am Gerüst wird der Sensor an geeigneter Stelle verklebt, wodurch die Erwärmung überwacht wird und gegebenenfalls Schutzmaßnahmen für den Anwender ergriffen werden können.

Durch die geringe Abmessung der Sensorperle und die direkte Einbringung in das zu messende Medium ohne schützende Außenhülle, kann eine wesentlich kürzere Reaktionszeit als bei der Verwendung eines Pt-100 Sensors erzielt werden.

Beim 1K2A1B handelt es sich um einen Heißleiter. Das bedeutet, dass der Widerstand bei steigender Temperatur sinkt. Gl. 35 beschreibt allgemein den Widerstandswert  $R_{NTC}$  eines Heißleiters in Abhängigkeit der Temperatur  $\vartheta$ .  $R_{NTC}(\vartheta_0)$  weist, bei dem gewähltem NTC bei 25 °C einen Wert von 1000  $\Omega$  auf.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist der *B*-Wert, der im Datenblatt des 1K2A1B mit 3348 K bei 25 °C beziehungsweise 85 °C und einer Toleranz von 0,5 % angegeben wird. Hierbei ist zu beachten, dass sich *B* abhängig von der Temperatur ändert. Die Messtemperatur *T* sowie die Bezugstemperatur  $T_0$  sind dabei vom absoluten Nullpunkt aus zu bestimmen.

$$R_{NTC}(\vartheta) = R_{NTC}(\vartheta_0) * \exp \left[ B * \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad \text{Gl. 35}$$

In Abbildung 24 wird die resultierende Temperatur-Widerstandskurve des Heißleiters veranschaulicht.

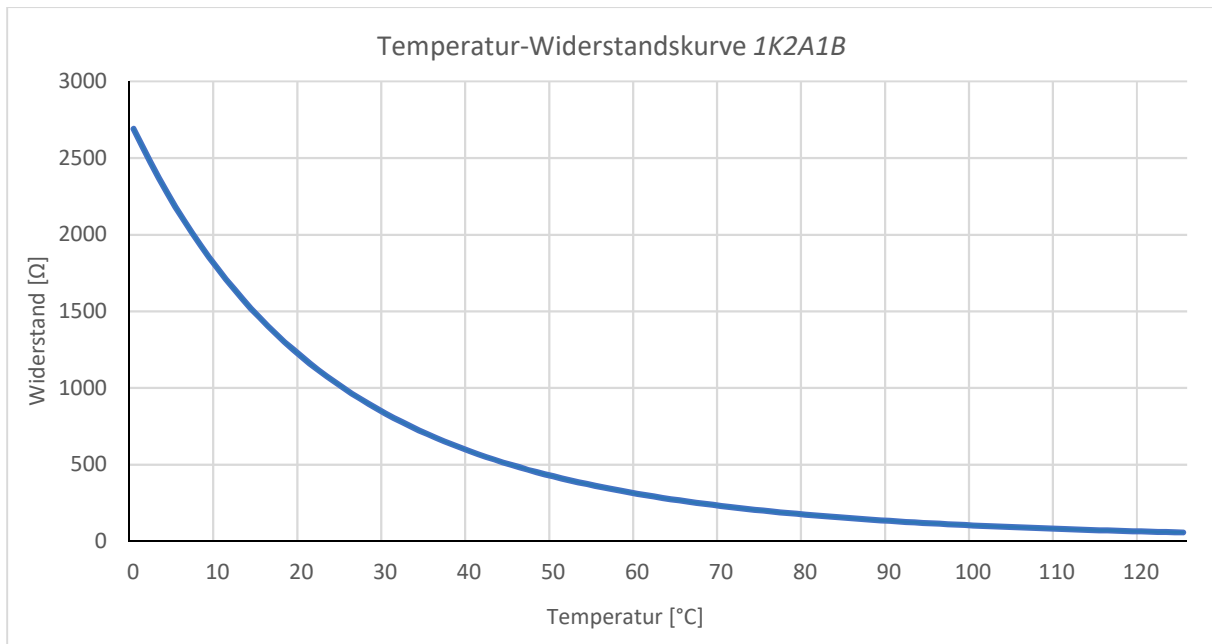


Abbildung 24: Temperatur-Widerstandskurve für den NTC-Tempersensor 1K2A1B

Die temperaturabhängige Widerstandsänderung lässt sich, wie schon beim Pt-100, nur indirekt über die Differenzspannung der *Wheatstone`schen* Messbrücke bestimmen. In der Auslegung dieser Brücke ist erneut auf eine möglichst geringe Eigenerwärmung des Sensors zu achten. Laut Datenblatt erwärmt sich der NTC um 1 °C je 0,75 mW Eigenbelastung.

Zur Bestimmung der Eigenerwärmung wurden zunächst mittels *LTspice* die Spannungen  $U_{1K2A}$  und Ströme  $I_{1K2A}$  am NTC ermittelt. Die Widerstandswerte des Heißleiters  $R_{1K2A}$  sind dabei so gewählt, dass sie den beiden Extrema des Messbereichs (15 °C und 110 °C) entsprechen. In der Messbrücke wird für  $R_{21K2A}$  und  $R_{31K2A}$  ein Widerstand mit je 8,2 kΩ verbaut, das Potentiometer  $R_{41K2A}$  auf einen Wert von 6,8814 kΩ eingestellt sowie  $R_{1K2A}$  um einen Zusatzwiderstand  $R_{Z1K2A}$  von 6,8 kΩ ergänzt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 16 abgebildeten Werte und es wird ersichtlich, dass die höchste zu erwartende Erwärmung bei 15 °C liegt und 0,179 °C beträgt. Da jedoch vorrangig das obere Ende des Messbereichs relevant ist, ist lediglich eine Temperaturverfälschung von circa 0,01 °C zu berücksichtigen.

Temperatur	15 °C	110 °C
Spannung $U_{1K2A}$ in mV	443,6	26,99
Strom $I_{1K2A}$ in μA	303,8	331,5
Leistung $P_{1K2A}$ in mW	0,134	0,00895
resultierende Eigenerwärmung in °C	0,179	0,0119

Tabelle 16: Eigenerwärmung des NTC 1K2A1B



Mit den festgelegten Widerstandswerten lässt sich nun die Differenzspannung bei den *1K2A1B*-Sensoren ermitteln. Die Temperatur-Spannungskurve wurde so angepasst, dass sich im Messbereich ein Hub von etwa 4000 mV ergibt. Die unverstärkte Differenzspannung beträgt 227,27 mV und wird über den Verstärkungsfaktor  $G_{1K2A}$  gleich 17,55 (vgl. Gl. 33) auf eine theoretische Spannungsdifferenz  $U_{AB\ 1K2A}$  von 3997 mV angehoben. Die sich daraus ergebende Temperatur-Spannungskurve des *1K2A1B* ist in Abbildung 25 dargestellt; ausführliche Temperatur- und Spannungsdaten zu dieser Kurve befinden sich in Anhang 11.1. Diese Werte bilden die Basis für die spätere softwaretechnische Kalibrierung (vgl. Abschnitt 3.3.2.5). Der Schaltungsaufbau entspricht im Prinzip dem in Abbildung 23 dargestellten, modifiziert mit den Widerstandswerten der *1K2A1B*-Messbrücke. Weitere Informationen sind dem Schaltplan der Temperaturmessplatine in Anhang 11.3 zu entnehmen.

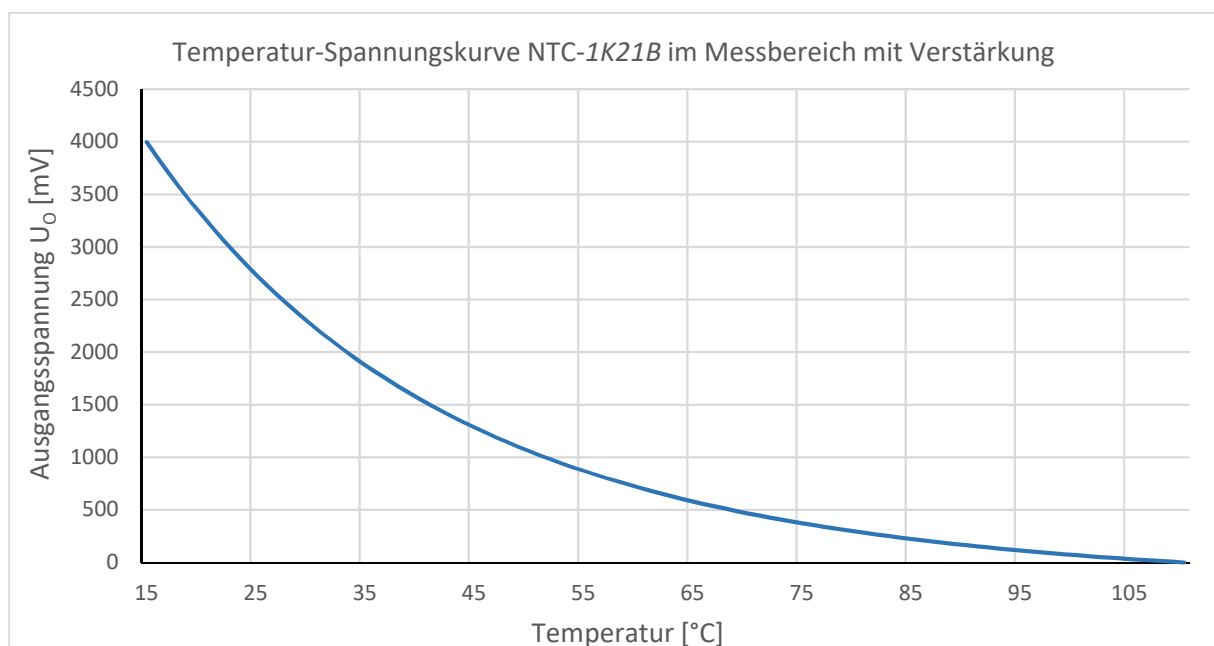


Abbildung 25: Temperatur-Spannungskurve NTC-1K2A1 im Messbereich mit Verstärkung

#### 3.3.2.4 Präzisions-Temperatursensor *TS-NTC-833*

Im modifizierten Siebträger aus Kapitel 3.2.3 wird der dritte Sensortyp mit der Bezeichnung *TS-NTC-833* (*B+B Sensors*) verbaut.

Der *TS-NTC-833* ist ebenfalls ein Heißleiter, dessen charakteristisches Verhalten Gl. 35 beschreibt. Bei einer Bezugstemperatur  $\vartheta_0$  von 37 °C ist die Materialkonstante  $B_{833}$  3435 K  $\pm 0,2$  % und der Nennwiderstand  $R_{833}(\vartheta_0)$  hat den Wert 50 k $\Omega$   $\pm 0,5$  %. Mit diesen in Gl. 35 eingesetzten Parametern sowie mithilfe der Tabelle der Widerstandsänderung über der Temperatur aus dem Datenblatt (vgl. Anhang 11.2) kann die Temperatur-Widerstandskurve des Fühlers analog zum *1K2A1B* erstellt werden (vgl. Abbildung 26).



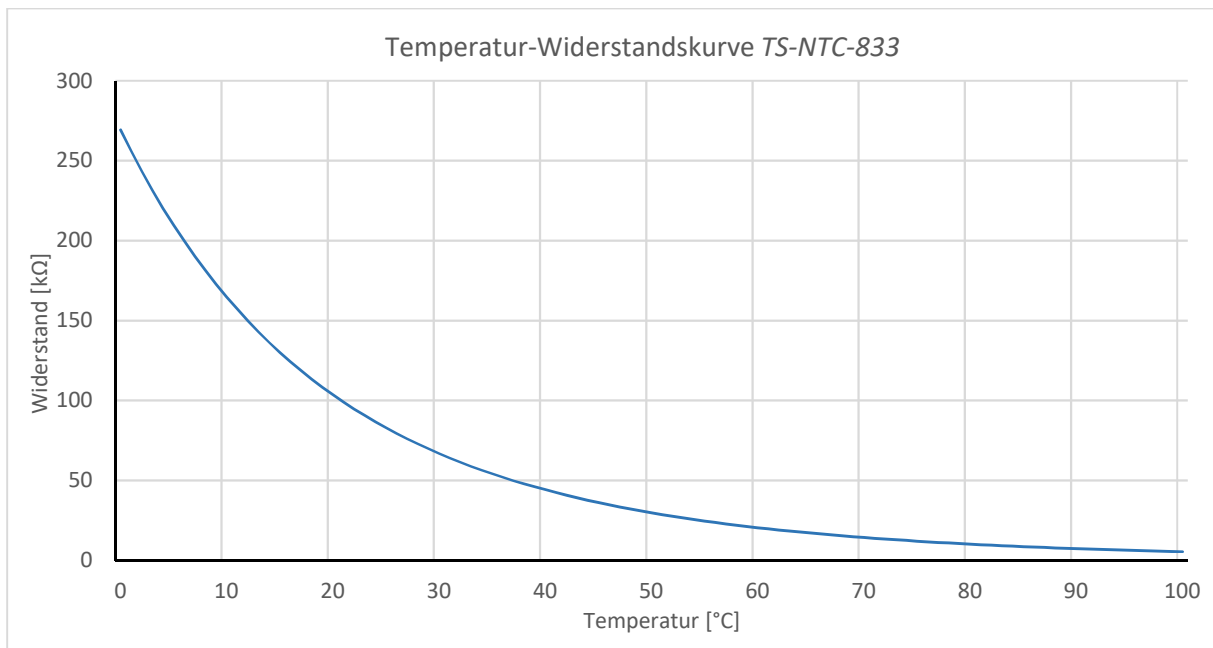


Abbildung 26: Temperatur-Widerstandskurve für den Temperatursensor TS-NTC-833

Um beim NTC 833 die Eigenerwärmung gering zu halten, werden folgende Widerstände zur Vervollständigung der Messbrücke gewählt:

- Ergänzungswiderstand  $R_{Z\ 833}$ : 5,6 kΩ
- Metallschichtwiderstände  $R_{2\ 833}$  und  $R_{3\ 833}$ : 15 kΩ
- Potentiometer  $R_{4\ 833}$ : 11,06 kΩ

Auch hier werden die Spannungen  $U_{833}$  und Ströme  $I_{833}$  des Temperaturwiderstands mittels *LTspice* bei den zwei Extremwerten des gewählten Messbereichs (15 °C und 100 °C) bestimmt. Der Heißleiter TS-NTC-833 erwärmt sich laut Datenblatt pro Milliwatt Leistungsaufnahme um 1,42 °C, woraus sich die in Tabelle 17 dargestellten Daten ergeben. Hieraus wird ersichtlich, dass bei diesem Sensor die höchste Eigenerwärmung mit 0,462 °C bei 100 °C auftritt. Dies ist bei der Messung zu berücksichtigen.

Temperatur	15 °C	100 °C
Spannung $U_{833}$ in V	4,48	1,33
Strom $I_{833}$ in $\mu$ A	34,46	244,31
Leistung $P_{833}$ in mW	0,154	0,325
resultierende Eigenerwärmung in °C	0,218	0,462

Tabelle 17: Eigenerwärmung des TS-NTC-833

Für eine optimale Position der Temperatur-Spannungskurve im Messbereich wird diese über das Potentiometer  $R_{4\ 833}$  angepasst. Verstärkt man die Differenzspannung um den Faktor  $G_{833}$  gleich 1,68, ergibt sich ein Kurvenverlauf wie in Abbildung 27. Ausführliche Daten, die der Kurve zugrunde liegen, sind in Anhang 11.1 hinterlegt. Die elektronische Verschaltung entspricht hier der des ersten NTCs, jedoch mit angepassten Widerstandswerten (vgl. Schaltplan in Anhang 11.3).

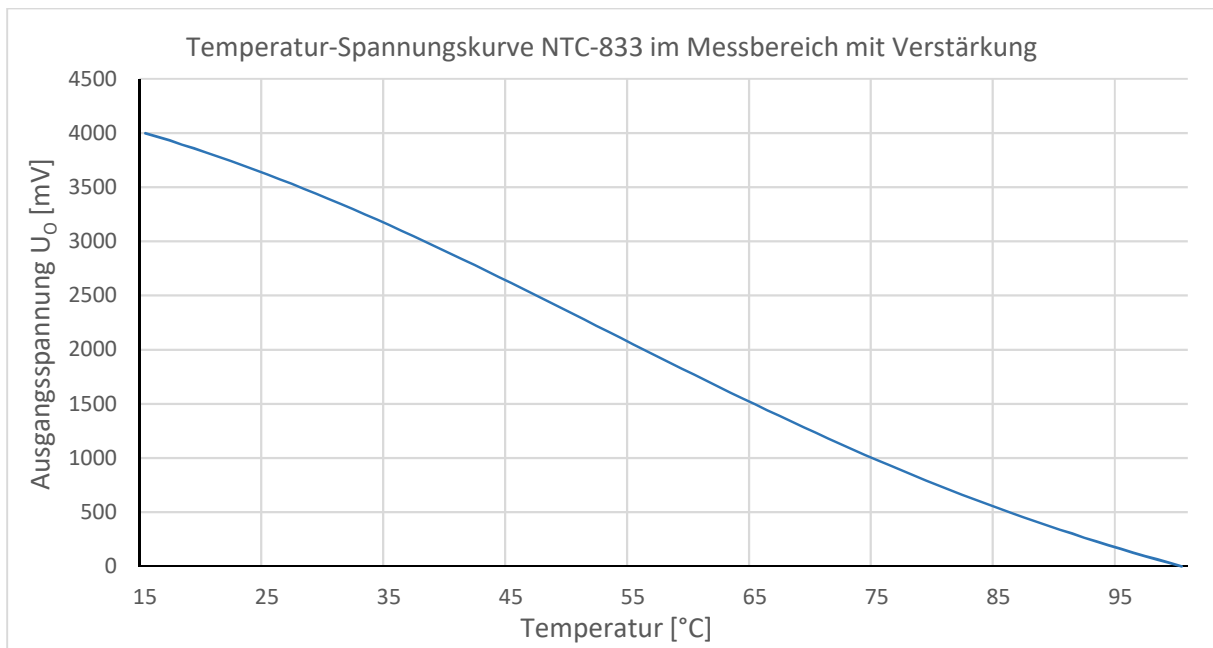


Abbildung 27: Temperatur-Spannungskurve TS-NTC-833 im Messbereich mit Verstärkung

Da der Temperaturfühler (vgl. Datenblatt) und die Widerstände in der *Wheatstone'schen* Brückenschaltung Toleranzen aufweisen, muss auch diese Brücke wie in Abschnitt 3.3.2.5 beschrieben kalibriert werden.

### 3.3.2.5 Kalibrierung der Temperatursensoren

Der Abgleich der Temperatursensoren geschieht in mehreren Schritten. Zunächst wird der Verstärkungsfaktor über das Potentiometer R5 (vgl. Abbildung 23) auf den berechneten Idealwert voreingestellt. Zur genaueren Einstellung dieses Faktors wird an den Eingängen des INAs eine Spannung von 1 mV eingespeist und am Ausgang die verstärkte Spannung gemessen. Mithilfe eines *Matlab*-Programms wird daraus der Verstärkungsfaktor berechnet und am Potentiometer entsprechend nachjustiert. Danach wird die Einstellung des Nullpunkts der Temperatur-Spannungskurve vorgenommen. Dazu wird zunächst die berechnete Differenzspannung  $U_{AB}$  bei sprudelnd kochendem Wasser (100 °C) aus der zugehörigen Temperatur-Spannungskurve abgelesen. Nun kann über das Potentiometer R4 (vgl. Abbildung 23) die Spannung an den Eingängen des INAs (Voltmeter an  $V_{IN}^-$  und  $V_{IN}^+$ ) so eingestellt werden, dass sie der zuvor ermittelten theoretischen Differenzspannung entspricht.

Da reelle Bauteile jedoch mit Toleranzen behaftet sind, ist in einem weiteren Schritt ein softwareseitiger Abgleich durchzuführen. Dazu wird jeder Sensor aufgeheizt und die damit gemessene Temperatur mit der eines Referenzthermoelements verglichen. Nun kann die Temperatur-Spannungskurve des zu kalibrierenden Sensors auf den tatsächlichen Ist-Wert justiert und im Messprogramm der labortechnischen espressomaschine zur weiteren Verwendung hinterlegt

werden. Die Kalibrierroutine wird in *Matlab* programmiert und ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

### 3.3.3 Druckmessung

In der labortechnischen Espressoemaschine kommen zwei unterschiedliche Drucksensoren von *B+B Sensors* zum Einsatz. Aufgrund der höheren Temperatur im Dampfboiler wird dort ein monolithischer Edelstahl-drucksensor verbaut, der bis zu einer Temperatur von 125 °C und einem Druck von 10 bar einsetzbar ist. An allen anderen Druckmessstellen finden sich Sensoren mit einem Gehäuse aus Keramik, die Temperaturen bis zu 105 °C und einem Druck von 25 bar ausgesetzt werden können. Beide Sensortypen sind ab Werk temperaturkompensiert und weisen eine sehr gute Beständigkeit gegenüber korrosiven Medien auf. Zudem können mit ihnen statische sowie dynamische Relativdrücke gemessen werden. Das Datenblatt zu den Sensoren findet sich in Anhang 11.2.

#### 3.3.3.1 Gehäusekonstruktion der Drucksensoren

Um die Drucksensoren an den jeweiligen Messstellen installieren zu können, wird ein passendes Gehäuse konstruiert. Da alle Sensoren der Baureihe *DS-KE-R* die gleichen Abmessungen aufweisen, reicht eine Gehäusekonstruktion aus.

Wie in Abbildung 28 dargestellt, besteht das Gehäuse aus zwei Teilen: einer Sensoraufnahme (1) und einem Verschlussdeckel (2). Die Aufnahme verfügt am unteren Ende über ein M10-Außengewinde, das mit den Boilern und mit der Brühgruppe verschraubt werden kann. Durch eine Durchgangsbohrung wird der Druck an den Sensor (3) geleitet, der am oberen Ende eingesetzt und mit dem Verschlussdeckel in der Aufnahme festgehalten wird. Um Druckverluste zu unterbinden, werden Sensor und Deckel zusätzlich mit einem Dichtmittel verklebt. Fertigungszeichnungen der einzelnen Komponenten können Anhang 11.4 entnommen werden.

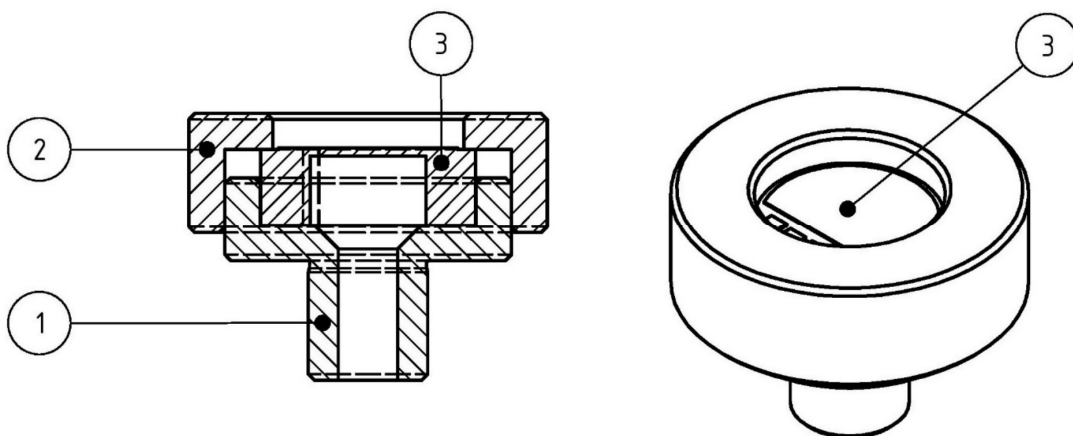


Abbildung 28: Zusammenbau der Druckmesseinrichtung aus Gehäuse und Sensor

### 3.3.3.2 Elektronische Auslegung der Drucksensoren

Die in Abschnitt 3.3.1 erläuterte Messkette wird bei der Druckmessplatine um die Drucksensoren ergänzt. Exemplarisch ist in Abbildung 30 der Schaltplan eines keramischen Drucksensors mit dem damit verbundenen Instrumentenverstärker dargestellt. Der gesamte Schaltplan sowie das zugehörige Layout der Druckmessplatine befinden sich in Anhang 11.3. Des Weiteren kann aus Tabelle 18 die Verdrahtung der Verbindungsleitungen der Drucksensoren entnommen werden (vgl. Abbildung 30). Tabelle 19 zeigt die Steckerbelegungsübersicht an der Druckmessplatine mit der dazugehörigen Messstelle. In Abbildung 29 ist der bestückte Prototyp der Druckmessplatine zu sehen. Bei dieser wird der ADDR-Pin mit VDD verbunden, womit am I<sup>2</sup>C-Bus die Adresse 0x49 für die Platine festgelegt ist.

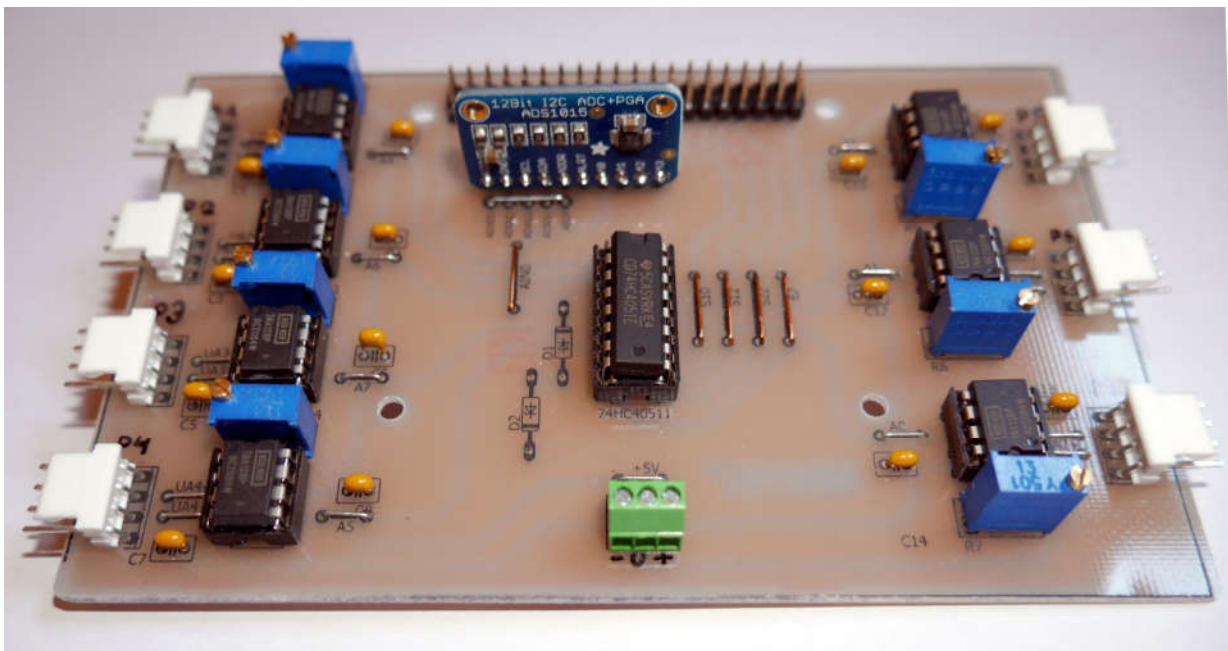


Abbildung 29: Bestückter Prototyp der Druckmessplatine

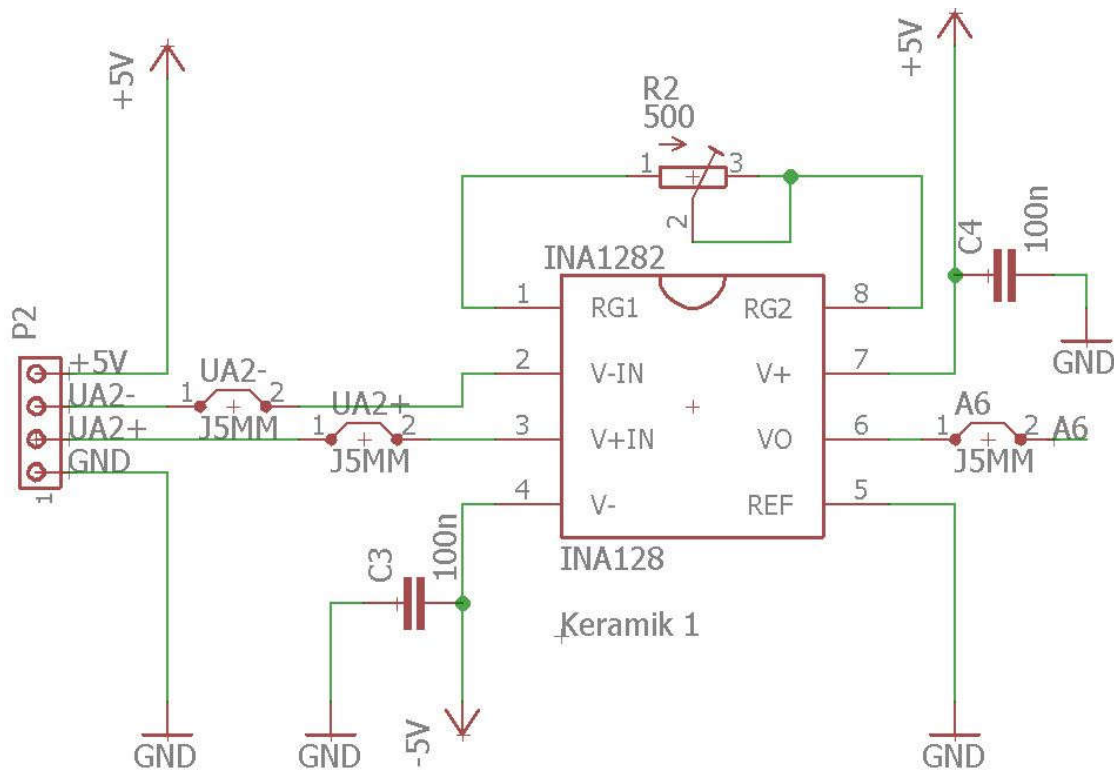


Abbildung 30: Ausschnitt der Druckmessplatine für den ersten Keramiksensor

Bezeichnung am Sensor	Sensor-Leitung	Bezeichnung am Stecker P	Stecker-Pin	Leitungsfarbe
+Ub	1	+5 V	4	braun
-Uout	2	UA-	3	grün
+Uout	4	UA+	2	gelb
-Ub	3	GND	1	weiß

Tabelle 18: Pin-Belegung an den Verbindungssteckern der Drucksensoren

Sensor	Steckerbezeichnung	MUX-Kanal	Druckmessstelle
Edelstahl 1	P1	A4	Dampfboiler
Keramik 1	P2	A6	Vorbrühboiler
Keramik 2	P3	A7	Hauptbrühboiler BG 1
Keramik 3	P4	A5	Hauptbrühboiler BG 2
Keramik 4	P5	A2	BG 1; nah an Dusche
Keramik 5	P6	A1	BG 2; nah an Dusche
Keramik 6	P7	A0	Systemdruck (Vorbereitung)

Tabelle 19: Übersicht der Steckerbelegung, MUX-Kanäle und Messstellen der Druckmessplatine

In die Drucksensoren ist bereits eine *Wheatstone'sche* Vollbrücke integriert, die es möglich macht, eine druckabhängige Ausgangsspannung vom Sensor zu erhalten. Diese muss anschließend lediglich verstärkt werden. Bei maximalem Druck kann die ausgangsseitige Spannung bei den keramischen Sensoren im Bereich von 3,7 mV bis 5,3 mV und bei den Edelstahlsensoren von 1,5 mV bis 3,5 mV je

Volt Speisespannung liegen. Aufgrund dieser breiten Streuung müssen die Kennlinien jedes einzelnen Sensors separat aufgezeichnet und angepasst werden. Dafür wurde eine Druckvergleichsvorrichtung konstruiert (vgl. Abbildung 31) und aus Aluminium gefertigt. Die zugehörige Fertigungszeichnung befindet sich in Anhang 11.4.

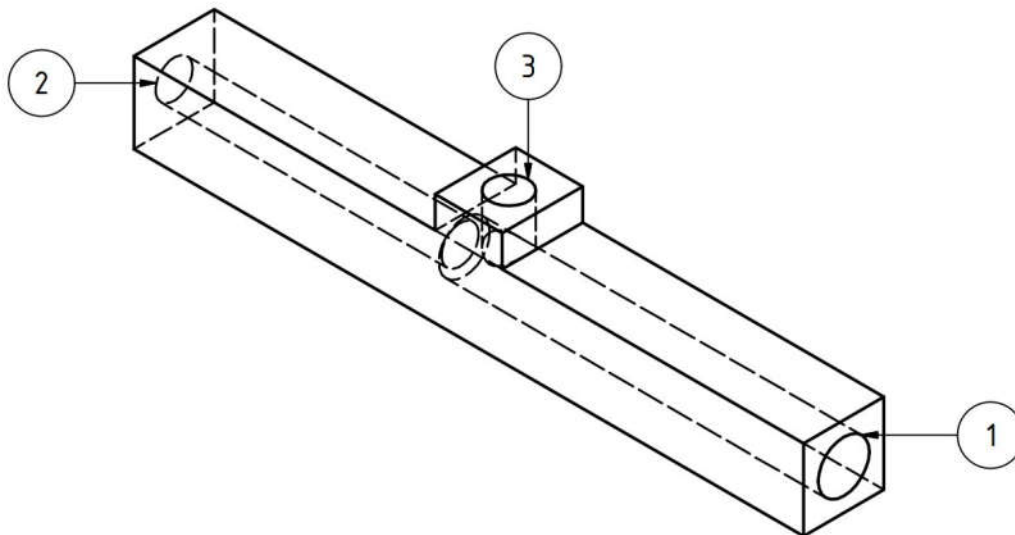


Abbildung 31: Vergleichsstelle für die Drucksensoren

An Position (1) kann das Gehäuse des zu vermessenden Drucksensors verschraubt werden. An Position (2) wird der Referenzsensor *DRTR-ED-10V-R40B* von *B+B Sensors* angebracht. In der Mitte befindet sich eine weitere Öffnung (3), an der eine Hochdruckpumpe über einen Adapter mit der Druckkammer verbunden wird. Mit dieser Pumpe kann nun der Druck im Inneren der Kammer erhöht werden. Lässt man anschließend den Innendruck langsam ab, kann der Druckwert des nicht abgeglichenen Sensors mit dem des Referenzsensors verglichen und mithilfe eines *Matlab*-Programms aufgezeichnet werden. Aus den erzeugten Druck-Spannungskurven lässt sich die Geradengleichung jedes Sensors berechnen und danach auf den gesamten geforderten Messbereich erweitern. Dazu wird über den Verstärkerwiderstand  $R_{G\text{ Druck}}$  ( $R_2$  in Abbildung 30) der Verstärkungsfaktor  $G_{\text{Druck}}$  des INAs für den damit verbundenen Drucksensor eingestellt (vgl. Gl. 33).  $G_{\text{Druck}}$  wird dabei so gewählt, dass die Ausgangsspannung im relevanten Messbereich insgesamt um 2000 mV ansteigt (vgl. Abschnitt 3.3.2.2). Da die integrierte *Wheatstone*-Brücke der Drucksensoren keine hardwareseitige Verschiebung des Nullpunkts zulässt, muss dieser anschließend über eine Software angepasst werden.

In Tabelle 20 werden die theoretischen Verstärkungsfaktoren, die zugehörigen Widerstandswerte sowie die Geradengleichungen aller Drucksensoren mit ihren idealen Werten zusammengefasst. Exemplarisch wird in Abbildung 32 der Verlauf der verstärkten Ausgangsspannung über dem anliegenden Druck des ersten Keramikdrucksensors dargestellt. Eine ausführliche Wertetabelle sowie die resultierenden Geraden jedes Drucksensors sind im Anhang hinterlegt.

Sensor	Verstärkungsfaktor $G_{Druck}$	Verstärkerwiderstand $R_{G\ Druck}$ in $\Omega$	Geradengleichung der Drucksensoren
Edelstahl 1	403,27	124,29 $\Omega$	$U_o(p) = (7717/35010)p + (2446403/35010000)$
Keramik 1	226,2	222,02 $\Omega$	$U_o(p) = (8833/99900)p - (932987/9990000)$
Keramik 2	210,11	239,11 $\Omega$	$U_o(p) = (188/1975)p - (15553/197500)$
Keramik 3	204,51	245,69 $\Omega$	$U_o(p) = (14677/150080)p - (838469/15008000)$
Keramik 4	205,86	244,07 $\Omega$	$U_o(p) = (389/4004)p - (146203/2002000)$
Keramik 5	190,26	264,19 $\Omega$	$U_o(p) = (39/371)p - (29651/371000)$
Keramik 6	209,55	239,75 $\Omega$	$U_o(p) = (4777/50050)p - (106163/1251250)$

Tabelle 20: Übersicht Verstärkungsfaktor und -widerstand sowie Geradengleichung der Drucksensoren

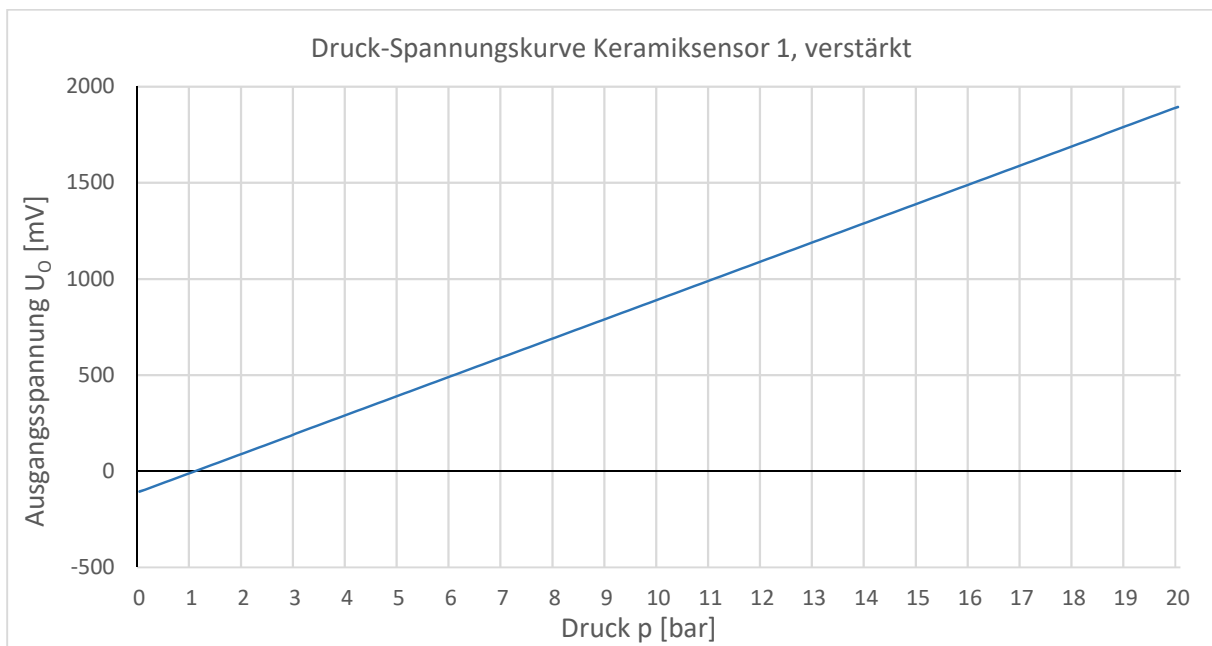


Abbildung 32: Exemplarische Druck-Spannungskurve des ersten Keramikensors

### 3.3.4 Entwicklung der Wägeeinheit

In Abschnitt 3.3.4.1 wird die mechanische Auslegung der Wägeeinheit vorgenommen. Dazu werden alle Kräfte aufgezeigt beziehungsweise berechnet, die für die Konstruktion und die Wägung relevant sind. Unter 3.3.4.4 wird auf die elektronische Funktionsweise der Wägezelle, den Aufbau der Messkette und den Messablauf eingegangen.

Der gesamte Aufbau der Wägeeinheit wird in Abbildung 33 ersichtlich. Die beiden Wägezellen H10A (1), deren wichtigste Kennwerte aus Tabelle 21 entnommen werden können, wurden von der Firma *Bosche* zugekauft. Das zugehörige Datenblatt befindet sich in Anhang 11.2. Damit sich die Wägezellen frei biegen können, benötigen sie einen Abstandshalter (4). An der Vorderseite des Biegebalkens wird eine Wägeplatte (3) für die daran abgestützte Tassenauflage (2) verschraubt. In der Mitte dieser Auflage befindet sich eine zusätzliche Lagerung (5), die die horizontalen Kräfte aufnimmt.



Um die vertikalen Kräfte in die Wägezellen einzuleiten, wird die Tassenaufgabe an den beiden äußeren Aussparungen (Lagerpunkte A und C) gelagert. Der mittlere Lagerpunkt (B) entspricht einer Berührungsfläche, die die horizontalen Normalkräfte aufnimmt und somit eine Verfälschung des Ergebnisses durch Momenteneinfluss verhindert (vgl. Abbildung 34).

Bezeichnung der Kennwerte	Kurzzeichen	Wert mit Einheit
Genauigkeitsklasse nach OIML R60	C3	
Schutzart	IP 65	
Anzahl der Teilungswerte	$n_{LC}$	3000
Nennlast	$E_{max}$	8 kg
Relativer Mindestteilungswert	$Y$	10.000
Grenzlast	$E_{lim}$	150 % $E_{max}$
Nennkennwert	$C_n$	$2 \pm 0,2 \text{ mV/V}$
Speisespannung	$U_{IN WZ}$	5 V

Tabelle 21: Kenndaten der Wägezelle Bosche H10A

Damit eine Beschädigung der Wägezellen verhindert wird, muss ein mechanischer Anschlag vorgesehen sein. Die maximale Durchbiegung der Wägezellen wird in einer FEM-Analyse ermittelt. Dazu werden die Wägezellen exemplarisch mit ihrer Grenzlast  $E_{lim} = 12 \text{ kg}$  (vgl. Tabelle 21) belastet, was eine maximale Verschiebung von 0,09 mm erzeugt. Über Anpassung der Unterlegscheiben (6) kann der Abstand der Schrauben (7) entsprechend variiert werden, sodass die Wägezelle eine Distanz von etwa 0,1 mm zum Gerüst aufweist. Die komplette Wägeeinheit wird schließlich so in der Maschine montiert, dass die Tassen unter dem Ausfluss der Siebträger positioniert sind und das Gewicht des Espressos verwogen werden kann.

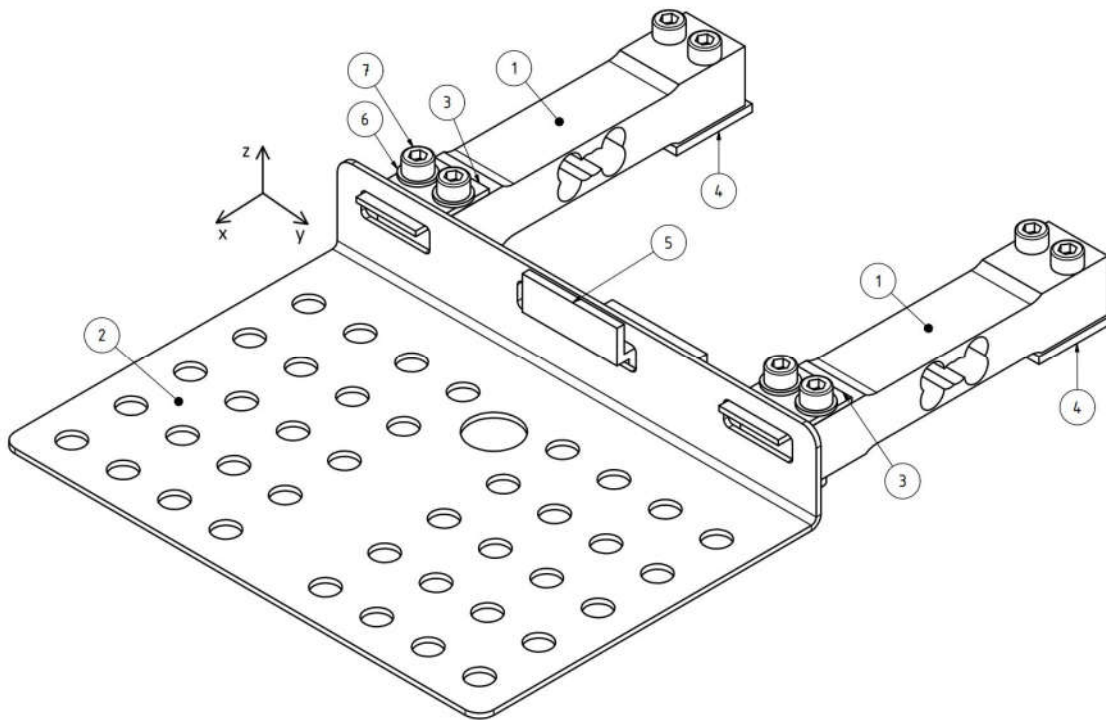


Abbildung 33: Übersicht der Wägeeinheit

### 3.3.4.1 Mechanische Auslegung der Wägeeinheit

Mithilfe der CAD-Software *Inventor* wurde zunächst ein Modell für die Tassenauflage konstruiert (vgl. Abbildung 34).

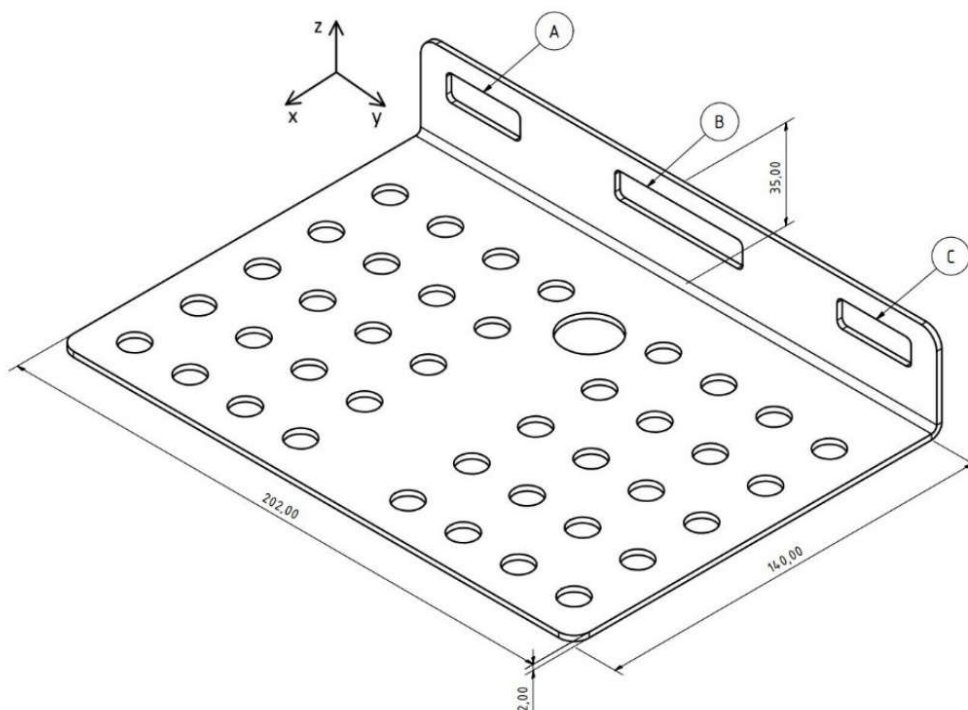


Abbildung 34: Abmessungen der Tassenauflage

Die Abmessungen der Auflage sind dabei so gewählt, dass zwei große Cappuccinotassen darauf Platz finden. Der obere Tassendurchmesser wird mit  $D_T = 100 \text{ mm}$  festgelegt. Der Siebträgerausguss der zugekauften Brühgruppe ist 100 mm von der Aufhängung (3) entfernt. Dieser Wert dient als zweiter Anhaltspunkt zur Festlegung der Fläche. Genaue Abmessungen der Tassenauflage können der Fertigungszeichnung in Anhang 11.4 entnommen werden.

Um die Tassenauflage vor Oxidation zu schützen, kommt ein rostfreies Stahlblech (Werkstoffnummer 1.4301) zum Einsatz. Der Fertigungsaufwand ist gering: Das Blech wird auf Maß gebracht, die Durchbrüche werden gefräst und der Winkel wird abschließend gebogen. Das große Loch in der Mitte gewährleistet am Ende des Bezugs das Abfließen überschüssigen Wassers aus der Brühgruppe in die Auffangschale. Durch die kleineren Löcher kann Tropfwasser abfließen.

Nun ist eine Ermittlung der Kräfte möglich, die durch die Tassen, den Espresso und das Eigengewicht der Auflage in die Wägezelle eingeleitet werden.

Zur Bestimmung der größtmöglichen Last auf die Wägezelle, wird von einer mit doppeltem Espresso befüllten Cappuccinotasse ausgegangen. Die Masse der Tasse  $m_T$  wird mit 0,3 kg festgelegt, das maximale Volumen beim Bezug eines doppelten Espressos mit 60 ml. Die Dichte des Espressos  $\rho_E$  kann in guter Näherung mit der von Wasser gleichgesetzt werden und entspricht somit  $1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Daraus ergibt sich eine Espressomasse  $m_E$  von 0,06 kg. Zudem wird eine kombinierte Kraft ( $F_{TE}$ ) aus  $m_T$  und  $m_E$  gebildet, da Tasse und Espresso eine Einheit bilden. Aus den physikalischen Eigenschaften des CAD-Modells kann mit einer gegebenen Dichte von  $7,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  für 1.4301 die Masse der Tassenauflage  $m_{GA}$  gleich 0,489 kg ermittelt werden.

Aus diesen Massen können die Gewichtskräfte, die zur weiteren Berechnung nötig sind, bestimmt werden. Eine Übersicht dieser Kräfte kann Tabelle 22 entnommen werden.

Bezeichnung der Kraft	Bezeichnung der Masse	Masse	Gewichtskraft
$F_T$	$m_T$	300 g	2,943 N
$F_E$	$m_E$	60 g	0,5886 N
$F_{GA}$	$m_{GA}$	489 g	4,7971 N
$F_{TE}$	$m_{TE}$	360 g	3,5316 N

Tabelle 22: Auftretende Gewichtskräfte auf die Lagerung

Um die maximal mögliche Belastung auf die Lagerstellen A und C in z-Richtung zu erhalten, werden zwei gefüllte Tassen auf der Tassenauflage angenommen. Werden die Kräfte in y-z-Richtung freigeschnitten, ergibt sich Abbildung 35. In Gl. 36 ist die Summe aller Kräfte in z-Richtung aufgeführt.

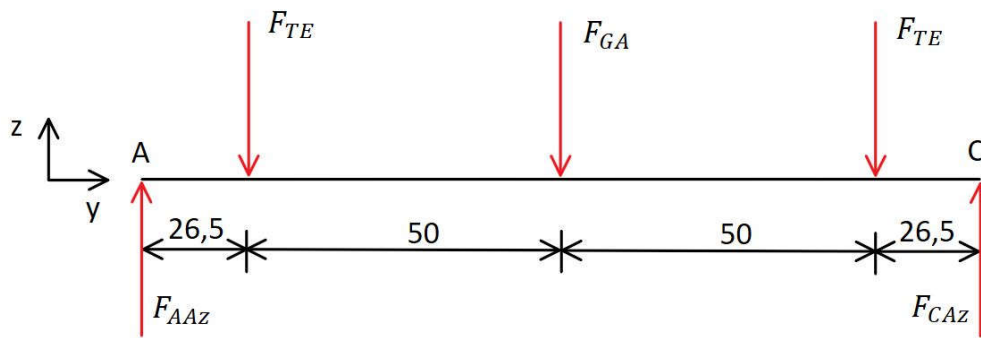


Abbildung 35: Freischnitt der Tassenauflage in y-z-Richtung

$$\Sigma F_z = 0 = F_{AAZ} + F_{CAZ} - F_{GA} - 2F_{TE} \quad \text{Gl. 36}$$

Zusätzlich wird das Momentengleichgewicht um den Lagerpunkt A der Auflage aufgestellt (Gl. 37):

$$\Sigma M_A = 0 = F_{TE} * 26,5 \text{ mm} + F_{GA} * 76,5 \text{ mm} + F_{TE} * 126,5 \text{ mm} - F_{CAZ} * 153 \text{ mm} \quad \text{Gl. 37}$$

Wird Gl. 37 nach der Auflagerkraft  $F_{CAZ}$  aufgelöst, ergibt sich ein Wert von 5,93015 N. Setzt man dieses Ergebnis in Gl. 36 ein, ergibt dies wiederum, dass  $F_{AAZ}$  ebenfalls 5,93015 N ist. Somit ist bestätigt, dass die Kräfte in den Lagerstellen bei symmetrischer Belastung der Auflage gleich groß sind und Gl. 38 gilt:

$$F_{AAZ} = F_{CAZ} \quad \text{Gl. 38}$$

Zudem lässt sich aus Gl. 36 ableiten, dass die Lagerreaktionskräfte der Summe der eingeleiteten Kräfte  $F_{TE}$  und  $F_{GA}$  entsprechen, wie in Gl. 39 ersichtlich wird:

$$F_{AAZ} + F_{CAZ} = F_{GA} + 2F_{TE} \quad \text{Gl. 39}$$

Im Folgenden soll zusätzlich gezeigt werden, dass bei ungleichmäßiger Belastung Gl. 40 gilt. Die Summe der beiden Kräfte auf die Lagerstellen ist jedoch genauso groß wie die gesamte eingeleitete Masse.

$$F_{AAZ} \neq F_{CAZ} \quad \text{Gl. 40}$$

Um exemplarisch eine unsymmetrische Belastung darzustellen, wird  $F_{TE}$  nur einmal in die Auflage eingeleitet. Gewählt ist die Kraft, die sich näher an Lagerpunkt A befindet. Nun kann ein Momentengleichgewicht um Position A beziehungsweise Position C der Auflage (wie in Gl. 41 und Gl. 42) aufgestellt werden:

$$\Sigma M_A = 0 = F_{TE} * 26,5 \text{ mm} + F_{GA} * 76,5 \text{ mm} - F_{CAZ} * 153 \text{ mm} \quad \text{Gl. 41}$$

$$\Sigma M_C = 0 = F_{AAZ} * 153 \text{ mm} - F_{TE} * 126,5 \text{ mm} - F_{GA} * 76,5 \text{ mm} \quad \text{Gl. 42}$$

Mit eingesetzten Werten ergibt sich für  $F_{AAZ} = 5,3185 \text{ N}$  und für  $F_{CAZ} = 3,0102 \text{ N}$ . Addiert man beide Werte, erhält man eine gesamte Kraft von 8,3287 N. Diese entspricht einer Tasse mit Inhalt und der Gewichtskraft der Tassenablage.

### 3.3.4.2 Kräfte in der Wägezelle

Zusätzlich zu den obigen Berechnungen wird überprüft, welche Kräfte in die Dehnmessstreifen (DMS) der Wägezellen eingeleitet werden.

Abbildung 36 zeigt eine Detailansicht der Wägezelle mit montierter Wägeplatte sowie die relevanten Maße, die für die folgenden Gleichungen benötigt werden. Die feste Verschraubung auf der linken Seite kann zwei Normalkräfte und ein Moment aufnehmen. Über die sich rechts befindende Wägeplatte wird die zu messende Kraft in die Wägezelle eingeleitet. Der Abstand des Krafteinleitungspunkts durch die Tassenauflage zum rechten Rand der Wägezelle beträgt dabei 4 mm.

Die Dehnmessstreifen befinden sich mittig auf der Oberfläche der Wägezelle, ober- und unterhalb des Ausbruchs. Um diese fest mit dem Trägermaterial zu verbinden, werden sie mit Kleber appliziert. Eine zusätzliche Silikonschicht gewährleistet Schutz gegenüber Umwelteinflüssen. Auf die Funktionsweise von Dehnmessstreifen wird in Abschnitt 3.3.4.4 näher eingegangen.

In Abbildung 37 findet sich der abgeleitete Freischnitt, der sich aus den vorherigen Angaben ergibt. Die eingeleitete Kraft wurde unter Gl. 36 und Gl. 37 berechnet und kann Tabelle 23 entnommen werden.

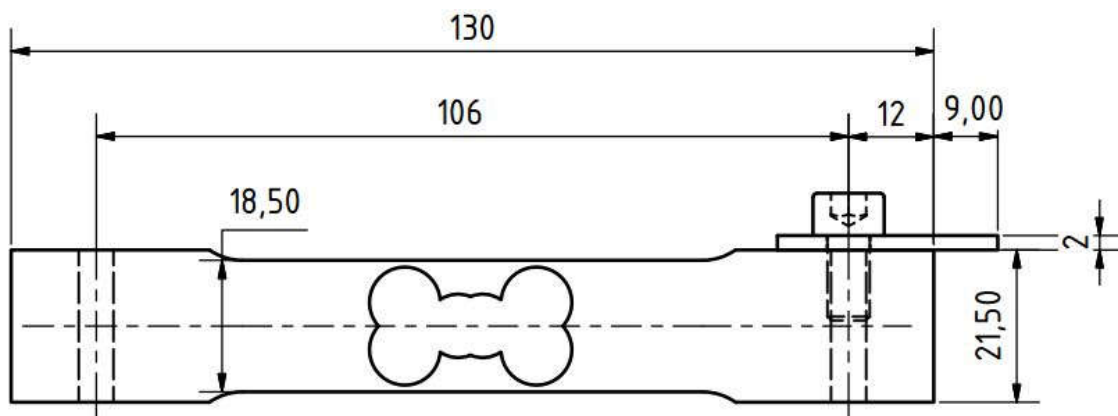


Abbildung 36: Abmessungen der Wägezelle mit montierter Wägeplatte

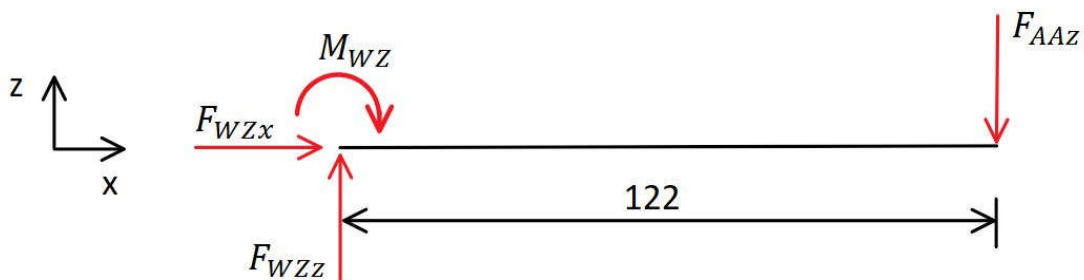


Abbildung 37: Freischnitt der Wägezelle

In vertikaler Richtung summieren sich alle Kräfte folgendermaßen:

$$\Sigma F_z = 0 = F_{WZZ} - F_{AAZ} \quad \text{Gl. 43}$$

Daraus folgt, dass die Lagerreaktionskraft der Wägezelle  $F_{WZZ}$  gleich der eingeleiteten Kraft  $F_{AAZ}$  ist und somit einem Wert von 5,93015 N entspricht. Dieser stimmt mit der halben Masse der Auflage und der Masse einer gefüllten Tasse überein.

Außerdem kann das Moment berechnet werden, das von der Einspannung an der rechten Seite aufgenommen wird. Dazu bildet man die Summe der Momente und stellt diese nach dem Lagermoment der Wägezelle  $M_{WZ}$  um:

$$M_{WZ} = -F_{AAZ} * 122 \text{ mm} \quad \text{Gl. 44}$$

Das sich daraus ergebende maximale Moment von  $-0,7235 \text{ Nm}$  muss von der Verschraubung an der linken Seite aufgenommen werden. Es wirkt auf die Wägezelle und erzeugt eine zusätzliche Dehnung an der Ober- sowie eine Stauchung an der Unterseite des Biegebalkens.

#### 3.3.4.3 Zusatzlagerung der Tassenauflage

Um eine Verfälschung des Messergebnisses durch die Einleitung von Momenten zu unterbinden, muss die Tassenablage zusätzlich in horizontaler Richtung gelagert werden. Eine Momentenbelastung entsteht durch den Abstand des Massenschwerpunkts der belasteten Tassenauflage zum Krafteinleitungspunkt der Wägezelle in x-Richtung. Des Weiteren ist zu beachten, dass an ihr keinerlei Kräfte in vertikaler Richtung aufgenommen werden. Dies würde die Messung ebenfalls verfälschen.

In Abbildung 38 wird die Geometrie mit den Grundmaßen der Lagerung ersichtlich. Um die spanende Fertigung zu erleichtern wurde Aluminium gewählt. Die exakten Abmessungen können der Fertigungszeichnung in Anhang 11.4 entnommen werden. Die Tassenauflage wird über die mittlere Aussparung an Punkt B (vgl. Abbildung 34) an der Lagerung eingehängt.

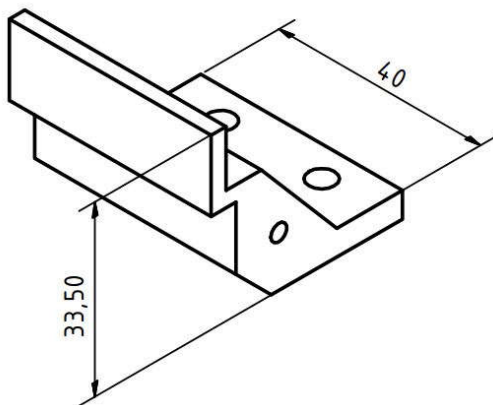


Abbildung 38: Lagerung der Tassenauflage

Abbildung 39 können die freigeschnittenen Kräfte in x- und z-Richtung sowie die jeweils dazugehörigen Abstände in Millimetern entnommen werden, die durch die Tassen und deren Auflage entstehen. Die im Folgenden berechneten Kräfte in x-Richtung müssen von der Lagerung in Punkt B aufgenommen werden.

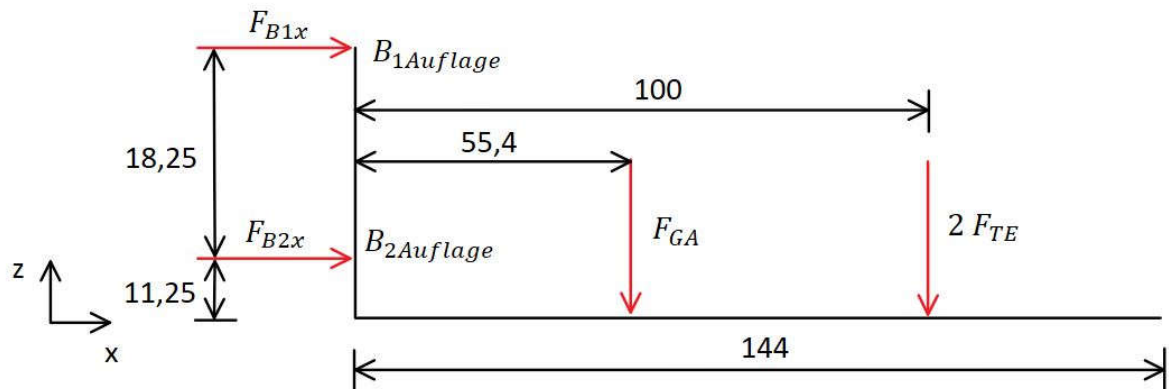


Abbildung 39: Freischnitt der Tassenauflage in x-z-Richtung

Das Kräftegleichgewicht in x-Richtung kann mittels Gl. 45 bestimmt werden:

$$\Sigma F_x = 0 = F_{B1x} + F_{B2x} \quad \text{Gl. 45}$$

Daraus folgt, dass  $F_{B1x}$  gleich  $-F_{B2x}$  ist und diese Kräfte demnach in entgegengesetzter Richtung wirken. Nun werden die Momente um Lagerpunkt  $B_{1Auflage}$  aufgestellt (vgl. Gl. 46):

$$\Sigma M_B = 0 = -F_{B2x} * 18,25 \text{ mm} + F_{GA} * 55,4 \text{ mm} + 2 F_{TE} * 100 \text{ mm} \quad \text{Gl. 46}$$

Umgestellt nach der Lagerkraft  $F_{B2x}$  bedeutet dies:

$$F_{B2x} = \frac{F_{GA} * 0,0554 \text{ m} + 2 F_{TE} * 0,1 \text{ m}}{0,01825 \text{ m}} \quad \text{Gl. 47}$$

Setzt man die Werte für  $F_{GA}$  und  $F_{TE}$  in Gl. 47 ein, ergibt sich eine Lagerkraft von 53,2646 N für  $F_{B2x}$  beziehungsweise -53,2646 N für  $F_{B1x}$ , die von der Lagerung aufgenommen werden muss.

Tabelle 23 dient als Übersicht für alle auftretenden resultierenden Kräfte.

Bezeichnung	Lagerkraft
$F_{AAz}$	5,93015 N
$F_{B1x}$	53,2646 N
$F_{B2x}$	-53,2646 N
$F_{WZx}$	0 N
$F_{WZZ}$	5,93015 N

Tabelle 23: Übersicht der Lagerkräfte aus der Tassenauflage

#### 3.3.4.4 Elektronischer Aufbau der Wägeeinheit

Um die Masse in den Cappuccinotassen bestimmen zu können, wird die Kraft mittels Wägezellen gemessen. Wägezellen sind mechanisch betrachtet metallische Biegebalken mit einer definierten

Schwächung, die sich meist in der Mitte des Balkens befindet. Wird eine Kraft in vertikaler Richtung in den Biegebalken eingeleitet, dehnt dieser sich auf der Oberseite und staucht sich auf der Unterseite. Verbindet man nun einen Dehnmessstreifen fest mit der Oberfläche des Biegebalkens, so verformt sich der Messstreifen in gleicher Richtung wie sein Träger. Dehnmessstreifen sind äußerst feine Drähte, die bereits bei sehr geringer Veränderung der Form ihren elektrischen Widerstand ändern. Schließt man nun mehrere Dehnmessstreifen in eine Vollbrückenschaltung zusammen und versorgt sie mit einer Spannung, kann am Brückenausgang eine Differenzspannung gemessen werden, die sich proportional zur Dehnung des Balkens beziehungsweise des Dehnmessstreifens verhält. Diese Ausgangsspannung kann nun zur weiteren Verarbeitung in die Messkette geleitet werden [Koch89].

Der gemeinsame Aufbau der Messketten wird in Abschnitt 3.3.1 beschrieben. Vom Multiplexer werden hier insgesamt vier Wägezellen an den AD-Wandler durchgeschaltet. Abbildung 40 zeigt die gefertigte und bestückte Prototyp-Messplatine für die Wägezellen.

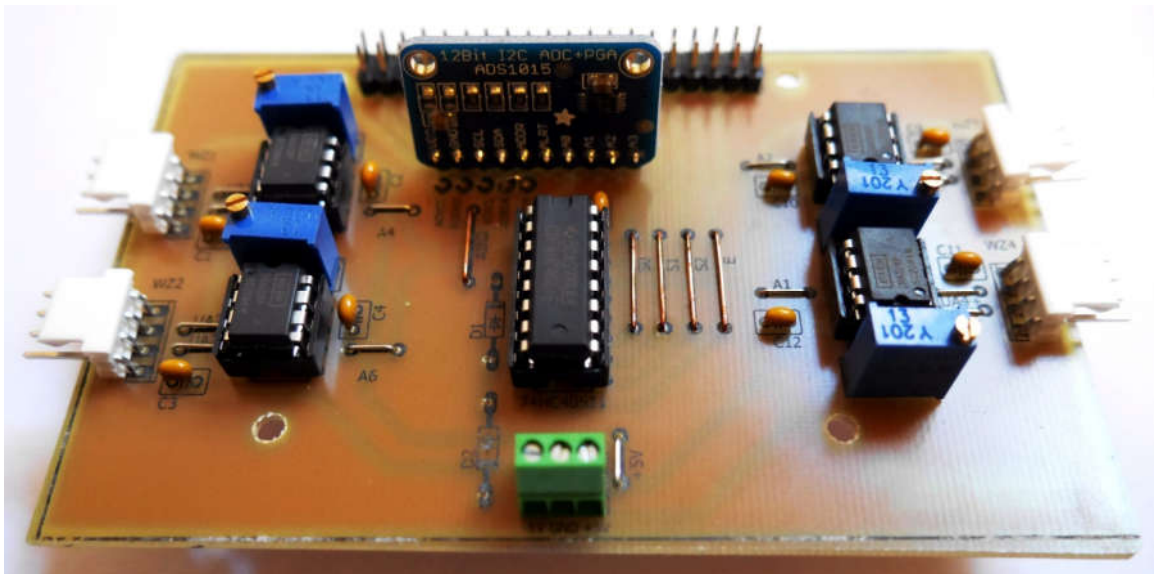


Abbildung 40: Bestückter Prototyp der Gewichtsmessplatine

Ein Ausschnitt des Schaltplans für die Wägeeinheit ist Abbildung 41 zu entnehmen und wird nachfolgend näher beschrieben. Der gesamte Schaltplan findet sich in Anhang 11.3.

Am Stecker WZ1 wird die erste Wägezelle angeschlossen und mit  $U_{IN\ WZ} = +5\ V$  versorgt. UA1- und UA1+ ist dabei die Ausgangsspannung.

Bei einer maximalen Belastung von 8 kg liegt der Nennkennwert  $C_n$  der Wägezelle H10A laut Datenblatt bei 2 mV pro Volt Speisespannung, woraus eine maximale Ausgangsspannung von

$$U_{OUT\ WZ} = 2 \frac{mV}{V} * 5\ V = 10\ mV \quad \text{Gl. 48}$$



folgt. Daraus kann eine ideale Geradengleichung (vgl. Gl. 49) für die Wägezellen ermittelt werden. Dabei entspricht  $U_{O\ WZ}$  der Spannung am Ausgang der Wägezelle und  $m$  der Masse, die sie belastet.

$$U_{O\ WZ}(m) = \frac{1}{800} * m \quad \text{Gl. 49}$$

Da in der labortechnischen Espressomaschine jedoch deutlich geringere Massen als 8 kg zu erwarten sind, wird ein Messbereich von 0 g bis 700 g festgelegt. Um auch hier die volle Auflösung von 2000 Teilen des AD-Wandlers nutzen zu können, muss die Ausgangsspannung  $U_{OUT\ WZ}$  der Wägezelle um den Faktor  $G_{WZ}$  gleich 2285,7 verstärkt werden. Wird Gl. 26 nach  $R_{G\ WZ}$  umgestellt, kann der Wert des Widerstands  $R_{g\ WZ}$  für den Verstärkungsfaktor des INAs bestimmt werden (vgl. Gl. 50):

$$R_{G\ WZ} = \frac{50k\Omega}{G_{WZ} - 1} \quad \text{Gl. 50}$$

Mit dem eingesetzten Verstärkungsfaktor  $G_{WZ}$  ergibt sich somit ein Widerstandswert von 21,88  $\Omega$ , der am Potentiometer R1 (vgl. Abbildung 41) voreingestellt werden muss. Da jedoch von der Ausgangsspannung der Wägezelle Toleranzen in Höhe von  $\pm 0,2$  mV pro Volt Speisespannung einzuplanen sind, muss der exakte Wert der benötigten Verstärkung an den Instrumentenverstärkern mit der jeweils angeschlossenen Wägezelle abgeglichen werden.

Der Adress-Pin des AD-Wandlers auf der Gewichtsmessplatine wird mit dem SDA-Pin verbunden, wodurch sich eine HEX-Adresse von 0x4A für den ADW dieser Messkette ergibt. In Tabelle 24 wird die Steckerbelegung der Wägezelle an der Messplatine aufgeführt. Tabelle 25 fasst alle Steckerbezeichnung an der Messplatine, den zugeordneten Multiplexerkanal sowie die Messstellen zusammen. Das Platinenlayout der Messplatine für die Wägung befindet sich samt Stückliste in Anhang 11.3 beziehungsweise 11.5.

Bezeichnung Wägezelle	Bezeichnung Stecker WZ	Stecker-Pin WZ	Leitungsfarbe
+ EXC	+5 V	4	rot
- Signal	UA-	3	weiß
+ Signal	UA+	2	grün
- EXC	GND	1	schwarz

Tabelle 24: Pin-Belegung an den Verbindungssteckern der Wägezellen

Sensor	Seriennummer	Steckerbezeichnung	MUX-Kanal	Messstelle
Wägezelle 1	1308191775	WZ1	A4	Brühgruppe 1
Wägezelle 2	1311150AFA	WZ2	A6	Brühgruppe 1
Wägezelle 3	1308191793	WZ3	A2	Brühgruppe 2
Wägezelle 4	1311150B22	WZ4	A1	Brühgruppe 2

Tabelle 25: Übersicht der Steckerbelegung, MUX-Kanäle und Messstellen der Wägeplatine

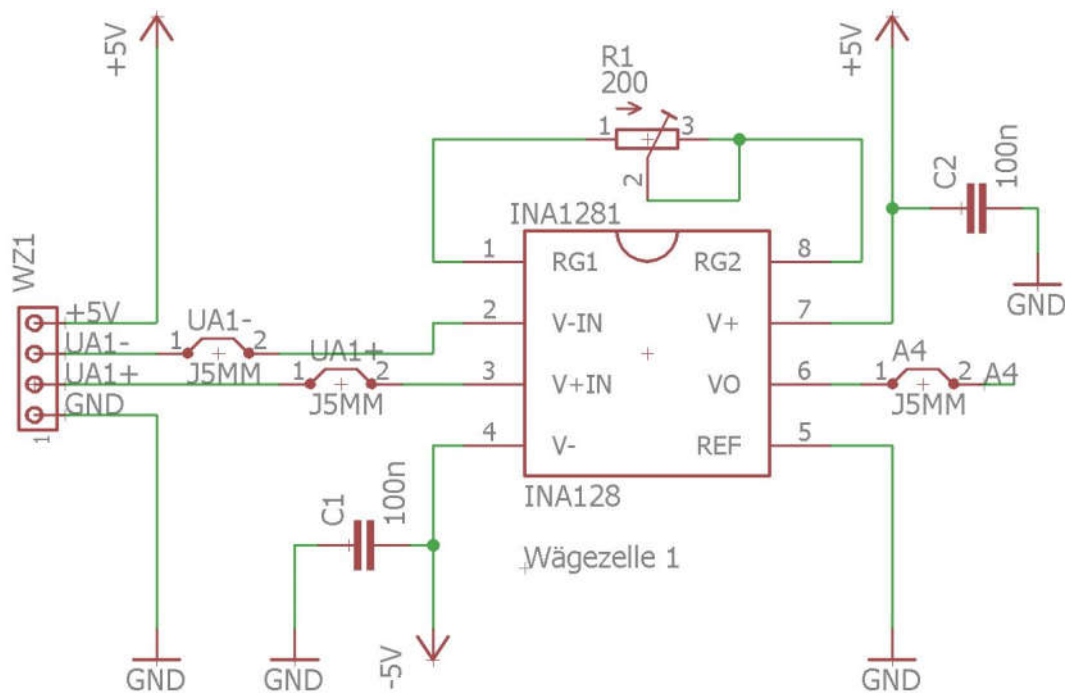


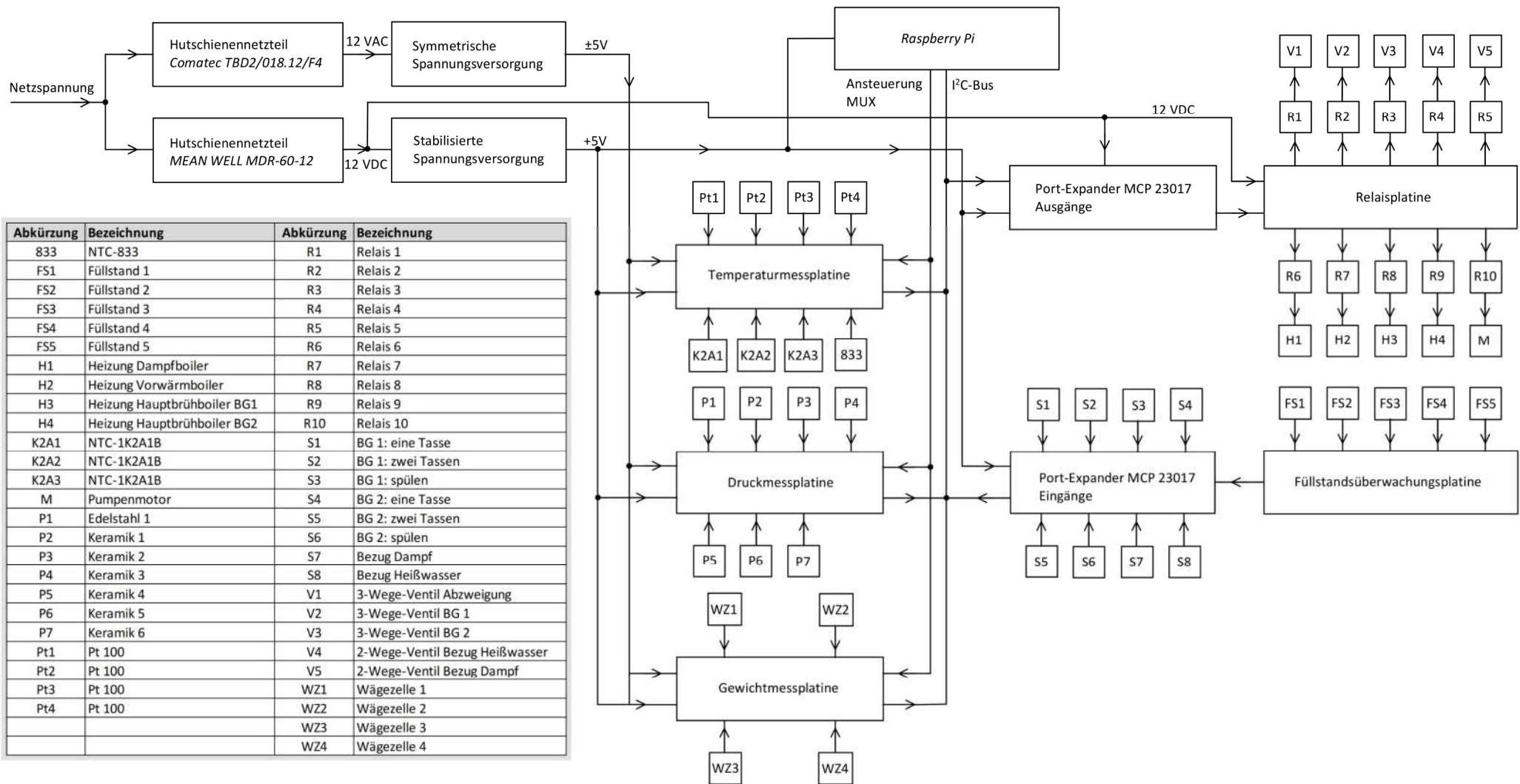
Abbildung 41: Schaltplanausschnitt der Wägezelle

### 3.4 Elektronik in der labortechnischen Espressoemaschine

Die Elektronik in der labortechnischen Siebträger-Espressoemaschine fungiert als Schnittstelle zwischen den einzelnen Komponenten wie der Messtechnik oder den Relais. Am zentralen Mikrocomputer (*Raspberry Pi*) laufen alle Signale zusammen, werden verarbeitet und anschließend als Steuerungs- und Regelungsaufgaben an das jeweils zuständige Bauteil übermittelt. Im folgenden Kapitel wird ausführlich auf zusätzlich notwendige Spannungsversorgungen, den verwendeten Mikrocomputer und dessen Erweiterung der Ein- und Ausgänge, die damit verbundene Füllstandsüberwachung und die Steuerrelais sowie auf die Herstellung der Platinen eingegangen.

#### 3.4.1 Übersichtsschaltplan der Espressoemaschine

Abbildung 42 zeigt den Übersichtsschaltplan der elektronischen Verschaltung in der gesamten labortechnischen Espressoemaschine. Ergänzend befindet sich in Anhang 11.3 ein ausgearbeiteter Schaltplan mit der konkreten Leitungsbelegung.



Abkürzung	Bezeichnung	Abkürzung	Bezeichnung
833	NTC-833	R1	Relais 1
FS1	Füllstand 1	R2	Relais 2
FS2	Füllstand 2	R3	Relais 3
FS3	Füllstand 3	R4	Relais 4
FS4	Füllstand 4	R5	Relais 5
FS5	Füllstand 5	R6	Relais 6
H1	Heizung Dampfboiler	R7	Relais 7
H2	Heizung Vorwärmboiler	R8	Relais 8
H3	Heizung Hauptbrühboiler BG1	R9	Relais 9
H4	Heizung Hauptbrühboiler BG2	R10	Relais 10
K2A1	NTC-1K2A1B	S1	BG 1: eine Tasse
K2A2	NTC-1K2A1B	S2	BG 1: zwei Tassen
K2A3	NTC-1K2A1B	S3	BG 1: spülen
M	Pumpenmotor	S4	BG 2: eine Tasse
P1	Edelstahl 1	S5	BG 2: zwei Tassen
P2	Keramik 1	S6	BG 2: spülen
P3	Keramik 2	S7	Bezug Dampf
P4	Keramik 3	S8	Bezug Heißwasser
P5	Keramik 4	V1	3-Wege-Ventil Abzweigung
P6	Keramik 5	V2	3-Wege-Ventil BG 1
P7	Keramik 6	V3	3-Wege-Ventil BG 2
Pt1	Pt 100	V4	2-Wege-Ventil Bezug Heißwasser
Pt2	Pt 100	V5	2-Wege-Ventil Bezug Dampf
Pt3	Pt 100	WZ1	Wägezelle 1
Pt4	Pt 100	WZ2	Wägezelle 2
		WZ3	Wägezelle 3
		WZ4	Wägezelle 4

Abbildung 42: Übersichtsschaltplan der labortechnischen Espressomaschine

### 3.4.2 Spannungsversorgungen

Insgesamt werden in der labortechnischen espressomaschine drei unterschiedliche Spannungen benötigt. Jedes Ventil sowie die Heizelemente arbeiten mit 230 V Wechselspannung. Alle anderen elektronischen Komponenten werden mit + 5 V Gleichspannung versorgt. Zusätzlich benötigen die Instrumentenverstärker negative 5 V DC, um auch negative Spannungen verstärken zu können. Alle Komponenten, die mit 230 V AC versorgt werden müssen, erhalten ihre Spannung über die Relaisplatine aus Abschnitt 3.4.6.

Da der Prototyp jedoch nur einen Netzanschluss haben soll, müssen die anderen Spannungen innerhalb der Maschine auf den gewünschten Wert transformiert werden. Zur Erzeugung dieser Kleinspannungen werden zwei getrennte Spannungsversorgungen aufgebaut.

#### 3.4.2.1 Stabilisierte 5 V-Spannungsversorgung

Zuerst wird aus der 230 V Netzwechselspannung eine niedrigere Gleichspannung erzeugt. Hierzu wird ein Hutschiene-Netzteil mit der Bezeichnung *MDR-60-12* der Firma *MEAN WELL* eingesetzt. Das zugehörige Datenblatt befindet sich in Anhang 11.2. Dieses Netzteil wandelt 230 V AC am Eingang in 12 V DC am Ausgang um. Der maximale Ausgangsstrom beträgt dabei 5 A. Mit ihm wird sowohl die Relaisplatine, als auch das zusätzlich aufgebaute + 5 V-Netzteil versorgt.

Abbildung 43 zeigt den Schaltplan der stabilisierten Spannungsversorgung. Am Stecker SKB1 wird die Eingangsspannung  $U_{IN}$  (12 V DC) vom Hutschiene-Netzteil angeschlossen. Von hier aus gelangt  $U_{IN}$  zum Kern dieses Netzteils, dem Spannungsregler *LT1085CT* von *Linear Technology*. Am Eingang befindet sich ein Filterkondensator C1, der hochfrequente Störungen ableitet sowie den Ladungsausgleich beim Schalten des Eingangs dämpft [Gall03]. Die Gleichrichterdiode D1 verhindert bei rücklaufenden Spannungen die Zerstörung des Spannungsreglers. Durch die externe Beschaltung am Ausgang des Bausteins ist die Spannung  $V_{OUT}$  variabel einstellbar. Die Ausgangsspannung berechnet sich dabei wie in Gl. 51:

$$U_{OUT} = U_{REF} \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) + I_{ADJ} R2 \quad \text{Gl. 51}$$

Der *LT1085* generiert eine Referenzspannung  $U_{Ref}$  von 1,25 V zwischen dem Adjust-Pin (1) und dem Ausgangs-Pin (2). Dabei beträgt der Einstellstrom  $I_{ADJ}$  50  $\mu$ A. Für die beiden Widerstände R1 und R2 wurden in einer Beispielschaltung für eine geringe Restwelligkeit 121  $\Omega$  und 365  $\Omega$  vorgeschlagen. Setzt man diese Werte in Gl. 51 ein, erhält man eine Ausgangsspannung  $U_{OUT}$  von 5,039 V, die am Stecker SKB2 abgegriffen werden kann. In der aufgebauten Schaltung wurde R2 als Potentiometer ausgeführt. Dadurch ist eine Feineinstellung der Ausgangsspannung möglich.

Ohne Kondensator C2 am Adjust-Pin würde die Ausgangswelligkeit, als Funktion der Ausgangsspannung zur Referenzspannung ( $U_{OUT}/U_{REF}$ ), ansteigen, was in diesem Fall eine

Vervierfachung der Welligkeit zur Folge hätte. Im Datenblatt wird für C2 und einer Frequenz der Störspannung unter 60 Hz eine Kapazität von 200  $\mu\text{F}$  empfohlen; verbaut wurde der nächste verfügbare Wert von 220  $\mu\text{F}$ . Zur Frequenzkompensation dient der Kondensator C3 mit einer Kapazität von 150  $\mu\text{F}$  [LT1085]. Um die Betriebsbereitschaft der Spannungsversorgung optisch überprüfen zu können, wurde LED1 in die Schaltung eingefügt. Der Widerstand R3 begrenzt dabei den Strom in der LED auf etwa 3 mA.

Zusätzlich wurde mit dem Elektronik-Simulationsprogramm *LTSpice* die Restwelligkeit der Ausgangsspannung überprüft. Die Eingangsspannung beträgt, wie im Datenblatt zum *MDR-60-12* angegeben, 12 V DC mit einer Restwelligkeit von 120 mV<sub>SS</sub>. Der restliche Aufbau ist Abbildung 43 zu entnehmen. Darin wurde bei einer Ausgangsspannung von 5,0081 V eine Restwelligkeit von 9,5  $\mu\text{V}_{\text{SS}}$  ermittelt.

Darüber hinaus muss bei Spannungsreglern die Wärmeabfuhr beachtet werden. Die Verlustleistung  $P_V$  wird als Wärme abgegeben und lässt sich wie in Gl. 52 berechnen:

$$P_V = (U_{IN} - U_{OUT})I_{OUT} \quad \text{Gl. 52}$$

Mit den oben beschriebenen Spannungen und einem angenommenen Ausgangsstrom  $I_{OUT}$  von 1 A ergibt sich eine Verlustleistung von 7 W. Mit Gl. 53 kann die sich daraus entwickelnde Temperatur an der Sperrschicht  $T_{S1}$  des Spannungsreglers *LT1085* berechnet werden:

$$T_{S1} = T_A + P_V(R_{\theta HS} + R_{\theta CS} + R_{\theta JC1}) \quad \text{Gl. 53}$$

Es wird eine Umgebungstemperatur  $T_A$  von 40 °C angenommen. Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers  $R_{\theta HS}$  ist im entsprechenden Datenblatt mit 11 K/W gegeben. Für den Wärmewiderstand zwischen Gehäuse und Kühlkörper ( $R_{\theta CS}$ ) gilt ein Wert von 0,2 K/W, der abhängig von der verwendeten Wärmeleitpaste ist. Bei der Gehäuseform Typ T des Spannungsreglers ist ein Wärmewiderstand der Sperrschicht zum Gehäuse  $R_{\theta JC1}$  von 0,7 K/W gegeben [LT1085]. Setzt man diese Werte nun in Gl. 53 ein, erhält man eine Sperrschichttemperatur  $T_S$  von 123,3 °C, die unter der erlaubten maximalen Temperatur von 150 °C liegt. Ab einer Stromaufnahme von etwa 1,3 A sollte ein Kühlkörper mit besserer Wärmeabfuhr verbaut werden.

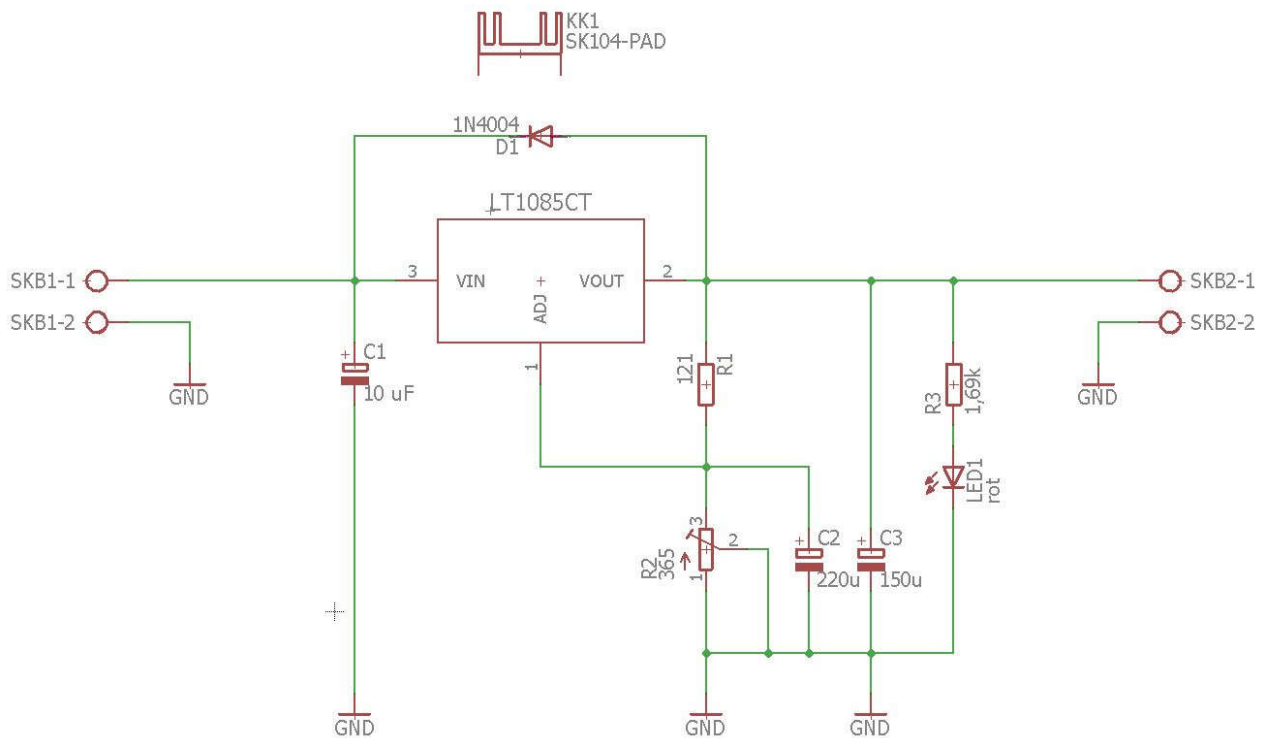


Abbildung 43: Schaltplan der stabilisierten Spannungsversorgung

### 3.4.2.2 Symmetrische Spannungsversorgung

Als Basis für die symmetrische Spannungsversorgung dient ein Schaltplan von Prof. Dr. Küpper [Küpp17], wobei die beiden Spannungsregler 7812CV und 7912CV gegen Modelle mit einer Ausgangsspannung von 5 V ausgetauscht wurden. Dieser modifizierte Schaltplan der symmetrischen Spannungsversorgung wird in Abbildung 44 ersichtlich.

Das Hutschienennetzteil *TBD2/018.12/F4* von Comatec stellt bei einer Stromstärke von 1,5 A eine Wechselspannung  $U_{eff}$  von 12 V zur Verfügung (Datenblatt siehe Anhang 11.2). Die symmetrische Spannungsversorgung benötigt diese Wechselspannung, um sowohl eine positive als auch eine negative Ausgangsspannung liefern zu können. Mit den beiden Gleichrichterdioden D2 und D6 wird hierzu jeweils die negative beziehungsweise positive Halbwelle gesperrt. Da nun im oberen positiven sowie im unteren negativen Zweig eine pulsierende Gleichspannung vorliegt, wird diese über die zwei 1000-Mikrofarad-Kondensatoren geglättet. Die beiden PTC-Sicherungen (*Positive Temperature Coefficient*) F1 und F2 lösen bei einer Belastung von 0,5 A aus. Im Gegensatz zu Schmelzsicherungen werden diese nach einem Kurzschluss wieder leitfähig und können somit mehrmals verwendet werden [Stin15]. Alle weiteren Kondensatoren dienen zur Glättung der Spannung oder zur Unterdrückung von Störungen. Zusätzliche Schutzdioden leiten Spannungen, die oberhalb der Betriebsspannung liegen, ab und verhindern dadurch eine Zerstörung der Spannungsregler *L7805CV* und *L7905CV*. Zwei LEDs am Ausgang signalisieren eine Bereitschaft der positiven und negativen Ausgangsspannung.

Zur Berechnung der Erwärmung muss zunächst der Spannungsverlust an den Spannungsreglern bestimmt werden. Der Spitzenwert der Wechsellspannung  $U_{SS}$  ergibt sich aus Gl. 54:

$$U_{SS} = U_{eff} * \sqrt{2} \quad \text{Gl. 54}$$

Daraus folgt eine Spitzenspannung von 16,97 V, die sich mit  $\pm 8,49$  V gleichmäßig auf beide Zweige verteilt. Da die Spannungsregler ihre Eingangsspannung auf 5 V reduzieren, müssen 3,49 V in Wärme umgewandelt werden. Mit einem angenommenen maximalen Strom von 500 mA, ergibt sich aus Gl. 52 eine Verlustleistung  $P_{V2}$  von 1,745 W. Die Sperrschichttemperatur  $T_{S2}$  an den Spannungsreglern L7805CV und L7905CV kann ebenfalls mittels Gl. 53 berechnet werden. Die Widerstandswerte des Kühlkörpers  $R_{\theta HS}$  und der Wärmeleitpaste  $R_{\theta CS}$  sowie die Umgebungstemperatur  $T_A$  werden wie unter Abschnitt 3.4.2.1 angegeben verwendet. Der Sperrschicht-Gehäuse-Widerstand  $R_{\theta JC2}$  der beiden verbauten Spannungsregler liegt laut Datenblatt bei 5 °C/W. Mit diesen Daten ergibt sich für  $T_{S2}$  eine Temperatur von 68,27 °C, die somit deutlich unter der maximal zulässigen Betriebstemperatur von 150 °C bleibt.

Tabelle 3 bietet eine Übersicht der Steckerbelegung an der symmetrischen Spannungsversorgung.

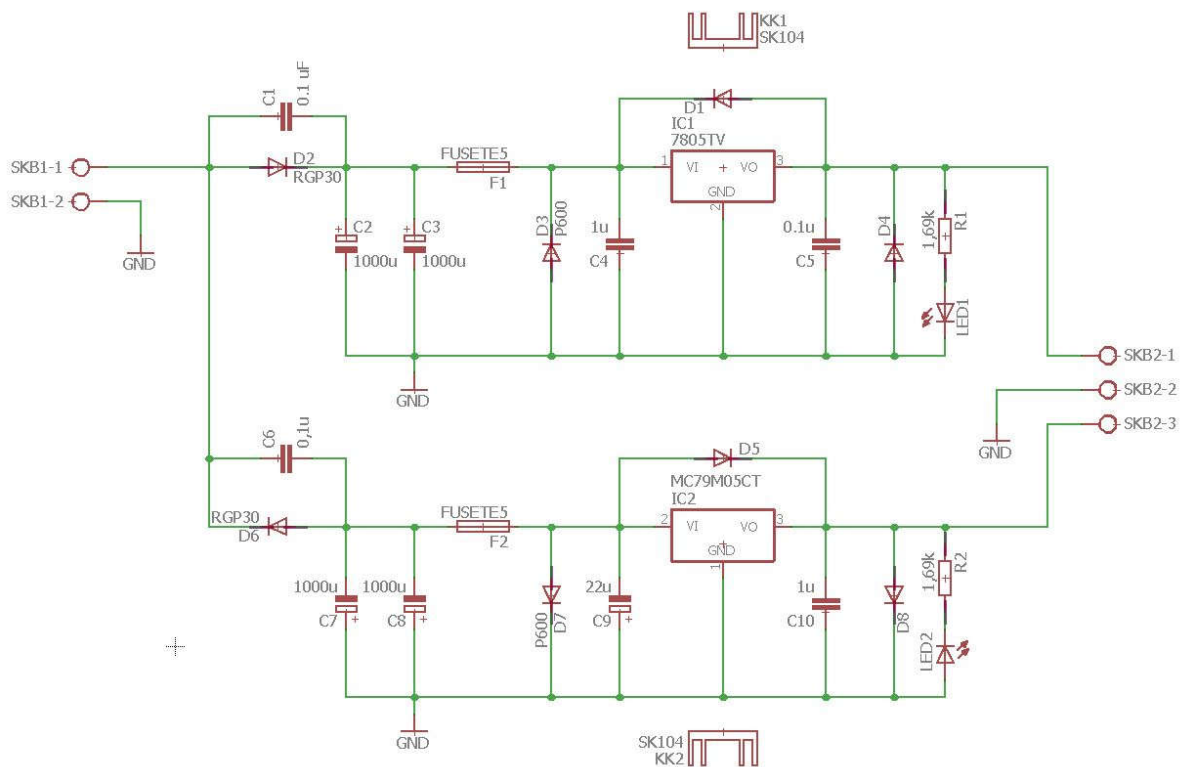


Abbildung 44: Schaltplan der symmetrischen Spannungsversorgung

Steckerbezeichnung	Spannung
SKB1-1	12 V Wechselspannung
SKB1-2	Masse
SKB2-1	+ 5 V Gleichspannung
SKB2-2	Masse
SKB2-2	- 5 V Gleichspannung

Tabelle 26: Übersicht der Steckerbelegung an der symmetrischen Spannungsversorgung

### 3.4.3 Raspberry Pi

Über den Einplatinencomputer *Raspberry Pi 3 Modell B* wird die vollständige labortechnische Espressomaschine gesteuert. Dieser Computer liest beispielsweise die Werte aus den Messplatinen aus, erkennt die Schalterstellungen der Bezugstasten und steuert die Relais an. Er benötigt eine Spannungsversorgung von + 5 V und nimmt bei maximaler Belastung eine Leistung von etwa 3,5 W (700 mA) auf. Da der RPi jedoch nur als Steuereinheit verwendet wird, ist eine wesentlich geringere Leistungsaufnahme von etwa 330 mA zu erwarten [Schn2]. Die Versorgungsspannung wird am GPIO-Pin 2 (*general purpose input/output*) angelegt, zur Versorgung wird die Spannungsquelle aus Absatz 3.4.2.1 verwendet. Die Messplatinen und der GPIO-Expander werden über den *Inter-Integrated Circuit* (I<sup>2</sup>C)-Datenbus angesteuert und ausgelesen. Zur Kommunikation müssen die jeweiligen Platinen mit den Pins SDA (Pin 3) und SCL (Pin 5) des RPis verbunden werden. Zudem werden über den RPi die Eingangskanäle der Multiplexer auf den Messplatinen durchgeschaltet. Dazu wird das Adressregister des MUX über die Pin-Nummern 11, 13 und 15 auf einen High- oder Low-Pegel gebracht und anschließend mittels eines Low-Signals über Pin 37 auf dem MUX gesetzt. Diese jeweils angesteuerten Eingänge können im Absatz 3.3.1 aus Tabelle 12 bestimmt werden. Eine Übersicht aller verwendeten GPIOs des *Raspberry Pis* können Tabelle 27 entnommen werden.

Die nötige Programmierung des *Raspberry Pis* muss noch erfolgen und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Pin-Nr. am RPi	GPIO-Nr.	Verwendung
2		+ 5 V
6, 9, 14, 20, 25, 30, 34, 39		GND (Masse)
3	GPIO 2	SDA (I <sup>2</sup> C)
5	GPIO 3	SCL (I <sup>2</sup> C)
11	GPIO 17	S0 (MUX)
13	GPIO 27	S1 (MUX)
15	GPIO 22	S2 (MUX)
37	GPIO 26	Enable (MUX)

Tabelle 27: Übersicht der verwendeten GPIOs



### 3.4.4 Erweiterung der GPIOs des Raspberry Pis

Da am *Raspberry Pi* nur 24 GPIOs zur Verfügung stehen, ist es sinnvoll diese über ein Expandermodul zu erweitern. Dazu eignet sich der IC *MCP23017-E/SP*, der mit dem I<sup>2</sup>C-Datenbus des RPi verbunden wird. Somit belegt der IC lediglich zwei GPIOs (SDA und SCL) und stellt insgesamt 16 weitere Ein- und Ausgänge zur Verfügung.

Mit diesen ICs werden nun zwei separate Erweiterungsplatinen aufgebaut. Die erste Platine wird nur für Eingangssignale verwendet, die zweite steuert alle Relais an. Abbildung 45 stellt den Schaltplan der Eingangsexpanderplatine, Abbildung 46 den der Ausgangsexpanderplatine dar.

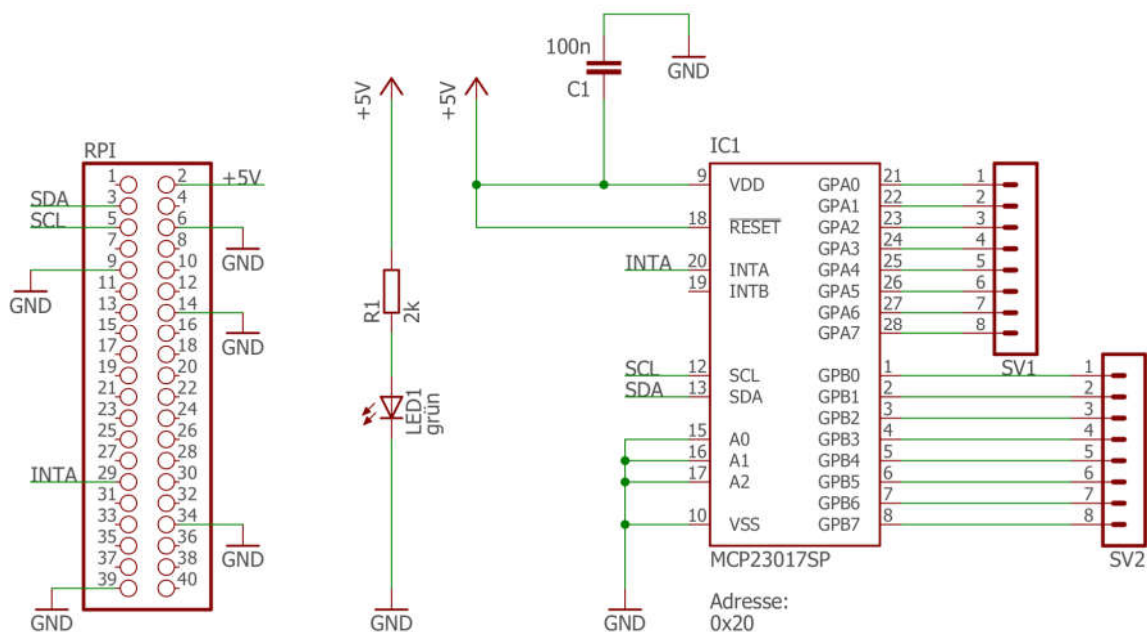


Abbildung 45: Schaltplan der Expanderplatine für die Eingänge

Da bei Schaltvorgängen des *MCP23017* die Versorgungsspannung impulsartig einbricht, muss am VDD-Pin ein Blockkondensator mit 100 nF angebracht werden. Damit Signale über den I<sup>2</sup>C-Bus übermittelt werden können, werden SCL und SDA mit den entsprechenden Pins des RPi verbunden. Über Pin 20 (INTA) des *MCP23017* wird ein Interrupt-Signal an den *Raspberry Pi* gesendet, sobald sich der Status an einem der Eingänge (GPA und GPB) ändert. Dabei muss nur einer der beiden INT-Pins am RPi angeschlossen sein, da sie intern mit einer ODER-Verknüpfung verbunden sind. Mithilfe dieses Interrupt-Signals müssen nun nicht mehr alle Eingänge ununterbrochen abgefragt werden. A0, A1 sowie A2 sind mit Masse verbunden, was dem *MCP23017* auf der Eingangsplatine die Adresse 0x20 auf dem Datenbus zuweist. LED1 signalisiert, dass eine Versorgungsspannung angelegt ist. An den Klemmverschraubungen SV1 und SV2 können die Leitungen für die Eingangssignale angebracht werden. Zusätzliche Pull-Up-Widerstände an den Eingängen werden nicht benötigt, da sie bereits in den *MCP23017* integriert sind [MCP23017].



### 3.4.5 Füllstandsüberwachung

An der Eingangsexpanderplatine werden unter anderem die Signale der Füllstandsüberwachung abgegriffen. Als Basis dieser Überwachung wurde die Schaltung eines Bausatzes der Firma *Conrad* verwendet. Dazu wurden lediglich die für die labortechnische Espressomaschine relevanten Elemente übernommen und um einen zusätzlichen High-/ Low-Pegel-Ausgang ergänzt. Insgesamt sind fünf dieser Überwachungsschaltungen auf einer Platine untergebracht. In Abbildung 47 ist diese bestückte Füllstandsüberwachungsplatine zu sehen.

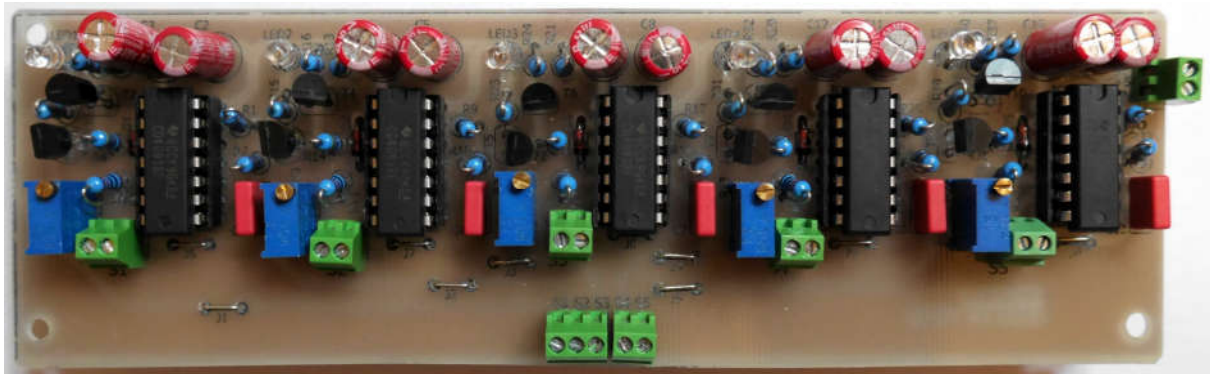


Abbildung 47: Bestückter Prototyp der Füllstandsüberwachungsplatine

Abbildung 48 stellt exemplarisch den Schaltplanausschnitt für die Überwachung eines Füllstands dar. Der vollständige Schaltplan sowie das zugehörige Layout befinden sich in Anhang 11.3.

Die Schaltung wird mit + 5 V (VDD) und GND der stabilisierten Spannungsversorgung verbunden. Hauptkomponente ist der IC 4093, der aus vier NAND-Schmitt-Triggern besteht.

Um elektrolytische Effekte an den Fühlern zu unterbinden, wird ein Rechtecksignal benötigt. Aus den Gattern IC1C und IC1D, den Widerständen R1 und R2 sowie dem Kondensator C1 wird dafür ein Rechteckoszillator gebildet. Über Pin 10 dieses Oszillators gelangt nun das Signal an den Anschluss SKB4-1, der mit der Masse der Platine verbunden ist. Da alle Boiler ebenfalls mit dem Massepotential zusammenliegen, wird pro Kessel nur ein Messfühler benötigt. Der zweite Steckeranschluss SKB4-2 wird an diesen Fühler im Boiler angeschlossen, der ein invertiertes Rechtecksignal vom Oszillator erhält.

Mit dem Potentiometer R4 kann die Empfindlichkeit der Fühler festgelegt werden. Sinkt der Wasserspiegel im Boiler unter die gewünschte Mindesthöhe, fällt am Anschluss SKB4-1 die Spannung von Pin 10 ab, das Signal an Pin 5 und Pin 6 gleichen sich an und der Ausgang von IC1B schaltet auf einen Low-Pegel um. Im letzten Gatter (IC1A) wird dieser Pegel wiederum invertiert, was ein High-Signal an Pin 3 zur Folge hat. Durch den High-Pegel an der Basis der Transistoren T1 und T2 können diese durchschalten. LED1 hat somit eine Verbindung zur Masse und signalisiert optisch einen zu geringen Füllstand [Conr97]. Um die Leistungsaufnahme der LED zu reduzieren, wird der Strom mithilfe des Widerstands R7 auf etwa 3 mA begrenzt. Die aktuellen Füllstände in den Boilern können

über den Anschluss OUT1 an den GPIO-Expander *MCP23017* weitergegeben werden. Da GPIO-Eingänge einen definierten Zustand benötigen, wurde R8 als Pull-Up-Widerstand realisiert. Zusätzlich begrenzt dieser den Eingangsstrom der GPIOs am RPi [Schn1].

Der Transistor T2 schaltet die Pegel zum Expander um. Hat der Füllstand seine gewünschte Höhe erreicht, liegt an OUT1 ein High-Pegel an, wird der Fühler hingegen nicht vom Wasser berührt, ein Low-Pegel.

Als Messfühler kommen Niveausonden mit einer Länge von 148 mm und einem Durchmesser von 2,5 mm zum Einsatz. Diese Stahlstäbe lassen sich auf die gewünschte Länge kürzen. Eine Übersicht der benötigten Längen der Niveausonden in den jeweiligen Boilern ist Tabelle 28 zu entnehmen.

Die Sonden sitzen jeweils in einer Klemmverschraubung in den Deckeln der Boiler. Die Verschraubung ist zusätzlich mit einer Flüssigdichtung verklebt. Eine integrierte Kunststoffhülse isoliert die Fühler gegen den Kessel. Das gequetschte Ende der Sonde kann über eine Leitung mit den Anschlüssen FS1 bis FS5 der Füllstandsüberwachungsplatine verbunden werden.

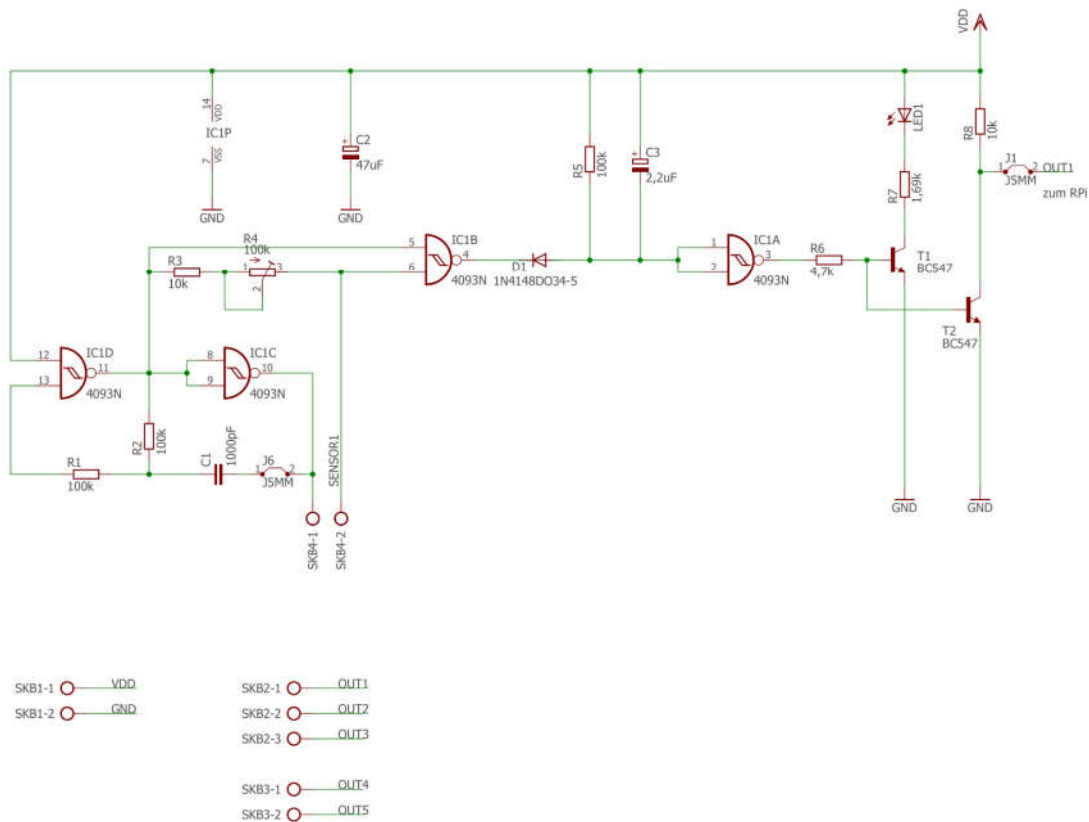


Abbildung 48: Ausschnitt der Füllstandsüberwachungsschaltung

Boilerbezeichnung	Bezeichnung Platinenanschluss	Länge (ab der Biegung)
Dampfboiler min.	FS1	140 mm (148 mm → max. Länge)
Dampfboiler max.	FS2	100 mm
Vorwärmboiler	FS3	115 mm
Hauptbrühboiler 1	FS4	50 mm
Hauptbrühboiler 2	FS5	50 mm (Vorbereitung)

Tabelle 28: Länge der Niveausonden

### 3.4.6 Relaisplatine

Es wird eine separate Trägerplatte gefertigt, an der alle Relais befestigt werden können. Dabei kommen Solid-State-Relais (SSR) von *Pollin* mit der Modellnummer *XSSR-DA2420* zum Einsatz. Mit ihnen können Spannungen bis zu 230 V und Ströme bis zu 20 A geschaltet werden. Somit sind sie für sämtliche daran angeschlossene Verbraucher ausreichend dimensioniert. Zur Absicherung des Schaltstroms der SSRs werden in den Leitungen Sicherungen integriert. Laut Datenblatt sollen diese innerhalb von 10  $\mu$ s auslösen und so ausgelegt werden, dass sie beim 1,2- bis 1,5-fachen des Laststroms auslösen. In Anhang 11.3 befindet sich der Schaltplan, aus dem die Verdrahtung mit der in Abschnitt 3.4.4 beschriebenen Ausgangsexpanderplatine ersichtlich wird. Die Zeichnung einer möglichen Trägerplatte, die im Gerüst untergebracht werden kann, ist in Anhang 11.4 hinterlegt. Tabelle 29 zeigt eine Übersicht der Relais sowie den zugehörigen angesteuerten Verbraucher (vgl. Abbildung 42).

Relais-Nr.:	Verbraucher	Kurzzeichen
R1	3-Wege-Ventil Abzweigung	V1
R2	3-Wege-Ventil BG 1	V2
R3	3-Wege-Ventil BG 2	V3
R4	2-Wege-Ventil Bezug Heißwasser	V4
R5	2-Wege-Ventil Bezug Dampf	V5
R6	Heizung Dampfboiler	H1
R7	Heizung Vorwärmboiler	H2
R8	Heizung Hauptbrühboiler BG1	H3
R9	Heizung Hauptbrühboiler BG2	H4
R10	Pumpenmotor (ungeregelt)	M

Tabelle 29: Übersicht der Relais und der zugehörigen Verbraucher

### 3.4.7 Steuern und Regeln

Dieses Kapitel muss in weiterführenden wissenschaftlichen Arbeiten an der labortechnischen Espressoemaschine behandelt werden.

### 3.4.8 Herstellung der Platinen

Für die labortechnische Espressomaschine werden mehrere Platinen-Prototypen hergestellt: Platinen für die stabilisierte sowie für die symmetrische Spannungsversorgung, drei Messplatinen und eine Füllstandsplatine. Dazu wird das sogenannte Tonertransferverfahren genutzt, das die Herstellung einer Prototypplatine innerhalb kurzer Zeit ermöglicht. Im Folgenden wird auf den grundsätzlichen Ablauf dieses Verfahrens eingegangen.

Zunächst wird mithilfe der Entwurfssoftware *Eagle* von *Autodesk* der elektronische Schaltplan der Platinen erstellt, aus dem anschließend ein Layout generiert wird. Dabei werden die elektronischen Bauteile der Schaltung sinnvoll angeordnet und mit Leiterbahnen verbunden. Es muss neben einer gemeinsamen Massefläche darauf geachtet werden, dass die Verbindungen der Bauelemente möglichst kurze Wege aufweisen. Um den Fertigungsaufwand gering zu halten, wird ein einlagiges Layout angestrebt.

Nachdem das Layout der jeweiligen Platine erstellt ist, kann es über einen Laserdrucker ausgedruckt werden. Dafür werden in *Eagle* nur Ebenen eingeblendet, die das Negativ der Leiterbahnen bilden.

Die Rohplatinen werden in etwa auf das Zielmaß der zu fertigenden Platine zugeschnitten.

Anschließend wird die kupferne Oberfläche mit Stahlwolle abgeschliffen und mit Aceton gereinigt und entfettet.

Der Ausdruck auf dünnem Papier mit glatter Oberfläche wird nun auf die Größe der zu fertigenden Platine gebracht, auf dieser ausgerichtet und mit Klebeband fixiert. Anschließend wird der Toner beispielsweise mit einem Bügeleisen so lange erhitzt, bis er sich verflüssigt und mit der Kupferseite der Platine verbindet. Sobald die Platine abgekühlt ist, wird sie in Wasser eingelegt, das die Papierschicht aufweicht. Diese Schicht kann anschließend vorsichtig von der Platine entfernt werden (vgl. Abbildung 49).





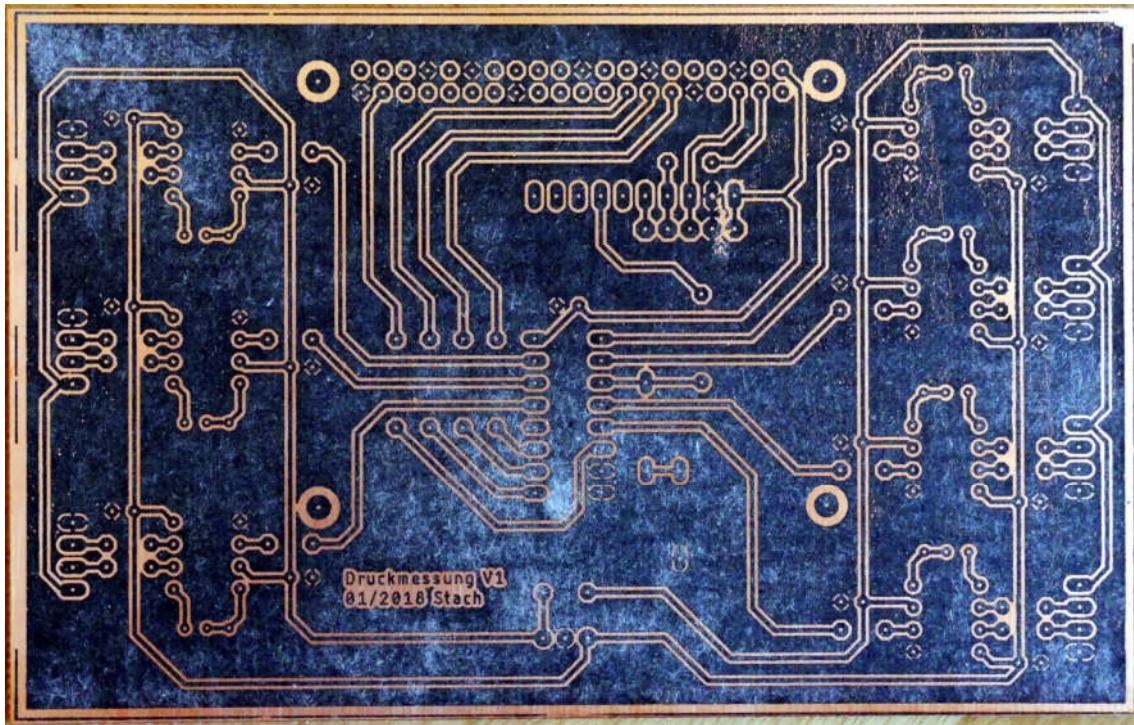


Abbildung 49: Toner auf der Rohplatine nach dem Transfer

Nachdem auf diese Weise der Toner auf die Rohplatine übertragen wurde, wird sie in eine Ätzlösung aus Wasser und Natriumpersulfat gelegt. Natriumpersulfat wirkt als Oxidationsmittel und eignet sich wegen seiner geringen Unterätzung zum Herstellen sehr feiner Leiterbahnen [Riss12]. Nach circa 15 Minuten kann die Platine aus der Lösung entnommen werden: Alle nicht tonergeschützten Bereiche der Kupferschicht haben sich aufgelöst. Anschließend werden sämtliche Löcher gebohrt, die zur Bestückung mit Bauelementen benötigt werden (vgl. Abbildung 50).

Nun kann die Vorderseite der Platine mit einem Bestückungsdruck versehen werden (vgl. Abbildung 51). Dazu wird der Toner auf die Oberfläche transferiert, wie oben beschrieben. Nach dem Entfernen des Trägerpapiers ist keine erneute Ätzung mehr durchzuführen.

Abschließend wird die Platine mit ihren elektronischen Bauteilen bestückt und verlötet.

Dokumentarische Fotos zu den gefertigten Platinen finden sich in den zugehörigen Abschnitten.

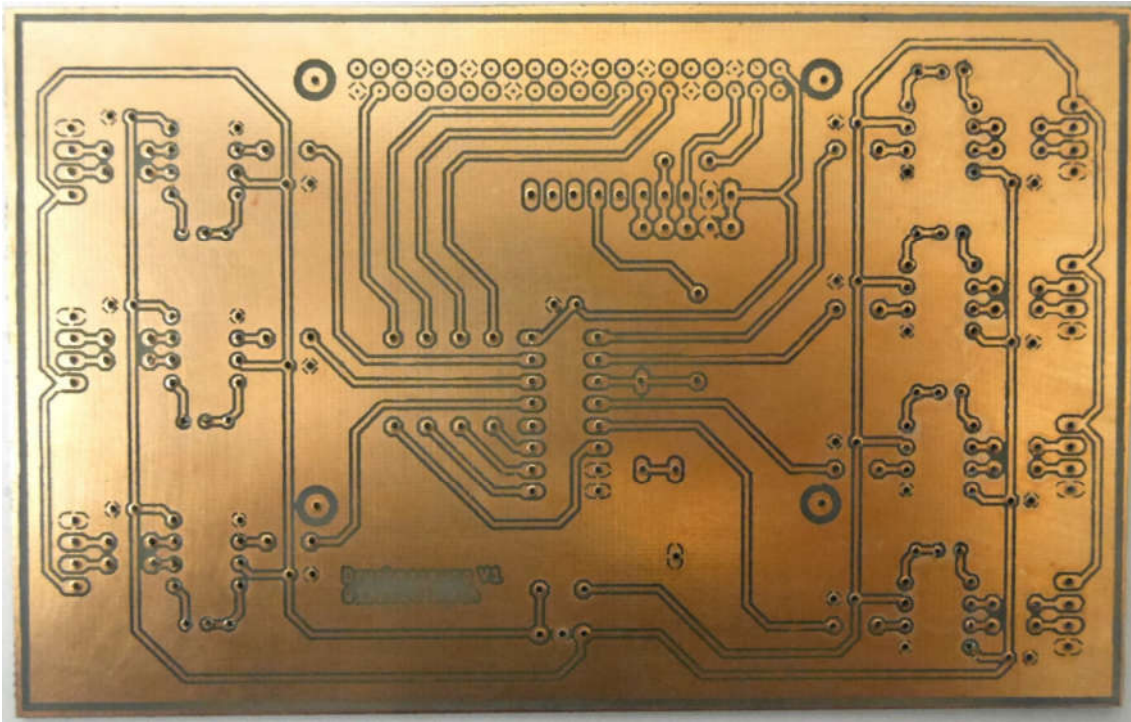


Abbildung 50: Platine nach dem Ätzen und Bohren

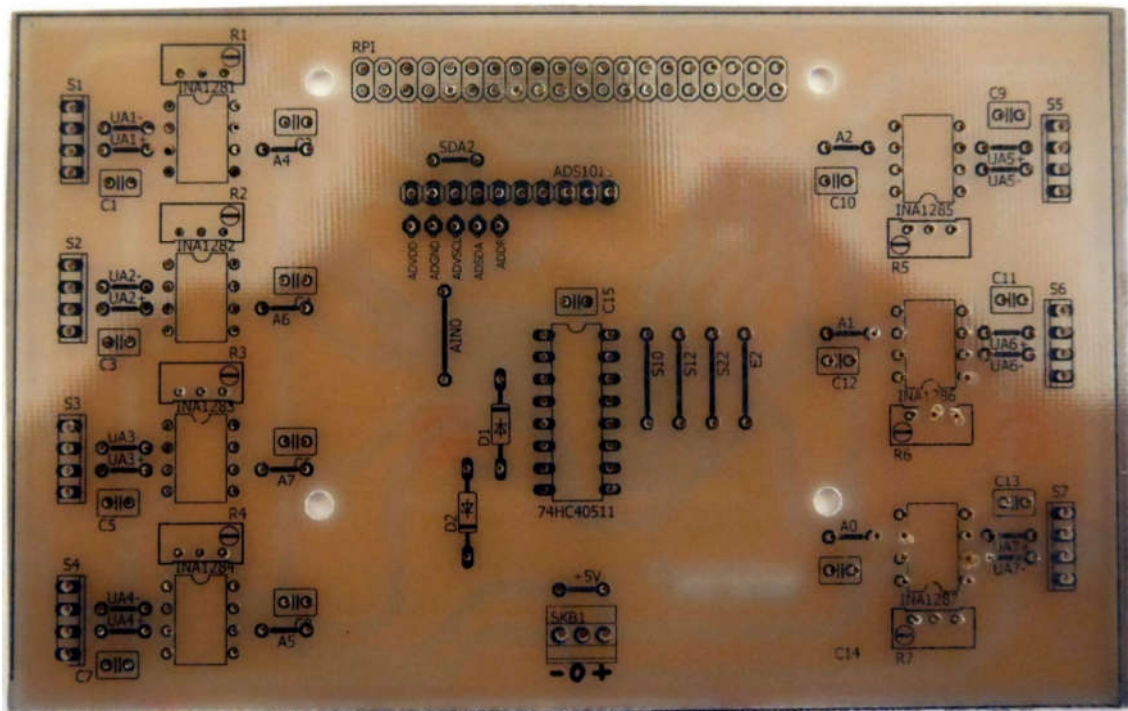


Abbildung 51: Bestückungsdruck eines Platinenprototyps



#### 4 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Diese Kapitelüberschrift dient als Platzhalter für zukünftige Untersuchungen zur Beeinflussung des Espressogeschmacks an der labortechnischen Espressoemaschine und wird somit Teil weiterführender wissenschaftlicher Arbeiten sein.

#### 5 Ergebnisse

Diese Kapitelüberschrift dient als Platzhalter für zukünftige Untersuchungen zur Beeinflussung des Espressogeschmacks an der labortechnischen Espressoemaschine und wird somit Teil weiterführender wissenschaftlicher Arbeiten sein.

#### 6 Interpretation

Diese Kapitelüberschrift dient als Platzhalter für zukünftige Untersuchungen zur Beeinflussung des Espressogeschmacks an der labortechnischen Espressoemaschine und wird somit Teil weiterführender wissenschaftlicher Arbeiten sein.

## 7 Ausblick



Im Rahmen dieser Arbeit ist der Hardware-Prototyp einer labortechnischen Siebträger-Espressomaschine entstanden. Da das Endprodukt jedoch eine marktreife Maschine für anspruchsvolle Kunden sein soll, gibt es Optimierungen und ergänzende Arbeiten, die noch ausgeführt werden müssen. Dies würde den Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit jedoch übersteigen.

Den umfangreichsten Teil wird voraussichtlich die Programmierung der Maschine darstellen. Sämtliche Aufgaben, die über die Software gelöst werden, wie die Regelung der Temperaturen und Drücke, die Auswertung der Messungen, die Abfrage von Eingangssignalen, die Ansteuerung elektronischer Komponenten (Heizungen, Ventile, etc.) oder die Anpassung der Kennlinien der Messketten, gilt es zu programmieren.


Um die Siebträger-Espressomaschine für den potentiellen Käufer auch äußerlich ansprechend zu gestalten, wird zudem eine Anpassungskonstruktion des Grundgerüsts sowie der Verkleidungen vorzunehmen sein. Diese sollten aus möglichst wenigen Einzelteilen hergestellt werden, ohne dabei designtechnische Aspekte außer Acht zu lassen. Nach der Konstruktion muss ein Lieferant ausfindig gemacht werden, der diese Bauteile wirtschaftlich herstellen kann.

Beim vorliegenden Prototyp befindet sich der Großteil der Elektronik auf einer separaten Befestigungsplatte außerhalb der Maschine. In der Serienmaschine soll jedoch die gesamte Elektronik innerhalb der Maschine untergebracht werden. Dafür ist ein eigenes Elektronikgehäuse zu konstruieren, das an einem thermisch günstigen Platz angebracht wird.

Da bei der Konstruktion aller Boiler nicht auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden konnte, der Schutz der Anwender jedoch gegeben sein muss, wurden die Kessel mit einer hohen Sicherheit versehen. Die gefertigten Boiler müssen in nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten auf tatsächlich auftretende Drücke hin untersucht werden, um die Materialstärken anschließend entsprechend anpassen zu können.


Alle im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Platinen sind lediglich als erster Entwurf anzusehen. Sie müssen sich nun im Dauerbetrieb bewähren und gegebenenfalls schaltungstechnisch optimiert werden. Da die aktuellen Versionen mit bedrahteten Bauelementen bestückt sind, empfiehlt sich für die Serienproduktion zudem eine Abänderung des Layouts auf den Einsatz von oberflächenmontierten Bauelementen (SMD). Mit diesen Bauteilen wird eine wesentlich kompaktere Baugröße der Platinen erzielt und der Fertigungsaufwand sowie die -kosten können minimiert werden.

Damit in der Espressomaschine nicht nur die Temperatur, sondern auch der Druck geregelt werden kann, sind an dieser Stelle zwei Optionen zur Druckregelung vorgeschlagen, die weiter

ausdifferenziert werden müssen: Zum einen könnte vor den Brühgruppen ein Druckregelventil installiert werden, über das sich mittels Pulsweitenmodulation der Durchflussquerschnitt des Ventils variieren ließe. Dazu muss ein geeignetes Ventil auf dem Markt gefunden und für den hier benötigten Einsatzzweck getestet werden. Zum anderen ist es denkbar die Motordrehzahl des Pumpenmotors zu regeln, beispielsweise über einen Frequenzumrichter. 

Bei der Konzeptionierung und Konstruktion des Prototyps einer labortechnischen Espressomaschine wurden alle notwendigen Maßnahmen zur Erweiterung um eine zweite Brühgruppe vorgesehen, die jedoch noch final bestimmt und daraufhin integriert werden muss.

In weiterführenden wissenschaftlichen Untersuchungen kann schließlich der Einfluss der Parameter Temperatur, Druck und Masse auf den Geschmack des erzeugten Espressos vorgenommen werden. Da jede Person eine unterschiedliche Geschmackswahrnehmung hat, könnte eine möglichst objektive Einschätzung des erzeugten Getränks über repräsentative Testreihen vorgenommen werden. Vorstellbar wäre auch ein Geschmackstest über eine Analyse der chemischen Zusammensetzung des Espressos.

Sämtliche in der vorliegenden Ausarbeitung hergestellten Platinen sowie der *Raspberry Pi* werden mit Kleinspannungen ( $\leq 120$  V) betrieben, die in normalen Anwendungsfällen nicht lebensbedrohlich sind. Alle Komponenten, die in die Schutzklasse I (230 V-Wechselspannung) fallen, müssen künftig von qualifiziertem und geschultem Fachpersonal verkabelt werden. 

Um dem potentiellen Kunden die Bedienung zu erleichtern, könnte die Maschine um einen berührungssensitiven Bildschirm erweitert werden. Auch die Entwicklung einer Anwendungssoftware zur Steuerung der Maschine über Smartphones ist vorstellbar.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass es bei der Entwicklung vom ersten Prototyp bis hin zu einer verkaufsfähigen Maschine eine Vielzahl an Aspekten zu bedenken und bewältigen gilt. Daher ist es sinnvoll und notwendig, Fachkräfte aus unterschiedlichsten Bereichen zusammenarbeiten zu lassen: Maschinenbau- und Elektroingenieure, Informatiker, Designer und Betriebswirte, die ihr jeweiliges Expertenwissen bestmöglich einbringen können.

## 8 Abgeleitete To-do-Liste

Im Folgenden wird stichpunktartig aufgezeigt, welche Aufgaben zukünftig noch durchzuführen sind.

Hier werden Themen aus dem Ausblick teilweise um zusätzliche Aspekte ergänzt.

- Programmierung eines Betriebssystems für die labortechnische Siebträger-Espressomaschine (Muss):
  - Regelung für Temperatur und Druck
  - Komponentensteuerung und -abfrage
  - Sicherheitsüberwachung der Boiler bezüglich des Drucks
  - Automatisierte Kalibrierroutinen für die Messketten
- Fertigung und Montage (Muss)
- Anpassungskonstruktion und Design des Gerüsts sowie der Verkleidung (Muss)
- Materialoptimierung der Kessel in Bezug auf die Anwendung (optional)
- Optimierung der Platinen für die spätere Serienfertigung (Muss):
  - Neues Layout für die SMD-Bestückung und gegebenenfalls eine Aufteilung der analogen und digitalen Masse
  - Bauteiloptimierung
  - Reduzierung von Verlustleistungen
- Anpassung der Relais auf Leistungsaufnahme
- Bestimmung der Druckregelung und dessen Steuerung (Muss)
- Auswahl der zweiten Brühgruppe und deren Integration in die Maschine (Muss)
- Geschmacksanalyse und -optimierung über repräsentative Testreihen (Muss)
- Verkabelung der unter Schutzklasse I fallenden Komponenten und zusätzliche Absicherung über (Fein-) Sicherungen (Muss)
- Änderung der Spannungsversorgung auf Dreiphasenwechselstrom aufgrund des Leistungsbedarfs bei Vollast aller Heizelemente (Muss) oder Lösung über eine reduzierte Heizleistung (optional)
- Entwicklung einer Steuerung über eine Smartphone-App (optional)
- Überprüfung der EMV-Sicherheit (Muss)
- Einfluss der Modifizierung des Siebträgers auf den Espressobezug (optional)
- Definition eines neuen AD-Wandlers für einen größeren Auflösungsbereich (optional)
- Erstellung eines Simulationsmodells (Muss)
- Kostenoptimierung und Auswahl von Lieferanten für die Serienproduktion (optional)

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mechanisches Grundgerüst der espressomaschine .....	4
Abbildung 2: Schematische Übersicht über das Prinzip einer zweikreisigen espressomaschine .....	5
Abbildung 3: Übersicht des hydraulischen Gesamtkonzepts.....	6
Abbildung 4: Messkette der espressomaschine.....	11
Abbildung 5: CAD-Modell der labortechnischen siebträger-espressomaschine .....	17
Abbildung 6: Mechanisches Grundgerüst der labortechnischen espressomaschine .....	18
Abbildung 7: Externes Gerüst für die elektronischen Komponenten (Vorderansicht) .....	19
Abbildung 8: Externes Gerüst für die elektronischen Komponenten (Rückansicht).....	20
Abbildung 9: Auf einen balken reduziertes deckelelement.....	24
Abbildung 10: Freischnitt von Abbildung 1 .....	24
Abbildung 11: Freischnitt eines halben deckels.....	25
Abbildung 12: von-Miseses-Spannungen bei einer Belastung von 24 bar .....	27
Abbildung 13: von-Miseses-Spannungen im deckel und mantel des boilers.....	28
Abbildung 14: Smith-Diagramm für 1.4571 .....	29
Abbildung 15: Schnittzeichnung der E61-Brühgruppe mit den nötigen Modifikationen.....	32
Abbildung 16: Modifizierte Schraube für die Temperaturmessung in der Brühgruppe .....	33
Abbildung 17: Modifikation des siebträgers.....	33
Abbildung 18: Verschaltung Multiplexer und AD-Wandler der Messkette .....	38
Abbildung 19: Vollbrückenschaltung für die Temperaturmessung.....	39
Abbildung 20: Bestückter Prototyp der Temperaturmessplatine .....	40
Abbildung 21: Temperatur-Widerstandskurve für das Widerstandsthermometer Pt-100 .....	41
Abbildung 22: Temperatur-Spannungskurve Pt-100 im Messbereich mit Verstärkung .....	43
Abbildung 23: Ausschnitt der Temperaturmessplatine Pt-100.....	43
Abbildung 24: Temperatur-Widerstandskurve für den NTC-Temperatursensor 1K2A1B .....	45
Abbildung 25: Temperatur-Spannungskurve NTC-1K2A1 im Messbereich mit Verstärkung.....	46
Abbildung 26: Temperatur-Widerstandskurve für den Temperatursensor TS-NTC-833 .....	47
Abbildung 27: Temperatur-Spannungskurve TS-NTC-833 im Messbereich mit Verstärkung.....	48
Abbildung 28: Zusammenbau der Druckmesseinrichtung aus Gehäuse und Sensor.....	49
Abbildung 29: Bestückter Prototyp der Druckmessplatine.....	50
Abbildung 30: Ausschnitt der Druckmessplatine für den ersten Keramiksensor.....	51
Abbildung 31: Vergleichsstelle für die Drucksensoren.....	52
Abbildung 32: Exemplarische Druck-Spannungskurve des ersten Keramiksensors.....	53
Abbildung 33: Übersicht der Wägeeinheit.....	55
Abbildung 34: Abmessungen der Tassenauflage .....	55

Abbildung 35: Freischnitt der Tassenauflage in y-z-Richtung .....	57
Abbildung 36: Abmessungen der Wägezelle mit montierter Wägeplatte .....	58
Abbildung 37: Freischnitt der Wägezelle .....	58
Abbildung 38: Lagerung der Tassenauflage .....	59
Abbildung 39: Freischnitt der Tassenauflage in x-z-Richtung .....	60
Abbildung 40: Bestückter Prototyp der Gewichtsmessplatine .....	61
Abbildung 41: Schaltplanausschnitt der Wägezelle .....	63
Abbildung 42: Übersichtsschaltplan der labortechnischen espressomaschine .....	64
Abbildung 43: Schaltplan der stabilisierten Spannungsversorgung .....	67
Abbildung 44: Schaltplan der symmetrischen Spannungsversorgung .....	68
Abbildung 45: Schaltplan der Expanderplatine für die Eingänge .....	70
Abbildung 46: Schaltplan der Expanderplatine für die Ausgänge .....	71
Abbildung 47: Bestückter Prototyp der Füllstandüberwachungsplatine .....	72
Abbildung 48: Ausschnitt der Füllstandsüberwachungsschaltung .....	73
Abbildung 49: Toner auf der Rohplatine nach dem Transfer .....	76
Abbildung 50: Platine nach dem Ätzen und Bohren .....	77
Abbildung 51: Bestückungsdruck eines Platinenprototyps .....	77

## 10 Literaturverzeichnis

- [ADS1015] Texas Instruments: Ultra-Small, Low-Power, 12-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference. ADS1013, ADS1014, ADS1015.  
<http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/ads1015.pdf>, zuletzt aufgerufen am 05.02.2018.
- [Conr97] Conrad Electronic GmbH: Füllstandsschalter. Best.-Nr.: 19 57 31.  
<http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/195731-as-02-de-Fuellstandsschalter.pdf>, zuletzt aufgerufen am 02.01.2018.
- [DGRL] Europäisches Parlament: RICHTLINIE 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt. <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/68/oj>, zuletzt aufgerufen am 05.02.2018.
- [DIN4108] DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Beuth Verlag, 2013.
- [DIN60529] DIN EN 60529 VDE 0470-1:2014-09: Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code). VDE Verlag, 2014.
- [DIN60751] DIN EN 60751 (IEC 60751:2008): Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren. Beuth Verlag, 2009.
- [DIN61140] DIN EN 61140 VDE 0140-1:2016-11: Schutz gegen elektrischen Schlag - Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel. VDE Verlag, 2016.
- [Dobr10] Dobrinski, P.; Krakau, G.; Vogel, A.: Physik für Ingenieure. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [ECM] Espresso Coffee Machines Manufacture GmbH: Controvento Due. Bedienungsanleitung. [https://www.ecm.de/fileadmin/manual/BA\\_ECM\\_Controvento\\_Due\\_03.2015.pdf](https://www.ecm.de/fileadmin/manual/BA_ECM_Controvento_Due_03.2015.pdf), zuletzt aufgerufen am 04.02.2018.
- [Gall03] Gallop, M.: Application Note AN2429/D. Interfacing to the HCS12 ATD Module. <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2429.pdf>, zuletzt aufgerufen am 06.01.2018.
- [Heri18] Hering, E.; Schönfelder, G. Hrsg.: Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018.
- [INA] Texas Instruments: INA12x Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina128.pdf>, zuletzt aufgerufen am 04.02.2018.

- [INEI06] Istituto Nazionale Espresso Italiano: The Certified Italian Espresso and Cappuccino. [http://www.espressoitaliano.org/files/File/istituzionale\\_inei\\_hq\\_en.pdf](http://www.espressoitaliano.org/files/File/istituzionale_inei_hq_en.pdf), zuletzt aufgerufen am 19.11.2017.
- [Kaff08] KaffeeWiki Autoren: Rotationspumpe. <https://www.kaffeewiki.de/index.php?title=Rotationspumpe&oldid=7371>, zuletzt aufgerufen am 08.01.2018.
- [Kaff16] KaffeeWiki Autoren: Dualboilermaschinen. Liste der Dualboilermaschinen. <https://www.kaffeewiki.de/index.php?title=Kategorie: Dualboilermaschinen&oldid=25963>, zuletzt aufgerufen am 08.01.2018.
- [Koch89] Kochsiek, M.: Handbuch des Wägens. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, s.l., 1989.
- [Kram02] Kramer, C.: 1. Praxishandbuch Thermoprozess-Technik. Grundlagen - Verfahren // Praxishandbuch Thermoprozess-Technik. Vulkan-Verlag GmbH, Essen, 2002.
- [Küpp17] Küpper, T.: Festspannungsnetzteil TK02/2014  $\pm 12$  V, 250 mA. Email vom 05.11.2017.
- [Lang17] Langeheinecke, K. et al.: Thermodynamik für Ingenieure. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [LT1085] Linear Technology Corporation: LT1083/LT1084/LT1085. 7.5A, 5A, 3A Low Dropout Positive Adjustable Regulators. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/108345fh.pdf>, zuletzt aufgerufen am 06.01.2018.
- [MCP23017] Microchip Technology Inc.: MCP23017/MCP23S17. 16-Bit I/O Expander with Serial Interface. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001952C.pdf>, zuletzt aufgerufen am 28.12.2017.
- [Mori84] Moriondo, A.: Nuovi apparecchi a vapore per la confezione economica ed istantanea del caffè in bevanda. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Espresso-machine-first-patent-angelo-moriondo.jpg&oldid=266132951>, zuletzt aufgerufen am 03.02.2018.
- [MUX] Texas Instruments: CDx4HC405x, CDx4HCT405x High-Speed CMOS Logic Analog Multiplexers and Demultiplexers. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4051.pdf>, zuletzt aufgerufen am 12.01.2018.
- [Niem01] Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: Maschinenelemente. Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. Springer Fachmedien, Berlin, 2001.
- [Part16] Parthier, R.: Messtechnik. Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2016.



- [Pref14] Prefontaine, J. C.: System, method and apparatus for regulating flow rate in an espresso machine WO2015031828 (A1), WO2014US53536 20140829. USA, 2014.
- [Rich17] Richter, I.; Bauer, M.; Steinke, T.: Die große Kaffee-Bibel. Christian Verlag, München, 2017.
- [Riss12] Risse, A.: Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [RM1] Wittel, H. et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [RM2] Wittel, H. et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Tabellenbuch. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [RM3] Wittel, H. et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Formelsammlung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [Schn1] Schnabel, P.: Raspberry Pi: GPIO mit Pullup- oder Pulldown-Widerstand beschalten? <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/raspberry-pi/2006051.htm>, zuletzt aufgerufen am 02.01.2018.
- [Schn2] Schnabel, P.: Raspberry Pi: Grundlagen der Energieversorgung/ Stromversorgung. <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/raspberry-pi/1912111.htm>, zuletzt aufgerufen am 31.12.2017.
- [Serie GS] La Marzocco Deutschland: Die Geschichte von La Marzocco. <http://de.lamarzocco.com/de/die-geschichte/>, zuletzt aufgerufen am 30.01.2018.
- [Stin15] Stiny, L.: Passive elektronische Bauelemente. Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [Strada EP] La Marzocco Deutschland a division of La Marzocco International LLC: Strada EP - für und von Baristas. <http://international.lamarzocco.com/de/strada-ep-de/>, zuletzt aufgerufen am 30.01.2018.
- [Tsan12] Tsantidis, D.; Dorn, U.: Faszination Espressomaschine. Franzis Verlag, Haar, 2012.
- [ULN] Texas Instruments: ULN2803A Darlington Transistor Arrays. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2803a.pdf>, zuletzt aufgerufen am 01.02.2018.
- [Vale58] Valente, E.: Pumpenanlage für Kaffeemaschinen AT218687 (B), AT19580008545 19581210. Österreich, 1958.

### **Erklärung zur Abschlussarbeit**

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

---








München, 06.02.2018

## 11 Anhang






















Aufgrund des umfangreichen Datenmaterials, das zur Ausarbeitung der vorliegenden Arbeit benötigt wurde, wird der Anhang größtenteils in digitaler Form vorgelegt. Darüber hinaus stehen CAD-Modelle, Layouts und Schaltpläne somit gleichzeitig zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung.

In den folgenden Abschnitten wird die digitale Ordnerstruktur mit ihren Inhalten bildlich dargestellt, um eine verständliche Handhabung zu gewährleisten. Einzelne wichtige Dokumente sind zusätzlich in analoger Form beigelegt.


























### 11.1 Allgemeines

Allgemeines	
	Druckprüfung der Boiler.pdf
	Messstellenplan espressomaschine.xlsx
	Übersicht digitale Ausgänge.xlsx
	Übersicht digitale Eingänge.xlsx
	Zusammenfassung Druck.xlsx
	Zusammenfassung Gewicht-Spannungsku...
	Zusammenfassung Temperatur-Spannun...


















### 11.2 Datenblätter

Elektronische Bauelemente	Hydraulik
 179272-da-01-en-SPANNUNGSREGLER_IC_L7905...	 CEME5252.pdf
 adafruit-4-channel-adc-breakouts.pdf	 Rotationspumpe.pdf
 ads1015.pdf	
 cd4051b.pdf	
 Comatec TBD2018.12F4_12VAC_1.5A_18 W .pdf	
 Fuellstandsschalter.pdf	
 ina128.pdf	
 LT1085.pdf	
 MCP23017.pdf	
 Netzteil MDR-60-12 12VDC 5A.pdf	
 SPANNUNGSREGLER_L78S05CV_TO220__STM.pdf	
 SSR XSSR-DA2420.PDF	
 uln2803a.pdf	
	<b>Messtechnik</b>
	 Datenblatt_Keramischer_Drucksensor_rel...
	 ENG_DS_Series_V_Thermistor_1K2A1_A.pdf
	 Kabelfuehler Pt100.pdf
	 Plattform_Waagezelle_H10A.pdf
	 Praezisionstemperatursensor_TS-NTC-83...
	 Pt-100.pdf












### 11.3 Eagle Files und Stromlaufpläne

Eagle Files	Stromlaufpläne als PDF
 Druckmessplatine.brd	 Druckmessplatine.pdf
 Druckmessplatine.sch	 Füllstandstandsüberwachung.pdf
 Füllstand.brd	 I2C-Expander Ausgänge.pdf
 Füllstand.sch	 I2C-Expander Eingänge.pdf
 I2C-Expander Ausgänge.sch	 Kraftmessplatine.pdf
 I2C-Expander Eingänge.sch	 Relaisplatine.pdf
 Kraftmessplatine.brd	 stabilisierte Spannungsversorgung +5V.p...
 Kraftmessplatine.sch	 Symmetrische Spannungsversorgung.pdf
 Relaisplatine.sch	 Temperaturmessplatine.pdf
 stabilisierte Spannungsversorgung +5V.b...	 Übersichtsschaltplan.pdf
 stabilisierte Spannungsversorgung +5V.sch	
 Symmetrische Spannungsversorgung.brd	
 Symmetrische Spannungsversorgung.sch	
 Temperaturmessplatine.brd	
 Temperaturmessplatine.sch	
 Übersichtsschaltplan.sch	




### 11.4 Fertigung

Fertigungszeichnungen	Montagezeichnung
 Abstandsplatte 27x27.pdf	 Gesamtaufbau Espressomaschine.pdf
 Auffangschale Halteblech.pdf	
 Auffangschale_Frontblech.pdf	
 AuffangschaleV1.pdf	
 Aufnahme DS.pdf	
 Dampfboiler_montiert.pdf	
 Frontplatte.pdf	
 Füße_Tanks.pdf	
 Grundplatte Platinenhalter.pdf	
 Hauptbrühboiler_montiert.pdf	
 Kalibrieradapter Drucksensor_V2.pdf	
 Lagerung Tassenauflage.pdf	
 Tassenablage.pdf	
 Verschlussdeckel DS.pdf	
 Vorbrühboiler_montiert.pdf	
 Wägeplatte H10A.pdf	

## 11.5 Stücklisten

Stücklisten	
	Druckmessplatine.txt
	Füllstandsüberwachungsplatine.txt
	Gerüst el. Komponenten.pdf
	Gewichtsmessplatine.txt
	I2C-Expander Ausgänge.txt
	I2C-Expander Eingänge.txt
	Labortechnische espressomaschine.pdf
	Relaisplatine.txt
	Stabilisierte Spannungsversorgung +5V.txt
	Symmetrische Spannungsversorgung.txt
	Temperaturmessplatine.txt

## 11.6 CAD-Modelle

CAD-Modelle	
	Befestigungsrahmen_Platine (repariert)_6x.stl
	Externes Gerüst el. Komponenten.stp
	Gesamtaufbau espressomaschine.stp