



Vermessung von E61 und nicht-E61 Siebträger  
Espressomaschinen anhand Auswertung und  
Gegenüberstellung der erfassten Parameter mittels des  
entwickelten Mess-Systems

Patricia Viebke

*Surveying E61 and non-E61 portafilter espresso machines through analysis and comparison  
of captured parameters using the developed measurement system*

Masterarbeit  
Master of Applied Research (MAPR)

Erstkorrektur: LbA Armin Rohnen  
Zweitkorrektur: Prof. Dr. Klemens Graf

Abgabe: 27.September 2024

## ABSTRACT

Die Masterarbeit beschreibt den Ablauf der Prüfung des Mess-Systems über die Zeit und zeigt Ergebnisse erster Messwerte auf. Es wird ein Mess-System eingesetzt, welches das Aufheizverhalten und die Kaffeebezüge von E61 und nicht-E61 Siebträgerespressomaschinen erfassen kann. Es werden Temperaturen, Druck, Durchflussrate und die Kaffeeauslaufmenge als relevante Aufzeichnungsparameter definiert. Für die Validierung des Mess-Systems werden unterschiedliche Maschinen in angefragten Kaffeeröstereien vermessen, mit dem Hauptfokus auf die Dalla Corte Mina. Diese Maschine hat das Digmesa Nano Brass Flowmeter verbaut, welches mit dem Mess-System kompatibel ist. Für den Vergleich von Kaffeemaschinen ist es notwendig den Messprozess für das Aufheizen und für die Kaffeebezüge zu definieren. Der Messprozess von nE61-Maschinen benötigt Vorbereitung durch die Fertigung von individuellem Messequipment in Form eines Kunststoffeinsatzes. Die Fertigung wird über das 3D-Druck Verfahren gefertigt. Die Messreihe zeichnet sich durch ihre Vielseitigkeit aus, indem sowohl das Ursprungsmodell Faema E61 als auch neuere E61-Modelle wie Profitec und ECM sowie Maschinen ohne E61-Brühgruppe vermessen werden. Für die Auswertung wird mithilfe von MATLAB Live-Skripten für jede Brühgruppenart ein individuelles Aufbereitungsskript entwickelt, das eine klare Übersicht und eine gezielte Interpretation der Ergebnisse ermöglicht. Durch die Unterteilung der Maschinen in drei Kategorien ist ein Vergleich innerhalb dieser möglich. Anschließend werden weitere Analysen auf Signalebene durchgeführt. Die Signalqualität wird anhand der Signal-Noise-Ratio bewertet und dient als Grundlage weiterer Analysen. Das positive Ergebnis lässt die Durchführung von Frequenzanalysen zu, die im Signal auftretende Schwingungen untersuchen. Die Frequenzen werden im Signal vor dem Kaffepuck analysiert, um einen Vergleich zwischen E61 und nE61 Signalen herzustellen. Während der Vermessungsreihe sind Optimierungsmaßnahmen in Software, Hardware, Elektronik und Analysen festzustellen. Die Verwendung des Mess-Systems im aktuellen Zustand ist weiterhin möglich, es werden jedoch Empfehlungen für die Umsetzung der Optimierungen formuliert.

*The master's thesis outlines the process of evaluating the measurement system over time and presents initial measurement results. A measurement system is employed that can capture the heating behavior and coffee extractions of E61 and non-E61 portafilter espresso machines. Temperature, pressure, flow rate, and coffee output volume are defined as key recording parameters. For the validation of the measurement system, various machines are tested at selected coffee roasteries, with a primary focus on the Dalla Corte Mina. This machine is equipped with the Digmesa Nano Brass Flowmeter, which is compatible with the measurement system. To compare different coffee machines, it is essential to define the measurement process for both the heating phase and the coffee extractions. The measurement process for non-E61 machines requires preparation through the fabrication of customized measurement equipment, in the form of a plastic insert, produced using 3D printing technology. The measurement series is characterized by its versatility, as it includes the original Faema E61 model, newer E61 models such as Profitec and ECM, as well as machines without an E61 brew group. For data analysis, individual MATLAB Live Scripts are developed for each brew group type, providing a clear overview and facilitating the interpretation of the results. By categorizing the machines into three groups, comparisons within each group are enabled. Subsequently, further signal-level analyses are conducted. The signal quality is assessed based on the signal-to-noise ratio (SNR), which serves as a foundation for additional analyses. The positive results allow for frequency analyses, examining oscillations within the signal. The frequencies are analyzed in the signal before the coffee puck to enable a comparison between E61 and non-E61 signals. Throughout the measurement series, optimization opportunities in software, hardware, electronics, and analysis are identified. While the current state of the measurement system allows for continued use, recommendations for implementing these optimizations are provided.*

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Erklärung
DFR	Durchflussrate IR
Infrarot	
KP	Kaffepuck
nE61	nicht-E61
NTC	Negative Temperature Coefficient
SNR	Signal-Noise-Ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	3
<b>2</b>	<b>Vorgehen der Vermessungsreihe</b>	3
2-A	Aufheizverhalten . . . . .	4
2-B	Kaffeebezüge . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Datenaufbereitung</b>	6
3-A	E61-Maschinen . . . . .	7
3-B	nE61-Maschinen . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Vergleich der Maschinen</b>	10
4-A	Dalla Corte Mina . . . . .	10
4-B	Faema Modelle . . . . .	15
4-C	weitere Maschinen . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Signalanalyse der Messdaten</b>	17
<b>6</b>	<b>Optimierungsmaßnahmen</b>	20
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b>	24
<b>Literatur</b>		26
<b>Anhang</b>		28

## 1. EINLEITUNG

In der modernen Kaffeetechnologie ist die präzise Steuerung und Anpassung von Parametern wie Temperatur, Druck und Durchflussrate entscheidend für die Qualität des Endprodukts. Diese Variablen bestimmen nicht nur den Geschmack, sondern auch die Textur und das Aroma eines Espressos. Wie der Espressomaschinenhersteller Gaggia treffend formulierte: "Für uns bedeutet Kaffee, Technik, Präzision und Leidenschaft zu verbinden, um das beste Ergebnis in die Tasse zu bringen." Trotz der fortschreitenden Entwicklung von Espressomaschinen, bleibt jedoch die Herausforderung bestehen, eine flexible Maschine zu entwickeln, die in der Lage ist, die Vielfalt an Parametern, die von verschiedenen Geräten auf dem Markt verwendet werden, exakt abzubilden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Teil der Entwicklung einer innovativen Espressomaschine mit einem Glasboiler vorgestellt, deren Schwerpunkt auf der Parametrierbarkeit liegt. Das Design dieser Maschine ermöglicht es, eine präzise Steuerung und Konfiguration der wesentlichen Variablen des Brühprozesses zu gewährleisten. Im Gegensatz zu herkömmlichen Maschinen bietet die Glasboiler-Technologie eine verbesserte Sichtbarkeit und Kontrolle über den Aufheizprozess und den Wasserkreislauf. Ziel ist es, eine Espressomaschine zu konstruieren, die nicht nur die technischen Spezifikationen der gängigsten Modelle replizieren kann, sondern auch eine Plattform bietet, um neue Parameter zu testen und weiterzuentwickeln.

Die Parametrierbarkeit der Glasboiler-Maschine steht im Mittelpunkt dieses Projekts. Um diese zu realisieren, werden Daten benötigt, die von anderen auf dem Markt befindlichen Kaffeemaschinen erfasst werden. Diese Informationen sind entscheidend, um die Variablen verschiedener Maschinen korrekt abzubilden und somit eine maximale Flexibilität bei der Konfiguration der neuen Espressomaschine zu gewährleisten. Hierfür wird ein eigens entwickeltes Mess-System eingesetzt, das mit verschiedenen Sensoren ausgestattet ist. Diese Sensoren ermöglichen die präzise Erfassung und Analyse von Schlüsselparametern wie Temperatur, Druck, Durchflussrate und Kaffeeauslaufmenge.

Das entwickelte Mess-System ist darauf ausgelegt, die Betriebsdaten bestehender Espressomaschinen zu erfassen, um diese als Referenz für die Parametrierung der neuen Maschine zu nutzen. Auf diese Weise kann die Glasboiler-Maschine in der Lage sein, die Parameter unterschiedlichster Maschinenmodelle abzubilden und zu optimieren, was zu einer

maßgeschneiderten und verbesserten Kaffeezubereitung führt. Diese Flexibilität und Präzision machen die Maschine zu einem innovativen Werkzeug sowohl für Kaffeeliebhaber als auch für den professionellen Einsatz in der Gastronomie und Forschung.

## 2. VORGEHEN DER VERMESSUNGSREIHE

Mit der Vermessungsreihe wird das entwickelte Mess-System langfristig auf Einsatzbereitschaft und Zuverlässigkeit getestet. Im Hinblick auf die Glasboiler-Espressomaschine werden Messdaten ausgewählter Maschinen benötigt, um die Entwicklung voranzuschreiten. Aus der Vermessungsreihe ergeben sich somit das Ziel der Validierung und das Analysieren erster Messdaten.

Für die Umsetzung werden neben der im Labor vorhandener Maschine weitere Exemplare benötigt. Zu diesem Zweck werden Anfragen bei Kaffeeröstereien im Großraum München gestellt, anschließend werden die Röstereien ausgewählt, welche für die Vermessung interessante Siebträgerespressomaschinen zur Verfügung stellen. Die interessanten Siebträgerespressomaschinen umfassen Exemplare mit E61- und nicht E61-Brühgruppe. Eine hohe Resonanz lässt auf ein großes Interesse an der Teilnahme am Projekt schließen. Zeitlich ist es nicht möglich alle angebotenen Kaffeemaschinen zu vermessen, so dass eine Priorisierung und Auswahl getroffen werden muss. Für die Vermessung wird der Fokus auf einige Hersteller gelegt, welche sich bei der Erfassung der Parameter als besonders interessant zeigen. Bei nE61-Maschinen fällt darunter der Hersteller Dalla Corte mit dem Modell Mina. Hier besteht die Besonderheit der Programmierbarkeit des Kaffeebezugs anhand des benutzerdefinierten Flowprofils. Pro Vermessung wird die Standardeinstellung der jeweiligen Rösterei verwendet. Hier wird erkenntlich, inwieweit sich die Parametrierbarkeit in den tatsächlichen Messwerten widerspiegelt. Die Relevanz der Vermessung von Dalla Corte Mina zeigt sich in Tabelle I durch vier Standorte als besonders hoch. Neben nE61-Maschinen werden Siebträgerespressomaschinen mit einer E61-Brühgruppe vermessen. Bei Kaffeemaschinen mit einer E61-Brühgruppe wird der Fokus auf den Hersteller Faema gelegt. Die erste E61-Brühgruppe wird von Faema entwickelt und dient im Vergleich zu moderneren Ausführungen als Urmodell. Die Profitec P700, ECM Synchronika und Bezzera Unica stellen weiterentwickelte E61-Brühgruppen in modernerer

Tabelle I: Übersicht der Röstereien mit Maschinen

Modell	E61?	Sieb Durchmesser	Standort	Heat-Up	Shots
Dalla Corte Mina	nein	54 mm	Kaffeewerkstatt München	x	x
			kaffeeart Augsburg	x	x
			Dinzler Rösterei	x	x
			Rösterei Bohnenschmiede	x	x
Faema E61	ja	E61	caffeleone Holzkirchen		x
Profitec P700			Rößler München	x	x
ECM Synchronika			Dinzler Rösterei	x	x
Bezzera Unica			privat	x	x
Faema Emblema	nein	59 mm		x	x
Gaggia TE	nein	59 mm	Labor	x	

Ausführung dar. Hier wird ein Vergleich über die E61-Modelle angestrebt mit der Erwartung einen Unterschied in den Messwerten, aufgrund der zeitlichen Weiterentwicklung, festzustellen.

Nach Aufnahme der Messwerte besteht die Aufgabe die Daten verständlich aufzubereiten, um weitere Analysen bzw. ein Fazit zu formulieren. Die erste Messung von Espressomaschinen einer Brühgruppenart ist für die Entwicklung einer Aufbereitung vorgesehen. Mit der Aufbereitung müssen die Messwerte verstanden werden, um weitere Analysen anzuwenden. Für die Formulierung eines Fazits ist es wichtig, dass die Struktur des Vermessungsprozess klar definiert ist und umgesetzt wird. Nur bei gleichen Umgebungsbedingungen gelingt ein aussagekräftiger Vergleich der Maschinen und ein Erkenntnisgewinn.

Da es sich bei der Vermessung um Siebträgerespressomaschinen mit unterschiedlicher Brühgruppenausführungen handelt, ist auch der Prozess der Vermessung nicht identisch. Je nach vorliegender Maschine müssen bei der Vorbereitung und während der Vermessung geringfügige Abweichungen berücksichtigt werden. Der Ablauf der Vermessung einer Maschine ist in zwei Teile unterteilt. Zuerst wird, wenn möglich, das Aufheizverhalten der vorliegenden Maschine ermittelt. Da sich die Maschinen in einer Rösterei mit Kundschaft befinden, ist dies nicht immer möglich aufzuzeichnen. Die Tabelle I gibt Auskunft über die durchgeführten Messungen jeder Siebträgerespressomaschine. Mit Heat-Up ist das Aufheizverhalten zu interpretieren, während Shots ein Synonym für Kaffeebezüge ist. Der angestrebte Messablauf umfasst zuerst das Aufzeichnen der Aufheizkurve und anschließend die Erfassung der Parameter während mehrerer Kaffeebezüge.

#### *A. Aufheizverhalten*

Während der Temperaturerfassung beim Aufheizverhalten muss die vorliegende Maschine im Aufbau berücksichtigt werden. Die E61-Maschinen bieten drei interessante Messstellen für die Erfassung der Temperaturen während des Aufheizprozesses an. Es wird präferiert die Temperatur an der Boileroberfläche mit dem Infrarotsensor und die Temperatur in der Brühgruppe mit dem entsprechenden NTC Sensor zu messen. Bei Verwenden des Sensors für die Messstelle  $T_{vorKP}$ , muss die M6-Schraube mit einem Imbusschlüssel durch den eigengefertigten Sensor ausgetauscht werden. Beim Einschrauben des Sensors ist das Verwenden des passenden Dichtrings zu beachten. Es wird empfohlen den Sensor rein über Handkraft einzuschrauben. Die Verwendung von Werkzeugen wie Schraubenschlüssel oder Zange führen zu hohen Anzugsmomenten, die sich in Form eines Bruchs am Gewinde zeigen. Die Temperatur auf der Boileroberfläche über den IR-Sensor ist nicht in allen Fällen möglich, da hierfür die Verkleidung der Maschine demontiert werden muss. Aus dem Grund wird eine alternative Messstelle für den IR-Sensor festgelegt. Statt den IR-Sensor auf den Boiler auszurichten, macht es Sinn die Temperatur der Brühgruppenoberfläche zu erfassen. Hierdurch kann später das Temperaturgefälle an der Brühgruppe von innen nach außen ermittelt werden.

Der IR-Sensor darf nicht direkt auf die Chrom-Oberfläche ausgerichtet werden, da die auftretende Spiegelung die Messwerte und somit die Temperaturen verfälscht. Das Messen tatsächlicher Temperaturen ist durch den Einsatz von mattem Isolierband auf die ausgerichtete Stelle zu realisieren.

Bei einer nE61-Maschine entfällt die Messstelle in Form einer Bohrung an der Brühgruppe. Hier muss eine passende Messstelle für die Erfassung der Aufheizkurve definiert werden. Je nach vorliegender Maschine unterscheidet sich die Messstelle und muss neu definiert werden. Es ist wichtig, dass bei der Vermessung von gleichen Modellen die gleiche Messstelle verwendet wird. Bei nE61-Maschinen wird ausschließlich der IR-Sensor für das Erfassen der Aufheizkurve verwendet. Bei Siebträgerespressomaschinen mit einer nE61-Brühgruppe bietet sich der Messingblock über dem Wasserverteiler als Messstelle an. Hierfür muss der Wasserverteiler und die Dusche demontiert werden.

Nachdem die Sensoren an die jeweilige Stelle der vorliegenden Kaffeemaschine positioniert sind, müssen diese mit dem Mess-System verkabelt werden. Der IR-Sensor kann ohne Weiteres über den 4-poligen Stecker direkt an beschrifteter Stelle mit dem Mess-System angeschlossen werden. Bei erfolgreichem Anschluss leuchtet die Anzeige der Elektronikbox des IR-Sensors auf und die aktuell gemessene Temperatur wird auf dem Display angezeigt. Der Sensor der die Temperatur vor der Brühgruppe an E61-Maschinen misst, ist aufgrund der Eigenfertigung empfindlich im Umgang. Um Beschädigungen und das Risiko der Defektheit zu minimieren wird der Sensor ohne Kabel in die entsprechende Messstelle eingeschraubt. Eine feste Verbindung des NTC-Elements mit dem Kabel führt beim Einschrauben zu Verdrehungen im Kabel, was erhöhte Kräfte auf die Klebeverbindung zum filigranen NTC Element auslöst. Aus dem Grund wird das Kabel zwischen Mess-System und Sensor erst angeschlossen, wenn der Sensor vollständig eingeschraubt ist. Der Sensor wird mit dem Kanal CH02 verbunden, da der ursprünglich zugewiesene Kanal CH01 aufgrund defekter Signalkonditionierung auf der Platine fehlerhafte Messwerte liefert.

Im nächsten Schritt werden der PC und das Mess-System über eine Dreifach-Steckdosenleiste mit Strom versorgt. Das Ethernetkabel vom Mess-System muss mit dem PC verbunden werden, sodass eine Kommunikation untereinander möglich ist. Die zwei LEDs an der Ethernetbuchse des Raspberry Pis bestätigen die aktive SSH-Verbindung zum Laptop. Bevor die Siebträgerespressomaschine eingeschaltet wird, muss die MATLAB GUI geöffnet werden. Die GUI hat die Bezeichnung GUI\_Messsystem\_v2.app. In der GUI müssen die entsprechenden Angaben zur Messung ausgewählt werden. Nach Eingabe des Passworts wird die Messung über den START Button gestartet. Die zu vermessende Siebträgerespressomaschine wird erst bei Veränderung des aktiven Counters in der Statusleiste und graphischer Darstellung der ersten Messwerte eingeschaltet. Der Aufheizprozess wird als vollständig betrachtet, wenn die Aufheizkurve ein Plateau erreicht oder ein alternierendes Verhalten zu erkennen ist. Bei E61-Maschinen wird eine

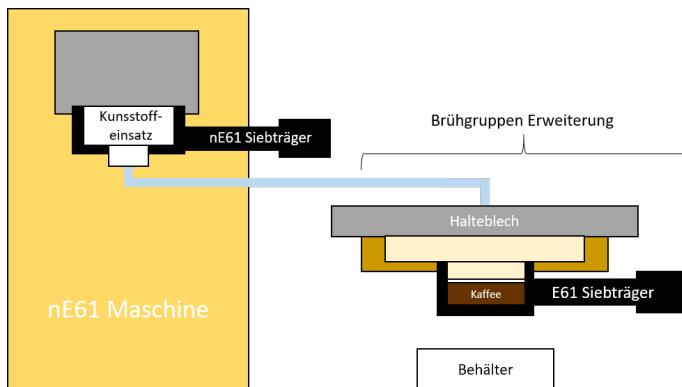


Abbildung 1: Aufbau der Brühgruppen Erweiterung bei nE61-Maschinen

Aufheizzeit von etwa 45 Minuten erwartet, während bei nE61-Modellen eine kürzere Zeit von 20 bis 30 Minuten realistisch ist.

#### B. Kaffeebezüge

Nach vollständigem Aufheizen der Maschine wird der Prozess beendet und die Messung von Kaffeebezügen wird vorbereitet. Für die Vermessung von Kaffeebezügen muss im ersten Schritt die Art der Brühgruppe identifiziert werden. Nach Identifizierung ist die Anbringung der Sensoren durchzuführen. Bei einer E61-Maschine ist der parallele

zylindrisches Zweitassensieb. Das Sieb muss mit einer 20 mm Bohrung in der Mitte versehen werden. Der Kunststoffeinsatz der Dalla Corte Mina ist aus PVDF und zeigt während der Kaffeebezüge ausreichend Stabilität, um den auftretenden Druck zuverlässig standzuhalten. Für die Gaggia TE und die Faema Emblema wird ein Kunststoffeinsatz mit einem Durchmesser von 59 mm benötigt. Der Einsatz wird mit einem 3D-Filmentdrucker gefertigt. Die gleiche Konstruktion mit 3D-Druck zeigt, dass die beim Kaffeebezug entstehenden Kräfte von dem Material nicht kompensiert werden können. Für die Fertigung mit dem 3D-Druck wird beschlossen den Kunststoffeinsatz als Scheibe, ohne Zapfen, zu konstruieren. Die Festigkeit im Zapfen lässt nach, da eine Druckdifferenz im Inneren von etwa 9 bar vorliegt und auf der Außenseite der Umgebungsdruck [BS03]. Durch das Umkonstruieren des Einsatzes auf eine Scheibe drückt das Sieb vollständig auf die Mantelfläche von außen und die Druckkräfte befinden sich im Gleichgewicht. Da die Fertigung mit dem 3D-Druck favorisiert wird, ist für weitere Espressomaschinen der Kunststoffeinsatz als Scheibe zu konstruieren. In der Mitte der Scheibe befindet sich auf der Unterseite die Kernbohrung für das G1/8" Gewinde. Das Gewinde muss in zwei Schritten manuell eingeschnitten werden. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der aufrechtzuerhaltenden Lebensmittelzertifizierung die Gewindeschneider nicht mit Öl verwendet werden dürfen. Die Kunststoffeinsätze und das Sieb müssen mit Isopropanol gereinigt und anschließend mit Aktivator eingestrichen werden. Nach einer halben Stunde Einwirkzeit werden die Einsätze mit Loctite 9480 im 2:1 Verhältnis verklebt. Der Klebstoff wird großflächig auf die Unterseite des Kunststoffeinsatzes aufgetragen, sodass beim Einsetzen in das Sieb der Klebstoff die Poren des Siebs füllt. Für eine höhere Erfolgsquote der Druckdichtheit wird empfohlen den Rand vollständig mit Klebstoff zu füllen. Da das Mess-System ausschließlich für Vermessungszwecke mit Testkaffee ausgelegt ist, besteht beim Material für den Kunststoffeinsatz kein Kriterium der Lebensmittelzertifizierung. Die vollständige Aushärtung der Klebeverbindung ist nach 24 Stunden erreicht. Anschließend wird der ELSA-Anschluss mit Isopropanol gereinigt und das Gewinde wird mit Sekundenkleber (Z70) verklebt. Mit einem 6 mm Rohr wird die Brühgruppenerweiterung an

Tabelle II: Maximale Anzahl aktiver Messkanäle

Brühgruppe	E61	nicht E61	Kanal
TAuslauf	ja	ja	CH00
TvorKP	ja*	ja	CH01/CH02
TEXtraNTC	nein	ja	CH03
TIR	ja	ja	CH10
Druck	ja*	ja	CH11
Flowmeter	nein	ja	CH12
Waage	ja	ja	HX711

Einsatz von vier Sensoren möglich. In Tabelle II sind fünf Messstellen für die Art der gennanten Brühgruppe vorgesehen. Da die Temperatur und der Druck vor dem Kaffeepuck die gleiche Messstelle an der Brühgruppe haben, ist die parallele Benutzung nicht gegeben. Während des Aufheizverhaltens befindet sich der Temperatursensor vor dem Kaffeepuck bereits in der Maschine verschraubt. Es bietet sich an die ersten Messungen mit dem Sensor weiterzuführen. Hier muss die Dichtheit der Schraubverbindung sichergestellt werden. Durch den Einsatz der Dichtung und handfestes Anziehen ist das System dicht. Bei den Kaffeebezügen wird neben dem NTC vor dem Kaffeepuck die Temperatur am Siebträgerauslauf erfasst. Eine weitere Temperatur kann über den IR-Sensor nach Bedarf aufgezeichnet werden. Der Parameter Kaffeeauslaufmenge wird durch eine Waage erfasst, welche auf der Abtropfschale platziert ist.

Bei einer nE61-Siebträgerespressomaschine wird für die Vermessung die entwickelte Brühgruppenerweiterung adaptiert. Wie in Abbildung 1 dargestellt, muss in die nE61-Kaffeemaschine der passende bodenlose Siebträger eingesetzt werden. Im Siebträger befindet sich ein möglichst

den ELSA-Anschluss des Kunsstoffeinsatzes angeschlossen. Die Ecken in der Verbindung werden mit NTCs von AVS Römer statt üblichen ELSA-Eckstücken realisiert. Direkt nach dem nE61-Siebträger ist der Extra NTC mit der Messstelle "Ecke" definiert. Der Sensor auf der Seite der Brühgruppenerweiterung misst die Temperatur vor dem Kaffeepuck. Zusätzlich ist die Brühgruppenerweiterung fest mit dem Drucksensor verbunden, sodass eine parallele Erfassung von Druck und Temperatur vor dem Kaffeepuck möglich sind. Am E61 Siebträger der Erweiterung ist am Auslauf ein NTC Sensor mit ELSA-Anschluss in Geradausführung angebracht. Unter dem Siebträger wird die Waage mit dem Kunststoffbehälter platziert. Falls eine Dalla Corte Mina vorliegt, kann das Signal des verbauten Flowmeters gemessen werden. Hierzu muss die rechte Abdeckung der Maschine abgeschraubt werden. Dort ist der Durchflusssensor Digmesa Nano Brass vertikal eingebaut.

Anschließend ist in beiden Fällen, E61 und nE61, die Verkabelung der Sensoren durchzuführen. Diese werden nach Tabelle II an das Mess-System angeschlossen. Am Gehäuse des Mess-Systems sind Bezeichnungen eingraviert. Bei den NTCs entspricht NTC1 dem Kanal CH00, analog für die weiteren NTC Sensoren. Der letzte Teil der Vorbereitung umfasst das Einstellen des Mahlgrads. Für den Kaffeebezug wird 20 g gemahlener Kaffee verwendet, welcher mit einem Leveler geebnet und anschließend mit einem Tamperdruck von 120 N gepresst wird. Der Mahlgrad des Kaffeemehls muss so bestimmt werden, dass eine angestrebte Durchflussrate von  $2 \pm 0,3 \text{ ml/s}$  erreicht wird. Für die Vermessung von Kaffeebezügen und dem Einstellen des Mahlgrads muss vor jedem Kaffeebezug das System mit heißem Wasser gespült werden, bevor der Siebträger eingesetzt wird. Die Berechnung der Durchflussrate muss manuell aus dem graphischen Verlauf der Kaffeeauslaufmenge der Waage ermittelt werden. Der Verlauf der Kaffeeauslaufmenge zeigt die Form eines vertikal gespiegelten Buchstabens Z auf. Hierbei wird der untere Knick als Startpunkt des Kaffeebezugs bestimmt. An diesem Punkt fängt der Kaffee an aus dem Siebträger in die Tasse zu fließen. Der Endpunkt des Kaffeebezugs ist der zweite Knick am oberen Ende des Graphs. Die graphische Darstellung zeigt die Rohdaten und beinhaltet somit auch die vorkommenden Ausreißer, welche durch die Elektronik begründet sind. Für den Start und das Ende muss jeweils ein Punkt gefunden werden, welcher nicht auf einem Ausreißer liegt.

$$\begin{aligned} DFR &= \Delta y / \Delta x \\ \Delta y &= y_2 - y_1 \\ \Delta x &= x_2 - x_1 \end{aligned} \quad (1)$$

Durch Anklicken der Punkte sind die Koordinaten sichtbar. Aus den Koordinaten, welche die Zeit in Sekunden und die Kaffeeausflussmenge in Gramm darstellen, muss manuell die Durchflussrate berechnet werden. Hierfür wird die Differenz der Kaffeemenge und die Differenz der Zeit gebildet. Anschließend werden die beiden Werte dividiert und es ergibt sich die Durchflussrate des Kaffeebezugs in der Einheit  $\text{ml/s}$ . Bei einer Durchflussrate oberhalb der Toleranz muss der Mahlgrad

verfeinert werden, während bei einer Unterschreitung der Mahlgrad größer gestellt werden muss. Durch feines Justieren der Kaffeemühle gelingt ein Wert im tolerierten Bereich. Beim Verstellen der Kaffeemühle muss darauf geachtet werden, dass nach dem Umstellen das Kaffeemehl der ersten beiden Kaffeebezüge nicht verwendet werden darf. Beim Verschieben des Reglers für den Mahlgrad bleiben Kaffeereste des vorherigen Mahlgrads erhalten. Um die Reste zu entfernen und ausschließlich den neu eingestellten Mahlgrad zu testen, müssen die ersten 40 g verworfen werden. Nachdem der optimale Mahlgrad ermittelt wird, kann die Vermessung der Kaffeebezüge beginnen. Für die spätere Aufbereitung der Daten, wird die Messung in der GUI gestartet und nach 5 Sekunden wird der Kaffeebezug an der vorliegenden Maschine aktiviert. Es wird eine Kaffeebezugsdauer von 30 Sekunden mit einer Stoppuhr abgezählt. Bei der Vermessung von Kaffeebezügen muss zwischen Siebträgerespresso maschinen mit E61 und nE61-Brühgruppe unterschieden werden.

In beiden Fällen wird das Ziel angestrebt, die maximale Anzahl an Messwerten pro Kaffeebezug zu erfassen. In Tabelle II sind die Kanäle dargestellt, welche parallel Messwerte erfassen können.

### 3. DATENAUFBEREITUNG

Die Datenaufbereitung der Messdaten wird nachträglich durchgeführt. Die Messdaten werden nach Beenden einer Messung durch den entsprechenden Button in der GUI in einem Unterordner mit der Bezeichnung der eingegebenen Kaffeemaschine gespeichert. Die Unterordner befinden sich im Pfad C:\0\_Messsystem\Data. Beim Speichern eines neuen Datensatzes wird überprüft, ob ein Unterordner mit der Bezeichnung der eingegebenen Kaffeemaschine bereits existiert. Für den Fall wird der Datensatz dem existierendem Ordner hinzugefügt, andernfalls wird ein neuer Ordner erstellt. Durch den Zeitstempel zu Beginn des Dateinamens kann die Messung dem jeweiligen Messtag bzw. der Rösterei zugewiesen werden. Bei mehrmaliger Vermessung eines Modells an verschiedenen Standorten werden manuell Unterordner mit dem Namen der Rösterei erstellt. Die jeweiligen Messdaten werden in die Ordner sortiert, um die automatisierte Datenaufbereitung zu unterstützen. Für die Aufbereitung der Messdaten werden MATLAB Live Skripte (mlx-Skripte) verwendet, mit dem Ziel der automatisierten Aufbereitung. Anhand der ersten Analyse von Messdaten ist ein Unterschied in der Aufbereitung von E61 und nE61-Maschinen zu berücksichtigen. Es wird entschieden jeweils für den vorliegenden Brühgruppentyp zwei separate Aufbereitungsskripte zu programmieren. Die Skripte sind unter der Bezeichnung analyseNE61 mlx und analyseE61 mlx zu finden. Ziel der Aufbereitung im ersten Schritt ist es eine Übersicht über die gesammelten Messdaten zu erzeugen. Dies wird durch die graphische Darstellung der Parameterverläufe pro Kaffeebezug realisiert. Anschließend werden die jeweiligen Parameter einzeln über die Anzahl der durchgeföhrten Kaffeebezüge dargestellt. So ist ein Vergleich in der Reproduzierbarkeit der Verläufe mit Abweichungen visuell zu erkennen. Aus den Verläufen pro Parameter wird jeweils ein Mittelwertverlauf gebildet. Die Bildung eines mittleren

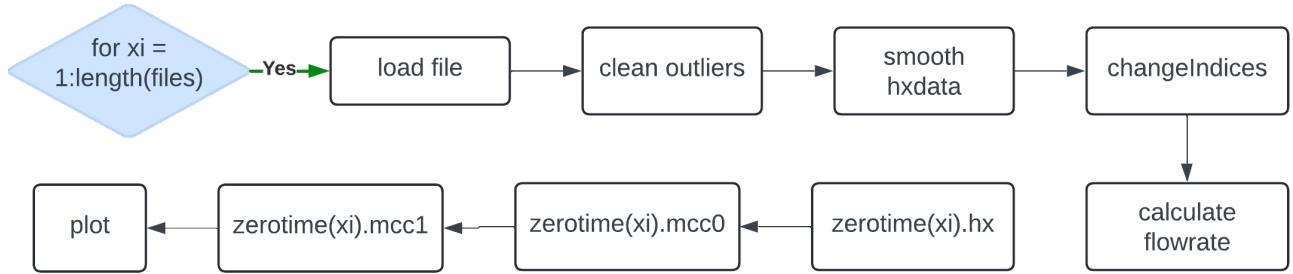


Abbildung 2: Flowchart für den Aufbau des Skripts für E61 Datenaufbereitung

Verlaufs der erfassten Messgrößen ergibt sich als Möglichkeit für den Vergleich der Siebträgerespressomaschinen.

#### A. E61-Maschinen

Es werden vier verschiedene Siebträgerespressomaschinen mit einer E61 Brühgruppe vermessen. Um die Aufbereitung großer Datenmengen zu vereinfachen, wird ein automatisiertes MATLAB Live Skript entwickelt, welche die Funktionen der Aufbereitung erfüllt. Bevor die Auswertung beginnt, muss das Skript in den gleichen Ordner der Messdaten kopiert werden. Anschließend muss in MATLAB der jeweilige Ordner geöffnet werden, sodass das Skript gestartet wird und die Datensätze geladen werden können.

Das Skript für die Visualisierung und Aufbereitung der Messdaten ist unterteilt in Aufheizverhalten und Kaffeebezüge. Für die Visualisierung des Aufheizverhaltens wird das Importieren der Datei und die graphische Darstellung manuell durchgeführt. Nach Import der relevanten Datei sind die zwei Kanäle CH02 und CH10 interessant. Über CH02 findet die Erfassung für die Temperatur in der Brühgruppe statt, während über CH10 der IR-Sensor die Daten erfasst. Für die Erfassung der Temperatur vor dem Kaffeebezug von E61 Siebträgerespressomaschinen ist ursprünglich der Kanal CH01 definiert. Da bei den Messungen ein Fehler in der Signalkonditionierung auf der Elektronikplatine festgestellt wird, wird der Messkanal vor dem Kaffeebezug für nE61 und E61-Maschinen zusammengelegt.

Bei der graphischen Darstellung für die Aufheizkurve muss für die x-Achse der Wert unter `messung.time` verwendet werden. Während des Aufheizprozesses wird von jedem Kanal in gleicher Frequenz ein Messwert erfasst. Daher ist nur ein Zeitvektor vorhanden, welcher mit der Länge der Messwerte jeden Kanals übereinstimmt. Das Aufheizverhalten beläuft sich zeitlich zwischen 20 bis 60 Minuten, sodass sich die Umwandlung der x-Achse in Minuten als sinnvoll ergibt.

Nach der dargestellten Aufheizkurve beginnt der automatisierte Prozess der Aufbereitung von Kaffeebezügen. Hierfür wird zu Beginn die Variable `filePattern` festgelegt. Mit der Variable wird der Import der Dateien erleichtert. Die Variable wird mit dem Datumsstempel des Vermessungstages als String definiert wie z.B. `filePattern = '2024Jul05*.mat'`. Mit dem

Stern werden alle Dateien ausgewählt, die zu Beginn des Dateinamens mit dem `filePattern` übereinstimmen. Diese Funktion zeigt sich als besonders hilfreich, wenn die Messdaten mehrerer Messtage in einem Ordner vorliegen. Es dient als Filter, um nur die relevanten Daten aufzurufen und aufzubereiten.

Mit `dir(filePattern)` werden die Informationen der durch das `filePattern` ausgewählte Dateien in einem Struct geliefert. Aus dem Struct ergibt sich die Anzahl an durchgeföhrten Kaffeebezügen. Es ist zu beachten, dass die Datei des Aufheizverhaltens ebenfalls zu Beginn mit dem `filePattern` übereinstimmt und erst am Ende mit dem Schlagwort `CUSTOM` unterscheidet. Liegt eine Datei zum Aufheizverhalten vor, darf die Iteration für die Aufbereitung der Kaffeebezüge erst bei `xi = 2` beginnen. In Abbildung 2 ist der Ablauf der Datenaufbereitung als Flowchart dargestellt. Aus dem Flowchart ist erkennbar, dass die Aufbereitung mit einer for-Schleife abläuft. Zu Beginn der for-Schleife müssen die Messdaten jedes Kaffeebezugs geladen werden. Aus dem Struct werden bei jedem Durchlauf der Dateiname geladen, welcher mit der Zählvariable übereinstimmt. Mit `fileName = files(xi).name` wird die Datei in MATLAB importiert. Anschließend wird mit `coffee(xi).shot = load(fileName).messung` der Datensatz eines Kaffeebezugs geladen. Die Messdaten einer Aufzeichnung sind unter dem Struct `messung` gespeichert. Um die Wege innerhalb des neuen Structs `coffee` kurz zu halten, werden direkt die Unterstrukturen von `messung` geladen. Dort befindet sich die Unterteilung der Messdaten in `mcc0`, `mcc1` und `hx`. Im neuen Struct wird die Unterteilung eines jeden Kaffeebezugs zu `coffee(xi).shot` hinzugefügt. In der Aufbereitung wird das Arbeiten mit MATLAB Strukturen bevorzugt angewendet, da es das Abarbeiten von Daten mit gleichem Aufbau automatisiert ermöglicht.

Für die Visualisierung der Kaffeebezüge ist der Zeitraum interessant, ab dem der Kaffee aus dem Kaffeebezug in die Tasse läuft und über die Waage in Gramm gemessen wird. Der Verlauf der Kaffeeauslaufmenge der Waage zeigt sich in Form eines vertikal gespiegelten Z wider. Der untere Knick ist als Kaffee Start und der obere Knick als Kaffee Ende zu definieren. Da es nicht möglich ist, jeden Kaffeebezug nach der exakten Dauer von 5 Sekunden zu starten, muss nachträglich der Start Zeitpunkt bestimmt werden. Für die

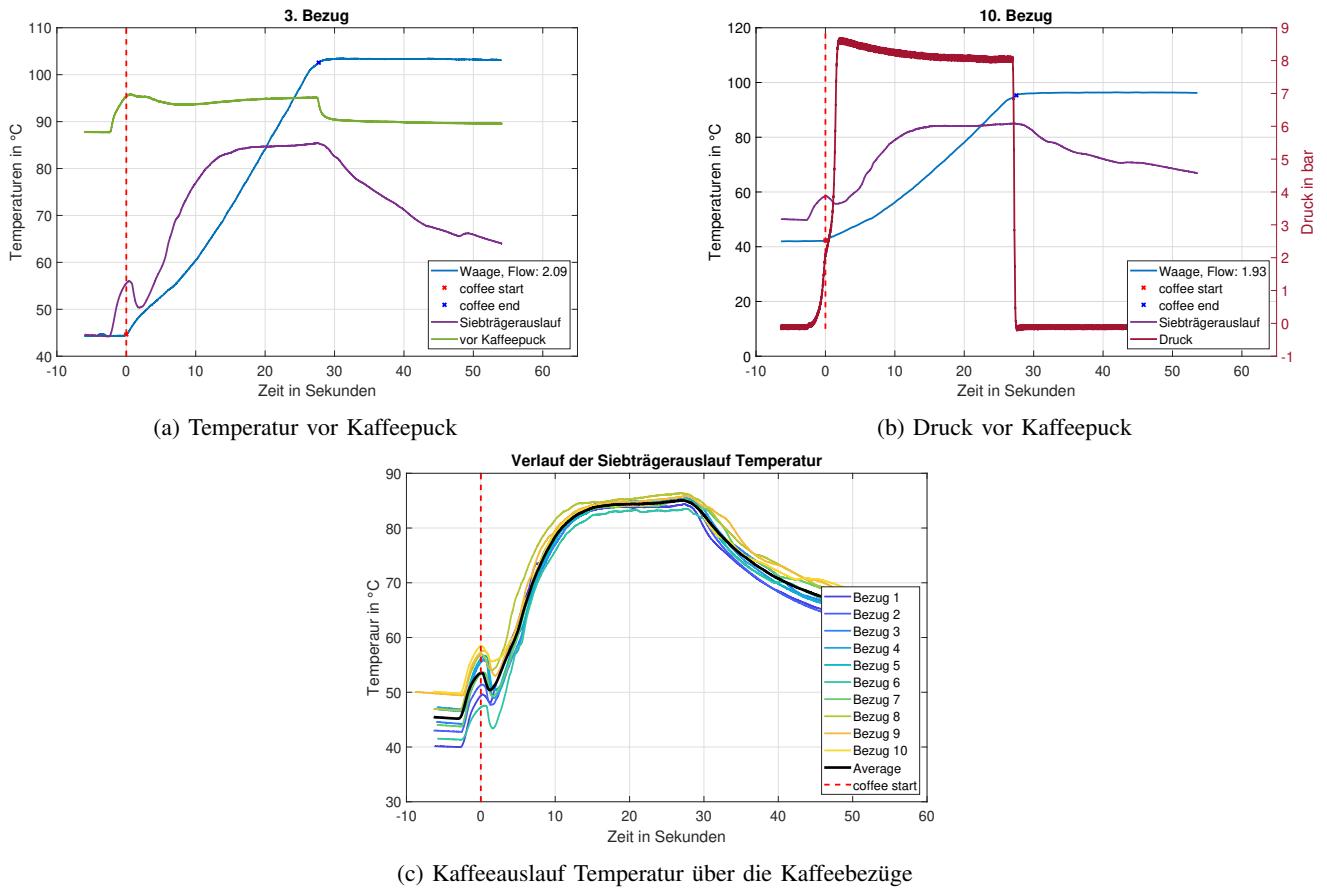


Abbildung 3: Visualisierung der Messdaten von E61 Siebträgerespressomaschinen

möglichst präzise Bestimmung des Start- und Endzeitpunkts muss das Signal der Waage aufbereitet werden. In den Rohdaten sind Ausreißer und Schwingungen vorhanden (Abbildung A.1), welche die methodische Ermittlung der Zeitpunkte verfälscht. Die Ausreißer im Signal werden mit `filloutliers` eliminiert. Mit dem Befehl werden die Ausreißer nicht nur detektiert, sondern auch gefüllt, sodass weiterhin die Stetigkeit des Signals vorliegt. Nach der Eliminierung der Ausreißer ist weiterhin eine Schwingung vorhanden. Bei E61 Siebträgerespressomaschinen ist die Waage auf dem Abtropfblech der Maschine platziert. Bei aktivem Brühvorgang der Maschine wird die Pumpe eingeschaltet, welche Schwingungen im Signal erzeugt. Die Schwingungen verhindern eine präzise Bestimmung des Startzeitpunktes und werden mit `smoothdata` geglättet. Die Parameter der beiden Befehle für die Aufbereitung des Waagesignals werden iterativ ermittelt, bis ein optimales Ergebnis festzustellen ist. Mit dem MATLAB Befehl `ischange` ist es möglich eine plötzliche Änderung im Signal zu detektieren. Die Erfassung der ChangePoints variiert anhand der getroffenen Parameter. Die zuverlässigste Erfassung zeigt die Verwendung des Varianzkriteriums mit einer gesuchten Anzahl von zwei ChangePoints. In einem MATLAB Live-Skript kann ein interaktiver Task zum Finden der ChangePoints eingefügt werden. Durch die direkte Visualisierung der geänderten Parameter im

Task, ist die Qualität der Erkennung von ChangePoints zu beurteilen. Es ist durchaus möglich, dass eine Einstellung nicht kontinuierlich auf alle Kaffeebezüge übertragbar ist. Hier muss die Einstellung gefunden werden, welche für die Messdaten der meisten Kaffeebezüge zuverlässig funktioniert. Der Output ist ein logischer Vektor mit 0 und 1 Elementen. Mit dem Befehl `find` werden die Indizes der Elemente mit dem Wert 1 ausgegeben. Bei der genannten Funktion ist mit Zusatzangaben wie 'first' oder 'last' möglich, direkt den ersten oder letzten Index eines positiven Elements auszugeben. Für den Fall, dass der Endzeitpunkt nicht korrekt erfasst wird, weil drei ChangePoints eingegeben werden und nach Kaffeebezugsende noch ein ChangePoint erkannt wird, muss manuell der entsprechende Index dem Endzeitpunkt zugewiesen werden. Eine weitere Option stellt die Einschränkung des Start- und Endbereichs dar, sodass nur ein ChangePoint im jeweiligen Bereich gefunden wird. Dieses Vorgehen erfordert mehr Aufwand, da nicht jeder Kaffeebezug exakt nach 5 Sekunden gestartet wird und somit der Start- und Endbereich in den Indizes variiert. Dieses Vorgehen hindert die angestrebte Automatisierung des Skriptes und wird daher vermieden und nur in Ausnahmefällen verwendet. Die Indizes werden in den Zeit- und Datavektor von der Waage eingesetzt, um die Werte der Durchflussrate zu den Zeitpunkten zu ermitteln. Aus dem Start- und Endzeitpunkt wird nach Formel 1 die Durchflussrate über die

Kaffeeausflussmenge der Waage berechnet.

Für die graphische Darstellung der erfassten Verläufe pro Kaffeebezug wird der ermittelte Startzeitpunkt auf den Zeitpunkt  $t = 0$  festgelegt. Der Startzeitpunkt der Waage wird von allen Zeitvektoren der MCCs subtrahiert. Dies führt dazu, dass die Verläufe im negativen Zeitbereich starten, wie in den drei Graphen aus Abbildung 3 zu erkennen. Pro Kaffeebezug wird bei einer E61-Maschine der Verlauf der Waage und der Siebträgerauslauftemperatur jedes Mal dargestellt. Lediglich die Temperatur und der Druck vor dem Kaffeepuck können nicht gleichzeitig dargestellt werden, da die Messstelle von beiden Sensoren verwendet wird. Die Abbildung 3a zeigt einen Kaffeebezug mit dem Temperatursensor vor dem Kaffeepuck. Nach 5 Bezügen wird der Sensor getauscht und es wird der Druck vor dem Kaffeepuck gemessen (Abbildung 3b). Mit einer if-Bedingung wird die Datenaufbereitung von Temperatur auf Druck angepasst. Bei der Messung der Temperatur vor dem Kaffeepuck wird der Kanal CH02 berücksichtigt. Für die Druckwerte wird statt dem Kanal CH02 der Kanal CH11 visualisiert. Bei der graphischen Darstellung wird die Achse für das Gewicht der Kaffeeausfluss-Menge vernachlässigt. Hierbei zeigt sich die Durchflusssrate als relevanter Wert, welcher sich durch die zwei Markierungen am Graph berechnet. Diese wird in der Legende neben der Bezeichnung der Linie in  $\text{m}/\text{s}$  angegeben. In beiden Fällen sind die Temperaturen an der linken Oordinate skaliert, der Druck auf der rechten Seite in Farbe des Graphs. Mit einer rot-gestrichelten Linie wird der Zeitpunkt des Kaffeestarts verdeutlicht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit, ist jedem Parameter eine Farbe aus dem MATLAB Standard Farbschema zugeordnet. Die graphische Darstellung der Kaffeebezüge gibt eine Übersicht über die Parameterverläufe und ihren Zusammenhängen.

Im letzten Teil der Datenaufbereitung werden die jeweiligen Parameter über die Anzahl der durchgeföhrten Kaffeebezüge dargestellt. Abbildung 3c zeigt die Verläufe der Temperatur am Siebträgerauslauf von 10 nacheinander ausgeführten Kaffeebezügen. Hier wird ein anderes Farbschema verwendet, um die jeweiligen Verläufe einem Bezug zuzuordnen. Die rot-gestrichelte Linie dient hier als Referenzlinie für den Kaffeestart, der sich aus dem Waageverlauf ergibt. Die Bildung eines mittleren Verlaufs erfordert das Sammeln der Daten von 10 Kaffeebezügen in einer Variable. Da die Vektoren der Kaffeebezüge nicht exakt die gleiche Länge besitzen, müssen diese gekürzt werden. Für die Messwerte des MCC0 entstehen nach 60 s Messung bei einer Abtastrate von 1  $kS/s$  etwa 60.000 Messwerte. Die Anzahl der Messwerte variiert leicht und anhand des kürzesten Vektors wird die neue Länge definiert. Es wird beschlossen die letzte Sekunde der Messung, also 1000 Messwerte, zu verwerfen. Dies beeinflusst die Qualität der Messdaten nicht, da der für die Analyse zu betrachtende Bereich sich bis maximal 35 Sekunden erstreckt. In einer for-Schleife werden der jeweilige Zeit- und Wertevektor jedes Kaffeebezugs zugeschnitten und bei der Variable mit `horzcat horizontal` erweitert. Die Werte eines Parameters und eines Kaffeebezugs befinden sich in Form einer Spalte der Variable. Die Variable hat in dem Fall 10 Spalten und 59.000 Zeilen. Anschließend ist das

Mitteln der Zeit- und Temperaturvariable möglich. Es ist zu beachten, dass mit `mean(values, 2)` zu mitteln ist. Mit der Angabe von 2 wird über die Zeilen statt Spalten gemittelt. Daraus ergibt sich eine Variable mit 59.000 Zeilen und 1 Spalte. Diese Vorgehensweise wird bei jedem Parameter separat durchgeführt. Die Messwerte des MCC1 werden mit einer höheren Abtastrate von 30  $kS/s$  erfasst. Hier ist die neue Vektorlänge entsprechend auf den kürzesten Vektor anzupassen.

Bei der Aufbereitung der Flowmeter-Verläufe über die Kaffeebezüge wird das gleiche Vorgehen angewendet. Zusätzlich wird die `ischange` Funktion erneut verwendet, um den Start- und Endzeitpunkt des durchschnittlichen Verlaufs zu ermitteln. Es ist nicht möglich die Start- und Endzeitpunkte zu mitteln und auf den gemittelten Verlauf zu übertragen. Bei diesem Fall treffen die gemittelten Zeitpunkte nicht mit den neu detektierten Zeitpunkten überein.

### B. nE61-Maschinen

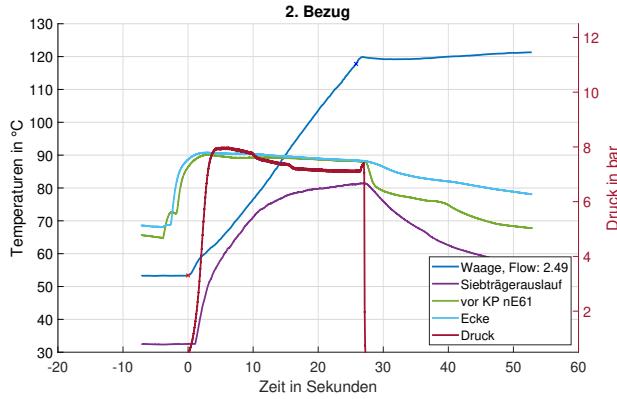
Dieses Skript zeigt die gleichen Aufbereitungsschritte wie für E61-Maschinen. Da nur in einigen Punkten geringfügige Abweichungen auftreten, wird nur auf diese eingegangen. Bei nE61-Maschinen ist die Erfassung nur einer Aufheizkurve möglich. Hier ist für die Visualisierung lediglich der Messkanal CH10 als relevant zu betrachten.

Die Aufbereitung der Kaffeebezüge umfasst den gleichen systematischen Aufbau wie den der E61-Maschinen. Die erste Visualisierung der Daten mit normierter Zeitachse wird ebenfalls mit einer for-Schleife umgesetzt. Da hier die Erfassung von Temperatur und Druck vor dem Kaffeepuck parallel möglich ist, wird innerhalb der Schleife keine Fallunterscheidung mit einer if-Bedingung benötigt. In Abbildung 4a sind die Parameterverläufe eines Kaffeebezugs dargestellt. Die linke Oordinate skaliert die Temperaturen und die Rechte den Druckverlauf. Die Flowrate wird automatisch ermittelt und in der Legende angezeigt. Nach der Visualisierung der Kaffeebezüge, werden die jeweiligen Parameter auf die Reproduzierbarkeit überprüft. Dieser Prozess ist identisch zu dem der E61-Maschinen. Bei der Dalla Corte Mina bietet sich die Möglichkeit der Erfassung der Durchflusssrate vom integrierten Flowmeter an. Hierfür wird eine separate Datenaufbereitung programmiert, welche die Interpretation der Durchflusssraten (DFR) erlaubt.

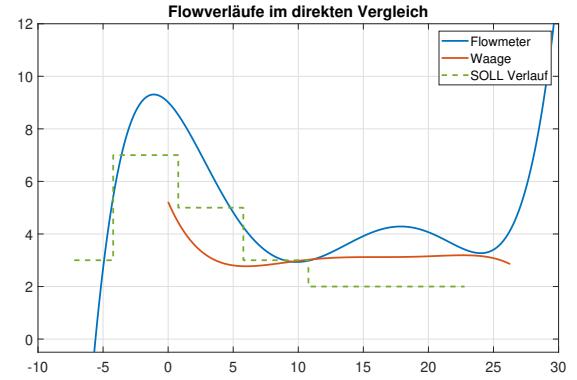
Für einen Einblick in das Verhalten der Durchflusssraten (DFR) steht bei der Dalla Corte Mina eine Smartphone App zur Verfügung, über welche ein Flowprofil erstellt werden kann. Für die Beurteilung der DFR-Steuerung von Dalla Corte werden Messwerte vom verbauten Digmesa Nano Brass und von der Waage erfasst und mit dem eingestellten SOLL-Verlauf der App verglichen.

Für die Aufbereitung wird das bereits vorhandene Struct `coffee` weitergeführt. Die DFR-bezogenen Daten werden unter `coffee.shot.flow` gespeichert.

Das Mess-System erfasst über den Kanal CH12 das Rechtecksignal des Flowmeters und wandelt es in interpolierte physikalische Werte um. In dem abgespeicherten Struct befinden sich somit die bereits aufbereiteten Durchflusssraten des Flowmeters. Für die spätere graphische Darstellung wird anhand der Länge des Datenvektors und der



(a) Messdaten eines Kaffeebezugs



(b) Vergleich von Flowraten eines Kaffeebezugs

Abbildung 4: Visualisierung der Messdaten von nE61 Siebrägerespressomaschinen

Messdauer von 60 Sekunden ein passender Zeitvektor erstellt. Die DFR-Raten und der Zeitvektor werden unter `coffee.shot.flow.flowmeter` abgelegt. Im nächsten Schritt wird der in der App eingestellte stufenartige SOLL-Verlauf graphisch reproduziert. Hier ist eine Fallunterscheidung implementiert, da nach einigen Kaffeebezügen das Flowprofil geändert wird. Der Zeit- und Datenvektor wird manuell erzeugt und unter `coffee.shot.flow.app` abgespeichert. Anschließend müssen die Messwerte aus dem Waageverlauf einer Aufbereitung unterzogen werden, um die Durchflussrate korrekt zu interpretieren. Für die Berechnung der Durchflussrate aus der Waage wird zunächst der Zeit- und geglättete Datenvektor benötigt. Da bei der Waage nur die DFR über den Kaffeebezug interessant ist, werden die beiden Vektoren auf den Bereich zwischen Start und Ende beschränkt. Die Messwerte der Waage werden mit einer Abtastrate von etwa 80 Hz abgetastet, wodurch deutlich weniger Messwerte zur Verfügung stehen als beim MCC0 mit einer  $fs = 1 \text{ kS/s}$ . Mit einem Basic Fitting der Kaffeeauslaufmenge, wird ein Upsampling auf 1  $\text{kS/s}$  durchgeführt, um einen glatteren Verlauf mit höherer Anzahl an DFR zu erhalten. Iterativ wird ein Polynom 6. Grades als passend für das Basic Fitting ermittelt. Die hochgesampleten Zeit- und Datenvektoren sind unter `coffee.shot.waage` abgelegt. Im nächsten Schritt wird die Durchflussrate elementweise berechnet. Hierzu wird eine for-Schleife verwendet, welche die Differenz der Kaffee- menge und die Differenz der Zeit berechnet und anschließend dividiert. Die elementweise Division ergibt einen Vektor mit den DFRs, die unter `coffee.shot.flow.waage` abgelegt sind. Hierzu muss ein Zeitvektor erzeugt werden, damit ein graphischer Vergleich der drei Durchflussraten möglich ist. Abbildung 4b zeigt die Gegenüberstellung der drei Durchflussratenverläufe. Blau zeigt die DFR des Flowmeters an, orange sind die DFR der Waage und grün gestrichelt stellt den eingestellten SOLL-Verlauf dar. Es ist zu erkennen, dass der orangefarbene Verlauf kürzer ist als der Grüne und Blaue. Dies liegt daran, dass die Messwerte der Waage vor der DFR-Berechnung auf den relevanten Bereich von Kaffeestart bis -ende begrenzt sind. Da bei 0 Sekunden der Startzeitpunkt definiert ist, an dem der Kaffee anfängt in die Tasse zu laufen,

ist das der Start des DFR-Verlaufs der Waage.

#### 4. VERGLEICH DER MASCHINEN

Die Vermessung von Siebrägerespressomaschinen verfolgt zwei zentrale Ziele: Zum einen dient sie der Validierung der Zuverlässigkeit des entwickelten Messsystems, indem über den gesamten Messzeitraum geprüft wird, ob das System in der Lage ist, den Messprozess konsistent und reproduzierbar abzubilden. Zum Anderen generiert die Vermessung erste Messdaten, die detaillierte Einblicke in die internen Betriebsprozesse der jeweiligen Maschinen ermöglichen. Diese Datenbasis ermöglicht es, die Siebrägerespressomaschinen verschiedener Modelle systematisch miteinander zu vergleichen. Für eine fundierte Analyse werden die Maschinen in drei Kategorien unterteilt. Die erste Kategorie umfasst vier Dalla Corte Mina Maschinen, die aufgrund ihrer benutzerdefinierten Einstellungen miteinander verglichen werden. Die zweite Kategorie beinhaltet Modelle der Firma Faema, bekannt als Hersteller der ersten E61-Brühgruppe. Die dritte Kategorie setzt sich aus weiteren E61-Maschinen sowie der im Labor befindlichen Gaggia TE zusammen.

##### A. Dalla Corte Mina

Das Modell Mina des Herstellers Dalla Corte zeichnet sich durch die Möglichkeit zur benutzerdefinierten Durchflussratensteuerung aus. Über eine Smartphone-App können sowohl die Aufheiztemperatur als auch der Kaffeebezug parametriert werden. Im Rahmen der Untersuchung werden vier Dalla Corte Mina Maschinen mit den unveränderten Einstellungen ihrer jeweiligen Benutzer vermessen. In Abbildung 5b sind die Aufheizkurven der vier Maschinen dargestellt. Das Modell ist als Dual-Boiler-System konzipiert und verfügt über einen kleinen Boiler, der sich oberhalb der Dusche und des Wasserverteilers befindet. Die Oberfläche des Boilers wird durch das Abschrauben der beiden Komponenten zugänglich gemacht, sodass der IR-Sensor auf die Boileroberfläche ausgerichtet werden kann. Es wird versucht die Temperatur bei jeder Maschine möglichst zentriert an der Boileroberfläche auszurichten. Die präzise Ausrichtung ist aufgrund ungleicher Umgebungsbedingungen nicht reproduzierbar. Der IR-Sensor

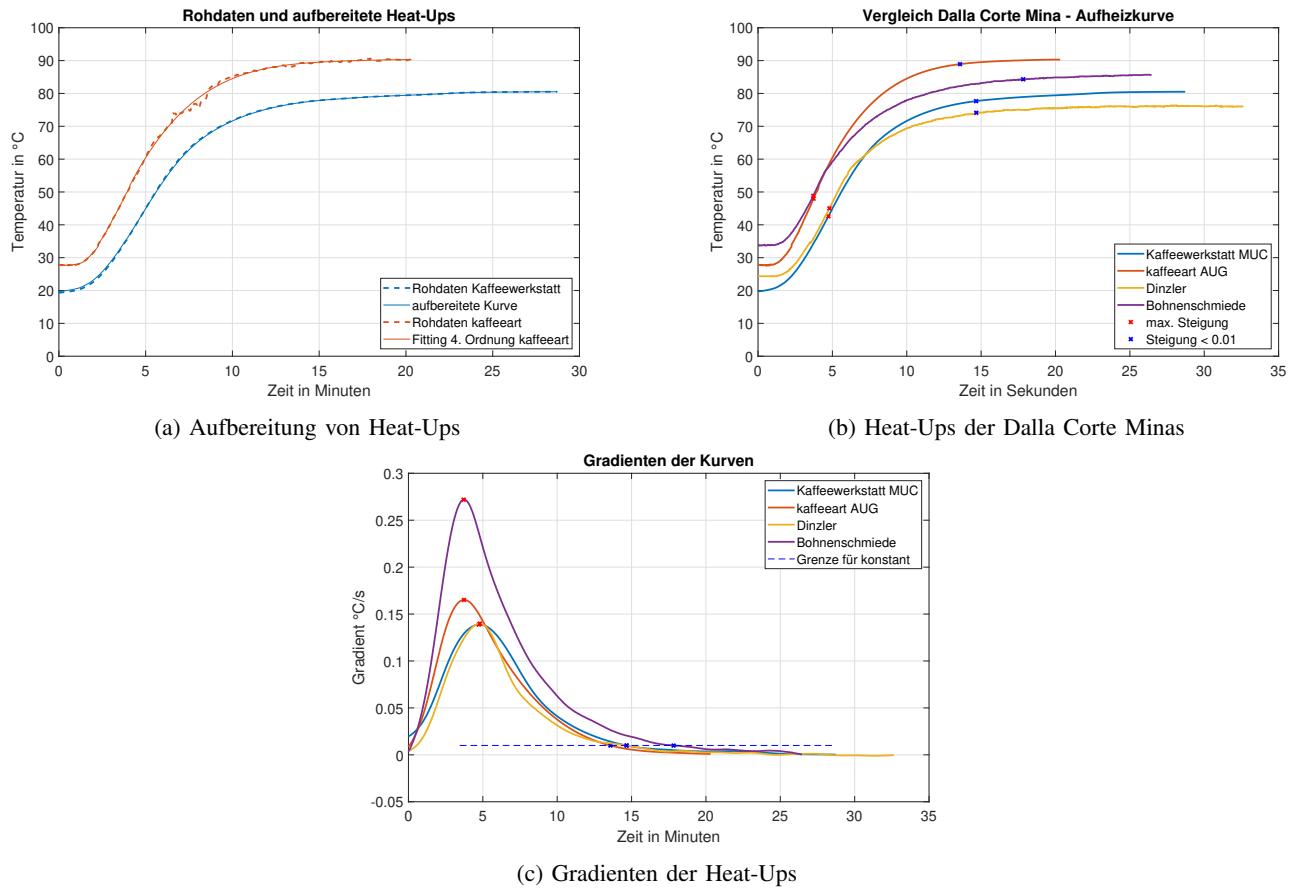


Abbildung 5: Ermittlung der Zeiten des Aufheizens der Dalla Corte Minas

muss für die Ausrichtung an eine Platte festgeschraubt werden. Da dies nicht an der gleichen Stelle möglich ist, zeigt sich eine leichte Variation in der Positionierung des IR-Sensors. Es resultieren geringfügige Abweichungen, die sich in den Temperaturen der Aufheizkurve widerspiegeln. Obwohl die eingestellte Endtemperatur bei allen Maschinen im Bereich von 89 °C bis 92 °C liegt, zeigen die Kurven in Abbildung 5b höhere Abweichungen. Die ungenaue Erfassung der Position und die unbekannte Wanddicke des Boilerquerschnitts führen zu den Differenzen in den Temperaturen. Der gelbe Verlauf zeigt eine Temperatur von maximal 76 °C. Hier wird der Sensor auf eine Stelle am Boiler mit höherer Materialstärke ausgerichtet. Das Aufheizverhalten wird gestoppt wenn die Bildung eines Plateaus erkennbar ist. Um den exakten Zeitpunkt des Erreichen der Endtemperatur zu bestimmen, muss eine Methode systematisch angewendet werden. Mithilfe der Bildung von Gradienten der jeweiligen Aufheizkurve ist die Bestimmung des vollständigen Aufheizens umgesetzt. In Abbildung 5c sind die Gradienten der Verläufe dargestellt. Für das korrekte Bestimmen des Zeitpunktes müssen zwei Aufheizkurven vor Bildung des Gradienten aufbereitet werden, da die Rohdaten nicht sauber sind. In Abbildung 5a sind die Rohdaten mit den aufbereiteten Kurven zu erkennen. Der orange Verlauf zeigt keinen optimalen Aufheizverlauf, da während des Aufheizens ein Kompressor im Raum eingeschalten wurde. Die Schwingungen des

Kompressors übertragen sich auf den IR-Sensor, der mit seinem Sensorkopf verwackelt und die Position geringfügig ändert. Die Änderungen reichen aus, um eine Stelle mit dickerem oder dünneren Querschnitt zu messen.

Die Kurve wird in dem kritischen Bereich mit einem Polynom vierter Ordnung gefüttet. Es wird nur ein Teil der Kurve gefüttet, da kein passendes Polynom die exakte Form der Kurve repräsentiert. Anschließend müssen die Rohdaten und der gefüttete Teil zusammengefügt werden, um den neu erzeugten Verlauf zu bilden. Der blaue Verlauf zeigt auf den ersten Blick eine optimale Kurve auf. Während der Bildung des Gradienten ist aufgefallen, dass beim Plateau Ungleichmäßigkeiten im Signal auftreten, welche den falschen Zeitpunkt des Aufheizens ermitteln. Hier muss ebenfalls der Teil der Kurve entsprechend gefüttet werden, um den Gradienten wahrheitsgemäß zu bilden. Es wird festgelegt, dass der Zeitpunkt des Aufheizens vollständig ist, wenn der Gradient kleiner 0.01 °C/s aufweist. Die Grenze wird blau gestrichelt in der Abbildung markiert. Je Kurve wird der exakte Zeitpunkt durch den Index bestimmt, an dem der Gradient kleiner gleich der Grenze vorliegt. Durch Übertragen des Index auf Abbildung 5b, so sind die Zeiten bei Erreichen des Plateaus sichtbar. Eine leichte Temperaturerhöhung nach dem Punkt ist weiterhin wahrzunehmen, die aufgrund der geringen Veränderung vernachlässigbar ist. Das Vorgehen ist anpassbar, indem die Grenze des Gradienten verfeinert wird.

Dadurch werden die Punkte in den Aufheizkurven weiter nach hinten versetzt und befinden sich bereits im Plateau. Die aus der Methodik ermittelten Aufheizzeiten sind in Tabelle III dargestellt. Die vier Maschinen zeigen eine

Tabelle III: Vergleich der Aufheizzeiten

Zeit in Minuten	14,40	13,35	14,40	17,50
Durchschnitt	15,11 min			

Aufheizzeit in einem Bereich von 13 bis 18 Minuten auf. Die durchschnittliche Aufheizzeit der vier Dalla Corte Minas errechnet sich auf etwa 15 Minuten.

Im aufgeheizten Zustand ist die anschließende Vermessung von Kaffeebezügen möglich. Während den Kaffeebezügen ist die Parametrierbarkeit besonders interessant. Die Maschine verfügt sowohl über einen Hebel für manuellen Kaffeebezug, als auch über einen automatisierten Vorgang über die Betätigung eines Knopfs. In beiden Fällen wird das in der Dalla Corte Mina App eingestellte Flowprofil durchlaufen. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um ein Durchflussratenprofil und nicht um ein Druckprofil handelt. In der App müssen fünf Punkte gesetzt werden, die das Profil definieren. Die Durchflussrate ist zwischen 2  $\text{mL/s}$  und 12  $\text{mL/s}$  einstellbar. Anhand der LEDs an der Maschine ist der systematische Ablauf des Flowprofils zu erkennen. Jede der fünf LEDs steht für eine eingestellte Stufe im Flowprofil. Zusätzlich ist während des Kaffeebezugs die mechanische Bewegung des Stellventils zur Durchflussregelung akustisch wahrzunehmen.

Für die Vermessungen wird der manuell durchgeführte Kaffeebezug über den Hebel bevorzugt. Der automatische Kaffeebezug ist für die Vermessung nicht hilfreich, da dieser frühzeitig abgebrochen wird. Ein möglicher Grund stellt die Verwendung des Kunststoffeinsatzes dar. Der Kunststoffeinsatz verhält sich während des Kaffeebezugs anders als ein Kaffeepuck. Möglicherweise hat die Maschine eine Überwachung von tolerierten Temperatur- und Druckverläufen während des Kaffeebezugs. Mit dem Kunststoffeinsatz liegen die Parameter außerhalb des tolerierten Bereichs und der Prozess wird abgebrochen. Durch die angenommene Fehlererkennung wird nicht ausreichend Wasser zur Brühgruppenerweiterung gepumpt. Das Rohr, welches die Brühgruppenerweiterung adaptiert, trägt ein Totvolumen von etwa 40 ml. Die Waage erfasst dadurch nur ein paar Tropfen Kaffee. Mit dem Vorgehen ist die Erfassung aller Parameter nicht möglich und wird daher nicht weiter verfolgt.

In Abbildung 6 sind die jeweiligen Parameter der vermessenen Maschinen dargestellt. Bei nE61-Maschinen sind die Temperaturen vor dem Kaffeepuck, am Eckstück und am Siebträgerauslauf verfügbar. Zusätzlich wird der Druckverlauf und der Waageverlauf erfasst. Da es sich hier um das gleiche Modell handelt, wird hier nach Standort unterschieden. Bei den Verläufen handelt es sich um gemittelte Verläufe pro Parameter. Die Verläufe fangen auf der negativen Zeitachse an, da der Zeitpunkt t = 0 Sekunden den Auslauf des Kaffees

darstellt. Die rot-gestrichelte Linie dient als Referenz dieses Zeitpunktes. Insgesamt dauern die Kaffeebezüge 30 Sekunden an, jedoch dauert es etwa 8 Sekunden bis der Kaffee aus der Brühgruppenerweiterung in den Behälter fließt.

Vergleicht man die Verläufe der einzelnen Maschinen fällt auf, dass die Dalla Corte Mina von kaffeeart heißer eingestellt ist. Die Aussage ist vor allem an der Temperatur am Eckstück in Abbildung 6c zu bestätigen. Am Eckstück wird die Brühwasser Temperatur gemessen, die direkt aus der Dalla Corte Mina fließt. Unter Betrachtung der erhöhten Durchflussrate von dieser Maschine, lässt sich die steiler ansteigende Temperatur am Siebträgerauslauf erklären. An der Maschine besteht die Schwierigkeit den Mahlgrad aufgrund der hoch eingestellten Durchflussrate optimal einzustellen. Die DFR fängt hier bei 5  $\text{mL/s}$  an und steigt im 4.5 s Takt auf 12  $\text{mL/s}$  an (A.2). Mit diesem Verlauf wird bei einem manuellen Bezug der letzte Bereich am längsten ausgeführt und es fließt Kaffee mit einer hohen Durchflussrate in den Behälter. Es wird die feinst mögliche Mahlgradeinstellung an der Mühle vorgenommen, jedoch ist der hohe Durchfluss durch den ungünstig erstellten Durchflussverlauf zu begründen.

Weiter fällt in den Vergleichsgrafiken in Abbildung 6 auf, dass die Druckverläufe abstufig enden. Bei den Verläufen handelt es sich um mittlere Verläufe pro Maschine. Die Stufen resultieren aus dem manuellen Stoppvorgang der Messung. Da es sich hierbei um manuell durchgeführte Kaffeebezüge handelt, ist die exakte Bezugsdauer von 30 s nicht realisierbar. Durch das Beenden des Kaffeebezugs ergeben sich leichte Abweichungen in den Zeitpunkten, die sich in Form von Stufen bei den mittleren Verläufen zeigen. Dies ist als irrelevant zu betrachten und gilt rein als Anmerkung zur Interpretation. Die Druckverläufe unterscheiden sich im Wert während des Brühprozesses. Die Druckverläufe zeigen alle die gleiche Form des Verlaufs eines Rechtecks auf. Der Druck steigt plötzlich durch das Auftreffen des Brühwassers auf den trockenen Kaffeepuck. Der Kaffeepuck nimmt das Wasser auf und quillt auf. Anschließend läuft das Wasser durch den Puck und es fließt Kaffee in den Behälter. Es ist ein leicht abfallender Druckverlauf anhand des abnehmenden Widerstands vom Kaffeepuck zu erkennen. Der Prozess des Aufquellens und anschließenden Abfließens in den Behälter spiegelt sich in den Waageverläufen in Abbildung 6e wider. Das vom Kaffeepuck gesammelte Wasser läuft nach Sättigung in einem Schub in den Behälter. Dieses Verhalten ist im blauen Verlauf anhand der Wölbung nach dem Kaffeestart deutlich zu erkennen. Bei der Dalla Corte Mina der Rösterei Bohnenschmiede wird zusätzlich mit dem integrierten Durchflusssensor die Parametrierbarkeit der Kaffeebezüge untersucht.

"Die Dalla Corte Mina ist eine Siebträgerespressomaschine, welche eine Besonderheit durch die Programmierbarkeit hat. Durch das patentierte DFR-Ventil (Digital Flow Regulation) ist es möglich, den Wasserfluss in jedem Moment der Extraktion, elektronisch genau zu steuern und zu reproduzieren." [Dal24]

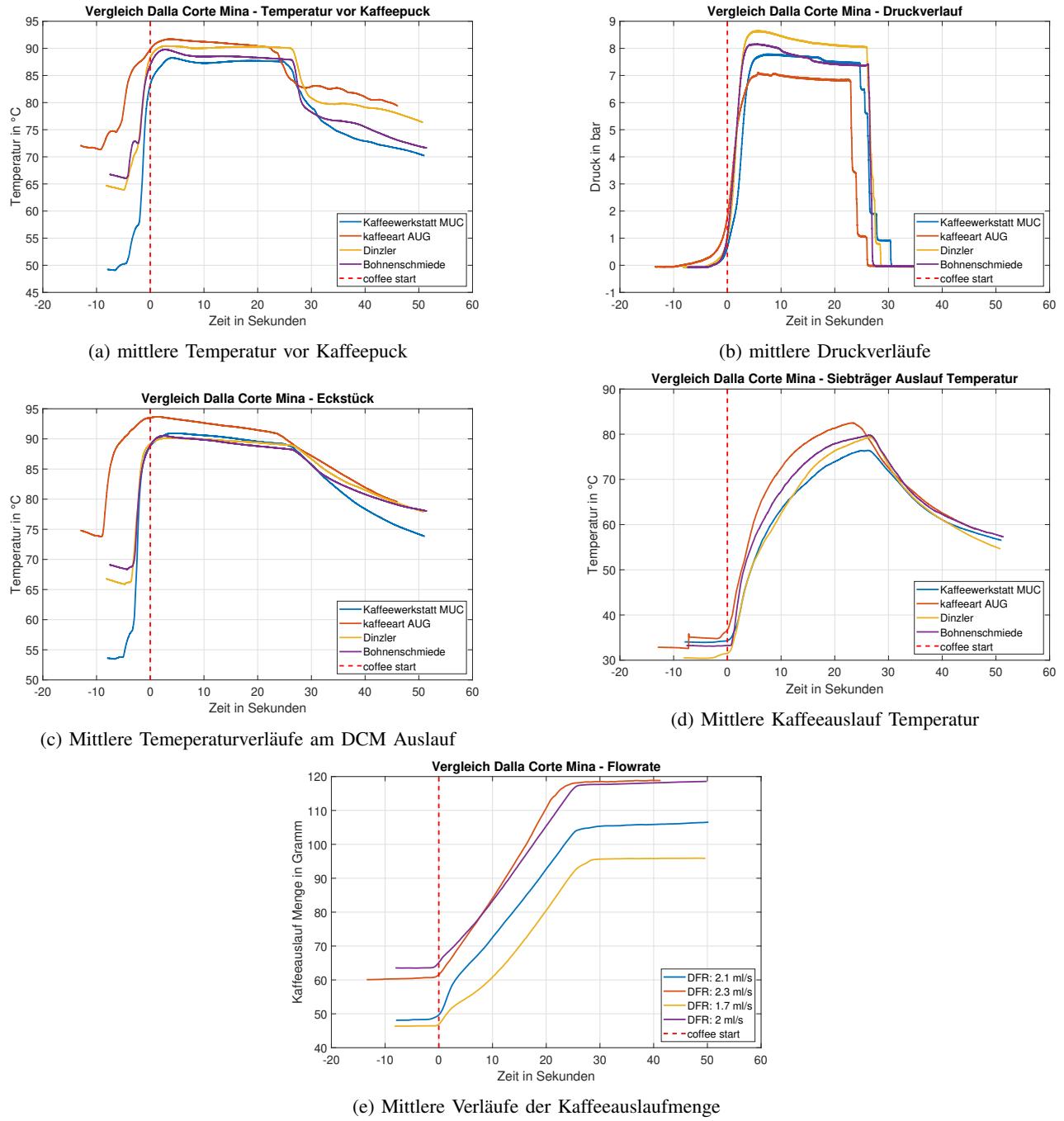


Abbildung 6: Ergebnisse der Parameter der Dalla Corte Mina

Das Zitat von Dalla Corte zeigt, dass in der Maschine eine präzise Flowregelung durch das patentierte Durchflussraten (DFR)-Ventil realisiert wird. Mithilfe des integrierten Flowmeters von Digmesa Nano und dem Mess-System, wird die Aussage von Dalla Corte anhand von Messungen überprüft. Das Flowmeter befindet sich auf der rechten Seite unter der Abdeckung der Maschine. Die Maschine benötigt für die Kaffeebezüge das Signal des Flowmeteres, um die Regelung korrekt zu steuern. Das Signal muss daher mit einem Y-Kabel vom Mess-System aufgenommen werden, um die Messwerte zu erfassen. Hierbei wird das Signal und die Masse von den

drei Leitungen benötigt, während die Spannungsversorgung weiterhin von der Siebträgerespressomaschine geliefert wird. Laut dem Hersteller ist es möglich die Durchflussrate präzise elektronisch zu steuern und zu reproduzieren. Für die Untersuchung dieser Aussage wird die Durchflussrate über zwei Wege ermittelt. Zum Einen werden die Messdaten direkt vom Flowmeter erfasst, welches vor dem DFR-Ventil in der Maschine verbaut ist. Zum Anderen findet eine Messwerterfassung mit der Waage am Siebträgerauslauf der Brühgruppenerweiterung in Gramm statt. Durch die Signalaufbereitung über die Zeit gelingt es, die Durchflussrate aus der Kaffeemenge zu berech-

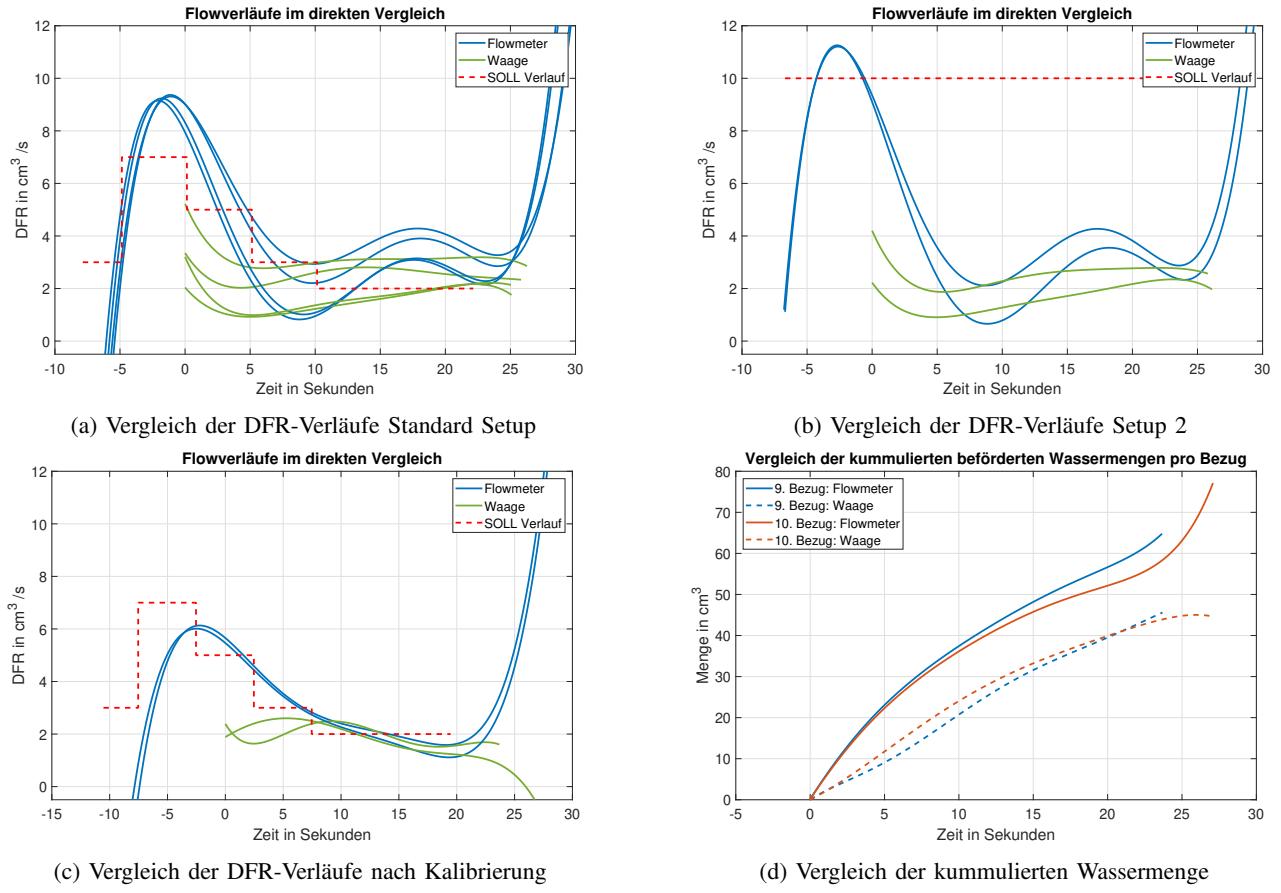


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Durchflussraten-Verläufe

nen. Diese zwei Verläufe werden mit dem SOLL-Verlauf der Dalla Corte Mina App gegenübergestellt und ausgewertet. Bei der Vermessung der Kaffeebezüge wird zunächst das Standard DFR Setup verwendet. In Abbildung 7a sind die Ergebnisse des ersten Setups graphisch dargestellt. Die blauen Linien zeigen die aus den Flowmeter Messwerten interpolierten Durchflussraten, während die grünen Linien die aus der Waage errechneten Durchflussraten darstellen. Bei der Waage werden die Durchflussraten nur über den relevanten Bereich des Kaffeebezugs dargestellt. Daher ist dieser Verlauf kürzer und fängt bei dem Zeitpunkt  $t = 0$  an. Der SOLL-Verlauf wird mit der rot-gestrichelten Linie dargestellt. In der Abbildung ist die präzise Ausführung des SOLL-Verlaufs und der Reproduzierbarkeit als kritisch zu betrachten. Weder die Durchflussraten des Flowmeters, als auch die der Waage stimmen mit dem SOLL-Verlauf überein. Die DFR des Flowmeters zeigen jedoch zu Beginn eine höhere Übereinstimmung mit dem SOLL-Verlauf und in der schrittweisen Abstufung. Die zweite Messwert Erhöhung des Flowmeters ist jedoch nicht zu erklären. Der SOLL-Verlauf ist als eine nicht differenzierbare Funktion dargestellt. Die Regelung des SOLL-Verlaufs ist laut DFR-Verlauf des Flowmeters ein träger Prozess, der keine schlagartigen Veränderungen zeigt. Weiter ist zu beachten, dass es sich bei den DFR des Flowmeters um bereits interpolierte Messwerte handelt und dies ein möglicher Grund für die Schwankungen um den SOLL-Wert ist. Die Interpolation

begründet am Ende des Kaffeebezugs den steilen Anstieg ins Unendliche. Aus den ersten Kaffeebezügen ist eine Reproduzierbarkeit des eingestellten DFR-Verlaufs zu erkennen, jedoch keine identische Übereinstimmung. Nach einigen Kaffeebezügen wird das DFR-Profil auf einen konstanten Wert von  $10 \text{ ml/s}$  eingestellt. Die Betrachtung der rot-gestrichelten SOLL-Verläufe zeigt eine komplett andere Form auf. Der Vergleich der Messwertverhalten von Flowmeter und Waage in Abbildung 7b zeigen keinen gravierenden Unterschied zum ausganglichen Setup. Lediglich wird zu Beginn des Kaffeebezugs die DFR von  $10 \text{ ml/s}$  übertroffen. Es ist kein Ansatz von exakter Steuerung des konstanten Wertes zu erkennen. Es wird erwartet, dass sich die DFR bei dem Wert von  $10 \text{ ml/s}$  einpendelt. Die Flowrate sinkt jedoch wieder auf das Minimum ab und zeigt im zweiten Teil erneut eine Erhöhung, welche aus dem SOLL-Verlauf nicht zu erklären ist. Bei der Vermessung wird das Verhalten der Maschine als kritisch betrachtet und es wird beschlossen eine Kalibrierung der Maschine vorzunehmen. Nach der Kalibrierung wird erneut das erste Standardsetup abgefahren. Abbildung 7c zeigt einen etwas nachvollziehbaren Verlauf der DFR des Flowmeters. Der interpolierte Verlauf schmiegt sich mehr an den eingestellten Verlauf an und die Erhöhung im zweiten Teil ist nicht mehr vorhanden. Die Durchflussrate der Waage zeigt in keinem Fall einen Zusammenhang mit dem SOLL-Verlauf auf. Die Messwerte der Waage werden im Vergleich der kum-

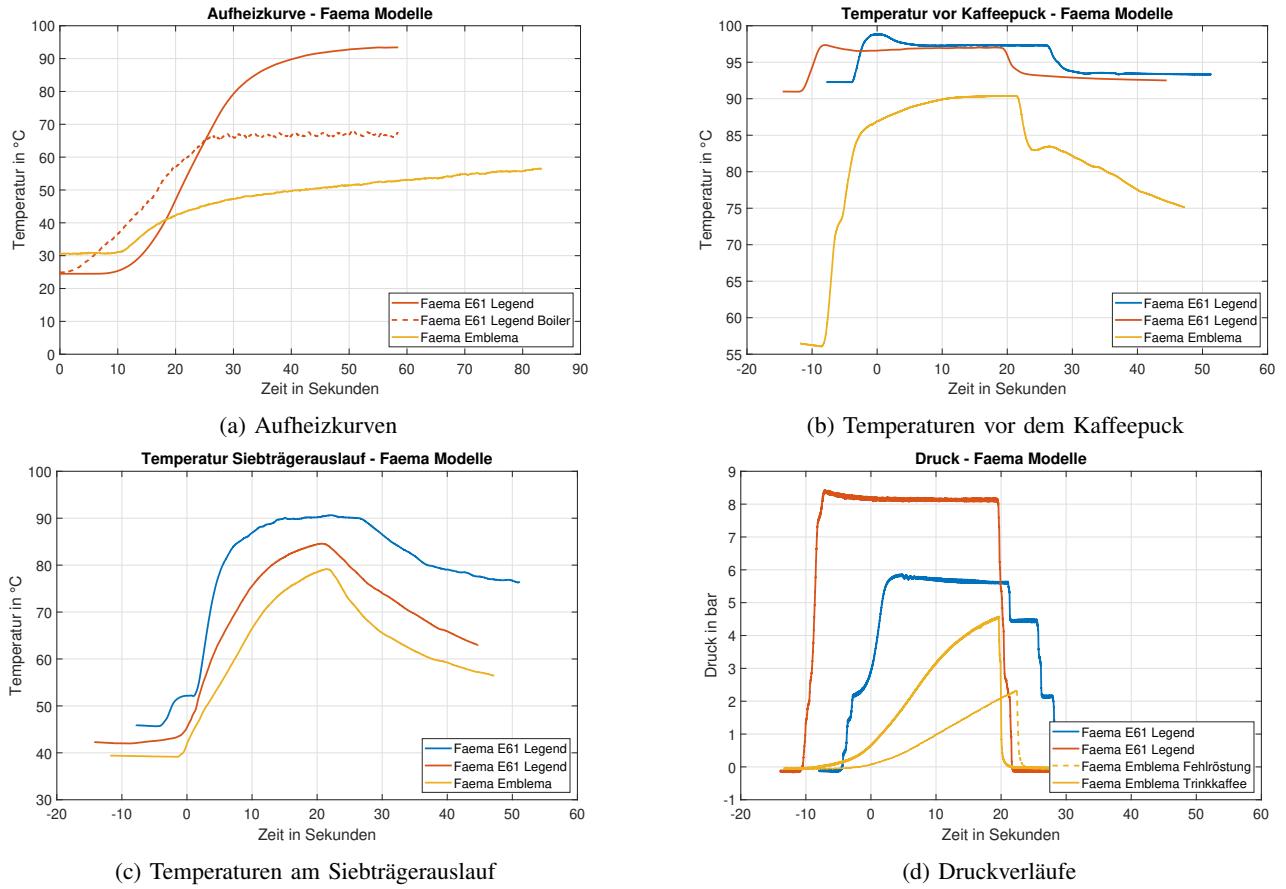


Abbildung 8: Vergleich der Faema Modelle anhand der jeweiligen Parameter

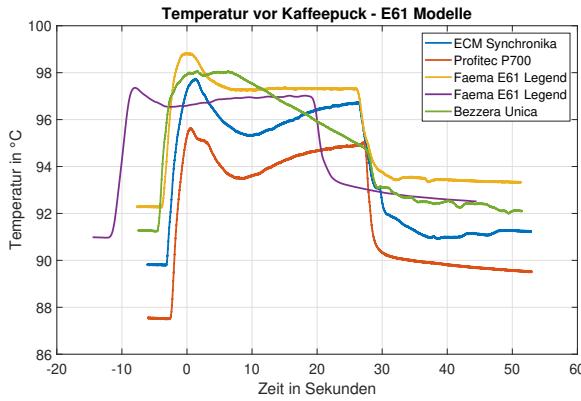
mulierten Wassermenge relevant. In Abbildung 7d sind die kummulierten Wassermengen aus den kalibrierten Kaffeebezügen im Vergleich visualisiert. Die vollen Linien zeigen die vom Flowmeter erfasste Wassermenge. Die in der gleichen Farbe dazugehörigen gestrichelten Linien stellen die von der Waage erfasste Wassermenge dar. Eine Farbe steht für ein Kaffeebezug. Es ist eine klare Differenz zwischen den beiden Messstellen zu sehen. Die Differenz aus den kummulierten Wassermengen an zwei Messtellen ergibt die vom Kaffeepuck aufgenommene Wassermenge. Die Vorgehensweise wird auf alle an der Maschine vermessenen Kaffeebezüge durchgeführt. Unabhängig davon, ob der SOLL-Verlauf korrekt gesteuert wird. Die Differenz der kummulierten Wassermenge ist in jedem Fall vorhanden. Aus allen Kaffeebezügen ergibt sich ein Durchschnittswert von 29 g Wasser. Dieser Wert bezieht sich auf die Verwendung des Testkaffees. Es wird erwartet, dass sich der Wert abhängig von der Bohnenart, Röststufe und Mahlgrad verändert.

#### B. Faema Modelle

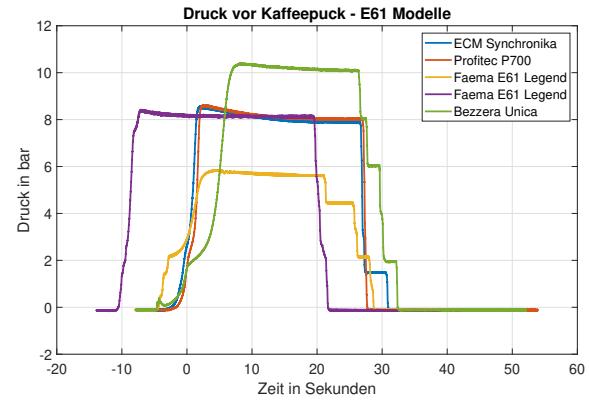
Für die Vermessung von Siebträgerespressomaschinen von Faema, stehen drei Maschinen zur Verfügung. Bei zwei dieser Maschinen handelt es sich um einen Nachbau der Originalen Faema E61 mit dem Namen Faema Legend aus dem Jahr 2001. Die dritte Maschine ist die Faema Emblema, welche mit einer Ringbrühgruppe ausgestattet ist.

Die Aufheizkurve wird nur von zwei der drei Maschinen erfasst, da eine Maschine zu Messbeginn bereits betriebsbereit vorzufinden ist. In Abbildung 8a sind die Aufheizverhalten dargestellt. Die orangefarbenen Linien gehören beide zu der Faema Legend. Dort wird mit dem IR-Sensor und mit dem NTC in der Brühgruppe parallel gemessen. Zu Beginn steigt die Temperatur der Boileroberfläche stark an auf etwa 67 °C und pendelt sich anschließend mit einem Zig-Zag Verhalten bei der Temperatur ein. Die Temperatur der Brühgruppe hat nach etwa 20 Minuten den steilsten Anstieg und läuft auf 92 °C zu. Vergleicht man die Aufheizkurve der Faema Emblema mit den vorherigen, fällt auf, dass diese kein Plateau bildet. Nach über 80 Minuten wird die Messung aus zeitlichen Gründen abgebrochen. Bei der Erfassung des Aufheizverhaltens wird auf das Durchspülen mit heißem Wasser verzichtet. Dies führt zum beschleunigten Aufwärmenden der Brühgruppe und reduziert somit die Zeit. Die Faema Emblema wird laut Verwender mit dem Durchspülen aufgeheizt, bis die Brühgruppe betriebsbereit ist.

Die Vermessung von Kaffeebezügen der Faema Modelle zeigt, dass sich die Temperaturverläufe vor dem Kaffeepuck in Form und Werten unterscheiden. Die beiden Faema Legends zeigen einen ähnlichen Ablauf, der zeitlich versetzt ist. Die Faema Emblema benötigt die Brühgruppenerweiterung und zeigt dadurch einen Startpunkt bei 55 °C auf. Der Einsatz der Brühgruppenerweiterung hat den Nachteil, dass selbst nach



(a) Temperatur vor Kaffeebezug - Vergleich E61



(b) Druck vor Kaffeebezug - Vergleich E61

Abbildung 9: Vergleich der Parameter vor dem Kaffeebezug bei E61 Maschinen

dem Durchspülen mit heißem Wasser, die Wärme durch das Rohrstück an die Außenumgebung abgegeben wird. In der Brühgruppe liegt die Temperatur bei etwa 90 °C, bevor das Brühwasser durchfließt. Die Temperatur am Siebträgerauslauf liegt bei der ersten Faema Legend am höchsten bei 90 °C. Dort besteht bei der Vermessung die Problematik, dass die feinste Stufe der Kaffeemühle nicht ausreichend war, um die angestrebte Durchflussrate von 2 ml/s zu liefern. Die feinste Stufe ergibt eine Durchflussrate knapp über dem tolerierten Bereich mit einem Wert von 2,4 ml/s. Durch die erhöhte Durchflussrate fließt das Brühwasser schneller durch den Kaffeebezug, was zu einem steileren Anstieg der Kaffeetemperatur führt.

Besonders interessant sind die Druckverläufe in Abbildung 8d. Die E61 mit dem blauen Verlauf zeigt den typischen Verlauf der E61-Brühgruppe. Es wird 5 Sekunden abgezählt, bis der Kaffeebezug gestartet wird. Anschließend steigt der Druck auf knapp über 2 bar an und springt anschließend auf knapp 6 bar. Der erste Druckanstieg deutet auf das Füllen der Brühkammer hin. Ist die Kammer voll, so steigt der Druck schlagartig auf den Brühdruck, der durch den Widerstand des Kaffeebeckens erzeugt wird. Nach 30 Sekunden wird der Kaffeebezug beendet und der Druck wird durch das Entlüftungsventil zurückgesetzt. Der orange Verlauf zeigt eine nicht so stark ausgeprägte Preinfusion. Direkt nach Start der Maschine steigt der Druck auf 2 bar an und anschließend direkt auf über 8 bar. Es wird vermutet, dass bei der Maschine das Wasser mit höherer Geschwindigkeit befördert wird und somit die Brühkammer schneller gefüllt ist. Der nE61-Faema Emblema sind zwei Verläufe zugeteilt. Der untere Verlauf zeigt den Druck während des Kaffeebezugs unter Verwendung einer Fehlröstung. Diese ist nicht vollständig durchgeröstet und weist erhöhte Härte auf. Nach Ersetzen der Fehlröstung mit einem Trinkkaffee, steigt der Druck auf 4,5 bar an. Aus zeitlichen Gründen ist die erneute Einstellung der optimalen Durchflussrate beim Trinkkaffee nicht möglich. Daher wird der Standard-Mahlgrad des Verwenders benutzt. Der Mahlgrad ist nicht auf die Faema Emblema angepasst und zeigt daher weiterhin einen zu geringen Druck. Damit ein optimaler Druckverlauf gemessen wird, muss der Mahlgrad des Trinkkaffees angepasst werden. Die Untersuchung des Drucks bei der Emblema muss mit

einer neuen Charge Testkaffee und eingestelltem Mahlgrad wiederholt werden. Durch den daraus resultierenden erhöhten Durchfluss ist es nicht möglich den Druck am Kaffeebezug auf den angestrebten Bereich von 8 bis 9 bar zu erreichen.

### C. weitere Maschinen

Neben dem Ursprungsmodell von Faema, werden Maschinen mit weiterentwickelten E61-Brühgruppe vermessen. Hierzu zählt die Profitec P700 und die ECM Synchronika. Das Aufheizverhalten an der Synchronika wird abgebrochen, da die GUI während der Messung eingefroren ist.

Die genannten Maschinen zeigen, wie die Faema E61, das Merkmal einer E61 Brühgruppe und ein Vergleich modernerer Modelle zum Ursprungsmodell bietet sich an. In Abbildung 9 sind die Parameterverläufe vor dem Kaffeebezug visualisiert. Bei den Temperaturen in Abbildung 9a fällt auf, dass die ECM und Profitec die gleiche Form des Verlaufs aufweisen. Lediglich eine konstante Temperaturdifferenz von knapp 3 °C ist festzustellen. Die zwei Faema Legends zeigen zu Beginn der Verläufe ebenfalls eine Temperaturerhöhung. Anschließend, im Vergleich zu den moderneren Varianten, bleibt die Temperatur relativ konstant. Die Temperaturen der Profitec und ECM zeigen ein stärkeres Abfallen auf. Das Minimum wird zum gleichen Zeitpunkt erreicht und anschließend ist ein langsames Steigen der Temperaturen festzustellen. Der Verlauf der Bezzera Unica unterscheidet sich insofern, dass die Temperatur zu Beginn konstant bleibt und über den Kaffeebezug abfällt.

Ein Blick auf die Druckverläufe im Vergleich (Abbildung 9b) zeigt, dass die modernen Varianten mit einem nahezu identischen Druckverlauf arbeiten. Die Bezzera und der gelbe Verlauf der Legend zeigen einen ausgeprägten Preinfusions-Prozess. Der lila Verlauf der zweiten Legend ist weiter nach links verschoben. Das hat den Grund, dass der Kaffee nach einer Verzögerung von etwa 14 Sekunden in die Schale tropft. Als Ursache wird eine defekte Pumpe bzw. reduzierte Pumpenleistung vermutet. Bei genauerer Betrachtung der Verläufe mit Preinfusion Charakter ist zu bemerken, dass der Kaffee in dem Moment anfängt in den Behälter zu tropfen, wenn der Knick zum nächsten Anstieg vorliegt. Lediglich bei dem

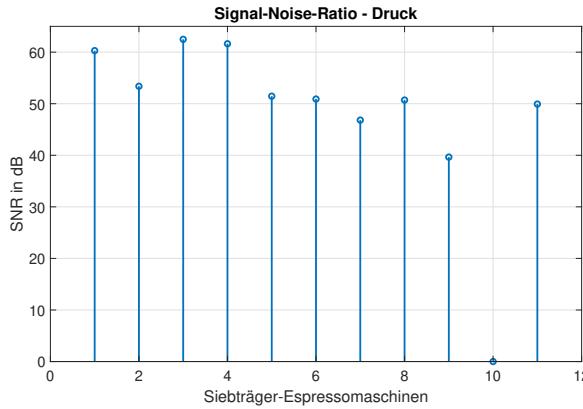


Abbildung 10: SNR Drucksensor

gelben Verlauf der Faema Legend liegt der Startzeitpunkt nach dem Knick, aufgrund der Problematik bei dem zu grob gemahlenen Kaffees.

Ursprünglich ist die Vermessung der im Labor vorhandenen Gaggia TE geplant. Während der Vermessung ist der Testkaffee ausgegangen und es wird versucht mit der Fehlröstung zu testen. Das Mahlen der Fehlröstung zeigt sich als problematisch, da die Bohnen zu fest sind, um gemahlen zu werden. Die Bohnen verfangen sich in den Mahlscheiben und der Überlastschutz der Mühle greift. Die Mahlscheiben müssen demontiert und gesäubert werden. Anschließend muss der Nullpunkt der Mahlscheiben neu eingestellt werden. Hierzu wird der Punkt gesucht an dem sich die Mahlscheiben berühren. Die Mahlscheiben müssen nur minimal getrennt werden, sodass sie sich gerade so nicht berühren. Dies ist der Nullpunkt der Mühle. Da im Laufe der Vermessungen der Testkaffee ausgegangen ist, wird beschlossen die Kaffeebezüge der Gaggia von der Vermessung auszuschließen. Das Aufheizverhalten der Gaggia TE zeigt nach etwa 30 Minuten ein Plateau.

## 5. SIGNALANALYSE DER MESSDATEN

Die aus der Messung von Siebträgerespressomaschinen gewonnenen Daten dienen nicht nur dem direkten Vergleich der Maschinen, sondern bilden auch die Grundlage für weiterführende Analysen. Um einen aussagekräftigen Vergleich der Maschinen zu ermöglichen, werden die Parameterverläufe systematisch aufbereitet. Neben diesem Vergleich wird auch eine detaillierte Untersuchung auf Signalebene angestrebt. Der erste Schritt der Signalanalyse konzentriert sich auf die Bewertung der Signalqualität. Diese Analyse ist entscheidend, um sicherzustellen, dass die erfassten Messwerte eine ausreichende Präzision und Zuverlässigkeit bieten, um als Grundlage für weiterführende Untersuchungen zu dienen. Eine hohe Signalqualität ist unerlässlich, um Verzerrungen und fehlerhafte Interpretationen der Daten zu vermeiden. Zur Verbesserung der Signalqualität werden Methoden zur Rauschunterdrückung sowie zur Identifikation potenzieller Störquellen angewendet. Die Untersuchung der Signalqualität erfolgt insbesondere für die Parameter während des Kaffeebezug, einschließlich der Temperaturen am Siebträgerauslauf, vor dem Kaffeepuck und

am Eckstück. Zusätzlich wird das Drucksignal bewertet. Für das Flowmeter ist eine Signalqualitätsanalyse jedoch nicht möglich, da nur die interpolierten Durchflussraten gespeichert werden. Zur Beurteilung der Qualität sind die Rohdaten erforderlich. Die Bewertung der Signalqualität erfolgt mittels der Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)-Analyse. Das SNR ist ein Maß für die Qualität eines Signals im Vergleich zum Hintergrundrauschen und quantifiziert, wie stark das Signal gegenüber dem Rauschen ausgeprägt ist, das während der Signalübertragung oder -fassung vorhanden ist. Mathematisch wird das SNR als Verhältnis der Signalstärke zur Rauschstärke definiert. In MATLAB wird dies durch die Funktion `snr(data, data - smoothedData)` durchgeführt. Hierbei wird der originale Messwertverlauf als `data` verwendet, während die geglätteten Daten mit der `smooth`-Funktion, die einen gleitenden Median über drei Messwerte berechnet, als `smoothedData` gespeichert werden. Das berechnete SNR stellt das Verhältnis der Signal- zur Rauschleistung in logarithmischer Einheit dar, was eine präzise Beschreibung des Signal-Rausch-Verhältnisses ermöglicht. [PM07]

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Rauschen}}} \right) \quad (2)$$

Für die Berechnung der Signalqualität werden pro Kaffeemaschine die gemittelten Verläufe des jeweiligen Parameters verwendet. Daraus ergeben sich pro Parameter 10 SNR-Werte. In Abbildung 10 sind die 10 SNR-Werte der gemittelten Druckverläufe der Kaffeemaschinen dargestellt. Die Maschinen 1 bis 4 sind Dalla Corte Minas, während 5 die Profitec und 6 die ECM repräsentiert. Die Signalqualität der Druckmessung ist bei den ersten vier Maschinen höher als bei den nachfolgenden Maschinen. Es wird vermutet, dass dies mit der Verwendung der Brühgruppenerweiterung zusammenhängt. Die Nummer 9 stellt die Faema Emblema dar, welche ebenfalls eine nE61 ist und die Brühgruppenerweiterung benötigt. Da dort die Vermessung mit einer Fehlröstung durchgeführt wurde, ist dieser Wert als nicht aussagekräftig zu bewerten. Es ist daher zu sagen, dass die Qualität des Drucksignals bei den nE61 höher ist als bei den E61-Maschinen. Eine mögliche Ursache dafür stellt die im Signal vorkommende Schwingung dar. Bei einer E61 wird der Drucksensor direkt in die Brühgruppe verschraubt und die beim Kaffeebezug auftretenden Schwin-

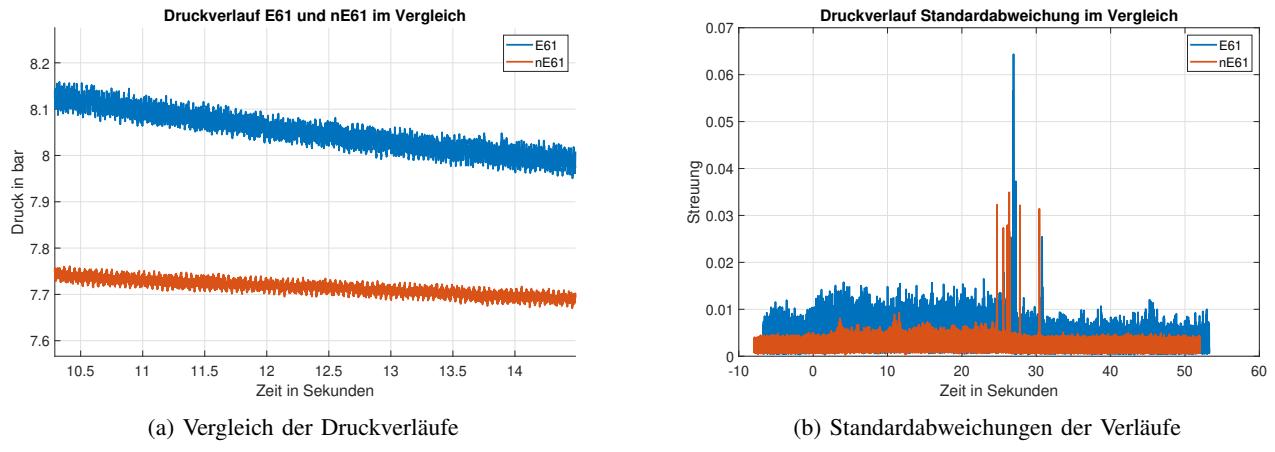


Abbildung 11: Vergleich der Druckverläufe von E61 und nE61

gungen werden im Signal wahrgenommen. Lediglich beim Druck ist eine Differenz im SNR-Wert abhängig von der Brühgruppenart wahrzunehmen. Bei den Temperaturen ist die Signalqualität bei allen Siebträgerespressomaschinen als gleichmäßig zu bezeichnen. Da hier die Signalqualität des Sensors in Kombination mit dem Mess-System bewertet wird, werden die berechneten SNR-Werte pro Parameter gemittelt. Die Werte sind in Tabelle IV vorzufinden. Die Signal-Rausch-

Tabelle IV: Gemittelte Signal-Noise-Ratios der Sensoren

Sensor	Auslauf	vor KP E61	vor KP nE61	Ecke	Druck
Kanal	CH00	CH02	CH02	CH03	CH11
SNR in dB	61.7	71.1	65.4	68.3	52.7

Verhältnisse (SNR) werden in Dezibel (dB) angegeben, wobei höhere Werte eine bessere Signalqualität anzeigen. Um die SNR-Werte zu interpretieren und die Signalqualität präziser zu bewerten, wird empfohlen, die Umrechnung der dB-Werte aus Formel 2 in lineare Verhältnisse vorzunehmen. Dies ermöglicht eine genauere Quantifizierung der Signalstärke im Vergleich zum Rauschpegel. Dieser lineare SNR-Wert bietet eine direkte Messgröße, die für weitere analytische und praktische Anwendungen von Vorteil ist. [MB13]

$$\text{SNR (linear)} = 10^{\frac{\text{SNR (dB)}}{10}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{SNR (linear)} &= 10^{\frac{50}{10}} \\ &= 10^5 \\ &= 100000 \end{aligned} \quad (4)$$

In Formel 3 wird der Zusammenhang zwischen logarithmischen und linearen Signal-Rausch-Verhältnissen dargestellt. Zur Veranschaulichung der Signalqualität wird der niedrigste gemessene SNR-Wert in seine lineare Form umgerechnet. Beispielsweise entspricht ein SNR-Wert von 50 dB einem linearen Verhältnis von 100000:1, was bedeutet, dass die Signalleistung um den Faktor 100000 höher ist als die des Rauschens. Dies deutet darauf hin, dass das Signal im Vergleich zum Rauschen äußerst klar und deutlich zu erkennen ist. [KW12] Aus Tabelle IV ist zu erkennen, dass das Signal des Sensors vor dem Kaffeebezug an E61

Maschinen die höchste Qualität zeigt. Der Sensor ist eine Eigenfertigung mit einem NTC-Element, welches lediglich mit einer Schicht Sekundenkleber überzogen ist. Die weiteren Temperatursensoren (Auslauf, vor KP nE61 und Ecke) sind NTCs von AVS Römer. Im Durchschnitt wird von AVS eine Signalqualität von 65.1 dB geliefert. Für die Druckerfassung werden zwei identische Drucksensoren von SEEED-Studio verwendet. Hier ist die Signalqualität mit einem Wert von knapp 53 dB immer noch als sehr gut zu bezeichnen, jedoch geringer als bei den Temperatursensoren. Aus der SNR-Analyse ist der aktuelle Aufbau des Mess-Systems mit den ausgewählten Sensoren als zuverlässig und präzise zu bewerten. Bei Implementierung neuer Sensoren wird empfohlen eine SNR-Analyse des Signals vorzunehmen.

Nachdem die Signalqualität der Sensoren als präzise bewertet wird, ist die Voraussetzung weiterer Analysen erfüllt. Die Überprüfung der Signalqualität zeigt bei der Druckmessung von E61 Maschinen einen geringeren SNR-Wert auf als bei den Dalla Corte Minas. Ein Vergleich der Rohdaten der Druckverläufe von E61 und nE61 in 11a zeigt, dass der blaue Verlauf eine höhere Streuung aufweist. Für die genaue Überprüfung wird die Methode der Standardabweichung verwendet. Da sich die Druckwerte über die Zeit stark verändern, ist die Anwendung der normalen Standardabweichung nicht aussagekräftig. Es wird beschlossen die gleitende Standardabweichung über die Zeit anzuwenden. In Abbildung 11b ist die Standardabweichung über jeweils 10 Werte über die Zeit dargestellt. Die Druckmessung fängt bei ausgeschalteter Maschine an. Nach 5 Sekunden wird der Kaffeebezug gestartet und nach etwa 8 Sekunden fängt der Druckanstieg an, welcher über den Kaffeebezug relativ konstant bleibt. Nach 30 Sekunden Bezugszeit wird der Prozess beendet. Die Systematik ist in dem Verlauf der Standardabweichungen zu erkennen. Bei 0 Sekunden wird der Startpunkt des Kaffeebezugs über das Gewicht der Kaffeeausflussmenge detektiert. Ab 0 Sekunden bis etwa 30 Sekunden sind in beiden Verläufen höhere Abweichungen berechnet, als vor und nach dem Kaffeebezug. Die Ausreißer bei etwa 30 Sekunden bilden sich aus den ungleichmäßig beendeten Kaffeebezügen und

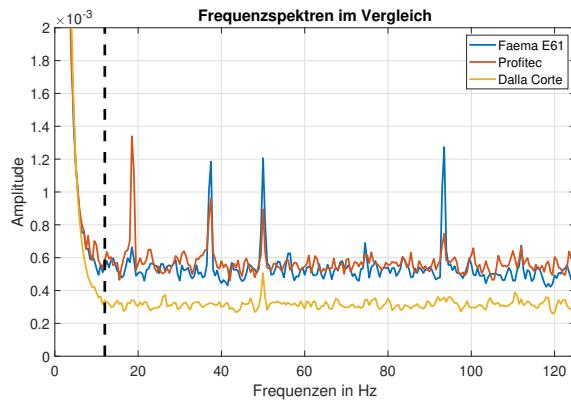
sind als irrelevant für diese Analyse zu betrachten. Es fällt auf, dass die Streuung bei einer E61-Kaffeemaschine höher ist als die der nE61-Maschine. Die Streuung ist jedoch nicht nur über den Kaffeebezug höher, sondern über den gesamten Verlauf. Aufgrund der hohen Signalqualität ist dies nicht als problematisch zu betrachten, jedoch wird empfohlen die Sensoren am Pumpenprüfstand einzubauen und auf Streuung zu überprüfen. In dem Fall ist die Verwendung identischer Testumgebung gegeben und es kann festgestellt werden, ob die erhöhte Streuung sensorspezifisch auftritt.

Die Inbetriebnahme der Waage wird an einer E61-Maschine durchgeführt. Erste Testmessungen zeigen, dass im Signal Schwingungen während des Kaffeebezugs erfasst werden. Die Schwingungen werden lediglich bei E61-Maschinen erkannt, da dort die Waage auf dem Abtropfblech platziert ist. Auf Grundlage dieser Erkenntnis gewinnt die Frequenzanalyse bei weiteren Sensoren an Bedeutung. Die Untersuchung auftretender Frequenzen wird auf die gemittelten Parameterverläufe von E61- und nE61-Maschinen durchgeführt. Die Frequenzanalyse bezieht sich ausschließlich auf die Verläufe der Temperatur und des Drucks vor dem Kaffeebecke. Bei einer E61-Maschine befindet sich während der Vermessung dort der Temperatur bzw. der Drucksensor. Bei einer nE61-Vermessung ist dies in der erweiterten Brühgruppe implementiert und es werden daher keine Schwingungen im Signal erwartet. Es werden explizit die zwei Messstellen betrachtet, da dort ein Signalvergleich abhängig zur Brühgruppenart gezogen werden kann. Als Ergebnis der Frequenzanalyse werden bei E61-Maschinen niederfrequente Schwingungen bis 100 Hz erwartet. Da der Druck mit einer Abtastrate von 30 kS/s erfasst wird, bedarf das Signal Vorbereitung für die Frequenzanalyse. Bei einer Untersuchung niederfrequenter Schwingungen ist es von Vorteil, die Abtastrate des Signals zu reduzieren. Um das Signal von der ursprünglichen Abtastrate von 30 kS/s auf die Zielabtastrate von 1 kS/s zu reduzieren, ist es notwendig, ein Downsampling durchzuführen. Dieses Downsampling reduziert die Anzahl der Abtastpunkte, indem es nur jeden 30. Datenpunkt des ursprünglichen Signals behält. Allerdings darf dieser Schritt nicht ohne eine vorherige Signalbearbeitung erfolgen, da das ursprüngliche Signal Frequenzanteile enthalten kann, die über der neuen Nyquist-Frequenz von 500 Hz liegen und zu Aliasing führen. Aliasing tritt auf, wenn Frequenzkomponenten oberhalb der halben Abtastrate nach dem Downsampling falsch dargestellt werden und in den niedrigeren Frequenzbereichen erscheinen. Um dies zu verhindern, muss vor dem Downsampling ein Anti-Aliasing-Filter angewendet werden. Dieser Filter ist ein Tiefpassfilter, der so ausgelegt ist, dass er Frequenzen oberhalb der neuen Nyquist-Frequenz (500 Hz) wirksam unterdrückt. Der Einsatz eines tiefpassigen Anti-Aliasing-Filters ist daher entscheidend, um sicherzustellen, dass die niederfrequenten Schwingungen präzise analysiert werden können, ohne durch unerwünschte Alias-Effekte gestört zu werden. Nach der Anwendung des Filters kann das Signal auf die Zielabtastrate von 1 kS/s heruntergesampelt werden, ohne dass es zu einer Verfälschung der im Signal enthaltenen

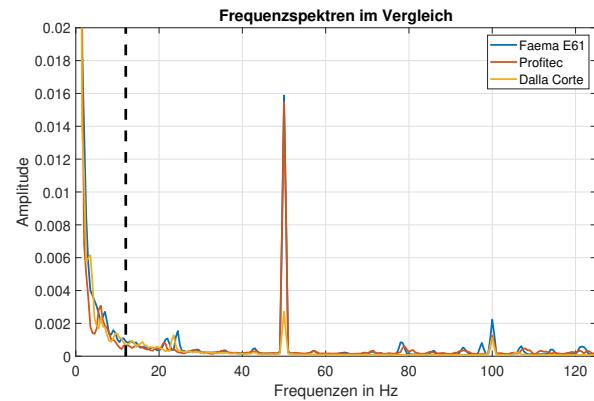
niederfrequenten Schwingungen kommt. [KR19]

Für die Signale der Temperatur vor dem Kaffeebecke ist die Vorbereitung nicht notwendig, da es mit einer Abtastrate  $f_s$  von 1 kS/s erfasst wird. Im Rahmen der Frequenzanalyse wird eine Frequenzauflösung  $f_d$  von 1/2 Hz angestrebt. Die dazu benötigte Blocklänge  $N$  ergibt sich aus der Division der Abtastrate  $f_s$  und Frequenzauslösung  $f_d$ , wobei das Ergebnis auf die nächstkleinere Ganzzahl gerundet wird. Um Randeffekte zu minimieren, wird auf die Blöcke ein Hanning-Fenster  $w$  mit einem Overlap  $o$  von 2/3 der Blocklänge angewendet. Durch die Überlappung wird die zeitliche Auflösung verbessert. Die Summe der Fensterkoeffizienten wird durch die Blocklänge geteilt, um den gemittelten Amplitudenwert  $FM$  zu berechnen. Die eigentliche Frequenzanalyse erfolgt mit der MATLAB Funktion  $[s, f, t, p] = spectrogram(data, w, o, N, fs)$ . Die Matrix  $s$  enthält die komplexen Spektren der einzelnen Zeitfenster des Signals. Jede Spalte von  $s$  repräsentiert das Frequenzspektrum für ein bestimmtes Zeitfenster, wodurch die Frequenzkomponenten des Signals über die Zeit detailliert dargestellt werden. Der Frequenzvektor  $f$  listet die Frequenzwerte auf, die den Zeilen der Spektrogramm-Matrix entsprechen. Er bietet eine gleichmäßige Verteilung der Frequenzen, die von 0 bis zur Nyquist-Frequenz reicht, und ermöglicht somit die Zuordnung der Frequenzkomponenten zu den Frequenzpunkten im Spektrogramm. Zur Berechnung des gemittelten Amplitudenwerts  $FM$  wird die Summe der Fensterkoeffizienten durch die Blocklänge geteilt. Dies dient der Normalisierung der Amplitudenwerte und verbessert die Interpretierbarkeit der Analyseergebnisse. Abbildung 12 zeigt die Frequenzspektren von Temperatur und Druck vor dem Kaffeebecke über drei Maschinen. In allen Fällen liegt bei 0 Hz die größte Amplitude vor, was als Gleichanteil definiert wird. Für die Betrachtung der auftretenden Frequenzen ist der Bereich ab der gestrichelten Linie, bei 12 Hz, relevant. Für die Interpretation der Frequenzanalyse werden bewusst die drei Maschinen Faema E61, Profitec und Dalla Corte ausgewählt. Vorherige Analysen haben gezeigt, dass die vier Dalla Corte Minas das gleiche Ergebnis von auftretenden Frequenzen liefern. Die Profitec repräsentiert neben der eigenen Maschine zusätzlich die ECM Synchronika aufgrund nahezu identischen Ergebnissen. Die Maschinen haben in den Parametern während des Kaffeebezugs hohe Überschneidungen gezeigt. Die Faema E61 wird zusätzlich ausgewählt, da es sich hierbei um die Siebträgerespressomaschine mit der Ursprungsbrühgruppe handelt.

Die Abbildung mit dem Frequenzspektrum für den Temperatur vor dem Kaffeebecke (Abb. 12a) zeigt, dass bei 50 Hz alle Kategorien einen Peak aufweisen. Die E61 Modelle zeigen zusätzliche Peaks bei etwa 18 Hz und dem doppelten Wert. Es ist zu beachten, dass bei der Vermessung von Dalla Corte ein anderer Sensor vor dem Kaffeebecke verwendet wird. Die Verwendung unterschiedlicher Sensorik lässt sich durch die durchschnittliche Amplitudenstärke erklären. Die gelben Amplituden bei Dalla Corte Vermessungen liegen bei einer Stärke von etwa 0.3 während bei nE61 die Amplituden bei etwa 0.6 liegen. In Abbildung 12b ist das Frequenzspektrum



(a) Frequenzspektren Temperatursignal im Vergleich



(b) Frequenzspektren Drucksignal im Vergleich

Abbildung 12: Vergleich der Signalspektren von E61 und nE61

für das Signal des Drucksensors dargestellt. Es ist ein deutlicher Peak bei 50 Hz für alle drei Kategorien zu erkennen, wobei das Signal bei der Faema E61 die höchste Amplitude aufzeigt und knapp darunter von den moderneren E61-Maschinen gefolgt. Bei den Signalen der Dalla Corte Minas ist die geringste Amplitude von 50 Hz zu erkennen. Aus den Frequenzanalysen folgt die Erkenntnis, dass in allen Fällen ein Peak bei 50 Hz festzustellen ist, welcher auf den Betrieb der verbauten Pumpe zurückzuführen ist. Der Wert entspricht ebenfalls der Netzfrequenz, welcher der Ursprung der Frequenz ist damit nicht eindeutig zuweisbar. Eine Erklärung für die bei E61-Modellen auftretende 18 Hz im Temperatursignal stellt die mechanischen Schwingungen von Komponenten während des Kaffeebezug dar.

## 6. OPTIMIERUNGSMASSNAHMEN

Im Laufe der Vermessungen werden Erkenntnisse gesammelt, um das Mess-System und den Vermessungsprozess zu optimieren. In dieser Vermessungsreihe steht der Fokus auf das Erfassen erster Messdaten und die Identifizierung der dabei auftretenden Herausforderungen. Während der Vermessung kristallisieren sich Optimierungen in Sensorik, Software, Hardware, Elektronik und Analyse heraus.

**Sensorik** - Die Sensorik funktioniert einwandfrei und zuverlässig. Lediglich bei der Waage ist eine Verschiebung des Nullpunktes über die Zeit aufgefallen. Zu Beginn jeder Messung wird der leere Behälter auf die Waage gesetzt. Da der Behälter ein konstantes Gewicht hat, muss zu Beginn jedes Waageverlaufs der gleiche Wert gemessen werden. Für die Berechnung der Durchflussrate ist dies nicht relevant, da die Differenz zwischen Start- und Endzeitpunkt verwendet wird. Mit einer erneuten Kalibrierung und Aufbereitung einer Kalibrierkurve muss das Verhalten beobachtet werden. Es wird empfohlen den Prozess der Kalibrierung in regelmäßigen Abständen durchzuführen.

Bei der Vermessung von E61 Maschinen wird der eigengefertigte NTC Sensor verwendet. Dieser ist mit X60 in einen Edelstahladapter geklebt. Bei den Messungen entsteht ein Druck von bis zu 10 bar. Hierbei ist aufgefallen, dass

durch den getrockneten Kleber Wassertropfen austreten. Es wird empfohlen den Sensor mit einem etwas zäheren Klebstoff neu zu fertigen z.B. Loctite 9480. Der Sensor für die Erfassung der Temperatur vor dem Kaffeepuck (E61) ist in der Länge anzupassen. Bei der Vermessung der Faema Legend ist aufgefallen, dass der Sensor zu lang ist und somit den Wasserzulauf zum Kaffeepuck blockiert. Der Adapter hat ein M6 Außengewinde, welches in die Brühgruppe eingeschraubt wird. Die Länge des Edelstahl Adapters wird anhand eines E61 Brühgruppen Querschnitts ausgelegt. Bei Faema Modelle fließt bei vollständigem Einschrauben des Sensors kein Wasser aus der Maschine. Durch leichtes Aufschrauben ist ein Wasserfluss zu bemerken. Bei leichtem Aufschrauben ist die Dichtheit nicht gewährleistet und Wasser fließt während des Kaffeebezug aus der Messstelle. Es wird empfohlen die Länge der Bohrungstiefe zu überprüfen und für Faema Modelle einen neuen Sensor auszulegen. Bei den moderneren E61-Maschinen wird das Problem nicht festgestellt. Die Erkenntnis lässt auf eine unterschiedliche Bohrungstiefe der E61-Messstelle schließen. Da die Bohrung zum Kaffeepuck nicht bei jeder E61 gleich lang ist, muss herausgefunden werden, welche Länge als optimal zu betrachten ist. Eine Lösung ist das Verkürzen des Gewindes oder den Adapter mit einem Absatz geringeren Durchmessers zu fertigen. Beim Kürzen der Gewindestange muss beachtet werden, dass der Sensor folglich weiter herausragt. Alternativ ist die Verwendung eines dünnen Röhrchens oder Schrumpfschlauch möglich, sodass nur die Sensorspitze frei ist. Die Sensorspitze wird mit einer dünnen Schicht Sekundenkleber überzogen, um Schutz zu gewährleisten.

Für die Platzierung des IR-Sensors wird zu Beginn ein Mikrofonständer verwendet. Dieser zeigt sich als sperrig im Transport und bei der Verwendung in den Röstereien. Durch den eingeschränkten zur Verfügung gestellten Raum muss eine kompaktere Lösung verwendet werden. Aktuell ist die Verwendung eines Mikrofonhalters mit flexiblem Hals eingesetzt. Diese zeigt sich als besonders hilfreich, da eine individuelle Positionierung des IR-Sensors möglich ist. Der Nachteil der aktuellen Konstruktion ist, dass durch das Gewinde eine Positionierung mit Drehbewegung in die gewünschte

Richtung nicht möglich ist, da die Schraubverbindung löst. Es bietet sich an, die Systematik des Halters beizubehalten, jedoch neu zu konstruieren. Durch den Einsatz eines längeren Schwanenhals z.B. 490 mm ist eine leichtere Positionierung in die gewünschte Position möglich. Die Mikrofonhalter haben an einem Ende für das Adaptieren des Mikrofons ein 3/8" Gewinde. Mit einem Adapter ist es möglich den IR-Sensor dort festzukleben, sodass sich das Gewinde bei Positionierung nicht lösen kann. Bei einem Fotografie Online Shop (Novoflex) sind Schwanenhäuse, Universalklemmen und Kugelneiger vorhanden. Der Einsatz eines Kugelneigers erleichtert die Positionierung durch die Zulässige Bewegung der Neigung, die stabilisiert werden kann.

Mit der Signalanalyse wird ein Unterschied in der Streuung der Messwerte von E61 und nE61 Maschinen festgestellt. Es wird empfohlen die nE61 und E61 Sensoren in den entsprechenden Strang am Prüfstand zu implementieren und die Pumpe laufen zu lassen. Hier erfahren die Sensoren eine identische Testumgebung und Last, in welcher die Qualität und Streuung gegenübergestellt werden kann. Die Überprüfung kann mit einer konstanten Pumpendrehzahl oder einem definierten Verlauf durchgeführt werden. Für die numerische Bewertung bietet sich in beiden Fällen die Standardabweichung an, da die Sensoren den identischen Verlauf erfahren und somit ein direkter Vergleich möglich ist.

Für die Messung mit der Waage muss untersucht werden, ob eine weitere Möglichkeit der Messkette realisierbar ist. Hierzu muss das Maximalgewicht der Last festgestellt werden. Für die ausschließliche Verwendung des Kunststoffbehälters wird bei Kaffeebezügen eine Last von 100 g ermittelt. Während der Einstellung des Mahlgrads und der optimalen Durchflussmenge sind höhere Werte möglich. Eine Wägezelle mit einem Messbereich bis zu 300 g wird daher als ausreichend erachtet. Die Wägezelle hat einen Nennkennwert von 1 mV/V. Bei 5 V Betriebsspannung steigt der Wert auf 5 mV an. Die Spannungswerte im Millivolt Bereich sind zu gering, um von den Messkarten erfasst zu werden und anschließend präzise umzuwandeln. Die Ausgangsspannung der Brückenspannung müssen auf einen Messbereich bis 5000 mV hochskaliert werden. Mit dem Instrumentenverstärker INA128 ist eine Verstärkung des Ausgangssignals möglich. Die Entscheidung, ob der Aufbau sinnvoll ist, hängt von der Auflösung ab.

$$HX = \frac{800 \text{ g}}{2^{23}} = 0.0000477 \text{ g} \quad (5)$$

$$\text{neu} = \frac{300 \text{ g}}{2^{15}} = 0.00916 \text{ g} \quad (6)$$

In Formel 5 ist die aktuell verwendete Konfiguration des Messaufbaus mit Einsatz des HX711 Bausteins dargestellt, welcher mit einem 24-Bit AD-Wandler arbeitet. Die Berechnung der Auflösung ergibt sich aus dem Messbereich dividiert durch die Bit des AD-Wandlers, wobei das erste Bit als Vorzeichen Bit zu sehen ist. Die Formel 6 zeigt die Auflösung der alternativen Messkette. Die aktuelle Auflösung ist als präziser zu bezeichnen, jedoch ist der Wert aus Formel 6 ebenfalls als ausreichend genau zu erachten.

**Software** - Das Mess-Syststem ist softwareseitig in Python und MATLAB aufgeteilt. Während über MATLAB die Steuerung und Datenaufbereitung stattfindet, ist Python für die Konfiguration der Messkarten und des Mess-Prozesses zuständig. Die Python Skripte für die Messung des Aufheizverhaltens und der Kaffeebezüge umfassen den Einsatz komplexer Zusammenhänge der verwendeten Bibliothek. Es wird empfohlen die Skripte nicht zu verändern. MATLAB-seitig gibt es Optimierungen, welche für weiterführende Analysen sinnvoll umzusetzen sind. Das Mess-System wird bei Dinzler mehrere Stunden am Stück verwendet. An der zweiten Maschine, der ECM Synchronika, ist die GUI bei Erfassung des Aufheizverhaltens eingefroren und die Aufnahme des Heat-Ups musste somit abgebrochen werden. Bis zu dem Zeitpunkt wurden alle Aufheizkurven mit einer Abtastrate von 1 Hz aufgezeichnet. Anschließend wird nur noch mit einer Abtastrate von ½ Hz gemessen. Es wird empfohlen dieses als Standardfrequenz zu setzen und die Option mit dem DropDown zur Auswahl entfernen.

Zu Beginn jeder neuen Siebträgerespressomaschine muss der Mahlgrad neu eingestellt werden. Dies ist ein zeitaufwendiger Prozess, bis die angestrebte Durchflussrate über die Waage 2 ml/s erreicht ist. Hierfür wird ein Kaffee bezogen und anschließend aus zwei markierten Punkten im Graph des Waageverlaufs die Durchflussrate manuell berechnet. Es bietet sich an den Prozess zu automatisieren mit Orientierung an der Vorgehensweise in den Aufbereitungsskripten. Die Rohdaten der Waage müssen erst von Ausreißern eliminiert und anschließend geglättet werden. Mit MATLAB Befehlen ist das Finden von ChangePoints möglich. Aus den ChangePoints ist die automatische Berechnung der Durchflussrate möglich. Es wird empfohlen in der GUI einen neuen Tab zu erstellen, welcher diese Funktion umsetzt. Für die Überprüfung der Richtigkeit der ChangePoint Erkennung, bietet sich die graphische Markierung im Graph an. So kann entschieden werden, ob die berechnete Durchflussrate korrekt ist, oder ob manuell nachgerechnet werden muss. Aus den Aufbereitungen der Messdaten ist zu folgern, dass mit der Methodik eine hohe Wahrscheinlichkeit für valide Ergebnisse vorliegt.

Im Code der GUI sind zwei Funktionen für die Umwandlung der Spannungswerte in physikalische Werte vorhanden. Eine Funktion umfasst die Umwandlung der Messwerte für das Aufheizverhalten, die zweite für die Kaffeebezüge (Shots). Auf der Elektronikplatine ist die Signalkonditionierung für den Kanal CH01 defekt. Daher werden die Sensoren für die Temperaturen vor dem Kaffeepuck für E61 und nE61 auf den Kanal CH02 zusammengelegt. Damit die Verwendung von beiden Sensoren möglich ist, muss der Code angepasst werden. Da entweder die Vermessung von E61 oder nE61-Maschinen vorliegt, ist das Beibehalten dieser Option sinnvoll. Für den Fall des Zurücksetzen auf den Ausgangszustand, also mit getrennten Kanälen, muss der Code entsprechend angepasst werden. Durch die ButtonGroup zur Auswahl der vorliegenden Brühgruppe wird bestimmt, welche Kalibrierkurve dem Kanal CH02 zugewiesen wird. Bei Trennen der Kanäle muss die Unterscheidung herausgenommen werden und jedem Kanal wird in der StartUp Function individuell eine Kalibrierkurve zugewiesen. Für das Visualisieren der Messwerte vor dem

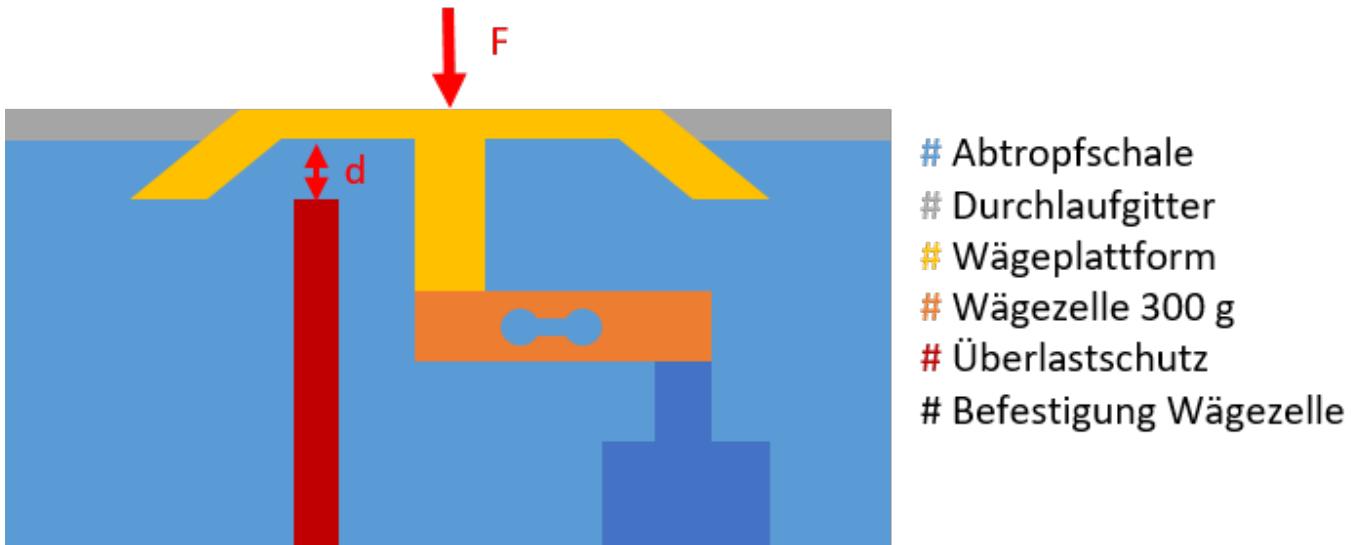


Abbildung 13: Konzept für ein Halteblech mit integrierter Waage

Kaffeepuck ist die Anpassung der Funktionen `shotPlot` und `customPlot` wichtig. Aktuell wird mit einer if-Bedingung unterschieden, ob die Visualisierung einer E61 oder nE61 vorliegt. Zuletzt muss bei der Datenspeicherung der Temperatur vor dem Kaffeepuck für E61 die dritte statt der vierten Spalte zugewiesen werden.

Für die vereinfachte Datenaufbereitung macht es Sinn die Struktur des Abspeicherns weiter auszuführen. Es ist sinnvoll zu überprüfen, ob bei gleicher Maschine auch der gleiche Standort bereits vorliegt. Wenn nicht, wird ein neuer Unterordner erstellt mit dem Namen des Standorts. Daraus ergibt sich ein Dateipfad mit z.B. C:/0\_Messsystem/Data/Gaggia TE/Labor. Die Nomenklatur einer Messung zeigt sich als hilfreicher, wenn nach dem Zeitstempel das Schlagwort 'Heatup' oder 'Shot' erscheint. So ist das Auswählen der Dateien bei der Aufbereitung einfacher gestaltet und der Index zur Iteration kann bei  $xi = 1$  starten.

Das Erfassen erster Messwerte der Durchflussrate zeigt sich als interessant und bietet tiefgreifendere Analysemöglichkeiten. Aktuell werden die Messwerte des Flowmeters in aufbereiteter und interpolierter Form abgespeichert. Beim Flowmeter macht es durchaus Sinn die Messwerte in Form von Rohdaten abzuspeichern und nachträglich aufzubereiten. Die Auswahl eines optimalen Grads des Polynoms bei der Interpolation der Messwerte hängt immer von dem vorliegenden Verlauf ab. Da der Flowverlauf bei der Dalla Corte Mina benutzerdefiniert ist, kann eine Festlegung des Polynomgrad innerhalb der Interpolation nicht stattfinden. Je nach Verlauf unterscheidet sich die Aufbereitung und die Auswahl des Polynoms. Die aktuelle Verwendung des Polynoms 5. Grades beim Basic Fitting zeigt starke Schwankungen des Flowverlaufs, wodurch die Beurteilung der Abweichung zum SOLL-Verlauf als schwierig gilt. Langfristig muss eine Datenaufbereitung in die GUI implementiert werden. Hierzu bietet es sich an am Pumpenprüfstand die bekannten Profile der Flowverläufe der Dalla Corte Minas abzubilden und eine passende

Signalverarbeitung für die Signale zu entwickeln. Mit einer leistungsgeregelten Pumpe ist es möglich die Profile zu programmieren und automatisch ablaufen zu lassen.

**Hardware** - Das Mess-System muss auf Seiten der Hardware ebenfalls optimiert werden. Die Verwendung der Brühgruppenerweiterung bei nE61 Siebträgerespressomaschinen muss in mehreren Punkten weiterentwickelt werden. Die Brühgruppenerweiterung besteht aus einem Halteblech, dem gedruckten Brühgruppeneinsatz und einer Siebträgeraufnahme aus Messing. Die Brühgruppe ist mit dem Halteblech über vier Schrauben verbunden. Durch das Halteblech ist der Drucksensor und der ELSA Anschluss mit dem Brühgruppeneinsatz verklebt. Während eines Kaffeebezug entsteht ein Druck von etwa 9 bar, welchen das System aushalten muss. In der Verbindung zwischen Halteplatte und Brühgruppeneinsatz ist ein Leck zu bemerken, dass durch Sammeln von Wasser an der Oberfläche der Halteplatte zu erkennen ist. Es wird vermutet, dass das Leck in den Klebeverbindungen liegt. Der ELSA Anschluss hat ein kurzes M5 Gewinde, welches nicht viel Fläche zum Kleben zur Verfügung stellt. Es wird empfohlen den Brühgruppeneinsatz so zu konstruieren, dass eine ELSA Einschraubverbindung mit einem G 1/8" Gewinde verklebt werden kann. Aktuell wird die Brühgruppe von der Glasboiler Maschine verwendet mit geringfügiger Abweichung der Bohrungen für die Sensoren. Bei Neukonstruktion des Brühgruppeneinsatzes, muss die Halteplatte bearbeitet werden. Die mittige Bohrung muss entsprechend aufgebohrt werden, sodass eine gerade Einschraubverbindung herausragt. Weiter muss versucht werden die Klebeverbindung des Drucksensors zu lösen. Eine weitere Option stellt das Aufbohren der Bohrung für den Drucksensor dar. Der Messingadapter des Drucksensors muss nicht auf der Halteplatte aufliegen und kann direkt mit der Brühgruppe aus Kunststoff verklebt werden. Die Siebträgeraufnahme aus Messing kann weiterhin verwendet werden. Diese ist mit 12 Schrauben mit der

Halteplatte verschraubt. Für die optimale Vermessung gehört die Verwendung einer passenden Abtropfschale.

In Abbildung 13 ist ein Konzept einer zu entwickelnden Abtropfschale dargestellt. Auf der Schale liegt ein Gitter drauf, wo die Abtropfflüssigkeiten durchlaufen. Das Gitter hat eine Aussparung für eine Wägeplattform, die mit einem 3D-Drucker hergestellt wird. Die Plattform hat an den Enden Flügel, sodass die Flüssigkeiten nicht direkt auf die Wägezelle tropfen. Die Plattform liegt direkt auf der Wägezelle auf, sodass diese die Kaffeeauslaufmenge erfassen kann. Für das Dehnen der Dehnungsmessstreifen (DMS), muss die Wägezelle am anderen Ende fest verbunden werden. Hierfür wird ein Block für die Befestigung an die Schale von innen geschraubt. Der Block muss steif sein, hierbei eignet sich der Einsatz eines Metallblocks. Die Wägezelle ist nur für einen bestimmten Messbereich vorgesehen und benötigt einen Überlastschutz, um den maximalen Messbereich nicht zu überschreiten. Es muss die maximale Verschiebung in z-Richtung ermittelt werden und ein Überlastschutz konstruiert werden. Der Überlastschutz kann sowohl auf der Unterseite der Wägezelle, als auch unter der Wägeplattform konzipiert werden. In dem Fall ist der Überlastschutz in Form von Säulen unter der Wägeplattform dargestellt. Diese verhindern das Überschreiten der maximalen Verschiebung in z-Richtung. Optimalerweise werden mehrere Schutzsäulen eingesetzt, sodass die Wägezelle vor Flüssigkeit geschützt ist. In der Abbildung fehlt ein Sammelbehälter, welcher in der Mitte eine Aussparung haben muss, da dort die Sensorik verbaut ist. Es bietet sich an, diesen über das 3D-Druck Verfahren zu fertigen. Die Abtropfschale muss mit der Brühgruppenerweiterung verbunden werden. Dazu ist der Einsatz der aktuell verwendeten Füße des Systems möglich. Der Abstand zwischen dem Abtropfblech und der Brühgruppenerweiterung muss so angepasst werden, dass genug Platz für den Behälter und das komfortable Ein- und Aussetzen des Siebträgers vorliegt. Das Konzept hat den Vorteil, dass die Waage in der Abtropfschale integriert ist und die Waage geschützt ist. Die Kompaktheit des Mess-Systems gewinnt dadurch an Wert und ein sauberes Vermessen von Kaffeebezügen ist möglich. Allgemein besteht der Appell eine Abtropfschale für das Mess-System zu verwenden, da nach dem Kaffeebezug einige Tropfen Kaffee auslaufen. Die Kombination einer Abtropfschale mit Messfunktion gibt der empfindlichen Wägezelle Schutz und ein Überlasten während dem Transport ist nicht möglich. Hier kann noch überlegt werden, ob die Elektronik z.B. die HX711-Platine ebenfalls integriert wird und nur ein Kabel zum Mess-System führt. Als mögliche Ursache der über die Zeit festgestellten Nullpunktabweichung der Waage ist die Überlastung zu nennen.

**Elektronik** - Im Bereich der Elektronik bedarf es eine Optimierung in der Gestaltung der Elektronikplatine mit den Signalkonditionierungen der Messwerte. Das Grundlayout muss aufgrund des Gehäusedesigns beibehalten werden. Lediglich die Dimensionierungen müssen verringert werden. Die Elektronikplatine misst in der Länge 17 cm und in der Breite 12 cm. Es wird empfohlen die Platine in der Länge

Tabelle V: aktualisierte Belegung der Klemmleiste 2

alt	Flow	Druck	IR
neu	Druck	IR	Flow
Symbol	- S +	- + S+ S-	- +

und Breite um jeweils 1 cm zu kürzen. So steht die Platine nicht im direkten Kontakt mit dem Gehäuse. Es muss überlegt werden, welches Design der Platine am sinnvollsten ist. In Abbildung 14 ist die grobe Platzierung der Klemmleisten dargestellt. Die Veränderung der Position ist möglich, jedoch muss beachtet werden, dass dadurch längere Steckerkabel zu den Sensoren benötigt werden. Es wird empfohlen die aktuelle Position beizubehalten. Die erste Federklemmleiste ist für das Anschließen von NTCs definiert. Auf dem MCC0 sind aktuell 4 Kanäle für NTCs definiert. Je nachdem, ob entschieden wird den Kanal für Temperatur vor dem Kaffeepuck für E61 und nE61 zusammenzuführen, bleiben drei aktive Kanäle übrig. Da das MCC0 für vier Sensoren Platz hat, wird empfohlen die Klemmleiste für vier NTCs auszulegen. Pro NTC werden zwei Anschlüsse benötigt. Aktuell sind pro NTC drei Anschlüsse definiert, wobei die zwei Massen miteinander verlötet wurden. Die zweite Federklemme muss etwas umgestaltet werden. Im Laufe der Entwicklung wird beschlossen, dass der IR-Sensor über das Mess-System mit Strom versorgt wird und somit keine externe Versorgung benötigt. Der IR-Sensor ist ganz rechts angeschlossen und benötigt 12 V und Masseanschluss, zusätzlich eine Signal- und Masseleitung. Die Leitungen müssen in der Reihenfolge ausgelegt werden, da der Stecker auf Seiten des IR-Sensors entsprechend belegt ist. Anschließend folgt auf der Klemmleiste der Anschluss für den Drucksensor. Der Sensor hat drei Leitungen. Es benötigt 5 V Versorgung, eine Signalleitung und eine Masseleitung. Auf der Klemmleiste muss zusätzlich eine zweite Masseleitung gelegt werden, die mit dem MCC verbunden wird, sodass die Messung über Differential möglich ist. Nach dem Drucksensor wird das Flowmeter verkabelt. Hier werden statt 3 Anschlässen nur zwei benötigt. Bei verbautem Flowmeter, wird dieses weiterhin über die Maschine mit 5 V versorgt. Es wird nur eine Signal- und Masseleitung für das Abgreifen des Signals benötigt. Nach Änderung der Federklemmen muss beachtet werden, dass die Beschriftung auf dem Gehäuse nicht mehr stimmt. Tabelle V zeigt die neue Zuordnung der Kanäle durch das Ändern der bestehenden Reihenfolge der Symbole. Lediglich die Sensornamen müssen den Symbolen auf dem Gehäuse neu zugeordnet werden. Die Klemmleiste muss so belegt werden, sodass die Leitungen der Stecker direkt nebeneinander liegen. So ist eine übersichtliche Zuordnung der Leitung möglich. Weiter wird empfohlen mit einem Color Coding zu arbeiten. Spannungsversorgung sind mit rot definiert, Masse mit schwarz, Signal mit weiß oder gelb und Signalmassen mit grau oder schwarz.

Die dritte Klemmleiste dient dem Anschluss eines Steckers für die Wägezelle. Hierbei ist aktuell eine Schraubklemme verbaut. Diese kann für die Vereinheitlichung mit einer Federklemmleiste mit 4 Anschläßen ersetzt werden. Die Pinningdaten sind der Modulararbeit [Vie22] zu entnehmen.

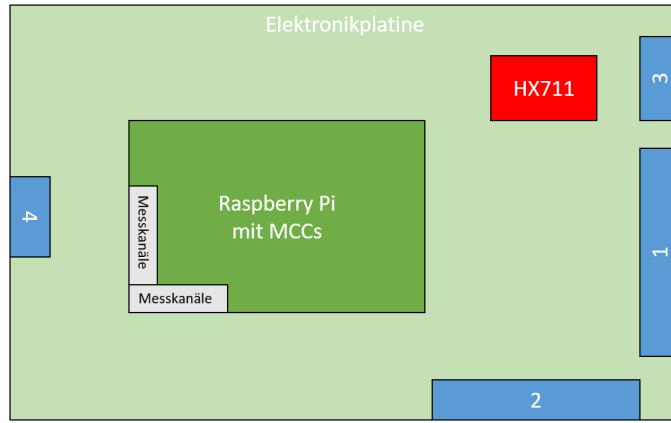


Abbildung 14: Gestaltung der neuen Platine

Die vierte Klemmleiste ist aktuell eine dreifach Federklemmleiste, die auf eine Leiste mit zwei Anschlüssen reduziert werden kann. Hier ist lediglich die Hauptversorgung des Systems angeschlossen. Ursprünglich wird ein Drucksensor verwendet, welcher eine Spannung von 24 V benötigt. Nachdem dieser nicht zuverlässig funktioniert, wird er mit dem SEEED Studio Sensor ausgetauscht. Dieser benötigt eine verringerte Versorgung von 5 V. Die höchste Spannungsversorgung benötigt der IR-Sensor im Bereich von 12 V bis 36 V. Um möglichst wenig Leistung durch den Kühlkörper abzugeben, wird empfohlen das Netzteil und die Platine auf maximal 12 V auszulegen.

**Analyseschwerpunkte** - Mit der Vermessung wurden erste Messdaten erfasst und ausgewertet. Durch die Analyse der Daten werden erste Erkenntnisse gesammelt. Bei der Analyse sind einige Punkte aufgefallen, die als unklar zu betrachten sind. Mit konkreter Definition einer Messung muss mit einem Analyseschwerpunkt das jeweilige Thema weiter untersucht werden. Ein Thema umfasst das Widerlegen des eingestellten Durchflussverlaufs an der Dalla Corte Mina. Durch die zeitliche Einschränkungen ist es nur an einer Maschine gelungen, die Daten des Flowmeters zu erfassen. Es wird empfohlen eine Vermessungsreihe zu starten, die den Analyseschwerpunkt auf den Vergleich der Durchflussraten legt. Hierzu eine Dalla Corte Mina mit unterschiedlichen Profilen vermessen. Da die Maschine nach Kalibrierung einen anderen Verlauf aufzeigt, ist es durchaus sinnvoll die z.B. drei Flowverläufe vor und nach der Kalibrierung durchzuführen und zu vergleichen. Pro Flowprofil sind 3-5 Kaffeebezüge durchzuführen. Bevor die Vermessungsreihe gestartet wird, muss die GUI aktualisiert werden, sodass die Rohdaten des Flowmeters statt der interpolierten Daten abgespeichert werden.

Bei einer zweiten Vermessungsreihe ist der Vergleich der Flowrate des Flowmeters mit dem aus der Waage errechneten Durchflussrate relevant. Hierzu muss erneut an einer Dalla Corte Mina gemessen werden. Aus der ersten Messreihe erfolgt die Erkenntnis, ob die Durchflussraten von der Kalibrierung beeinflusst sind. Für diesen Fall muss bei der zweiten Messreihe zu Beginn eine Kalibrierung der Dalla

Corte Mina durchgeführt werden. Anschließend werden Kaffeebezüge mit einem ausgewählten Flowprofil bezogen. Hierbei wird erneut die Durchflussrate des Flowmeters erfasst und zusätzlich die Kaffeeauslaufmenge in Gramm über die Waage gemessen. Über die Aufbereitung der Messwerte, wie in Abbildung 7d, ist eine Differenz der beförderten Wassermenge festzustellen. Es ist zu untersuchen, ob die Wasseraufnahme des Kaffeepucks unter den Variablen Röstgrad, Mahlgrad und Kaffeesorte den Wert verändert. Es wird empfohlen pro Parametrierung drei Kaffeebezüge zu erfassen. Für das Feststellen von Veränderungen wird bei der Auswahl der Kaffeesorte empfohlen in die Grenzen zu gehen. Damit ist die Verwendung von einem 100 % Arabica und 100 % Robusta gemeint. Für die Darstellung der Ergebnisse

Tabelle VI: Beispielhafte Ergebnismatrix für eine Kaffeesorte

Röstgrad/Mahlgrad	light	medium	dark
fein			
mittel			
grob			

eignet sich die Form der Tabelle VI pro Kaffeesorte. Mit der Matrix ist die Betrachtung aller Parameter unter verschiedenen Variablen möglich. Neben der vom Kaffeepuck erfassten Wassermenge, kann der Vergleich von Druck und Temperaturen stattfinden.

Weiter ist zu überlegen, welche Möglichkeiten für die Ermittlung des optimalen Mahlgrads zur Verfügung stehen. Durch einen Partikelgrößenanalysator ist die Bestimmung der Korngröße des gemahlenen Kaffees möglich. Hierbei muss untersucht werden, ob die Verwendung sinnvoll ist. Es muss jedoch die Abhängigkeit zur Kaffeeart und Röststufe beachtet werden.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Das erfolgreich in Betrieb genommene Mess-System wird durch eine Testmessung auf Zuverlässigkeit und Konsistenz geprüft. Es werden verschiedene Siebrägerespressomaschinen aus den Röstereien für die Vermessung ausgewählt. Hierfür werden E61- und nE61- Siebräger-Espresso-Maschinen benötigt. Der Fokus der Vermessung liegt auf den Dalla

Corte Minas und Faema Modellen. Neben den Kategorien werden neuere E61 Ausführungen vermessen. Bevor die Vermessung gestartet werden kann, muss der Messprozess detailliert definiert werden. Pro Vermessung wird die Erfassung des Aufheizverhaltens und anschließend von Kaffeebezügen angestrebt. Bei E61-Maschinen ist die Erfassung von zwei Aufheizverhalten aufgrund der zusätzlich interessanten Messstelle am Boiler möglich. Bei Erreichen eines Plateaus in den Temperaturmesswerten an der jeweiligen Messstelle, wird der Aufheizprozess als beendet definiert. Anschließend ist die Vermessung der Kaffeebezüge anhand eingesetzter Sensorik möglich. Es werden Temperaturen, Druck, Kaffeeauslaufmenge und die Durchflussrate vom Mess-System erfasst. Die Erfassung der Durchflussrate ist nur bei der Vermessung von Dalla Corte Mina möglich, da dort ein Flowmeter verbaut ist, welches mit dem Mess-System kompatibel ist. Bei nE61-Modellen muss die Brühgruppenerweiterung zusätzlich adaptiert werden. Die Sensorik muss an die Siebträgermaschine und an das Mess-System angeschlossen werden und über die GUI wird die Vermessung eines Kaffeebezugs gestartet mit einer Messdauer von 60 s. Die Messdaten werden in einem Struct abgelegt und in einer vordefinierten Ordnerstruktur mit Bezeichnung der Kaffeemaschine abgelegt. Die Datenaufbereitung und -analyse wird nachträglich anhand von automatisierten MATLAB Skripten durchgeführt. Hierfür werden pro Brühgruppenart (E61, nE61) jeweils ein Skript entwickelt, welche die Daten im ersten Schritt für die Kaffeebezüge grafisch darstellt. Hiermit wird eine Übersicht über die Messdaten geschaffen, welche die Grundlage weiterer Vorgehensweise der Datenaufbereitung bietet. Für die Interpretation werden die Parameterverläufe auf den Start des Kaffeebezugs normiert. Der Startpunkt wird über die Kaffeeauslaufmenge automatisch detektiert, welche über die Waage erfasst wird. Das Skript für die Aufbereitung zeigt im nächsten Schritt die Konstanz der Messwertverläufe über die Anzahl der durchgeföhrten Kaffeebezüge. Pro Parameter wird ein mittlerer Verlauf gebildet, der für Vergleiche und weitere Analysen verwendet wird. Die Dalla Corte Minas zeigen je nach Einstellung des Benutzers Abweichungen untereinander, jedoch ist die Konstanz in den Messwerten gegeben. Die Programmierbarkeit der Maschine wird anhand der Flowmeterverläufe überprüft. Für die Überprüfung werden die vom Mess-System erfassten und interpolierten Durchflussraten des Flowmeters verwendet und zusätzlich die Berechnung der Durchflussrate über die Waage. Für die Durchflussrate über die Waage muss eine Aufbereitung in Form von Upsampling und Berechnung über die Zeit durchgeführt werden. Aus den Durchflussraten wird die kummulierte Wassermenge errechnet, die befördert bzw. ausgelassen wird. Aus der Differenz der beiden Werte wird die vom Kaffeepuck aufgenommene Wassermenge von etwa 30 ml erkannt.

Mit den mittleren Verläufen werden neben den Vergleichen weitere Analysen auf Signalebene angewendet. Es wird die Signalqualität über das Signal-Rausch-Verhältnis bewertet. Die Signalqualität der Sensoren ist als sehr gut zu bezeichnen und die Eignung kann damit bestätigt werden. Im nächsten Schritt

wird die Frequenzanalyse durchgeführt, um die im Signal vorkommende Schwingungen von E61 und nE61 aufzuzeigen. Die Signalverläufe der Temperatur und des Drucks vor dem Kaffeepuck zeigen in allen Fällen einen Peak bei 50 Hz auf. Bei E61 Modellen sind weitere Peaks und mit höheren Amplituden zu identifizieren. Aus der Vermessungsreihe werden Erkenntnisse gesammelt, die zu Optimierungen am Mess-System und dem dazugehörigen Messprozess dienen. Die Optimierungsmaßnahmen umfassen den Bereich der Sensorik, Software, Hardware und Elektronik. Weiter werden Vorschläge für weitergehende Analysen aufgezeigt, die das Mess-System lösungsorientiert weiterentwickeln. Insgesamt ist das Mess-System als sehr stabil und zuverlässig zu bewerten. Das Ziel erste Messdaten von Siebträgerespressomaschinen zu erfassen wird erfolgreich umgesetzt. Mit der Erkenntnis ist die Durchführung klar definierter Vermessungsreihen möglich, welche die Entwicklung der Glasboiler-Espressomaschine vorantreiben.

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1	Aufbau der Brühgruppen Erweiterung bei nE61-Maschinen . . . . .	5
2	Flowchart für den Aufbau des Skripts für E61 Datenaufbereitung . . . . .	7
3	Visualisierung der Messdaten von E61 Siebträgerespressomaschinen . . . . .	8
4	Visualisierung der Messdaten von nE61 Siebträgerespressomaschinen . . . . .	10
5	Ermittlung der Zeiten des Aufheizens der Dalla Corte Minas . . . . .	11
6	Ergebnisse der Parameter der Dalla Corte Mina . . . . .	13
7	Gegenüberstellung der Durchflussraten-Verläufe . . . . .	14
8	Vergleich der Faema Modelle anhand der jeweiligen Parameter . . . . .	15
9	Vergleich der Parameter vor dem Kaffeepuck bei E61 Maschinen . . . . .	16
10	SNR Drucksensor . . . . .	17
11	Vergleich der Druckverläufe von E61 und nE61 . . . . .	18
12	Vergleich der Signalspektren von E61 und nE61 . . . . .	20
13	Konzept für ein Halteblech mit integrierter Waage . . . . .	22
14	Gestaltung der neuen Platine . . . . .	24
A.1	Schritte zur Signalaufbereitung der Waage . . . . .	28
A.2	Flowprofile der Dalla Corte Minas . . . . .	29
A.3	Flowprofile der Dalla Corte Mina bei Bohnenschmiede . . . . .	30

## TABELLENVERZEICHNIS

I	Übersicht der Röstereien mit Maschinen . . . . .	3
II	Maximale Anzahl aktiver Messkanäle . . . . .	5
III	Vergleich der Aufheizzeiten . . . . .	12
IV	Gemittelte Signal-Noise-Ratios der Sensoren . . . . .	18
V	aktualisierte Belegung der Klemmleiste 2 . . . . .	23
VI	Beispielhafte Ergebnismatrix für eine Kaffeesorte . . . . .	24

## LITERATUR

- [BS03] A. P. Boresi and K. P. Schmidt. *Engineering Mechanics of Materials*. Wiley, Hoboken, NJ, 6th edition, 2003.
- [Dal24] Dalla Corte. Mina, 2024. Eigenschaften und Merkmale der Mina Espressomaschine.
- [KR19] Thomas Kuttner and Armin Rohnen. *Praxis der Schwingungsmessung: Messtechnik und Schwingungsanalyse mit MATLAB®*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2., überarbeitete und erweiterte auflage edition, 2019. Online-Ressource, 565 Seiten, Illustrationen, Diagramme (überwiegend farbig).
- [KW12] Peter Kürner and Werner Wiesbeck. *Nachrichtentechnik: Grundlagen, Verfahren und Systeme der Informationsübertragung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 9. auflage edition, 2012.
- [MB13] Uwe Meyer-Baese. *Digitale Signalverarbeitung: Grundlagen und Anwendungen*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 6. auflage edition, 2013.
- [PM07] John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 4th edition, 2007.
- [Vie22] Patricia Viebke. Modularbeit maschinen- und systemmethodik, 2022. Zugriff am 22. August 2024.

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel:

**"Vermessung von E61 und nicht-E61 Siebträger Espressomaschinen anhand Auswertung und Gegenüberstellung der erfassten Parameter mittels des entwickelten Mess-Systems"**

selbstständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben kann.

Ort, Datum: Poing, 27.09.2024

Unterschrift: 

## ANHANG

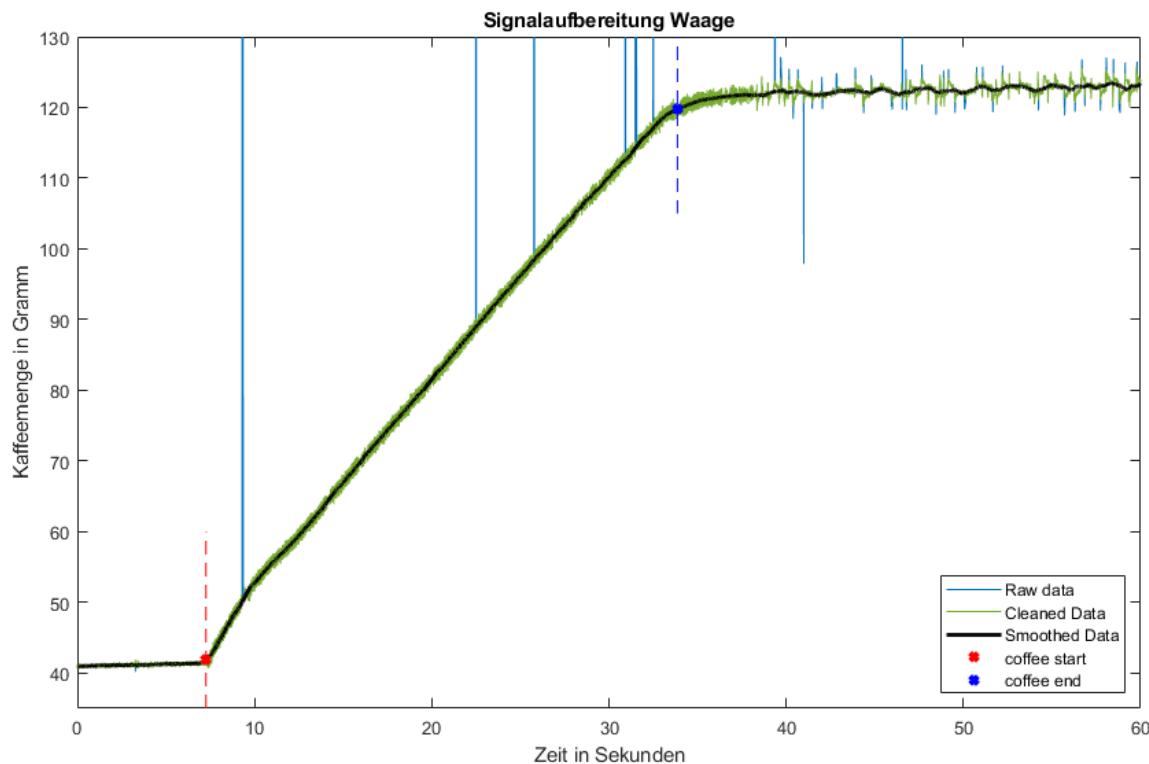


Abbildung A.1: Schritte zur Signalaufbereitung der Waage

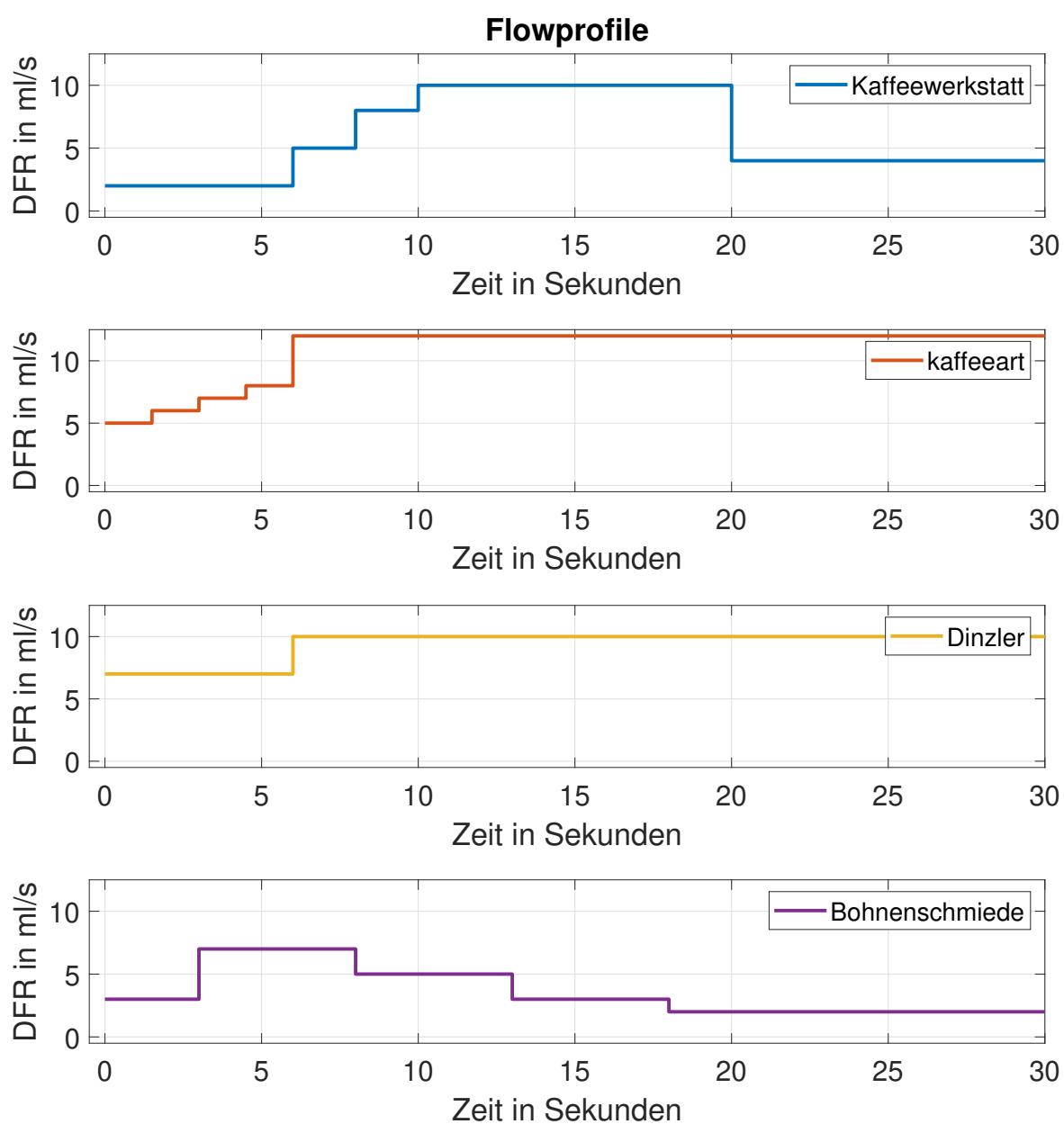


Abbildung A.2: Flowprofile der Dalla Corte Minas

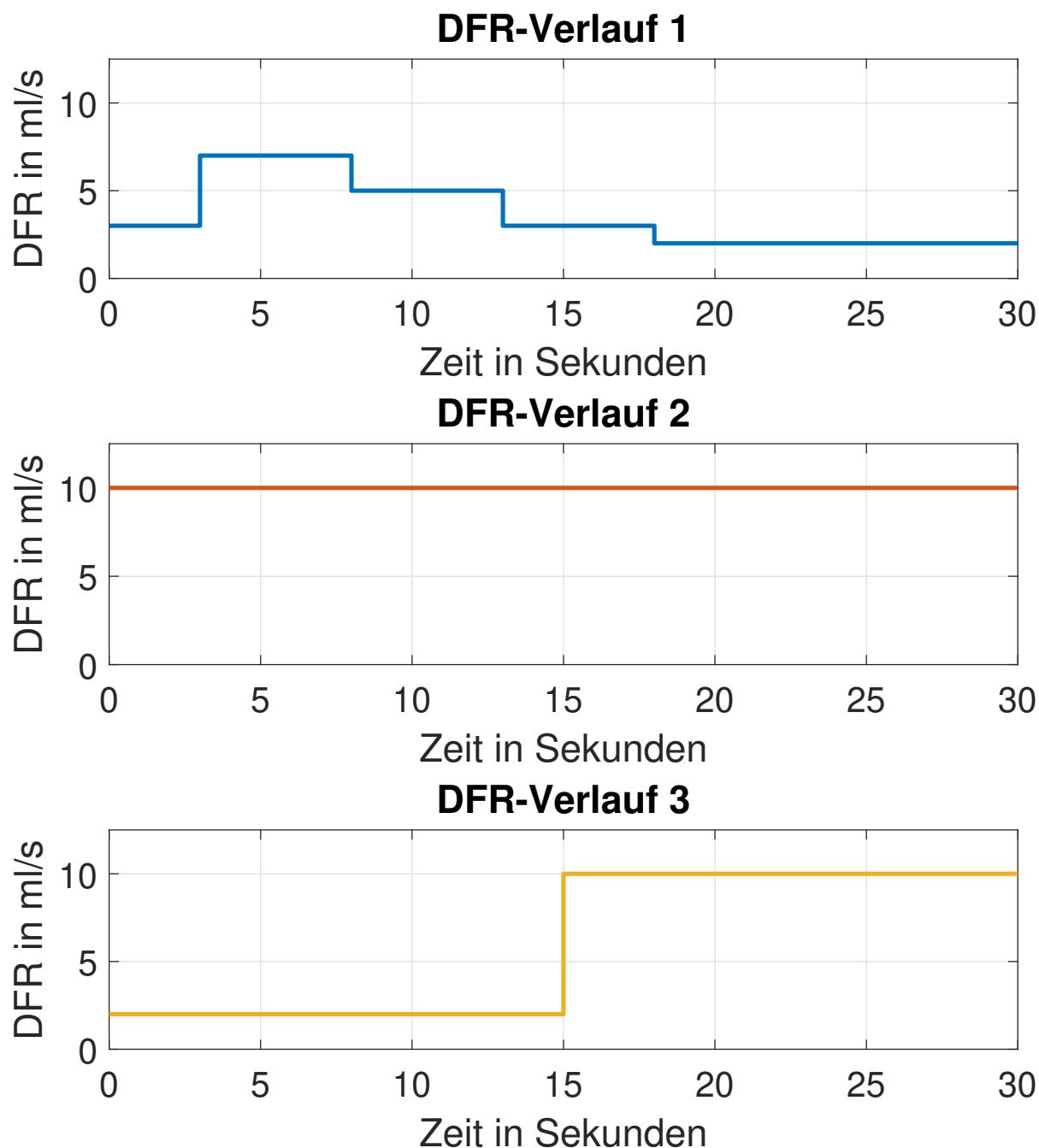


Abbildung A.3: Flowprofile der Dalla Corte Mina bei Bohnenschmiede