

Entwicklung einer Siebträger- Espressomaschine mit Borosilikat- Glasboiler

Technische Planung und Entwicklung bis zur Inbetriebnahme

Development of an espresso machine with portafilter and a boiler made from borosilicate glass

Technical planning and development until commissioning

14.10.2022



Felix Kistler

Applied Research in Engineering Sciences

Hochschule München - Munich University of Applied Sciences

Fakultät 03 - Verbundlabor Fahrzeugtechnik, Akustik und Dynamik

felix.kistler@hm.edu

Matrikel-Nr. 315635

1 Abstract

Im Zuge des Forschungsprojektes „Technische Beeinflussbarkeit der Geschmackssache Kaffee“ an der Hochschule München befinden sich mehrere Siebträger-Espressomaschinen in der Entwicklung. Dieser Projektbericht beschäftigt sich mit der technischen Planung des globalen Entwicklungsprozesses der zu entwickelnden Siebträger-Espressomaschinen sowie mit der technischen Entwicklung ausgewählter Bauteile. So werden in der technischen Planung zuerst alle notwendigen Arbeitspakete vor und während der Inbetriebnahme der Siebträger-Espressomaschine mit Borosilikat-Glasboiler aufgelistet und analysiert. Diese Liste an Arbeitspaketen kann zur Überprüfung des Projektfortschritts verwendet werden und sicherstellen, dass die bis zum Prototypenbau der Maschine benötigten Arbeitspakete abgearbeitet werden. Die technische Entwicklung beschäftigt sich mit der Optimierung der bisher verwendeten, unbeheizten Brühgruppe. Dafür wird zuerst die Ausgangssituation dieses Projektes sowie die zu Projektbeginn vorliegende Konstruktion der bisherigen Brühgruppe beschrieben. Die bisherige Konstruktion der Brühgruppe soll überarbeitet werden, da die sich bildende Crema in Aussehen und Qualität von der Crema anderer renommierter Espressomaschinen deutlich unterscheidet. Dafür werden mit der Brühgruppe einige Versuche an dem Prototypen der labortechnischen Espressomaschine durchgeführt, um erforderliche Änderungen an der bisherigen Konstruktion abzuleiten und Rückschlüsse auf den Einfluss einzelner Variablen auf die entstehende Crema zu ziehen. Ziel der Optimierung ist es, Crema in vergleichbarer Qualität anderer renommierter Maschinen wie beispielsweise der Gaggia TE herstellen zu können. Die erforderlichen Änderungen werden in einer Anforderungsliste dokumentiert und für die Konstruktion verwendet. Sobald die Konstruktion abgeschlossen ist, soll von der optimierten Brühgruppe im weiteren Verlauf der Entwicklung ein Prototyp gefertigt und ausgiebig getestet werden. Dafür wird eine Kostenkalkulation für den Prototypen sowie eine Kostenschätzung für die Serienfertigung der optimierten Brühgruppe vorgenommen. Gegen Ende folgt eine Zusammenfassung der bearbeiteten Inhalte dieser Projektarbeit sowie ein Ausblick auf die erforderlichen Arbeitsschritte im weiteren Projektverlauf.

In the course of the research project "Technische Beeinflussbarkeit der Geschmackssache Kaffee" at the University of Applied Sciences in Munich, several portafilter espresso machines are under development. This project report deals with the technical planning of the global development process of the portafilter espresso machines to be developed as well as with the technical development of selected components. Thus, the technical planning first lists and analyzes all necessary work packages before and during the commissioning of the portafilter espresso machine with borosilicate glass boiler. This list of work packages can be used to check the progress of the project and ensure that the work packages required up to the prototype construction of the machine are processed. The technical development deals with the optimization of the previously used unheated brewing group. To this end, the initial situation of this project and the design of the previous brew group available at the start of the project will first be described. The existing design of the brew group is to be revised, since the crema that is formed differs significantly in appearance and quality from the crema of other renowned espresso machines. To this end, a number of tests will be carried out with the brew group on the prototype laboratory espresso machine in order to derive necessary changes to the previous design and to draw conclusions about the influence of individual variables on the resulting crema. The aim of the optimization is to be able to produce crema of comparable quality to other renowned machines such as the Gaggia TE. The necessary changes will be documented in a list of requirements and used for the design. Once the design is complete, a prototype of the optimized brew group will be manufactured and extensively tested in the further course of development. For this purpose, a cost calculation for the prototype as well as a cost estimate for the series production of the optimized brew group will be made. Towards the end, a summary of the contents of this project work will be presented, together with an outlook on the necessary work steps in the further course of the project.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1 Abstract..... | 2 |
| 2 Verzeichnis der Formelzeichen..... | 5 |
| 3 Verzeichnis der Abkürzungen | 6 |
| 4 Einleitung | 7 |
| 5 Technische Planung | 8 |
| 5.1 Übersicht der erforderlichen Arbeitspakete bis zur Inbetriebnahme..... | 8 |
| 5.2 Analyse der erforderlichen Arbeitspakete bis zur Inbetriebnahme..... | 10 |
| 5.3 Übersicht der erforderlichen Arbeitspakete während der Inbetriebnahme | 11 |
| 5.4 Analyse der erforderlichen Arbeitspakete während der Inbetriebnahme..... | 13 |
| 5.4.1 Boiler | 13 |
| 5.4.2 Unterbau..... | 13 |
| 5.4.3 Brühlturm..... | 13 |
| 5.4.4 Brühgruppenabdeckung..... | 14 |
| 5.4.5 Gehäuse | 14 |
| 5.4.6 Elektronik..... | 14 |
| 5.4.7 Software..... | 15 |
| 5.4.8 Sonstiges..... | 16 |
| 6 Technische Entwicklung..... | 17 |
| 6.1 Ausgangssituation..... | 17 |
| 6.1.1 Aufbau der bisherigen unbeheizten Brühgruppe | 17 |
| 6.1.2 Erforderliche Änderungen an der bisherigen Brühgruppe..... | 18 |
| 6.2 Versuche mit der bisherigen Brühgruppe | 19 |
| 6.2.1 Versuchsplanung | 20 |
| 6.2.2 Durchführung der Versuche | 22 |
| 6.2.3 Auswertung der Versuche | 23 |
| 6.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 25 |
| 6.3 Anforderungen an die optimierte Brühgruppe..... | 26 |
| 6.4 Optimierung der unbeheizten Brühgruppe..... | 26 |
| 6.4.1 Konzeptentwicklung | 26 |
| 6.4.2 Konstruktion der optimierten Brühgruppe..... | 27 |
| 6.4.3 Prototyping der optimierten Brühgruppe..... | 30 |
| 6.5 Kostenkalkulation..... | 30 |
| 6.5.1 Stückliste der optimierten Brühgruppe | 30 |
| 6.5.2 Kostenkalkulation der Konstruktionsteile..... | 31 |
| 6.5.3 Kostenkalkulation der Zukaufteile..... | 31 |
| 6.5.4 Kalkulation der Gesamtkosten | 32 |

| | |
|------------------------------|----|
| 7 Zusammenfassung..... | 34 |
| 8 Ausblick..... | 35 |
| 9 Abbildungsverzeichnis..... | 36 |
| 10 Anhang..... | 37 |

2 Verzeichnis der Formelzeichen

| | | |
|--------------|------------|-------------------------|
| τ_{max} | $[N/mm^2]$ | Maximale Schubspannung |
| τ_{zul} | $[N/mm^2]$ | Zulässige Schubspannung |
| F | [N] | Scherkraft |
| A | $[mm^2]$ | Scherfläche |
| R | $[mm]$ | Radius |
| H | $[mm]$ | Höhe |
| V | [-] | Sicherheitsfaktor |

3 Verzeichnis der Abkürzungen

| | |
|------|-----------------------------------|
| FMEA | Failure Mode and Effects Analysis |
| MJF | MultiJet Fusion Printing |
| PA12 | Polyamid 12 |
| MCU | Micro Controller Unit |
| FLM | Fused Layer Modelling |
| PLA | Polyactid |
| GUI | Graphical User Interface |
| CAD | Computer Aided Design |
| CSV | Comma-separated Values |
| MS58 | Messing |
| PVDF | Polyvinylidenfluorid |
| CNC | Computer Numerical Control |

4 Einleitung

An der Hochschule München wird seit geraumer Zeit unter der Leitung des Diplom-Ingenieurs Armin Rohnen an der technische Beeinflussbarkeit der Geschmackssache Kaffee geforscht. Im Zuge dieses Forschungsprojektes wird an der Entwicklung mehrerer Siebträger-Espressomaschinen gearbeitet. Eine dieser Espressomaschinen soll gegenüber handelsüblichen Maschinen eine deutliche Innovation aufweisen. So soll diese Espressomaschine entgegen dem handelsüblichen, im Gehäuse verborgenen Stahlboiler über einen von außen einsehbaren Boiler aus Borosilikat-Glas verfügen. Des Weiteren soll die Maschine im Betrieb maximal energieeffizient sein sowie eine vollständige Parametrierbarkeit aller relevanten Kaffeebezugsparameter möglich machen. Ziel ist es, diese Maschine mithilfe von Projekt- und Abschlussarbeiten durch Studenten der Fakultät 03 an der Hochschule München von der ersten Konzeptbeschreibung bis zur Serienreife zu entwickeln.



Neben der Siebträger-Espressomaschine mit Borosilikat-Glasboiler, im weiteren Verlauf Glasboilermaschine genannt, werden im Zuge des Forschungsprojektes noch zwei weitere Siebträger-Espressomaschinen entwickelt. Das ist zum einen die labortechnische Espressomaschine zur Erforschung aller relevanten Kaffeebezugsparameter und zum anderen die Siebträger-Espressomaschine mit einem 1,8 Liter-Stahlboiler, die in Zusammenarbeit mit der TURNUS Espresso GmbH konzipiert wird. Ziel dieser drei Entwicklungsprojekte ist es, möglichst viele gleiche Teile zu verbauen und die gleiche Technik in allen drei Maschinen zu verwenden. Die labortechnische Espressomaschine dient zum Qualifizieren neuer Komponenten und Technologien, bevor diese in die Glasboiler-Maschine und 1,8 Liter-Maschine integriert werden.

Der Fokus dieser Projektarbeit bezieht sich auf die Entwicklung der Glasboilermaschine. Dazu soll zum einen die technische Planung mit der Auflistung und Analyse aller erforderlichen Arbeitsschritte durchgeführt werden, die bis zum Prototypenbau der Espressomaschine mit Borosilikat-Glasboiler notwendig sind.

Zum anderen soll die bestehende Konstruktion der unbeheizten Brühgruppe optimiert werden, da die aktuelle Version nicht den Anforderungen entspricht. Die optimierte Version der Brühgruppe soll im weiteren Verlauf sowohl in der Siebträger-Espressomaschine mit Borosilikatglas-Boiler als auch in der labortechnischen Espressomaschine Verwendung finden.

5 Technische Planung

Der erste Teil dieser Projektarbeit behandelt die technische Planung hinsichtlich der noch durchzuführenden Arbeitspakete bis zum Prototypenbau und der Inbetriebnahme.

5.1 Übersicht der erforderlichen Arbeitspakete bis zur Inbetriebnahme

Im Folgenden sind die erforderlichen und gegenwärtig bearbeiteten Arbeitspakete bis zur Inbetriebnahme mit den jeweiligen Bearbeitenden und dem geplanten Bearbeitungszeitraum aufgelistet.

Tabelle 1: Übersicht der zu bearbeitenden Arbeitspakete bis zur Inbetriebnahme

| Modul | Arbeitspaket | Bearbeitende | Deadline |
|----------------|---|-------------------|------------|
| Verspanndeckel | Technische Auslegung des neuen Verspanndeckels | Mustafa Inaltekin | 14.08.2022 |
| | Konstruktion des neuen Verspanndeckels | | 14.08.2022 |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen des neuen Verspanndeckels | | 14.08.2022 |
| | Definition von Materialien und Produktionsmethoden des Verspanndeckels | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Zukaufteile | | 14.08.2022 |
| Tank | Technische Auslegung der Konstruktionsteile | Erik Reitsam | 14.08.2022 |
| | Konstruktion von Glaskörper, Tankboden und Deckel | | 14.08.2022 |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Tankboden - Grundplatte | | 14.08.2022 |
| | Definition von Materialien und Produktionsmethoden der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Zukaufteile | | 14.08.2022 |
| Abtropfwanne | Konstruktion der Abtropfwanne und Bügeln | Mustafa Inaltekin | 14.08.2022 |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Entnahme der Abtropfwanne | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Zukaufteile | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung | ausstehend | 14.08.2022 |


| | | | |
|-------------------------|--|-----------------------|------------|
| | Abtropfwanne - Unterbau | | |
| | Konzeptentwicklung für die Integration der Schmutzwasserleitungen | <i>ausstehend</i> | 14.08.2022 |
| Abtropfblech | Konstruktion des Abtropfblechs | Mustafa Inaltekin | 14.08.2022 |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Abtropfblech – Grundplatte/Unterbau | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Zukaufteile | | 14.08.2022 |
| Brühturm | Technische Auslegung der Konstruktionsteile | Luca Simon Kurbjuweit | 14.08.2022 |
| | Konstruktion von Brühgruppenaufnahme und Sockel | | 14.08.2022 |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Brühgruppenaufnahme - Sockel | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Sockel - Grundplatte | | 14.08.2022 |
| | Definition von Materialien und Produktionsmethoden der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Zukaufteile | | 14.08.2022 |
| | Leitungsverlegung und Verrohrung der Brühgruppe in den Unterbau | <i>ausstehend</i> | |
| Freitragende Brühgruppe | Technische Auslegung der Konstruktionsteile | Luca Simon Kurbjuweit | 14.08.2022 |
| | Konstruktion von Halte- und Versteifungsblech | | 14.08.2022 |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Blechkonstruktion - Brühgruppe | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Positionierung der mechatronischen Komponenten in der Brühgruppenaufnahme | | 14.08.2022 |
| | Definition von Materialien und Produktionsmethoden der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Zukaufteile | | 14.08.2022 |
| Dampflanze | Konstruktion der Dampflanze | Mustafa Inaltekin | 14.08.2022 |



| | | | |
|----------------|---|-------------------|------------|
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Materialien und Produktionsmethoden der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Zukaufteile | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Dampfplanze - Grundplatte | <i>ausstehend</i> | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Bedienknopf Dampfplanze - Grundplatte | <i>ausstehend</i> | 14.08.2022 |
| | | | |
| Teewasserlanze | Konstruktion der Teewasserlanze | Mustafa Inaltekin | 14.08.2022 |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Definition von Materialien und Produktionsmethoden der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Teewasserlanze - Grundplatte | <i>ausstehend</i> | 14.08.2022 |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Bedienknopf Teewasserlanze - Grundplatte | <i>ausstehend</i> | 14.08.2022 |
| | | | |
| Unterbau | Positionierung der mechatronischen Komponenten im Unterbau | Erik Reitsam | 14.08.2022 |
| | Konstruktion der Blechteile des Unterbaus | | 14.08.2022 |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | 14.08.2022 |
| | | | |
| Elektronik | Integration und Testen des alternativen Dosierventils | Serkan Duman | 14.08.2022 |
| | | | |
| Brühgruppe | Anpassung des Brühgruppeneinsatzes und der Siebträgeraufnahme | Felix Kistler | 14.08.2022 |
| Boiler | Integration der Leitung zur Boilerentleerung in den Boilerboden | <i>ausstehend</i> | |
| | | | |

5.2 Analyse der erforderlichen Arbeitspakete bis zur Inbetriebnahme

Im Zuge der technischen Planung sollen die erforderlichen Arbeitspakete bis zur Inbetriebnahme analysiert werden. Diese Analyse ist auf dem Projekt-Wiki unter der Page-ID [13879] zu finden.

Der Bearbeitungsstatus der einzelnen Arbeitspakete kann in der globalen ToDo-Liste der Glasboilermaschine eingesehen werden. Diese findet sich unter der Page-ID [13866] auf dem Projekt-Wiki. Dort finden sich auch die Links zu den erarbeiteten Inhalte der Arbeitspakete unter der jeweiligen Module. 

5.3 Übersicht der erforderlichen Arbeitspakete während der Inbetriebnahme

Im Folgenden sind die noch erforderlichen Arbeitspakete während der Inbetriebnahme mit den jeweiligen Bearbeitenden und dem geplanten Bearbeitungszeitraum aufgelistet.

Tabelle 2: Übersicht der zu bearbeitenden Arbeitspakete während der Inbetriebnahme

| Modul | Arbeitspaket | Bearbeitende | Zeitraum |
|----------------------|--|---------------------|----------------------|
| Boiler | Austauschen der Schneidringe | Studenten der FK03 | WS 22/23 und SS 2024 |
| | Integration des Temperatursensors im Zwischenraum des Boilers | | |
| | Reduzierung der erforderlichen Hülsen im Boilerboden und Recherche nach Alternativen | | |
| | Lebensdauerprüfung der 3D-Druckteile im Boiler | | |
| | | | |
| Unterbau | Revision und Vereinfachung der Komponentenanzahl | | |
| | | | |
| Brühturm | Überarbeitung der bestehenden Konstruktion | | |
| | Überarbeitung der Positionierung der Magnetventile | | |
| | | | |
| Brühgruppenabdeckung | Konstruktion der Brühgruppenabdeckung | | |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Brühgruppenabdeckung - Brühgruppenaufnahme | | |
| | Konzeptentwicklung für die Integration der Bedienelemente | | |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | |
| | Definition von Materialien und Produktionsmethoden der Konstruktionsteile | | |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Brühgruppenabdeckung | | |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Zukaufteile | | |
| | | | |
| Gehäuse | Technische Auslegung des Konstruktionsteils | | |
| | Konstruktion des Gehäuses | | |
| | Konzeptentwicklung für die Anbindung Gehäuse - Unterbau | | |
| | Anfertigung von technischen Zeichnungen der Konstruktionsteile | | |
| | Definition von Materialien und Produktionsmethoden der Konstruktionsteile | | |
| | Definition von Lieferanten und Kosten des Gehäuses | | |
| | Definition von Lieferanten und Kosten der Zukaufteile | | |
| | | | |

| | | | |
|------------|--|--|--|
| Lanzen | Implementierung der Druck-/Drehknöpfe | | |
| | | | |
| Elektronik | Überarbeitung der Basisplatine | | |
| | Überarbeitung der Messplatine | | |
| | Erarbeitung eines Testkonzepts zur Dichtheit der Magnetventile im Betrieb | | |
| | Recherche zu alternativem Drucksensor | | |
| | Recherche zu alternativem Netzteil | | |
| | | | |
| Software | Integration aller erforderlichen Magnetventile | | |
| | Änderung der Ventilstellungen und -schaltungen | | |
| | Kalibrierung/Signalkonditionierung der Drucksensoren | | |
| | Integration der Füllstandssensoren und Tankfüllung | | |
| | Überarbeitung der Test-Benutzeroberfläche in MATLAB | | |
| | Implementierung und Konfiguration der Presets | | |
| | Implementierung des Leitwert-Sensors | | |
| | Implementierung von Reinigungsmodus und Preinfusion | | |
| | | | |
| Sonstiges | Finalisierung der Stücklisten aller Baugruppen | | |
| | Überführung der Konstruktionsteile in das definierte System zur Teilenummerierung | | |
| | Erstellung einer Modulstruktur mit der Berücksichtigung aller Baugruppen | | |
| | Erstellung eines Kostenkalkulators zur Erfassung aller anfallenden Kosten je Baugruppe sowie den zugehörigen Lieferanten | | |
| | Vorarbeit zum Bedienkonzept | | |
| | Vorarbeit zum Montagekonzept | | |
| | Recherche zur Druckbehälterverordnung | | |
| | Recherche der neuen EU-Verordnung zur zulässigen Serviertemperatur von Heißgetränken | | |

5.4 Analyse der erforderlichen Arbeitspakete während der Inbetriebnahme

Es erfolgt eine Analyse der in Tabelle 2 aufgelisteten Arbeitspakete.



5.4.1 Boiler

In dem gegenwärtigen Prototypen des Boilers müssen die verwendeten Schneidringe ausgetauscht werden, da diese rosten. Es sollen neue Schneidringe unter Anwendung von Anti-Seize-Paste verbaut werden, um erneutem Rostbefall vorzubeugen.

Die gegenwärtige Konstruktion des Boilerbodens verwendet viele Hülsen, für die eine Alternative gefunden werden soll. Allgemein soll Einkleben als Verbindungstechnik vermieden werden. Eine Option wären Schrauben, für die jedoch erst eine ausreichende Dichtigkeit evaluiert werden muss. Zusätzlich soll die Konstruktion so angepasst werden, dass der Boiler direkt auf dem Bodenblech aufliegt und so gestützt wird. Außerdem müssen die 3D-Druckteile wie die Spannhaken in der Boilerkonstruktion auf deren Lebensdauer getestet werden. Optional kann ein Temperatursensor im Zwischenraum der beiden Glaszylinder integriert werden.

5.4.2 Unterbau

Die im Sommersemester 2022 erarbeitete Komponentenanzordnung und Leitungsverlegung im Unterbau der Glasboilermaschine genügt noch nicht den gestellten Anforderungen. Die Komponentenanzordnung soll optimiert und die Leitungsverlegung vereinfacht werden. Ziel ist es, die optimale Montier- und Wartbarkeit aller mechatronischen Komponenten im Unterbau zu gewährleisten. Zur Wartung soll die Maschine samt Unterbau aus dem Gehäuse gehoben und auf einen Drehteller gesetzt werden. Deshalb sollen alle Komponenten so angeordnet werden, dass sie von außen einfach zugänglich und einzeln austauschbar sind.

Des Weiteren soll die Leitung des Mischwasserstranges möglichst kurz sein, um Wärmeverluste bis zum Erreichen der Brühgruppe zu minimieren. Auch sollen möglichst wenig Eckverbinder für die Leitungsführung verwendet werden, um Materialkosten zu sparen. Dafür muss eine Anordnung der Magnetventile, Dosierventile und übrigen mechatronischen Komponenten gefunden werden, die eine möglichst einfache, kurze und geradlinige Leitungsführung ermöglicht. Die Mindest-Leitungslänge von 10 mm zwischen den einzelnen Komponenten ist zu berücksichtigen, da ansonsten die Demontierbarkeit der Komponenten nichtmehr gegeben ist. Der aktuelle Bearbeitungsstand des Unterbaus ist auf der Page-ID [13901] sowie unter [82] im Literaturverzeichnis des Projekt-Wikis zu finden. Informationen zum Leitungsverlauf sowie zu den verwendeten Komponenten sind dem Hydraulik-Plan der Glasboilermaschine unter [64] zu entnehmen.

5.4.3 Brühurm

Der gegenwärtige Konstruktionsstand des Brühurms ist zu Beginn des Wintersemesters 22/23 noch zu weit von der ursprünglich gestellten Designvorgabe entfernt. Die Proportionen wie die Länge und Breite der Brücke des Brühurms sind an die Designvorgabe so weit wie möglich anzugleichen. Dazu muss die Positionierung der Magnetventile Y07, Y09 und Y10 in der Brücke überarbeitet werden. Auch muss geprüft werden, ob zusätzlich zu den Magnetventilen noch der Mischer, ein

Temperatursensor und eine Festdrossel möglichst nah an der Brühgruppe platziert werden können, um gegenwärtig entstehende Wärmeverluste zwischen Mischer und Brühgruppe zu minimieren. Hier muss das Ziel sein, den Mischwasserstrang zwischen Mischer und Brühgruppe möglichst kurz zu halten, um Wärmeverluste zu minimieren. Montage, Austausch und Wartung der Magnetventile müssen bei der Positionierung berücksichtigt werden. Der aktuelle Bearbeitungsstand des Brühsturms ist auf der Page-ID [13895] sowie unter [82] im Literaturverzeichnis des Projekt-Wikis zu finden.

5.4.4 Brühgruppenabdeckung

Die Brücke des Brühsturms sowie die Brühgruppe soll mit einer Kunststoff-Verkleidung abgedeckt und über das 3D-Druckverfahren des Thermotransfer-Sinterns wie beispielsweise MultiJet-Fusion-Printing (MJF) aus Nylon (PA12) gefertigt werden. Die Abdeckung ist nach der vereinbarten Designvorgabe zu konstruieren. Um die Zugänglichkeit der Komponenten im Brühurm gewährleisten zu können, muss die Abdeckung einfach demontierbar sein. Mögliche Verbindungstechniken hierzu sind Schrauben oder Schnapphaken aus Kunststoff. Auch die Bedienelemente wie die Knöpfe und das Display müssen in die Abdeckung integriert werden. Informationen zu den zu integrierenden Bedienelementen sind auf dem Projekt-Wiki unter der Page-ID [13876] zu finden.

Zur Entwicklung gehört die technische Auslegung der Abdeckung mit dem Nachweis über ausreichende Steifigkeit sowie die Konstruktion und die Anfertigung von technischen Zeichnungen. Sobald die Konstruktion fertiggestellt ist, sollen Angebote von Lieferanten eingeholt und die zu erwartenden Kosten in der Serienfertigung ermittelt werden. Des Weiteren müssen die benötigten Zukaufteile für die Brühgruppenabdeckung sowie die zugehörigen Lieferanten definiert werden. Sobald die Konstruktion fertig gestellt ist, sollen alle erforderlichen Bauteile in einer Stückliste zusammengeführt werden.

5.4.5 Gehäuse

Der Unterbau mit den mechatronischen Komponenten und Leitungen soll bei der Auftischvariante der Glasboiler-Maschine mithilfe eines Gehäuses verkleidet werden. Eine Anforderung an die Konstruktion des Gehäuses ist, dass Bodenplatte und Unterbau zur Wartung und Reparatur entnehmbar sind. Von daher sollen diese Teile mithilfe von demontierbaren Verbindungselementen wie Schrauben miteinander befestigt werden. Das Gehäuse soll als Blechbiegeteil ausgeführt werden.

Zur technischen Entwicklung gehören die technische Auslegung und Konstruktion des Gehäuses sowie die Auswahl des Materials und der zugehörigen Produktionsmethode. Es sollen technische Zeichnungen des Konstruktionsteils und ein Konzept zur Anbindung des Teils erstellt werden. Des Weiteren sollen Lieferanten für die Fertigung des Konstruktionsteils sowie für die benötigten Zukaufteile gefunden werden. Die entstehenden Kosten für Produktion oder Einkauf je Teil sind zu dokumentieren. Die technische Entwicklung des Gehäuses ist für den Prototypenbau jedoch nicht zwingend erforderlich.

5.4.6 Elektronik

Im Zuge der technischen Entwicklung in den kommenden Semestern sollen die Basisplatine sowie die Messplatinen neu entwickelt werden. Dafür sollen wenn möglich mehrere ~~kleine~~ Mikroprozessoren



mit zwei Kernen verwendet werden, da die Kapazitäten für mehrere Regelkreise mit der gegenwärtigen Hardware-Architektur begrenzt sind.

Benötigt werden Regelkreise für die Füllstandskontrolle in Boiler und Tanks sowie für das Mischwasser-Fördervolumen und die Regelung des Boilerdrucks. Zusätzlich werden für die Ansteuerung der Magnetventile und Schrittmotoren weitere Ressourcen benötigt. Von daher soll eine Basisplatine sowie mehrere kleine Controller-Platinen im Zuge der Neuentwicklung angewendet werden. Mögliche Bauteile für einen Prototypen wären beispielsweise MCUs wie das STM32 F4001RE Development Board des Herstellers STMicroelectronics. Ein weiteres Problem mit der gegenwärtig verbauten Elektronik ist die Datenerfassung, da die 12-bit-Auflösung der verwendeten Mikrocontroller zu gering ist. Für die Neuentwicklung verwendet werden sollen Mikrocontroller mit 16 bit AD-Wandler für einen Einkaufspreis von maximal 30 €, um die Messung der Analog-Spannungen in ausreichender Auflösung gewährleisten zu können.

Neben der Neuentwicklung der Platinen soll eine Alternative für das gegenwärtig verwendete elektronische Dosierventil von AVS Römer sowie ein Netzteil gefunden werden, die den technischen und ökonomischen Anforderungen entsprechen. Für das Dosierventil wurde bereits ein neues Konzept bestehend aus Kugelhahn und Schrittmotor gefunden, das jedoch noch in das System integriert und getestet werden muss. Dieses Konzept ist unter der Page-ID [13856] sowie unter [56] im Literaturverzeichnis des Projekt-Wikis zu finden. Zusätzlich soll ein Testkonzept erarbeitet werden, um die Dichtheit der verbauten Magnetventile überprüfen zu können.

5.4.7 Software

Der aktuelle Stand der Betriebssoftware gegen Ende des Sommersemesters erfordert noch einige Optimierungen. So müssen noch einige Magnetventile in die Software integriert werden. Die Ventilstellungen und -schaltungen sollen entsprechend geändert und im Hydraulikplan vermerkt werden. Bei der Integration von noch nicht genutzten Magnetventilen muss auf die Kompatibilität bei neuen Programmen geachtet werden. Auch muss das alternative Dosierventil sowie die Platine für die Schrittmotorsteuerung in die Betriebssoftware integriert werden. Bei der Schrittmotorsteuerung muss die Null-/Endpunktbestimmung der Motoren gewährleistet werden.

Des Weiteren muss die Kalibrierung und Signalkonditionierung der Druck- und Temperatursensoren erfolgen. Dafür werden die individuellen Kennlinien benötigt. Außerdem muss eine Option zur Abschaltung der Pumpe im Falle einer Schaltung der Magnetventile eingebaut werden, um die Gefahr eines entstehenden Überdruckes im Betrieb zu vermeiden. Die Füllstandssensoren in Boiler und den Tanks müssen in die Software integriert werden, um ein Voll- bzw. Leerlaufen zu vermeiden. Das Gleiche gilt für den Leitwertsensor, um hochgradig verschmutztes Wasser vom Kaffeebezug auszuschließen und damit die Lebensdauer der Maschine zu erhöhen. Dazu soll im Falle von verschmutztem Bezugswasser das Frischwasserventil schließen und der gesicherte Zustand der Maschine hergestellt werden.

Optional ist eine Überarbeitung der MATLAB-GUI erforderlich, um die Bedienung der labortechnischen Espresso-Maschine während der Inbetriebnahme zu erleichtern.


Im weiteren Verlauf der Entwicklung müssen die Presets für die benutzerdefinierten Einstellungen der Kaffeebezugparameter in die Software implementiert und konfiguriert werden. Zusätzlich dazu müssen auch Funktionen wie der Reinigungsmodus und die Preinfusion implementiert werden, um eine angemessene Funktionalität der Glasboiler-Maschine gewährleisten zu können.

5.4.8 Sonstiges



Sobald die benötigten Konstruktionsteile für den Prototypenbau der Glasboilermaschine entwickelt sind, müssen Stücklisten mit allen benötigten Zukaufteilen erstellt werden. Alle Konstruktionsteile müssen in das definierte System der Teilenummerierung überführt und in Baugruppen gegliedert werden. Ebenfalls muss eine Modulstruktur mit der Berücksichtigung aller Baugruppen für die gesamte Maschine entwickelt werden.

Die Erstellung eines Kostenkalkulators ist zur Erfassung der entstehenden Material- und Produktionskosten aller Bauteile unerlässlich. Dazu soll eine projektübergreifende Datenbank erstellt und darin alle Baugruppen mit den zugehörigen Konstruktionsteilen und Lieferanten erfasst werden.

Es sind Konzepte für die Bedienung und Montage der Glasboilermaschine zu erstellen. Diese Konzepte sollen mithilfe von Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA) erarbeitet werden, die bereits in vorangegangenen Projektarbeiten zu Bedienung und Montage erstellt werden. Die Dokumentationen hierzu sind auf dem Projekt-Wiki unter der Page-ID [13828] zu finden. 

Zusätzlich sollen für die weitere technische Entwicklung Recherchen zur Druckbehälterverordnung sowie zur neuen EU-Richtlinie zur zulässigen Serviertemperatur von Heißgetränken durchgeführt werden.

6 Technische Entwicklung

~~Der zweite Teil dieser Projektarbeit beschäftigt sich mit der technischen Entwicklung der Brühgruppe, die auf Basis der vorangegangenen Konstruktion optimiert werden soll. Neben der technischen Planung der erforderlichen Entwicklungsschritte bis zur Inbetriebnahme wurden im Laufe des Projekts einige technische Änderungen und Optimierungen an bestehenden Bauteilen nötig. Im Folgenden ist der Optimierungsprozess der bestehenden Brühgruppe beschrieben.~~

6.1 Ausgangssituation

Eines der Teile, die baugleich in allen drei Maschinen verwendet werden sollen, ist die sogenannte unbeheizte Brühgruppe. Diese unbeheizte Brühgruppe, bestehend aus einer Siebträgeraufnahme aus Messing und einem Brühgruppeneinsatz aus PVDF, wurde bereits in vorangegangenen Projekt- und Abschlussarbeiten entwickelt.

Zu Beginn dieses Projektes lagen Prototypen aller Teile der Brühgruppe vor. Die Funktionalität der Brühgruppe konnte bis zu Projektbeginn jedoch noch nicht ausreichend getestet werden, da die Betriebssoftware der labortechnischen Espressomaschine noch nicht einsatzbereit war. Im Laufe des Projektes erfolgte dann die erfolgreiche Inbetriebnahme der labortechnischen Espressomaschine, wodurch auch die unbeheizte Brühgruppe im Betrieb getestet werden konnte. Während der ersten Kaffeebezüge mit der labortechnischen Espressomaschine zeichnete sich ab, dass die gegenwärtige Ausführung der Brühgruppe nicht den Anforderungen entspricht. Dementsprechend wurde entschieden, dass die unbeheizte Brühgruppe überarbeitet und optimiert werden soll.

6.1.1 Aufbau der bisherigen unbeheizten Brühgruppe

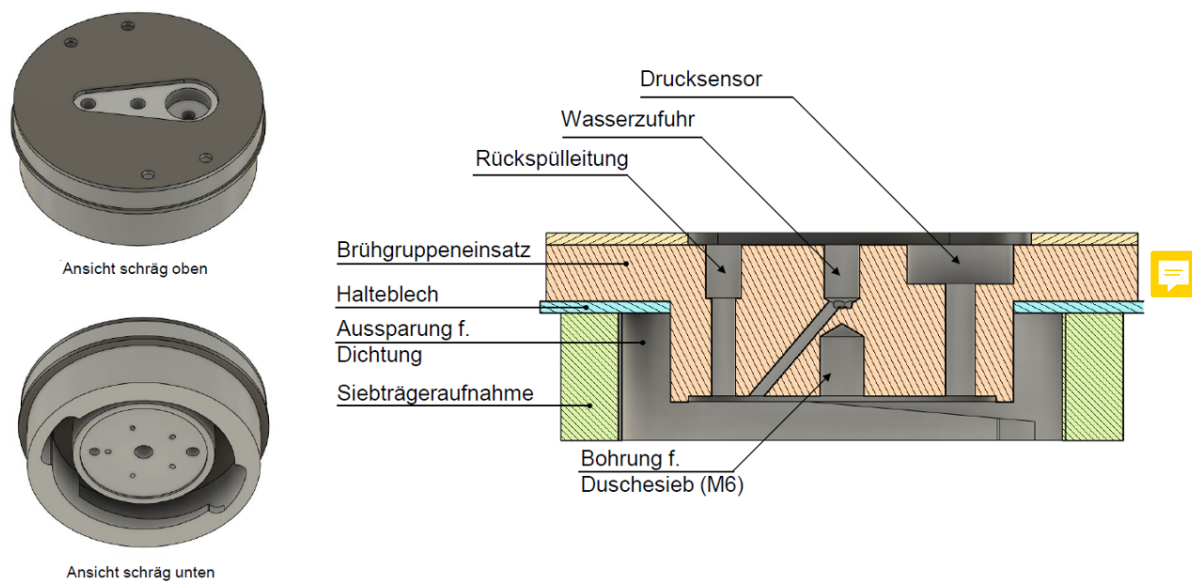



Abbildung 1: Ansichten und Schnitt der bisherigen unbeheizten Brühgruppe

Die Siebträgeraufnahme und der Brühgruppeneinsatz werden mithilfe von vier Schrauben miteinander befestigt. Im Brühgruppeneinsatz befinden sich Aussparungen für den Zu- und Ablauf des Kaffeebezugswassers sowie für einen Drucksensor. Dieser Sensor dient zur Messung des entstehenden Drucks während des Kaffeebezugs. Der Drucksensor wird in die vorgesehene Aussparung des Brühgruppeneinsatzes eingeklebt. Der Siebträger wird von unten in die Siebträgeraufnahme eingesetzt und um 45° gegen den Uhrzeigersinn gedreht, bis der Siebträger gegen die Dichtung im Brühgruppeneinsatz drückt und dicht wird. Das Duschesieb wird per M6-Schraube von unten über einen Gewindeeinsatz in den Brühgruppeneinsatz eingeschraubt.

6.1.2 Erforderliche Änderungen an der bisherigen Brühgruppe

~~Im Folgenden sind die Punkte aufgelistet, die bei der Überarbeitung der Brühgruppe berücksichtigt werden müssen:~~


~~Änderung des Gewindeeinsatzes für das Duschesieb~~

Der Gewindeeinsatz für das Duschesieb soll als M5 anstatt des gegenwärtigen M6 ausgeführt werden. Dazu muss die Bohrung im Brühgruppeneinsatz für den M5-Gewindeeinsatz angepasst werden. 

~~Positionsänderung der ELSA-Anschlüsse für Wasserzulauf und -ablauf sowie des Drucksensors~~

Die Linie, auf der die ELSA-Anschlüsse für Wasserzulauf, Schmutzwasserablauf und die Aussparung für den Drucksensor befinden, soll in der oberen Ansicht in einem 90°-Winkel zu der vertikalen Mittellinie der Siebträgeraufnahme liegen.

~~Recherche und Implementierung eines alternativen Drucksensors~~

Der gegenwärtig verbaute Drucksensor des Lieferanten B+B wird in die Brühgruppe eingeklebt, was ein Qualitätsrisiko darstellt. Zusätzlich sind auch die Kabel auf dem Drucksensor nur aufgeklebt. Mit diesem Drucksensor wird in der Serie mit einer Ausschussrate von 10% gerechnet, was die späteren Qualitätskosten in die Höhe treibt. Diese Ausschussrate ist durch die Verklebungen begründet, die sich durch den Druck und durch die Temperatur in der Brühgruppe während des Kaffeebezugs lösen können, was einen Austausch des Sensors erfordert. Diese Vermutung hat sich bei den Brühgruppenversuchen mit der labortechnischen espressomaschine am 27.06.2022 bestätigt, bei denen sich die Verklebung des Drucksensors bei einem Druck von ca. 9,5 bar schlagartig gelöst hat. 

Deshalb soll ein neuer Drucksensor in die überarbeitete Brühgruppe implementiert werden, der nach Möglichkeit per Verschraubung in der Brühgruppe fixiert wird, für einen Betriebsdruck von 16 bar geeignet ist und über eine integrierte Signalaufbereitung verfügt. Für den Prototypenbau wurde bereits ein alternativer Drucksensoren von Seeed Studio bei mouser.de bestellt, der während der Inbetriebnahme auf dessen Eignung getestet werden soll. Dieser Drucksensor soll mit einem Gewindeeinsatz von KerbKonus in den Brühgruppeneinsatz der überarbeiteten Brühgruppe integriert werden.

Implementierung einer Dichtungsnut

Durch den Druck während des Kaffeebezugs entstehen Undichtigkeiten in der Brühgruppe. Von daher soll eine Dichtungsnut integriert werden, mit der die Dichtung während des Bezugs abgestützt wird und so ein Wegkippen bei hohem Druck verhindert. Diese Nut soll zum jetzigen Stand Teil des Brühgruppeneinsatzes aus PVDF sein und per Fräsen gefertigt werden.

Provisorisch wurden diese Dichtungsstützen für die gegenwärtige Brühgruppe per FLM-Druck aus PLA gefertigt, bei der Montage der Brühgruppe in die Siebträgeraufnahme eingesetzt und für die durchgeführten Brühgruppenversuche verwendet. Mit den 3D-Druckteilen wird die Brühgruppe jedoch nicht richtig dicht, sodass die Nut wahrscheinlich definitiv erforderlich wird.

Anpassen der erforderlichen Eintauchtiefe des Brühgruppeneinsatzes in den Siebträger

Der Abstand zwischen der Oberkante der Dichtung und der Oberkante des Brühgruppeneinsatzes bzw. des Duschesiebs definiert, wie weit der Brühgruppeneinsatz mit dem Duschesieb in den Siebträger eintaucht. Diese Eintauchtiefe hat unter anderem Einfluss auf den entstehenden Druck auf den Kaffee puck während der Preinfusion und der Extraktion. Der Druck hat wiederum Einfluss auf die Durchflussmenge und die Extraktionsdauer. Wichtige Bezugsgrößen wie der Brühgruppendruck, die Durchflussmenge und die Extraktionsdauer müssen in einem bestimmten vordefinierten Bereich liegen, um einen optimalen Kaffeebezug zu gewährleisten.

Nach Versuchen mit der gegenwärtigen Ausführung der Brühgruppe hat sich herausgestellt, dass die Eintauchtiefe bzw. der Überstand des Brühgruppeneinsatzes noch nicht richtig bemaßt ist, da weder das Aussehen noch die Qualität der entstehenden Crema mit der Crema renommierter Maschinen vergleichbar ist. Zusätzlich ist der Kaffee puck nach Bezug meist schlammig und es befindet sich noch viel Wasser im Siebträger. Bei vergleichbaren Maschinen ist dieser Kaffee puck im Gegensatz dazu eher trocken und weist einen leichten Abdruck des Duschesiebs auf.

6.2 Versuche mit der bisherigen Brühgruppe

Es müssen weitere Versuche mit der gegenwärtigen Brühgruppe durchgeführt und mit den Bemaßungen und Bezugsgrößen der Brühgruppen anderer renommierter Maschinen verglichen werden, um das Idealmaß der Eintauchtiefe des Brühgruppeneinsatzes in den Siebträger für die optimierte Brühgruppe zu ermitteln. Um einen Orientierungswert für die erforderliche Eintauchtiefe des Siebträgers zu gewinnen, wurde die E61-Brühgruppe der LELIT Mara PL62X vermessen. Die Messungen ergaben eine Eintauchtiefe von 8 mm.

Ziel der Versuche ist es, die Einflussfaktoren auf die Qualität der Crema feststellen zu können. Diese Einflussfaktoren sollen so optimiert werden, sodass die entstehende Crema mit der angepassten Brühgruppe qualitativ gleichwertig mit der anderer renommierter Hersteller ist.

6.2.1 Versuchsplanung

Übersicht der Variablen

Im Folgenden sind alle Variablen der Brühgruppenversuche dargestellt und in drei unterschiedliche Kategorien eingeteilt.

Tabelle 3: Übersicht der Variablen für die Brühgruppenversuche

| Unabhängige Variablen | Abhängige Variablen | Variable Variablen |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Art der Kaffeeröstung/-mischung | Extraktionsdauer [s] | Mahlgrad Kaffee |
| Wasserqualität (Härte, pH-Wert) | Brühdruck [bar] | Tamperdruck [kg] |
| | Qualität der Crema [optisch] | Kaffeemenge IN [g] |
| | Aussehen Kaffeepuck [optisch] | Espressomenge OUT [ml] |
| | Extraktionsrate [%; nicht messbar] | Brühtemperatur [°C] |
| | Geschmack [nicht messbar] | Flowrate [ml/s] |
| | | Siebträgerinhalt OUT [g] |
| | | Überstand Brühgruppeneinsatz [mm] |

Die unabhängigen Variablen sind über alle Versuche hinweg konstant und können systembedingt nicht variiert werden.

Die abhängigen Variablen werden von den unabhängigen und zu variierenden Variablen direkt beeinflusst und können nur über die variablen Variablen aktiv verändert werden.

Die ~~variablen~~ Variablen können während der Versuche direkt beeinflusst werden. Je nach Versuchsplan und gewünschten Messergebnissen müssen einige dieser Variablen konstant gehalten und andere variiert werden, um einen kausalen Zusammenhang zwischen den einzelnen Variablen und dem Ergebnis herstellen und empirisch beweisen zu können.

Konstante Variablen

~~Um die Ergebnisse der Brühgruppenversuche empirisch auswerten zu können, müssen einzelne ausgewählte Variablen über alle Versuche hinweg konstant gehalten werden.~~ Zu den konstanten Variablen gehören einerseits die Kaffeesorte und das Kaffeebezugswasser. Des Weiteren muss der verwendete Kaffee für die Versuche den gleichen Mahlgrad aufweisen. Der Mahlgrad kann über die Kaffeemühle eingestellt werden. Der Tamperdruck, mit dem der Kaffee im Siebträger komprimiert wird, muss ebenfalls konstant sein. Für den Tamperdruck wurde vor den Versuchen ein Festwert von 12 Kilogramm bestimmt, welcher sich über den Tamper einstellen lässt. Die Kaffeemenge im Siebträger soll für einen doppelten Espresso bei 20 Gramm liegen. Dafür wird die Menge des Kaffeemehls, die in den Siebträger gefüllt wird, vor jedem Versuch mit einer Waage abgewogen. Die Extraktionsdauer ist mit 25 Sekunden definiert. Die Messung der Extraktionszeit startet, sobald gebrühter Kaffee aus dem Siebträger zu tropfen beginnt. Nach 25 Sekunden wird der Brühvorgang manuell beendet. Die Temperatur in der Brühgruppe soll über die Versuche hinweg bei 90 °C liegen. Die Temperatur lässt sich über das Interface der Betriebssoftware der labortechnischen Maschine in MATLAB einstellen.

Zu variierende Variablen

~~Einige ausgewählte Variablen sollen während der Versuche verändert werden, um deren Einfluss auf die Ergebnisse evaluieren zu können.~~ Zu den ~~variablen~~ Variablen gehört zum einen der Überstand des Brühgruppeneinsatzes. Dieser soll zwischen 7 und 10,5 Millimetern in Schritten von 0,5 Millimetern variiert werden, um so den Einfluss auf das Aussehen und die Qualität der entstehenden Crema des gebrühten Kaffees ermitteln zu können. Auch die Flowrate soll während der Versuche zwischen 1 und 2 Millilitern pro Sekunde variiert werden. Die Änderungen erfolgen in Schritten von 0,5 Millilitern pro Sekunde über das MATLAB-GUI an der labortechnischen Espressoemaschine.

Zu messende Ergebnisse während der Brühgruppenversuche

~~Während der Versuche sollen einzelne Variablen gemessen und anschließend ausgewertet werden.~~ Dazu gehören zum einen das Gewicht des Siebträgerinhalts in Gramm, bestehend aus dem Kaffeemehl und dem aufgenommenen Wassers nach dem Brühvorgang. Außerdem soll die Espressomenge in Millilitern gemessen werden, die sich nach dem Brühvorgang in der Tasse befindet.

Über MATLAB soll auch der Verlauf des Brühgruppendrucks in bar sowie den Verlauf der Flowrate in Millilitern pro Sekunde und der Brühgruppentemperatur in °C über die Dauer des Kaffeebezugs gemessen und ausgewertet werden.

Zusätzlich zu den Messungen sollen auch einzelne nicht messbare Merkmale evaluiert werden. Dazu gehören die Optik und Qualität der entstehenden Crema nach dem Kaffeebezug sowie die Optik und den Wassergehalt des Kaffeepucks nach dem Brühvorgang. Diese sollen direkt nach den Versuchen mithilfe einer Kamera dokumentiert und anschließend mit anderen Maschinen verglichen werden.

Übersicht des Versuchsablaufs

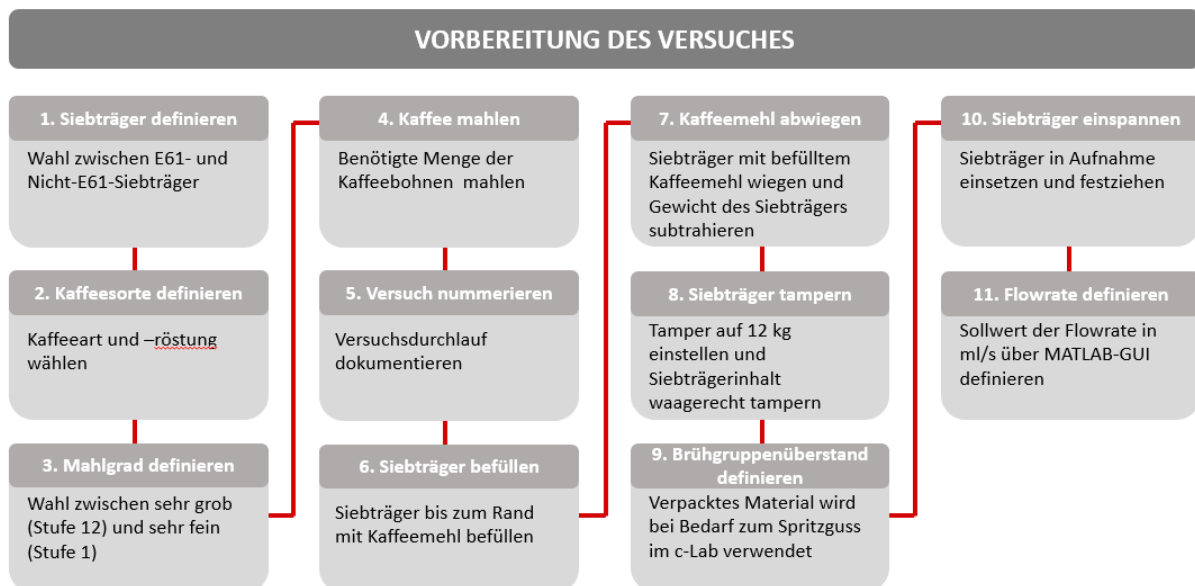


Abbildung 2: Ablauf der Vorbereitung für die Brühgruppenversuche

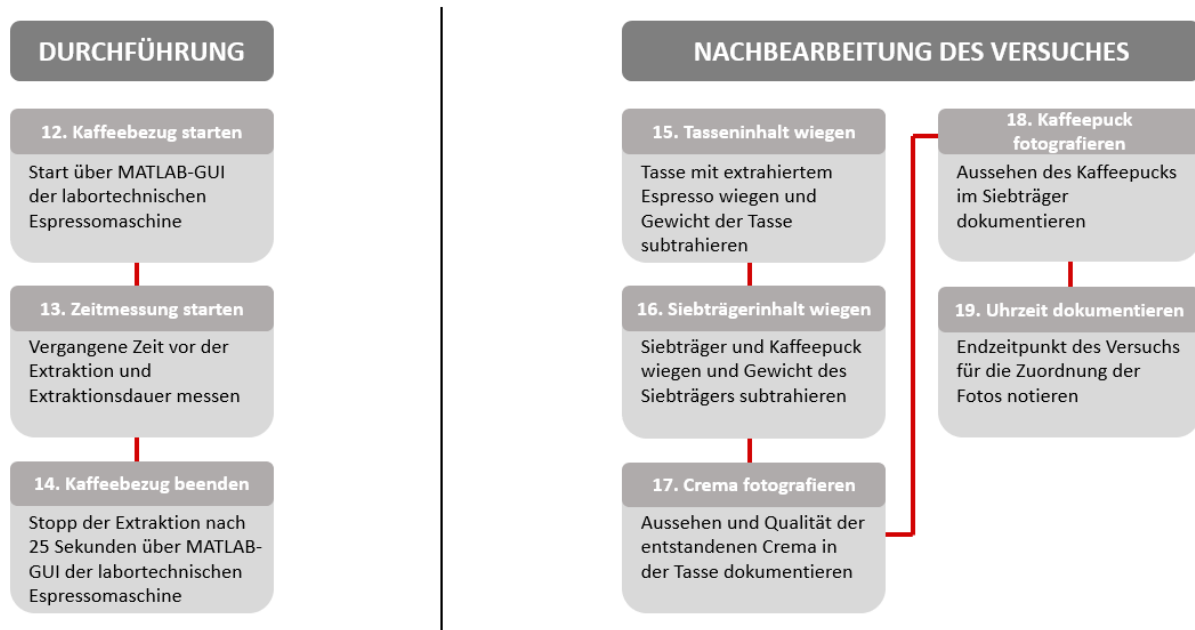


Abbildung 3: Durchführung und Nachbearbeitung der Brühgruppenversuche

6.2.2 Durchführung der Versuche

~~Die Versuche mit der Brühgruppe wurden am 08.06.22 zusammen mit dem Bacheloranten Jan Budnik an dem Prototypen der labortechnischen Espressomaschine und der bisherigen, unbeheizten Brühgruppe durchgeführt.~~

Insgesamt wurden 10 Versuchsdurchläufe dokumentiert. Dabei wurden zuerst drei Versuche mithilfe einer ~~hochwertigen Siebträger-Espressomaschine von dem Hersteller Gaggia~~ durchgeführt, um Vergleichsparameter zu bekommen. Anschließend erfolgten sieben Test-Kaffeebezüge mithilfe des Prototypen der labortechnischen Espressomaschine, in dem die bisher verwendete, unbeheizte Brühgruppe eingebaut war. Während dieser sieben Testläufe wurden einzelne Variablen wie der Überstand der Brühgruppe manuell angepasst und die daraufhin gewonnenen Messergebnisse notiert. Der Brühgruppenüberstand wurde mithilfe von mehreren Ringen aus PLA mit einer Stärke von 0,5 Millimetern geändert, die per FLM-3D-Druck gefertigt wurden. Diese Ringe wurden zwischen Brühgruppeneinsatz und Duschesieb gelegt und miteinander verschraubt, um den gewünschten Überstand des Brühgruppeneinsatzes zu realisieren. Auch zwei Stützen für die Dichtung wurden per FLM-Druckverfahren aus PLA gefertigt, um ein Wegkippen der Dichtung in der bisherigen Brühgruppe zu verhindern.

Die Bedienung der labortechnischen Espressomaschine erfolgte über die MATLAB-GUI der vorläufigen Betriebssoftware. Mithilfe von MATLAB wurden die Verläufe des Brühgruppendrucks, der Mischertemperatur, der Brühgruppentemperatur und der Flowrate gemessen und als CSV-Datei exportiert. Der extrahierte Espresso sowie der Siebträgerinhalt wurden gewogen und deren Gewicht notiert. Des Weiteren wurden mithilfe einer Kamera das Aussehen der entstandenen Crema in der Tasse sowie das Aussehen des Kaffeepucks im Siebträger nach dem Bezug dokumentiert.

6.2.3 Auswertung der Versuche

~~Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Auswertung und Interpretation der gesammelten Ergebnisse.~~ Die Auswertung der Brühgruppenversuche wird anhand der Messergebnisse von Versuch Nr. 10 an der labortechnischen Espressoemaschine veranschaulicht. Anschließend findet sich die Zusammenfassung der Daten aus den restlichen Versuchen an der labortechnischen Espressoemaschine in Tabellenform.

Versuch Nr. 10

Tabelle 4: Eingestellte Versuchsparmeter für Versuch Nr. 10

| | |
|-----------------------|--------|
| Maschine: | Labor |
| Brühgruppenüberstand: | 8 mm |
| Kaffeemahlgrad: | 6 |
| Tamperdruck: | 12 kg |
| Sollwert Flowrate: | 1 ml/s |
| Extraktionsdauer: | 25 s |
| Kaffee IN: | 20,4 |
| Espresso OUT: | 30,7 |
| Kaffeepuck: | 39,9 |

| | |
|------------------------|--------|
| Brühgruppenniederdruck | [mbar] |
| Temperatur Mischer | [°C] |
| Temperatur Brühgruppe | [°C] |
| Flowrate | [ml/s] |

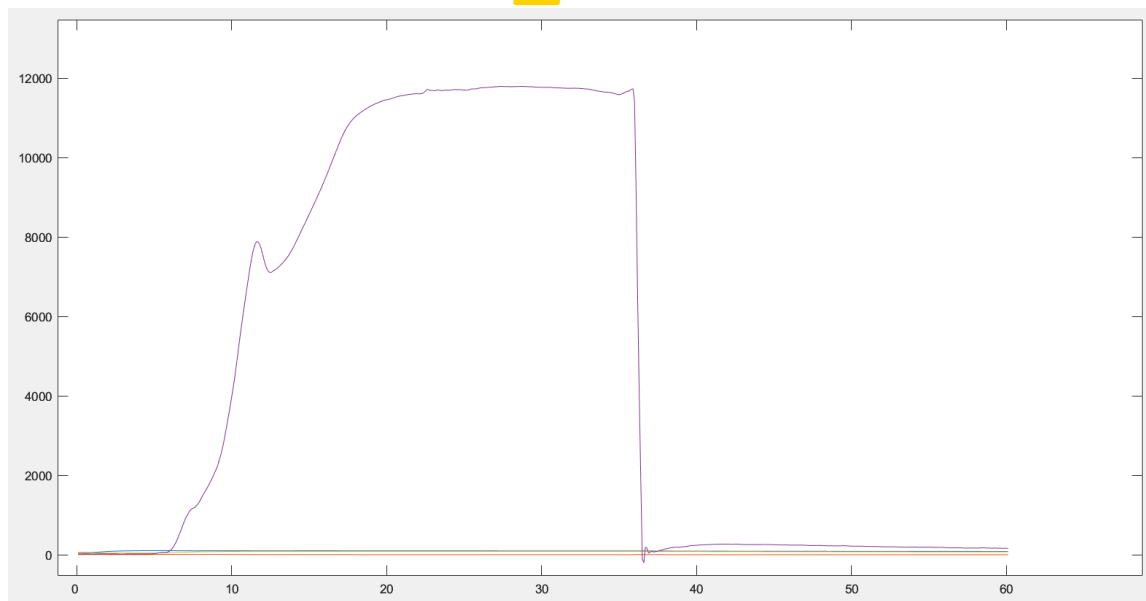


Abbildung 4: Messaufnahme des Kaffeebezuges bei Versuch Nr. 10
X-Achse Zeitverlauf in Sekunden, Y-Achse Messwertindex

Tabelle 5: Verlauf des Brühgruppenniederdrucks bei Versuch Nr. 10 über 60 Sekunden

| Druckverlauf | Ausgangswert | Anstieg 1 | Anstieg 2 | Höchstwert | Abstieg | Endwert |
|-------------------------------|--------------|-----------|--------------|------------|-------------|---------|
| Zeitverlauf [s] | 0 – 5 | 5 – 12 | 13 – 35 | 36 | 36 – 37 | 60 |
| Brühgruppenniederdruck [mbar] | 21 | 21 – 7800 | 7100 – 11500 | 11800 | 11800 – 280 | 250 |

Zu Beginn der Messung beträgt der Brühgruppendruck 21 *mbar*. Nach 5 *s* beginnt der Druck in der Brühgruppe anzusteigen. Zwischen 5 und 11,5 *s* erreicht der Brühgruppendruck den vorläufigen Höchstwert von 7800 *mbar*, fällt dann innerhalb von 1 *s* auf 7100 *mbar* und steigt anschließend bis 21 *s* nach Messbeginn auf einen weiteren Höchstwert von 11500 *mbar*. Zwischen 22,5 und 35 *s* bleibt der Druck mit 11700 *mbar* konstant und steigt ab 36 *s* nach Beginn der Messung auf den absoluten Höchstwert von 11800 *mbar*.

Anschließend fällt der Druck innerhalb von 0,5 *s* auf 280 *mbar* und sinkt bis Ende der Messung noch einmal leicht auf 250 *mbar* ab.

Tabelle 6: Verlauf der Mischer- und Brühgruppentemperatur bei Versuch Nr. 10 über 60 Sekunden

| Temperaturverlauf | Ausgangswert | Anstieg | Höchstwert | Abstieg | Endwert |
|----------------------------|--------------|----------|------------|----------|---------|
| Zeitverlauf [s] | 0 – 1 | 1 – 6 | 6 | 6 – 60 | 60 |
| Mischertemperatur [°C] | 54 | 54 – 104 | 104 | 95 – 100 | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 5 | 5 – 13 | 13 | 13 – 60 | 60 |
| Brühgruppentemperatur [°C] | 41 | 41 – 84 | 84 | 75 – 83 | |

Zu Beginn der Messung beträgt die Mischertemperatur 54 °C und die Brühgruppentemperatur 41 °C.

Nach 1 *s* beginnt die Mischertemperatur anzusteigen und erreicht nach 5,5 *s* den absoluten Höchstwert von 102 °C. Anschließend pendelt sich die Mischertemperatur bis Ende der Messung zwischen 95 und 100 °C ein.

Nach 5 *s* beginnt die Brühgruppentemperatur von 45 °C anzusteigen und erreicht nach 13 *s* den absoluten Höchstwert von 83,5 °C. Bis Ende der Messung pendelt die Brühgruppentemperatur zwischen 75 und 83 °C.

Tabelle 7: Verlauf der Flowrate von Versuch Nr. 10 über 60 Sekunden

| Flowrate | Ausgangswert | Anstieg | Höchstwert | Abstieg | Endwert |
|-----------------|--------------|---------|------------|---------|---------|
| Zeitverlauf [s] | 0 – 7 | 7 – 12 | 12 | 15 – 38 | 38 – 60 |
| Flowrate [ml/s] | 4,5 – 7,5 | 5,5 – 7 | 7 | 1,5 – 3 | 0 |

Zu Beginn der Messung beträgt die Flowrate 4,5 *ml/s*. Bis 6 *s* steigt die Flowrate auf 7 *ml/s*. Zwischen 7 und 12 *s* schwankt die Flowrate zwischen 5,5 und 7 *ml/s* und sinkt von 10,5 und 14,5 *s* auf 1,5 *ml/s*. Bis 38 *s* nach Beginn der Messung schwankt die Flowrate zwischen 1,5 und 3 *ml/s* und fällt danach auf 1 *ml/s* ab. Ab 38 *s* bis Ende der Messung beträgt die Flowrate 0 *ml/s*.



Abbildung 5: Entstandene Crema und Aussehen des Kaffeepucks nach Versuch Nr. 10

Das Resultat ist eine volle, deutlich erkennbare Crema, die in der Qualität vergleichbar mit der Crema der Gaggia TE ist. Der Kaffeepuck im Siebträger nach dem Kaffeebezug ist trocken, jedoch ist kein deutlicher Abdruck des Duschesiebs erkennbar.

6.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Zusammenfassung der Messergebnisse aller durchgeführten Versuche sind im Anhang ab S. 37 dieses Berichts zu finden. Des Weiteren kann das Protokoll der Brühgruppenversuche unter [] gefunden werden. Allgemein wurde während der Brühgruppenversuche festgestellt, dass der Sollwert des Brühgruppendrucks von 8 bis 12 bar während der Versuche Nr. 4 bis 9 nicht annähernd erreicht wurde. Die Höchstwerte des Brühgruppendrucks bei den Versuchen Nr. 4 bis 9 liegen einem Bereich von 1500 bis 3000 *mbar*, was sich im Aussehen und in der Qualität der Crema widerspiegelt. Während dieser Versuche ist so gut wie keine Crema vorhanden. Ausschließlich bei Versuch Nr. 10 konnten Werte von 8000 bis 12000 *mbar* über einen Zeitraum von 25 Sekunden nachgewiesen werden. Das Aussehen und die Qualität der bei diesem Versuch entstandenen Crema ist mit der Crema der Gaggia während der Versuche 1 – 3 vergleichbar. Der Brühgruppenüberstand war wie bei Versuch Nr. 6 – 9 bei 8 *mm*, von daher kann diese Variable als Ursache für das deutlich bessere Ergebnis ausgeschlossen werden. Der Grund für die Verbesserung muss damit bei dem feineren Mahlgrad des Kaffeemehls liegen. Für Versuch Nr. 10 wurde ein Mahlgrad von Stufe 3 im Gegensatz zu Stufe 6 bei den übrigen Versuchen gewählt. Durch das feiner gemahlene Kaffeemehl im Siebträger erhöht sich der Widerstand für das Kaffeebezugswasser. Dadurch kann mehr Druck in der Brühgruppe aufgebaut werden, was dem Ergebnis zugutekommt. Als Resultat gelangte jedoch bei Versuch Nr. 10 mit rund 30 g Espresso auch deutlich weniger Kaffee in die Tasse als bei den Versuchen 1 bis 9, wo die durchschnittliche Espressomenge in der Tasse nach einer Extraktionsdauer von 25 Sekunden bei rund 52 g lag. Auf das Gewicht und den Wassergehalt des Kaffeepucks nach dem Kaffeebezug hatte der feinere Mahlgrad jedoch keine Auswirkungen.

Ein weiterer Grund für das deutlich bessere Ergebnis von Versuch Nr. 10 könnte die durchgeführte Preinfusion des Kaffeepucks vor Kaffeebezug sein. Dafür wurde die Flowrate in dem MATLAB-GUI in den ersten 8 Sekunden des Versuchs manuell auf 9 *ml/s* gesetzt. Das hatte eine effektive Flowrate zwischen 4,5 und 7,5 *ml/s* vor Start der Kaffeeextraktion zur Folge, wodurch der Kaffeepuck vor der Extraktion wie bei renommierten Maschinen üblich mit heißem Kaffeebezugswasser benetzt wurde. Damit könnte auch der deutlich frühere Druckanstieg in der Brühgruppe sowie der erreichte Maximalwert von knapp 12 *bar* erklärt werden.

Für die Konstruktion der optimierten Brühgruppe wurde 11,5 mm als Maß für den Überstand definiert. Dieses Maß soll während der zweiten Versuchsreihe auf das geschätzte Idealmaß von 8 mm verringert und die Ergebnisse dokumentiert werden. Die Verringerung erfolgt durch das manuelle Abdrehen des Brühgruppeneinsatzes aus PVDF in 0,5 mm-Schritten in der Werkstatt der Hochschule München.

6.3 Anforderungen an die optimierte Brühgruppe

Mithilfe der vorangegangenen Versuche war es möglich, alle Anforderungen an die optimierte Brühgruppe zu definieren und für die Konzeption und Konstruktion zu verwenden.

Tabelle 8: Anforderungsliste für die Konzeption der optimierten Brühgruppe

| Nr. | Anforderung |
|-----|---|
| 1 | Die angepasste Brühgruppe soll einen Brühgruppenüberstand von 11,5 mm aufweisen |
| 2 | Die Dichtung soll mit einer Nut abgestützt werden, um ein Wegkippen während dem Kaffeebezug zu verhindern |
| 3 | Die Anschlüsse auf der Oberseite des Brühgruppeneinsatzes sollen in einem 90°-Winkel angeordnet sein |
| 4 | Ein alternativer Drucksensor soll implementiert werden, der durch Einschrauben im Brühgruppeneinsatz befestigt wird |
| 5 | Der Gewindeinsatz für das Duschesieb soll von M6 auf M5 geändert werden |

Ziel ist es, die unbeheizte Brühgruppe so umzugestalten, dass die Brühgruppe im Betrieb dicht bleibt, der Drucksensor sowie die Verschraubungen dem maximal entstehenden Betriebsdruck von 12 bar standhalten und das Aussehen und die Qualität der entstehenden Crema vergleichbar mit der Crema anderer renommierter Maschinen ist.

6.4 Optimierung der unbeheizten Brühgruppe

~~Im Folgenden ist die Entwicklung der optimierten Brühgruppe beschrieben.~~

6.4.1 Konzeptentwicklung

Nachdem alle Anforderungen an die optimierte Brühgruppe definiert waren, konnte mit der Konzipierung der optimierten Brühgruppe begonnen werden.

Der Entwurf der optimierten Brühgruppe erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Ingenieur Armin Rohnen, der mithilfe einiger Skizzen den ersten groben Aufbau der optimierten Brühgruppe definierte. Diese Skizzen mit zugehöriger Beschreibung sind unter der Page-ID [13863] auf dem Projekt-Wiki zu finden. Im neuen Entwurf sollen Siebträgeraufnahme und Brühgruppeneinsatz direkt an die Unterseite des Halblechs geschraubt werden. Neben der Siebträgeraufnahme, dem Brühgruppeneinsatz und dem Halblech soll auch ein Wasserverteiler als zusätzliches Bauteil in der optimierten Brühgruppe Anwendung finden. Dieses Bauteil wird auch in anderen E61-Brühgruppen renommierter Hersteller verwendet, um das Wasser in den Siebträger zu leiten und damit das Kaffeemehl gleichmäßiger zu befeuchten.

6.4.2 Konstruktion der optimierten Brühgruppe

Sobald die optimierte Brühgruppe gemäß den davor definierten Anforderungen konzipiert war, konnte mit der Konstruktion begonnen werden. Im Zuge dessen wurde von der optimierten Brühgruppe ein CAD-Modell in Autodesk Fusion 360 erstellt. Alle für die Konstruktion verwendeten und genormten Maße wurden aus [42] entnommen.

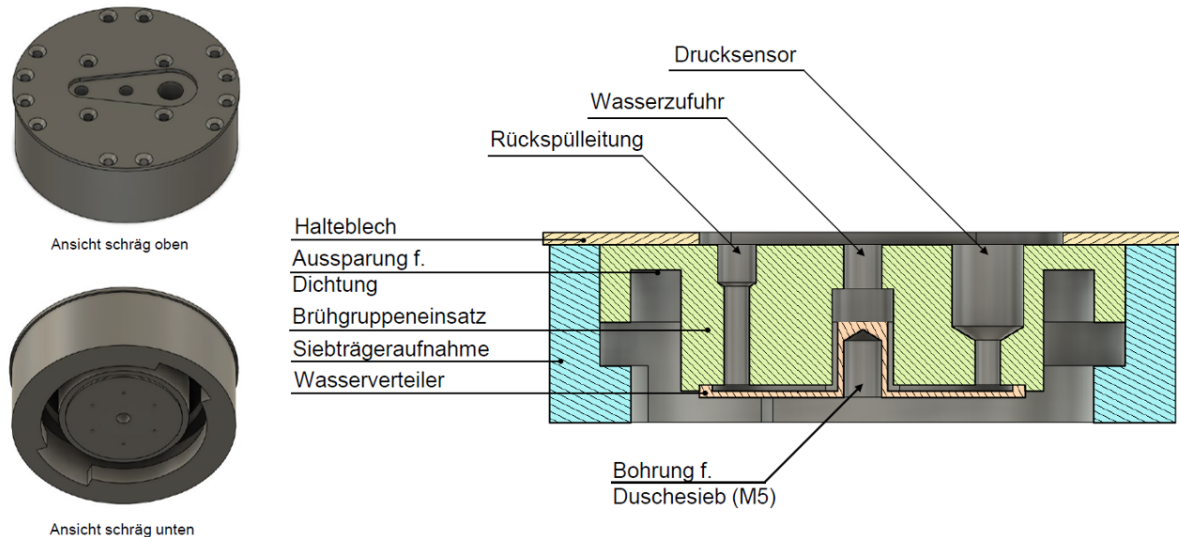


Abbildung 6: Ansichten und Schnitt der optimierten unbeheizten Brühgruppe

In den Abbildungen oben sind unterschiedliche Ansichten der angepassten Brühgruppe sowie die Schnittansicht zu sehen. Wie oben beschrieben werden Siebträgeraufnahme und Brühgruppeneinsatz über beiden von unten an das Halblech angeschraubt.

Die Schraubenauslegung für die optimierte Brühgruppe ~~wurde ebenfalls durch den Ingenieur Armin Rohnen durchgeführt. Die Berechnungen dazu sind im Quellenverzeichnis des Projekt Wikis~~ unter [81] zu finden. Mithilfe der Schraubenauslegung konnte der erforderliche Querschnitt der Schrauben und die benötigte Klemmlänge ermittelt werden, um die Brühgruppe bei einem Betriebsdruck von 12 bar ausreichend abzudichten. Mit diesen Daten war es möglich, die Schraubengröße und -anzahl zu bestimmen.

Um Undichtigkeiten der angepassten Brühgruppe vorzubeugen, sollen 16 anstatt vier M4x25-Senkkopfschrauben aus Edelstahl zur Befestigung von Siebträgeraufnahme, Brühgruppeneinsatz und Halblech verwendet werden.

Die Befestigung der Siebträgeraufnahme am Halblech erfolgt über 12 M4x25-Senkkopfschrauben, die von oben in die angesenkten Bohrungen des Halblechs eingesetzt werden. Diese Schrauben befinden sich auf einem Lochkreisdurchmesser von 98 mm. Acht dieser Schrauben sollen die entstehenden Kräfte aufnehmen, wobei die Übrigen zur Sicherung verwendet werden. Die acht kräfteaufnehmenden Schrauben sind auf dem Lochkreis ausgehend von der waagerechten Mittellinie jeweils um +10°, -10°, +30° und -30° versetzt. Die vier sichernden Schrauben befinden sich auf dem Lochkreis ausgehend von der vertikalen Mittellinie um +10° und -10° versetzt.

Die Bohrungen in der Siebträgeraufnahme sind in einer Tiefe von 20 mm als Durchgangsloch für M4 bemaßt, um die erforderliche Klemmlänge von zu realisieren. Daraufhin folgt eine Kernlochbohrung

für M4, in die das M4-Innengewinde zur Verschraubung gesetzt werden soll. Diese Kernlochbohrung ist durchgängig, sodass die M4-Innengewinde von unten in die Siebträgeraufnahme gesetzt werden können.

Die Befestigung des Brühgruppeneinsatzes erfolgt über die übrigen vier Bohrungen mit M4x25-Senkkopfschrauben. Diese Bohrungen befinden sich auf einem Lochkreisdurchmesser von 48 mm und befinden sich um 45° ausgehend von der horizontalen und vertikalen Mittellinie versetzt. Wie bei den Bohrungen in der Siebträgeraufnahme sind die ersten 20 mm der Bohrung als M4-Durchgangsloch bemaßt, worauf eine Sacklochbohrung für die M4-Gewindeeinsätze der Firma KerbKonus folgt. Diese Gewindeeinsätze werden in das PVDF gedreht und verfügen über ein M4-Innengewinde, durch das die Schrauben fixiert werden. Des Weiteren befinden sich in der Oberseite des Brühgruppeneinsatzes drei durchgängige Aussparungen für Wasserzulauf und -ablauf sowie für den Drucksensor. Die beiden Bohrungen für Wasserzulauf und -ablauf sind für M5-Gewindeeinsätze der Firma KerbKonus konzipiert, sodass dort die ELSA-Anschlüsse für die Schlauchleitungen eingeschraubt werden können. Der Durchmesser des Wasserzulaufs in der Mitte vergrößert sich auf 10,11 mm, was dem Kernloch für ein M12-Innengewinde entspricht. In dieses M12-Innengewinde soll der Wasserverteiler eingeschraubt werden.

In die Aussparung für den Drucksensor soll ebenfalls ein Gewindeeinsatz in der Ausführung G1/4“ eingesetzt werden, da der für den Prototypenbau vorläufig ausgewählte Drucksensor von Seeed Studio über ein nicht-metrisches G1/4“-Außengewinde verfügt. Der hierfür benötigte Kernlochdurchmesser des Gewindeeinsatzes beträgt 11,445 mm.

Außerdem verfügt der Brühgruppeneinsatz über eine Aussparung, in die eine handelsübliche Dichtung mit dem Außendurchmesser von 73 mm, einem Innendurchmesser von 57 mm und einer Dicke von 8 mm gesetzt werden soll. Eine Nut soll die Dichtung im Betrieb abstützen und ein Wegkippen wie bei der bisherigen Brühgruppe verhindern. Während dem Einspannen des Siebträgers entstehen Scherkräfte von 5000 N. Um ein Fließen des PVDF-Teils während dem Einwirken dieser Scherkräfte zu verhindern, musste eine Berechnung zur benötigten Stärke des PVDF-Bodens unterhalb der Dichtungsnut vorgenommen werden.

Die Berechnung der minimalen Stärke des Bodens erfolgte anhand der Formel zur Berechnung der maximalen Schubspannung:

$$\tau_{max} = F/A$$



τ_{max} – Maximale Schubspannung [N/mm²]

F – Scherkraft [N]

A – Scherfläche [mm²]

Die Scherfläche in diesem Anwendungsbeispiel gleicht der Mantelfläche eines Zylinders, sodass die Scherfläche folgendermaßen berechnet wird:

$$A = 2 * R * \pi * H$$



R – Radius des Zylinders [mm]

H – Höhe des Zylinders, hier auch die minimale Wandstärke [mm]

Zuerst erfolgt die Berechnung des Betriebsfestigkeitswerts des Ausgangsmaterials PVDF:

$$\tau_{zul} = \tau_{max}/V$$



τ_{zul} – Zulässige Schubspannung [N/mm^2]

V – Sicherheitsfaktor

Für die Berechnung der zulässigen Schubspannung wird angenommen:

$$\tau_{max} = 55 \text{ N/mm}^2 \text{ (Streckgrenze von PVDF)}$$

$$V = 2$$

Infolgedessen:

$$\tau_{zul} = 27,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (Betriebsfestigkeitswert von PVDF)}$$

Für die Berechnung der Höhe des Zylinders und damit der minimalen Wandstärke der wird angenommen:

$$F = 5000 \text{ N}$$

$$R = 29 \text{ mm}$$

Woraus sich mit

$$F = A * \tau_{zul}$$

$$F = (2 * R * \pi * H) * \tau_{zul}$$

und

$$H = \frac{F}{\tau_{zul} * (2 * R * \pi)}$$

$$H = \frac{5000 \text{ N}}{27,5 \text{ N/mm}^2 * (2 * 29 \text{ mm} * \pi)}$$

$$H = 0,998 \text{ mm}$$

ergibt.

Dementsprechend muss die minimale Wandstärke des Bodens über der Nut mindestens 1 mm betragen, um ein Fließen während dem Einspannen des Siebträgers zu verhindern. In der späteren Konstruktion des Brühgruppeneinsatzes wurde der PVDF-Boden zur leichteren Fertigung mit 4 mm bemaßt.

Der Wasserverteiler aus PVDF verfügt über einen Bolzen, auf den ein M12-Außengewinde geschnitten wird und der von unten in den Brühgruppeneinsatz eingeschraubt wird. Dieser Bolzen verfügt über durchgängige Kerben mit 2 mm Tiefe, über die das Kaffeebezugswasser nach unten in den Siebträger geleitet werden soll. Das Wasser soll sich innerhalb des Wasserverteilers gleichmäßig ausbreiten und gelangt anschließend über mehrere Bohrungen in den Siebträger. Der Wasserverteiler

verfügt an der Unterseite eine Sacklochbohrung für den M5-Gewindeinsatz zur Befestigung des Duschesiebs, so wie es in den Anforderungen definiert wurde.

6.4.3 Prototyping der optimierten Brühgruppe

Es ist geplant, die Siebträgeraufnahme in der Serie aus dem Werkstoff MS58 sowie den Brühgruppeneinsatz und den Wasserverteiler aus PVDF zu fertigen. Die Siebträgeraufnahme kann sowohl in der Serie als auch für den Prototypen per CNC-Fräse und 3D-Fräskopf aus einem handelsüblichen MS58-Rohr mit der Mindest-Wandstärke von 15 mm gefräst werden. Die Prototypen- und Serienfertigung soll extern über Zulieferer wie Xometry erfolgen.

Das Halteblech für den Prototypen wird aus der bestehenden Konstruktion für die labortechnische Espressomaschine übernommen. In der Serie soll es aus 2 bis 3 mm starken Edelstahlblech gefertigt werden, für den Prototypen wurde Aluminium als günstigere Alternative bestimmt. Sofern im weiteren Entwicklungsverlauf nachgewiesen werden kann, dass Aluminium die Anforderungen an die Betriebs- und Dauerfestigkeit dauerhaft erfüllt, soll Aluminium aufgrund des niedrigeren Preises auch für die Serienfertigung der Vorzug gegeben werden. Das Lochbild sowie die Aussparungen für Wasserzulauf und -ablauf sowie für den Drucksensor werden zuerst per Laser in das Blech geschnitten. Gleichzeitig wird auch die Kontur des ungefalteten Teils aus dem Blech geschnitten. Anschließend werden die Bohrungen im Blech angesenkt und das Bauteil anschließend per Abkanten in die letztendliche Form gebracht. Bis auf das Entgraten der Schnittkanten sind keine weiteren Nachbehandlungen der Siebträgeraufnahme für den Prototypen nötig.

6.5 Kostenkalkulation

Im Zuge der Kostenplanung für den Prototypenbau sowie die Serienfertigung der Labor- und Glasboilermaschine wurde eine Kostenkalkulation zur Fertigung der optimierten Brühgruppe in den Losgrößen 1, 10 und 50 aufgestellt.

6.5.1 Stückliste der optimierten Brühgruppe

Im Folgenden sind alle relevanten Teile der optimierten Brühgruppe aufgelistet.

Tabelle 9: Stückliste der optimierten Brühgruppe

| Nr. | Bauteil | Anzahl | Werkstoff | Produktionsmethode | Lieferant - Prototyping | Lieferant - Serie |
|-----|---------------------------------------|--------|-----------|-----------------------|-------------------------|--------------------|
| 1 | Siebträgeraufnahme | 1 | MS58 | CNC-Fräsen | Xometry | Xometry |
| 2 | Brühgruppeneinsatz | 1 | PVDF | CNC-Fräsen/ Drehen | Xometry | Xometry |
| 3 | Wasserverteiler | 1 | PVDF | CNC-Fräsen/ Drehen | Xometry | Xometry |
| 4 | Duschesieb (\varnothing 51,5mm) | 1 | Edelstahl | - | LF- Ersatzteile | LF- Ersatzteile |
| 5 | ELSA-Anschluss M5 | 2 | PPSU | - | AVS Römer | AVS Römer |

| | | | | | | |
|----|---------------------------|----|---------|---|-------------|--------------------|
| 6 | Drucksensor | 1 | - | - | Mouser | Noch zu definieren |
| 7 | Gewindeinsatz ENSAT-M5 | 1 | Messing | - | KerbKonus | KerbKonus |
| 8 | Gewindeinsatz ENSAT-M4 | 4 | Messing | - | KerbKonus | KerbKonus |
| 9 | Senkkopfschraube M4x25 | 16 | A2-70 | - | Frantos.com | Noch zu definieren |
| 10 | Senkkopfschraube M5x10 | 1 | A2-70 | - | Frantos.com | Noch zu definieren |

6.5.2 Kostenkalkulation der Konstruktionsteile

In der folgenden Tabelle sind die Konstruktionsteile der optimierten Brühgruppe sowie deren Außenmaße, Gewicht und den Kosten in der Losgröße 1, 10 und 50 dargestellt.

Tabelle 10: Kostenkalkulation der Konstruktionsteile

| Nr. | Bauteil | Werkstoff | Kosten Los 1 | Kosten Los 10 | Kosten Los 50 |
|-----|--------------------|-----------|--------------|---------------|---------------|
| 1 | Siebträgeraufnahme | MS58 | € 361,07 | € 99,25 | € 45,56 |
| | | Aluminium | € 198,45 | € 50,73 | € 22,73 |
| 2 | Brühgruppeneinsatz | PVDF | € 156,06 | € 48,36 | € 26,29 |
| 3 | Wasserverteiler | PVDF | € 142,22 | € 37,17 | € 18,07 |

6.5.3 Kostenkalkulation der Zukaufteile

In der folgenden Tabelle sind die Zukaufteile der optimierten Brühgruppe sowie deren Lieferanten und Artikel-Nummer sowie den Kosten in der Losgröße 1 und 50 dargestellt.

Tabelle 11: Kostenkalkulation der Zukaufteile

| Nr. | Bauteil | Lieferant | Artikel-Nr. | Kosten Los 1/Stk | Kosten Los 50/Stk |
|-----|---|----------------|---------------------|------------------|----------------------|
| 4 | Duschesieb | LF-Ersatzteile | 1081007 | € 02,08 | € 01,66 |
| 5 | Drucksensor (\varnothing 51,5 mm) | Mouser | 713- 114991178 | € 12,26 | Noch nicht definiert |
| 6 | ELSA-Anschluss M5 | AVS Römer | 367060 | € 15,40 | Noch nicht definiert |
| 7 | Gewindeinsatz ENSAT-SBD M5 | KerbKonus | 347 000 050.500M | € 02,30 | € 01,49 |
| 8 | Gewindeinsatz ENSAT-SBD M4 | KerbKonus | 347 000 040.500M | € 02,30 | € 01,41 |
| 9 | Senkkopfschraube M4x25 | Frantos.com | 4438/1102704 025 | € 00,19 | € 09,51 |
| 10 | Senkkopfschraube M5x10 | Frantos.com | 438/11027050 10 | € 00,12 | € 06,05 |

6.5.4 Kalkulation der Gesamtkosten

Im Folgenden findet sich die Kalkulation der Gesamtkosten für alle Konstruktions- und Zukaufteile in der Losgröße 1 für den Prototypenbau sowie in der Losgröße 50 für die Serienfertigung der optimierten Brühgruppe.

Tabelle 12: Kalkulation der Gesamtkosten der optimierten Brühgruppe

| Nr. | Bauteil | Anzahl | Kosten – Prototyping (Los 1) | Kosten – Serie (Los 50) |
|-----|-------------------------|-----------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | Siebträgeraufnahme | 1 | € 198,45 | € 45,56 |
| 2 | Brühgruppeneinsatz | 1 | € 156,06 | € 26,29 |
| 3 | Wasserverteiler | 1 | € 142,22 | € 18,07 |
| 4 | Duschesieb (ø 51,5 mm) | 1 | € 02,08 | € 01,66 |
| 5 | ELSA-Anschluss M5 | 2 | € 30,80 | Noch zu definieren (€ 30,80) |
| 6 | Drucksensor | 1 | € 12,26 | Noch zu definieren (€ 12,26) |
| 7 | Gewindeeinsatz ENSAT-M4 | 4 | € 09,20 | € 05,64 |
| 8 | Gewindeeinsatz ENSAT-M5 | 1 | € 02,30 | € 01,49 |
| 9 | Senkkopfschraube M4x25 | 16 | € 03,04 | Noch zu definieren (€ 03,04) |
| 10 | Senkkopfschraube M5x10 | 1 | € 00,12 | Noch zu definieren (€ 00,12) |
| | GESAMT | 29 | € 556,53 | (€ 144,93) |

Lieferanten sowie zugehörige Angebote mit Preisen für Bauteile sind unter der Page-ID [13763] und [13906] auf dem Projekt-Wiki zu finden.

Mit den oben genannten Preisen je Bauteil war es möglich, die entstehenden Gesamtkosten für einen Prototypen der optimierten Brühgruppen genau zu kalkulieren.

Die entstehenden Kosten aller Teile des Prototypen betragen 556,53 € je Brühgruppe. Einen Großteil der Kosten fällt durch die Fertigung der Konstruktionsteile durch den Zulieferer Xometry an. Durch die geringe Stückzahl sind die Siebträgeraufnahme, der Brühgruppeneinsatz und der Wasserverteiler im Gegensatz zur Serienfertigung deutlich teurer. Sobald jedoch die optimierte Brühgruppe in der Serie gefertigt wird, wird auch die Fertigung der Konstruktionsteile deutlich günstiger.

Für die Serienfertigung wurde lediglich eine Schätzung der Gesamtkosten vorgenommen, da einige Zukaufteile und Lieferanten für die Serienfertigung noch nicht definiert und damit noch keine genauen Preise bekannt sind. Von daher wurde bei einigen Teilen für die Bestimmung der Gesamtkosten in der Serienfertigung der Preis für den Prototypen übernommen.

Trotz der teilweise übernommenen Preise aus dem Prototyping ist zu sehen, dass die optimierte Brühgruppe in der Serienfertigung mit einem geschätzten Gesamtpreis von 144,93 € je Stück deutlich günstiger sein wird. Noch nicht eingerechnet sind exklusiv gewährte Rabatte wie bei dem Zulieferer

AVS Römer, die den Preis im Prototypenbau sowie in der Serie noch etwas minimieren. Ebenfalls noch nicht eingerechnet sind die Montagekosten, die beispielsweise durch das Eindrehen der Gewindeeinsätze in den Brühgruppeneinsatz verursacht werden. Auch muss noch eine Möglichkeit gefunden werden, den Drucksensor im Brühgruppeneinsatz zu fixieren. Der ausgewählte Drucksensor von Mouser für den Prototypenbau verfügt über ein G1/4“-Gewinde, für den noch ein passender Gewindeeinsatz zum Einschrauben gefunden werden muss, da diese bei dem Zulieferer KerbKonus momentan nicht verfügbar sind. Je nach ausgewähltem Drucksensor für die Serie muss ebenfalls noch eine geeignete Verbindungstechnik für den Brühgruppeneinsatz gefunden werden.

Einsparungspotenzial für die Gesamtkosten besteht in der Serie bei der Auswahl der Lieferanten des Drucksensors und der Schrauben. ~~Angestrebt wird eine Zusammenarbeit mit dem Schraubenlieferanten Würth, wobei zum 01.10.22 noch keine Kontaktaufnahme stattgefunden hat.~~

7 Zusammenfassung

~~Allgemein kann festgehalten werden,~~ dass es noch einiger Arbeitsschritte bedarf, bevor mit dem Prototypenbau und der Inbetriebnahme der Glasboiler-Maschine begonnen werden kann.

Zu den wichtigsten Arbeitspaketen gehören unter anderem die Überarbeitung der gegenwärtigen Konstruktionen von Brühlturm und Unterbau. Der Brühlturm muss in seiner Form an die Designvorgabe angeglichen werden. Auch muss eine Möglichkeit gefunden werden, den aktuell entstehenden Wärmeverlust zwischen Mischer und Brühgruppe zu minimieren. Dazu sollen innerhalb des Brühlturms die drei Magnetventile sowie eine Festdrossel, ein Temperatursensor und der Mischer Platz finden. Dabei ist auf die Zugänglichkeit der Komponenten sowie auf die Leitungsführung zu achten. In dem Unterbau muss ebenfalls die Komponentenanordnung überarbeitet und der Leitungsverlauf optimiert werden. Auch muss evaluiert werden, an welchen Stellen in der Konstruktion noch zusätzliche Messstellen in Form von Druck- oder Temperatursensoren notwendig oder hilfreich sind. Die übrigen gelisteten Arbeitspakete können gegebenenfalls auch während des Prototypenbaus oder der Inbetriebnahme abgearbeitet werden.

Die Versuche mit der bisherigen Brühgruppe haben ergeben, dass bei den meisten Kaffeebezügen in der Brühgruppe nicht der erforderliche Druck von 8 bis 12 bar erreicht wird. Die Versuche Nr. 4 bis 9 mit mittlerem Kaffeemahlgrad und ohne simulierter Preinfusion erreichten Werte von maximal 3 bar, was für einen Kaffeebezug deutlich zu wenig ist. Als Resultat entstand bei diesen Versuchen so gut wie keine Crema. Ausschließlich mit feinem Kaffeemahlgrad und simulierter Preinfusion war es möglich, eine ähnliche Crema wie mit der Gaggia TE zu erzeugen, wie es in der Auswertung von Versuch Nr. 10 gezeigt wird.

Als Resultat der ersten Versuchsreihe wurde beschlossen, dass weitere Brühgruppenversuche mit einem Prototypen der optimierten Konstruktion benötigt werden. Mit diesen Versuchen soll erforscht werden, wie die Qualität der Crema auch mit größeren Mahlgraden verbessert werden kann sowie welcher Einfluss die simulierte Preinfusion auf das Ergebnis hat. Auch der Einfluss des Überstandes des Brühgruppeneinsatzes auf das Ergebnis soll nochmal ausgiebig getestet werden.

8 Ausblick

Im kommenden Wintersemester 2022/23 muss die Entwicklung und Konstruktion aller benötigten Teile für den Prototypenbau der Glasboilermaschine so weit abgeschlossen werden, dass diese bis Ende des Semesters bei den definierten Zulieferern bestellt werden können. Gleiches gilt für die notwendigen Entwicklungen der Elektronik und der Software. Dafür wäre es hilfreich, die einzelnen Arbeitspakete aus Tabelle 2 nach deren Priorität und geschätztem Arbeitsumfang zu ordnen und die zeitnahe Abarbeitung zu koordinieren. So soll sichergestellt werden, dass die wichtigen Arbeitspakete im kommenden Semester definitiv abgearbeitet werden, sodass im Sommersemester 2023 mit dem Prototypenbau der Glasboilermaschine begonnen werden kann.



Des Weiteren müssen mechatronische Komponenten wie die neu ausgewählten Magnetventile und Multifunktionsventile von AVS Römer mithilfe des Pumpenprüfstands im Labor sowie mit der Konstruktion der labortechnischen Espressomaschine ausgiebig auf deren Eignung getestet werden. Musterteile hierzu liegen bereits vor. Auch nicht bearbeitete Arbeitspakete aus dem letzten Semester wie beispielsweise das Testen und die Integration des manuellen Dosierventils müssen im kommenden Wintersemester 2022/23 durchgeführt werden.



Im Laufe der weiteren Entwicklung muss der Prototyp der optimierten Brühgruppe intensiv getestet und der Einfluss der einzelnen Variablen auf die Qualität der Crema evaluiert werden. Sollte sich weiterer Änderungsbedarf ergeben, müssen gegebenenfalls weitere Anpassungen an der Konstruktion der Brühgruppe vorgenommen werden. Das Idealmaß des Brühgruppenüberstandes muss durch Iteration mithilfe mehrerer Versuchsreihen ermittelt werden. Auch der Einfluss der Preinfusion sowie des Kaffeemahlgrads auf die entstehende Crema muss empirisch nachgewiesen und für die weitere Entwicklung der Brühgruppe berücksichtigt werden.



Ziel ist es, auch mit unterschiedlichen Mahlgraden den gleichen Druck- und Temperaturverlauf wie bei Versuch Nr. 10 dauerhaft zu etablieren, um so mit der optimierten Brühgruppe eine Crema mit ausgezeichneter Qualität gewährleisten zu können. Dafür bedarf es deutlich mehr Versuche als in der ersten Versuchsreihe.

Für die Serienfertigung der optimierten Brühgruppe muss ein geeigneter Drucksensor mit zugehörigem Lieferanten zu einem angemessenen Preis gefunden werden. Dazu müssen potenziell geeignete Drucksensoren ausgewählt und auf deren Eignung getestet werden. Auch ein Konzept zu dessen Befestigung im Brühgruppeneinsatz muss erarbeitet werden. Der Drucksensor soll austauschbar sein und den entstehenden Druck- und Temperaturwerten während des Betriebes standhalten. Auch sind die ausstehenden Lieferanten wie beispielsweise für die Schrauben zu definieren und eine detaillierte Kostenkalkulation der optimierten Brühgruppe sowie von der gesamten Glasboilermaschine durchzuführen.

9 Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der zu bearbeitenden Arbeitspakete bis zur Inbetriebnahme

Tabelle 2: Übersicht der zu bearbeitenden Arbeitspakete während der Inbetriebnahme

Tabelle 3: Übersicht der Variablen für die Brühgruppenversuche

Tabelle 4: Eingestellte Parameter für Versuch Nr. 10

Tabelle 5: Verlauf des Brühgruppendrucks bei Versuch Nr. 10 über 60 Sekunden

Tabelle 6: Verlauf der Mischer- und Brühgruppentemperatur bei Versuch Nr. 10 über 60 Sekunden

Tabelle 7: Verlauf der Flowrate von Versuch Nr. 10 über 60 Sekunden

Tabelle 8: Anforderungsliste für die Konzeption der optimierten Brühgruppe

Tabelle 9: Stückliste der optimierten Brühgruppe

Tabelle 10: Kostenkalkulation der Konstruktionsteile

Tabelle 11: Kostenkalkulation der Zukaufteile

Tabelle 12: Kalkulation der Gesamtkosten der optimierten Brühgruppe

Abbildung 1: Ansichten und Schnitt der bisherigen unbeheizten Brühgruppe

Abbildung 2: Ablauf der Vorbereitung für die Brühgruppenversuche

Abbildung 3: Durchführung und Nachbearbeitung der Brühgruppenversuche

Abbildung 4: Messaufnahme des Kaffebezuges bei Versuch Nr. 10

Abbildung 5: Entstandene Crema und Aussehen des Kaffeepucks nach Versuch Nr. 10

Abbildung 6: Ansichten und Schnitt der optimierten unbeheizten Brühgruppe

10 Anhang

Im Folgenden findet sich die Zusammenfassung der eingestellten Parameter der Brühgruppenversuche Nr 1 bis 10 sowie der Messdaten aus den Brühgruppenversuchen Nr. 4 bis 10. Des Weiteren kann das allgemeine Versuchsprotokoll der Brühgruppenversuche unter [84] gefunden werden.

| Nr. | Maschine | Überstand [mm] | Flowrate [ml/s] | Extraktionsdauer [s] | Kaffee IN [g] | Espresso OUT [g] | Kaffeepuck [g] |
|-----|----------|----------------|-----------------|----------------------|---------------|------------------|----------------|
| 1 | Gaggia | 9,5 | - | 27,2 | 20,1 | 45,8 | 38,7 |
| 2 | Gaggia | 9,5 | - | 27,6 | 20,5 | 44,5 | 38,0 |
| 3 | Gaggia | 9,5 | - | 25,5 | 20,5 | 46,4 | 37,7 |
| 4 | Labor | 7,0 | 1 | 25,5 | 20,1 | 55,4 | 38,8 |
| 5 | Labor | 7,5 | 1 | 25,0 | 20,3 | 56,9 | 35,8 |
| 6 | Labor | 8,0 | 1 | 25,0 | 20,3 | 45,3 | 35,0 |
| 7 | Labor | 8,0 | 1 | 25,0 | 19,6 | 45,2 | 34,2 |
| 8 | Labor | 8,0 | 1 | 25,0 | 20,5 | 42,6 | 35,3 |
| 9 | Labor | 8,0 | 1 | 25,0 | 20,4 | 50,0 | 35,4 |
| 10 | Labor | 8,0 | 1 | 25,0 | 20,4 | 30,7 | 39,9 |

Verlauf des Brühgruppendrucks

| Druckverlauf | Ausgangswert | Anstieg 1 | Anstieg 2 | Höchstwert | Abstieg | Endwert |
|-------------------------|--------------|------------|-------------|------------|------------|---------|
| Versuch Nr. 4 | | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 19 | 19 – 33 | 33 – 53 | 53 | 53 – 60 | 60 |
| Brühgruppendruck [mbar] | 45 | 45 – 1240 | 1240 – 1830 | 1830 | 1830 – 950 | 950 |
| Versuch Nr. 5 | | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 8 | 8 – 18 | 18 – 42 | 42 | 42 – 45 | 45 – 60 |
| Brühgruppendruck [mbar] | -22 | -22 – 1850 | 180 – 3000 | 3000 | 3000 – 125 | 115 |
| Versuch Nr. 6 | | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 22 | 22 – 35 | 35 – 57 | 57 | 57 – 58 | 60 |
| Brühgruppendruck [mbar] | 45 | 45 – 1580 | 1580 – 2160 | 2160 | 2160 – 170 | 260 |
| Versuch Nr. 7 | | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 21 | 22 – 38 | 35 – 56 | 56 | 56 – 57 | 60 |
| Brühgruppendruck [mbar] | 21 | 21 – 1600 | 1500 – 1900 | 1900 | 1900 – 160 | 260 |
| Versuch Nr. 8 | | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 45 | 22 – 28 | 28 – 54 | 54 | 54 – 58 | 60 |
| Brühgruppendruck | 45 | 21 – 2080 | 1450 – 2220 | 2220 | 1900 – 130 | 370 |

| | | | | | | |
|-------------------------|--------|-----------|--------------|-------|-------------|-----|
| [mbar] | | | | | | |
| Versuch Nr. 9 | | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 27 | 27 – 37 | 28 – 57 | 57 | 57 – 59 | 60 |
| Brühgruppendruck [mbar] | 31 | 31 – 1650 | 1450 – 2750 | 2750 | 2750 – 120 | 210 |
| Versuch Nr. 10 | | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 5 | 5 – 12 | 13 – 35 | 36 | 36 – 37 | 60 |
| Brühgruppendruck [mbar] | 21 | 21 – 7800 | 7100 – 11500 | 11800 | 11800 – 280 | 250 |

Verlauf der Mischer- und Brühgruppentemperatur

| <i>Temperaturverlauf</i> | <i>Ausgangswert</i> | <i>Anstieg I</i> | <i>Höchstwert</i> | <i>Abstieg</i> | <i>Endwert</i> |
|----------------------------|---------------------|------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Versuch Nr. 4 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 14 | 14 – 19 | 19 | 19 – 24 | 24 – 60 |
| Mischertemperatur [°C] | 50 | 50 – 104 | 104 | 104 – 95 | 90 – 95 |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 18 | 18 – 40 | 40 | 40 – 60 | 60 |
| Brühgruppentemperatur [°C] | 38 | 38 – 86 | 86 | 80 – 85 | - |
| Versuch Nr. 5 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 6 | 6 – 9 | 9 | 9 – 10 | 10 – 60 |
| Mischertemperatur [°C] | 77 | 77 – 103 | 103 | 103 – 95 | 85 – 95 |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 8 | 8 – 16 | 25 | 25 – 60 | 60 |
| Brühgruppentemperatur [°C] | 54 | 54 – 85 | 90 | 90 – 80 | 80 |
| Versuch Nr. 6 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 17 | 17 – 22 | 22 | 22 – 60 | 60 |
| Mischertemperatur [°C] | 44 | 44 – 104 | 104 | 90 – 95 | - |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 22 | 22 – 42 | 42 | 42 – 60 | 60 |
| Brühgruppentemperatur [°C] | 38 | 38 – 85 | 85 | 80 – 85 | - |
| Versuch Nr. 7 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 18 | 18 – 22 | 22 | 22 – 25 | 25 – 60 |
| Mischertemperatur [°C] | 70 | 70 – 104 | 104 | 104 – 95 | 90 – 95 |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 22 | 22 – 42 | 42 | 42 – 60 | - |

| | | | | | |
|---------------------------------|--------|----------|-----|----------|---------|
| Brühgruppen- temperatur [°C] | 42 | 42 – 85 | 85 | 82 – 85 | - |
| Versuch Nr. 8 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 18 | 18 – 22 | 22 | 22 – 60 | - |
| Mischertemperatur [°C] | 51 | 51 – 104 | 104 | 95 – 100 | - |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 22 | 22 – 30 | 30 | 30 – 60 | - |
| Brühgruppen- temperatur [°C] | 37 | 37 – 83 | 83 | 78 – 83 | - |
| Versuch Nr. 9 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 22 | 22 – 27 | 27 | 27 – 45 | 45 – 60 |
| Mischertemperatur [°C] | 50 | 50 – 102 | 102 | 102 – 95 | 90 – 95 |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 26 | 26 – 52 | 52 | - | 52 – 60 |
| Brühgruppen- temperatur [°C] | 40 | 40 – 85 | 85 | - | 80 – 85 |
| Versuch Nr. 10 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 1 | 1 – 6 | 6 | 6 – 60 | 60 |
| Mischertemperatur [°C] | 54 | 54 – 104 | 104 | 95 – 100 | - |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 5 | 5 – 13 | 13 | 13 – 60 | 60 |
| Brühgruppen- temperatur [°C] | 41 | 41 – 84 | 84 | 75 – 83 | - |

Verlauf der Flowrate

| <i>Verlauf der Flowrate</i> | Ausgangs- wert | Anstieg | Höchst- wert | Abstieg | Endwert |
|-----------------------------|-------------------|---------|-----------------|---------|---------|
| Versuch Nr. 4 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 15 | - | 15 | 15 – 60 | 60 |
| Flowrate [ml/s] | 0 | - | 4,5 | 1,5 – 3 | - |
| Versuch Nr. 5 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 15 | - | 15 | 15 – 60 | 60 |
| Flowrate [ml/s] | 0 | - | 4,5 | 1,5 – 3 | - |
| Versuch Nr. 6 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 15 | - | 15 | 15 – 60 | 60 |
| Flowrate [ml/s] | 0 | - | 4,5 | 1,5 – 3 | - |

| | | | | | |
|-----------------------|-----------|---------|-----|---------|---------|
| Versuch Nr. 7 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 15 | - | 15 | 15 – 60 | 60 |
| Flowrate [ml/s] | 0 | - | 4,5 | 1,5 – 3 | - |
| Versuch Nr. 8 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 15 | - | 15 | 15 – 60 | 60 |
| Flowrate [ml/s] | 0 | - | 4,5 | 1,5 – 3 | - |
| Versuch Nr. 9 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 20 | 21 - 26 | 26 | 26 – 32 | 32 – 60 |
| Flowrate [ml/s] | 0 | 3,5 – 4 | 6 | 5,5 – 6 | 2 – 3 |
| Versuch Nr. 10 | | | | | |
| Zeitverlauf [s] | 0 – 7 | 7 – 12 | 12 | 15 – 38 | 38 – 60 |
| Flowrate [ml/s] | 4,5 – 7,5 | 5,5 – 7 | 7 | 1,5 – 3 | 0 |