

Hochschule München
Dachauer Straße 98b
80335 München

Datum
Ihre Zeichen/Nachricht

Status der Espressomaschinen-Entwicklung für das Forschungsprojekt der technischen Beeinflussbarkeit der Geschmacksache Kaffee.

Unsere Zeichen

Status of espresso machine development for the research project of the technical ability to influence the taste of coffee.

Dipl.-Ing. A. Rohnen LbA
FK03 Fahrzeugtechnik
Verbundlabor Fahrzeugtechnik,
Akustik und Dynamik

Telefon: 089 1265 3366
Telefon: 089 8758 9875
eMail: rohnen@hm.edu

Büro: B260
Labor: R4.068

Planegg, 2. März 2021
Dipl.-Ing. Armin Rohnen LbA

Hochschule München
Dachauer Straße 98b
80335 München
www.hm.edu

Straßenbahn-Linien 20,21, 29
Haltestelle Lothstraße
U-Bahn-Linie 1
Haltestelle Mallingerstraße

Einleitung

Ausgehend von den Projektarbeiten zum Kaffeeröster der Kaffeewerkstatt München entstand zum Wintersemester 2016/17 die Idee, über eine labortechnische Espressomaschine mehr über die technische Beeinflussbarkeit der Geschmacksache Espresso zu erforschen.

Die Zusammenarbeit mit der Kaffeewerkstatt München wurde im Sommer 2020 beendet.

Beginnend mit der ersten Bachelorarbeit von Kilian Stach mit dem Titel „Entwicklung einer labortechnischen Mehrkreis- und Mehrkessel-Espressomaschine“ [1] konnte zum Wintersemester 2017/18 dieses Vorhaben umgesetzt werden. Die in dieser Arbeit beschriebene labortechnische Espressomaschine wurde weitestgehend umgesetzt.

Im Zuge der Inbetriebnahme der labortechnischen Mehrkreis- und Mehrkessel-Espressomaschine wurden weitreichende Erkenntnisse gesammelt, die dazu führten, dass ein Forschungsbetrieb dieser Espressomaschine nie erfolgte. Die Erkenntnisse führten zu einer Erfindungsmeldung [12] mit den patentfähigen Merkmalen der kalten Brühgruppe, dem kalten Siebträger, dem Wassermischsystem und dem Borosilikatglasboiler.

Im weiteren Verlauf der Tätigkeiten wurde eine Modellreihe basierend auf der labortechnischen Espressomaschine definiert. Erste Entwicklungstätigkeiten sind abgeschlossen, andere befinden sich in der Bearbeitung, weitere werden durch dieses Dokument definiert.

Insgesamt sollen vier Espressomaschinentypen unter der Verwendung möglichst vieler Gleichteile entwickelt werden:

1. Labor und Röster
Diese Maschine dient der Entwicklung der erforderlichen Regelkreise. Diese Espressomaschine soll andere im Markt befindliche Siebträger-Espressomaschinen abbilden können.
Damit dient diese Maschine dem Kaffeeröster dazu, dem Kunden die Geschmacksunterschiede unterschiedlicher Espressomaschinen demonstrieren zu können, ohne über die entsprechende Auswahl an Hardware verfügen zu müssen. Diese Maschine benötigt für die Bedienung einen PC.
2. Bar und Barista
Basierend auf der Laborvariante ausgestattet mit zwei Brühgruppen einer Skalierbarkeit zu noch mehr Brühgruppen, und versehen mit der Parametrierbarkeit aller relevanten Parameter für die Geschmacksbeeinflussung. Allerdings gegenüber der Laborvariante mit eingeschränkter Anzahl an „Profilen“ und einem Touch-Display-Bedienungskonzept.
3. Home
Gegenüber der Barista-Variante mit kleinerem Boiler, weniger Heizleistung und lediglich einer Brühgruppe.
4. Style
Eigentlich technisch identisch zur Home-Variante, jedoch mit einem Boiler aus Borosilikatglas. Denkbar ist diese Variante auch als Barista mit zwei Brühgruppen, welches zwei Borosilikatglasboiler erfordern würde. Im Wintersemester 2020/21 wurde hier eine weitere Variante konstruiert, bei der sich im sichtbaren Bereich lediglich der Glasboiler und der Brühlturm befinden. Alle anderen Komponenten wurden so angeordnet, dass sie unsichtbar unterhalb der Arbeitsplatte angeordnet sind.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
Inhaltsverzeichnis	3
1. Abgeschlossene Projekt- und Abschlussarbeiten	4
1.1. Entwicklung einer labortechnischen Espressomaschine	4
1.2. Inbetriebnahme der Labor-Espressomaschine	4
1.3. Simulationsmodell einer Siebträger-Kaffeemaschine	4
1.4. Neukonstruktion einer Kaffeemaschinenbrühgruppe	5
1.5. Inbetriebnahme der ersten kalten Brühgruppe	5
1.6. Konstruktion von kalten Brühgruppen und zugehörige Siebträger	6
1.7. Konstruktion Borosilikatglasboiler	6
1.8. Versuche an einem Borosilikatboiler	6
1.9. Konstruktion einer kalten Brühgruppe nach dem E61 Prinzip	7
1.10. Kraftmessung in Z-Richtung	7
1.11. Konstruktion von vier Siebträger-Espressomaschinen	8
1.12. Neukonstruktion der labortechnischen Siebträger-Espressomaschine	8
1.13. Espressomaschine mit Borosilikatglasboiler „under Table“	8
1.14. Programmierung der Mischerregelung	9
2. Aktuelle Abschluss- und Projektarbeiten bzw. Labortätigkeiten	10
2.1. Elektronikentwicklung	10
2.2. Inbetriebnahme Mess-System zur Parametererfassung	13
2.3. Inbetriebnahme Sensorkalibrierung	13
2.4. Leistungsregelung verschiedener Pumpenvarianten	13
2.5. Inbetriebnahme labortechnische Espressomaschine	13
3. Offene Bearbeitungspunkte	14
3.1. Allgemeine Konzeptbeschreibung	14
3.2. Gehäusevariationen	17
3.3. Programmierung labortechnische Espressomaschine	17
4. Literatur / Quellen	18

1. Abgeschlossene Projekt- und Abschlussarbeiten

Seit dem Start der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten in Zusammenarbeit mit der Kaffeewerkstatt München wurden 10 Projekt- und Abschlussarbeiten durchgeführt und abgeschlossen. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeiten haben wesentlich zur Formulierung der Modellreihe beigetragen. Ebenso wurden weiterführende Aufgabenstellungen daraus formuliert.

Auch wenn aus heutiger Sicht die ein oder andere Arbeit nicht für die weitere Entwicklung bzw. Forschung noch Relevanz aufweist, so waren diese Arbeiten für die Entscheidungsfindung der angestrebten Modellvariationen erforderlich.

1.1. Entwicklung einer labortechnischen Espressoemaschine

Diese Arbeit [1] enthält das ursprüngliche Konzept der labortechnischen Espressoemaschine. Diese wurde als Mehrkreis- und Mehrkessel-Espressoemaschine definiert. Bereits während der Durchführung der Abschlussarbeit stellte sich die Erkenntnis ein, dass es für das eigentlich angestrebte Ziel, der Abbildung aller auf dem Markt befindlicher Siebträger-Espressoemaschinen, der falsche Ansatz ist.

Verwendbar hieraus sind das messtechnische Konzept sowie die Recherche der anzuwendenden Vorschriften.

1.2. Inbetriebnahme der Labor-Espressoemaschine

Obwohl bereits bekannt war, dass eine finale labortechnische Espressoemaschine ein anderes, im weiteren ausgeführtes, Konzept verfolgen wird, wurde mit der Inbetriebnahme des ursprünglichen Konzepts begonnen. Aus der Inbetriebnahme der Mehrkreis- und Mehrkessel-Espressoemaschine [2] sollten Erkenntnisse bezüglich des angestrebten messtechnischen Konzepts und der angestrebten Sensorik gewonnen werden.

Die grundlegenden Erkenntnisse dieser Arbeit bestehen darin, dass die Verwendung eines Raspberry Pi mit einem GPIO-Expandershield sowie einem AD-Wandler-Shield für die weiteren Entwicklungsschritte, ggf. auch für hochpreisige Varianten ein Lösungsweg darstellt. Die Ansteuerung von Magnetventilen, Rotationspumpe und Heizelemente über Solid-State-Relais (SSR) ist von einem GPIO-Expandershield möglich, sofern zwischen GPIO-Expander und SSR eine Darlingtonschaltung [3] zwischengeschaltet wird.

Bei der Nutzung des I2C und SPI Bus am Raspberry Pi ist auf die strikte Einhaltung einer seriellen Verdrahtung zu achten. Eine sternförmige Verbindung dieser Bus-Systeme führt zu Disfunktionalität.

Auf die in dieser Arbeit verwendete Sensorik wird im weiteren verzichtet. Für die weitere Entwicklung werden Drucksensoren und NTC-Temperatursensoren der Fa. AVS Römer. In Verbindung mit [6] stellte sich die eigene Entwicklung und Herstellung von Temperatursensoren als zu große Herausforderung heraus. Die elektrische Signalaufbereitung benötigt zwingend Tiefpassfilter zur Rauschunterdrückung der Messsignale.

Auf Basis dieser Arbeit und der Inbetriebnahme der kalten Brühgruppe [6] erfolgt derzeit die Programmierung der Mischerregelung (siehe Abschnitt 2.1).

1.3. Simulationsmodell einer Siebträger-Kaffeemaschine

Diese Projektarbeit [4] befasst sich mit der Überführung thermodynamischer Vorgänge einer Siebträger-Espressomaschine in ein Simulink-Modell. Insbesondere wird auf die Wärmeschichtung der Boiler eingegangen.

Abgeleitet aus dieser Arbeit wurde das Konzept der „Entschichtung“ und die Anforderung der höchstmöglichen Boilerisolierung. Ebenso wurde die Idee des Borosilikatglasboilers basierend auf dem Simulink-Modell nachgerechnet mit dem Ergebnis, dass sich ein Borosilikatglasboiler erheblich schneller aufheizen wird, als ein Stahlboiler. Ebenso weist ein Boiler aus Borosilikatglas eine hohe Isolation auf als ein Stahlboiler.

1.4. Neukonstruktion einer Kaffeemaschinenbrühgruppe

Eine der Erkenntnisse aus der Konstruktion der labortechnischen Espressomaschine [1] ist, dass für die Zielvorstellung die Parametrierung der Espressomaschine von einem Kaffeebezug zum nächsten, eine Brühgruppe herkömmlicher Bauart nicht geeignet ist.

Einer der geschmacksrelevanten Parameter ist die Temperatur des Kaffeebezugswassers am verpressten Kaffee im Siebträger. Die bisherigen Konzepte auf dem Markt befindlicher Siebträger-Espressomaschinen lösen die Problematik der stabilen Kaffeewasserbezugstemperatur durch PID-Regelung der Boilerheizelemente sowie durch Aufheizung der Brühgruppen. Aufgrund der großen Massen (bis zu 5 kg) der verwendeten metallischen Brühgruppen speichern diese eine entsprechend hohe Wärmemenge. Eine Absenkung oder Erhöhung der Wassertemperatur im Boiler um wenige °C wird keine, oder nur sehr geringe Auswirkung auf die Kaffeewasserbezugstemperatur im Siebträger haben.

Um die Kaffeewasserbezugstemperatur von einem Kaffeebezug zum nächsten realisieren zu können, wurde die „kalte Brühgruppe“ [5] definiert. Hierbei handelt es sich um eine Brühgruppe mit einem Einsatz, welcher aus einem thermisch sehr trägen Kunststoff hergestellt wird. Dies führt dazu, dass diese Brühgruppe dem Kaffeebezugswasser nahezu keine Wärme entzieht und somit nicht auf Bezugswassertemperatur gebracht werden muss.

Die kalte Brühgruppe bedingt, dass auch die Verrohrung der Espressomaschine nicht aus metallischen, sondern aus thermisch trägen Materialien hergestellt wird.

Die konsequente Weiterführung dieser Idee ist der kalte Siebträger (siehe Abschnitt 3.3). Auch am Siebträger wird, wenn auch nur in sehr geringem Maße, dem Kaffeebezugswasser Wärme entzogen.

1.5. Inbetriebnahme der ersten kalten Brühgruppe

Die erste Variante der kalten Brühgruppe [5] wurde als Prototyp aufgebaut. In dieser Arbeit [6] ist die Inbetriebnahme dokumentiert.

Der Prototypenbau der ersten kalten Brühgruppe ergab Erkenntnisse, die zu einer fertigungstechnisch vereinfachten Spezifikation der kalten Brühgruppe geführt haben (siehe Abschnitt 3.2).

Ebenso konnte nachgewiesen werden, dass die Verwendung von NTC-Temperatursensoren zu einer Vereinfachung der elektrischen Beschaltung führt. Auch der Nutzen von Tiefpassfilterung in der elektrischen Beschaltung konnte bestätigt werden. Aktuell weisen die Messwerte eine gute Messwertstabilität auf.

Die Entwicklung und Produktion eigener schnellerer Temperatursensoren erwies sich als zu hohe Herausforderung. Zudem wurde von der Fa. AVS Römer ein NTC-Temperatursensor mit Reaktionszeiten < 1 s auf dem Markt eingeführt. Die Weiterführung einer eigenen Temperatursensorentwicklung wurde daher eingestellt.

Auf Basis der Inbetriebnahme der kalten Brühgruppe erfolgt derzeit die Programmierung der Mischerregelung (siehe Abschnitt 2.1)

1.6. Konstruktion von kalten Brühgruppen und zugehörige Siebträger

Mit zwei weiteren Projektgruppen wurden Varianten der kalten Brühgruppe entwickelt. In [17], welche die Weiterführung der Konstruktion einer Siebträger-Espressomaschine behandelt, wurde das Konzept für eine einteilige kalte Brühgruppe in 3D-Druck aus PA12 sowie eine zweiteilige kalte Brühgruppe welche letztlich aus einem in 3D-Druck oder CNC-Fertigung herstellbaren Kunststoffkern und einer metallischen Aufnahme für den Siebträger besteht.

Das Konzept der einteiligen kalten Brühgruppe in 3D-Druck wurde in [18] finalisiert. Für den Prototypenbau und die Erprobung stehen damit mehrere Varianten der kalten Brühgruppe zur Verfügung. Wahlweise in Verbindung mit üblichen Siebträger der E61-Brühgruppe oder Siebträger welche ebenfalls in 3D-Druck hergestellt werden können.

Die Konstruktion der kalten Brühgruppe kann damit insofern als beendet betrachtet werden, dass das Grundkonzept funktionsfähig als vorhanden betrachtet werden kann und im weiteren lediglich eine Anpassung an die jeweilige Maschinenkonstruktion erforderlich ist. Auch die Art der Werkstoffe gilt damit als abgeschlossen.

1.7. Konstruktion Borosilikatglasboiler

Ziel dieser Arbeit [7] ist die Konstruktion eines Versuchsaufbaus für einen Dampfboiler mit einem Zylinder aus Borosilikatglas, um zu prüfen, ob dieser Werkstoff als Boilermaterial geeignet ist.

Diese Arbeit enthält insbesondere die Grundlagen für den Festigkeitsnachweis gemäß der Druckbehälterverordnung. Durch den Versuchsaufbau des Borosilikatboilers (siehe Abschnitt 1.8) wurden weitere Erkenntnisse bezüglich der Konstruktion gewonnen.

1.8. Versuche an einem Borosilikatboiler

Der Versuchsaufbau des Borosilikatboilers ist soweit fortgeschritten, dass die erste Befuerung des Boilers vorgenommen werden kann.

Für den Versuchsaufbau waren einige Änderungen an der Konstruktion des Borosilikatboilers erforderlich. Es wurde insbesondere auf die Verspannung durch Verschraubung verzichtet. Stattdessen wurde ein Federmechanismus eingeführt, der den Boilerdruck aufnimmt und für ausreichend Druck auf dem Dichtungssystem sorgt.

Als problematisch habe sich die vielen Durchführungen dargestellt.

Da das Glas nicht direkt auf einer metallischen Oberfläche verspannt werden darf, ist eine PTFE-Einlage definiert worden. Dies stellt im Deckel kein Problem dar. Da dort keine weiteren Durchführungen vom Boilerinneren in das Boileräußere erforderlich sind. Im Boden stellt sich die flächendeckende PTFE-Einlage als problematisch dar. Für jedes Bauteil, welches durch den Boilerboden durchgeführt wird, musste eine Dichthülse konstruiert werden. Dies führt zu Dichtheitsproblemen und mehrt die Produktionskosten.

Für den Boilerboden ist eine weitere Konzeptphase erforderlich mit dem Ziel, möglichst auf Dichthülsen zu verzichten (siehe Abschnitt 3.7).

Bestätigt wurde die Vorgehensweise für die Versuchsaufbauten der labortechnischen Espressomaschine ein Steuerungskonzept auf Basis eines Raspberry Pi zu verwenden. Erweitert mit GPIO-Expandershield, AD-Wandler-Shield und einer Softwarekombination aus Python-Skripten und MATLAB®-GUI lassen sich die Mess-, Steuerungs- und Regelungsaufgaben praxisorientiert und relativ zügig programmieren.

Erste Tests der SSR-Insel konnten ebenso durchgeführt werden. Hier konnte das Grundkonzept bestätigt werden. Es sind jedoch noch Verbesserungen im Schaltungsdesign erforderlich. Eine Vibrationspumpe kann mit dieser SSR-Schaltung nicht angesteuert werden.

Die in 2020 durchgeführten Messungen und Versuche zeigen sehr beeindruckend den Vorgang der thermischen Schichtung und die Möglichkeiten dieses entweder zu unterbinden bzw. auf zu brechen.

1.9. Konstruktion einer kalten Brühgruppe nach dem E61 Prinzip

Mit dieser Arbeit [9] soll eine kalte Espressomaschinen-Brühgruppe erarbeitet und konstruiert werden, welche nach dem Prinzip der FAEMA E61 Brühgruppe aufgebaut ist. Diese Brühgruppe soll unter anderem als Austauschteil für bestehende Siebträger-Espressomaschinen mit E61 Brühgruppe dienen und hat daher die entsprechenden Anschlussmaße eingehalten. Die bestehende Patentsituation wurde berücksichtigt.

Diese Arbeit ist mehr als Konzeptstudie zu sehen. Die Herstellung eines Prototypen ist auf Basis dieser Arbeit noch nicht möglich.

Grundlegend wurde nachgewiesen, dass das Konzept der kalten Brühgruppe durch Einbringen eines Brühgruppenesatzes aus Kunststoff in die E16 Brühgruppe realisierbar ist.

Das Thema wird aktuell nicht weiter verfolgt.

1.10. Kraftmessung in Z-Richtung

Das ursprüngliche Konzept für die Erfassung der Durchflussmenge basierte auf einer Kraftmessung. Mit dieser Arbeit [10] sollte ein funktionsfähiges Konzept für die Kraftmessung erarbeitet werden.

Es wurde nachgewiesen, dass die hohen Reibwerte der verwendeten Materialien und die konstruktiv vorhandene Verspannung sich negativ auf das Kraftmessergebnis auswirken. Die Funktionalität des unterbreiteten Lösungsvorschlags konnte nicht nachgewiesen werden.

Versuche einer korrekten Kraftmessung in Z-Richtung werden im SoSe2021 wieder aufgenommen. Hintergrund dazu ist, dass es einen Kundenkreis im gehobenen Preissegment von Siebträger-Espressomaschinen gibt, welche diese Funktionalität fordern.

1.11. Konstruktion von vier Siebträger-Espressomaschinen

Ziel dieser Projektarbeit [11] ist die Konstruktion als auch die Festlegung von Lieferanten für vier verschiedenen Siebträger-Espressomaschinen anhand der vorhandenen Hydraulikpläne mit den vorgegebenen Heizleistungen sowie der unterschiedlichen Kesselgrößen und der Bauraumanforderung für die Steuerungselektronik. Die Hauptaufgabe der Projektarbeit gliedert sich in die verschiedenen Einzelbereiche Druckbehälter mit Isolierung, Brühgruppe und Grundrahmen mit Gehäuse.

Die Konstruktionen der Boiler 3,6 l und 1,8 l konnten nahezu fertiggestellt werden. Allerdings stellte sich kurz vor Abgabe der Arbeit heraus, dass die ursprüngliche Annahme der Heizleistung mit 10 W/cm^2 auf 7 W/cm^2 korrigiert werden muss. Hierdurch werden die Heizelemente länger werden. Die finale Konstruktion der Boiler wird in den Abschnitten 3.4 bis 3.7 definiert.

Für das überdachte Konzept der kalten Brühgruppe liegt durch diese Arbeit eine Konzeptskizze vor.

Erste Entwürfe des Grundrahmens können ebenfalls dieser Arbeit entnommen werden.

1.12. Neukonstruktion der labortechnischen Siebträger-Espressomaschine

In [17] wurde die Konstruktion einer Siebträger-Espressomaschine weitergeführt. Hierdurch liegen die Konstruktionsunterlagen für eine 3,6 l Zweikreis-Espressomaschine vor, welche der ursprünglichen Versuchsaufbau der labortechnischen Espressomaschine ablöst.

Für den Bau von Prototypen liegen die Konstruktionen von 1,8 l und 3,6 l Boiler vor. Versuchsteile wurden inzwischen beschafft. Ebenso sind Versuchsteile der Heizelemente und Wasserwendeln vorrätig.

Im SoSe2021 erfolgt der nächste Schritt zur Inbetriebnahme der labortechnischen Espressomaschine. Die vorbereitenden Schritte dazu wurden durch [19] und [20] durchgeführt.

1.13. Espressomaschine mit Borosilikatglasboiler „under Table“

In [23] wurde eine Borosilikatglas-Espressomaschine konstruiert bei lediglich der Boiler und der Brühlturm sich sichtbar oberhalb der Arbeitsplatte befinden. Boiler und Brühlturm können nahezu beliebig zueinander positioniert werden. Alle anderen benötigten Baugruppen befinden sich unterhalb der Arbeitsplatte im nicht direkt sichtbaren Bereich.

Um ein optisch ansprechendes Design für eine neue Generation der Espressomaschinen zu ermöglichen, wurde bereits im Zuge [17] Maschine mit einem Boiler aus Borosilikatglas entworfen. Hierbei besteht der Boiler aus zwei Borosilikatglaszylindern, die den Erwärmungsprozess des Wassers im Boiler für den Anwender sichtbar machen. Bei der Erwärmung des Wassers im Boiler wird ein starker Innendruck aufgebaut. Diese Druckkraft wird durch eine Verspannung zwischen Boiler und Boilerdeckel aufgenommen, wobei zu beachten ist, dass dieser Verspannmechanismus ebenfalls eine Längenänderung aufgrund von Erwärmung zu erfassen hat. In der vorangegangenen Arbeit wurde hierfür eine Stabverspannung zwischen den beiden Borosilikatglaszylindern vorgesehen. Da diese jedoch die Sicht auf das Innere des Boilers einschränkt und gleichzeitig das optisch einwandfreie Gesamtbild für den Anwender stört, soll dieser Verspannmechanismus neu entworfen werden.

Des Weiteren ist, für eine optisch ansprechende Aufteilung der wesentlichen Komponenten, eine Undertable-Konstruktion der Maschine zu entwickeln. Hierbei sollen lediglich der Borosilikatglasboiler sowie der Brühurm mit den wichtigsten Bedienelementen für den Anwender erkennbar sein. Alle weiteren Komponenten, z.B. die Kabelführung oder die Wasserzuführung und -ableitung, sollen unter der Arbeitsplatte angebracht sein, um den Blick nicht durch nebensächliche Komponenten abzulenken. Zur Optimierung des visuellen Gesamtbildes sollen der Brühurm und die darauf befindlichen Bedienelemente angepasst werden. Es müssen sowohl die Kabel- und Leitungsführungen neugestaltet werden, als auch die dafür notwendigen Elemente zur Befestigung und Platzierung angepasst werden.

Durch eine Kostenreduktion von Boilerdeckel und -boden werden für den Endverbraucher die Anschaffungskosten der Espressomaschine gesenkt, wodurch das Produkt für den Kunden attraktiver wird. Aus diesem Grund ist in der diesjährigen Projektarbeit eine Neukonstruktion des Deckels und Bodens durchzuführen, um alle erforderlichen Eigenschaften zu erfüllen.

1.14. Programmierung der Mischerregelung

Durch diese Arbeit [21] wurden die erforderlichen Schritte für die Programmierung der Boilerheizung und der Wassermischung geklärt. Es ist Programmcode in Python und/oder MATLAB® erstellt worden, mit denen beispielhaft die Boilertemperatur und die Wassermischerregelung betrieben wird.

Das Konzept der labortechnischen Espressomaschine sieht vor, dass analog des Zweikreissystems das Heißwasser für den Kaffee- und Teewasserbezug über eine Heizwendel im Dampfboiler erhitzt wird. Die Heizwendel soll so ausgelegt werden, dass eine Boilerausgangstemperatur $> 100\text{ °C}$ des Bezugswassers sichergestellt ist.

Über das Mischverhältnis zwischen Kalt- und Heißwasser wird die gewünschte Bezugstemperatur hergestellt.

Ein AVS Römer Dosierventil, welches sich entweder im Kalt- oder Heißwasserzulauf befindet, soll für die Temperaturmischung sorgen. In der aktuellen Variante wird über ein zweites Dosierventil die Durchflussmenge (Flowrate) beeinflusst. Die Regelung der Flowrate erfolgt im finalen System über die Regelung der DC-Rotationspumpe. An jenem Wasserzulauf, welcher kein Dosierventil beinhaltet, wird im finalen System durch eine Drossel der Durchfluss behindert.

2. Aktuelle Abschluss- und Projektarbeiten bzw. Labortätigkeiten

Aktuell befinden sich mehrere Themen in der Bearbeitung durch Bachelor-Abschlussarbeiten, Projektarbeiten sowie als Projektauftrag für Labormitarbeiter.

2.1. Elektronikentwicklung

Für die Maschinenbaureihe wird eine modulare Elektronik benötigt. In [22] ist hierzu das Konzept beschrieben.

Durch die modulare Systemelektronik wird aus der elektromechanischen Espressomaschine ein Industrie 4.0 Produkt. Die Kernaufgaben der Systemelektronik sind definiert als

- 1.) Übergabe der Bedienanforderung (Tasten) an den Controller
- 2.) Übergabe Systemparameter (Sensoren) an den Controller
- 3.) Übergabe der Stellgrößen (Ventilstellungen, Pumpensollwert) vom Controller an die Mechatronik
- 4.) Übergabe von Nutzerinformationen vom Controller an die Mechatronik

Im weiteren muss die Systemelektronik die Aufgabe

- 5.) Datenübergabe von Controller an WLAN oder Bluetooth

sicher gestellt werden. Wobei dies u.u. durch den Controller selbst geleistet werden kann.

Für die Systemelektronik ist eine dreistufiger Entwicklungsprozess definiert. Zunächst erfolgt die Hardwareentwicklung der erforderlichen elektronischen Schaltungen um die Kernaufgaben der Systemelektronik sicher zu stellen. In dieser Phase ist die Nutzung eines Raspberry Pi PICO als MCU möglich, weil diese Schnittstele dazu integriert wird. Zur Vereinfachung des Entwicklungsprozesses ist primär die Kopplung der Systemelektronik mit einem Raspberry Pi als Schnittstelle zum PC mit MATLAB® vorgesehen. Auf der Platine der Systemelektronik ist der Bauraum für die Ziel-MCU nebst Bluetooth/WLAN-Controller vorzuhalten. Die Belange aus den angrenzenden Projekten, Pumpenprüfstand und labortechnische Espressomaschine (Ein- und Zweigruppig) sowie die noch nicht final entschiedene Sensorik, sind zu berücksichtigen. Zwangsläufig wird dies eine Maximum-Systemelektronik (Basiselektronik), die auch für spätere Projekte zum Einstieg dienen wird.

In einer Zwischenphase wird für die Softwareentwicklung der Basisfunktionalität unter Beachtung der Ziel-MCU der Raspberry Pi PICO als MCU eingesetzt. Die Softwareentwicklung erfolgt modularisiert und parametrisiert, so dass ein Umstieg auf eine andere MCU lediglich eine Umparametrisierung erfordert. Programmiersprache vorzugsweise microPython. Für die zweite Entwicklungsphase wird keine neue Systemelektronik entwickelt.

Die finale Systemelektronik wird auf Basis der Basiselektronik und in Abstimmung der beteiligten Prozesspartner definiert. Operativ ist dies eine Reduktion der Basiselektronik auf die erforderlichen Komponenten. Letztlich werden einzelne Schaltungen aus der Basiselektronik entfernt und die Ziel-MCU integriert.

Als Ziel-MCU wird aktuell ein STM32 (bevorzugt) oder ESP32 betrachtet.

Die Systemelektronik baut auf einer Basisplatine auf. Hierzu gibt es durch [1] einen ersten Entwurf. Dieser ist jedoch nicht funktionsfähig. Von einer nicht vollständig funktionsfähigen Basisplattenvariante existieren drei Exemplare.

Die Basiselektronik ist wie folgt definiert:

1.) Spannungsregler

- externes Netzteil 24 V DC 250 W
- 5,1 V DC mindestens 3 A für die Versorgung der Basiselektronik nebst Raspberry Pi
- 3,3 V Displayversorgung

2.) SSR-Insel

- 5 SSRs zum Schalten von elektrischen Lasten 230 V AC 50 Hz 2 A
- 1 Signaldurchleitung
- 230 V AC Verteiler
 - Netzteil
 - nächste SSR-Insel
 - Heizelement

3.) NTC-Messplatine (Temperatursensoren)

- Ausgelegt für 4 NTCs 10 kOhm mit TP-Filter 10 Hz
- Signalverstärkung auf den Messbereich des ADCs der Ziel MCU (üblich 3,3 V)

4.) Brückenschaltung-Messplatine

- Ausgelegt auf 4 Sensoren in Brückenschaltung
- Abgleichbare Signalverstärkung auf den Messbereich des ADCs der Ziel MCU (üblich 3,3 V)
- Abgleichbare Nullpunktverschiebung
- TP-Filter 10 Hz

5.) Spannungs-Messplatine

- Ausgelegt auf 4 Sensoreingänge
- Abgleichbarer Spannungsteiler mit TP-Filter 10 Hz

6.) Displayplatine

- Montage und Ansteuerung des Displays
- Aufnahme der Spannungsteilerlogik für die Drucktasten

7.) Elektronikumfang der Basisplatine

- 3 x Füllstand mit Zustandsanzeige (LED) über Kurzschlussdetektion (funktionsfähige Schaltung vorhanden), als Spannungseingang aufgelegt
- 2 x Flowmeter mit ISR an MCU
- 2 x links/rechts Erkennung mit ISR an MCU
- 16 LEDs Zustand am GPIO-Expander
- 2 x Analog-Sollwertsignal 0 bis 10 Volt über DAC und Operationsverstärker
- 2 x 8 auf 1 Multiplexer für die Analogeingänge, verteilt auf zwei ADC-PINS
 - MUX1
 - 4 x NTC
 - 4 x Druck
 - MUX2
 - 3 x Füllstand
 - Spannungsteiler Tasten
 - 4 x Spannung von Spannungsmessplatine
- MCP23017, (I2C) GPIO Expander für die Ansteuerung der SSRs

- Datum und Uhrzeit
- LED-Beleuchtung, Helligkeit über PWM (> 100 Hz) aus der MCU
- Integration Helligkeitssensor ggf. auf Spannungs-Messplatine
- Referenzspannung für ADC und NTC-Messplatine

8.) Schnittstellen der Basisplatine

- 2 x 20 PIN für den Anschluss der MCU Raspberry Pi PICO
- 2 x 6 PIN an SSR-Inseln plus DC-Versorgung und GND (jeweils 1 bis 5 aus GPIO Expander)
- 1 x 6 PIN (Rest aus GPIO Expander) an SSR oder ähnliches plus DC-Versorgung und GND
- 4 x Messwertplatine
- 2 x Flowmeter
- 2 x Analog-Sollsignal
- 3 x Füllstand
- 1 x SPI (MOSI, CLK, A0, CS, RESET) zum Display plus Tastenschnittstelle, 3,3 V und GND
- 2 x Drehknopf
- 1 x I2C (SDA, CLK) zum Display plus Tastenschnittstelle, 3,3 V und GND
- 3 x PWM für Servoantriebe
- 1 x LED-Beleuchtung
- Helligkeitssensor

9.) PIN-Belegung Controller (2 x 20 PIN der Basisplatine)

Die 2 x 20 PIN Anschlüsse werden im Raspberry Pi PICO Schema belegt. Es stehen maximal 28 frei programmierbare PINS zur Verfügung. Wobei ADC, I2C und SPI festen bzw. primären PIN-Nr zugeordnet sind.

- 5,1 V
- GND
- (1) 1 GPIO OUT / PWM 8 Hz für Boilerheizelement
- (2) 1 GPIO OUT / PWM 8 Hz für Tassenwärmer
- (3) SPI-MOSI
- (4) SPI-CLK
- (5) SPI-A0
- (6) SPI-CS (Display)
- (7) SPI-RESET
- (8) I2C-SDA
- (9) I2C-CLK
- (10) ADC0
- (11) ADC1
- (12) ADC2 (mit Brücke zu GND)
- (13 ... 15) 3 x PWM für Servoantriebe und DC-Motorsteuerung
- (16) PWM für Beleuchtung
- (17) A0 für MUX
- (18) A1 für MUX
- (19) A2 für MUX
- (20) ENABLE für MUX
- (21) Links-Erkennung Drehknopf 1
- (22) Links-Erkennung Drehknopf 2
- (23) Rechts-Erkennung Drehknopf 1
- (24) rechts-Erkennung Drehknopf 2
- (25) UART TX
- (26) UART RX

- (27) ISR Flowmeter 1
- (28) ISR Flowmeter 2

2.2. Inbetriebnahme Mess-System zur Parametererfassung

Aus der Projektarbeit [24] liegen Konstruktionsunterlagen und weitestgehend die einzelnen Bauteile für ein Mess-System zur Parametererfassung vor, jedoch sind nicht alle Bauteile in der Entwicklung soweit vorangeschritten, dass ein komplette Inbetriebnahme möglich sein wird.

Dort wo es erforderlich ist sind gemäß dem Erkenntnisstand neue Bauteile zu konstruieren. Eine Signalaufbereitung um die Mess-Signale über einen A/D-Wandler zu digitalisieren fehlt derzeit. Hierzu sind die Definitionen zu treffen. Das Mess-System soll auf Raspberry Pi Basis in Verbindung mit MATLAB® erstellt werden. Hierzu ist ein Konzept für MATLAB® und Python Code für den Raspberry Pi vorhanden.

2.3. Inbetriebnahme Sensorkalibrierung

In [25] wurde ein Konzept erarbeitet indem der vorhandene Pumpenprüfstand um die Funktionalität zur Sensorkalibrierung erweitert wird. Das Konzept wird als Funktional angesehen und es wird durch Labormitarbeiter umgesetzt.

2.4. Leistungsregelung verschiedener Pumpenvarianten

Durch die bisher durchgeführten Untersuchungen hat sich der Bedarf von leistungsgeregelten Pumpen ergeben. Das Maschinenkonzept als solches sieht vor über Leistungssteuerung der Förderpumpe das Fördervolumen (bevorzugt) oder den Förderdruck (nur begrenzt technisch möglich) über einen Regelkreis zu regeln.

Dazu gilt es in einem ersten Schritt zunächst die Leistungssteuerbarkeit verschiedener Pumpenvarianten zu ermitteln. Angedacht ist es zu ermitteln, inwieweit sich 230 V AC Antriebe und 230 V AC Schwingkolbenpumpen (Hubkolbenpumpe bzw. Vibrationspumpe) über einen Phasenschnitt-Reglerbaustein in der Leistung bzw. Drehzahl regeln lassen.

Im weiteren wird ermittelt welche Leistung für einen 24 V DC Antrieb zum sicheren Betrieb von Drehschieberpumpen benötigt wird.

2.5. Inbetriebnahme labortechnische Espressomaschine

Wie unter 1.12. beschrieben, ist die Konstruktion und Teilebeschaffung der labortechnischen Espressomaschine soweit fortgeschritten, dass eine Inbetriebnahme der Maschine erfolgen kann. Begleitend zur Inbetriebnahme sollen Verrohrungspläne und ein Kabelbaum entwickelt werden, welche wiederum als Basis zukünftiger Entwicklungen dienen. Ebenso soll ein Werkzeug zum Biegend er Kunststoffrohre zu konzipieren.

Die Bedienung erfolgt zunächst durch Anpassung der unter [26] als MATLAB® GUI erstellten Simulation der Bedienung.

3. Offene Bearbeitungspunkte

Über die 19 abgearbeiteten Projekt- und Abschlussarbeiten mit insgesamt 11 385 Arbeitsstunden wurde das Maschinenkonzept inzwischen eindeutig definiert und in vielen Bereichen weit voran gebracht.

Der weitere Projektplan sieht nun vor, dass die einzelnen erforderlichen Baugruppen soweit auskonstruiert werden, dass diese bei Bedarf bei den jeweiligen Lieferanten bestellt werden können.

Die labortechnische Espressomaschine (Variante „Labor und Röster“) soll bis Sommer 2021 als funktionsfähiger Prototyp umgesetzt sein.

3.1. Allgemeine Konzeptbeschreibung

Basierend auf der Idee eine Siebträger-Espressomaschine zu entwickeln, mit der alle auf dem Markt befindlichen Siebträger-Espressomaschinen abgebildet werden können, ergeben sich für das Maschinenkonzept gewisse Konsequenzen.

Bislang sind als geschmacksbildende Merkmale einer Siebträger-Espressomaschine bekannt:

a) Die Kaffeewasserbezugstemperatur

Um die Kaffeewasserbezugstemperatur beliebig wählen zu können, prinzipiell auch einen Temperaturverlauf über die Kaffeebezugszeit, wurden mehrere Maßnahmen ergriffen.

Alle mit dem heißen Kaffeewasser in Berührung kommenden Bauteile werden aus Materialien hergestellt, welche eine extrem niedrige Wärmekapazität, verbunden mit einer extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeit, aufweisen. Diese Bedingung erfüllen viele hochwertige lebensmittelverträgliche Kunststoffe.

Aufgrund des Maschinendesigns fließt nicht benötigtes Kaffeewasser in den Maschinenüberlauf.

Eine Heißwasserwendel im Dampfboiler stellt für das Kaffeewasser eine Bezugstemperatur $> 100\text{ °C}$ sicher. Über einen PID geregelten Wassermischer (Dosierventil) wird die gewünschte Kaffeewasserbezugstemperatur bzw. deren zeitlicher Verlauf mit hoher Genauigkeit erreicht.

b) Die Durchflussrate des Bezugswassers, bestimmt durch den Mahlgrad des Kaffees und der Kraft des Verpressens (Tamberdruck)

Eine PID geregelte Rotationspumpe mit DC Antrieb stellt die gewünschte Durchflussrate bzw. den zeitlichen Verlauf einer Durchflussrate und hierdurch auch die gewünschte Tassenfüllmenge sicher.

c) Zeitspanne der ersten Benetzung des Kaffeemehls und dem ersten Austreten von Kaffee aus dem Siebträger. Diese Zeitspanne wird als Pre-Infusion bezeichnet.

Jedes Gramm Kaffeemehl nimmt ca. 1 Gramm Wasser auf. Über die PID geregelte Rotationspumpe lassen sich mehrere Szenarien abbilden.

Die Durchflussrate der ersten $X\text{ cm}^3$ Wasser kann bei vordefinierter Masse des Kaffeemehls eine abweichende Größe annehmen.

Während der ersten X *Sekunden* des Kaffeebezugs wird anstelle der Durchflussratenregelung eine Max-Druck-Regelung durchgeführt. Erst nach Überschreiten der gewünschten Preinfusionszeit wird die Durchflussratenregelung aktiv.

Auch Kombinationen dieser Logik sind denkbar. Zu dieser Funktion ist noch Forschung an der zu realisierenden labortechnischen Espressomaschine erforderlich.

Neben dieser grundlegenden Eigenschaft werden weitere Alleinstellungsmerkmale angestrebt.

3.1.1. Schnelles Aufheizverhalten

Die Verordnung der Europäischen Union Nr. 801 von 2013 mit dem Titel „Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an den Stromverbrauch elektrischer und elektronischer Haushalts- und Bürogeräte“ fordert von jedem Haushaltsgerät nach 15minütiger ungenutzter Betriebszeit für die Reduzierung des Energieverbrauchs die Schaltung in einen Stand-By-Modus. Derzeit erfüllt keine der auf dem Markt befindlichen Siebträger-Espressomaschinen diese Anforderung der EU. Hintergrund ist, dass marktübliche Siebträger-Espressomaschinen in dieser Zeit noch nicht im betriebsbereiten Zustand sind.

Das technische Problem liegt in der Schichtung des Wassers im Boiler.

Durch die Anomalie des Wassers weist warmes Wasser eine geringere Dichte als kaltes Wasser auf. Dies führt dazu, dass das heißere Wasser sich über das kältere Wasser im Boiler „aufschichtet“. Diese Schichtung des Wassers wird durch die Wärmeleitung des Boilermaterials erheblich zeitversetzt aufgehoben.

Lösungsansatz hierzu ist eine Kaltwasserzuführung oberhalb des üblichen Wasserstands sowie eine Entwässerungsbohrung des Boilers erforderlich. Durch Umpumpen des kalten Wassers wird die Schichtung des Wassers gebrochen.

Ein weiterer Lösungsansatz ist, die Dampfleitung so lange offen zu halten, bis dass das Wasser zu „kochen“ beginnt. Durch das Sprudeln des Wassers bei seiner Siedetemperatur erfolgt eine Durchmischung.

Durch die Entschichtungsfunktion während der Aufheizphase soll die tatsächliche Aufheizzeit nahe an der theoretisch berechneten Aufheizzeit liegen. Die theoretisch berechneten Aufheizzeiten für die unterschiedlichen Boiler-Heizelementvarianten betragen:

- 7,2 l 2xZweikreisboiler mit 2x2250 W Heizelement 400 Sekunden
- 7,2 l 2xZweikreisboiler mit 2250 W Heizelement 800 Sekunden
- 3,6 l Zweikreisboiler mit 2250 W Heizelement 400 Sekunden
- 1,8 l Zweikreisboiler mit 1800 W Heizelement 250 Sekunden
- 1,99 l Borosilikatglasboiler mit 1200 W Heizelement 420 Sekunden

3.1.2. Energieeffizienz

Die Energieeffizienz der Stahl-Boilerkonstruktionen werden durch eine 25 mm vollumfängliche Isolationsschicht ohne Wärmebrücken realisiert.

Die Variante mit Borosilikatglasboiler ist in Doppelverglasung ausgeführt. Dies ist neben der Sicherheitsvorkehrung auch eine Verbesserung in der Energieeffizienz.

3.1.3. Verkalkungsschutz

Ein Leitwertsensor erfasst die zugeführte Wasserqualität. Wird Wasser mit zu hoher elektrischer Leitfähigkeit der Espressomaschine zugeführt, so ist dies ein Indiz für zu kalkreiches bzw. anderweitig verschmutztes Wasser.

Überschreitet die elektrische Leitfähigkeit einen Grenzwert, dann erscheint ein Warnhinweis in der Maschinensteuerung/Maschinenanzeige. Der weitere Betrieb der Maschine erfolgt auf Risiko des Anwenders. Das Auftreten des Warnhinweises wird in der Machinenelektronik im Fehlerspeicher abgelegt.

3.1.4. Halbautomatisierte Boilerreinigung bzw. Boilerentkalkung

Trotz sorgfältigen Umgangs mit der Wasserzuführung kann es zu Verschmutzung und Verkalkung des Boilers kommen. Für die Reinigung und Entkalkung des Boilers wird ein halbautomatisierter Reinigungsprozess in der Maschinensteuerung hinterlegt.

Es erfolgt ein Abpumpen des Boilerinhalts. Danach wird über einen Bypass in der Wasserversorgung der Boiler mit einer Reinigungsflüssigkeit befüllt. Über den Füllstandssensor wird 2/3 des Boilervolumens erkannt. Daraufhin wird der Boiler anhand der Durchflussmessung auf 95 % seines Fassungsvermögens weiter befüllt. Je nach Beschaffenheit der Reinigungsflüssigkeit wird der Boiler auf „Reinigungstemperatur“ gebracht.

Nach einer noch zu definierenden Reinigungszeit wird der Boiler wieder entleert. Die Entleerung erfolgt ggf. über die mit einem Blindsieb verschlossene Brühgruppe. Hierdurch wird erreicht, dass die Brühgruppe und alle Leitungen ebenfalls in diesen Reinigungsprozess eingebunden sind.

Nach der Beseitigung der Reinigungsflüssigkeit aus der Maschine erfolgt ein mehrmaliges Durchspülen der Maschine mit kalkfreiem Frischwasser nach dem gleichen Prinzip.

3.1.5. Reinigungsprogramm wie bei vollautomatischen Espressomaschinen

In Siebträger-Espressomaschinen müssen mindestens einmal täglich die öligen Rückstände des Kaffees beseitigt werden. Dies erfolgt über eine „Rückspülung“. Hierzu wird ein Siebträger mit Blindsieb eingespannt. Im Blindsieb befindet sich ein Reinigungsmittel.

Der Ablauf des Reinigungsprozesses wird durch den Controller der Maschine gesteuert. Das Reinigungsmittel wird durch heißes Wasser aufgeweicht und die entstandene Reinigungsflüssigkeit wird durch die verschmutzten Bauteile gefördert. Es erfolgt zudem eine Durchspülung des Systems.

Ob ein Blindsieb eingesetzt ist kann anhand des steigenden Systemsdrucks bei gleichzeitiger „Nullförderung“ erkannt werden. Hierüber kann erkannt werden, ob eine Reinigung mit Rückspülung oder eine einfache Spülung durchgeführt werden soll.

3.1.6. Teewasserbezug mit Wunschtemperatur und Wunschwassermenge

Analog zum Espresso-Bezug ist auch für den Teewasserbezug die Bezugswassertemperatur sowie die Fördermenge frei wählbar.

3.2. Gehäusevariationen

Abhängig der Grundrahmenkonstruktionen wird zu einem späteren Zeitpunkt über Gehäusevariationen diskutiert werden.

Im aktuellen Entwicklungsstand werden die Prototypen entweder ganz ohne Gehäuse oder durch Glasplattenverblendung realisiert.

3.3. Programmierung labortechnische Espressomaschine

Im ersten Schritt zur späteren Bedienung soll ein detailliertes Konzept entwickelt, beschrieben und als MATLAB®-GUI demonstriert werden.

Die einzelnen Maschinenkonzepte unterscheiden sich in Funktionsumfang und technischer Ausstattung. Das (unvollständige) Maximum der angestrebten Funktionen ist beschrieben mit:

- freier Temperatureinstellung ggf. Temperaturverlauf und Menge des Kaffeebezugswassers
- freier Temperatureinstellung ggf. Temperaturverlauf und Menge des Teewassers
- freier Boilerdruck (bis zu einem Grenzwert)
- freie Gestaltung der Preinfusionszeit und des Preinfusionsvorlaufes (Füllgeschwindigkeit der Todwassermenge zum Sättigen des Kaffees)
- freie Gestaltung des Kaffeebezugs in Durchflussmenge je Sekunde bzw. Durchflussmengenverlauf
- Aktion Kaffeebezug 1 Tasse
- Aktion Kaffeebezug 2 Tassen
- Aktion Tassenwärmung
- Aktion Dampf
- Aktion Teewasserbezug
- Aktion Spülung (ohne Druckaufbau Brühgruppenspülung, mit Druckaufbau Maschinenreinigung)
- Presets abgeleitet aus der Vermessung im Markt befindlicher Espressomaschinen
- Abspeicherung von Presets welche aus Kaffeebezug hervorgegangen sind

Für die Wassermischung, Boilerdruck und Durchflussrate werden PID-Regelkreise benötigt.

4. Literatur / Quellen

1. Kilian Stach, Entwicklung einer labortechnischen Mehrkreis- und Mehrkessel-Espressomaschine, Bachelor-Thesis, 2018
2. Rawad Alshikh, Frank Hadwiger, Timo Sieber, Inbetriebnahme der Labor-Espressomaschine, Projektarbeit, 2018
3. Johann Siegl, Schaltungstechnik- Analog und gemischt analog/digital, 2. Auflage Springer Berlin Heidelberg New York, 2005
4. Matthias Kretzschmar, Joshua Bauske, Christoph Binder, Simulationsmodell einer Siebträger Kaffeemaschine, Projektarbeit, 2018
5. Marc Arendt, Neukonstruktion einer Kaffeemaschinenbrühgruppe, Bachelorarbeit 2018
6. Fabian Deiser, Felix Müller, Stefan Sellmaier, Johannes Amann, Inbetriebnahme und Vorbereitung zur Erprobung der kalten Brühgruppe für eine labortechnische Espressomaschine, Projektarbeit 2019
7. Tobias Tritschler, Konstruktion zweier Druckbehälter für eine hochwertige Siebträgermaschine, Bachelorarbeit 2019
8. Sebastian O'Reilly, Florian Fritz, Tim Kittelmann, Johannes Kastner, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung an einem Borosilikatdampfboiler 2020
9. Sebastian Bitzinger, Lorenz Fricke, Marinus Winhart, Konstruktion einer kalten Brühgruppe nach dem E61 Prinzip, Projektarbeit 2019
10. Andreas Boeck, Ludwig Laurent, Marcel Seibold, Kraftmessung in Z-Richtung, Projektarbeit 2019
11. Melissa Schütz, Moritz Albrecht, Vladyslav Sosnytskyi, Konstruktion von vier Siebträger-Espressomaschinen, Projektarbeit 2020
12. Erich Weidler, Armin Rohnen, Erfindung Espressomaschine mit kalter Brühgruppe, Erfindungsmeldung 2019
13. Armin Rohnen, Hydraulikplan mit Entschichtung, 2019
14. VERORDNUNG (EU) Nr. 801/2013 Festlegung von Ökodesign- Anforderungen an den Stromverbrauch elektrischer und elektronischer Haushalts- und Bürogeräte
15. Formelsammlung und Berechnungsprogramme Anlagenbau, <https://www.schweizer-fn.de/>, gesehen am 22.03.2020
16. Vorrichtung zum erwärmen eines Trinkgefäßes, Patentschrift EP 1 878 369 A1, Anmeldetag 14.07.2006
17. Tobias Blädel, Til Ahlgrim, Lukas Ankner, Yasin Bolat, Fabian weber, Florian Michal, Konstruktion einer Siebträger-Espressomaschine, 2020
18. Tolga Acar, Antonia Huber, Karim Ragab, Kerstin Seitz, Konstruktion der Brühgruppen und zugehöriger Siebträger für den 3D-Druck, 2021
19. Fabian Weber, Mechatronische Entwicklung und Inbetriebnahme einer labortechnischen Espressomaschine, 2021
20. Florian Johann Michal, Entwicklung und Inbetriebnahme des hydraulischen Aufbaus einer labortechnischen Espressomaschine, 2021
21. Felix Müller, Entwicklung zweier Temperaturregelungen (Folgeregelung) mithilfe von Python und MATLAB®, 2020
22. Armin Rohnen, Konzept: Modulare Systemelektronik für Siebträger Espressomaschinen, 2021
23. Ludwig Ackermann, Lucas Kolbinger, Marko Kurtusic, Isabell Nuißl, Matthias Rieseberg, Melanie Schuster, Edon Shala, Espressomaschine mit Borosilikatglasboiler, 2021
24. Sebastian Czernin, Jonas Pytlik, Michael Zanziger, Mess-System zur Ermittlung der Betriebsparameter von Espressomaschinen
25. Korbinia Ass, Valentin Sachmann, Simon Schmetz, Entwicklung eines Kalibriersystems für Druck- und Temperatursensoren, 2021
26. Anna Gutenberger, Yasin Mahan, Michael Spießl, Artur Tomczak, Entwicklung eines Bedienkonzeptes für eine Espressomaschine und Simulation der Bedienung mit MATLAB® App Designer