

Technische Entwicklung und Kostenoptimierung einer modularen Siebträger-Espressomaschine

Erforschung von Maßnahmen für die wirtschaftliche Fertigung in Kleinstückzahlen

Technical development and cost optimization of a modular portafilter espresso machine

Research into measures for economical production in small quantities

31.05.2024

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

The aim of this report is to investigate measures that can be used to achieve cost-effective production in manufactory operations. First, the current state of the art on the subject of cost optimization in product development is mapped. Possible measures for manufacturing operations are derived from this and applied to a specific example in the course of a case study. The case study comprises the further development of a two-group portafilter espresso machine for gastronomic use within the academic environment and the associated design and cost optimization. This is followed by an evaluation of the measures implemented and their impact on the economic efficiency of the developed machine. Finally, a classification is made as to how the identified measures can be applied in comparable projects and which framework conditions are required for economical production in a manufactory operation. It becomes clear that not every strategy for cost optimization that is described in the literature can be applied to manufactory operations. The implementation of the case study shows that the most effective way to reduce manufacturing costs in manufactory operations is to reduce the total number of parts, reduce the variety of parts and use as many identical parts as possible between different product variants. A functioning system for part and variant management is essential for reducing manufacturing costs. If in-house production capacities are not available, external production is preferable. By increasing the production volume of identical parts and using manufacturing processes without tool costs, the manufacturing costs of a product produced in a manufactory can be significantly reduced. The decision to use additive manufacturing processes in series production can also result in a reduction in costs. However, this decision must be made as early as possible in the development phase and the design of the parts concerned must be adapted accordingly.

Das Ziel dieses Berichts ist die Erforschung von Maßnahmen, mit welchen die wirtschaftliche Fertigung im Manufakturbetrieb realisiert werden kann. Dazu wird zuerst der aktuelle Stand der Technik zum Thema Kostenoptimierung in der Produktentwicklung abgebildet. Aus diesem werden mögliche Maßnahmen für den Manufakturbetrieb abgeleitet und auf ein konkretes Beispiel im Zuge einer Fallstudie angewandt. Die durchgeführte Fallstudie umfasst die Weiterentwicklung einer zweigruppigen Siebträger-Espressomaschine für den gastronomischen Betrieb innerhalb des akademischen Umfelds und damit einhergehend die Konstruktion und Kostenoptimierung. Anschließend erfolgt eine Bewertung der durchgeführten Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der entwickelten Maschine. Als letztes wird eine Einordnung vorgenommen, wie sich die identifizierten Maßnahmen in vergleichbaren Projekten anwenden lassen und welche Rahmenbedingungen für die wirtschaftliche Fertigung im Manufakturbetrieb erforderlich sind. Es wird ersichtlich, dass sich nicht alle in der Literatur vermittelten Strategien zur Kostenoptimierung auf den Manufakturbetrieb übertragen lassen. Die Durchführung der Fallstudie zeigt, dass sich die Herstellkosten im Manufakturbetrieb am effektivsten über die Verringerung der Gesamtteilezahl, die Verringerung der Teilevielfalt und die Verwendung von möglichst vielen Gleichteilen zwischen verschiedenen Produktvarianten realisieren lässt. Ein funktionierendes System zum Teile- und Variantenmanagement ist hierbei unerlässlich. Bei nicht vorhandenen eigenen Fertigungskapazitäten ist die Fremdfertigung der Eigenfertigung vorzuziehen. Über die Erhöhung von Produktionsvolumen der stückzahlabhängigen Teile sowie den Einsatz von Fertigungsverfahren ohne Werkzeugkosten lassen sich die Herstellkosten eines im Manufakturbetrieb hergestellten Produktes deutlich senken. Die Entscheidung zur Verwendung von additiven Fertigungsverfahren in der Serie kann ebenfalls in einer Kostenreduktion resultieren. Diese Entscheidung muss jedoch bereits so früh wie möglich in der Entwicklungsphase gefällt werden und die Konstruktion der betroffenen Teile entsprechend darauf abgestimmt werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Abstract	2
2 Eigenständigkeitserklärung	4
3 Verzeichnis der Abkürzungen	5
4 Einleitung mit Aufgabenstellung	6
5 Stand der Technik.....	8
5.1 Grundlagen zur Kostenoptimierung in der Produktentwicklung.....	8
5.2 Grundlagen des kostengünstigen Konstruierens.....	9
5.3 Übertragung der ermittelten Strategien auf den Manufakturbetrieb.....	10
6 Fallstudie: Entwicklung einer Siebträger-Espressomaschine für den gastronomischen Betrieb	11
6.1 Ausgangssituation und zugrunde liegende Technik	11
6.1.1 Entwicklungsstand und Kostenstruktur der 1-Zylinder-Maschine	14
6.1.2 Abgeleitete Zielkostenstruktur der 2-Zylinder-Maschine	15
6.1.3 Zielvereinbarung für die Entwicklung der 2-Zylinder-Maschine.....	16
6.2 Maschinenkonzept 2-Zylinder-Maschine	17
6.3 Gruppierung der Bauteile und Teilenummernkonzept	18
6.4 Durchgeführte Optimierungen während der Entwicklung	19
6.4.1 Verringerung der Teilevielfalt und Gesamtteileanzahl	19
6.4.2 Baukastenkonstruktion und Modularisierung.....	23
6.4.3 Wahl von Material, Fertigungstechniken und Verbindungsmethoden	27
6.5 Kostenkalkulation für die Vorserienfertigung.....	30
6.6 Ableitung von Maßnahmen zur Kostenoptimierung für die Serienfertigung.....	31
6.6.1 Möglichkeiten zur Kostenoptimierung stückzahlabhängiger Teilen	31
6.6.2 Möglichkeiten zur Kostenoptimierung stückzahlunabhängiger Teile.....	34
6.6.3 Weitere Möglichkeiten zur Kostenoptimierung	35
7 Zusammenfassung	37
8 Ausblick	39
9 Tabellenverzeichnis.....	40
10 Abbildungsverzeichnis	41
11 Literaturverzeichnis.....	42
A Anhang	44

2 Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Bearbeitung dieser Abschlussarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe vorgenommen und keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

31.05.2024 Felix Kistler 
.....

Datum & Unterschrift

3 Verzeichnis der Abkürzungen

DTC	Design to Cost
NTC	Negative Temperature Coefficient
PID	Proportional-Integral-Differential
CAD	Computer Aided Design
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PEEK	Polyetheretherketon
EU	Europäische Union
PFAS	Per- and polyfluoroalkyl substances
FLM	Fused Layer Modelling
OEM	Original Equipment Manufacturer
PFA	Perfluoralkoxy-Copolymer
FEP	Fluorethylenpropylen

4 Einleitung mit Aufgabenstellung

In Zeiten von hohen Rohstoff- und Energiepreisen sowie der steigenden Inflation ist es für Produktentwickler wichtiger denn je, die Kosten eines Produktes so zu optimieren, dass eine wirtschaftliche Herstellbarkeit gegeben ist.

Die Produktkosten setzen sich aus den entstehenden Fertigungs-, Verwaltungs- und Entwicklungskosten zusammen. Für ein erfolgreiches Projekt in der Produktentwicklung sind daher eine gute Planung sowie die enge Zusammenarbeit verschiedenster Abteilungen innerhalb eines Unternehmens ausschlaggebend. So müssen neben der Konstruktion und Entwicklung auch die Abteilungen Controlling, Einkauf und Vertrieb sowie die Produktion in den Produktentwicklungsprozess mit einbezogen werden. Hierbei sind eine gute Koordination und Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten der Schlüssel zum Erfolg, um das Produkt zu den geplanten Kosten im verfügbaren Zeitrahmen auf den Markt bringen zu können.

Eine Sonderstellung hat der Manufakturbetrieb. Das Duden Wörterbuch definiert den Begriff „Manufaktur“ als „gewerblichen Kleinbetrieb, in dem stark spezialisierte Produkte in Handarbeit hergestellt werden, was zu einer hohen Qualität führt.“ [1]. Wenn Unternehmen dem Verein „Deutsche Manufakturen – Handmade in Germany e.V.“ beitreten wollen, muss nachgewiesen werden können, dass die hergestellten Produkte innerhalb von Deutschland und überwiegend in Handarbeit hergestellt werden. Weitere Voraussetzungen für den Beitritt sind, dass die verwendeten Materialien eine hohe Wertigkeit aufweisen und dass die hergestellten Produkte dem Premium-Segment angehören [2]. Durch den Manufakturbetrieb ergeben sich spezielle Anforderungen und Rahmenbedingungen an den gesamten Produktlebenszyklus, insbesondere jedoch an die Produktentwicklung, Fertigung und Montage. Dadurch ist die Kostenoptimierung von im Manufakturbetrieb hergestellten Produkten ausschlaggebend für den wirtschaftlichen Erfolg.

Bekanntermaßen ist das Potenzial für die Kostensenkung und Kostenoptimierung während der frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses am größten [3]. Je später erforderliche Maßnahmen zur Kostenoptimierung umgesetzt werden, desto höher sind die dadurch entstehenden Änderungskosten. Kostenoptimierte Produktentwicklung ist daher nach wie vor ein relevantes Thema innerhalb der Wirtschafts- und Ingenieurwissenschaften und allgegenwärtig in der gängigen Literatur. In dieser ist oft von dem Begriff „Design to Cost (DTC)“ die Rede. Mörtl und Schmied [3] definieren den Begriff „Design to Cost“ als Entwurfsmethode, in welcher die Kosten als Entscheidungsfaktor in den Entwicklungsprozess mit aufgenommen werden.

Der Fokus von Publikationen innerhalb des Forschungsbereichs kostenoptimierte Produktentwicklung liegt hauptsächlich auf Unternehmen, welche über eine eigene Entwicklungsabteilung und Produktion verfügen oder Produkte in größeren Stückzahlen produzieren. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Automobilindustrie. Die meisten in der Literatur vermittelten Strategien zur Kostenoptimierung beziehen sich auf Konstruktionsrichtlinien, mit welchen der Materialverbrauch sowie die Rüstzeiten und Maschinenlaufzeiten verringert werden können, um Material-, Fertigungs- und Lohnkosten zu sparen. Zu Möglichkeiten für die Kostenoptimierung von Produkten in Einzel- und Kleinserienfertigung ohne eigene Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten findet sich hingegen nur wenig Literatur. In dem Forschungsbereich Design to Cost existiert daher eine Forschungslücke zwischen Manufakturbetrieb und industrieller Serienfertigung.

Dieser Bericht beschäftigt sich mit der Untersuchung von Möglichkeiten, wie sich die Produktkosten in der Einzel- und Kleinserienfertigung optimieren und auf den Manufakturbetrieb anwenden lassen.

Für das Projekt wurden folgende Forschungsfragen definiert:

1. Welche Anforderungen stellt der Manufakturbetrieb an den gesamten Entwicklungsprozess mit Fokus auf Projektmanagement, Konstruktion, Fertigung und Montage?
2. Welche der in der gängigen Literatur vermittelten Strategien zur Kostenoptimierung sind auf den Manufakturbetrieb anwendbar?
3. Unter welchen Rahmenbedingungen ist der Manufakturbetrieb wirtschaftlich realisierbar?

Für die Beantwortung dieser Forschungsfragen wird eine Fallstudie durchgeführt, in welcher die aus der Literatur ermittelten Strategien zur Kostenoptimierung bei der Entwicklung einer zweigruppigen Siebträger-Espressomaschine für den gastronomischen Betrieb angewandt werden.

5 Stand der Technik

Zunächst wurde eine Recherche von relevanter Literatur zu den Themen Kostenoptimierung in der Produktentwicklung und der Konstruktion von kostengünstigen Produkten durchgeführt. Die Ergebnisse werden an dieser Stelle zur Wiedergabe des aktuellen wissenschaftlichen Stands zusammengefasst. Anschließend werden jene Strategien hervorgehoben, welche sich auf den Manufakturbetrieb anwenden lassen.

5.1 Grundlagen zur Kostenoptimierung in der Produktentwicklung

Mörtl und Schmied [3] beschreiben die wichtigsten Faktoren, welche relevanten Einfluss auf die entstehenden Kosten während der Produktentwicklung und auf die Möglichkeiten zur Kostenreduktion nehmen. So müssen bereits in der Planungsphase des Produkts die Aufgaben, Anforderungen und Kundenwünsche klar definiert werden. Dies setzt ein Lasten- und Pflichtenheft voraus, in welchen die umzusetzenden Produkteigenschaften und -funktionen festgelegt sind. Auch das Produktkonzept muss klar definiert sein, da das zu entwickelnde Produkt neue Anforderungen des Marktes erfüllen und gleichzeitig günstiger als Konkurrenzprodukte sein muss. Die Produktform mit den geometrischen Eigenschaften nimmt ebenfalls Einfluss auf die entstehenden Produktkosten. Während der Entwurfsphase muss in alternativen Konzepten gedacht werden, bei welchen sowohl technische als auch wirtschaftliche Vor- und Nachteile evaluiert werden. Produktgröße und -proportionen nehmen Einfluss auf Materialkosten, während die Produktionszahlen und Losgrößen die Fertigungskosten beeinflussen. So verteilen sich bei höheren Produktionsvolumen die entstehenden Fixkosten wie beispielsweise die Raum- und Energiekosten auf die Gesamtanzahl der produzierten Teile, wodurch bei steigender Stückzahl der individuelle Stückpreis sinkt. Auch die Rüstkosten verteilen sich auf die produzierten Stückzahlen, was den Anteil der Fertigungskosten eines Teils bei steigenden Produktionszahlen deutlich verringern kann. Gleichzeitig sorgen höhere Produktionszahlen zu Lerneffekten bei der Fertigung und Montage, was zu kürzeren Arbeitszeiten und damit einhergehend zu geringeren Lohnkosten führt. Die Entscheidung zur Selbst- oder Fremdfertigung sollte hinsichtlich Kostenfaktoren getroffen werden, da der Aufbau von eigenen Fertigungskapazitäten massive Investitionskosten nach sich ziehen kann, welche über die zu entwickelnden Produkte abbezahlt werden müssen. Die Ausrichtung der Produktion auf die Fremdfertigung hat wiederum eine hohe Abhängigkeit von Lieferanten zur Folge.

Durch das Entwickeln mehrerer Produktvarianten lassen sich unterschiedliche Zielgruppen und Marktsegmente erschließen, was die Konkurrenzfähigkeit des Unternehmens erhöht und den Umsatz steigert. Jedoch können durch das Akzeptieren von Kleinaufträgen und Sonderanfertigungen zu viele Varianten innerhalb eines Unternehmens entstehen. Dies kann zu erhöhten Entwicklungskosten und zu einer negativen Unternehmensbilanz beitragen, wenn das unternehmensinterne System zur Identifizierung von Gleich- und Wiederholteilen nicht ausgereift ist. Daher muss der Fokus beim Variantenmanagement auf der Verwendung von möglichst vielen Gleich- und Wiederholteilen und damit der Erhöhung der Produktionsvolumen liegen, um eine Reduzierung der Fixkosten und variablen Kosten zu realisieren.

Mörtl und Schmied [3] heben dabei insbesondere die Regel zur Erhöhung der Produktionszahlen als effektive Maßnahme zur Kostenoptimierung hervor. Gleichzeitig wird betont, dass für Unternehmen, welche in geringen Stückzahlen produzieren, die Optimierung von Material- und Fertigungskosten sowie das Variantenmanagement als Maßnahmen zur Kostenreduktion besonders geeignet sind.

5.2 Grundlagen des kostengünstigen Konstruierens

Neben den allgemeinen Einflüssen auf die entstehenden Produktkosten ist die Konstruktion von kostengünstigen Produkten ein weiteres relevantes Thema in der Literatur.

Ehrlenspiel et al. beschreiben in ihrem Standardwerk Kostenmanagementmethoden sowie allgemeine Strategien zur kostenoptimierten Produktentwicklung und geben dabei Richtlinien an die Hand, welche speziell auf die Konstruktion kostengünstiger Produkte ausgerichtet sind [4]. Dabei wird zunächst auf die gleichen Einflussfaktoren auf die Produktkosten wie bei Mörtl und Schmied [3] eingegangen. Es werden jedoch auch neue Strategien dargelegt, die sich speziell auf die Konstruktion von kostenoptimierten Produkten anwenden lassen.

Besonders hervorgehoben wird die Notwendigkeit, die zu erwartenden Kosten bereits in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses zu kalkulieren oder abzuschätzen und mögliche Optimierungsstrategien in die Entwicklung miteinzubeziehen.

Allgemeingültige Maßnahmen zum Produktkostensenken sind das Berücksichtigen der Rahmenbedingungen des Projekts. So muss die Konstruktion eines Produkts beispielsweise auf die Einzel- oder Kleinserienfertigung, die Größe der Teile oder die verwendeten Materialien abgestimmt werden. Es sollte sich nur auf die Entwicklung der Kernfunktionen und der Kernteile des Produkts beschränkt werden, während alles andere auswärts vergeben werden sollte. Sofern bei der Zulieferung nur ein Lieferant vorhanden ist, sollte nach Konkurrenzlieferanten gesucht werden. Die Konstruktion und die Wahl der Fertigungsverfahren von den Kernteilen muss auf die angestrebte Stückzahl abgestimmt werden. Dabei werden Prototypen aus Standard-Werkstoffen über konventionelle Fertigungsverfahren hergestellt. Anschließend sollten die Prototypen nach Möglichkeit nur geringfügig umkonstruiert und so unverändert wie möglich in die Serienfertigung übernommen werden.

Eine weitere wichtige Maßnahme zum Senken der Produktkosten ist die Verringerung der Teilezahl. Dies kann über die Verwendung von möglichst vielen Gleich- und Wiederholteilen sowie über die Baukasten- und Baureihenkonstruktion realisiert werden. Bei kleiner Stückzahl müssen Werkzeugkosten vermieden werden, da sich Werkzeuge, Formen und Modelle in diesem Fall nur schwer finanzieren lassen. Daher kommen für die Serienfertigung hauptsächlich Fertigungsverfahren wie das Ur- und Umformen sowie die mechanische Bearbeitung in Frage. Darüber hinaus müssen Teile für das entsprechende Fertigungsverfahren optimiert werden, sodass die Fertigung eines Teils mit wenigen Fertigungsgängen und Umspannvorgängen erfolgen kann. Gleichzeitig sollte das Teil gut spannbar sowie möglichst grob toleriert sein und wenig Bearbeitungsflächen aufweisen, um Fertigungszeiten und Lohnkosten zu verringern.

Auch die Optimierung der Montierbarkeit eines Produktes kann Kosten senken. So sollte das Produkt aus möglichst wenig montierbaren Teilen und Varianten aufgebaut sein. Einfache und leicht zugängliche Verbindungen vermindern den Montageaufwand, was in einer Verkürzung der Montagezeit resultiert. Vormontierbare und getrennt prüfbare Baugruppen vereinfachen die Endmontage und die Sicherstellung der Produktqualität.

Neben den allgemein gültigen Maßnahmen wird auch auf spezielle Regeln zur Einzelfertigung und Serienfertigung eingegangen. Kleine Teile bis zu einem Gewicht von 5 kg sollten aus üblichen Standardwerkstoffen über mechanische Bearbeitung hergestellt werden. Bei kleinen Teilen kann der Anteil der Rüstkosten zwischen 60 bis 90 % der gesamten Herstellkosten ausmachen, wohingegen der Anteil der Materialkosten vernachlässigbar ist. Bei der Einzelfertigung wird erneut auf die Regel zur Teilezahlverringerung durch die Verwendung von Gleichteilen, Wiederholteilen sowie der Baukastenbauweise eingegangen, mit denen sich eine Stückzahlerhöhung und damit eine Verringerung der Rüst- und Einmalkosten realisieren lassen. Auch die Anwendung von Integral- und

Differentialbauweise kann sich positiv auf die Produktkosten auswirken. Die Integralbauweise zeichnet sich dadurch aus, dass mehrere, aus demselben Material gefertigte Teile zu einem Teil kombiniert werden, was die Gesamtteileanzahl verringert. Bei der Differentialbauweise werden einzelne komplexe und schwer montierbare Teile in mehrere kleinere und einfachere Teile unterteilt, welche teils mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt werden, um die Fertigung und Montage zu erleichtern.

Ehrlenspiel et al. weisen darauf hin, dass die oben aufgeführten Konstruktionsregeln zum Kostensenken speziell in dem Fall angewendet werden können, wenn keine verlässliche Kostenanalyse zum Zeitpunkt des Entwicklungsstarts vorliegt, und dass diese Regeln sowohl für die Eigen- als auch Fremdfertigung geeignet sind.

5.3 Übertragung der ermittelten Strategien auf den Manufakturbetrieb

Die wichtigsten Strategien zur Kostenoptimierung aus der Literatur sind im folgenden Abschnitt zusammengefasst. Dabei wird im Detail auf jene Strategien eingegangen, die sich auf den Manufakturbetrieb übertragen lassen.

Während der Planungsphase muss gewährleistet sein, dass die Anforderungen, der Funktionsumfang und die angestrebte Kostenstruktur des zu entwickelnden Produkts definiert sind. Gleichzeitig sollte die Zielgruppe sowie die angestrebten Produktionszahlen definiert sein. Vom Start der Entwicklung müssen wirtschaftliche Faktoren in den Entscheidungsprozess mit einfließen. Teile für den Manufakturbetrieb sollten aus Standard-Werkstoffen und über mechanische Fertigungsverfahren wie Zerspanen oder Umformen gefertigt werden. Werkzeugkosten müssen bei der Fertigung vermieden werden. Bauteile, Komponenten und Baugruppen müssen bereits während der Konstruktion hinsichtlich Materialverbrauch, Fertigungsaufwand und Montage optimiert werden. Ein Baukastensystem erleichtert die Montage, setzt jedoch ein funktionierendes Teilemanagement voraus.

Bei mehreren Produktvarianten ist das Variantenmanagement unerlässlich. So müssen Chancen zur Verwendung von Gleich- und Wiederholteilen zwischen Produktvarianten erkannt und umgesetzt werden. Ein hoher Anteil an verbauten Gleichteilen hat eine Steigerung der Fertigungsvolumen zur Folge, mit welchen günstigere Stückpreise realisiert werden können. Während der Konstruktion müssen je Komponente und Baugruppe mehrere Konzepte erarbeitet und auf deren Vor- und Nachteile untersucht werden. Hierbei ist es unerlässlich, auch die entstehenden Kosten für jedes Konzept abzuschätzen und zu vergleichen. Bei kostenintensiven Bauteilen müssen mehrere Werkstoffe und Fertigungsverfahren hinsichtlich deren Wirtschaftlichkeit evaluiert werden.

Für den Manufakturbetrieb ist die Fremdfertigung der Eigenfertigung vorzuziehen, sofern zum Projektstart keine eigenen Fertigungskapazitäten vorliegen. Auf diese Weise müssen keine eigenen Fertigungskapazitäten für das Projekt aufgebaut werden, was sich durch die geringen Produktionsvolumen nur in Ausnahmefällen rechnet. Neben der Fremdfertigung von Konstruktionsteilen muss auf handelsübliche Normteile zurückgegriffen werden. Mögliche Strategien zur Kostenoptimierung der Zukaufteile sind die Neuverhandlung von bestehenden Lieferanten oder die Recherche nach günstigeren Konkurrenten. Außerdem muss der Fokus bei der Produktentwicklung auf der Reduzierung der Gesamtteileanzahl gelegt werden, um Herstellkosten zu senken.

6 Fallstudie: Entwicklung einer Siebträger-Espressomaschine für den gastronomischen Betrieb

An der Hochschule München wird im Zuge des Forschungsprojekts „Technische Beeinflussbarkeit der Geschmackssache Kaffee“ an der Entwicklung mehrerer Siebträger-Espressomaschinen gearbeitet. Dazu wird erforscht, welche relevanten Bezugsparameter Einfluss auf die Qualität und den Geschmack des Kaffees nehmen und wie diese technisch beeinflusst werden können. Ziel des Forschungsprojektes ist, Konzepte zu entwickeln und zu erproben, mit denen sich innerhalb des Systems Kaffeemaschine Bezugsparameter wie die Wasserbezugstemperatur und die Durchflussrate von Tasse zu Tasse verändern lassen. Auf diese Weise soll es Baristas im professionellen Umfeld sowie Kaffee-Enthusiasten zuhause ermöglicht werden, mit den entwickelten Maschinen die Bezugsparameter individuell je nach verwendeter Kaffeesorte und Röstung perfekt aufeinander abzustimmen.

6.1 Ausgangssituation und zugrunde liegende Technik

An dieser Stelle wird zunächst auf die Grundlagen der Kaffeezubereitung eingegangen. Die Extraktionsparameter für die Zubereitung eines perfekten Espressos werden innerhalb der Branche unterschiedlich kommuniziert.

Corrochano definiert den Begriff „Kaffeeextraktion“ als „Mobilisierung von löslichen Feststoffen und Aromen aus geröstetem und gemahlenen Kaffee zur Herstellung eines Kaffeeextrakts“ [5, S. 20] (Übersetzung des Verfassers) und zeigt eine Übersicht mit den unterschiedlich kommunizierten Kaffeebezugsparametern für Espressomaschinen aus der Fachliteratur:

Tabelle 1: Übersicht der empfohlenen Extraktionsparameter für Espressomaschinen in der Fachliteratur (in Anlehnung an Corrochano [5], S. 25)						
Menge Kaffeemehl	Flowrate	Espresso-Volumen	Extraktionszeit	Bezugstemperatur		Primärquelle (zitiert nach Corrochano [5])
[g]	[ml/s]	[ml]	[s]	Eintritt [°C]	Austritt [°C]	
¹ 14,5 ± 0,2	2	51,4 ± 1,2	25 – 30	92	79,6 ± 3	Parenti et al. (2014) [6]
² 7,12 ± 0,4	0,95 ± 0,3	22,04 ± 3,92	23,2 ± 8,00	k.A.	k.A.	Romani et al. (2004) [7]
² 7,5	1,90	40	21 ± 2	92	86 ± 2	Andueza, De Peña, et al. (2003) [8]
² 7,5	1	25	25	83	68 ± 1,5	Caporaso et al. (2014) [9]

¹: Menge für doppelten Espresso; ²: Menge für einfachen Espresso
Werte ± Standardabweichung; k.A.: keine Angabe

Nach Petracco [10] sollte die Zubereitung eines traditionellen italienischen Espressos „bei einer Wassertemperatur von 88 ± 2 °C und einem Druck von 9 ± 1 bar erfolgen, welcher im Siebträger innerhalb von 25 ± 5 s auf einen kompakten, aus frisch gemahlenen Kaffeepulver bestehenden Kaffeepuck mit einem Gewicht von 7 ± 0,5 g einwirkt, um eine kleine Tasse von 25 bis 40 mL mit

konzentriertem Espresso zu gewinnen“ (zitiert nach Mestdagh et al. [11], S. 375) (Übersetzung des Verfassers).

Darüber hinaus können bei herkömmlichen Siebträgern Siebe in unterschiedlichen Größen eingesetzt werden, um einen doppelten Espresso oder einen Cappuccino zubereiten zu können. Diese Siebe haben je nach Ausführung ein Fassungsvermögen von bis zu 20 Gramm Kaffeemehl.

Gerade die Veränderung der Bezugsparameter von Tasse zu Tasse stellt eine enorme Herausforderung an die Technik dar und setzt voraus, dass der gesamte Vorgang des Kaffeebezuges innerhalb der Maschine aufgezeichnet wird. Die meisten handelsüblichen Siebträger-Espressomaschinen verfügen über eine Druck- und Temperaturanzeige. Die Daten hierfür werden jedoch an unspezifizierten Stellen innerhalb der Maschinen erhoben. Dadurch kann sich der Benutzer nicht sicher sein, dass die angezeigten Werte mit den wirklichen Werten übereinstimmen, welche direkten Einfluss auf die Qualität des Kaffees nehmen. Für den Barista ist es ausschlaggebend, die exakten Werte für die Kaffeewasserbezugstemperatur bei Kontakt mit dem Kaffeemehl und den dadurch resultierenden Druck im Siebträger zu kennen, sodass er die externen Einflussfaktoren wie den Mahlgrad und Tamperdruck des Kaffeemehls im Siebträger darauf abstimmen kann.

Im Projekt werden zur Aufzeichnung des Kaffeebezugs unter anderem Drucksensoren, NTC-Sensoren und Durchflusssensoren verwendet, die an relevanten Messstellen innerhalb des Systems Daten erheben. Auf diese Weise kann der Kaffeebezug über den gesamten Zeitverlauf nachvollzogen werden. Die erhobenen Daten werden anschließend mithilfe der verbauten Elektronik über mehrere Microcontroller ausgewertet. Auf den Platinen laufende PID-Regelkreise sorgen dafür, dass die vom Benutzer gewünschten Bezugsparameter mithilfe der entsprechenden Stellglieder in der Maschine innerhalb kürzester Zeit umgesetzt werden.

Im Zuge des Projekts gewonnene Erfahrungswerte zeigen, dass sich nur zwei Bezugsparameter mithilfe von Technik direkt beeinflussen lassen. Das ist zum einen die Wasserbezugstemperatur, welche jedoch, wie in Tabelle 1 dargestellt, je nach Quelle geringfügig variieren kann. Für das Projekt an der Hochschule München wurde der Temperaturbereich zwischen 88 und 92 °C als Richtwert definiert.

In den zu entwickelnden Maschinen werden zur Erhitzung des Bezugswassers leistungsgeregelte Heizelemente mit einer Leistung von 1000 oder 1800 W verwendet. Innerhalb des Boilers wird das meist rund 20 °C kalte Wasser vor dem Bezug auf 125 °C erhitzt. Anschließend wird das Heißwasser aus dem Boiler Richtung Brühgruppe geleitet. Vor der Brühgruppe befindet sich die Mischstelle. Dort befindet sich ein Dosierventil, welches dem Heißwasser je nach gewünschter Bezugstemperatur kaltes Wasser hinzuführt. Auf diese Weise kann die gewünschte Wassertemperatur für den Kaffeebezug eingestellt werden. Die Mischstelle befindet sich nah an der Brühgruppe selbst, sodass der resultierende Leitungsweg möglichst kurz ist. Des Weiteren sind alle Leitungen innerhalb der Maschine anstelle von Kupferrohren als Kunststoff-Rohre ausgeführt, um den entstehenden Temperaturverlust zwischen Mischstelle und Brühgruppe zu minimieren. Sobald der verbleibende Temperaturverlust bekannt ist, kann dieser über einen Regelkreis kompensiert werden.

Neben der Bezugswassertemperatur lässt sich die Durchflussrate technisch variieren. Die Durchflussrate innerhalb der zu entwickelnden Maschinen ergibt sich über die Drehzahl und Fördermenge der verwendeten Getriebepumpen, welche wiederum von der zugeführten Betriebsspannung abhängen.

Für die Durchflussraten werden innerhalb der Branche ebenfalls unterschiedliche Werte kommuniziert. Generell sollten sich nach einer durchschnittlichen Extraktionszeit von 25 Sekunden zwischen 25 und 40 ml Espresso in der Tasse befinden, was einer Durchflussrate von 1 bis 1,6 ml/s entspricht. Ermittelte Versuchswerte innerhalb des Projekts bestätigen diese Annahme und zeigen ebenfalls, dass die besten Ergebnisse hinsichtlich Espresso-Qualität und Crema-Bildung mit einer Durchflussrate zwischen 1 bis 2 ml/s erzielt werden.

Die Durchflussrate wird in den zu entwickelnden Maschinen mithilfe eines Durchflusssensors gemessen, welcher nah am Pumpenausgang platziert wird. Über die Pumpenbetriebsspannung kann die Fördermenge und damit die Durchflussrate während des Kaffeebezugs entsprechend eingestellt werden.

Der entstehende Druck in der Brühgruppe hingegen lässt sich nur schwer direkt beeinflussen, da sich dieser aus statischem und dynamischen Druck sowie den entstehenden Druckverlusten im Leitungssystem der Maschine zusammensetzt [12]. Außerhalb der Maschine wird der entstehende Druck im Siebträger durch die Kaffeesorte, den Mahlgrad und den Tamperdruck beeinflusst, welche den Widerstand des Kaffeemehls im Siebträger definieren. So beschreiben Mestdagh et al. den während der Kaffeeextraktion wirkenden Druck als „Ergebnis des Gleichgewichts zwischen der auf den Kaffeepuck wirkenden Kraft (durch das Wasser) und dem Widerstand des Kaffeepucks gegen das Versickern des Wassers.“ [11, S. 369] (Übersetzung des Verfassers)

Die direkt beeinflussbaren Bezugsparameter innerhalb der Maschine wie Bezugstemperatur und Durchflussrate sowie die direkt beeinflussbaren Bezugsparameter außerhalb der Maschine wie Kaffeesorte, Mahlgrad und Tamperdruck bilden das sogenannte Bezugsprofil. Zwischen Maschinen unterschiedlicher Hersteller können sich die erforderlichen Bezugsparameter für die Zubereitung von Kaffee in identischer Qualität teilweise stark unterscheiden.

Das Forschungsprojekt konzentriert sich hauptsächlich auf die Entwicklung technischer Konzepte für die Regelung direkt beeinflussbaren Bezugsparameter innerhalb der Maschine. Die entwickelte Technik wird zunächst zuerst innerhalb der sogenannten labortechnischen Espressomaschine erprobt, welche als Zweikreis-System mit einem Stahlboiler mit 3,6 Litern Fassungsvermögen ausgeführt ist. Anschließend werden erfolgreich getestete, technische Konzepte in die zweite, sich in der Entwicklung befindliche Maschine, der sogenannten Glasboiler-Maschine, übernommen.

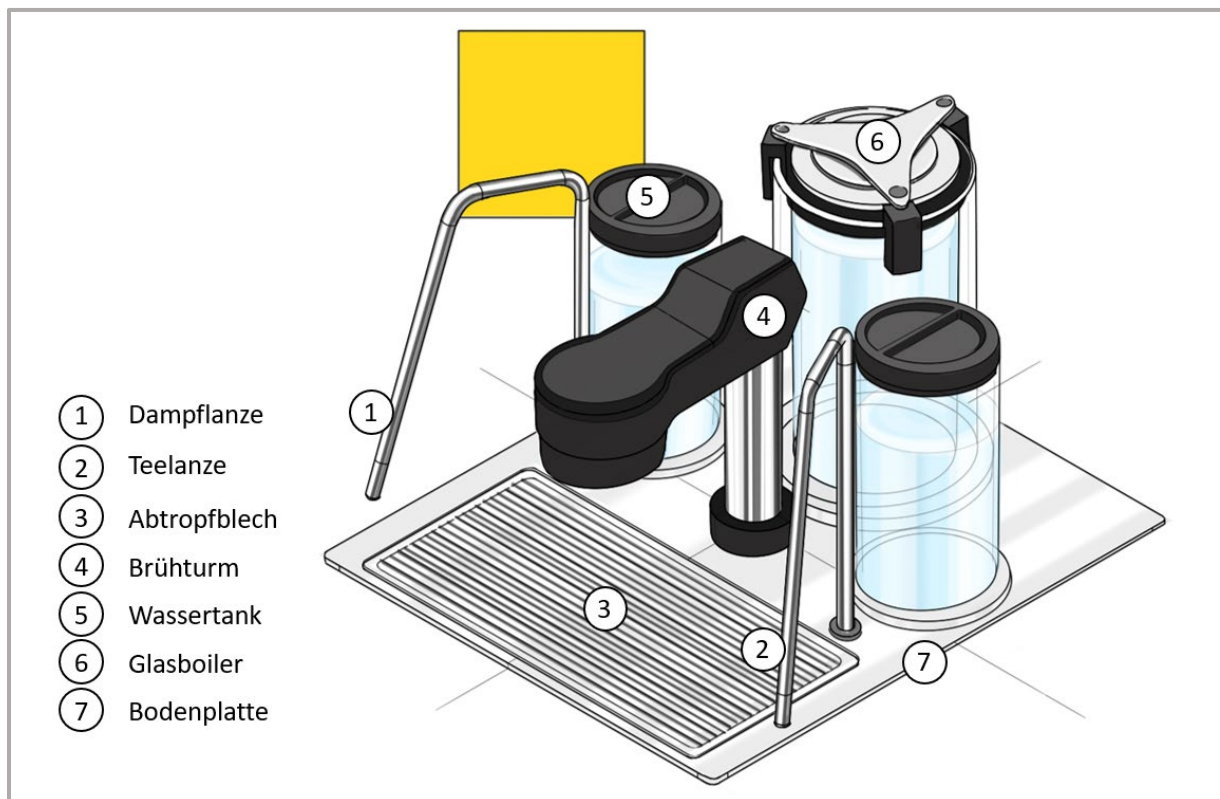


Abbildung 1: Konzeptrendering der 1-Zylinder-Glasboilermaschine, Stand Mai 2023 (eigene Darstellung)

Diese Siebträger-Espressomaschine soll anstelle des handelsüblichen Stahlboilers über einen Boiler aus doppelwandigem Borosilikat-Glas mit einem Fassungsvermögen von 2,4 Litern verfügen. Mit dem einsehbaren Boiler kann der Benutzer den Erhitzungsvorgang sowie das sprudelnde Wasser im Betrieb mitverfolgen, was die Kaffee-Zubereitung zu einem emotionalen Erlebnis macht. Dies stellt eine deutliche Innovation gegenüber herkömmlichen Siebträger-Espressomaschinen dar.

Die doppelwandige Ausführung der Glaswände des Boilers und die dazwischenliegende Luftschicht sorgen für die Isolierung. Alle mit dem Heiß- und Mischwasser in Kontakt kommenden Bauteile wie Boilerdeckel und Boilerboden sowie die Brühgruppe und die Verrohrung sind als Kunststoff-Teile ausgeführt, um die Wärmeverluste im Betrieb zu minimieren. Gegenüber handelsüblichen Siebträger-Espressomaschinen werden auf diese Weise kürzere Aufheizzeiten und ein geringerer Energieverbrauch im Betrieb realisiert, was die Maschine maximal energieeffizient macht [13]. Dem Benutzer wird es durch die vollständige Parametrierbarkeit der relevanten Kaffeebezugsparameter ermöglicht, die Bezugsprofile jeder anderer handelsüblichen Siebträger-Espressomaschine nachzubilden. Durch diese Alleinstellungsmerkmale hebt sich die Glasboiler-Maschine deutlich von Mitbewerbern ab. Anders als die labortechnische Espressomaschine, die zunächst ausschließlich der Erprobung und Qualifizierung technischer Konzepte und Komponenten dient, soll die Glasboiler-Maschine nach erfolgreichem Prototypenbau in Serie gefertigt und in den kommerziellen Markt eingeführt werden.

Die Glasboiler-Maschine soll sowohl für den Privatgebrauch als 1-Zylinder-Variante mit einem Boiler, zwei Tanks und einer Brühgruppe als auch für den Einsatz in professionellem Umfeld als 2-Zylinder-Variante mit zwei Boilern, drei Tanks und zwei Brühgruppen erhältlich sein. Die Entwicklung der oben genannten Maschinen erfolgt über studentische Projekt- und Abschlussarbeiten an der Hochschule München. Im Zuge dieses Berichts soll auf die Entwicklung der 2-Zylinder-Maschine eingegangen werden.

6.1.1 Entwicklungsstand und Kostenstruktur der 1-Zylinder-Maschine

Die 1-Zylinder-Maschine für den Privatgebrauch ist durch die zahlreichen technischen Innovationen und dem grundlegend anderen Design dem Premium-Segment zuzuordnen. Damit ist die Maschine vergleichbar mit Maschinen renommierter Hersteller wie einer Synesso ES1, einer Slayer V3 oder einer Kees van der Westen Speedster, welche ebenfalls für den Privatgebrauch konzipiert sind und sich im selben Marktsegment befinden. Die Endverbraucherpreise dieser Maschinen liegen zwischen 8.500 und 12.500 € inkl. Mehrwertsteuer.

Für die Festlegung der Kostenstruktur der 1-Zylinder-Maschine wurde zuerst der zulässige Marktpreis für den Endkonsumenten anhand von konkurrierenden Produkten definiert und anschließend in einzelne Teilbereiche aufgeteilt. Die Kostenstruktur und die Zielkosten der 1-Zylinder-Maschine wurden innerhalb eines Business Case festgelegt und näher beschrieben [14].

Der angestrebte Brutto-Verkaufspreis der 1-Zylinder-Maschine setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 2: Kostenstruktur der 1-Zylinder-Maschine	
Verkaufspreis (netto)	12.000 €
Händlermarge	4.000 €
Herstellkosten	4.000 €
Marge je Maschine	4.000 €
Zzgl. Mehrwertsteuer 19 %	2.280 €
Resultierender Verkaufspreis (brutto)	14.280 €

Als Zielverkaufspreis wurden für die 1-Zylinder-Maschine 12.000 € zuzüglich Mehrwertsteuer definiert. Der Vertrieb sowie die Wartung und Reparatur der Maschine sollen zukünftig von Kaffeewerkstätten übernommen werden. Im Gegenzug für diese Leistung wird den Kaffeewerkstätten eine Händlermarge von einem Drittel des Netto-Verkaufspreises für jede verkaufte Maschine gewährt. Von dem angestrebten Netto-Verkaufspreis bleiben nach Abzug der daraus resultierenden Händlermarge von 4.000 € sowie den geplanten Herstellkosten von 4.000 € eine Marge von 4.000 € je Maschine. Dies bildet den Kostenplanungsstand vom Januar 2022. Mit 19 % Mehrwertsteuer beläuft sich der Brutto-Verkaufspreis der 1-Zylinder-Maschine auf 14.280 €.

Die Entwicklung der 1-Zylinder-Maschine war zum Übernahmezeitpunkt bereits fortgeschritten. So waren die Baugruppen Boiler, Tanks, Brühlturm mit Brühgruppe, Dampf- und Teewasserlanze sowie der Unterbau bereits konstruiert und deren Anordnung auf der Bodenplatte festgelegt.

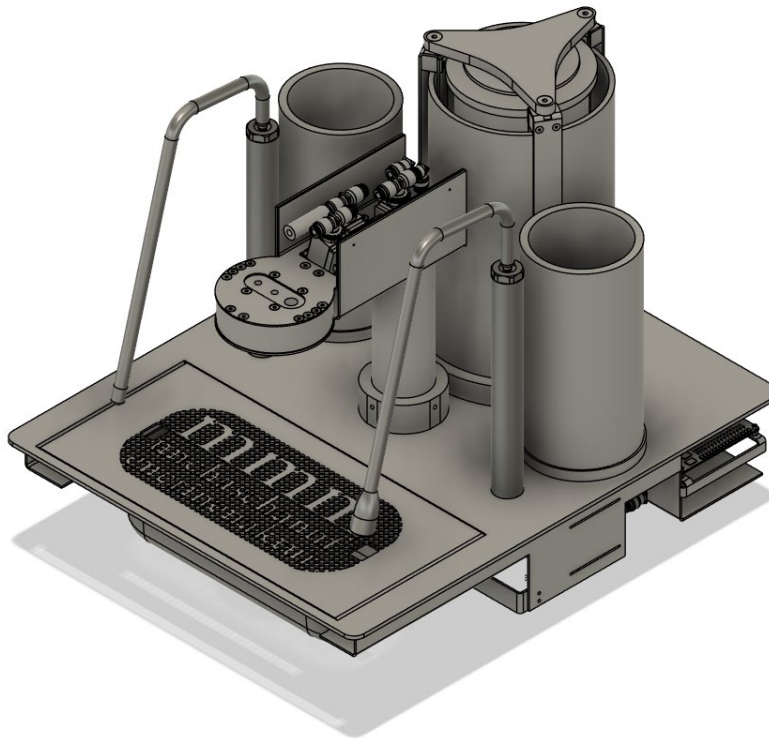


Abbildung 2: CAD-Modell der 1-Zylinder-Maschine, Stand November 2023

Der in Abbildung 2 gezeigte Entwicklungsstand bildet die Grundlage für die Entwicklung der 2-Zylinder-Maschine für den gastronomischen Betrieb.

6.1.2 Abgeleitete Zielkostenstruktur der 2-Zylinder-Maschine

Vor dem Entwicklungsstart musste die angestrebte Kostenstruktur der 2-Zylinder-Maschine definiert werden. Der zulässige Netto-Verkaufspreis wurde über die Verkaufspreise vergleichbarer Maschinen ermittelt und mit 21.000 € veranschlagt. Aus den Zielkosten der 1-Zylinder-Maschine wurde die Kostenstruktur der 2-Zylinder-Maschine abgeleitet. Die Preisstruktur bleibt hierbei unverändert.

Der angestrebte Brutto-Verkaufspreis der 2-Zylinder-Maschine setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 3: Kostenstruktur der 2-Zylinder-Maschine	
Verkaufspreis (netto)	21.000 €
Händlermarge	7.000 €
Herstellkosten	7.000 €
Marge je Maschine	7.000 €
Zzgl. Mehrwertsteuer 19 %	3.990 €
Verkaufspreis (brutto)	24.990 €

So wird den Vertriebs- und Servicepartnern ein Drittel des Netto-Verkaufspreises von jeder verkauften 2-Zylinder-Maschine als Prämie gewährt, sofern Vertrieb und zukünftige Serviceleistungen übernommen werden. Ein weiteres Drittel des Netto-Verkaufspreises bilden die zulässigen Herstellkosten. Das übrige Drittel bildet die zu erzielende Marge je verkaufter Einheit. Zuzüglich von 19 % Mehrwertsteuer ergibt sich ein Brutto-Verkaufspreis von 24.990 € für die 2-Zylinder-Maschine, welcher durchaus vergleichbar mit anderen handelsüblichen zweigruppigen Siebträger-Espressomaschinen für den gastronomischen Betrieb ist.

Mit der Definition des Brutto-Verkaufspreis und der damit einhergehenden zulässigen Herstellkosten konnte mit der Entwicklung der 2-Zylinder-Maschine begonnen werden.

6.1.3 Zielvereinbarung für die Entwicklung der 2-Zylinder-Maschine

Die Fallstudie umfasst die technische Entwicklung aller Komponenten einer zweigruppigen Siebträger-Espressomaschine für den gastronomischen Betrieb. Die Entwicklung ist so weit voranzubringen, dass im Anschluss mit dem Prototypenbau und der Inbetriebnahme fortgefahren werden kann. Dazu soll das bestehende Konzept der Home-Variante mit einer Brühgruppe, einem Boiler und zwei Tanks auf die Gastro-Variante mit zwei Boilern, zwei Brühgruppen und drei Tanks skaliert werden. Für die 2-Zylinder-Maschine soll eine detaillierte Konzeptbeschreibung erstellt werden.

Die Entwicklung der Baugruppen Boiler, Tanks und Lanzen ist weit fortgeschritten, sodass diese weitestgehend unverändert übernommen und dupliziert werden können. Die zugehörige Verrohrung der Baugruppen Boiler und Lanzen muss auf die 2-Zylinder-Variante adaptiert werden. In der Baugruppe Boiler muss der Boilerboden angepasst werden. Um die Bohrungen für die Wasserwendel wird eine Nut benötigt, da sich die Muffen nicht weit genug auf die Schneidringverschraubungen schrauben lassen. Die Muffen wurden im Zuge des Prototypenbaus durch Gerade-Aufschraub-Verschraubungen ersetzt, da diese eine einfachere Leitungsführung und eine bessere Abdichtung durch den vorhandenen O-Ring ermöglichen. Die CAD-Datei der 1-Zylinder-Maschine soll entsprechend aktualisiert werden. In das CAD-Modell der 2-Zylinder-Maschine soll der angepasste Boiler übernommen und dupliziert werden. In der gegenwärtigen Konstruktion der Tanks der 1-Zylinder-Maschine fehlt der Tankdeckel. Dieser soll im Zuge der Abschlussarbeit konstruiert werden. Zum Abdichten wird eine Gummidichtung benötigt, die über eine entsprechende Nut an der Unterseite des Deckels geführt wird. Die Oberseite des Deckels soll eine Struktur aufweisen, die das Greifen und Abnehmen des Deckels mit mindestens zwei Fingern ermöglicht. Es muss ein Lieferant für die Gummidichtung definiert werden. Der Tankboden soll über alle Tanks hinweg als Gleichteil ausgeführt werden. Dafür müssen die beiden Bohrungen für Zulauf und Füllstandssensor zentral in die Mitte verlagert werden. Die Konstruktion der Dampf- und Teelanze ist abgeschlossen, sodass beide

Lanzen baugleich in das CAD-Modell der 2-Zylinder-Maschine übernommen werden können. Für die Baugruppen Brühlturm, Abtropfwanne, Bodenplatte und Unterbau der 2-Zylinder-Maschine werden Neukonstruktionen benötigt. Der rechte Brühlturm der 2-Zylinder-Maschine ist für den Kaffee- und Teewasserbezug bestimmt und damit identisch zum Brühlturm der 1-Zylinder-Maschine. Der linke Brühlturm ist ausschließlich für den Kaffeebezug bestimmt, wodurch das Umschaltventil Y109 entfällt. Dies resultiert in veränderter Leitungsführung im linken Brühlturm.

Die Abtropfwanne der 2-Zylinder-Maschine wird, wie bei Gastro-Maschinen üblich, direkt an einen Abwasseranschluss angeschlossen, wodurch ausschließlich das im täglichen Betrieb anfallende Schmutzwasser aufgefangen und abgeleitet werden muss. Es bedarf einer Neukonstruktion von Abtropfwanne und Schmutzwassersammelblock für die 2-Zylinder-Maschine. Auch die Blechteile Anbindungsrahmen und Versteifungsblech im Unterbau sowie die Bodenplatte müssen neu konstruiert werden, da diese sich grundlegend von der Konstruktion der 1-Zylinder-Maschine unterscheiden. Die Komponentenanzordnung und Leitungsführung im Unterbau muss entsprechend überarbeitet werden. Grundlage für die Komponentenanzordnung und Leitungsführung im Unterbau der 2-Zylinder-Maschine ist der Unterbau der 1-Zylinder-Maschine.

Für die 1- und 2-Zylinder-Maschine ist die Fertigung in Serie in kleinen Stückzahlen geplant. Um die Wirtschaftlichkeit der Maschinen zu gewährleisten, müssen niedrige Herstellkosten realisiert werden. Daher soll für beide Maschinenvarianten eine Analyse der Herstellkosten und damit einhergehend eine Kostenoptimierung durchgeführt werden. Sobald eine Abschätzung der zu erwartenden Herstellkosten je Maschine in Serienfertigung vorliegt, sollen Kosteneinsparungspotenziale definiert werden. Anschließend werden relevante Teile einer Analyse zur Kostenoptimierung unterzogen und Maßnahmen abgeleitet, wie deren Herstellkosten optimiert werden können, um die Gesamtherstellkosten beider Maschinen zu reduzieren. Diese Maßnahmen werden als Empfehlung für den weiteren Entwicklungsverlauf dokumentiert.

6.2 Maschinenkonzept 2-Zylinder-Maschine

Durch die spezifischen Rahmenbedingungen des Projekts innerhalb des akademischen Umfelds und den geplanten Manufakturbetrieb ergeben sich folgende technische Anforderungen an die Entwicklung und Konstruktion:

Tabelle 4: Allgemeine Anforderungen an die Entwicklung und Konstruktion	
Nr.	Beschreibung
01	Für die Entwicklung sollen möglichst viele genormte, handelsübliche Zukaufteile verwendet werden
02	Eigens konstruierte Teile müssen auf ein Minimum reduziert werden
03	Alle Konstruktionsteile werden ausschließlich über Fremdfertigung hergestellt
04	Alle Konstruktionsteile werden über handelsübliche Halbzeuge aus Standard-Materialien gefertigt
05	Bei den gewählten Fertigungsmethoden der Konstruktionsteile dürfen keine Werkzeugkosten anfallen.
06	Zwischen beiden Maschinentypen sollen möglichst viele Gleichteile sowie identisch ausgeführte Komponenten und Baugruppen verwendet werden
07	Für das Varianten- und Teilemanagement muss ein funktionierendes Teilenummernkonzept erstellt werden.
08	Die Montage beider Maschinen muss per Hand und ohne Sonderwerkzeuge oder Hilfsmittel realisierbar sein

Der grundlegende Funktionsumfang sowie die technische Realisierung der 2-Zylinder-Maschine wurden in einem Maschinenkonzept festgelegt [15]. Ein Factsheet mit der grundlegenden Funktionalität der 2-Zylinder-Maschine ist im Anhang A1 zu finden.

Der Unterschied zwischen 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine ist die Anzahl von Boiler, Tanks und Brühgruppen. Die 1-Zylinder-Maschine verfügt über einen Boiler und eine Brühgruppe, sodass im Betrieb maximal ein Cappuccino oder zwei Espressos gleichzeitig bezogen werden können. Dies ist für den Privatgebrauch vollkommen ausreichend. Für den gastronomischen Betrieb in Cafés oder Restaurants liegt der durchschnittliche Kaffee-Durchsatz jedoch deutlich höher als im privaten Umfeld, sodass mehr als eine Brühgruppe benötigt wird. Daher verfügt die 2-Zylinder-Maschine über zwei Boiler und zwei Brühgruppen, um den höheren Bedarf an Kaffee-Zubereitungen im gastronomischen Umfeld in kürzerer Zeit realisieren zu können. Anstelle von zwei Tanks mit einem Gesamtvolumen von 2,4 Litern verfügt die 2-Zylinder-Maschine über drei Tanks mit einem Gesamtvolumen von 3,6 Litern. Anders als die 1-Zylinder-Maschine, welche sowohl über die Tanks als auch über einen Festwasseranschluss betrieben werden kann, ist die 2-Zylinder-Maschine ausschließlich für den Betrieb mit Festwasseranschluss vorgesehen. Die Tanks bilden bei der 2-Zylinder-Maschine ein rein designtechnisches Element, sodass der Benutzer den steigenden und sinkenden Wasserstand während des Betriebs durch die Borosilikat-Glaswände der Tanks verfolgen kann. Dies kreiert neben dem Sprudeln des Wassers in beiden Boilern weiteres Show-Potenzial und macht die 2-Zylinder-Maschine in der Gastronomie zu einem echten Blickfang. Gleichzeitig stellen die durchsichtigen Boiler und Tanks ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber Konkurrenzprodukten dar.

Durch die fertigungsbedingt hohen Toleranzen der Borosilikat-Glasrohre und die Leistungstoleranzen der Heizelemente können sich beim Aufheizen der 2-Zylinder-Maschine zwischen beiden Boilern im Extremfall Temperaturdifferenzen von rund 30 °C ergeben. Die Berechnung der Temperaturdifferenz ist im Anhang A2 zu finden. Dadurch können die Boiler nicht aneinandergeschaltet und die Heizelemente nicht in Parallelschaltung betrieben werden. Die Betriebssoftware muss daher in der Serie über einen Kalibrierprozess den jeweils langsamer aufheizenden Boiler identifizieren. Der Betrieb des langsameren Boilers erfolgt dann über einen Druckregler. Für den Betrieb des zweiten Boilers ist ein Temperaturfolgeregler vorgesehen. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass beide Boiler auf den gewünschten Betriebsdruck von 1300 mbar geregelt werden, ohne dass sich größere Druck- und Temperaturunterschiede einstellen. Dies setzt jedoch separate Befüll-, Entschichtungs- und Entwässerungskreisläufe für jeden Boiler sowie eigene Bezugsstränge mit je einer Pumpe für jede Brühgruppe voraus.

Die Mischwassertemperatur für den Kaffee- und Teewasserbezug kann auf diese Weise auf beiden Brühgruppen individuell eingestellt werden. Die Versorgungsspannungen beider Pumpen sind ebenfalls individuell regelbar, sodass für jede Brühgruppe unterschiedliche Durchflussraten eingestellt werden können. Durch die individuell regelbaren Mischwassertemperaturen und Durchflussraten können auf beiden Brühgruppen zwei vollkommen unterschiedliche Kaffeebezüge realisiert werden oder Kaffee und Teewasser gleichzeitig bezogen werden.

Der hydraulische Aufbau der 2-Zylinder-Maschine mit den benötigten Leitungen und Kreisläufen wurde in einem Hydraulikplan definiert [16]. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Sensoren und Aktoren sowie zur Umsetzung der Elektronik sind im Elektronik-Konzept auf dem projektinternen MediaWiki des Instituts für Kaffeetechnologie nachzulesen [17].

6.3 Gruppierung der Bauteile und Teilenummernkonzept

Durch die Anforderung der Verwendung möglichst vieler Gleichteile zwischen beiden Maschinentypen ist es notwendig, auf Basis der existierenden Konstruktion der 1-Zylinder-Maschine

eine Gruppierung der Bauteile vorzunehmen und diese zu einem Teilenummernkonzept weiter auszuarbeiten. Mit dem Konzept sollen möglichst viele Bauteile in vormontierbare und getrennt prüfbare Komponenten und Baugruppen unterteilt werden, die dann unverändert in beide Maschinentypen übernommen werden können. So können die Komponenten und Baugruppen vormontiert eingelagert und je nach Auftragseingang entweder in einer 1-Zylinder- oder 2-Zylinder-Maschine verbaut werden. Damit werden Lagerkapazitäten und -kosten gespart. Die Endmontage aller Komponenten und Baugruppen zu einer gesamtheitlichen Maschine erfolgt dann im letzten Montageschritt. Auf diese Weise ist die späte Variantenerzeugung gegeben.

Das Teilenummernkonzept wird innerhalb des Projekts mithilfe einer Datenbank umgesetzt. In der Datenbank befinden sich mehrere Listen mit grundlegenden Informationen zu den Einzelteilen sowie zugehörigen Lieferanten und Preise. Jedes Bauteil verfügt über eine einzigartige Teilenummer, über welche weiterführende Informationen in der Datenbank abgefragt werden können.

Die Bauteile bilden die niedrigste Ebene in dem Konzept. Jedes Bauteil kann einer Komponente oder Baugruppe zugeordnet werden, wobei die Baugruppe die höchste Ebene bildet. Bauteile müssen nicht zwingend einer Komponente zugeordnet werden und können als Einzelteil in einer Baugruppe existieren, Komponenten müssen jedoch einer übergeordneten Baugruppe zugeordnet werden.

Die Erstellung einer Komponente macht nur Sinn, wenn diese baugleich in zwei unterschiedlichen Baugruppen verwendet werden soll oder sich Vorteile bei der Vormontierbarkeit der gesamtheitlichen Baugruppe ergeben. Das ist beispielsweise bei der Hydraulik im Unterbau der Maschinen der Fall.

Über die Datenbank können Bauteile nach Maschinentyp, Lieferant, Komponente oder Baugruppe gefiltert werden. Auch die Herstellkosten können nach diesen Kategorien ermittelt werden.

Bei der Zuordnung einzelner Bauteile zu Komponenten oder Baugruppen wurde evaluiert, ob die entsprechende Komponente oder Baugruppe vormontiert werden kann und ob die Möglichkeit zur identischen Verwendung des Bauteils in sowohl der 1-Zylinder- als auch 2-Zylinder-Maschine besteht. Sobald sich Bauteile in Komponenten oder Baugruppen zwischen beiden Maschinentypen unterscheiden, wurde eine neue Komponente oder Baugruppe eingeführt. Dies musste jedoch auf ein Minimum reduziert und damit einhergehend bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Das übergeordnete Ziel bei der Erstellung des Teilenummernkonzepts war es, während der Serienfertigung bei einer eingehenden Bestellung die Lagerbestände mithilfe der Datenbank automatisch zu überprüfen und fehlende Teile automatisch nachbestellen zu können.

6.4 Durchgeführte Optimierungen während der Entwicklung

Während der Entwicklung der 2-Zylinder-Maschine wurden die bereits existierenden Konstruktionen ausgewählter Baugruppen und Bauteile nochmals überarbeitet. Gleichzeitig wurden die aus der Literatur ermittelten Strategien für die Kostenoptimierung im Zuge der Fallstudie angewandt. In der Vorserie soll die 1-Zylinder-Maschine in Losgröße 10 und die 2-Zylinder-Maschine in Losgröße 3 gefertigt werden. Daher wurden für die Kostenkalkulationen der beiden Maschinentypen die Angebotspreise der Lieferanten verwendet und für die entsprechenden Losgrößen durchgeführt.

6.4.1 Verringerung der Teilevielfalt und Gesamtteilenanzahl

Zum Übernahmezeitpunkt der 1-Zylinder-Maschine bestand der Aufbau zum Verspannen des Boilers aus drei Spannhaken, die mithilfe des Boilerbodens, des Verspanndeckels und der Bodenplatte die

Verspannung des Boilers herstellen. Diese Konstruktion ist in Abbildung 3 als Variante 1 dargestellt. Ein Spannhaken besteht aus einem inneren und äußeren Edelstahl-Blech sowie zwei Versteifungselementen aus Aluminium, die oben und unten zwischen den Edelstahl-Blechen eingeschoben werden. Die Versteifungselemente werden benötigt, um einer Deformation der Edelstahl-Blechteile beim Verspannen vorzubeugen. Anschließend wird das ganze System miteinander verschraubt.

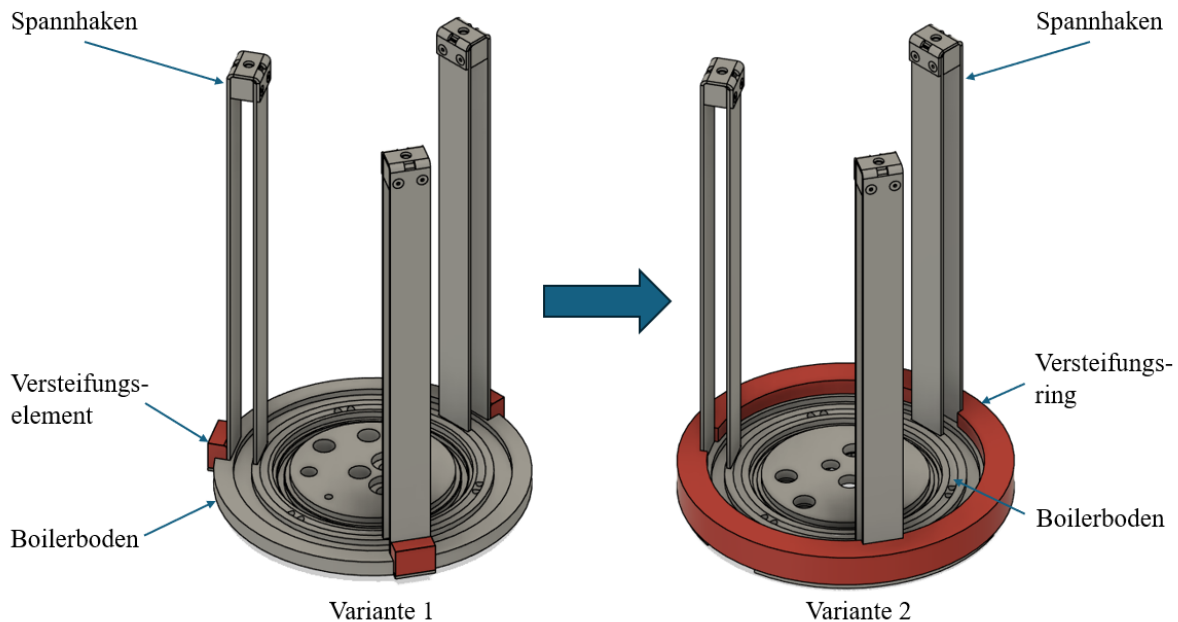


Abbildung 3: Übersicht von Variante 1 und 2 des Boiler-Verspannsystems

Im Zuge der Kostenkalkulation dieses Konzepts kam auf, dass die vielen Einzelteile die Komplexität und den Montageaufwand der Baugruppe erhöhen, was sich wiederum in höheren Kosten niederschlägt. Zusätzlich sollte für Variante 1 aus ästhetischen Gründen eine ringförmige Kappe aus Kunststoff zum Abdecken der unteren Versteifungselemente konstruiert werden, was in einem zusätzlichen Teil resultiert.

Daher wurde für das Verspannsystem eine weitere Variante konstruiert, welche in Abbildung 3 als Variante 2 dargestellt ist. In dieser werden die unteren Versteifungselemente als Ring aus Messing ausgeführt, welcher wie die Versteifungselemente über Zerspanen gefertigt wird. Auf diese Weise wird die Gesamtteilanzahl reduziert sowie der Montageaufwand verringert, da anstelle von drei kleinen Einzelteilen mit sechs Schrauben nun ein großes Teil mit drei Schrauben mit den Blechen verschraubt wird. Zugleich wird die Optik des Boilers verbessert, da der massive Messing-Ring einen stabileren und wertigeren Eindruck macht als die drei Versteifungselemente mit einer Kunststoff-Abdeckung.

Tabelle 5: Kostenvergleich des Boiler-Verspannsystems für Losgröße 3					
Variante 1			Variante 2		
Bezeichnung	Anzahl	Preis/Stk	Bezeichnung	Anzahl	Preis/Stk
Boilerboden	1	224,02 €	Boilerboden	1	224,02 €
Spannhaken Innen	3	9,30 €	Spannhaken Innen	3	9,30 €
Spannhaken Außen	3	14,29 €	Spannhaken Außen	3	14,29 €
Versteifungselement Oben	3	27,79 €	Versteifungselement Oben	3	27,79 €

Versteifungselement Unten	3	25,30 €	Versteifungsring	1	68,80 €
Gesamtkosten		454,06 €	Gesamtkosten		446,96 €

Bei dem Vergleich der entstehenden Kosten beider Varianten wurde ersichtlich, dass Variante 2 bei der Fertigung in Losgröße 3 geringfügig günstiger ist als Variante 1. Neben der Kostenoptimierung bringt Variante 2 eine deutliche Verbesserung der Montage und Optik mit sich, sodass diese Variante als finale Konstruktion des Boilers baugleich in die 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine übernommen wurde.

Ein weiteres Problem mit der Konstruktion der 1-Zylinder-Maschine zum Übernahmezeitpunkt war die Vormontierbarkeit des Boilers. Da die Verspannung des Boilers über die Teile Verspanndeckel, Spannhaken, Boilerboden und Bodenplatte realisiert wurde, konnte die Baugruppe Boiler nur zusammen mit der Bodenplatte montiert werden. Dies macht eine vormontierte Einlagerung so gut wie unmöglich, da die Bodenplatte als Edelstahl-Blech mit einer Stärke von 4 mm ausgeführt ist. Somit ist die Bodenplatte durch die Abmessungen und dem resultierenden Gewicht schwer zu handhaben und benötigt im montierten Zustand viel Platz zum Einlagern. Aus diesen Gründen wurde nach einer Möglichkeit gesucht, wie der Boiler ohne Bodenplatte vormontiert und eingelagert werden kann, ohne das komplette Verspannsystem nochmals überarbeiten zu müssen.

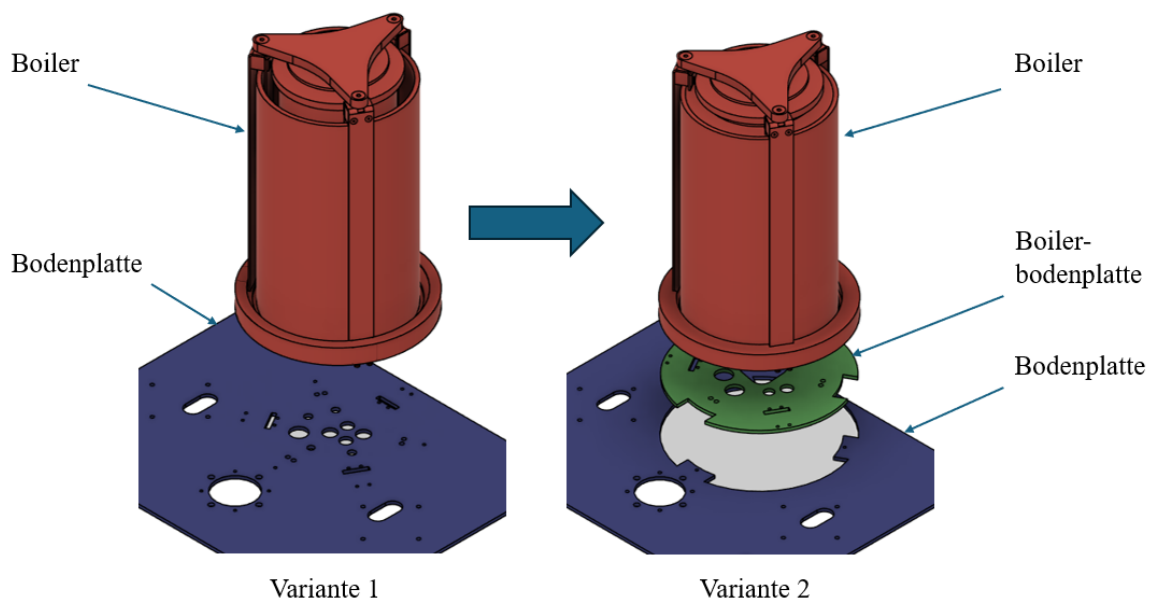


Abbildung 4: Übersicht von Variante 1 und 2 zur Anbindung von Bodenplatte und Boiler

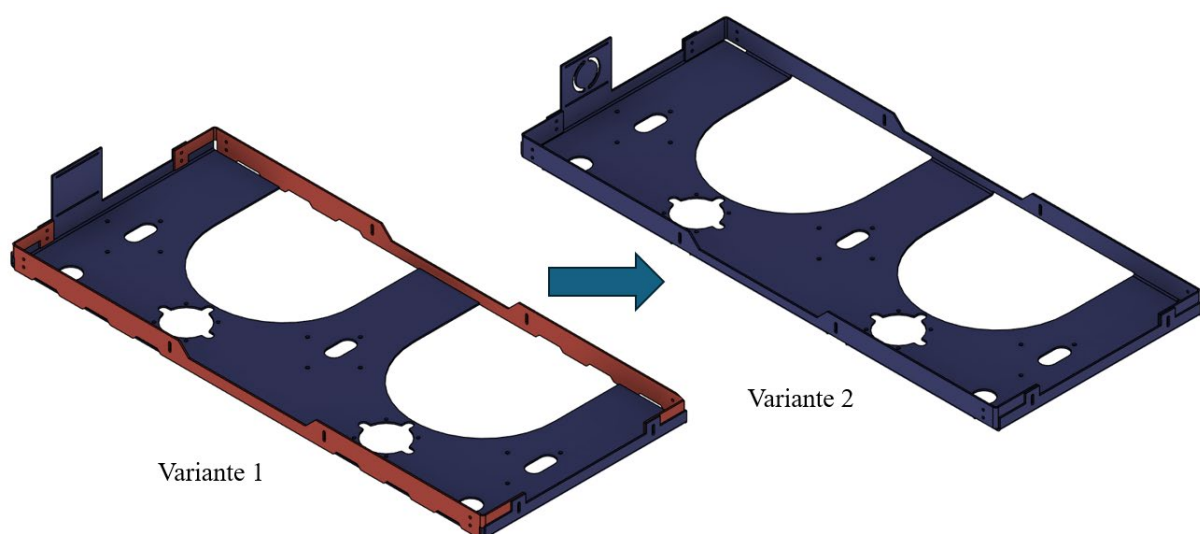
Als das am einfachsten umzusetzende Konzept wurde die Einführung einer Boilerbodenplatte beschlossen. Dazu wird im letzten Bearbeitungsschritt beim Schneiden eine kleinere Platte mit der Kontur für den Boiler aus der Bodenplatte herausgeschnitten. Die Boilerbodenplatte wird zum Verspannen des Gesamtsystems Boiler verwendet, sodass dieser vormontiert eingelagert werden kann. Der vormontierte Boiler wird erst im Zuge der Endmontage mit der Bodenplatte verschraubt.

Tabelle 6: Kostenvergleich für das Konzept der Boilerbodenplatte					
Variante 1			Variante 2		
<i>Bezeichnung</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Preis/Stk</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Preis/Stk</i>
Bodenplatte (alt)	1	47,78 €	Bodenplatte (neu)	1	45,03 €
-	-	-	Boilerbodenplatte	1	13,79 €
Gesamtkosten		47,78 €	Gesamtkosten		58,82 €

Wie aus Tabelle 6 ersichtlich wird, resultiert die Einführung der Boilerbodenplatte in einem zusätzlichen Bauteil, was die Fertigungskosten erhöht. Gleichzeitig lässt sich auf diese Weise die Baugruppe Boiler vormontieren und prüfen, ohne die komplette Maschine montieren zu müssen. Nach Einlagerung des vormontierten Boilers kann dieser je nach Nachfrage baugleich entweder in der 1-Zylinder- oder 2-Zylinder-Maschine verbaut werden, sodass eine späte Variantenerzeugung gegeben ist. Diese Vorteile von Variante 2 überwiegen die erhöhten Fertigungskosten, sodass das Konzept der separaten Boilerbodenplatte in die finalen Konstruktionen der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine übernommen wurde. Erwähnenswert ist jedoch, dass die in Tabelle 6 gezeigten Preise über das Online-Kalkulationstool des für das Projekt definierten Blechfertigers ermittelt wurden, in welchem die Bodenplatte und Boilerbodenplatte als zwei separate Bauteile kalkuliert werden. Die Preise entstehen, wenn beide Teile in zwei komplett unterschiedlichen Bearbeitungsschritten aus unterschiedlichen Halbzeugen gefertigt werden.

Für die Serienfertigung ist es ratsam, mit dem Lieferanten eine Vereinbarung zu treffen, sodass bei der Fertigung der Bodenplatte die Kontur der Boilerbodenplatte als letzter Schritt nach allen übrigen Aussparungen geschnitten wird und die Bodenplatte immer mit der zugehörigen Boilerbodenplatte geliefert wird. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass Bodenplatte und Boilerbodenplatte immer perfekt ineinanderpassen, da der entstehende Spalt zwischen beiden Teilen über den Laser- oder Wasserstrahl beim Schneiden hergestellt wird. Die resultierenden Fertigungskosten von Variante 2 sollten in diesem Fall nur geringfügig höher als bei Variante 1 sein, da beim Schneidevorgang nur eine zusätzliche Kontur geschnitten werden muss, was zusätzliche Halbzeuge und Rüstkosten überflüssig macht und die Maschinenlaufzeit nur minimal erhöht.

Ein Beispiel, wie die Gesamtteilenanzahl während der Entwicklung verringert wurde, ist der Anbindungsrahmen der 2-Zylinder-Maschine. Die Anbindungsrahmen der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine sind unterschiedlich ausgeführt und werden in den jeweiligen Unterbauten verbaut. Bei beiden Maschinen werden die Anbindungsrahmen aus geschnittenen und gefalteten Edelstahl-Blechen mit einer Dicke von 2 mm gefertigt. Sie sorgen für die Versteifung des Unterbaus und werden zur Befestigung von Hydraulik und Elektronik sowie der Bodenplatte verwendet. Der Anbindungsrahmen besteht bei der 1-Zylinder-Maschine aus dem Anbindungsrahmen selbst sowie einem separaten Versteifungsblech. Da die Blechkonstruktion des Unterbaus der 1-Zylinder-Maschine nicht unverändert übernommen werden konnte, wurde eine Neukonstruktion für die 2-Zylinder-Maschine durchgeführt. Bei der Entwicklung wurden für die Blechkonstruktion des Unterbaus zwei Varianten konstruiert.



[Abbildung 5: Übersicht von Variante 1 und 2 der Blechkonstruktion des Unterbaus der 2-Zylinder-Maschine]

In Variante 1 besteht die Blechkonstruktion aus einem Anbindungsrahmen, der mithilfe von zwei Blechen vorne und hinten vernietet wird, um das System zu versteifen. Die beiden Versteifungsbleche wurden als Gleichteil ausgeführt. Die Breite der Bleche wurde dabei so gering wie möglich gewählt, um Materialkosten zu sparen. Als Resultat besteht die Blechkonstruktion des Unterbaus bei Variante 1 aus drei wenig komplexen Blechteile, die über je zwei Biegekanten aufweisen und über Laserschneiden und Blechumformen hergestellt werden können. Jedes Teil muss bei der Fertigung nur jeweils einmal gedreht werden, um alle Biegungen herzustellen. Bei der Vormontage müssen insgesamt acht Nieten gesetzt werden.

Gleichzeitig wurde die Integralbauweise angewandt und die Blechkonstruktion als komplexes Einzelteil konstruiert. In Variante 2 verfügt der Anbindungsrahmen über acht Biegekanten, die teilweise ineinander liegen, was den erforderlichen Fertigungsaufwand beim Blechumformen im Vergleich zu Variante 1 deutlich erhöht. Das Teil verfügt an den Seiten über je zwei lange und zwei kurze Flansche, die nach oben gefaltet werden und die Vorder- und Rückwand sowie die Seitenwände des Anbindungsrahmens bilden. Die langen Flansche an der Vorder- und Rückseite verfügen jeweils über zwei Laschen, die nach innen gefaltet und anschließend mit den Seitenwänden vernietet werden. Das komplexe Teil erfordert deutlich mehr Aufwand zur Handhabung während der Fertigung, da das Teil beim Umformen mehrmals gedreht werden muss. Daher wurde ursprünglich erwartet, dass Variante 1 die kostengünstigere Variante wäre. Die Anzahl der Nieten und damit der Montageaufwand sind identisch zu Variante 1.

Tabelle 7: Kostenvergleich der Blechkonstruktion für den Unterbau der 2-Zylinder-Maschine					
Variante 1			Variante 2		
Bezeichnung	Anzahl	Preis/Stk	Bezeichnung	Anzahl	Preis/Stk
Anbindungsrahmen	1	49,73 €	Anbindungsrahmen	1	67,41 €
Versteifungsblech	2	16,03 €	-	-	-
Gesamtkosten		81,79 €	Gesamtkosten		67,41 €

Für beide Varianten wurden bei dem Blechfertiger Angebote eingeholt. Entgegen der Erwartung wurde nach der Kalkulation der Gesamtkosten beider Varianten deutlich, dass Variante 2 aufgrund der geringeren Gesamtteilzahl und der damit entfallenden Rüstzeiten kostengünstiger ist. In Kombination mit der deutlich erhöhten Steifigkeit des Einzelteils gegenüber den drei Teilen wurde Variante 2 in die finale Konstruktion der 2-Zylinder-Maschine übernommen.

6.4.2 Baukastenkonstruktion und Modularisierung

Der Unterbau der 1-Zylinder-Maschine wies zum Übernahmezeitpunkt eine nicht funktionale Bauteilanordnung und eine verwinkelte Leitungsführung mit vielen Ecken auf. Dies resultierte in einer hohen Anzahl an benötigten Steckverbindern, was den Montageaufwand und die Kosten für Zukaufteile deutlich erhöhte.

Tabelle 8: Vergleich des alten und neuen Standes vom Unterbau der 1-Zylinder-Maschine		
	Stand vom 19.10.2023	Stand vom 08.03.2024
Teileanzahl	68	58
Resultierende Kosten	1.504,71 €	1.427,47 €

Im Zuge mehrerer Iterationsschleifen wurde die Komponentenanzahl und Leitungsführung im Unterbau der 1-Zylinder-Maschine hinsichtlich Montierbarkeit, Teileanzahl und benötigter

Eckverbinder optimiert. So war es möglich, die Gesamtteilanzahl der Zukaufteile im Unterbau von 68 auf 58 Teile zu verringern, was in einer Kosteneinsparung von 77,47 € resultiert.

Während der Optimierung der Leitungsführung wurden mehrere mögliche Zusammenstellungen von Verbindungselementen miteinander verglichen, wie in Abbildung 6 ersichtlich wird.

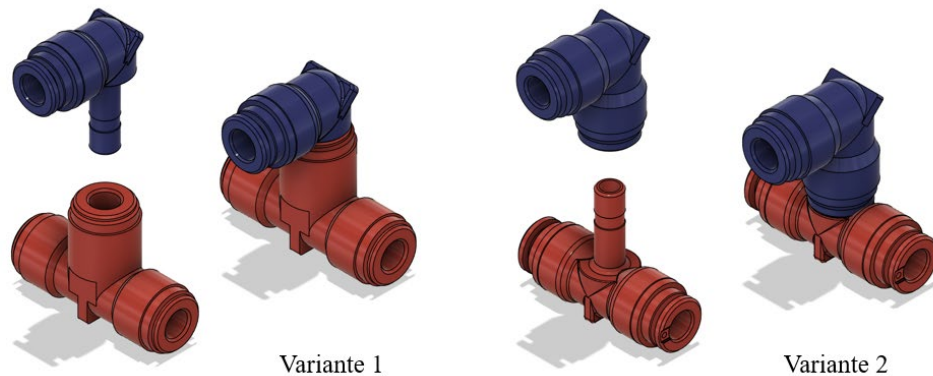


Abbildung 6: Übersicht von unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten der Steckverbinder

Tabelle 9: Kostenvergleich der Steckverbinder					
Variante 1			Variante 2		
Bezeichnung	Anzahl	Preis/Stk	Bezeichnung	Anzahl	Preis/Stk
T-Steck-Verbindung	1	7,47 €	T-Steckanschluss	1	5,62 €
Winkel-Steckanschluss	1	4,69 €	Winkel-Steck-Verbindung	1	5,62 €
Gesamtkosten		12,16 €	Gesamtkosten		11,24 €

In dem in Abbildung 6 gezeigten Fall ist mit beiden Varianten die gleiche Leitungsführung zu realisieren, jedoch unterscheiden sich die entstehenden Kosten je nach gewählten Bauteilen, wie aus Tabelle 9 ersichtlich wird.

Vor der Positionierung der Komponenten im Unterbau wurde der verfügbare Bauraum in zwei horizontale Ebenen unterteilt. Bei den Leitungen wurde zwischen druckführenden und drucklosen Leitungen unterschieden. Um zu verhindern, dass in den drucklosen Leitungen Wasser stehen bleibt, wurden diese auf die obere Ebene im Unterbau gelegt, während die druckführenden Leitungen auf die untere Ebene gelegt wurden. Auf diese Weise wird verhindert, dass die drucklosen Leitungen unter dem Schmutzwasserabfluss liegen und dadurch beim Entwässern Wasser in den Leitungen stehen bleibt. Bei der Leitungsverlegung wurde auf einen geradlinigen Verlauf mit möglichst wenig Ecken geachtet. Generell sind die Abstände einzelner Steckverbinder zueinander durch deren Geometrie, die Anforderungen für den Verrastmechanismus sowie den verfügbaren Bauraum im Unterbau vorgegeben, was die Gestaltungsfreiheit bei der Leitungsverlegung deutlich einschränkt.

Bauteile, Komponenten und Leitungen wurden innerhalb des Unterbaus so angeordnet, sodass eine Montage von unten möglich ist. Dafür wird der vormontierte obere Teil der Maschine vor der Endmontage um 180° gedreht und in eine Vorrichtung gesetzt, sodass die Unterseite der Blechkonstruktion im Unterbau frei zugänglich ist. Anschließend werden nach und nach die einzelnen Bauteile und vormontierten Komponenten mithilfe von Rohrstücken miteinander verbunden und innerhalb der Blechkonstruktion des Unterbaus befestigt.

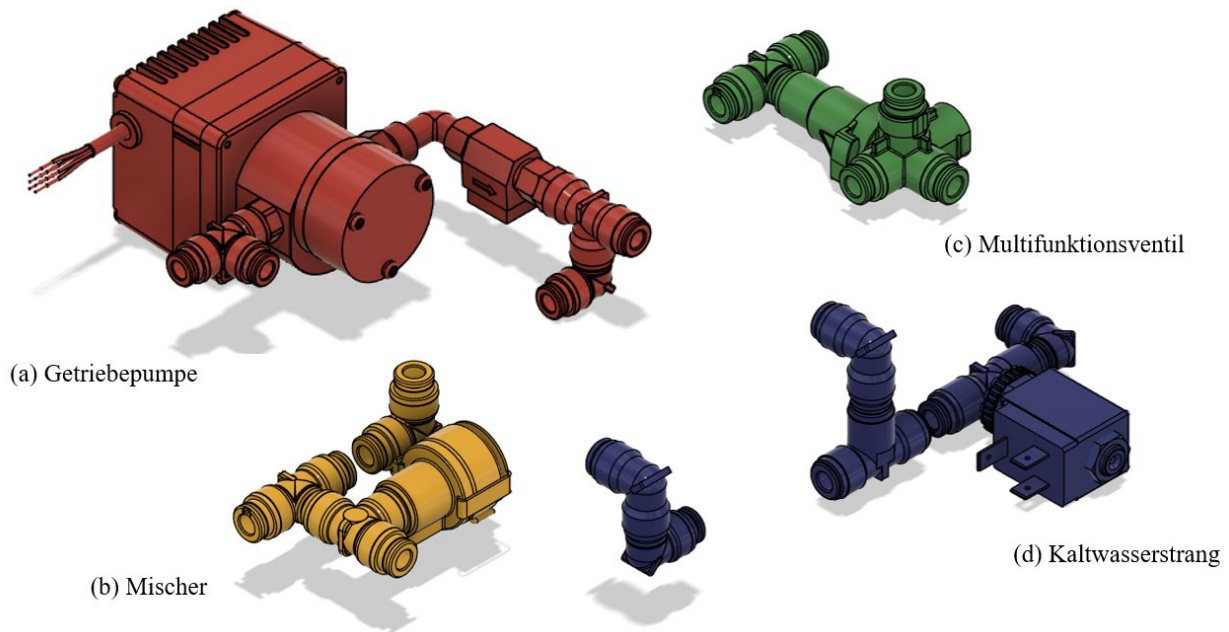


Abbildung 7: Übersicht der baugleichen Komponenten im Unterbau der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine

Einzelne Leitungsstränge mit unterschiedlicher Funktion wurden nach dem Hydraulikplan in Komponenten untergliedert. So besteht die Komponente Getriebepumpe (a) aus der Getriebepumpe, einem Durchflusssensor sowie mehreren Steckverbindern zur Integration in das Leitungssystem. Die Komponente Mischer (b) besteht aus dem elektronischen Dosierventil zur Bereitstellung von Mischwasser in der eingestellten Temperatur sowie mehreren Steckverbindern. Die Komponente Multifunktionsventil (c) besteht aus dem Ventil sowie einem T-Stück. Die Komponente Kaltwasserstrang (d) besteht aus einem Magnetventil sowie mehreren Steckverbindern. Die Rohrstücke zwischen den Teilen sind in Abbildung 7 nicht dargestellt.

Bei der Zusammenstellung von Bauteilen zu Komponenten wurde auf die Vormontierbarkeit sowie die Möglichkeit zur baugleichen Verwendung an mehreren Stellen geachtet. Das Ziel bei der Positionierung der Bauteile im Unterbau der 1-Zylinder-Maschine war das Zusammenfassen von Bauteilen zu möglichst vielen Komponenten und Baugruppen, welche in identischer Form im Unterbau der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine verwendet werden können.

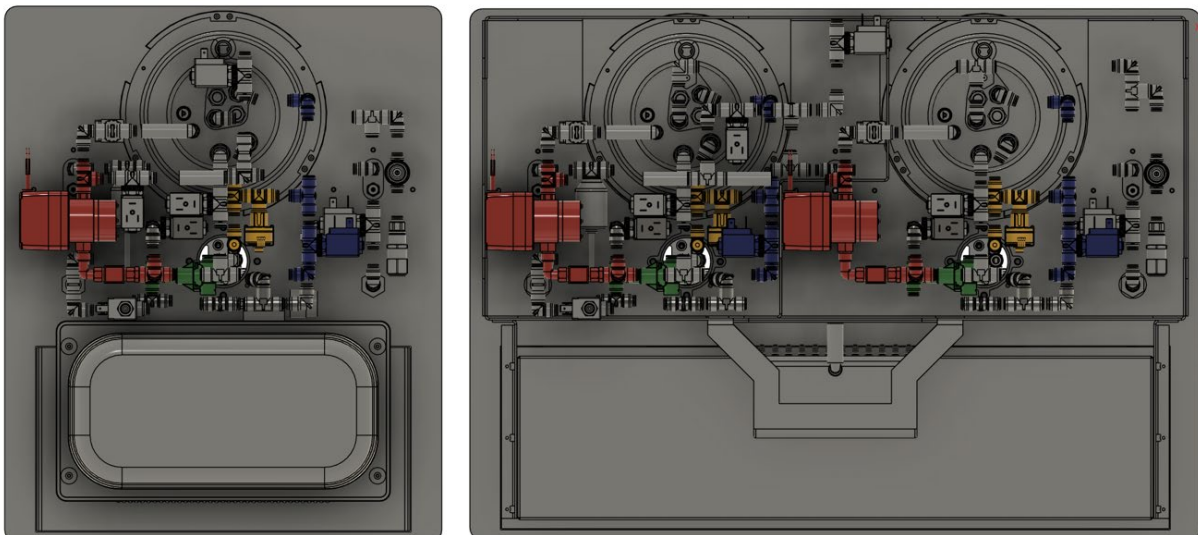


Abbildung 8: Untenansicht des Unterbaus der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine mit den identischen Komponenten Getriebepumpe (rot), Mischer (gelb), Multifunktionsventil (grün) und Kaltwasserstrang (blau)

Sobald die Komponentenanzordnung und Leitungsführung im Unterbau der 1-Zylinder-Maschine definiert war, wurden diese in den Unterbau der 2-Zylinder-Maschine übernommen. Da die beiden Boiler und Brühtürme der 2-Zylinder-Maschine separat voneinander betrieben werden, war es möglich, den Unterbau der 1-Zylinder-Maschine weitestgehend unverändert zu übernehmen. Als Folge davon sind die Kreisläufe zur Befüllung, Entschichtung und Entwässerung des Boilers sowie die Kalt-, Heiß- und Mischwasserleitungen bei beiden Maschinen identisch ausgeführt. Für die 2-Zylinder-Maschine wurden diese weitestgehend unverändert dupliziert, wobei lediglich einzelne Bauteile anders ausgerichtet wurden. An manchen Stellen wurden zusätzliche Steckverbinder benötigt, um die Funktionalität des Unterbaus der 2-Zylinder-Maschine herzustellen.

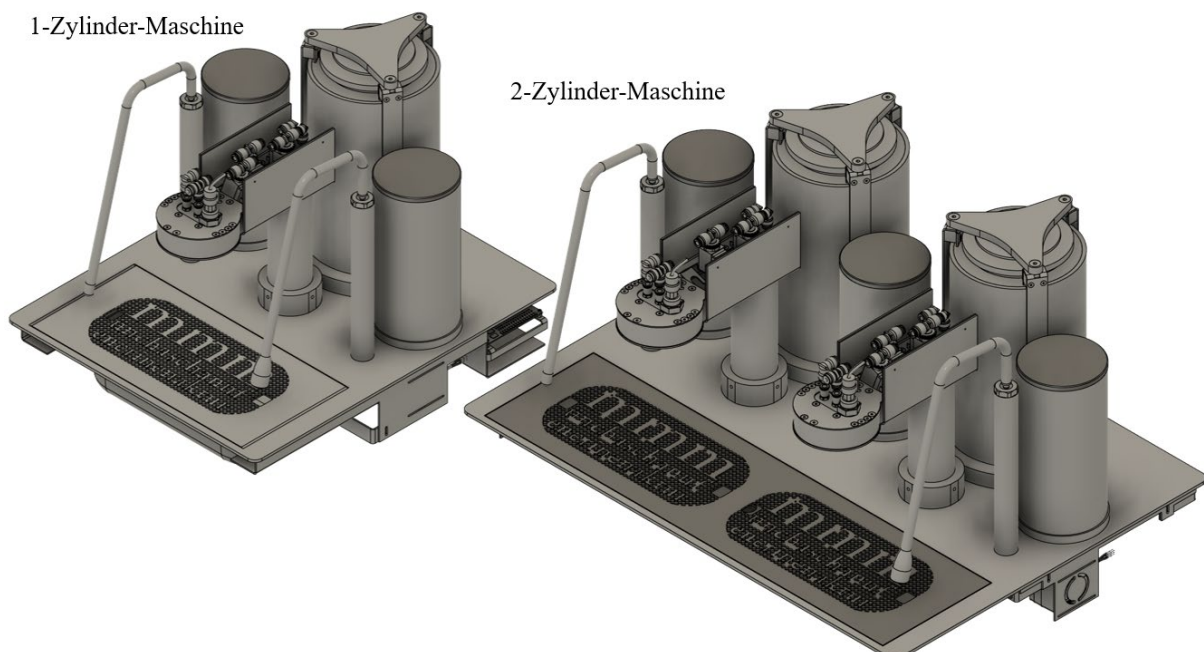


Abbildung 9: CAD-Modelle der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine, Stand Mai 2024

Als Resultat teilen sich 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine einen Großteil der verbauten Komponenten und Baugruppen im Unterbau, sodass diese vormontiert eingelagert und je nach Auftragseingang im Zuge der Endmontage im entsprechenden Maschinentyp verbaut werden können. Die vollautomatisierte Abwicklung zur Prüfung des Lagerbestands sowie zur automatischen Nachbestellung von fehlenden Bauteilen und die Endmontage kann damit realisiert werden. Die nahezu identische Ausführung des Unterbaus in beiden Maschinen erleichtert die Endmontage sowie die Reparatur und Wartung, da diese durch die steigende Erfahrung nach einigen Durchläufen deutlich schneller und effizienter durchgeführt werden kann, was wiederum Kosten spart.

Tabelle 10: Übersicht der Gleichteile zwischen 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine			
	1-Zylinder-Maschine		2-Zylinder-Maschine
Anzahl Bauteile	297		505
Anzahl Gleichteile	240		405
Anteil Gleichteile in %	80,8		80,2

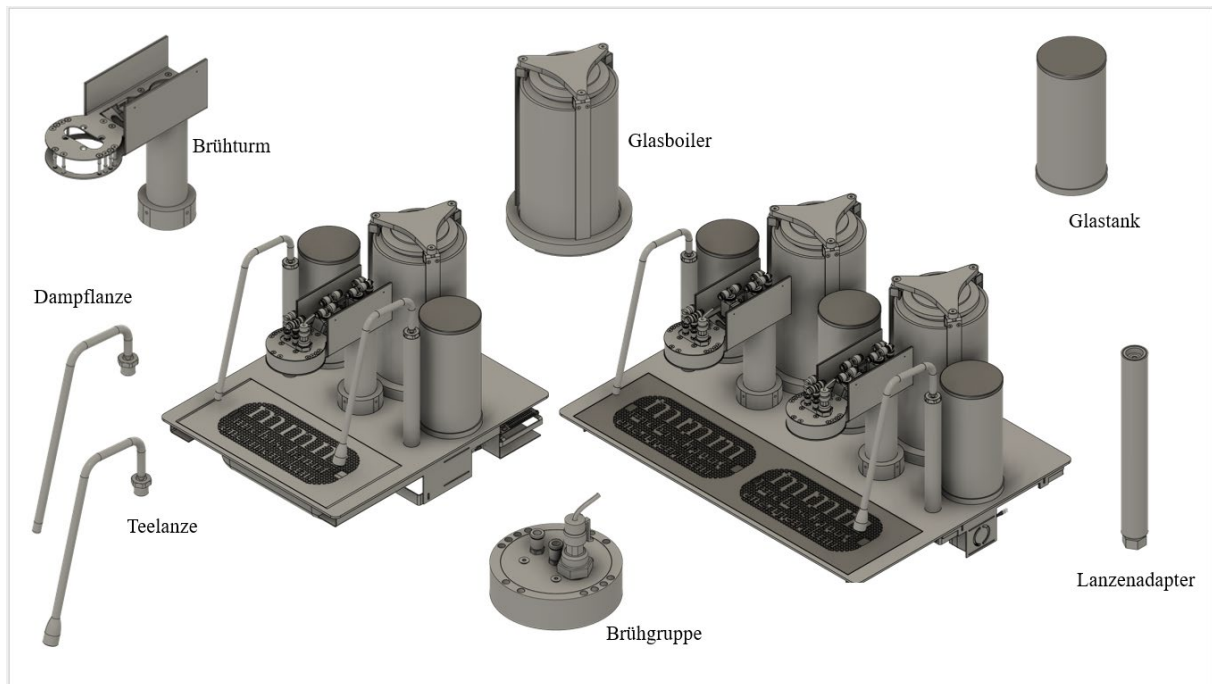


Abbildung 10: Übersicht der identischen Baugruppen beider Maschinentypen auf der Bodenplatte

Auf die Gesamtteilzahl beider Maschinentypen gesehen beträgt der Anteil von verbauten Gleichteilen innerhalb der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine rund 80 %. Als Gleichteile wurden identische Teile gewertet, die in der gleichen Konfiguration innerhalb einer Baugruppe oder Komponente in beiden Maschinen verbaut werden können. Dazu gehören beispielsweise die Baugruppen Boiler mit zugehöriger Hydraulik, die Glastanks, der Brühgruppenhalter mit Brühgruppe und die Lanzen. Die Komponenten Getriebepumpe, Mischer, Multifunktionsventil und Kaltwasserleitung werden im Unterbau der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschinen in identischer Konfiguration verbaut.

6.4.3 Wahl von Material, Fertigungstechniken und Verbindungsmethoden

Während der Entwicklung wurde darauf geachtet, den entstehenden Materialverbrauch bei der Fertigung der Konstruktionsteile über die Auswahl geeigneter Halbzeuge zu minimieren. Auf diese Weise werden die Maschinenlaufzeiten und die Bearbeitungsschritte während der Fertigung reduziert, was sich wiederum positiv auf die Herstellkosten auswirkt.

Als Resultat von diesen Anforderungen werden alle Teile mithilfe von handelsüblichen Halbzeugen aus Standardwerkstoffen gefertigt. Als Materialien kamen Metalle wie Automatenmessing, Edelstahl und Aluminium sowie technische Kunststoffe wie PVDF in Form von Halbzeugen wie Blechen oder Rohren zum Einsatz. Alle Teile werden ausschließlich über Zerspanen, Blechumformen und additive Fertigung hergestellt, für die keine Werkzeugkosten anfallen. Bei der Montage werden ausschließlich Verbindungen verwendet, die wenige Arbeitsschritte sowie geringe Investitionskosten erfordern, wie zum Beispiel Kleben, Schrauben und Nieten. Die Montage beider Maschinen kann von Hand und ohne aufwändige Sonderwerkzeuge durchgeführt werden.

Im Zuge der Entwicklung wurden bei kostenintensiven Teilen mehrere Kombinationsmöglichkeiten für Material und Fertigung auf deren Wirtschaftlichkeit untersucht. So kam bei der Kostenkalkulation auf, dass die Teile aus technischem Kunststoff wie beispielsweise der Brühgruppeneinsatz und Wasserverteiler einen großen Anteil der Herstellkosten verursachen. Dies lässt sich mit der beschränkten Verfügbarkeit von technischen Kunststoffen wie PVDF und damit einhergehend den

hohen Materialkosten erklären. Gleichzeitig werden in der Serie nur kleine Stückzahlen produziert, was in hohen Rüstkosten und damit in hohen Stückpreisen resultiert.

Die Teile aus technischem Kunststoff innerhalb der Maschine haben gemeinsam, dass sie im Betrieb mit heißem Kaffeebezugswasser in Kontakt kommen und daher sowohl lebensmittelzertifiziert als auch temperaturbeständig sein müssen. Gleichzeitig darf das Material zur Gewährleistung der maximalen Energieeffizienz der Maschinen nur wenig Wärme aufnehmen, wodurch Metalle als Material ausscheiden. Einige Teile wie der Boilerboden werden während des Betriebs mechanisch belastet, wodurch der Werkstoff über entsprechende Materialeigenschaften verfügen muss. Das Material sollte leicht verfügbar und einfach zu bearbeiten sein, ohne dass zusätzliche Werkzeugkosten erforderlich werden. Diese Materialanforderungen machen technische Kunststoffe wie PVDF und PEEK eigentlich alternativlos.

Jedoch wird innerhalb der EU eine Verordnung zur Beschränkung von PFAS-basierten Chemikalien evaluiert, zu denen auch technische Kunststoffe wie PVDF gehören [18]. Sollte die Beschränkung oder ein Verbot von PFAS-basierten Chemikalien umgesetzt werden, müsste für die Bauteile aus technischen Kunststoffen von PVDF auf den Werkstoff PEEK ausgewichen werden, was in beschränkter Verfügbarkeit und höheren Materialkosten resultiert. Daher wurde nach alternativen Materialien und Fertigungsmethoden für die Bauteile aus technischen Kunststoffen recherchiert.

Neben der mechanischen Fertigung werden bei additiven Fertigungsverfahren ebenfalls keine Werkzeugkosten benötigt. Bei der Recherche nach Filamenten für den FLM-Druck wurde ein geeignetes Material gefunden, welches lebensmittelzertifiziert und temperaturbeständig ist sowie über ausreichende mechanische Eigenschaften verfügt. Dieses Filament lässt sich mit minimalen Materialeinsatz über herkömmliche Desktop-3D-Drucker für den Privatgebrauch verdrucken. Ein Nachteil von FLM-Druck gegenüber vom Zerspanen sind die deutlich größeren Toleranzen, die sich über das Druckverfahren ergeben. Diese lassen sich jedoch über eine darauf ausgelegte Konstruktion sowie über die Feinjustierung der Druckparameter kompensieren.

Im Vergleich zu den Werkstoffen PVDF und PEEK ist der Materialpreis des 3D-Druck-Filaments deutlich niedriger. Gleichzeitig sind die erforderlichen Rüstzeiten und die Anzahl der Bearbeitungsschritte beim FLM-Druck geringer als beim Zerspanen, was sich ebenfalls positiv auf die Fertigungskosten der Teile auswirkt.

Ein weiteres Argument für den FLM-Druck ist der geringere Aufwand zur Nachbearbeitung. So verfügen beispielsweise die Teile Brühgruppeneinsatz und Wasserverteiler über mehrere Außen- und Innengewinde aus Kunststoff, für die beim Zerspanen nach dem Setzen der Kernlochbohrungen und dem Abdrehen der Bolzen Gewinde geschnitten werden müssen. Dies lässt sich nur über mehrere Fertigungsoperationen bewerkstelligen, bei welchen auch mehrere Werkzeugwechsel erforderlich werden. Im Gegensatz dazu lassen sich die besagten Außen- und Innengewinde direkt über den FLM-Druck herstellen, ohne dass diese extra geschnitten oder nachbearbeitet werden müssen. Support-Material ist beim Drucken der Gewinde durch die Geometrie der Gewindgänge ebenfalls nicht notwendig. Darüber hinaus besteht bei Teilen für den FLM-Druck deutlich mehr Gestaltungsfreiheit, da über den FLM-Druck auch komplizierte Geometrien wie Hinterschnitte gefertigt werden können, die über Zerspanen nicht herstellbar wären.

Mögliche Nachbearbeitungen bei den FLM-Druck-Teilen sind das Entfernen von Support-Material oder das Nachbohren von Bohrungen, welche durch die groben Toleranzen von rund 0,3 mm nicht maßhaltig sind. Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Konstruktion von FLM-Druck-Teilen ist neben der Vermeidung von erforderlichem Support-Material beim Drucken die Platzierung der Bauteile auf der Druckplatte und damit einhergehend die Ausrichtung der einzelnen Druckschichten, um das FLM-Druckteil auf Zug, Scherung oder Torsion belasten zu können.

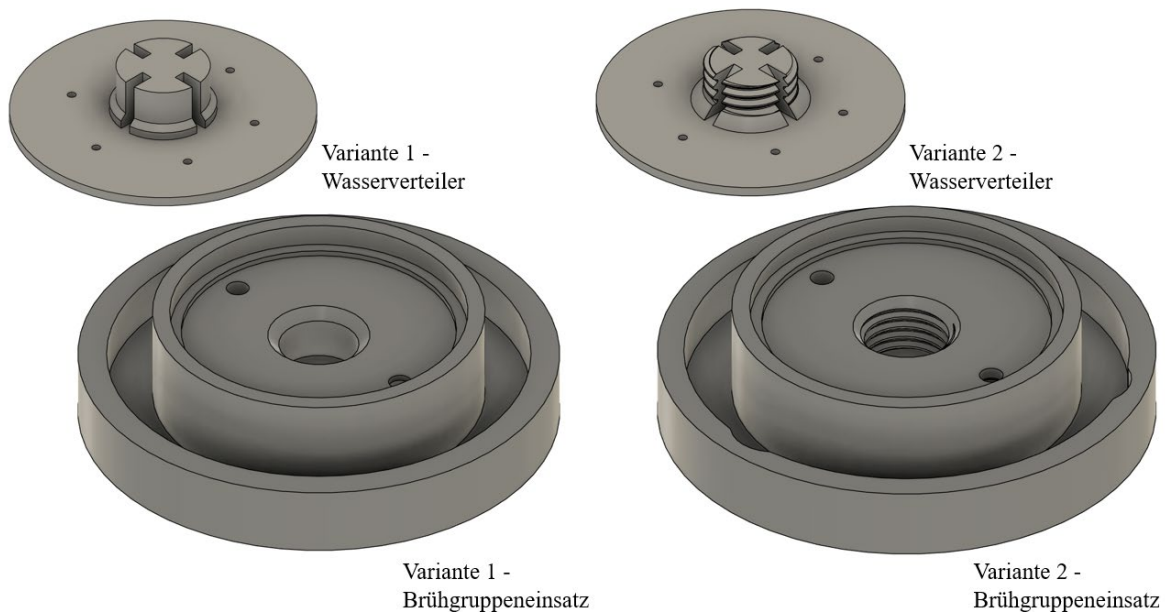


Abbildung 11: Variante 1 und 2 der Teile Wasserverteiler und Brühgruppeneinsatz

Tabelle 11: Kostenvergleich der Fertigung für den Kunststoffkern der Brühgruppe					
Variante 1 – Zerspanen			Variante 2 – FLM-Druck		
Bezeichnung	Material	Preis/Stk	Bezeichnung	Material	Preis/Stk
Brühgruppeneinsatz	PVDF	94,12 €	Brühgruppeneinsatz	Greentec PRO	13,47 €
Wasserverteiler	PVDF	27,13 €	Wasserverteiler	Greentec PRO	9,11 €
Gesamtkosten		121,25 €	Gesamtkosten		22,58 €

In Tabelle 11 findet sich ein Kostenvergleich der Stückpreise von Brühgruppeneinsatz und Wasserverteiler, wenn diese entweder aus PVDF und Zerspanen oder aus lebensmittelzertifiziertem Filament über FLM-Druck hergestellt werden. Für Variante 1 wurden die Angebotspreise für Losgröße 10 des projektinternen Zulieferers für mechanisch gefertigte Bauteile verwendet. Erforderliche Nachbearbeitungen wie beispielsweise das Schneiden von Gewinden nach der Fertigung sind noch nicht mit eingerechnet.

Für Variante 2 wurden die entstehenden Material- und Fertigungskosten für beide Teile manuell kalkuliert. Für die Kalkulation wurden Annahmen für Materialverbrauch und Energieverbrauch sowie für die Zeiten zur Vor- und Nachbereitung der FLM-Druckteile getroffen. Für die erforderliche Zeit zum Einstellen der Drucker sowie zur Nachbearbeitung wurden pro Teil pauschal 15 Minuten veranschlagt.

Tabelle 12: Kalkulation der Herstellkosten der FLM-Druck-Teile				
Bezeichnung	Materialkosten je Teil	Fertigungskosten je Teil	Lohnkosten je Teil	Herstellkosten je Teil
Brühgruppeneinsatz	4,22 €	0,50 €	8,75 €	13,47 €
Wasserverteiler	0,31 €	0,05 €	8,75 €	9,11 €

Wie in Tabelle 12 zu sehen ist, machen bei einem geschätzten Brutto-Stundenlohn von 35 € die Vor- und Nachbereitungskosten mit 8,75 € je Teil einen Großteil der Herstellkosten der FLM-Druckteile aus. Die Materialkosten bilden je nach der Größe des Teils einen weiteren Anteil, während die Fertigungskosten durch die verbrauchte Energie beim FLM-Druck fast vernachlässigbar sind.

Nach dem direkten Kostenvergleich der beiden Varianten wurde FLM-Druck mit lebensmittelzertifiziertem Filament als alternative Fertigungsmethode der Kunststoffteile in der Serie definiert. Die Teile Brühgruppeneinsatz und Wasserverteiler wurden entsprechend umkonstruiert und für den FLM-Druck optimiert, sodass beide Teile vollständig ohne Support-Material gedruckt werden können.

Im Prototypenbau müssen die über FLM-Druck hergestellten Teile hinsichtlich deren Eignung für die Serienfertigung jedoch zuerst ausreichend validiert werden. Aus diesem Grund wurde die Kalkulation der Gesamtkosten mit den Preisen durchgeführt, welche sich aus Variante 1 ergeben.

6.5 Kostenkalkulation für die Vorserienfertigung

Nach dem Abschluss der Entwicklungsarbeiten an der 2-Zylinder-Maschine wurde für beide Maschinen der aktuelle Kostenstand für die unterschiedlichen Fertigungslosgrößen kalkuliert.

Tabelle 13: Gegenüberstellung der Material- und Fertigungskosten nach Maschinentyp			
	1-Zylinder-Maschine	2-Zylinder-Maschine	Faktor
Losgröße 1	5.619,09 €	9.309,68 €	1,66
Losgröße 3	3.876,36 €	6.362,68 €	1,64
Losgröße 10	3.074,23 €	5.021,85 €	1,63

Hierbei wird ersichtlich, dass sich die die Material- und Fertigungskosten der 1-Zylinder- zu 2-Zylinder-Maschine je Losgröße um den Faktor 1,6 bis 1,7 erhöhen.

Zusätzlich wurde eine Gesamtkalkulation der Herstellkosten für die Vorserienfertigung beider Maschinentypen durchgeführt, um evaluieren zu können, ob die vereinbarten Kostenziele für die Herstellkosten bis dato erreicht wurden und wieviel Spielraum für die weitere Entwicklung besteht. Der Zwischenstand ist in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Abschätzung der erzielbaren Margen je Maschinentyp		
	1-Zylinder-Maschine	2-Zylinder-Maschine
Brutto incl. Mwst.	14.280 €	24.990 €
Netto excl. Mwst.	12.000 €	21.000 €
Vertrieb/Service	- 4.000 €	- 7.000 €
Nettoerlös	= 8.000 €	= 14.000 €
Herstellkosten (Ziel)	4.000 €	7.000 €
Marge (Ziel)	4.000 €	7.000 €
Material- und Fertigungskosten/Einheit (Stand 14.05.2024)	3.074 € (Losgröße 10)	6.363 € (Losgröße 3)
Zzgl. Montagekosten	175 €	210 €
Herstellkosten/Einheit (Plan)	= 3.249 €	= 6.573 €
Marge/Einheit (Plan)	4.751 €	7.427 €

Bei der Vorserienfertigung sollen nach Abschluss des Prototypenbaus zehn 1-Zylinder und drei 2-Zylinder-Maschinen gefertigt werden. Für die Kalkulation der Herstellkosten wurden daher die rabattierten Preise in Losgröße 10 für die 1-Zylinder-Maschine und in Losgröße 3 für die 2-Zylinder-Maschine zuzüglich Montage verwendet.

Zu den Material- und Fertigungskosten wurden die geschätzten Montagekosten je Maschinentyp hinzugerechnet, um die Herstellkosten für beide Maschinentypen zu ermitteln. Für die Montagekosten wurden vier Stunden für die 1-Zylinder-Maschine und fünf Stunden für die 2-Zylinder-Maschine veranschlagt. Die geschätzte Montagezeit beider Maschinen wurde mit einem Brutto-Stundenlohn von 35 € multipliziert, wodurch sich die Montagekosten je Maschine ergeben. Die Material- und Fertigungskosten bilden mit den Montagekosten die proportionalen Herstellkosten, welche rein stückzahlabhängig sind [4]. Von der Marge je verkaufter Maschine müssen anschließend die entstehenden Fixkosten abgezogen werden, um den Reingewinn je Maschine errechnen zu können. Da in diesem speziellen Fall durch die kontinuierliche Vermeidung von Werkzeugkosten sowie durch das akademische Umfeld keine Raum-, Energie- und Entwicklungskosten und damit keine Fixkosten entstanden sind, kann die Marge mit dem Gewinn gleichgesetzt werden.

Überträgt man die aktuelle Gewinnabschätzung für die Vorserienfertigung auf die geplanten Verkaufsvolumen der ersten drei Jahre nach Markteinführung, ergeben sich folgende erzielbare Gesamtgewinne:

Tabelle 15: Schätzung des erzielbaren Gesamtgewinns über die ersten drei Jahre				
	1-Zylinder		2-Zylinder	
Zeitraum	Volumen	Marge/Jahr	Volumen	Marge/Jahr
Jahr 1	50 Maschinen	237.550 €	100 Maschinen	742.700 €
Jahr 2	25 Maschinen	118.775 €	50 Maschinen	371.350 €
Jahr 3	25 Maschinen	118.775 €	50 Maschinen	371.350 €
Gesamt	100 Maschinen	475.100 €	200 Maschinen	1.485.400 €

Wichtig ist hierbei, dass die proportionalen Herstellkosten nur den aktuellen Entwicklungsstand vom 14.05.2024 darstellen. Beide Maschinen sind jedoch noch nicht reif für die Serienfertigung, sodass sich der Anteil der proportionalen Herstellkosten mit fortlaufender Entwicklung noch geringfügig erhöhen wird. So fehlen beispielsweise noch einige Teile wie die Brühgruppenabdeckung und die Bedienelemente. Des Weiteren wurden bei der Kalkulation die entstehenden Kosten für die Verrohrung der Hydraulik im Unterbau nicht berücksichtigt. Die verwendeten Preise für der Ermittlung der Material- und Fertigungskosten stellen den Angebotsstand vom Sommersemester 2023 dar und wurden noch nicht inflationsbereinigt.

6.6 Ableitung von Maßnahmen zur Kostenoptimierung für die Serienfertigung

Nach Abschluss der Entwicklung und der Kostenkalkulation der Vorserie wurden weitere Möglichkeiten zur Kostenoptimierung definiert. Dazu wurden zuerst die kostenintensivsten Bauteilen in beiden Maschinentypen identifiziert. Hierbei wurde zwischen stückzahlabhängigen und stückzahlunabhängigen Teilen unterschieden. Anschließend konnten Kosteneinsparungspotenziale erkannt und Maßnahmen zur Kostensenkung abgeleitet werden.

6.6.1 Möglichkeiten zur Kostenoptimierung stückzahlabhängiger Teilen

Die stückzahlabhängigen Teile sind hauptsächlich jene Teile, die speziell für das Projekt gefertigt werden und bei denen die Stückzahlen größeren Einfluss auf den Stückpreis haben:

Tabelle 16: Übersicht der teuersten stückzahlabhängigen Teile					
<i>Teile-Nr.</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Losgröße</i>	<i>Stückpreis</i>	<i>1-Zylinder Anzahl/Einheit</i>	<i>2-Zylinder Anzahl/Einheit</i>
11	Boilerboden (PVDF)	10	148,58 €	1	2
50	Brühsäule	10	118,74 €	1	2
40	Brühgruppeneinsatz (PVDF)	10	94,12 €	1	2
37	Siebträgeraufnahme	10	85,39 €	1	2
23	Auffangbehälter	10	77,00 €	1	2
2	Glasrohr D 160 mm	10	74,70 €	1	2
150	2Z-Bodenplatte	10	72,34 €	0	1
54	Verbindungsstück U	10	58,26 €	1	2
153	2Z-Sammelblock	10	54,13 €	0	1
147	Versteifungsring	10	53,62 €	1	2

Wie aus Tabelle 16 ersichtlich wird, befinden sich die Teile Boilerboden und Brühgruppeneinsatz auf dem ersten und dritten Platz, wenn diese aus technischem Kunststoff wie PVDF über das Zerspanen hergestellt werden. Die Herstellkosten beider Teile ließen sich, wie in Abschnitt 6.4.3 bereits beschrieben, deutlich senken, wenn sie aus lebensmittelzertifiziertem und temperaturbeständigen 3D-Druck-Filament über FLM-Druck gefertigt werden. Nimmt man die übrigen Kunststoff-Teile mit dazu, ließe sich ein großer Anteil der Gesamtherstellkosten beider Maschinentypen verringern. Dafür müsste jedoch eine eigene Fertigung mit FLM-Druckern aufgebaut werden, für welche Investitionskosten benötigt werden.

Im Zuge der Kostenoptimierung wurde eine Fertigungsplanung für die FLM-Druckteile unter der Prämisse durchgeführt, dass alle Kunststoff-Teile einer 1-Zylinder- oder 2-Zylinder-Maschine innerhalb eines Arbeitstages mit je acht Arbeitsstunden gefertigt werden können. Dazu wurden zunächst alle für FLM-Druck in Frage kommenden Bauteile identifiziert und die allgemeinen Druckparameter sowie Materialien festgelegt. Anschließend wurde über das Programm eines Druckerherstellers die individuelle Druckzeit jedes Teils und damit einhergehend die erforderliche Gesamtdruckzeit für alle Teile eines Maschinentyps definiert. Geschätzte Vor- und Nachbearbeitungszeiten wurden mit 15 Minuten je Teil pauschal geschätzt und zur Gesamtdruckzeit dazugerechnet. Übersteigt die Druckzeit eines Teils dabei acht Stunden, gilt der Drucker für den Arbeitstag als blockiert. Die komplette Vorgehensweise sowie detaillierte Angaben zur Kalkulation hierzu finden sich im Anhang A3.

Die Kalkulation ergab, dass rund 12 FLM-Drucker benötigt werden, um eine 1-Zylinder- oder 2-Zylinder-Maschine innerhalb eines Arbeitstages fertigen zu können. Mit drei weiteren Maschinen als Ersatz erhöht sich die Gesamtanzahl auf 15 Drucker. Veranschlagt man rund 1.000 € Anschaffungskosten je Drucker, ergeben sich rund 15.000 € Investitionskosten. Erforderliche Raumkosten werden hierbei nicht berücksichtigt.

So ließen sich auf diese Weise die Herstellkosten für beiden Maschinentypen deutlich verringern, wie am Beispiel der 2-Zylinder-Maschine aus Tabelle 17 ersichtlich wird:

Tabelle 17: Kosteneinsparungspotenzial mit additiver Fertigung						
Allgemein		2-Zylinder	Zerspanen		FLM-Druck	
<i>Teile-Nr.</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Anzahl/ Einheit</i>	<i>Stückpreis</i>	<i>Kosten/ Einheit</i>	<i>Stückpreis</i>	<i>Kosten/ Einheit</i>
5	Boilerdeckel	2	40,43 €	80,86 €	15,83 €	31,66 €
11	Boilerboden	2	148,58 €	297,16 €	25,30 €	50,60 €
23	Auffangbehälter	2	77,00 €	154,00 €	10,71 €	21,42 €
31	Tankdeckel	3	31,95 €	95,85 €	11,10 €	33,30 €

33	Tankboden	3	39,79 €	119,37 €	11,36 €	34,08 €
40	Brühgruppeneinsatz	2	94,12 €	188,24 €	13,47 €	26,94 €
45	Wasserverteiler	2	27,13 €	54,26 €	9,11 €	18,22 €
	Kosten			989,74 €		216,22 €

Werden die oben aufgeführten Kunststoff-Teile über den FLM-Druck anstelle über das Zerspanen hergestellt, ließen sich die Herstellkosten der 2-Zylinder-Maschine um 773,52 € je Einheit senken. Sofern gewährleistet ist, dass sich die Ausschussquote nicht erhöht, könnten bei kleineren Teilen wie den Tankböden und -deckeln auch mehrere Teile auf einem Drucker gleichzeitig gedruckt werden, was die Gesamtanzahl der benötigten Drucker und damit die erforderlichen Investitionskosten verringern würde.

Neben den Kunststoff-Teilen machen auch die Bauteile aus metallischen Werkstoffen wie die Brüksäule, die Siebträgeraufnahme oder die Blechteile einen großen Anteil der Herstellkosten aus. Da diese Teile für das Projekt in Fremdfertigung und in geringen Stückzahlen hergestellt werden, haben die Rüstkosten den größten Anteil am individuellen Stückpreis. Die Herstellkosten dieser Teile lassen sich daher ausschließlich über die Erhöhung der Stückzahlen senken. In Abbildung 12 sind die sinkenden Stückpreise bei steigender Stückzahl am Beispiel des Halteblechs für den Brühurm und der Siebträgeraufnahme visuell dargestellt. Das Diagramm wurde mit Daten aus den Preiskalkulatoren der Zulieferer erstellt, über welche die Blech- und Zerspanteile beider Maschinen bezogen werden sollen.

Die Teile Halteblech und Siebträgeraufnahme sind Gleichteile und werden in identischer Ausführung in der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine verbaut.

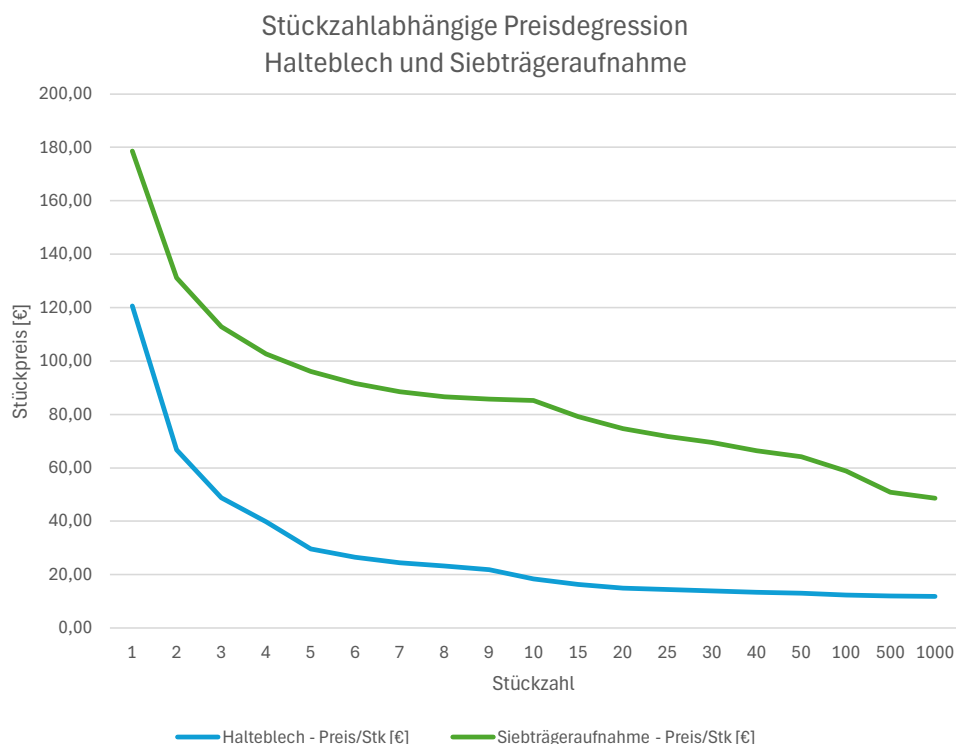


Abbildung 12: Preisdegression bei steigender Stückzahl am Beispiel Halteblech und Siebträgeraufnahme

In dem Diagramm in Abbildung 12 ist zu sehen, dass der individuelle Stückpreis für beide Teile zwischen den Stückzahlen 1 und 10 exponentiell sinkt. Bei Stückzahl 10 hat sich der Stückpreis der Siebträgeraufnahme mit 85,16 € im Gegensatz zu 178,65 € bei Stückzahl 1 beinahe halbiert, während

der Stückpreis des Halteblechs bei Stückzahl 10 mit 18,42 € nur noch ein Sechstel des ursprünglichen Stückpreises von 120,60 € bei Stückzahl 1 beträgt. Bis Stückzahl 100 sinkt der Stückpreis bei beiden Teilen kontinuierlich, wenn auch beim Halteblech nur geringfügig. Während bei der Siebträgeraufnahme der Stückpreis zwischen Stückzahl 100 und 1000 nochmal von 58,77 € auf 48,60 € sinkt, bleibt der Stückpreis des Halteblechs beinahe auf dem gleichen Niveau bei rund 12 €.

Es muss also eine Möglichkeit gefunden werden, die Stückzahlen beider Maschinen zu erhöhen, um den Effekt der stückzahlabhängigen Preisdegression maximal ausnutzen zu können. Dies lässt sich über eine gemeinsame Fertigung der Gleichteile zwischen 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine erreichen. Geht man davon aus, dass nach Anlauf der Serienfertigung in halbjährlichem Turnus 10 1-Zylinder-Maschinen und 25 2-Zylinder-Maschinen zusammen in Auftrag gegeben werden, erhöhen sich die Produktionszahlen der Gleichteile deutlich, was eine signifikante Vergünstigung der Stückpreise zur Folge hat.

Im Falle der oben genannten Serienfertigung erhöhen sich die Stückzahlen von Gleichteilen wie beispielsweise des Halteblechs und der Siebträgeraufnahme auf jeweils 60 Stück. Überträgt man diese Prämisse auf die restlichen Gleichteile beider Maschinentypen, sind **folgende** Einsparungen bei den Material- und Fertigungskosten möglich:

Tabelle 18: Einsparungspotenziale bei gemeinsamer Fertigung beider Maschinentypen			
	Losgröße 10 Kosten/Einheit	Serienfertigung Kosten/Einheit	Kosteneinsparung je Einheit
1-Zylinder-Maschine	3.074,23 €	2.698,32 €	375,91 €
2-Zylinder-Maschine	5.021,85 €	4.454,21 €	567,64 €

Durch den hohen Anteil an verbauten Gleichteilen von rund 80 % können die Herstellkosten beider Maschinentypen über die Serienfertigung deutlich verringert werden.

6.6.2 Möglichkeiten zur Kostenoptimierung stückzahlunabhängiger Teile

Die stückzahlunabhängigen Teile sind jene Teile, die aus dem Produktangebot von Zulieferern bezogen werden und bei denen die Abnahmemengen durch die vergleichsweise geringen Fertigungszahlen der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine wenig bis keinen Einfluss auf die Stückpreise haben:

Tabelle 19: Übersicht der teuersten stückzahlunabhängigen Teile					
Teile-Nr.	Bezeichnung	Losgröße	Stückpreis	1-Zylinder Anzahl/Einheit	2-Zylinder Anzahl/Einheit
97	Getriebepumpe	10	300,00 €	1	2
99	Leitfähigkeitssensor	10	212,95 €	1	1
22	Wasserwendel	10	125,00 €	1	2
98	Boiler-Drucksensor	10	91,73 €	1	1
20	Heizelement	10	76,41 €	1	2
66	Teelanze	10	55,00 €	1	1
102	Multifunktionsventil	10	52,48 €	1	2
88	Basisboard	10	48,72 €	1	1
100	Durchflusssensor	10	93,66 €	1	2
65	Dampfplanze	10	43,40 €	1	1

Da es sich bei den oben aufgeführten Bauteile um OEM-Teile aus den Produktkatalogen der Zulieferer handelt, die von den Herstellern nicht selbst an den Endkunden geliefert werden, sind die Möglichkeiten zur Kostenoptimierung beschränkt. Als Resultat des Manufakturbetriebs ergeben sich durch die geringen Fertigungszahlen nur wenig Spielräume für die Neuverhandlung von Preisen mit den jeweiligen Lieferanten. Des Weiteren haben die geringen Abnahmemengen nur wenig Einfluss auf die Stückpreise der Komponenten.

Daher kommen als Maßnahmen zur Kostenoptimierung nur die Recherche nach alternativen Lieferanten mit günstigeren Preisen oder die Eigenentwicklung von einzelnen kostenintensiven Bauteilen in Frage, was jedoch nicht zwangsweise in einer Vergünstigung des Stückpreises resultiert. Die Zulieferer haben sich oft auf ihr entsprechendes Marktsegment spezialisiert und damit eine gewisse Monopol-Stellung innerhalb des deutschen Marktes. Denkbar wäre das Ausweichen auf ausländische Lieferanten außerhalb von Deutschland und Europa, was wiederum lange Lieferzeiten und -wege, eine Verschlechterung der Kommunikation sowie das Risiko von Lieferengpässen und mangelnder Qualität zur Folge haben kann. Daher lassen sich diese Strategien zur Kostenoptimierung der stückzahlunabhängigen Teile nicht oder nur bedingt auf dieses Projekt und den Manufakturbetrieb generell anwenden.

Die beste Möglichkeit zur Kostenoptimierung ist in diesem Fall die Reduktion der Gesamtteilezahl. So ist beispielsweise der Leitfähigkeitssensor mit einem Stückpreis von 212,95 € eines der kostenintensivsten Zukaufteile. Der Leitfähigkeitssensor misst die Leitfähigkeit und damit den Verschmutzungs- und Verkalkungsgrad des Frischwassers. So soll verhindert werden, dass verschmutztes oder ungefiltertes Leitungswasser in die Maschine gelangt, welches Bauteile mit kleinen Durchlassöffnungen wie Ventilen durch den erhöhten Kalkgehalt innerhalb kürzester Zeit verstopfen würde. Der Leitfähigkeitssensor wird dazu verwendet, den Benutzer zu informieren, dass der Kalk- oder Verschmutzungsgrad des Bezugswassers zu hoch ist. Daraufhin wird der Weg in die Maschine versperrt.

Zur Kostenreduktion könnte man argumentieren, dass es sich hierbei um eine Premium-Funktion handelt, welche im Verkaufspreis entsprechend berücksichtigt werden muss. Gleichzeitig könnte man eine günstigere und im Funktionsumfang beschränkte Maschinenvariante ohne Leitfähigkeitssensor anbieten, bei der nur in der Betriebsanleitung auf die Notwendigkeit der Verwendung von gefiltertem Wasser hingewiesen wird. Der Verkalkungsgrad des Frischwassers wird in diesem Fall innerhalb der Maschine nicht zusätzlich kontrolliert und die Nutzung erfolgt auf eigene Verantwortlichkeit des Benutzers.

6.6.3 Weitere Möglichkeiten zur Kostenoptimierung

Neben den Möglichkeiten zur Kostenoptimierung der stückzahlunabhängigen und stückzahlunabhängigen Teile wird an dieser Stelle auf allgemeine Möglichkeiten zur Kostenoptimierung für die weitere Entwicklung eingegangen.

Zum jetzigen Stand sind die Abstände zwischen den Komponenten im Unterbau nicht einheitlich definiert, sodass sich die Längen der Rohrstücke zwischen den Komponenten um mehrere Millimeter unterscheiden können. Dies hat einen erheblichen Mehraufwand bei der Montage des Unterbaus zur Folge, da die Rohre in unterschiedlichen Längen geschnitten und anschließend an die richtige Stelle im Unterbau gesetzt werden müssen. Dazu müssen die unterschiedlichen Rohrstücke bei der Montage vermessen und markiert werden, da der Längenunterschied zwischen den Rohrstücken bei wenigen Millimetern nur schwer ersichtlich wird. Um die erforderliche Zeit und den Aufwand bei der Montage zu verringern, ist es vorteilhaft, die Länge der Rohrstücke und damit den Abstand zwischen den

Komponenten zu vereinheitlichen, sodass an möglichst vielen Stellen im Unterbau Rohrstücke von identischer Länge verbaut werden können.

Eine weitere Möglichkeit zur Kostenoptimierung ist die Verwendung von Rohren aus unterschiedlichen Materialien. Momentan sind für den gesamten Unterbau Rohre aus dem Kunststoff PFA mit einem Außendurchmesser von 6 mm vorgesehen. Die Rohre aus diesem Werkstoff sind steif, lebensmittelzertifiziert sowie laut Herstellerangaben bei einer Temperatur von 150 °C beständig bis zu einem Druck von 9,5 bar. Gleichzeitig sind die PFA-Rohre mit einem Preis von 1.122 € je 100 Meter vergleichsweise teuer. Der Lieferant bietet in seinem Produktkatalog auch Rohre aus dem Kunststoff FEP an. Der Preis von FEP-Rohren ist mit 774 € je 100 Meter die günstigere Alternative zu PFA-Rohren. Die FEP-Rohre lassen sich leichter biegen und sind ebenfalls lebensmittelzertifiziert, jedoch bei einer Temperatur von 150 °C nur beständig bis zu einem Druck von 2,5 bar. Dies schließt die Verwendung von FEP-Schläuchen in heißwasserführenden und druckbelasteten Leitungen innerhalb der Maschine aus.

Um die resultierenden Kosten für die Verrohrung zu verringern, wäre es sinnvoll, für die druckfreien und kaltwasserführenden Leitungen FEP-Rohre zu verwenden, und PFA-Rohre nur für die Heiß- und Mischwasserleitungen der Maschine einzusetzen. Durch die bessere Biegsamkeit der FEP-Rohre ließen sich gegebenenfalls auch Steckverbinder im Unterbau einsparen, was ebenfalls eine Kostenreduzierung zur Folge hat. Zur Minimierung der erforderlichen Steckverbinder im Unterbau kann es Sinn machen, nach einem externen Dienstleister zur Biegung der Rohre zu recherchieren. Da die Rohre aus Kunststoff bestehen, ließen sie sich mithilfe einer erhitzten Matrice dauerhaft in die benötigte Form bringen, sodass auch Ecken in der Leitungsführung ohne Steckverbinder realisiert werden können, was eine weitere Teilereduktion im Unterbau zur Folge hat.

Des Weiteren wurden für die Kostenkalkulation in Abschnitt 6.5 die Stückpreise von Verbindungselementen wie Schrauben, Muttern, Nieten und Stiften in der jeweilig benötigten Stückzahl angefragt. Sofern diese Teile während der Serienfertigung als Schüttgut in großen Anzahlen abgenommen, eingelagert und nach und nach für die Montage der Maschinen verwendet werden, anstatt für jede Maschine die wirklich benötigten Stückzahlen zu bestellen, lassen sich die Einkaufspreise dieser Verbindungselemente weiter reduzieren.

7 Zusammenfassung

Es lässt sich zusammenfassen, dass sich nicht alle in der Literatur vermittelten Strategien zur Kostenoptimierung ohne Weiteres auf den Manufakturbetrieb und die Fertigung in Kleinststückzahlen anwenden lassen. Die effektivsten Strategien für den Manufakturbetrieb sind die Reduktion der Gesamtteileanzahl, die Verwendung von möglichst vielen Gleichteilen und damit einhergehend die Erhöhung der Produktionsvolumen von stückzahlabhängigen Teilen. Die Baukastenkonstruktion kann bei mehrerer Produktvarianten das Variantenmanagement und die Montage deutlich erleichtern.

Zu Beginn des Projektes muss das im Manufakturbetrieb herzustellende Produkt in seinen Anforderungen und Funktionen sowie die angestrebte Marktplatzierung, das Produktionsvolumen und die Kostenstruktur eindeutig definiert sein. So sind eine gute Planung mit der Festlegung von allgemeinen Anforderungen sowie ein darauf ausgerichtetes Projektmanagement ab Projektstart unerlässlich für den Erfolg. Bei der Entwicklung müssen wirtschaftliche Faktoren in die Entscheidungsfindung mit einfließen, da sich die einzigen Möglichkeiten für Kostenoptimierungen im Manufakturbetrieb während der Entwicklung bieten. Bei der Auswahl der Materialien und Fertigungsmethoden muss auf die kontinuierliche Vermeidung von Werkzeugkosten geachtet werden. Bei fehlenden Fertigungskapazitäten zu Beginn des Projekts ist die Fremdfertigung der Eigenfertigung vorzuziehen. Dies hat eine hohe Abhängigkeit von Lieferanten zur Folge. Bei Zukaufteilen besteht durch den Manufakturbetrieb nur geringer Verhandlungsspielraum wegen der geringen Stückzahlen. Kostenoptimierungen sind dadurch nur für stückzahlabhängige Teile über höhere Produktionszahlen und damit einhergehend über stückzahlabhängige Preisdegression möglich. Kostenoptimierungen auf Bauteilebene wie beispielsweise die Reduzierung des Materialverbrauch über die Auswahl geeigneter Halbzeuge hat bei der Fremdfertigung dagegen eher geringen Einfluss auf die Herstellkosten. Die additive Fertigung bildet im Falle des Manufakturbetriebs eine gute Alternative zu konventionellen Fertigungsmethoden, mit der sich eine eigene Fertigung mit geringen Investitionskosten aufbauen lässt. Infolgedessen lassen sich die Herstellkosten jedoch deutlich reduzieren.

Mithilfe der oben genannten Strategien zur Kostenoptimierung war es möglich, die Entwicklung weitestgehend abzuschließen und dabei die geplanten Herstellkosten von 4.000 € für die 1-Zylinder-Maschine und 7.000 € für die 2-Zylinder-Maschine deutlich zu unterschreiten, sodass sich ausreichend Spielraum für die restliche Entwicklung ergibt. Gleichzeitig wurde durch die kontinuierliche Vermeidung von Werkzeugkosten erreicht, dass nur minimale Investitionskosten erforderlich sind, um die Serienfertigung anlaufen zu lassen. Die zum jetzigen Stand erforderlichen Investitionskosten belaufen sich auf 1.600 € für den Werkzeugbau der Wasserwendel, die nicht anderweitig gefertigt werden konnte. Sollte sich der FLM-Druck als geeignete Alternative für die Fertigung der Kunststoff-Teile erweisen, werden weitere 15.000 € für die Anschaffung der erforderlichen Drucker zum Aufbau einer eigenen Produktion benötigt. Die Kosten für die noch ausstehende Finalisierung der Elektronik werden auf rund 35.000 € geschätzt, wenn diese von einem externen Dienstleister durchgeführt wird. Damit ergeben sich geschätzte 51.600 € Investitionskosten für den Anlauf der Serienfertigung.

Es muss jedoch erwähnt werden, dass sich die Rahmenbedingungen dieses Projekts durch das akademische Umfeld nicht unverändert auf jedes Projekt im Manufakturbetrieb übertragen lassen. So ergeben sich durch das akademische Umfeld spezifische Vor- und Nachteile gegenüber Projekten in der Privatwirtschaft. Vorteile des akademischen Umfeldes sind die Möglichkeit zur Vermeidung von projektspezifischen Fixkosten für Raumnutzung, Energie und Gerätschaften sowie die kostenlose Entwicklungsleistung, welche durch die studentischen Projekt- und Abschlussarbeiten gegeben ist. In der Privatwirtschaft wären die projektspezifischen Fixkosten und damit auch die erforderlichen Investitionskosten deutlich höher als es in diesem Projekt der Fall war.

Die Nachteile des akademischen Umfelds sind die hohe Personalfuktuation und damit einhergehend der erschwerte Wissensaustausch innerhalb des Projektes, welche sich durch die semesterbasierte

Arbeitsweise ergeben. Dies hat teilweise hohe Einarbeitungszeiten und schlechte Dokumentationsqualität zur Folge. Auch die teilweise langen Bestellwege und Lieferzeiten innerhalb des akademischen Umfelds wirken sich nachteilig auf den Projektfortschritt aus, sodass es eher zu Verzögerungen kommt. Auch darum ist ein gutes Projektmanagement im akademischen Umfeld ausschlaggebend für den Erfolg eines solchen Projekts.

8 Ausblick

Die Entwicklung und Konstruktion der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine ist weitestgehend abgeschlossen. Im kommenden Semester soll die Brühgruppenabdeckung zur Aufnahme des Displays sowie die Bedienknöpfe für die Lanzen konstruiert werden. Außerdem müssen die Maße sowie die Fertigung der Tankdeckel-Dichtungen definiert werden.

Für die 1-Zylinder-Maschine erfolgt momentan der Prototypenbau, in dem die generelle Funktionalität der Maschine sowie die Montierbarkeit und das Teilenummernkonzept verifiziert werden sollen. Dabei wird eine Montageanleitung für die 1-Zylinder-Maschine erarbeitet. Nach dem Sommersemester 2024 soll der Glasboiler erstmals in Betrieb genommen werden, sodass das Sprudeln des Wassers beobachtet werden kann.

In den kommenden Semestern muss die Elektronik für beide Maschinen final entwickelt werden. Dies soll entweder in Zusammenarbeit mit studentischen Projekt- und Abschlussarbeiten aus der Fakultät 04 für Elektrotechnik oder über einen externen Dienstleister realisiert werden.

Im weiteren Entwicklungsverlauf sollen wenn möglich die Empfehlungen zur Kostenoptimierung aus diesem Bericht umgesetzt und zusammen mit den konstruktiven Änderungen während des Prototypenbaus der 2-Zylinder-Maschine getestet werden. Es muss verifiziert werden, ob sich der FLM-Druck für die Fertigung der Bauteile aus technischem Kunststoff eignet. Sobald dies gewährleistet ist, kann eine eigene Produktion mit FLM-Druckern aufgebaut werden. Des Weiteren sollen die Rohrlängen im Unterbau vereinheitlicht werden.

Sobald der Prototypenbau der 2-Zylinder-Maschine erfolgreich durchgeführt wurde und die Funktionalität beider Maschinen gewährleistet ist, kann mit der Vorserienfertigung der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine fortgefahren werden.

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der empfohlenen Extraktionsparameter für Espressomaschinen in der Fachliteratur

Tabelle 2: Kostenstruktur der 1-Zylinder-Maschine

Tabelle 3: Kostenstruktur der 2-Zylinder-Maschine

Tabelle 4: Allgemeine Anforderungen an die Entwicklung und Konstruktion

Tabelle 5: Kostenvergleich des Boiler-Verspannsystems für Losgröße 3

Tabelle 6: Kostenvergleich für das Konzept der Boilerbodenplatte

Tabelle 7: Kostenvergleich der Blechkonstruktion für den Unterbau der 2-Zylinder-Maschine

Tabelle 8: Vergleich des alten und neuen Standes vom Unterbau der 1-Zylinder-Maschine

Tabelle 9: Kostenvergleich der Steckverbinder

Tabelle 10: Übersicht der Gleichteile zwischen 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine

Tabelle 11: Kostenvergleich der Fertigung für den Kunststoffkern der Brühgruppe

Tabelle 12: Kalkulation der Herstellkosten der FLM-Druck-Teile

Tabelle 13: Gegenüberstellung der Material- und Fertigungskosten nach Maschinentyp

Tabelle 14: Abschätzung der erzielbaren Margen je Maschinentyp

Tabelle 15: Schätzung des erzielbaren Gesamtgewinns über die ersten drei Jahre

Tabelle 16: Übersicht der teuersten stückzahlabhängigen Teile

Tabelle 17: Kosteneinsparungspotenzial mit additiver Fertigung

Tabelle 18: Einsparungspotenziale bei gemeinsamer Fertigung beider Maschinentypen

Tabelle 19: Übersicht der teuersten stückzahlunabhängigen Teile

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzeptrendering der 1-Zylinder-Glasboilermaschine, Stand Mai 2023

Abbildung 2: CAD-Modell der 1-Zylinder-Maschine, Stand November 2023

Abbildung 3: Übersicht von Variante 1 und 2 des Boiler-Verspannsystems

Abbildung 4: Übersicht von Variante 1 und 2 zur Anbindung von Bodenplatte und Boiler

Abbildung 5: Übersicht von Variante 1 und 2 der Blechkonstruktion des Unterbaus der 2-Zylinder-Maschine

Abbildung 6: Übersicht von unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten der Steckverbinder

Abbildung 7: Übersicht der baugleichen Komponenten im Unterbau der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine

Abbildung 8: Untenansicht des Unterbaus der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine mit den identischen Komponenten Getriebepumpe (rot), Mischer (gelb), Multifunktionsventil (grün) und Kaltwasserstrang (blau)

Abbildung 9: CAD-Modelle der 1-Zylinder- und 2-Zylinder-Maschine, Stand Mai 2024

Abbildung 10: Übersicht der identischen Baugruppen beider Maschinentypen auf der Bodenplatte

Abbildung 11: Variante 1 und 2 der Teile Wasserverteiler und Brühgruppeneinsatz

Abbildung 12: Preisdegression bei steigender Stückzahl am Beispiel Halteblech und Siebträgeraufnahme

11 Literaturverzeichnis

- [1] „Manufaktur“ auf Duden online: Onlinequelle
URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Manufaktur> (Abrufdatum: 23.05.2024)
- [2] Maßstäbe des Vereins Deutschen Manufakturen e.V.: Onlinequelle
URL: <https://www.deutsche-manufakturen.com/de/initiative/about/> (Abrufdatum: 23.05.2024)
- [3] Mörtl, M., Schmied, C.: Design for Cost - A Review of Methods, Tools and Research Directions. *Journal of the Indian Institute of Science*. 95 (4), 379-404 (2015)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [123]
- [4] Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U., and Mörtl, M.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. *Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 8. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2020)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [124]
- [5] Corrochano, B. R.: Advancing the Engineering Understanding of Coffee Extraction. Dissertation an der University of Birmingham (2015)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [125]
- [6] Parenti, A., Guerrini, L., Masella, P., Spinelli, S., Calamai, L., and Spugnoli, P.: Comparison of espresso coffee brewing techniques. *Journal of Food Engineering*, 121, 112–117. doi:10.1016/j.jfoodeng.2013.08.031 (2014)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [126]
- [7] Romani, S., Severini, C., Fiore, A. G., and Pinnavaia, G.: Quality of “Espresso” coffee: a study performed through Italian coffee shops. In ASIC (Ed.), *20th International Conference on Coffee Science* (pp. 521–525). Bangalore, India. (2004)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [127]
- [8] Andueza, S., De Peña, M. P., and Cid, C.: Chemical and sensorial characteristics of Espresso coffee as affected by grinding and torrefacto roast. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(24), 7034–9. doi:10.1021/jf034628f (2003)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [128]
- [9] Caporaso, N., Genovese, A., Canela, M. D., Civitella, A., and Sacchi, R.: Neapolitan coffee brew chemical analysis in comparison to espresso, moka and American brews. *Food Research International*, 61, 152–160. doi:10.1016/j.foodres.2014.01.020 (2014).
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [129]
- [10] Petracco, M.: Beverage preparation: brewing trends for the new millennium. In: Clarke, R., Vitzthum, O. (Eds.), *Coffee: Recent Developments*. Blackwell Science, Oxford. (2001)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [130]
- [11] Mestdagh, F., Glabasnia, A., and Giuliano, P.: Chapter 15 - The Brew-Extracting for excellence. *The craft and science of coffee*, Academic Press, pp. 355-380. doi:10.1016/B978-0-12-803520-7.00015-3. (2017)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [131]
- [12] Rohnen, A.: Druck in der Espressomaschine. Onlinequelle. URL: http://www.institut-fuer-kaffeetechnologie.de/Wiki/index.php?title=Druck_in_der_Espressomaschine (Abrufdatum: 30.05.2024)

- [13] Rohnen, A.: Leitfragen Sprunginnovationen - Reduzierung des Energiebedarfs einer Siebträger-Espressomaschine, eingereicht bei der Bundesagentur für Sprunginnovationen SPRIND. (2020)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [132]
- [14] Kistler, F.: Business Case Glasboiler-Maschine, Institut für Kaffeetechnologie (2022)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [63]
- [15] Kistler, F.: Konzeptbeschreibung 2-Zylinder-Maschine, Institut für Kaffeetechnologie (2023)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [115]
- [16] Kistler, F.: Hydraulikplan Style 2-Zylinder. Onlinequelle.
URL: http://www.institut-fuer-kaffeetechnologie.de/Wiki/index.php?title=Hydraulikplan_Style_2-Zylinder (Abrufdatum: 30.05.2024)
- [17] Rohnen, A.: Elektronik-Konzept, Institut für Kaffeetechnologie (2023)
Quellenverweis im Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie: [104]
- [18] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFAS). Onlinequelle.
URL: <https://www.bmu.de/faq/per-und-polyfluorierte-chemikalien-pfas> (Abrufdatum: 30.05.2024)

Literaturverzeichnis des Instituts für Kaffeetechnologie

URL:

http://www.institut-fuer-kaffeetechnologie.de/Wiki/index.php?title=Technische_Beeinflussbarkeit_der_Geschmacksache_Kaffee:Literatur

A Anhang

A1 Factsheet der 2-Zylinder-Maschine

An dieser Stelle sind die wichtigsten Eigenschaften und Funktionen der 2-Zylinder-Maschine in einem Factsheet zusammengefasst:

Factsheet 2-Zylinder-Maschine	
Globale Maße	716,5 x 520 x 92,5 mm
Boiler	Verfügt über zwei Borosilikat-Glasboiler mit je 2,4 Liter Innenvolumen, davon 1,6 Liter Wasservolumen bei 1300 mbar Betriebsdruck
Wasserversorgung	Erfolgt über drei Borosilikat-Glastanks mit je 1,2 Liter Innenvolumen in Kombination mit Festwasseranschluss
Brühgruppe	Verfügt über eine Brühgruppe mit Kunststoffkern und E61 kompatibellem Siebträger je Zylinder
Dampf- und Teewasserbezug	Erfolgt über je eine Dampf- und Teelanze mit Cold-Touch-Funktion
Heizleistung	Verfügt über ein leistungsgeregeltes Heizelement mit 1000 W Heizleistung je Boiler
Pumpe	Verfügt über eine drehzahlgeregelte Getriebepumpe je Brühgruppe. Eine Versorgungsspannung von 0,3 – 5 V resultiert in 300 bis 5000 Umdrehungen pro Minute bei einer Fördermenge von 0,3 ml je Umdrehung
User-Interface	<p>LCD-Display zur Statusanzeige und zur generellen Bedienung der Grundfunktionen</p> <ul style="list-style-type: none"> - 4 x Presets für Kaffeerezepte - 1 x Kaffeebezug mit manueller E61-Preinfusion - 1 x Flush-Funktion <p>Zwei Druck/Drehknöpfe zur Bedienung der Lanzen, davon</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 x Dampfbezug mit Soft-Open-Funktion - 1 x Teewasserbezug mit Temperatureinstellung <p>Federbelasteter Hebel mit Potentiometer zur Regelung des Volumenstroms der Pumpe (optional)</p>
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> • Beliebige Einstellung der Misch- und Teewassertemperatur • Beliebige Einstellung der Durchflussrate • Maximale Energieeffizienz durch vollumfängliche Isolierung an warmwasserführenden Bauteilen und damit einhergehend geringe Aufheizzeiten • Regelkreis zur Aufhebung der Wasserschichtung im Boiler während des Aufheizens • Automatische Füllstandsdetektion in Boiler und Tanks • Automatische Druckerfassung in Boiler und Brühgruppe • Überprüfung von Qualität und Verschmutzungsgrad des Bezugswassers über Leitwertsensor • Automatisierte Rückspül-Reinigung der Brühgruppe • Bereitstellung mehrerer Bezugsprofile von renommierten Maschinentypen über Kaffee-Presets • Möglichkeit zur Erstellung und Speicherung eigener Bezugsprofile

A2 Toleranzanalyse und Berechnung der möglichen Temperaturdifferenzen

Toleranzanalyse der Glasrohre des Boilers mit der Berechnung der sich dadurch ergebenden Temperaturdifferenzen zwischen beiden Boilern der 2-Zylinder-Maschine:

Toleranzanalyse

Berechnung des minimalen und maximalen Innendurchmessers des inneren Glaszylinders

$D_{innen} := 105 \text{ mm}$	Innendurchmesser
$D_{außen} := 115 \text{ mm}$	Innendurchmesser
$t_{Rundheit} := D_{außen} \cdot 0.007 = 0.805 \text{ mm}$	Rundheitstoleranz (7%)
$t_{Daußen} := 1.5 \text{ mm}$	Toleranz des Außendurchmessers
$d := 5 \text{ mm}$	Wandstärke
$t_d := 0.5 \text{ mm}$	Toleranz der Wandstärke

Berechnung des minimalen Durchmessers

$$D_{min} := D_{außen} - t_{Daußen} - 2 \cdot (d + t_d) - t_{Rundheit} = 101.695 \text{ mm}$$

Berechnung des maximalen Durchmessers

$$D_{max} := D_{innen} + t_{Daußen} + t_{Rundheit} = 107.305 \text{ mm}$$

Volumenberechnung

Berechnung der Füllvolumen

$H_{innen} := 270 \text{ mm}$	Höhe des inneren Glaszylinders
$H_{Füllstand} := H_{innen} \cdot \frac{2}{3} = 180 \text{ mm}$	Höhe des Idealfüllstands
$V_{Nenn} := \left(\frac{D_{innen}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot H_{Füllstand} = 1.559 \text{ l}$	Füllvolumen mit Nennmaßen
$V_{min} := \left(\frac{D_{min}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot H_{Füllstand} = 1.462 \text{ l}$	Füllvolumen mit Minimalmaßen
$V_{max} := \left(\frac{D_{max}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot H_{Füllstand} = 1.628 \text{ l}$	Füllvolumen mit Maximalmaßen

Berechnung der entstehenden Temperaturdifferenzen

1. Berechnung der Aufheizzeit mit Nennmaßen

$$c_{Wasser} := 4190 \frac{W \cdot s}{kg \cdot K}$$

Wärmekapazität Wasser

$$m_{Nenn} := 1.559 \text{ kg}$$

Wassermasse mit Nennmaßen

$$T_{Wasser} := 400 \text{ K}$$

Wasserzieltemperatur

$$T_{Umgebung} := 290 \text{ K}$$

Wasserausgangstemperatur

$$\Delta T_{Nenn} := T_{Wasser} - T_{Umgebung}$$

$$Q_{Nenn} := c_{Wasser} \cdot m_{Nenn} \cdot \Delta T_{Nenn} = (7.185 \cdot 10^5) \text{ J}$$

$$P_{Nenn} := 1000 \text{ W}$$

$$t_{Aufh} := \frac{Q_{Nenn}}{P_{Nenn}} = 718.543 \text{ s}$$

Aufheizzeit mit Nennwerten

2. Berechnung des Temperaturunterschieds mit minimalen Toleranzen und maximaler Heizleistung

$$m_{min} := 1.462 \text{ kg}$$

Wassermasse mit Minimalmaßen

$$P_{max} := P_{Nenn} \cdot 1.05 = (1.05 \cdot 10^3) \text{ W}$$

Maximale Heizleistung (+5%)

$$Q_{max} := P_{max} \cdot t_{Aufh} = (7.545 \cdot 10^5) \text{ J}$$

$$\Delta T_{min} := \frac{Q_{max}}{(c_{Wasser} \cdot m_{min})} = 123.163 \text{ K}$$

$$\Delta T_1 := \Delta T_{Nenn} - \Delta T_{min} = -13.163 \text{ K}$$

3. Berechnung des Temperaturunterschieds mit maximalen Toleranzen und minimaler Heizleistung

$$m_{max} := 1.628 \text{ kg}$$

Wassermasse mit Maximalmaßen

$$P_{min} := P_{Nenn} \cdot 0.9 = 900 \text{ W}$$

Minimale Heizleistung (-10%)

$$Q_{min} := P_{min} \cdot t_{Aufh} = (6.467 \cdot 10^5) \text{ J}$$

$$\Delta T_{max} := \frac{Q_{min}}{(c_{Wasser} \cdot m_{max})} = 94.804 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 := \Delta T_{Nenn} - \Delta T_{max} = 15.196 \text{ K}$$

A3 Produktionsplanung und Kalkulation der Herstellkosten für FLM-Druckteile

Definierte Druckparameter für die Kalkulation:

FLM-Druckteile												
Teile-Nr.	Bauteil	Anzahl	Material	Filament-Ø [mm]	Materialpreis/kg [€]	Schichthöhe [mm]	Infill [%]	Drucker	Druckdüsen-Ø [mm]	Stützstruktur	Drucktemperatur [°C]	Leistungsaufnahme [W]
5	Boilerdeckel	1	Green-TEC Pro	1,75	48,21	0,1	100	Prusa MK4	0,4	Kein	220	150
11	Boilerboden	1	Green-TEC Pro	1,75	48,21	0,1	100	Prusa MK4	0,4	Nur auf Druckbett	220	150
23	Auffangbehälter	1	Prusament PLA	1,75	24,29	0,1	15	Prusa MK4	0,4	Nur auf Druckbett	215	80
31	Tankdeckel	2	Green-TEC Pro	1,75	48,21	0,1	15	Prusa MK4	0,4	Kein	220	150
33	Tankboden	2	Green-TEC Pro	1,75	48,21	0,1	15	Prusa MK4	0,4	Kein	220	150
40	Bruehgruppeneinsatz	1	Green-TEC Pro	1,75	48,21	0,1	100	Prusa MK4	0,4	Kein	220	150
45	Wasserverteiler	1	Green-TEC Pro	1,75	48,21	0,1	100	Prusa MK4	0,4	Kein	220	150

Resultierende Druckzeiten und Kosten für Material und Fertigung je Teil:

Teile-Nr.	Material/Teil	Materialkosten/Teil	Druckzeit/Teil	Druckzeit/Teil	Druckzeit/Teil	Leistungsaufnahme	Energiepreis	Fertigungskosten/Teil	Nachbearbeitungszeit/Teil	Lohnkosten/h	Lohnkosten/Teil
	[g]	[€]		[min]	[h]	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[h]	[€]	[€]
5	134,50	6,48	11 h 22 m	682	11,37	1,71	0,35	0,60	0,25	35,00	8,75
11	311,11	15,00	1 d 5 h 37 m	1.777	29,62	4,44	0,35	1,55	0,25	35,00	8,75
23	71,08	1,73	8 h 17 m	497	8,28	0,66	0,35	0,23	0,25	35,00	8,75
31	43,71	2,11	4 h 36 m	276	4,60	0,69	0,35	0,24	0,25	35,00	8,75
33	48,50	2,34	5 h 9 m	309	5,15	0,77	0,35	0,27	0,25	35,00	8,75
40	87,45	4,22	9 h 32 m	572	9,53	1,43	0,35	0,50	0,25	35,00	8,75
45	6,42	0,31	55 m	55	0,92	0,14	0,35	0,05	0,25	35,00	8,75

Resultierende Gesamt-Druckzeiten und Gesamtkosten für Material und Fertigung einer 2-Zylinder-Maschine:

Teile-Nr.	Druckzeit Gesamt [min]	Druckzeit Gesamt [h]	Materialkosten Gesamt [€]	Fertigungskosten Gesamt [€]	Lohnkosten Gesamt [€]
5	1364	22,73	12,97	1,19	17,50
11	3554	59,23	30,00	3,11	17,50
23	994	16,57	3,45	0,46	17,50
31	828	13,80	6,32	0,72	26,25
33	927	15,45	7,01	0,81	26,25
40	1144	19,07	8,43	1,00	17,50
45	110	1,83	0,62	0,10	17,50
	8921	148,68	68,81	7,40	140,00

Resultierende Herstellkosten je Teil:

FLM-Druckteile					
Teile-Nr.	Bauteil	Materialkosten/Teil [€]	Fertigungskosten/Teil [€]	Lohnkosten/Teil [€]	Herstellkosten/Teil [€]
5	Boilerdeckel	6,48	0,60	8,75	15,83
11	Boilerboden	15,00	1,55	8,75	25,30
23	Auffangbehälter	1,73	0,23	8,75	10,71
31	Tankdeckel	2,11	0,24	8,75	11,10
33	Tankboden	2,34	0,27	8,75	11,36
40	Bruehgruppeneinsatz	4,22	0,50	8,75	13,47
45	Wasserverteiler	0,31	0,05	8,75	9,11
Materialkosten = Filamentpreis / Filamentgewicht (g) * Modellgewicht (g) + Ausschussrate [%]					
Fertigungskosten = Verbrauchte Energie (kWh) * Energiekosten (€/kWh)					
Umrechnung von W in kWh = ((Durchschn. Leistungsaufnahme (W)) * (Druckzeit (h)))/1000					
Lohnkosten = Zeit für Vor- und Nachbearbeitung in (h) * Stundenlohn (€)					