

Projektarbeit (FA 137)

Simulationsmodell einer Siebträger Kaffeemaschine

Betreuender Dozent: Herr Rohnen

Betreuer in der Kaffeewerkstatt München: Erich Weidler

Name	Studiengang	Matrikel-Nr.	Email-Adresse	Unterschrift
Kretzschmar Matthias				
Bauske Joshua				
Binder Christoph				

Kurzfassung/Abstract

Die vorliegende Projektarbeit befasst sich mit der Überführung thermodynamischer Vorgänge einer Siebträger Espressomaschine wie dem Aufheizverhalten der Boiler, den Wärmeverlusten im gesamten System und der Wärmeleitung bzw. Wärmestrahlung, in ein Simulink-Modell. Zudem wird auf die Wärmeschichtung der Boiler eingegangen. Als Vorlage über die Entwicklung und Konstruktion der Boiler und der gesamten Espressomaschine dient die Bachelorarbeit von Herrn Kilian Stach „Entwicklung einer labortechnischen Mehrkreis- und Mehrkessel-Espressomaschine“. Ziel ist es mit Hilfe dieser neuen Erkenntnisse eine vollständig geregelte Espressomaschine zu entwerfen.

The present project work deals with the transfer of thermodynamic processes of a portafilter espresso machine such as the heating behavior of the boilers, the heat losses in the entire system and the heat conduction or heat radiation in a Simulink model. In addition, the heat lamination of the boiler is discussed. As a template for the development and construction of the boilers and the entire espresso machine, the bachelor thesis of Mr. Kilian Stach "Development of a laboratory multi-circuit and multi-boiler espresso machine". The goal is to use these new findings to design a fully-regulated espresso machine.

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	[m ²]	Rohrinnenquerschnitt
c _p	[J/kg*K]	Spezifische Wärmekapazität
c _w	[J/kg*K]	Spezifische Wärmekapazität des Wassers
c _b	[J/kg*K]	Spezifische Wärmekapazität des Boilers
c _{PMessing}	[J/kg*K]	Spezifische Wärmekapazität der Brühgruppe
I	[A]	Strom
K _{PS}	[-]	Verstärkungsfaktor
L	[m]	Länge
m	[kg]	Masse
m _w	[kg]	Masse des Wassers
m _B	[kg]	Masse des Boilers
Q	[J]	Wärmemenge
Q _{ges}	[J]	Gesamte Wärmemenge
Q _w	[J]	Wärmemenge im Wasser
Q _B	[J]	Wärmemenge im Boiler
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
\dot{Q}_{ges}	[J]	Gesamter Wärmestrom
\dot{Q}_w	[J]	Wärmestrom des Wassers
\dot{Q}_B	[J]	Wärmestrom des Boilers
R _{th}	[K/W]	Thermischer Widerstand
T ₁	[-]	Zeitkonstante der Regelstrecke
T _{1R}	[-]	Zeitkonstante des Reglers
t	[s]	Zeit
α	[W/m ² *K]	Wärmeübergangskoeffizient
ϑ ₁	[°C]	Temperatur zum Zeitpunkt 1
ϑ ₂	[°C]	Temperatur zum Zeitpunkt 2
ϑ _{1B}	[°C]	Boiler Starttemperatur
ϑ _{2B}	[°C]	Boilertemperatur beim Abschalten des Heizelements:
ϑ _{3B}	[°C]	Boilertemperatur beim Ende der Messung
ϑ _{4B}	[°C]	Boilertemperatur zum Zeitpunkt ,4‘

ϑ_{5B}	[°C]	Boilertemperatur zum Zeitpunkt ,5‘
ϑ_{1w}	[°C]	Wasser Starttemperatur:
ϑ_{2w}	[°C]	Wassertemperatur beim Abschalten des Heizelements:
ϑ_{3w}	[°C]	Wassertemperatur beim Ende der Messung
ϑ_{4w}	[°C]	Wassertemperatur zum Zeitpunkt ,4‘
ϑ_{5w}	[°C]	Wassertemperatur zum Zeitpunkt ,5‘
ϑ_i	[°C]	Temperatur Innen
ϑ_a	[°C]	Temperatur Außen
ϑ_o	[°C]	Raumtemperatur
λ	[W/m*K]	Wärmeleitfähigkeit
ρ	[kg/m ³]	Dichte

Stoffwerte

Stoffgröße	Stoffwert	Einheit
Wärmekapazität Wasser	4186	J/kg*K
Wärmekapazität Stahl	500	J/kg*K
Wärmekapazität PTFE Rohre	0,96	J/kg*K
Wärmekapazität Messing	377	J/kg*K
Dichte Wasser	1000	kg/m ³
Dichte Stahl	8000	kg/m ³
Dichte PTFE	2,16	g/cm ³

Inhalt

Kurzfassung/Abstract	2
Abkürzungsverzeichnis	3
Stoffwerte.....	4
1. Einleitung.....	7
2. Aufbau Siebträgermaschine	7
3. Projektplanung	10
4. Thermodynamik	10
4.1. Definition Wärmeleitung (Konduktion).....	11
4.2. Definition Wärmeströmung (Konvektion).....	11
4.3. Definition Wärmestrahlung.....	11
4.4. Thermodynamische Einflüsse.....	11
4.4.1. Beachtete Einflüsse	12
4.4.2. Nicht beachtete Einflüsse.....	12
5. Versuch mit den realen Boilern.....	13
5.1. Versuchsziel	13
5.2. Versuchsaufbau	13
5.3. Versuchsdurchführung	16
5.4. Versuchsauswertung	17
5.4.1. Graphische Veranschaulichung und Interpretation der Messergebnisse	17
5.4.2. Berechnung von R_{th}	18
5.4.2.1. Allgemeines	18
5.4.2.2. Aufheizung.....	19
5.4.2.3. Abkühlung.....	20
6. Problematik der thermischen Schichtung	21
6.1. Konzepte zur Unterbindung	21
6.1.1. Kaffeeboiler nacheinander durchspülen	22
6.1.2. Kaffeeboiler und Vorwärmboiler gleichzeitig erhitzen	22
6.1.3. Kaffeeboiler über Betriebstemperatur heizen	24
6.2. Bewertung der Konzepte.....	24
6.2.1. Kaffeeboiler für den Teewasserbezug.....	25
7. Berechnung der Aufheizzeit der Brühgruppe.....	25
8. Simulink Modell.....	27
8.1. Einführung	27
8.2. Regelstrecke	27
8.3.1. Zweipunktregler	31

8.3.2. PID-Regler	31
8.3.2.1. Aufbau des PID-Reglers	31
8.3.2.2. Auslegung des PID-Reglers	32
8.3. Thermometer	33
8.4. Espresso Bezug	34
8.5. Simulink Gesamtsystem	35
8.6. Ergebnisse der Simulation	35
8.6.2. Aufheizzeit	35
9. Fazit	39
10. Literaturverzeichnis	40
11. Abbildungsverzeichnis	40
12. Tabellenverzeichnis	41

1. Einleitung

Auf dem Markt gibt es eine Vielzahl an Siebträger Espressomaschinen in unterschiedlichsten Ausführungen und Preisklassen zu kaufen. Eine Analyse verschiedener Maschinen hat gezeigt, dass selbst renommierte Hersteller der gezielten Beeinflussung der geschmacksrelevanten Größen Wassertemperatur und Durchflussgeschwindigkeit zu wenig Bedeutung widmen. Vor diesem Hintergrund entstand am Maschinendynamischen Labor der Hochschule München der Ansporn eine Labortechnische Espressomaschine zu entwickeln, die es erlaubt technisch relevante Größen an wichtigen Komponenten der Maschine zu bestimmen und durch Veränderung dieser Rückschlüsse auf die Geschmacksentwicklung ziehen zu können.

Im Rahmen einer vorangegangenen Bachelorarbeit ist in Kooperation mit der Kaffeewerkstatt München bereits ein Prototyp der Maschine entwickelt worden. Als nächster Schritt im Entwicklungsprozess entsteht nun im Rahmen dieser Arbeit ein Simulationsmodell für diesen Prototyp.

Um einen allgemeine Überblick über die Siebträger-Kaffeemaschine zu erhalten, wird zuerst der prinzipielle Aufbau dargestellt. Das darauffolgende Kapitel geht kurz auf die Projektplanung ein, wodurch man eine genauere Gesamtübersicht über das Projekt erhält.

Anschließend werden die thermodynamischen Zusammenhänge in der Kaffeemaschine dargestellt, wobei als erstes einige grundlegende Sachen erklärt werden, bevor es später zur Berechnung der einzelnen Systeme kommt.

Abschließend findet die Überführung der physikalischen Gleichung in ein MATLAB-Simulink-Modell statt.

2. Aufbau Siebträgermaschine

Die Labortechnische Siebträger Espressomaschine setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Der in Abbildung 1 dargestellte hydraulische Schaltplan gibt eine gute Übersicht über die einzelnen Bauteile.

Zur Wasserversorgung dient ein Festwasseranschluss. Ein Filtersystem mit Kohlestoffaktiv-Filterung, welches Unreinheiten im Wasser entfernt, ist zwischen Pumpe und Wasseranschluss geschaltet. Eine Rotationspumpe, die von einem Asynchronmotor betrieben wird, baut einen Druck auf, welcher durch ein nachgeschaltetes Überdruckventil in der gesamten Maschine konstant bei 9 bar gehalten wird.

Am verbauten 3-Wege-Ventil teilt sich das System in zwei separate Wasserkreisläufe. Der erste Kreislauf dient der Espressoversorgung, der zweite Kreislauf der Dampfdruckgenerierung.

Für die Espressoversorgung wird das Wasser zunächst in den Vorbrühboiler gepumpt und von einer Heizspule erhitzt. Ein Rückschlagventil verhindert ein Rückfließen des Wassers. Die Überwachung der geschmacksrelevanten Größen Temperatur und Druck erfolgt im Vorbrühboiler durch einen Temperatur-, sowie einen Drucksensor. Zusätzlich wird der Pegelstand mit einem Füllstandsensoren erfasst. Bei Ausfall der elektronischen Heizregelung schützt ein Überdruckventil vor zu großem Druckaufbau im Warmwasserspeicher. Um die gleichzeitige Entnahme von bis zu vier Espressi zu gewährleisten teilt sich das System zur Espressoversorgung nach dem Vorbrühboiler in zwei Kreisläufe auf. Das System der Brühgruppe 1 ist identisch zum System Brühgruppe 2, erhält aber zusätzlich die Möglichkeit Warmwasser aus dem System zu entnehmen. Aus dem Vorbrühboiler fließt das Wasser zunächst in den Kaffeeboiler. Die beiden Kaffeeboiler sind vom Aufbau identisch zum Vorbrühboiler, bieten allerdings ein geringeres Füllvolumen. Erneut sind neben einem Heizelement, auch Sensoren zur Temperatur-, Druck-, sowie Füllstands-Erfassung verbaut. Auf ein Überdruckventil wird verzichtet. Vom Kaffeeboiler aus fließt das Wasser nun über ein 3 Wege-Ventil zur Brühgruppe und dem Siebträger. Über das Wegeventil wird die Brühgruppe vom unter Druck stehenden System getrennt so lange kein Espresso bezogen wird. Während der Reinigungsfunktion der Brühgruppe dient es zudem als Ablauf des Spülwassers. In der Brühgruppe sind ein Temperatur- und ein Drucksensor verbaut, um Temperatur und Druck des Wassers direkt vor Einlauf in den Siebträger messen zu können. Beim System der Brühgruppe 1 kommt eine Brühgruppe vom Typ „Faema 61 Gastro“ zum Einsatz. Bei Brühgruppe 2 steht die Festlegung der Brühgruppe noch aus. Unter den beiden Siebträgern befindet sich für jede Tasse eine einzelne Waage zur Bestimmung des Gewichts in der Tasse, wodurch ein einfacher oder doppelter Espresso bestimmt wird. Das allgemeine Grundgerüst sowie die Abmaße der Boiler, wurden bereits von vorherigen Projektgruppen erarbeitet bzw. werden zeitgleich durchgeführt.

Der Dampfdruckkreislauf besteht aus einem großen Boiler mit einem Volumen von 1,94 Litern und einer Heizspirale im Inneren. Im Boiler sind Sensoren zur Füllstands-, Temperatur- und Druckbestimmung installiert, außerdem ist ein Überdruckventil verbaut. Eine Leitung führt über ein Zweiwegeventil zur Düse, an der Wasserdampf aus dem System entnommen werden kann.

3. Projektplanung

Die Projektplanung wird mittels der Software Microsoft Project 2016 durchgeführt, da diese dank Ihrer vielzähligen Funktionen einen sehr guten Überblick über das Projekt gibt. So kann neben der graphisch sehr ansprechenden Projektübersicht auch gleich der Ressourcenplan (Stundenplan) der am Projekt beteiligten Personen dargestellt werden und liefert einem zu jedem Zeitpunkt genaue Zahlen zum Stand des Fortschrittes.

Wichtig ist hierbei die ständige Aktualisierung des Projektes, wie Terminverschiebungen, zusätzliche Versuchsdurchführungen oder andere Termine, die den geplanten Endtermin oder die zur Verfügung stehenden Ressourcen gefährden können. Diese Auswirkungen müssen in regelmäßigen Teammeetings, welche im Besprechungsprotokoll festgehalten werden, besprochen werden.

Der Projektplan wird in drei Hauptpunkte gegliedert: 1.1 Planung, 1.2 Simulink Arbeitspakete und 1.3 Abschlusspräsentation. Diese Hauptpunkte untergliedern sich dann in mehrere Unterpunkte, denen dann die zur Verfügung stehende Zeit und Ressourcen zugeteilt werden.

Des Weiteren werden einige Meilensteine in das Projekt gesetzt, um den kontinuierlichen Fortschritt des Projekts zu kontrollieren. Bei den Meilensteinen handelt es sich um Termine mit Professoren, um den vorhandenen Fortschritt vorzulegen oder um zusätzliche Informationen für einen bevorstehenden Unterpunkt zu erhalten.

Weitere Einzelheiten können dem Projektplan im Anhang entnommen werden.

4. Thermodynamik

Das Simulationsmodell in Simulink baut vor allem auf den thermodynamischen Zusammenhängen in der Kaffeemaschine auf.

Hierzu zählen der zugeführte Wärmestrom durch die Heizelemente in den Boilern und die Wärmeverluste in Form von Konduktion, Konvektion und Wärmestrahlung der Boiler und Leitungen. Im Laufe des Projekts hat sich herausgestellt, dass einige Zusammenhänge nicht ohne die Durchführung von Versuchen erklärt werden können. Es fehlen zum Beispiel die Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Brühwasser-Boilerwand und Boilerwand-Umgebungsluft, welche von vielen unterschiedlichen physikalischen Faktoren abhängen. Zudem kamen komplexe Prozesse wie die Schichtung des Wassers im Vorwärmbrühboiler zutage, welche für eine spätere exakte Regelung der Maschine physikalisch vollständig berechnet werden müssen.

4.1. Definition Wärmeleitung (Konduktion)

Konduktion findet immer dann statt, wenn es zwischen einem Feststoff, Fluid oder Gas zu einem Temperaturunterschied kommt. Die Wärme fließt dabei immer von der niedrigeren Temperatur zur höheren Temperatur (siehe 2. Hauptsatz der Thermodynamik).

4.2. Definition Wärmeströmung (Konvektion)

Allgemein lässt sich sagen, dass konvektiver Wärmeübergang stets dann stattfindet, wenn eine feste Wand in Kontakt mit einem bewegten Fluid steht.

Allerdings muss bei der Konvektion zwischen der freien Konvektion und der erzwungenen Konvektion differenziert werden. Freie Konvektion entsteht immer dann, wenn es zu einer Fluidströmung aufgrund von Temperaturunterschieden kommt. Bei der erzwungenen Konvektion entsteht die Strömung durch eine äußere Druckdifferenz z.B. durch eine Pumpe.

4.3. Definition Wärmestrahlung

Hierbei findet die Wärmeübertragung durch elektromagnetische Strahlung statt. Diese Art der Wärmeübertragung findet immer statt und hängt dabei hauptsächlich von der Oberflächentemperatur, Oberflächenbeschaffenheit und der Ausrichtung der abstrahlenden Fläche in Bezug auf die Empfängerfläche ab.

4.4. Thermodynamische Einflüsse

Mit Voranschreiten der Arbeit hat sich gezeigt, dass es eine Vielzahl an bisher unbeachteten thermodynamische Gesetzmäßigkeiten gibt, welche Einfluss auf das Aufheiz- und Abkühlverhalten des Brühwassers haben. Da einige dieser Vorgänge nur experimentell beschrieben werden können, jedoch zum Zeitpunkt dieser Projektarbeit der Prototyp der Kaffeemaschine noch nicht so weit aufgebaut war, werden diese vorerst nicht berücksichtigt.

Im folgenden Absatz werden die beachteten und bis jetzt außeracht gelassenen Einflüsse dargestellt und erklärt.

4.4.1. Beachtete Einflüsse

Der konduktive und konvektive Wärmeübergang am Vorbrühboiler sowie am Dampfboiler und an den Vorbrühboilern wird mittels thermodynamischer Gleichungen beschrieben. Hieraus lässt sich der Wärmestromverlust an den Boilern berechnen und dadurch die Aufheizzeit des Brühwassers ermitteln. In einem zweiten Simulink-Modell wird zudem die Verwendung einer Isolation um die Boiler berücksichtigt. Dadurch kann die abgegebene Wärme an die Umgebungsluft im Gehäuse verringert werden und in Folge dessen, das Wasser schneller auf die bevorzugte Temperatur erhitzt werden. Zudem können die Heizelemente früher abgeschaltet werden, was zu einer Energieeinsparung führt.

Der für die Wärmeleitung durch die Wand relevante Wärmeübergangskoeffizient wird mittels eines Versuches (siehe Kapitel 5) ermittelt, um sowohl den Übergang Brühwasser-Boiler als auch Boiler-Umgebungsluft thermodynamisch so exakt wie möglich zu beschreiben. Weitere für die Berechnung benötigte stoffspezifische Größen, wie die spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit können aus Tabellen entnommen werden.

4.4.2. Nicht beachtete Einflüsse

Für die Wärmeverluste an den PTFE-Leitungen sind nach aktuellem Stand keine Kennzahlen bekannt und müssen deshalb experimentell bestimmt werden. Diese sollten sich jedoch aufgrund der kompakten Bauweise der Maschine und der daraus ergebenden kurzen Wege der Leitungen nur geringfügig auswirken. Dennoch ist es notwendig, sie für eine vollständige Abbildung des Systems zu kennen und zu beachten, da auch diese einen Einfluss auf die zu regelnden Stellgrößen nehmen.

Ein weiterer thermodynamischer Einfluss, dem bei der Berechnung und Simulation keine Beachtung geschenkt wird ist die unterschiedliche Schichtung von kaltem und heißem Brühwasser in den Boilern. Wie in den meisten Boilern erfolgt die Frischwasserzufuhr von unten, während das Heißwasser oben entnommen wird. Im Boiler ergibt sich so eine thermische Schichtung. Da an der Espressomaschine im Normalfall maximal vier Espresso zu je 25cm^3 in 25s entnommen werden und die beiden Kaffeeboiler jeweils ein Fassungsvermögen von 850ml besitzen, sollte sich dieser Effekt nur geringfügig auf die Zieltemperatur von 88°C auswirken. Im Hinblick auf eine spätere vollständig simulierte Kaffeemaschine handelt es sich jedoch um wichtige Einfluss-/Regelgrößen, die berücksichtigt werden müssen. Außerdem stellt der Teewasserbezug bei dieser Betrachtung ein Problem dar. Bei Teewasserbezug wird mehr Wasser benötigt, welches in der jetzigen Planung der Kaffeeboiler von unten abgezapft wird. Dies führt zu einer Absenkung der Brühwassertemperatur und muss berücksichtigt werden.

Des Weiteren soll durch das spätere Simulink-Modell das optimale Größenverhältnis von Vorwärmbrühboiler zu Kaffeeboilern ermittelt werden, um energieeffizient und schnell das Brühwasser auf die Zieltemperatur von 88°C zu bekommen. Aus diesen Gründen ist es wichtig genau zu wissen, wie sich die Brühwassertemperatur bei Bezug eines Espressos verändert und wie lange es dauert bis sich das thermische Gleichgewicht bei 88°C wieder einstellt.

5. Versuch mit den realen Boilern

Die Berechnung des thermischen Widerstands R_{th} hat sich als äußerst komplex erwiesen, da sie von einer Vielzahl an unterschiedlichen Faktoren abhängt, die teilweise nicht bekannt und bestimmbar sind. Um dennoch einen brauchbaren Wert zu ermitteln erfolgt die Bestimmung von R_{th} im Versuch.

5.1. Versuchsziel

Ziel ist es den Verlust der thermischen Energie über der Zeit zu erfassen, um daraus auf den thermischen Widerstand R_{th} zu schließen. Die thermische Energie entspricht der im Wasser und dem Boiler Material enthaltene Wärme. Diese darf nicht mit einer Temperatur verwechselt werden.

5.2. Versuchsaufbau

Der Versuch wird an dem Kaffeeboiler der Brühgruppe 2 durchgeführt, welcher keine Teewasser Bereitstellung vorsieht. In die beiden Öffnungen an der Unterseite des Boilers werden Rückschlagventile eingeschraubt und mit Dichtmasse abgedichtet. Zusätzlich wird das Heizelement mit drei Schrauben in die vorgesehene Öffnung eingeschraubt.

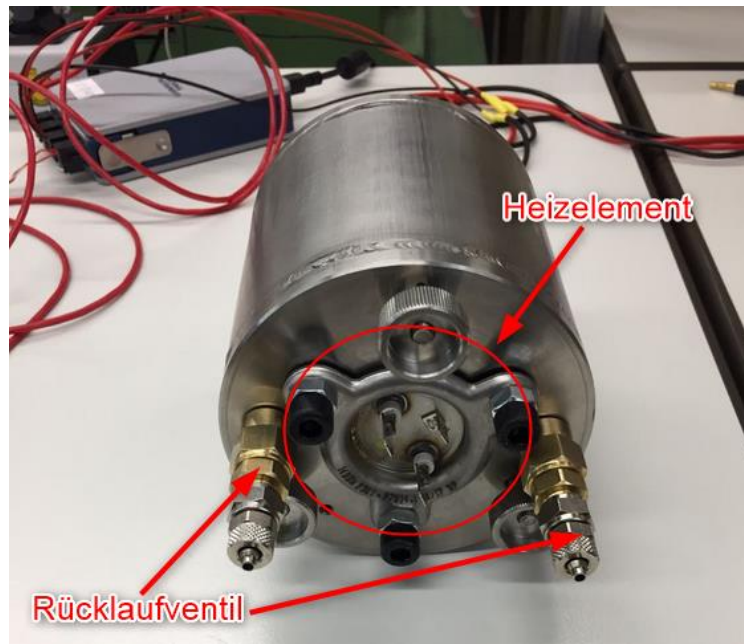


Abbildung 2 Foto des Kaffeeboilers

Die Spannungsanbindung des Heizelements erfolgt über Netzspannung. Dafür wird die Isolierung eines Netzkabels aufgetrennt und die drei Leiter werden mit Kabelschuhen an den Anschlüssen des Heizelements verbunden.

Die Messung aller Versuchsrelevanten Temperaturen erfolgt mit Temperatursensoren vom Typ PT100.



Abbildung 3 PT100 Sensor

Zur Bestimmung der Umgebungstemperatur wird der PT100 Sensor frei in der Luft positioniert. Das Erfassen der Wandtemperatur des Boilers erfolgt mit einem im Deckel des Boilers verschraubten

Temperatur Sensor. Außerdem wird ein Temperatur Sensor frei hängend im gefüllten Boiler positioniert, um so die Wassertemperatur zu ermitteln.



Abbildung 4 Messpunkte am Kaffeeboiler

Die Übertragung der Messwerte erfolgt mittels eines Data-Loggers der Firma „National Instruments“ an einen Messrechner. Am Computer kann im Programm MATLAB zeitgleich zum Versuch das Ergebnis der Messung beobachtet und anschließend in gängigen Dateiformaten gespeichert werden.

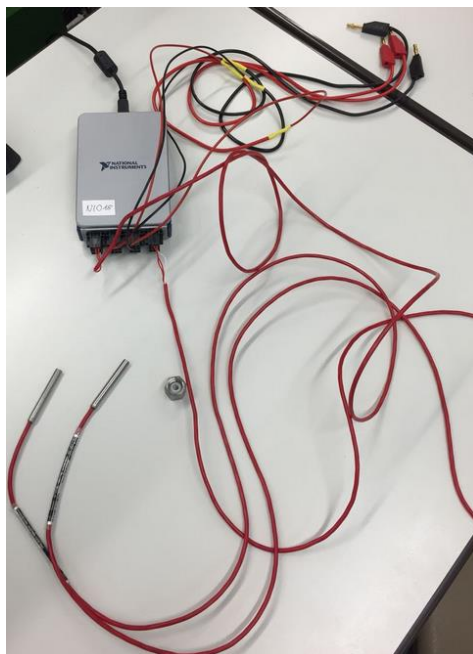


Abbildung 5 Data-Logger und PT100

Mit einer Digital-Waage und einem Messbecher wird das Gewicht des Wassers bestimmt, welches für den Versuch in den Boiler eingefüllt wird und anschließend in den Boiler gefüllt. Es zeigt sich dabei, dass bei den Berechnungen in der Bachelorarbeit das Volumen der Heizspirale nicht beachtet wird. In Folge dessen fällt das tatsächlich verfügbare Volumen im Boiler kleiner aus als bisher angenommen. Es beträgt 0.82ccm statt 0.85ccm.

5.3. Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuches werden Raumtemperatur sowie Ausgangstemperatur des Wassers und des Stahls bestimmt. Anschließend wird das Heizelement über ein Netzkabel an das Stromnetz angeschlossen und der Aufheizvorgang beginnt.

Beim Erreichen der geforderten 88°C der Brühwassers, wird das Heizelement vom Strom genommen. In MATLAB wird der zeitliche Verlauf der Temperaturen in Form von Messwerten in einer Matrix am Computer dargestellt und daraufhin in einem Diagramm veranschaulicht.

Zusätzlich zur Wärmemessung mittels Sensorik erfolgt eine subjektive Beurteilung der Wärmeverteilung durch Erfühlen.

Nach Erreichen der 88°C wird das Nachheizverhalten gemessen und das anschließende Abkühlverhalten des Wassers im Boiler.

Während des Versuches fällt auf, dass eine der Schweißnähte am Boiler einen Haarriss aufweist, durch den langsam Wasser austritt. Der Verlust ist dabei allerdings so gering, dass seine Auswirkung auf die Messergebnisse vernachlässigt werden kann. Zur Behebung des Problems erfolgt die Kontaktaufnahme mit der für die Inbetriebnahme zuständigen Gruppe.

5.4. Versuchsauswertung

5.4.1. Graphische Veranschaulichung und Interpretation der Messergebnisse

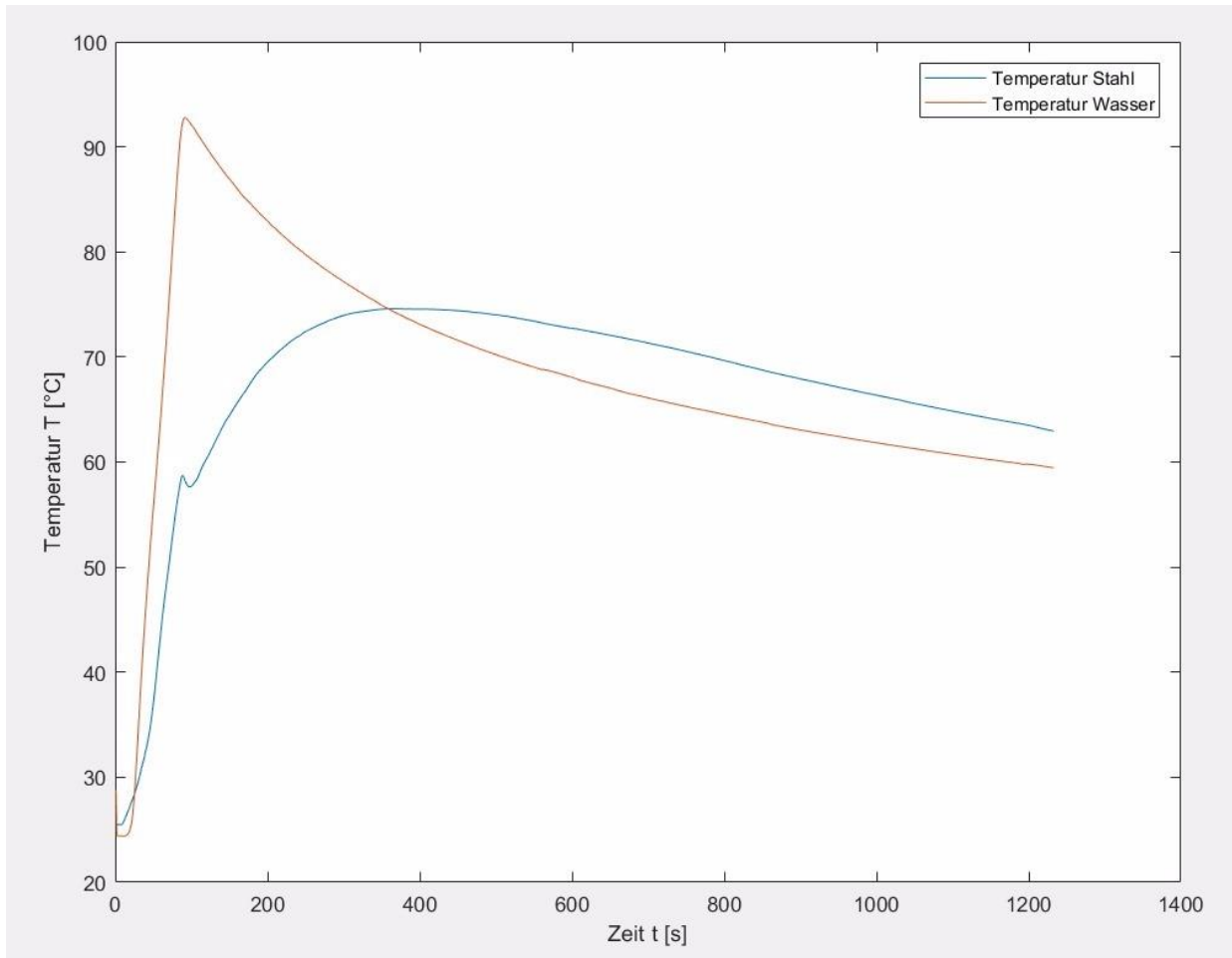


Abbildung 6 Temperaturverlauf der Messung im Kaffeeboiler über der Zeit

Gemessene Aufheizzeit: 83 s

Wie in dem Diagramm zu sehen heizt die 1400 W Heizspirale das Wasser von anfangs 28,7°C innerhalb von 83s auf die gewünschten 88°C in den oberen Schichten. Die Temperatur des Boilers selbst zieht verzögert nach und hat zu diesem Zeitpunkt erst die 56,9°C erreicht. Zu diesem Zeitpunkt wird die Heizspirale vom Strom genommen, um die restliche Aufheiz- und spätere Abkühlzeit zu ermitteln. Mithilfe dieser Zeiten kann später der thermische Widerstand R_{th} berechnet werden.

Die maximale Temperatur des Wassers liegt bei 91°C, die des Boilers bei 74,6°C. Der Versuch wird nach ca. 35min beendet, wobei die Endtemperaturen bei 59,4°C Wasser und 62,9°C Boiler lagen.

Der kurze Einbruch des Temperaturverlaufs des Boilers um 0,5°C, ist auf einen Messfehler zurückzuführen. Im Moment des Abschaltens der Heizspirale kam es wo möglich zu einer

elektromagnetischen Störung in den Kabeln der PT 100 Temperatursensoren, wodurch kurzfristig ein falscher Messwert entstand.

Zudem wird während des Versuchs festgestellt, dass es zu einer deutlichen Schichtung im Boiler kommt, wie bereits im Kapitel „4.4.2 Nicht-beachtete Einflüsse“ angesprochen. Dies äußerte sich durch sehr viel höhere Außenwandtemperaturen im oberen Bereich des Kaffeeboilers verglichen zum unteren Bereich.

Im Folgenden wird auf die Ermittlung der zugeführten Wärmemengen sowie der Wärmeverlust nach einer bestimmten Zeit eingegangen. Hieraus errechnet sich am Ende der thermische Widerstandes R_{th} .

5.4.2. Berechnung von R_{th}

5.4.2.1. Allgemeines

Im ersten Schritt unserer Berechnungen wird, basierend auf den Berechnungen der Bachelorarbeit die Wassertemperatur und die Boilertemperatur als äquivalent angenommen. Durch die Messung im Boiler wird eindeutig klar, dass die Wandtemperatur des Boilers keinesfalls der Wassertemperatur im Boiler gleichgesetzt werden darf.

Bei einem vollständig gefüllten Boiler mit der Wassertemperatur von 88°C ergibt sich folgende gespeicherte Wärmeenergie:

$$Q_{ges} = Q_w + Q_B$$

Gl. 1

$$Q_w = m_w * c_w (\vartheta_{1w} - \vartheta_{2w}) , \quad Q_B = m_B * c_B (\vartheta_{1B} - \vartheta_{2w})$$

Mit:

Bezeichnung	Gemessene Werte
Boiler-Stahl Starttemperatur:	$\vartheta_{1B} = 25,4^{\circ}\text{C}$
Wasserstarttemperatur:	$\vartheta_{1w} = 24,4^{\circ}\text{C}$
Boiler bzw. Wassertemperatur beim Abschalten des Heizelements:	$\vartheta_{2w} = 88,6^{\circ}\text{C}$
Stahltemperatur beim Abschalten des Heizelements:	$\vartheta_{2B} = 56,94^{\circ}\text{C}$
Wasserendtemperatur:	$\vartheta_{3w} = 59,4^{\circ}\text{C}$
Stahlendtemperatur:	$\vartheta_{3B} = 62,9^{\circ}\text{C}$
Raumtemperatur (gemessener Tageswert):	$\vartheta_0 = 24^{\circ}\text{C}$
Hinzugefügte Wassermasse:	$m_w = 0,754\text{kg}$

Tabelle 1 Gemessene Werte

5.4.2.2. Aufheizung

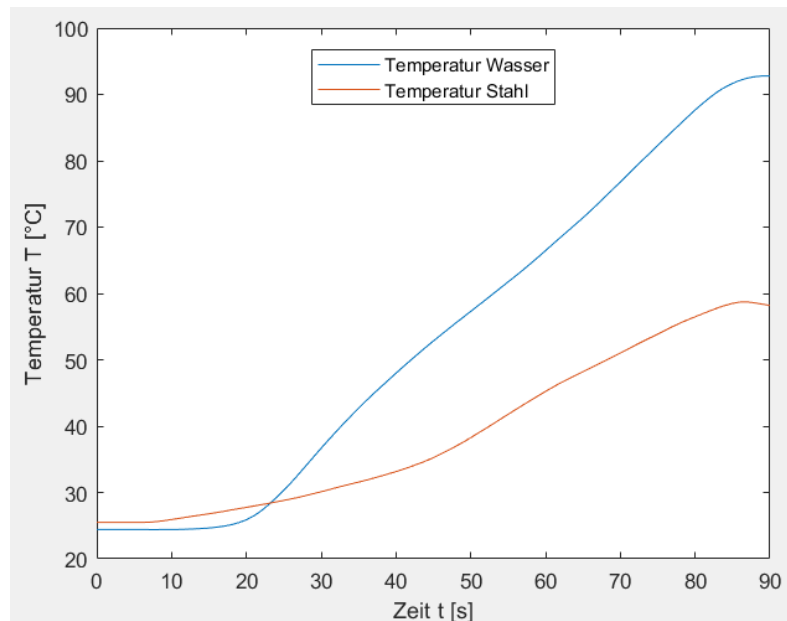


Abbildung 7 Aufheizkurve der Messung im Kaffeeboiler

Die real hinzugeführte Wärmeenergie errechnet sich zu:

$$1400\text{W} \cdot 83\text{s} = \underline{116,200 \text{ kJ}}$$

Die berechnete hinzugefügte Wärmeenergie zu:

$$Q_{ges1} = m_w \cdot c_w \cdot (\vartheta_{1w} - \vartheta_{2w}) + m_B \cdot c_B (\vartheta_{1B} - \vartheta_{2B})$$

Gl. 2

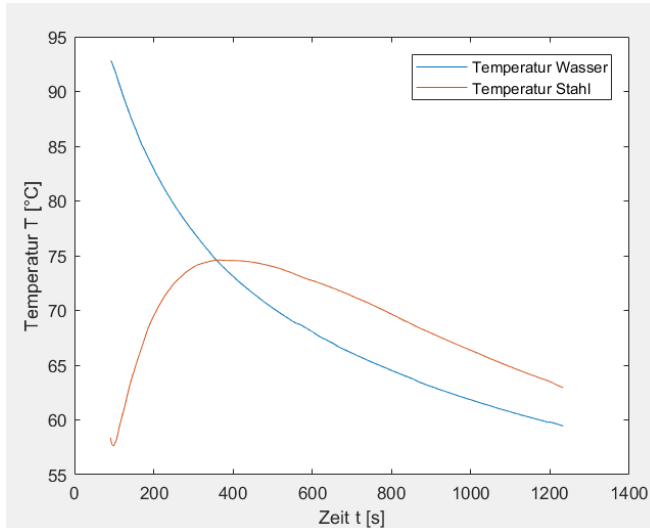
$$Q_{ges1} = 0,754\text{kg} \cdot 4,186 \cdot (88,6^\circ \text{C} - 24,4^\circ \text{C}) + 2,743\text{kg} \cdot 0,5 (56,94^\circ \text{C} - 25,4^\circ \text{C}) = 2458879 \text{ J}$$

$$= \underline{245,8879 \text{ kJ}}$$

Aus den Berechnungen geht hervor, dass nur knapp die Hälfte der berechneten Wärmeenergie real benötigt wird, um auf Betriebstemperatur zu kommen. Dies ist ein extremer Unterschied zwischen berechneter Wärmezunahme und tatsächlich hinzugefügter Wärmemenge. Unter anderem durch Rücksprache mit Frau Prof. Dr. Henze wird deutlich, dass dies auf eine extreme Wärmeschichtung zurückzuführen ist.

5.4.2.3. Abkühlung

Annahme: die Berechnung aus 5.4.2.2. Aufheizung zeigt, dass eine extreme Schichtung vorhanden ist, die die Messung verfälscht. Im Folgenden wird angenommen, dass die mittlere Temperatur zwar



deutlich geringer ist, aber die Temperaturdifferenz im Mittelwert der Temperaturdifferenz im Maximum übereinstimmen.

Zudem wird ein Zeitpunkt gegen Ende des Versuches für die Berechnungen gewählt, da angenommen wird, dass zum späteren Zeitpunkt eine geringere Schichtung vorhanden ist.

Abbildung 8 Abkühlkurve der Messung im Kaffeeboiler

	Zeitpunkt nach Beginn der Messung	Temperaturwert
ϑ_{4W}	768s	65°C
ϑ_{5W}	1173s	60°C
ϑ_{4B}	768s	70,23°C
ϑ_{5B}	1173s	63,8°C

Tabelle 2 Temperaturwerte für ausgewähltes Zeitfenster

$$Q_{ges2} = (m_w * c_w + m_B * c_B)(\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

$$Q_{ges1} = 0,754kg * 4186 * (65^\circ C - 60^\circ C) + 2,743kg * 500 (70,23^\circ C - 63,8^\circ C) = 8825,39 J$$

In 405 min entweicht also einer Verlustwärme von = 8825,39 J. Dadurch kann der Wärmestrom bzw. die entweichende Leistung P berechnet werden.

$$\dot{Q} = P = \frac{Q}{t}$$

In Werten:

$$\dot{Q} = P = \frac{8825,39 \text{ J}}{405 \text{ s}} = 21,79 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = \frac{\frac{\vartheta_{1\text{Wasser}} + \vartheta_{1\text{Boiler}}}{2} - \frac{\vartheta_{2\text{Wasser}} + \vartheta_{2\text{Boiler}}}{2}}{R_{th}}$$

Umgestellt nach R_{th}

In Werten

$$R_{th} = \frac{(67,6^\circ \text{ C} - 61,9^\circ \text{ C})}{21,79 \text{ W}} = \mathbf{0,262}$$

6. Problematik der thermischen Schichtung

Der Versuch zur Bestimmung des thermodynamischen Widerstandes R_{th} hat gezeigt, dass sich die Schichtung wesentlich stärker auf die Temperaturverteilung im Boiler auswirkt als zunächst angenommen.

Die Berechnungen in Kapitel 5 weisen nach, dass dem System nach 83 Sekunden viel weniger Energie zugeführt wird, als für eine Erhitzung der gesamten Wassermenge auf 88°C notwendig. Es kommt zu einer thermischen Schichtung und einer Durchschnittstemperatur des Wassers unterhalb der geforderten 88°C .

Der Effekt der Schichtung tritt dabei direkt nach dem Einschalten Maschine am stärksten in Erscheinung. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser nach einer gewissen Zeit im Betrieb abschwächen wird.

Im „Worst Case“ Szenario werden aus den beiden Kaffeeboilern gleichzeitig je zwei Espresso a 25 ccm und zusätzlich Teewasser entnommen. Der Hauptbrühboiler muss dann Wasser für vier Espresso, sprich 100ccm, und die Teewassermege nachliefern.

6.1. Konzepte zur Unterbindung

Da auch die Szenarien mit Espresso bezug direkt nach Einschalten der Maschine und gleichzeitigem Bezug von bis zu vier Espresso umsetzbar sein sollen, werden im folgenden Konzepte zur Reduzierung der thermischen Schichtung erarbeitet bewertet. Ziel ist es das Aufheizverhalten des Gesamtsystems so auszulegen, dass zu jedem Zeitpunkt ausreichend Heißwasser zur Verfügung steht.

6.1.1. Kaffeeboiler nacheinander durchspülen

Bei diesem Konzept wird das gesamte Wasser zunächst im Vorwärmboiler auf die geforderten 88°C gebracht, bevor es anschließend in die Kaffeeboiler gelangt. Voraussetzung für dieses System ist, dass die Kaffeeboiler über einen Abfluss verfügen, der es ermöglicht das vorhandene kalte Wasser auszuspülen. Erst nachdem das Heißwasser in die Kaffeeboiler gelangt ist, werden auch diese über die Heizelemente beheizt, um die Temperatur von 88°C zu halten. Ziel ist es das Wasser im Vorwärmboiler möglichst schnell auf die Zieltemperatur zu bringen. Hierfür soll der Boiler eine möglichste dünne Wandstärke besitzen, um die Verluste an den Stahl so gering wie möglich zu halten. Des Weiteren ist eine gute Isolierung notwendig.

Vorteil bei diesem Konzept ist, dass neben einer sehr großen Menge an verfügbarem Heißwasser auch die hohen Einschaltspannungen, welche durch das gleichzeitige Einschalten aller Heizelemente entstehen, vermieden werden. Außerdem ist es möglich den Anschluss für den Teewasserbezug, wie aktuell vorgesehen, an der Boilerunterseite zu realisieren.

Besonders wichtig ist es die Wassermenge im Vorheizboiler schnellstmöglich zu erhitzen.

Für die konstante Regelung der 88°C in den beiden Boilern, ist ein PID gesteuertes Heizelement unabdingbar. Die Verwendung eines Zweipunktreglers ist für die hohen Einschaltbelastungen, welche durch die 1400W starken Heizelemente entstehen auf Dauer nicht empfehlenswert. Die in Kapitel 6.2.1 aufgeführte Berechnung zur Bestimmung der Aufheizzeit der Brühgruppe zeigt, dass diese ca. 11min benötigt um auf eine Temperatur von 88°C zu kommen. Diese Zeit dient als Referenzzeit, in welcher auch das Wasser im Vorwärmboiler die geforderten 88°C erreicht haben soll. In einem Versuch muss ermittelt werden, ob es zur Deckung der beiden Aufheizzeiten kommt. Ist dies der Fall, ist die Zeit welche die Brühgruppe zum Aufheizen braucht optimal genutzt, um ohne große Einschaltleistungen aller Heizelemente, das Wasser aufzuheizen.

6.1.2. Kaffeeboiler und Vorwärmboiler gleichzeitig erhitzen

Dieses Konzept zielt darauf ab so früh wie möglich Heißwasser für einen Espresso zur Verfügung zu stellen. Dafür werden zu Beginn alle Boiler gleichzeitig aufgeheizt. Der Versuch hat gezeigt, dass im Kaffeeboiler bereits nach 83 sec die obere Schicht die gewünschte Temperatur erreicht und der erste Espresso bezogen werden kann. Das Heizelement im Kaffeeboiler kann dann abgeschaltet werden, während das Heizelement im Vorbrühboiler weiterhin eingeschaltet bleibt, um das größere Volumen aufzuheizen. Da anschließend bereits vorgewärmtes Wasser von unten in den Kaffeeboiler nach strömt, dauert es nicht lange, bevor der nächste Espresso aus dem Kaffeeboiler entnommen werden

kann. Die in Kapitel 7 durchgeführte Berechnung der Aufheizzeit der Brühgruppe zeigt, dass diese erst nach ca. 11 Minuten vollständig aufgeheizt ist und somit die Zeit für den frühestmöglichen Espresso vorgibt. Dieses Problem kann durch eine zusätzlich mit Wasser beheizte Brühgruppe eliminiert bzw. verkleinert werden. Dabei zirkuliert Heißwasser aus dem Kaffeeboilern durch die Brühgruppe, um diese schneller aufzuheizen.

Ein weiteres Problem stellen die hohen Spannungsspitzen dar, welche durch das gleichzeitige einschalten der vier Heizelemente zu je 1400W entstehen. Um diesem Problem zu entgehen, soll der spätere Prototyp einen Drehstromanschluss erhalten. Trotzdem liegt die Belastung der einzelnen Elektronikbauteile sehr hoch und es ist abzuwägen, ob sich dies auf eine vernünftige Lebensdauer der espressomaschine negativ auswirkt.

Des Weiteren steht zu Beginn, durch die hohe thermodynamische Schichtung in den Boilern, nur in den oberen Wasserschichten 88°C heißes Wasser zur Verfügung. Deshalb ist es empfehlenswert die Teewasserentnahme, gleich wie die espressowasserentnahme, von oben her zu gestalten.

Auch bei diesem Konzept, kann durch eine Verringerung der Boilerwandstärke und den Einsatz einer geeigneten Wandisolierung ein schnelleres Aufheizverhalten des Systems erreicht werden.

Überschlagene Rechnung zur Veranschaulichung:

Maximal wird von der Brühgruppe folgender Massestrom entzogen (4 Espresso gleichzeitig):

$$\frac{0.025 \text{ l} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 4}{25 \text{ s}} = 0.004 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Mit 1400W kann in 1s

$$m_w = \frac{Q}{(\vartheta_1 - \vartheta_2) c_w} \quad \text{mit } \vartheta_1 = 25^\circ\text{C} \quad \vartheta_2 = 88^\circ\text{C}$$

$$m_w = 0,0053 \text{ kg}$$

von Raum- auf Betriebstemperatur gebracht werden.

Diese Berechnung ist zwar durch die Durchmischung des Wassers und anderen Faktoren in der Realität nicht umzusetzen, sie zeigt aber deutlich die Leistung des Heizelements. Das Heizelement kann (unter Vernachlässigung einiger Faktoren) 0,0053 kg in 1s von Raum- auf Betriebstemperatur aufheizen. Dies lässt vermuten, dass selbst wenn ununterbrochen Espresso bezogen wird das Heizelement ausreichend dimensioniert ist um diesen Extremfall auszuhalten.

So ist die Empfehlung, dass im Fall des Heizelements keine Anpassung bezüglich der Schichtung getroffen werden.

6.1.3. Kaffeeboiler über Betriebstemperatur heizen

Bei diesem Konzept werden alle vier Heizelemente gleichzeitig eingeschaltet. Jedoch werden die Kaffeeboiler nicht bereits bei 88°C in der oberen Wasserschicht ausgeschaltet, sondern erst bei einer höheren Temperatur. Ziel ist es durch das Übersteuern der 88°C in den oberen Schichten, das Wasser in den unteren Schichten durch zusätzliche Wärmeübertragung schneller auf die 88°C zu erhitzen. Dadurch kann auch die Teewasserentnahme von unten, bereits nach relativ kurzer Zeit erfolgen.

Die obere Schicht, welche für den Espresso bezug ebenfalls die geforderten 88°C aufweisen muss, soll nach Erreichen der 88°C in den unteren Schichten (also im gesamten Boiler 88°C) nicht überheizt sein. Um dies zu erreichen muss die optimale Abschalttemperatur durch einen Versuch ermittelt werden. Diese hängt vor allem von der Wandstärke und der Isolierung der Boiler ab.

6.2. Bewertung der Konzepte

In Tabelle 3 werden die drei Konzepte hinsichtlich ihrer wichtigsten Eigenschaften verglichen. Es zeigt sich dabei, dass Konzept eins zwar die größtmögliche verfügbare Heißwassermenge zur Verfügung stellt und auch hinsichtlich des Leistungspeaks beim Einschalten am besten abschneidet, allerdings dauert es sehr lang bis der erste Espresso bezogen werden kann. Die Konzepte zwei und drei heizen beim Einschalten mit voller Heizleistung in allen drei Heizelementen und schneiden dementsprechend schlecht hinsichtlich des dadurch entstehenden Leistungspeaks ab. Konzept zwei weist den großen Vorteil auf bereits nach sehr kurzer Zeit Heißwasser für den Espresso bezug zu liefern und schneidet deshalb am besten ab hinsichtlich der benötigten Zeit bis zum ersten Espresso bezug. Allerdings steht anfangs nur eine sehr kleine Heißwassermenge zur Verfügung. Konzept drei muss nach dem Überhitzen in der oberen Wasserschicht zunächst wieder auf die Soll-Temperatur abkühlen, was Zeit kostet. Dafür wird durch das Überheizen schneller eine große verfügbare Heißwassermenge erzeugt.

Konzept	Zeit bis zum Espresso Bezug	Schnell verfügbare Heißwassermenge	Leistungsspeak
1	--	++	++
2	++	--	--
3	-	+	--

Tabelle 3 Konzeptbewertung

Die Bewertung zeigt, dass sich mit keinem der Konzepte die beiden Problematiken „schneller Espresso Bezug“ und „große Menge an entnommenen Heißwasser“ optimal kompensieren lassen. Deshalb muss eine Priorisierung erfolgen, welches Kriterium als relevanter zu bewerten ist und es ist dementsprechend ein Konzept auszuwählen.

6.2.1. Kaffeeboiler für den Teewasserbezug

Hier ergibt sich das größere Problem, da zum einen das Wasser von unten entnommen wird, zum anderen mehr Wassermasse in einem Prozessschritt entnommen wird. Dadurch, dass das Heizelement sich unten befindet und die Wasserentnahme unten erfolgt, kann es ausreichen den Teewasserbezug mit angeschaltetem Heizelement zu tätigen. Dies sollte aber versuchstechnisch ermittelt werden.

Sollte selbst bei angeschaltetem Heizelement die entnommene Wassertemperatur nicht ausreichen, so muss auf eine vorherige Durchspülung des kalten Wassers zurückgegriffen werden.

Im Fall der Serien-Espressomaschine sollte jedoch auf eine Wasserentnahme von oben zurückgegriffen werden.

7. Berechnung der Aufheizzeit der Brühgruppe

Die Aufheizzeit der Brühgruppe spielt eine wichtige Rolle im Gesamtaufheizverhalten des Systems. Denn ohne die richtige Temperatur wird sich das Wasser bereits hier zu stark abkühlen und es kommt nicht zu einer optimalen Auswaschung der Aromastoffe aus dem Kaffeemehl.

Die aus Messing gefertigte Brühgruppe wird mittels einer 80W starken Heizpatrone aufgeheizt und wiegt 2045g. Die Wärmekapazität von Messing liegt bei $c_p = 377 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Hieraus lässt sich adiabatisch die gesamte zuzuführende Wärmemenge bestimmen und daraus die Zeit, welche die Brühgruppen zum Erreichen der 88°C benötigt.

$$Q = c_{p\text{Messing}} * \Delta\vartheta * m$$

$$\Delta\vartheta = 88^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 68^{\circ}\text{C}$$

$$Q = 377 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} * 68\text{K} * 2,045\text{kg} = 52,426 \text{ kJ}$$

$$\rightarrow P = \frac{Q}{t} \rightarrow t = \frac{Q}{P} = \frac{52426\text{J}}{80\text{W}} \approx 11 \text{ min}$$

Diese Zeit liegt um einiges höher, als beispielsweise nur die Aufheizzeit der Kaffeeboiler und gibt somit die Zeit bis zum ersten Espresso bezug vor. Mit 11 Minuten liegt sie bereits unter der durchschnittlichen Aufheizzeit von anderen Espressomaschinen von 15-30 Minuten.

Trotzdem kann man die Aufheizzeit wahrscheinlich noch verkürzen. Zum Beispiel mittels einer zusätzlichen Durchströmung der Brühgruppen mit Heißwasser aus den Kaffeeboilern. Dies müsste man mittels eines weiteren Versuchs testen. Jedoch verändert sich hierdurch ein Großteil des Aufbaus und der verwendeten Ventile und sollte vorher bedacht werden.

Die 80W Heizpatrone der Brühgruppe bleibt während des Betriebs durchgehend eingeschaltet.

8. Simulink Modell

8.1. Einführung

Zur Veranschaulichung der verschiedenen thermodynamischen Einflüsse wird Simulink als Simulationstool gewählt. Simulink ist ein Zusatzprodukt zu MATLAB von der Firma MathWorks und eignet sich für jegliche Art von Simulationen und Modellierung von Systemen. Das im Folgenden beschriebene Simulink Modell wird in der von der Hochschule München zur Verfügung gestellten Version MATLAB R2017b erstellt.

8.2. Regelstrecke

Beispielhaft wird die gesamte Berechnung und Simulation am Kaffeeboiler durchgeführt. Die Übertragung auf die weiteren Boiler erfolgt lediglich mit einer Veränderung der spezifischen Werte. Die Eingangsgröße der Regelstrecke ist die Heizleistung P . Die Regelgröße ist die Wassertemperatur ϑ . Die elektrische Energie erwärmt über das Heizelement die Wassertemperatur

$$\int P(t) dt$$

Gl. 4

Die zugeführte Leistung entspringt dem zugeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{ZuGesamt}$

$$\dot{Q}_{ZuGesamt} = \frac{dQ_{ZuGesamt}}{dt} = P_e(t)$$

Gl. 5

Da das Reale Gesamtsystem diabat und nicht adiabatisch angenommen wird zusätzlich eine gewisse Wärmemenge nach außen abgeführt. Dies ist auf eine nicht-ideale Isolation zurückzuführen. Die dem Boiler verlassene Wärme ist die für ($t > \text{Aufheizzeit}$) vom Heizelement zugeführte Wärme, um die Temperatur konstant zu halten.

Zur Vereinfachung gilt die Annahme $\vartheta_{\text{Wasser}} = \vartheta_{\text{BoilerMaterial}}$. Daraus lässt sich folgendes ableiten:

	Wasser	Boiler
Gespeicherte Wärmeenergie	$Q_W = m_W * c_W (\vartheta_{1W} - \vartheta_{2W})$	$Q_B = m_B * c_B (\vartheta_1 - \vartheta_2)$
Daraus ergibt sich	$\frac{dQ_W}{dt} = m_W c_W \frac{d\vartheta}{dt}$	$\frac{dQ_B}{dt} = m_B c_B \frac{d\vartheta}{dt}$

Tabelle 4 Formeln für die Wärmeenergie

Der abgeführte Wärmestrom ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Boilerinnen- und außenwand abhängig von dem Wärmewiderstand R_{th} . Im ersten Schritt wird angenommen, dass der Boiler nicht über eine Isolation verfügt.

Der Wärmewiderstand ergibt sich zu:

$$R_{th} = \frac{1}{\alpha A} * \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{2\pi L \lambda} + \frac{1}{\alpha A}$$

Gl. 6

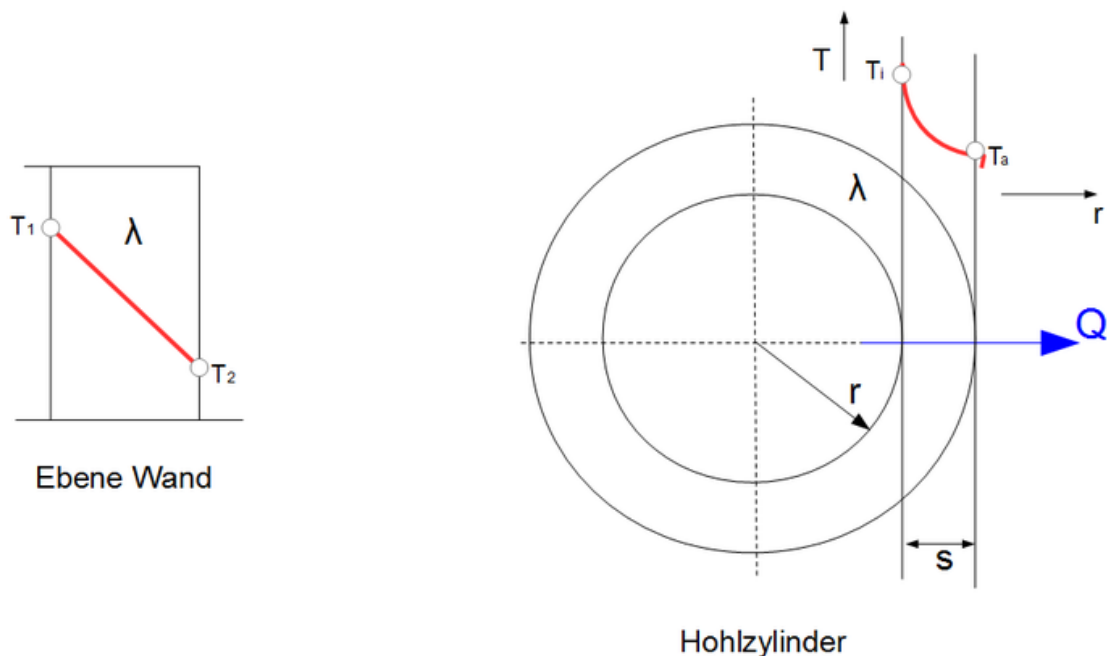


Abbildung 9 Temperaturgefälle am Hohlzylinder [IngenKurs]

Abbildung 9 zeigt den Temperaturabfall über die Zylinderwand. Der Wärmestrom der den Zylinder verlässt ergibt sich zu:

$$\dot{Q}_V = \frac{(\vartheta_i - \vartheta_a)}{R_{th}}$$

Gl. 7

Gleichzeitig ist der Wärmestrom, der die Zylinderwände verlässt gleich der zeitlichen Ableitung der Wärmemenge.

$$\dot{Q}_V = \frac{dQ_V}{dt}$$

Gl. 8

Die durch die Heizspule zugeführte Wärmemenge teilt sich auf in die im Wasser gespeicherte, die im Stahl gespeicherte und der abgeführten Wärmemenge durch die Zylinderwände.

$$Q_{ZuGesamt} = Q_w + Q_B + Q_V$$

Oder

$$\dot{Q}_{ZuGesamt} = \dot{Q}_w + \dot{Q}_B + \dot{Q}_V$$

Setzt man die Gleichungen für den Wärmestrom ein, so ergibt sich:

$$\dot{Q}_{ZuGesamt} = P_e(t) = m_w c_w \frac{d\vartheta}{dt} + m_B c_B \frac{d\vartheta}{dt} + \frac{(\vartheta_i - \vartheta_a)}{R_{th}}$$

Gl. 9

Oder

$$(m_w c_w + m_B c_B) * R_{th} * \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta_i = R_{th} * P_e(t) + \vartheta_a$$

Gl. 10

Folgende Parameter werden nun ersetzt:

Als Verstärkungsfaktor wird

$$K_{PS} = R_{th} = 0,262$$

Gl. 11

definiert.

Als Zeitkonstante wird:

$$T_1 = R_{th} * (m_w c_w + m_B c_B) = 1186$$

Gl. 12

eingeführt.

(T_1 ist hier die Zeitkonstante des Systems und nicht mit einer Temperatur zu verwechseln)

Daraus ergibt sich:

$$T_1 \frac{d\vartheta(t)}{dt} + \vartheta_i = K_{PS} P_e(t) + \vartheta_a$$

Gl. 13

Durch eine Laplace-Transformation erhält man:

$$T_1 * (s\vartheta(s) - \vartheta_a) + \vartheta(s) = K_{PS} * \frac{P_{e0}}{s} + \frac{\vartheta_a}{s}$$

Gl. 14

Nach $\vartheta(s)$ aufgelöst:

$$\vartheta(s) = (K_{PS} P_{e0} + \vartheta_a) * \frac{1}{(1 + sT_1)} + T_1 \vartheta_a \frac{1}{(1 + sT_1)}$$

Gl. 15

Die Regelstrecke hat in Summe folgende Übertragungsfunktion

$$\vartheta(s) = \frac{K_{PS} * P_{e0} + \vartheta_a + T_1 \vartheta_a}{(1 + sT_1)}$$

Gl. 16

8.3.1. Zweipunktregler

Aktuell ist ein Zweipunktregler für die Steuerung der Boiler vorgesehen. Um zu schnelle Schwingungen des Ausgangs (der Ist-Temperatur) zu verhindern hat ein Zweipunktregler oft eine eingebaute Hysterese. Es wird also ständig um den eigentlichen Soll-Wert der Temperatur „herumgesprungen“. Dies lässt sich durch eine starke Schwingung um den Ist-Wert der Temperatur erkennen. Die Problemstellung hierbei ist weniger die Dynamik der Temperaturwerte, sondern mehr das ständige Ein- und Ausschalten der Heizspule. Jedes Einschalten erzeugt einen deutlichen Schaltimpuls, der mit der Zeit der Lebensdauer des realen Heizelements zu Lasten geht. Dies ist besonders bei einer hochwertigen Espressomaschine ein nicht zu tolerierender Zustand. In Simulink wird der Zweipunktregler durch ein sehr einfaches, selbstgeschriebenes Skript umgesetzt. Hier wird beispielhaft die Hysterese auf 2°C gesetzt. Falls die Temperaturdifferenz über 2°C beträgt heizt das virtuelle Heizelement mit 1400W. Für jeden anderen Fall wird nicht geheizt.



Abbildung 11 Blockschaltbild des Zweipunktreglers

```
function y = fcn(u)
    if u > 2
        y = 1400;
    else
        y = 0;
    end
end
```

Abbildung 10 Skript als Zweipunktregler

8.3.2. PID-Regler

8.3.2.1. Aufbau des PID-Reglers

Für die Serien-Espressomaschine wird stark ein PID-geregeltes System empfohlen. Die entsprechenden Mehrkosten kann sich durch eine deutlich angehobene Lebenszeit der Heizspulen rentieren.

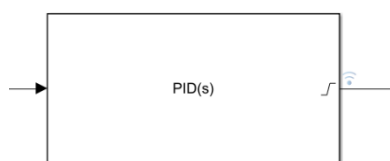


Abbildung 12 Blockschaltbild des PID-Reglers

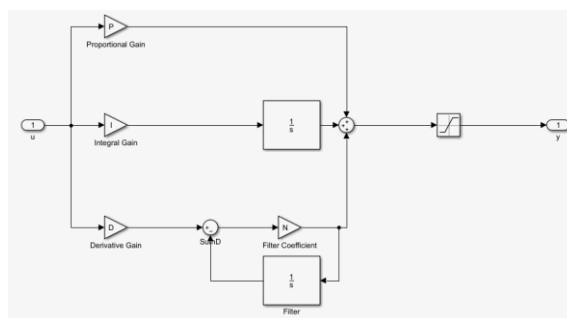


Abbildung 13 Detaillierte Ansicht des PID-Reglers

Der PID-Regler besteht aus 3 zusammengeführten Regelgliedern. Das „P-Glied“ wird als einfache Gain-Funktion realisiert und ist eine proportionale Verstärkung des Eingangsfehlers. Das I-Glied ist ein Übertragungsglied, welches ein integratives Übertragungsverhalten aufweist. Dies wird benötigt, da eine stationäre Genauigkeit erzielt werden soll. Umgekehrt kann man sagen, dass ohne das I-Glied ein zu hoher stationärer Fehler das Ergebnis wäre und sich durch eine zu niedrige Temperatur zeigen wird. Mathematisch lässt die hervorgerufene stationäre Genauigkeit wie folgt erklären: Durch einen stationären Fehler ist der Eingang des Integrals ungleich 0. Der Ausgang des Integrals liefert einen linear mit der Zeit anwachsenden Wert, der die Regeldifferenz verkleinert.

Das D-Glied wird in für diese Regelung nicht benötigt und daher zu 0 gesetzt.

Zuletzt befindet sich am Ausgang des Reglers eine Ramp-Funktion von 0-1400, die die minimale und maximale Heizleistung definiert.

8.3.2.2. Auslegung des PID-Reglers

Wie in Kapitel 8.2 ermittelt, lautet die Übertragungsfunktion der Regelstrecke

$$\vartheta(s) = \frac{K_{PS} * P_{e0} + \vartheta_a + T_1 \vartheta_a}{(1 + sT_1)}$$

Der PID-Regler wird durch eine Übertragungsfunktion der Form

$$k_R * \frac{(T_{1RS} + 1)(T_{2RS} + 1)}{s}$$

Gl. 17

beschrieben.

Da es sich bei der Strecke unseres Modells lediglich um eine PT1 Strecke handelt, kann auf die Zeitkonstante T_{2R} verzichtet werden. Somit besitzt der Regler nur noch die Form:

$$k_R * \frac{(T_{1RS} + 1)}{s}$$

Gl. 18

Zur Ermittlung von T_1 und k_R wird nun eine Pol-Nullstellenkompensation durchgeführt. Hierzu werden die Übertragungsfunktionen von Regler und Strecke multipliziert.

$$\frac{K_{PS} * P_{e0} + \vartheta_a + T_1 \vartheta_a}{(1 + sT_1)} * \frac{k_R (T_{1R}s + 1)}{s}$$

Für $T_1 = T_{1R}$ wird die Polstelle der Regelstrecke von der Nullstelle des Reglers kompensiert.

$$\frac{(K_{PS} * P_{e0} + \vartheta_a + T_1 \vartheta_a) * k_R}{s}$$

Gl. 19

Für $k_R = \vartheta_a$ ergibt sich letztendlich eine Gesamtübertragungsfunktion von

$$\frac{\left(\frac{K_{PS}}{k_R} * P_{e0} + T_1 + 1\right)}{s}$$

Gl. 20

Der Verstärkungsfaktor k_p des P-Gliedes entspricht also $T_1 = 1186$

Der Verstärkungsfaktor k_i des I-Gliedes entspricht also $\vartheta_a = 24$

8.3. Thermometer

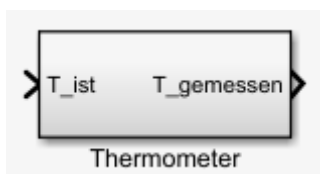


Abbildung 15 Blockschaltbild des Thermometers

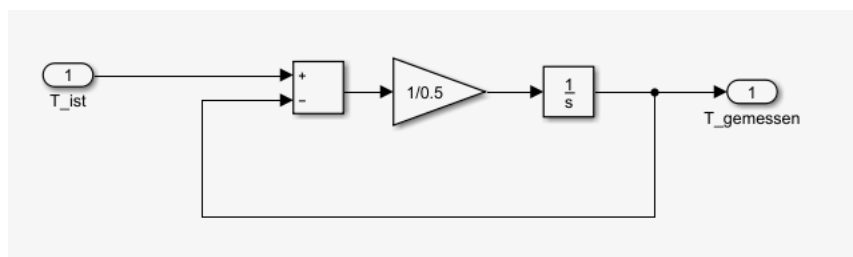


Abbildung 14 Realisierung im Submodell des Thermometers

Das Thermometer wird realisiert durch eine einfache Verzögerung der realen Temperatur zur gemessenen Temperatur. Die Zeitkonstante wird hier als sehr gering angenommen. Das

Thermometer ist lediglich ein zusätzlich modellierter Block im Gesamtsystem, der falls nicht erwünscht, einfach weggelassen werden kann.

8.4. Espresso Bezug

Der Espresso Bezug wird wie der Zweipunktregler durch ein einfaches Skript umgesetzt. Der Eingang ist zum einen die aktuelle Temperatur, zum anderen die Zeit. In diesem Fall wird ein Skript geschrieben, in dem zum Zeitpunkt 500s nach Einschalten der Espressomaschine ein Espresso bezogen wird. Dies wird realisiert durch eine 20sec andauernde Absenkung der Temperatur um $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Dies ist ein willkürlicher Wert, um die qualitativen Auswirkung eines Espresso bezugs zu verdeutlichen. Es wird empfohlen die tatsächlichen Auswirkungen auf die Temperatur messtechnisch zu bestimmen, um so ein reproduzierbareres Ergebnis zu erzielen.

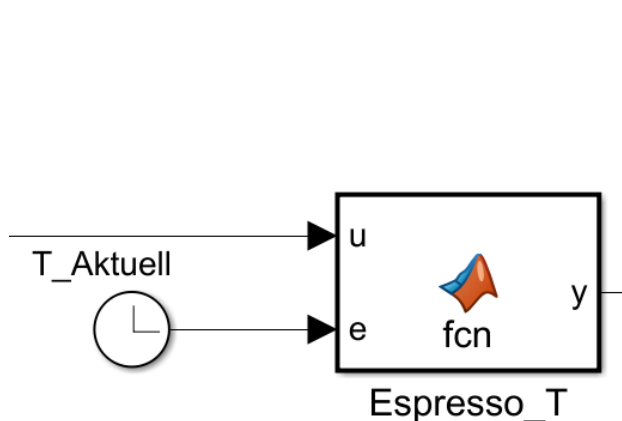


Abbildung 16 Blockschaltbild des Espresso bezugs

```
function y = fcn(u,e)

y = u;

if e >500 && e<5020
    y = u - 1;
end

end
```

Abbildung 17 Skript zur Umsetzung des Espresso bezugs

Da das Volumen des Wassers in den Boilern als konstant angenommen werden kann, macht es Sinn den Espresso Bezug durch eine einfache Herabsenkung der Temperatur im Boiler anzunehmen. Für den Kaffeeboiler wird das nachfließende Wasser im Vorheizboiler vorgeheizt. Deshalb wird die Herabsenkung der Temperatur als verschwindend gering angesetzt. Im Vorheizboiler jedoch hat das nachfließende Wasser annähernd Raumtemperatur. So lässt sich vermuten, dass trotz des größeren Boiler Volumens der Espresso Bezug Auswirkungen auf die Temperatur im Boiler hat.

8.5. Simulink Gesamtsystem

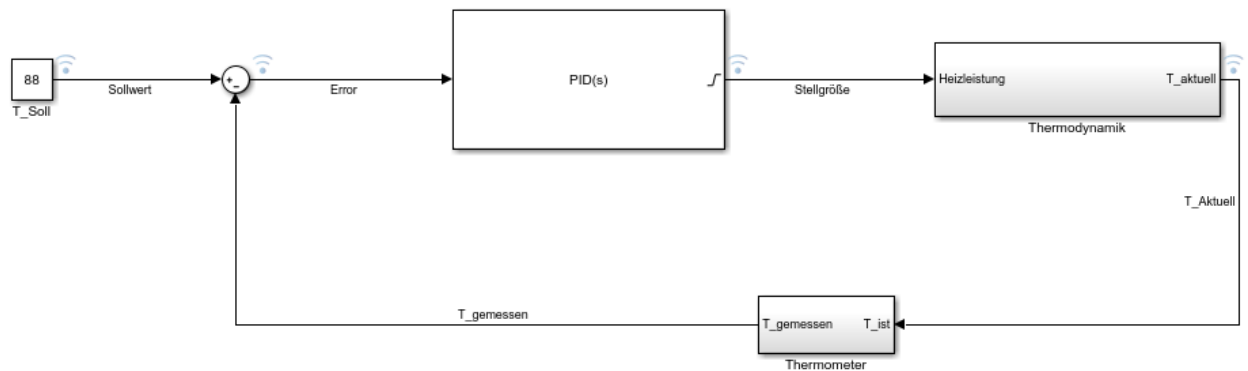


Abbildung 18 Simulink Gesamtsystem

Das Simulink Gesamtsystem besteht aus den zuvor erklärten Einzelbausteinen. Der Sollwert des Kaffeeboilers beträgt 88°C. Die Differenz aus Sollwert und gemessenen Wert wird als Eingang in den PID-Regler übergeben. Ausgang des Reglers ist eine spezifische Heizleistung von 0-1400W die sich je nach Höhe der Leistung unterschiedlich stark auf die Ist-Temperatur auswirken.

Die Übertragung des Kaffeeboilers auf die anderen Boiler erfolgt lediglich über eine Anpassung des Soll-Werts, und der Masse des Wassers & des Boiler Materials.

8.6. Ergebnisse der Simulation

Die folgenden Graphischen Veranschaulichungen dienen lediglich als qualitative Darstellung und müssen bevor sie als vollständig reproduzierbar angenommen werden, messtechnisch validiert werden.

8.6.2. Aufheizzeit

Bei Betrachtung der Aufheizzeit wird relativ früh in der Projektarbeit deutlich, dass man verschiedene Zustände zu betrachten hat.

Zum einen kann man die Aufheizzeit betrachten bis zu dem Zeitpunkt, wo die maximale Wassertemperatur 88°C besitzt. Diese wird messtechnisch bestimmt und beträgt für den Kaffeeboiler 84 sec. Zum anderen kann man die Aufheizzeit so interpretieren, dass die Durchschnittstemperatur 88°C beträgt. Da der reale Fall zwischen den beiden Zuständen liegt, ist es extrem schwierig eine reproduzierbare Aussage über die von der Lage im Boiler abhängigen Temperaturen zu treffen. Die

Darstellung der maximalen Temperatur ist im Gegensatz dazu sehr einfach umzusetzen, da hierfür die spezifischen Werte zu Verfügung stehen.

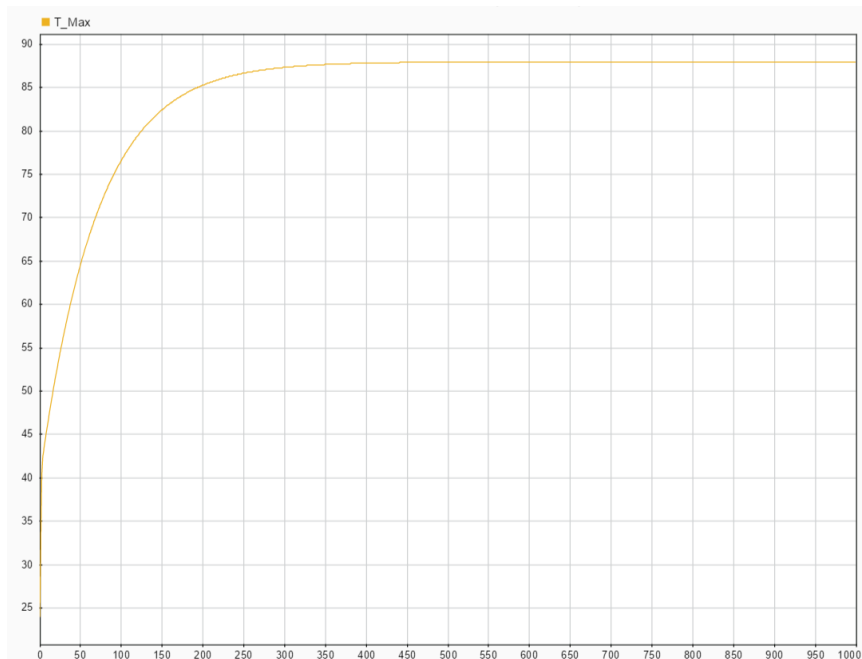


Abbildung 19 Maximale Wassertemperatur über der Zeit

Für die Simulation der Durchschnittstemperatur wird die errechneten Aufheizzeiten mit einem Anwendungsfaktor versehen. Eine gewisse Schichtung ist nie zu beheben und der Boiler erreicht zu einem späteren Zeitpunkt als das Wasser die gewünschte Temperatur. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die reelle Aufheizzeit niedriger ist als die exakt berechnete Zeit.

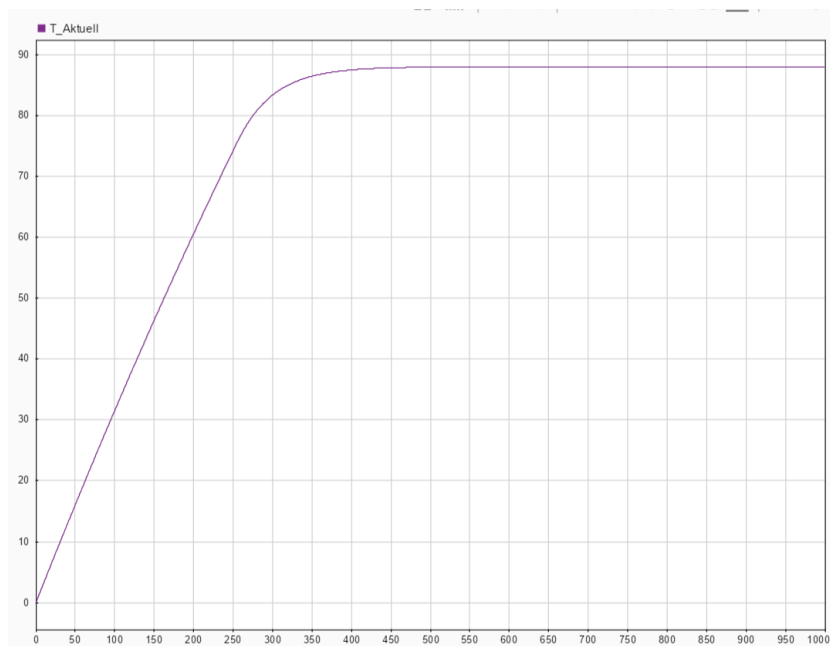


Abbildung 20 Durchschnittstemperatur über die Zeit

Wie schon erwähnt, hat ein Espresso bezug aufgrund des Vorheizboilers wenig Auswirkungen auf die Temperatur im Kaffeeboiler. Das Folgende Diagramm zeigt (rein qualitativ) die Auswirkungen eines Espresso bezugs auf den Vorheizboiler.

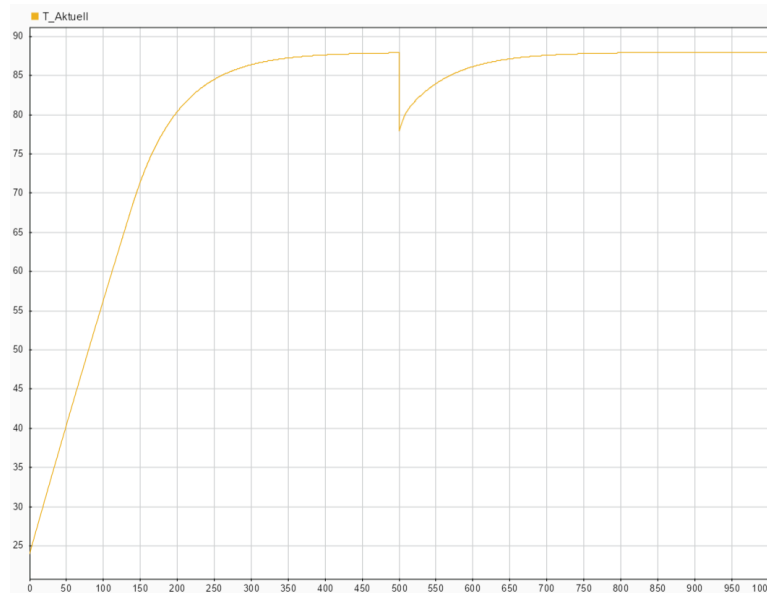


Abbildung 21 Auswirkung eines Espresso bezugs auf den Boiler

Wie in Abb. 22 zusehen ist erreicht man durch einen Zweipunktregler schneller die gewünschte Betriebstemperatur. Aufgrund der Hysterese ist aber mit starken Temperaturschwankungen zu rechnen. Im Gegensatz dazu wird die Temperatur mit dem PID-Regler durch einen konstanten Wärmestrom konstant gehalten.

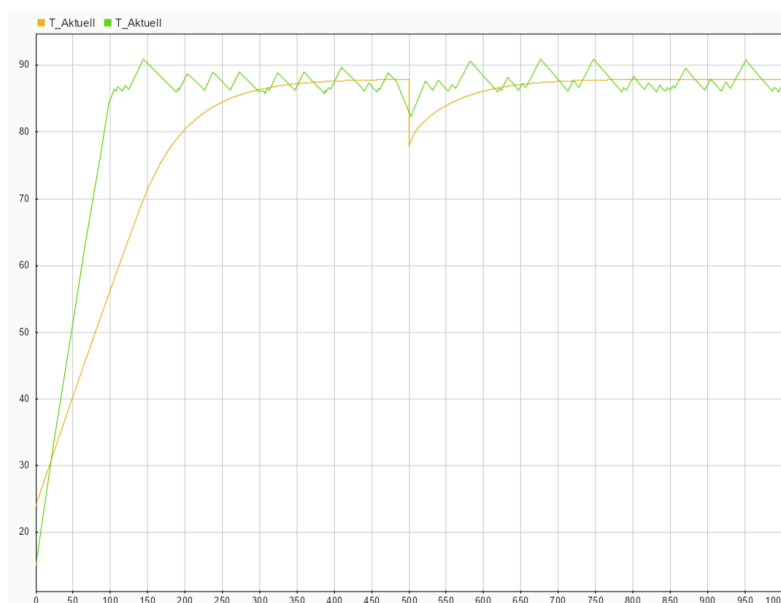


Abbildung 22 Vergleich Temperatur Zweipunktregler(grün) mit Temperatur PID-Regler(gelb)

Abbildung 23 zeigt die Leistung des Heizelements über die Zeit. Wie zu erwarten erfolgt der Leistungsbezug mit dem Zweipunktregler in Stufenform. Wird ein PID-Regler verwendet wird eine konstante Leistung von der Heizspule bezogen.

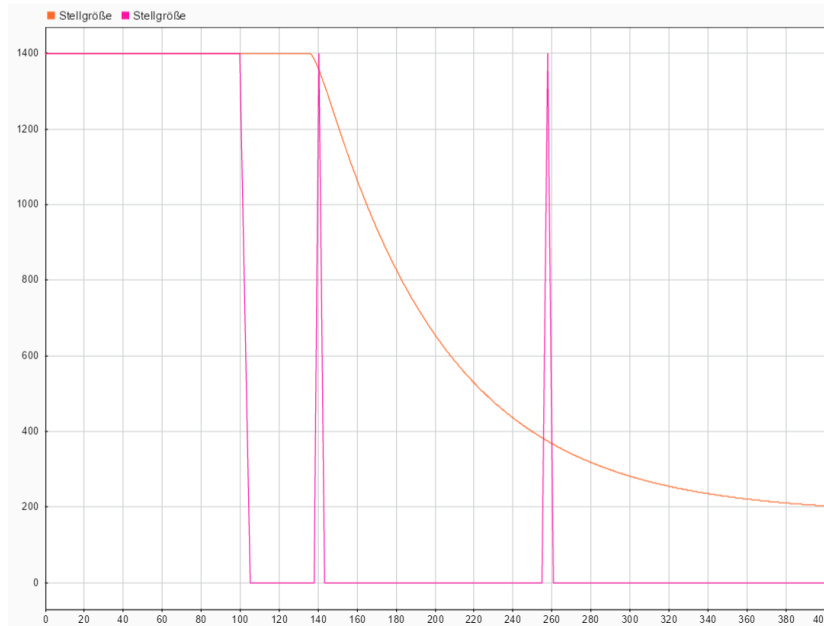


Abbildung 23 Vergleich Leistung Zweipunktregler (rosa) PID-Regler (orange)

9. Fazit

Abschließend lässt sich feststellen, dass während der Projektarbeit eine Verschiebung des Schwerpunkts vollzogen wird. Die Thermodynamik im Boiler wurde leichter eingeschätzt, als sie sich letztlich herausstellte. Deshalb ist das Simulink Modell in der von uns erstellten erste Version mehr als qualitative Veranschaulichung gedacht. Es wird sich mehr auf die Thermodynamik im Boiler und die Schichtung konzentriert. Die von uns erstellte erste Version des thermodynamischen Systems kann durch weitere Messungen noch reproduzierbarer gemacht werden. Trotzdem können einige Aussagen durch die Versuche und das Modell getroffen werden.

Im ersten Prototyp wird mit einem Zweipunktregler die Wassertemperatur im Boiler geregelt. Dieser wird durch Absprache mit Herrn Rohnen durch einen PID-Regler ersetzt. So werden die Lebenszeit der Heizspule und dadurch die allgemeine Qualität der Espressomaschine gesteigert. Zudem wird die von uns entdeckte fehlerhafte Schweißnaht am Boiler noch nachträglich bearbeitet, sodass sie den Ansprüchen genügt. Besonders durch die große Leistung der 4 Spulen in den Boilern, macht es Sinn die Boiler nach außen zu Isolieren. Durch eine geeignete Isolation um die Boilerwand kann der Wirkungsgrad erhöht und somit der Gesamtstromverbrauch der Kaffeemaschine gesenkt werden. Da eine sehr hohe Qualität der Espressomaschine angestrebt wird, sollte der Gesamtwirkungsgrad nicht vernachlässigt werden.

Für das Teewasser wird ein Bezug von unten empfohlen. Besonders durch unseren Versuch wird uns klar wie extrem die Schichtung in einem Boiler auftreten kann. Im Extremfall ist es möglich, dass das Thermometer einen Wert von 88°C an den Controller weiter gibt, aber an der untersten Stelle eine tatsächliche Wassertemperatur von knapp 30°C herrscht. Um den Fall eines kalten Tees auszuschließen empfiehlt es sich, dass Thermometer an die Stelle des Wasserbezugs zu legen.

Die Brühgruppe wird aktuell mit einer Heizpatrone beheizt. Durch einen zusätzlichen Heißwasserdurchfluss wird sich die Gesamtaufheizzeit der Siebträger Espressomaschine deutlich verringern.

Zuletzt sollte noch erwähnt werden, dass thermodynamische Berechnungen und Simulationsmodelle zwar für Konzeptideen sehr hilfreich sind, jedoch oft ein realer Versuch deutlichere Erkenntnisse bewirkt. Besonders mögliche Nachteile verschiedener Konzeptideen können durch reale Versuche am besten bestimmt werden.

10. Literaturverzeichnis

- [IngenKurs] Ingenieurkurse: Wärmeleitung durch eine zylindrische Wand
<https://www.ingenieurkurse.de/waermeuebertragung-waermeleitung/waermeleitung-in-einem-feststoff/stationaere-waermeleitung/waermeleitung-durch-eine-zylindrische-wand.html>
 zuletzt aufgerufen am 19.05.2018
- [Regellng] Serge Zacher Manfred Reuter: Regelungstechnik für Ingenieure Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen, Springer Vieweg, 2017
- [Kaffee] Kaffee24: Faszination Espresso: Siebträger, Espressomaschine und Espressoautomat kurz erklärt
<https://www.kaffee24.de/espressomaschine?p=1>
 zuletzt aufgerufen am 19.05.2018 Bild auf dem Deckblatt
- [Thermo] Prof. Dr. Diane Henze: Thermodynamik / Wärmeübertragung Hochschule München SS18

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Aufbau der Siebträger Espressomaschine	9
Abbildung 2 Foto des Kaffeeboilers	14
Abbildung 3 PT100 Sensor.....	14
Abbildung 4 Messpunkte am Kaffeeboiler	15
Abbildung 5 Data-Logger und PT100.....	15
Abbildung 6 Temperaturverlauf der Messung im Kaffeeboiler über der Zeit.....	17
Abbildung 7 Aufheizkurve der Messung im Kaffeeboiler	19
Abbildung 8 Abkühlkurve der Messung im Kaffeeboiler.....	20
Abbildung 9 Temperaturgefälle am Hohlzylinder	28
Abbildung 10 Skript als Zweipunktregler	31
Abbildung 11 Blockschaltbild des Zweipunktreglers.....	31
Abbildung 12 Blockschaltbild des PID-Reglers	31
Abbildung 13 Detaillierte Ansicht des PID-Reglers.....	31

Abbildung 14 Realisierung im Submodell des Thermometers	33
Abbildung 15 Blockschaltbild des Thermometers.....	33
Abbildung 16 Blockschaltbild des Espressobezugs.....	34
Abbildung 17 Skript zur Umsetzung des Espressobezugs	34
Abbildung 18 Simulink Gesamtsystem	35

12. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Gemessene Werte	18
Tabelle 2 Temperaturwerte für ausgewähltes Zeitfenster	20
Tabelle 3 Konzeptbewertung	25
Tabelle 4 Formeln für die Wärmeenergie	28