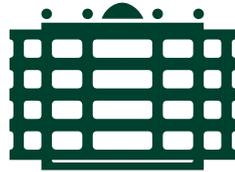


Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

MASTERARBEIT

Prozesssteuerung für eine vollautomatische Sinteranlage zur
Wärmebehandlung von 3D-gedruckten Körpern aus Metall und
Keramik

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science

vorgelegt von: Geidel, Maximilian
im Studiengang: Regenerative Energietechnik
Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner
Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) Johannes Rudolph
Tag der Abgabe: 16.01.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Aufgabenstellung

zur

Abschlussarbeit
im Studiengang Master Regenerative Energietechnik

für

Herrn Maximilian Geidel
geb. am 17. Dezember 1992 in Chemnitz

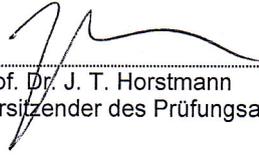
zum Thema

**Prozesssteuerung für eine vollautomatische Sinteranlage zur
Wärmebehandlung von 3D-gedruckten Körpern aus Metall und Keramik**

(ausführliche Aufgabenstellung siehe Rückseite)

Betreuer/ Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner
Prüfer: Dipl.-Ing. (FH) Johannes Rudolph
Ausgabedatum: 18.08.2016
Abgabedatum: 25.01.2017
Tag der Abgabe:

Unterschrift:


Prof. Dr. J. T. Horstmann
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Ausführliche Aufgabenstellung:

In modernen Produktionsprozessen gewinnt der 3D-Druck immer mehr an Bedeutung. Besonders kunststoffbasierte 3D-Drucker sind heute weit verbreitet und haben auch im privaten Hobbybereich eine zunehmend größer werdende Anzahl von Anwendern gefunden. Sollen hingegen Metalle und Keramiken oder Kombinationen dieser Materialien mit Hilfe eines dreidimensionalen Druckverfahrens zur Herstellung solider Körper eingesetzt werden, ist nach dem eigentlichen Druckvorgang ein anschließender Sintergang erforderlich, bei dem die gedruckten Teile zu einem festen Körper verschmelzen. Da sich diese Wärmebehandlung signifikant auf die späteren mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften auswirkt, ist eine hohe Kontrollier- und Reproduzierbarkeit des Sintervorgangs unerlässlich.

Thema der Masterarbeit ist es daher eine Softwaresteuerung auf LabView-Basis zu entwerfen, die den kompletten Prozess der Wärmebehandlung steuert und überwacht. Grundlage dafür ist ein vorhandener Sinterofen, der auch einen Betrieb unter Schutzatmosphäre erlaubt. Neben der Erstellung der Steuerungssoftware ist die Auswahl und Inbetriebnahme entsprechender Hardware, wie Messkarten und Sensoren, Teil der Arbeit. Wesentliche Zielstellungen der Arbeit sind:

Aufgabe Steuerung:

- Messung von Kammertemperatur
- Regelung von Kammertemperatur
- Einhalten vorgegebener Temperaturkurven und Haltezeiten
- Anschluss an Ofen über Leistungsteil
- Ansteuerung von Magnetventilen (öffnen und schließen)
- Ansteuerung von Vakuumpumpe
- Messung Druck/Unterdruck (mehrere)

Softwareanforderungen:

- Anzeige Ist- und Sollwerte
- Grafische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Istwerte (Temperatur, Einschaltzeiten für Ventile und Pumpe)
- Grafische Anzeige der eingegebenen Temperaturkurve und der Drücke
- Netzwerkanbindung (Abruf der Grafischen Oberfläche die am Steuerungsrechner zusehen ist vom Bürocomputer aus.)
- Möglichkeit der Planung von Prozessen (z.B. Beginn des Sintervorgangs um Mitternacht damit am nächsten Tag die Ergebnisse begutachtet werden können)
- Speicherung von Temperaturkurven und Ansteuervorgängen an Ventilen und Pumpen als Job (Prozesswiederholung)
- Wenn möglich als ausführbares Programm
- Modularer erweiterbarer Aufbau

Hardwareanforderungen: (hängen von Umsetzung ab)

- Min. 4 analoge Eingänge
- Digitale Eingänge
- Netzwerkschnittstelle
- Wenn möglich analoge Ausgänge
- Digitale Ausgänge

Die fertige Steuerung ist am Versuchsstand zu testen. Mit Hilfe exemplarischer Sintervorgänge ist die Funktionalität der Software und der Hardware nachzuweisen.

Inhaltsverzeichnis

Bibliografische Beschreibung und Kurzreferat	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Formelzeichenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Hinführung zum Thema	1
1.2 Aufgabenstellung	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Fertigungsverfahren	2
2.1.1 3D-Druck	2
2.1.2 Sintern	4
2.2 Steuerungs- und Regelungstechnik	7
2.2.1 Phasenanschnittsteuerung	7
2.2.2 Zweipunktregelung	8
2.2.3 Einschleifiger Regelkreis	9
2.2.4 Regeleinrichtungen	10
2.3 Messtechnik	14
2.3.1 Thermoelement	14
2.3.2 Piezoresistive Drucksensoren	16
2.3.3 Pyrometer	17
2.3.4 Metalloxidhalbleiter-Gassensor	18
2.3.5 Photoelektrischer Rauchsensor	18
2.3.6 Kompensationsstromwandler	18
2.4 Programmierumgebungen	20
2.4.1 LabVIEW	20
2.4.2 Arduino-Plattform	21

3	Konzeption	22
3.1	Ausgangssituation	22
3.2	Anforderungen an den Versuchsstand	23
3.3	Funktionsumfang der Sinterofensteuerung	25
3.3.1	Temperaturregelung	25
3.3.2	PID-Reglerparametrierung	26
3.3.3	Druckregelung	27
3.3.4	Prozessablaufsteuerung	27
3.3.5	Monitoring via Netzwerk	28
3.3.6	Kommunikationsfähigkeit mit externer Hardware	28
3.4	Gefahrenbeurteilung und daraus resultierende Maßnahmen	29
3.4.1	Risikobeurteilung	30
3.4.2	Definition des sicheren Zustandes	37
3.5	Softwarekonzept	38
3.5.1	Auswahl der Programmierumgebung der Prozessablaufsteuerung und der Überwachungseinheit	38
3.5.2	Auswahl der Softwarearchitektur	39
3.5.3	Schnittstellendefinition	42
3.6	Hardwarekonzept	43
3.6.1	Auswahl der Messgeräte der Prozessablaufsteuerung	43
3.6.2	Auswahl der Messgeräte der Überwachungseinheit	45
4	Umsetzung der Sinterofensteuerung	46
4.1	Herausforderung bei der Umsetzung	46
4.2	Programmierung der Prozessablaufsteuerung	47
4.2.1	Messwerterfassung, Reglerausgabe und Setzen der Ausgänge	47
4.2.2	Steuerungsalgorithmus	49
4.3	Realisierung der Reglerparametrierung	54
4.3.1	Bestimmung der Regelstrecke	54
4.3.2	Simulation des Regelkreises	56
4.3.3	Validierung der Ergebnisse	59
4.4	Umsetzung der Überwachungseinheit	60
4.5	Bedienoberfläche	62
4.5.1	Initialisierung	63
4.5.2	Monitoring	65
4.5.3	Manueller Bedienmodus	65
4.5.4	Automatischer Bedienmodus	66

5	Nachweis der Funktionstüchtigkeit	68
5.1	Funktionstüchtigkeit der Prozessablaufsteuerung	68
5.1.1	Definition der Versuchsreihe	68
5.1.2	Auswertung der Versuchsreihe	69
5.2	Funktionstüchtigkeit der Überwachungseinheit	70
6	Zusammenfassung	71
7	Ausblick	73
	Literaturverzeichnis	74
A	Anhang	78
A.1	Prozessablaufsteuerung	78
A.1.1	Hinweise	78
A.1.2	Beispiel eines Logfiles	78
A.1.3	Beispiel einer Konfigurationsdatei	79
A.2	Überwachungseinheit	80
A.2.1	Hinweise	80
A.2.2	Schaltplan	81
A.3	Weitere Abbildungen	82

Geidel, Maximilian:

Prozesssteuerung für eine vollautomatische Sinteranlage zur Wärmebehandlung von 3D-gedruckten Körpern aus Metall und Keramik

Masterarbeit an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Chemnitz, Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe, Chemnitz, 2017

73 Seiten, 58 Abbildungen, 4 Tabellen, 6 Anlagen, 27 Quellen

Kurzreferat

Am Lehrstuhl „Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe“ der Technischen Universität Chemnitz wurde ein Verfahren entwickelt, das die Erstellung von Prototypen aus Keramik und Metall mittels 3D-Druck und einem anschließenden Sintervorgang ermöglicht. Die mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Werkstückes werden während des Sintervorganges maßgeblich durch die verwendeten Sinterzeiten, Temperaturen und den Druck innerhalb des Sinterofens beeinflusst. Um Prototypen mit konstanter Qualität und gleichbleibenden Eigenschaften herzustellen, ist die Automatisierung des Prozesses notwendig. Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Konzeptionierung und Umsetzung eines Versuchsstandes für automatisierte Sinterprozesse. Dabei wird eine Risikobeurteilung durchgeführt, um entsprechende Maßnahmen für einen sicheren Betrieb des Versuchsstandes zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang findet die Entwicklung und Umsetzung einer Überwachungseinheit statt, die das Verhalten der Ofensteuerung und die Parameter des Ofens überwacht. Basierend auf dem entwickelten Versuchsstand können weitere Untersuchungen und Tests des Verfahrens durchgeführt werden.

At the Chair of „Electrical Energy Conversion Systems and Drives“ at the Technical University of Chemnitz, a process was developed that allows the creation of prototypes from ceramics and metal using 3D printing and a subsequent sintering process. The mechanical, electrical and magnetic properties of the workpiece are influenced by the sintering times, temperatures and pressure within the sintering furnace during the process. The automation of the process is necessary in order to produce prototypes with constant quality and consistent properties. This master thesis deals with the conception and implementation of a test stand for automated sintering processes. A risk assessment is carried out in order to ensure appropriate measures for safe operation of the test stand. In this context, the development and implementation of a monitoring unit, which monitors the behavior of the oven control and the parameters of the furnace, is implemented. Further investigations and tests of the method can be carried out based on the developed test stand.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Ablaufdiagramm des 3D-Druckprozesses	2
2.2	Abhängigkeit der Kontur von der Anzahl der Dreiecke (aus: [Geb13])	3
2.3	Zur Erstellung des Grünkörpers genutzter 3D-Drucker	3
2.4	Gesinterte 3D-Druckmodelle aus Eisen und Kupfer	4
2.5	Sinterprozess in einem Durchlaufofen (aus: [Klo15])	5
2.6	Innerhalb der Arbeit verwendeter Sinterofen	6
2.7	Prinzip der Phasenanschnittsteuerung	7
2.8	Zweipunktregelung mit sinusförmiger Strom-Sollwertkurve (in Anlehnung an: [Mic11])	8
2.9	Funktionsprinzip des einschleifigen Regelkreises (in Anlehnung an: [Lun14]) . .	9
2.10	Sprungantwort des P-Reglers (aus: [Bei13])	10
2.11	Sprungantwort des I-Reglers (aus: [Bei13])	11
2.12	Sprungantwort des PI-Reglers (aus: [Bei13])	11
2.13	Sprungantwort des PD-Reglers (aus: [Bei13])	12
2.14	Anstiegsantwort des PD-Reglers (aus: [Bei13])	13
2.15	Sprungantwort des PID-Reglers (aus: [Bei13])	13
2.16	Veranschaulichung des Seebeck-Effektes	15
2.17	Verschaltung der Piezowiderstände zur Messbrücke (aus: [Hon02])	16
2.18	Aufbau eines Pyrometers (aus: [Sch14])	17
2.19	Aufbau des Messkopfes (aus: [Sch14])	17
2.20	Prinzip des Streulichtrauchmelders (aus: [Tra15])	18
2.21	Darstellung des Halleffektes (aus: [Sch14])	19
2.22	Prinzipschaltung des Kompensationsstromwandlers(aus: [LEM15])	19
2.23	Beispiel zur Funktionsweise von LabVIEW	21
2.24	Arduino Uno R3-Board [Ard16]	21
3.1	Versuchsaufbau mit manueller Bedienung vor der Automatisierung	23
3.2	PID-Tune Funktion von Matlab/Simulink	26
3.3	Schema der Risikobeurteilung	30
3.4	Gefahrenbeurteilung mittels geeignetem Toolkit, Produktinformation	32
3.5	Gefahrenbeurteilung mittels geeignetem Toolkit, erste Seite	33

3.6	Gefahrenbeurteilung mittels geeignetem Toolkit, zweite Seite	34
3.7	Festlegung der notwendigen Sicherheitsmaßnahmen	35
3.8	Einschätzung der Gefahr mithilfe von „Safeexpert“ - Risikobeurteilung vor und nach Einbeziehung der ersten Schutzmaßnahme	36
3.9	gewählte Softwarearchitektur der Prozessablaufsteuerung	39
3.10	Ablaufplan der Steuerungsroutine	40
3.11	Flussdiagramm des automatischen Bedienmodus	41
3.12	Softwarearchitektur der Überwachungseinheit	42
3.13	Komponenten der Überwachungseinheit, von links nach rechts: Arduino Mega, Ethernet-Shield, Relaiskarte, DS18B20 in Edelstahlgehäuse, Gassensor und Pyrometer	45
4.1	in LabVIEW hinterlegter PID-Regler	47
4.2	Ablaufdiagramm der parallelen Schleife zur Messwerterfassung, Reglerausgabe und zum Setzen der Ausgänge	48
4.3	Beschreibung der Sollwertkurve über einzelne Punkte	49
4.4	Berechnung der Zwischenwerte aus den Eckdaten	50
4.5	Unterprogramm zu Validierung der Eingabedaten	50
4.6	Überprüfen der Events auf Überlagerungen	51
4.7	Einbettung des Screenshots in eine selbstaktualisierende HTML-Seite	52
4.8	Webservice zur Erstellung des Stopbefehls	53
4.9	Authentifizierung des Benutzers zum Stoppen des Versuchsstandes	53
4.10	Gemessene Sprungantwort und Regression der Sprungantwort	55
4.11	Simulation der Sprungantwort in Simulink	56
4.12	Vergleich der simulierten mit der realen Sprungantwort	57
4.13	Simulation des Regelkreises in Simulink	57
4.14	Temperatur- und Stellgrößenverlauf der Regelung mit den ermittelten Parametern	58
4.15	Simulation des Temperaturverlaufes eines Sinterprozesses	58
4.16	Vergleich zwischen Simulation und realem Verhalten der Regelung	59
4.17	Auslesen der Messwerte der Überwachungseinheit	61
4.18	Versuchsaufbau der Überwachungseinheit	62
4.19	Darstellung des Initialisierungs-Reiters der Benutzeroberfläche	64
4.20	Darstellung der Oberfläche zur manuellen Bedienung	65
4.21	Darstellung der Oberfläche zur automatischen Sollwertvorgabe	66
A.1	Ersatzcodes für Anmeldung im Gmail-Account	80
A.2	Schaltplan der Überwachungseinheit	81
A.3	Einschwingvorgang der Temperatur auf 750 °C	82
A.4	Vergrößerte Darstellung der Messwerte nach Abschluss des Einschwingvorganges	82

Tabellenverzeichnis

3.1	Typische Gefahrenarten und zugehörige Beispiele (in Anlehnung an: [Kre15])	31
3.2	Übersicht der verwendeten Geräte und ihrer Schnittstelle	43
3.3	Auswahl möglicher Messgeräte	44
5.1	Test der Funktionstüchtigkeit der Überwachungseinheit	70
A.1	Beispiel für ein Logfile	79
A.2	Beispielkonfigurationsdatei zum Sintern von Eisen	79

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Arduino-IDE	Arduino integrated development environment
AMS	Ausmaß des Schadens
C	Kapazität
CAD	computer-aided design (computergestützte Konstruktion)
COM-Port	Communication port
CSV	Comma-separated values
Di	Diac
EWS	Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
I-Regler	Integral-Regler
IR	Infrarot
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LED	light-emitting diode
P-Regler	Proportional-Regler
PI-Regler	Proportional-Integral-Regler
PD-Regler	Proportional-Differential-Regler
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
R	Widerstand
SD-Karte	Secure Digital Memory Card
STL-Format	Stereolithographie-Format
T	Triac
USB	Universal Serial Bus
VI	virtuelle Instrumente

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$d(t)$	-	Störgröße
$e(t)$	-	Regelabweichung
I	A	Strom
i_{ist}	A	Iststrom
i_{max}	A	maximaler Strom
i_{soll}	A	Sollstrom
K_D	$\frac{V \cdot s}{K}$	Differenzierbeiwert
K_{IR}	$\frac{V}{K \cdot s}$	Integralbeiwert
K_{PR}	$\frac{V}{K}$	Proportionalbeiwert
T	s	Periodendauer
t_a	s	Verzögerungszeit des Einschaltzeitpunktes
T_n	s	Nachstellzeit
T_v	s	Vorhaltzeit
$u(t)$	-	Stellgröße
U	V	Spannung
$u_R(t)$	-	am Prozess wirksame Größe
$w(t)$	-	Führungsgröße
$y(t)$	-	Regelgröße
$y_m(t)$	-	gemessene Regelgröße
$\alpha_{1,2}$	$\frac{V}{K}$	Seebeckkoeffizient der Materialien 1 und 2
ΔI	A	Breites des Toleranzbandes des Stromes
ΔT	K	Temperaturunterschied
τ	s	Zeitkonstante

1 Einleitung

1.1 Hinführung zum Thema

Zur schnellen Erstellung von Prototypen gewinnt der 3D-Druck fortwährend an Bedeutung. Sowohl in der Industrie als auch im Hobbybereich sind 3D-Drucker zunehmend verbreitet, wobei meist Kunststoffe verarbeitet werden. Für ingenieurtechnische Anwendungen ist auch die Erforschung des Druckens von Keramiken und Metallen interessant. Um diese Werkstoffe nach dem Drucken zu verfestigen, ist es notwendig, die gedruckten Modelle zu sintern. Die verwendeten Parameter beeinflussen die mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Werkstückes erheblich. Aus diesem Grund ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Parameter des Sintervorganges notwendig, um Werkstücke mit definierten und reproduzierbaren Eigenschaften herzustellen. Einsatzgebiete für dieses Verfahren sind zum Beispiel die Luft- und Raumfahrt, der Sondermaschinenbau oder die Prototypenentwicklung, da in diesen Anwendungsbereichen Bauteile mit speziellen Eigenschaften in einer niedrigen Stückzahl benötigt werden. Zukünftig vorstellbar ist auch das gleichzeitige Drucken mehrerer Materialien in einem Arbeitsgang. So wäre es beispielsweise möglich, in einem Elektroantrieb gleichzeitig die Leiter aus Kupfer und die Isolation aus Keramik zu drucken. [Tec16]

1.2 Aufgabenstellung

Zum Erreichen der notwendigen Reproduzierbarkeit wird innerhalb dieser Masterarbeit ein Versuchsstand zur Steuerung des Sinterofens, der Regelung der Kammertemperatur und der Ansteuerung der Peripheriegeräte entworfen. Gefordert ist zusätzlich eine Visualisierung aller Parameter des Sinterverlaufes, Netzwerkanbindung zur Fernüberwachung des Versuchsstandes sowie die Speicherung eines Prozessablaufes zur späteren Wiederholung und die Planung von künftigen Prozessabläufen. Den Abschluss der Arbeit bildet die erfolgreiche Inbetriebnahme des Versuchsstandes. Die gesamte Programmierung erfolgt modular, so dass zukünftige Änderungen unkompliziert einzupflegen sind. Zusätzlich zur Aufgabenstellung wird ein weiterer Schwerpunkt auf die Betriebssicherheit des Versuchsstandes gelegt. Diese wird durch geeignete Maßnahmen realisiert.

2 Stand der Technik

2.1 Fertigungsverfahren

Innerhalb der Arbeit werden zur Fertigung des Werkstückes zwei Verfahren angewandt, die nachfolgend näher erläutert werden. Wie in der Einleitung dargelegt, ist das Neuartige am Fertigungsprozess die Verbindung von 3D-Druck und Sintern. Dies ermöglicht die wirtschaftliche Herstellung spezieller Bauteile in kleinster Stückzahl bei vergleichsweise geringer Fertigungszeit.

2.1.1 3D-Druck

Der 3D-Druck ist ein additives Fertigungsverfahren und beruht auf der Herstellung eines Werkstückes durch Stapelung mehrerer Materialschichten. Den additiven Fertigungsverfahren ist die direkte Erstellung eines physischen Modelles aus einem CAD-Modell gemein. Der allgemeine Ablauf des Verfahrens ist in Abbildung 2.1 dargestellt. [Fri15]

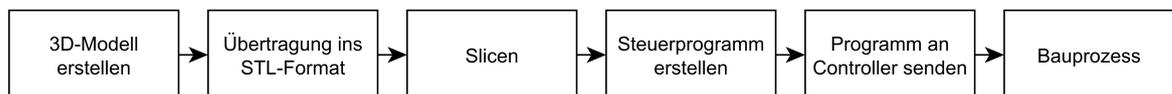


Abbildung 2.1: Ablaufdiagramm des 3D-Druckprozesses

Zu Beginn des Prozesses wird entweder aus Messwerten realer Körper oder innerhalb eines CAD-Programmes ein 3D-Modell eines Volumenkörpers erstellt. Für den Fertigungsprozess ist es notwendig, dieses Modell in mehrere Einzelschichten zu zerlegen. Dieser Vorgang wird als „slicen“ bezeichnet. Umgesetzt wird der Bearbeitungsschritt durch Triangulation der Oberfläche mit Dreiecken oder durch das direkte Schneiden der Schichten im CAD-Modell. Da eine vollständige Trennung des CAD-Modelles vom Herstellungsprozess erwünscht ist, wird die erstere Methode namens Stereolithographie (STL) bevorzugt. Das STL-Format enthält als Speicherdaten die Eckpunkte der einzelnen Dreiecke sowie die Normalenvektoren der Flächen. Die Zerlegung in Dreiecke ermöglicht beim Slicen die Berechnung der Zwischenpunkte, wenn eine Schnittebene ein Dreieck entzwei teilt. Nachteilig ist bei diesem Verfahren, dass die Kontur nur angenähert werden kann. Wie Abbildung 2.2 zeigt, ist die Genauigkeit der Annäherung

proportional zur Anzahl der Dreiecke. Folglich steht auch die Dateigröße im Verhältnis zur Genauigkeit des Modelles, was zu einem hohen Speicherbedarf führen kann. [Geb13]

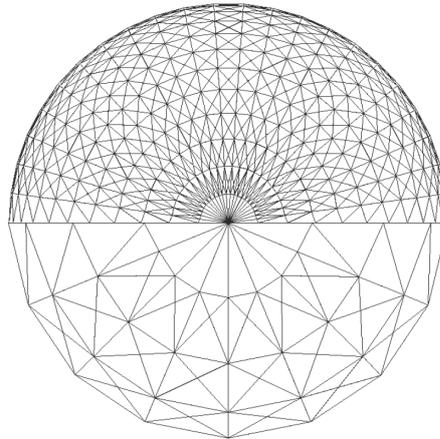


Abbildung 2.2: Abhängigkeit der Kontur von der Anzahl der Dreiecke (aus: [Geb13])

Anschließend wird aus dem Stereolithographie-Format das Maschinensteuerungsprogramm erzeugt. Im nachfolgenden Bauprozess werden abwechselnd neue Schichten in der xy -Ebene hergestellt und mit der vorherigen Schicht in z -Richtung verbunden. Im Anschluss sind je nach Fertigungsprozess und Material noch manuelle Endbearbeitungsschritte notwendig. [Awi12]

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten 3D-Druckverfahren wird mit einem Bindemittel versetztes Metall- und Keramikpulver verwendet. Der verwendete 3D-Drucker ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Das erstellte Modell dient als Grünkörper für den anschließenden Sinterprozess. Als Grünkörper wird das noch ungesinterte Werkstück mit definierter Größe, Form und Dichte bezeichnet. Er ist so dimensioniert, dass das Werkstück trotz Schwindung während des Sinterprozesses seine gewünschte Form erhält. [Sal06]

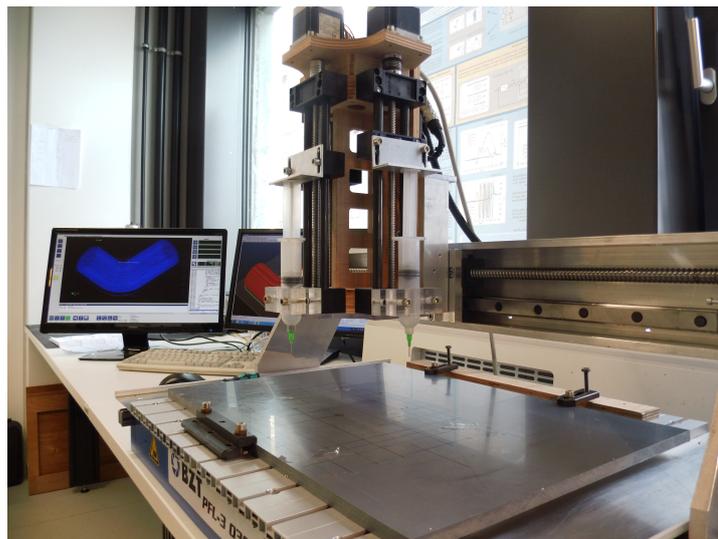


Abbildung 2.3: Zur Erstellung des Grünkörpers genutzter 3D-Drucker

2.1.2 Sintern

Sintern ist ein Prozess zur Verfestigung von Pulverteilchen innerhalb eines Bindemittels. Dabei werden die Werkstücke durch Wärmebehandlung unterhalb der Schmelztemperatur zu einem dichteren Erzeugnis verarbeitet [Sal06]. Die treibende Kraft hinter dem Prozess folgt aus der Verringerung an Grenzflächen und der daraus resultierenden Energieeinsparung [Ils10]. Die benötigte Energie für den Vorgang ist folglich schon in den Pulverteilchen enthalten und die Temperaturerhöhung dient ausschließlich dem Ingangsetzen des Materialtransportes durch Diffusionsprozesse [Sal06]. Der Prozess zeichnet sich durch Poreneliminierung, sowie Korn- und Porenwachstum aus. Der erstere Effekt führt zu einer Verkleinerung des Werkstückes während des Vorganges. Das Porenwachstum ist Folge der Vereinigung mehrerer kleinerer zu einer größeren Pore. Als Werkstoffe werden Metalle und Keramiken verwendet [Sal06]. Es existiert noch keine geschlossene Theorie zum Sintern, da es eine Vielzahl von Teilprozessen beinhaltet, die abhängig von Zeit, Temperaturen, Druck und anderen Faktoren sind [Sch06, Sal06]. In Abbildung 2.4 sind zwei gesinterte 3D-Druckmodelle exemplarisch abgebildet.

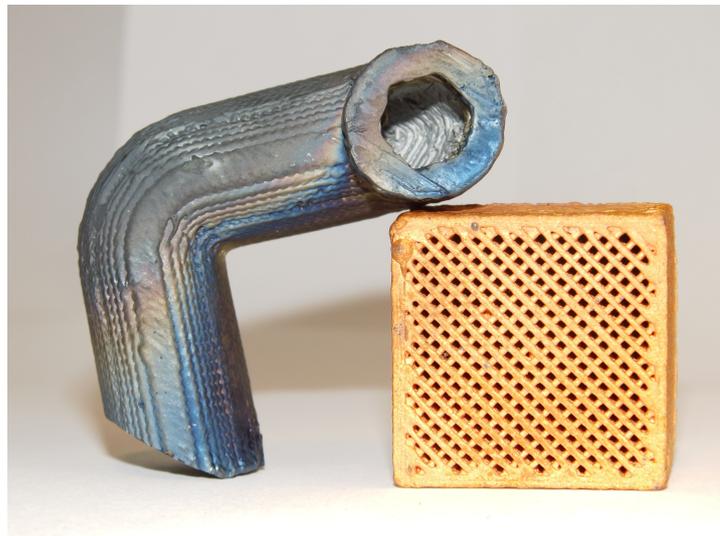


Abbildung 2.4: Gesinterte 3D-Druckmodelle aus Eisen und Kupfer

Ein allgemeiner Sintervorgang ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Er besteht aus drei Schritten: dem Aufheizen auf die Sintertemperatur, der Verweildauer auf der spezifischen Sintertemperatur, sowie der Abkühlphase. Während des Aufheizens wird auf einer Zwischentemperatur verweilt, um das Bindemittel aus dem Werkstück auszutreiben. Dieser Vorgang wird innerhalb der Arbeit als „Entbinderung“ bezeichnet. Anschließend besteht ein direkter Kontakt zwischen den einzelnen Pulverteilchen. Der Materialtransport findet während der ersten beiden Phasen des Sintervorganges statt [Sch06]. Um Wärmebehandlungseffekte zu erzielen, kann in der Abkühlphase eine beschleunigte Verringerung der Temperatur forciert werden. Ein großer

Temperaturgradient führt zu einer Härtung des Bauteils. Dieser Vorgang wird als Sinterhärtung bezeichnet. Da je nach Prozess der Kohlenstoffgehalt des Werkstückes verringert wird, ist ein weiterer möglicher Prozessschritt das Wiederaufkohlen des Werkstückes [Klo15]. Für höhere Anforderungen an das Werkstück kann ein zweiter Press- und Sintervorgang erfolgen, um die Dichte und Festigkeit nochmals zu erhöhen [Sch06].

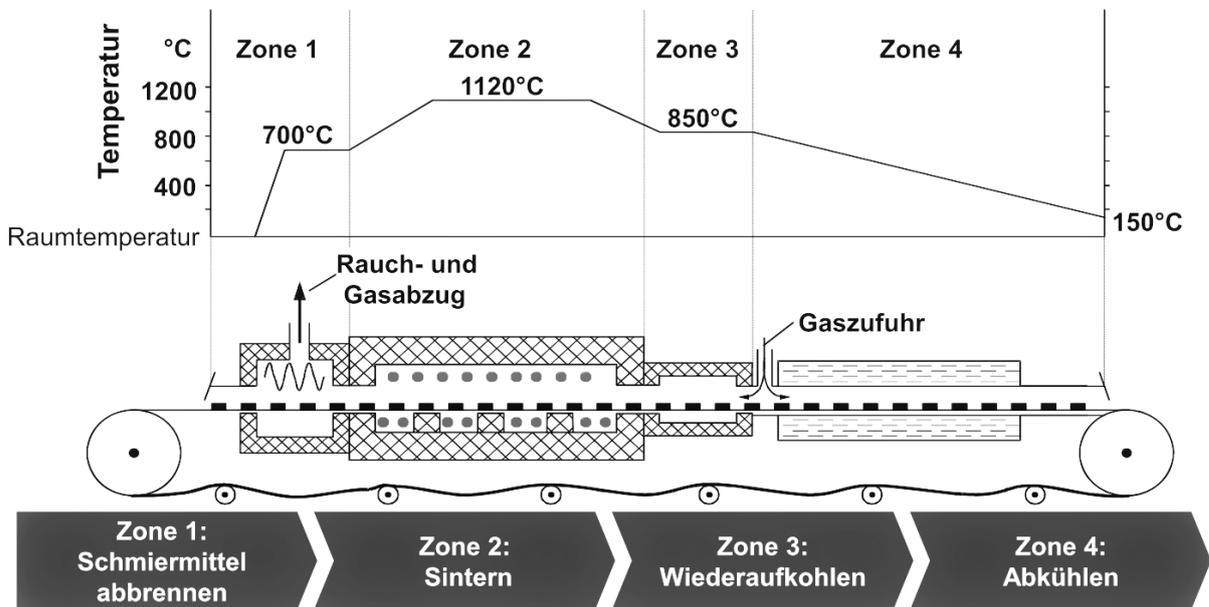


Abbildung 2.5: Sinterprozess in einem Durchlaufofen (aus: [Klo15])

Zur Qualitätssicherung und Reproduzierbarkeit der Eigenschaften des Sinterproduktes müssen laut Schatt [Sch06] folgende Parameter überwacht werden:

- Arbeitstemperatur,
- Schutzatmosphäre,
- Art der Temperaturerzeugung,
- Temperaturkurve des gesamten Sinterprozesses sowie
- Materialeigenschaften des Werkstückes.

Die oben genannte Schutzatmosphäre ist notwendig, da das Werkstück aufgrund seiner porösen Beschaffenheit eine erhöhte Tendenz zur Reaktion mit der Umgebung aufweist. Ziel des Einsatzes ist die Unterbindung von unerwünschten Oxidationsvorgängen, die den Materialtransport behindern können. Typischerweise werden zur Erzeugung der Schutzatmosphäre Wasserstoff, Stickstoff und teilverbrannte Gase verwendet. [Sch06]

In Abbildung 2.5 wurde eine mögliche Bauform eines Sinterofens dargestellt. Dabei handelt es sich um einen kontinuierlich arbeitenden Sinterofen, der bei geringem Bauraum hohe Stückzahlen ermöglicht. Die Werkstücke werden bei diesem Prinzip mit einem Transportband durch verschiedene Arbeitsbereiche bzw. Temperaturbereiche befördert. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass der Ofen nicht gasdicht ist, was zu einem erhöhten Schutzgasverbrauch führt. Des Weiteren wird das Förderband durch die hohen Temperaturen stark belastet und verschleißt dadurch schneller. [Sch06]

Da innerhalb dieser Arbeit keine Serienfertigung angestrebt wird, wurde ein periodisch arbeitender Sinterofen, dargestellt in Abbildung 2.6, für den Versuchsstand ausgewählt. Dieser besteht aus einem mit feuerfesten Steinen ausgekleideten Gehäuse, in welches radial verteilt zehn Heizwendeln vertikal eingebaut wurden. Durch Abdichtung aller Übergänge zur Umgebung, ist der Ofen gasdicht. Während der Entbinderung wird das Bindemittel mit einer Kombination aus Verdampfung bei Unterdruck und mit Überdruck des Schutzgases aus dem Sinterofen heraustransportiert indem das Ventil zur Umgebung geöffnet wird. In modernen Sinteröfen erfolgt die Temperatur- und Druckreglung vollautomatisch. [Sch06]



Abbildung 2.6: Innerhalb der Arbeit verwendeter Sinterofen

2.2 Steuerungs- und Regelungstechnik

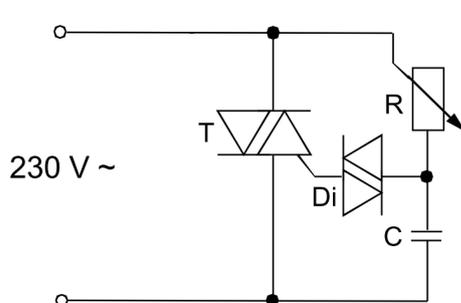
Wie in Kapitel 2.1.2 dargestellt, ist die Temperatur ein maßgeblicher Parameter des Sintervorganges. Um diese mit der nötigen Genauigkeit einzustellen, ist eine Regelung erforderlich. Diese stellt die in den Heizwendeln umgesetzte Leistung entsprechend der Solltemperatur ein.

2.2.1 Phasenanschnittsteuerung

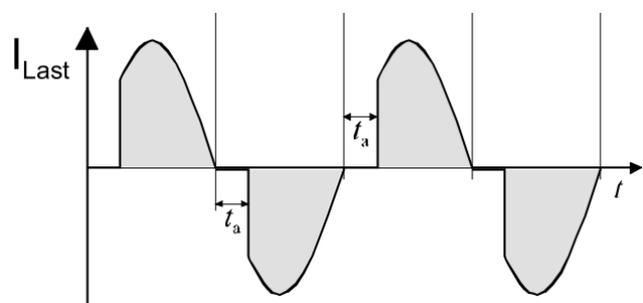
Die Phasenanschnittsteuerung ist eine Methode der Leistungsstellung. Sie beruht auf einer Thyristorschaltung, die das Halbleiterbauelement zu einem beliebigen Zeitpunkt verzögert zündet. Dadurch kommt der Stromfluss erst zustande, sobald der Zündimpuls den Thyristor in den leitenden Zustand geschaltet hat. Wie in Abbildung 2.7(b) ersichtlich, fließt der Strom erst ab dem Einschaltzeitpunkt nach der Zeitspanne t_a . Dadurch ist nach Gleichung 2.1 der Effektivwert des Stromes umso kleiner, je größer die Zeitspanne t_a ist - und damit verbunden sinkt folglich auch der Effektivwert der im Verbraucher umgesetzten Leistung. [Gir16]

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \int_0^T i(t)^2 \cdot dt} > \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \int_{t_a}^T i(t)^2 \cdot dt} \quad \text{für } t_a > 0 \quad (2.1)$$

Die zugrundeliegende Schaltung ist in Abbildung 2.7(a) dargestellt. Basis der Schaltung ist ein Diac, der den stromtragenden Triac zündet. Bei jeder Halbwelle wird der Kondensator C über den einstellbaren Widerstand R aufgeladen. Dadurch baut sich über den Anschlüssen des Kondensators eine Spannung auf. Überschreitet diese Spannung die Durchbruchspannung des Diacs, so wird dieser leitend und entlädt den Kondensator über den Triac - wodurch dieser vom Sperr- in den Leitzustand übergeht. Mit dem nachfolgenden Nulldurchgang des Stromes erlischt der Triac und muss neu gezündet werden. Der Schaltzeitpunkt ist einstellbar über den Widerstand R, der die Ladegeschwindigkeit des Kondensators bestimmt. Nachteil der Schaltung sind die starken Oberwellen durch den periodischen starken Stromanstieg, sobald der Triac leitfähig wird. Innerhalb der Arbeit wird diese Methode der Leistungsstellung zur Regulierung der Heizleistung des Sinterofens genutzt. [Gir16]



(a) Schaltung zur Phasenanschnittsteuerung
(in Anlehnung an: [Gir16])



(b) Strom- und Spannungsverlauf (in Anlehnung an: [Gir16])

Abbildung 2.7: Prinzip der Phasenanschnittsteuerung

2.2.2 Zweipunktregelung

Die Zweipunktregelung besitzt nur zwei Zustände der Stellgröße, zwischen denen gewechselt werden kann. Enthält das System einen Energiespeicher, wie zum Beispiel eine Induktivität oder eine thermische Kapazität, so ist es durch die Zeitkonstanten und ein eingestelltes Tastverhältnis¹ möglich, die Regelgröße innerhalb eines Toleranzbandes zu halten. [Mic11]

Zur Umsetzung wird der Sollwert sowie die maximal zulässige Abweichung vorgegeben, welche als Toleranz bezeichnet wird. Innerhalb dieser Grenzen wird die Regelgröße gehalten. Wird die Abweichung größer als die Toleranz, so wird zwischen den Zuständen der Stellgröße so umgeschaltet, dass die Regeldifferenz verringert wird. [Mic11]

In Abbildung 2.8 wird eine Zweipunktregelung des Stromes über eine induktive Last veranschaulicht. Dabei ist eine sinusförmige Sollwertkurve für den Strom vorgegeben. Der Stromsollwert ist mit i_{soll} gegeben und die Größe des Toleranzbandes mit ΔI . Ersichtlich ist, dass, sobald der Istwert i_{ist} des Stromes die Grenzen des Toleranzbandes überschreitet, eine Umschaltung zwischen den Zuständen der Stellgröße erfolgt. Anzumerken ist, dass bei niedriger Umschaltfrequenz der Zustände eine erhebliche Abweichung vom Sollwert auftreten kann. [Mic11]

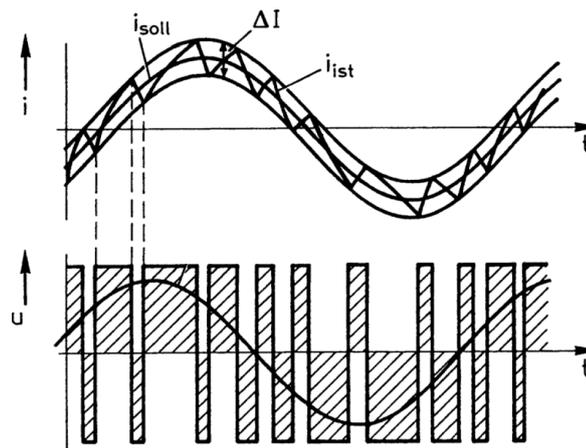


Abbildung 2.8: Zweipunktregelung mit sinusförmiger Strom-Sollwertkurve (in Anlehnung an: [Mic11])

¹ Das Tastverhältnis beschreibt das Verhältnis der Dauer des Signalimpulses zur Periodendauer. [Zac10]

2.2.3 Einschleifiger Regelkreis

Die Regelungstechnik ist ein Teilgebiet der Automatisierungstechnik und hat die gezielte Einflussnahme auf die Ausgangsgröße eines technischen Prozesses zum Ziel. Dazu wird die Ausgangsgröße gemessen und mit dem aktuellen Sollwert verglichen. Anschließend greift der Regler so in diesen Prozess ein, dass sich die Ausgangsgröße an den Sollwert angleicht. Diese Überprüfung beziehungsweise „Rückführung“ der Ausgangsgröße unterscheidet einen geregelten von einem rein gesteuerten Prozess. [Sch08]

In Abbildung 2.9 ist das Prinzip des einschleifigen Regelkreises dargestellt. Ziel der Regelung ist, dass die Regelgröße $y(t)$ möglichst genau der Führungsgröße $w(t)$ folgt, welche den Sollwertverlauf darstellt. Um dies zu erreichen, wird die Regelgröße vom Messglied erfasst. Die gemessene Regelgröße $y_m(t)$ wird anschließend mit der Führungsgröße verglichen. Die Differenz der Größen wird als Regelabweichung $e(t)$ bezeichnet und ist ein Maß dafür, wie stark der Ist- vom Sollwert abweicht. Der Regler wirkt über die Stellgröße $u(t)$ anschließend so auf das Stellglied ein, dass die Regelabweichung minimiert wird. Entsprechend der Stellgröße entsteht im Stellglied der im Prozess wirksame Wert $u_R(t)$. Über diesen Wert lässt sich die Ausgangsgröße der Regelstrecke manipulieren, die ein mathematisches Abbild der physikalischen Prozesse des zu regelnden Objektes darstellt. [Lun14]

Des Weiteren wirken auf die Regelstrecke Störgrößen ein. Diese führen zu einer unerwünschten Abweichung der Regelgröße von der Führungsgröße und müssen vom Regler kompensiert werden. [Bei13]

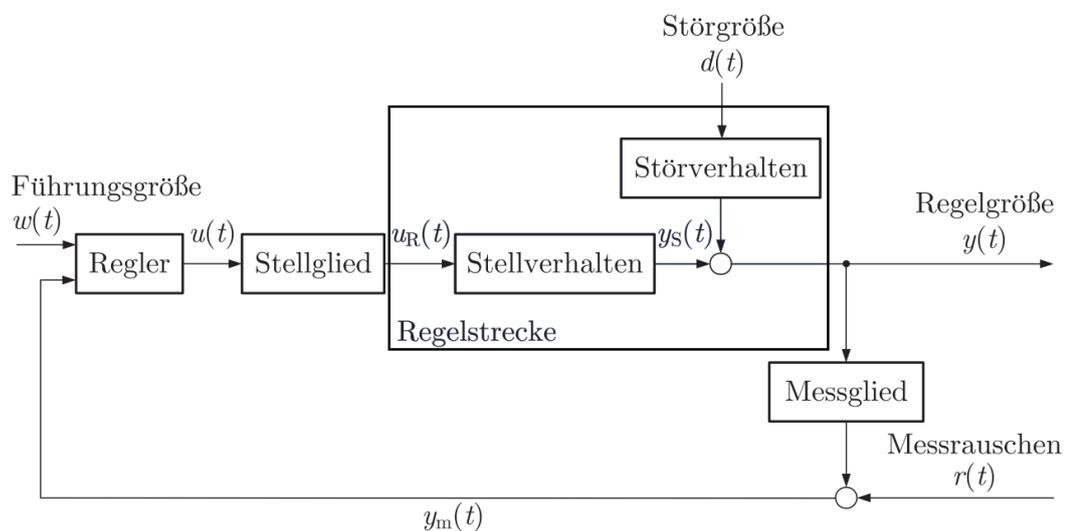


Abbildung 2.9: Funktionsprinzip des einschleifigen Regelkreises (in Anlehnung an: [Lun14])

2.2.4 Regeleinrichtungen

2.2.4.1 Der Proportional-Regler

Die Ausgangsgröße des P-Reglers ist, wie in Abbildung 2.10 dargestellt, stets proportional zur Eingangsgröße. Bei gleichbleibender Regelabweichung verläuft die Ausgangsgröße konstant über die Zeit. Mathematisch beschrieben wird der Regler durch den Proportionalbeiwert K_{PR} nach Gleichung 2.2. Der Vorteil des Reglers ist, dass die Ausgangsgröße zeitlich unverzögert der Eingangsgröße folgt. Von Nachteil ist die dauerhaft verbleibende Regelabweichung. [Bei13]

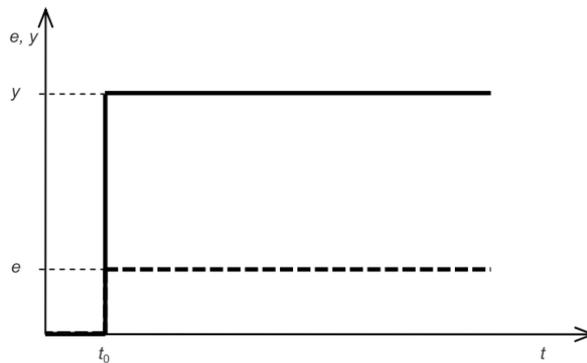


Abbildung 2.10: Sprungantwort des P-Reglers (aus: [Bei13])

$$K_{PR} = \frac{y}{e} \quad (2.2)$$

2.2.4.2 Der Integral-Regler

Wie in Abbildung 2.11 veranschaulicht wird, integriert der I-Regler die Regelabweichung über die Zeit. Daher ist die Sprungantwort des Reglers eine lineare Funktion mit konstantem Anstieg. Beschrieben wird dieser Zusammenhang durch den Integralbeiwert K_{IR} nach Gleichung 2.3. Da der Regler zu Beginn der Sprungantwort von null an zu integrieren beginnt, entsteht eine Verzögerung, bis der Regler Einfluss auf die Regelgröße nimmt. Daher wird er den langsamen Reglern zugeordnet. Vorteilhaft ist, dass der Regler solange regelt, bis die Regeldifferenz zu null wird. Er erlaubt demnach die Ausregelung von Störgrößen, so dass ein konstanter Endwert erreicht werden kann. [Bei13]

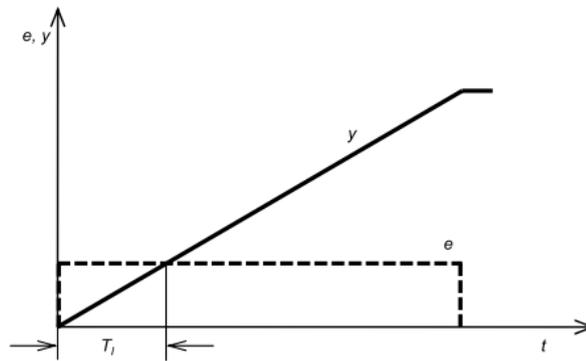


Abbildung 2.11: Sprungantwort des I-Reglers (aus: [Bei13])

$$K_{IR} = \frac{\Delta y}{e} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (2.3)$$

2.2.4.3 Der PI-Regler

Der PI-Regler in Abbildung 2.12 stellt eine Kombination aus den zwei vorherigen Reglertypen dar. Zeitgleich zur Sprungfunktion nimmt die Sprungantwort den Wert y_p an, welcher durch den zeitunabhängigen Proportionalanteil verursacht wird. Die Zeit, die ein reiner I-Regler bräuchte, um dieselbe Ausgangsgröße zu erzeugen, wird als Nachstellzeit T_n bezeichnet. Beschrieben wird diese durch Gleichung 2.4. Da sofort eine Ausgangsgröße anliegt, zählt der PI-Regler zu den schnellen Reglern. Zusätzlich kann er durch den I-Anteil die Regeldifferenz ausregeln. [Bei13]

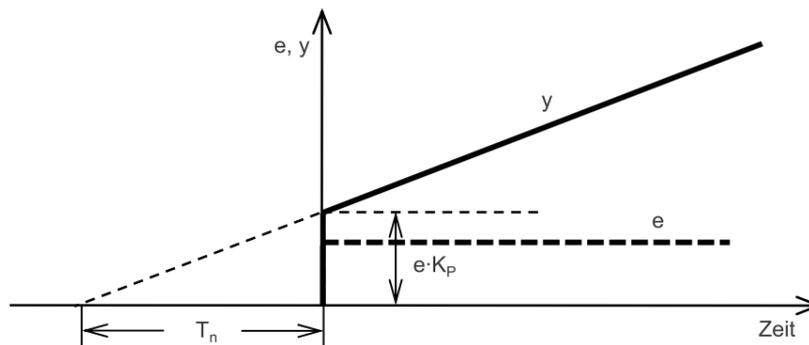


Abbildung 2.12: Sprungantwort des PI-Reglers (aus: [Bei13])

$$T_n = \frac{K_P}{K_I} \quad (2.4)$$

2.2.4.4 Der PD-Regler

Der PD-Regler in Abbildung 2.13 besitzt zusätzlich zum Proportionalverhalten noch ein differenzielles Verhalten der Ausgangsgröße. Dies bedeutet, dass der Regler eine Ausgangsgröße zu eigen hat, die proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Eingangsgröße ist. Beschrieben wird dieser Sachverhalt durch den Differenzierbeiwert K_D in Gleichung 2.5. Der Nachteil des reinen D-Reglers ist, dass nur eine Ausgangsgröße vorliegt, solange sich die Eingangsgröße verändert. Da der Regler im Anwendungsfall ausschließlich auf die Änderung der Regeldifferenz und nicht auf die Regeldifferenz reagieren würde, ist der reine D-Regler für regelungstechnische Anwendungen ungeeignet. Wird der D-Regler mit einem P-Regler kombiniert, so ergibt sich zu Beginn der Regelung eine starke impulsartige Ausgangsgröße, die auf den Anstieg der Regeldifferenz reagiert. Im Anschluss daran entsteht eine Ausgangsgröße proportional zur Eingangsgröße aufgrund des P-Anteils. [Bei13]

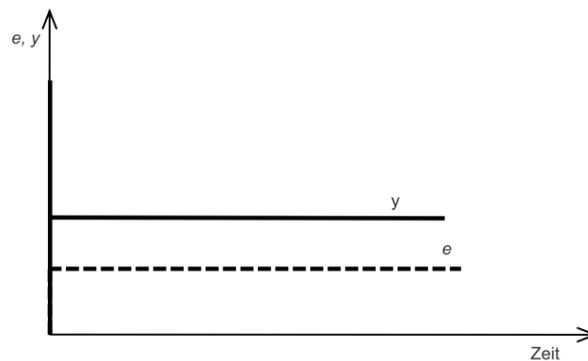


Abbildung 2.13: Sprungantwort des PD-Reglers (aus: [Bei13])

$$K_D = \frac{y}{\Delta e} \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

In Abbildung 2.14 ist die Antwort des PD-Reglers auf eine Regeldifferenz mit konstantem Anstieg dargestellt. Aus diesem konstanten Anstieg resultiert eine konstante Ausgangsgröße des reinen D-Anteils. Ersichtlich ist, dass die Ausgangsgröße y des PD-Reglers deutlich schneller anliegt als die Ausgangsgröße y_p des reinen P-Reglers. Die Zeit, die der PD-Regler schneller als der reine P-Regler ist, wird als Vorhaltzeit T_v bezeichnet. Sie gibt an, wie viel Zeit ein reiner P-Regler brauchen würde, um die selbe Ausgangsgröße wie der PD-Regler zum Startzeitpunkt zu generieren. Eine Regeldifferenz verbleibt auch bei diesem Reglertyp. [Bei13]

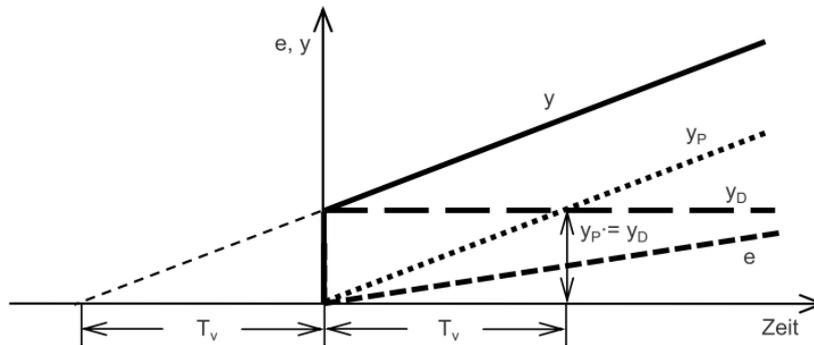


Abbildung 2.14: Anstiegsantwort des PD-Reglers (aus: [Bei13])

2.2.4.5 Der PID-Regler

Der PID-Regler kombiniert die schnelle Reaktionszeit des PD-Reglers mit der vollständigen Ausregelung der Regeldifferenz des PI-Reglers. Die Sprungantwort des realen PID-Reglers ist in Abbildung 2.15 abgebildet. Da in der praktischen Anwendung der Stellgrößenprung durch den D-Anteil zu Störsignalen führen kann, wird der D-Anteil hier durch eine Zeitkonstante verzögert. [Bei13]

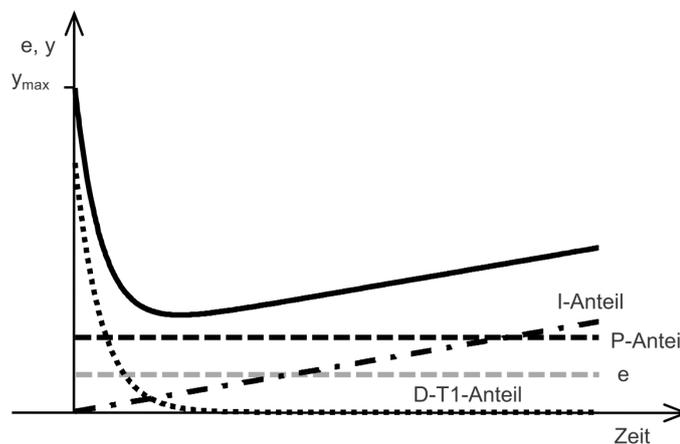


Abbildung 2.15: Sprungantwort des PID-Reglers (aus: [Bei13])

Zu Beginn der Regelung dominiert der D-Anteil in der Sprungantwort. Durch die Zeitkonstante klingt dieser über die Zeit langsam ab. Währenddessen integriert sich der I-Anteil langsam auf, bis er innerhalb der Sprungantwort zur dominierenden Größe anwächst. Vorteilhaft an diesem Regler ist die sehr schnelle Reaktionszeit und die vollständige Ausregelung der Regeldifferenz. Aufgrund der Vielzahl an Konfigurationsmöglichkeiten ist die Reglerparametrierung jedoch kompliziert. Außerdem ist der Regler in der Praxis sehr empfindlich und nicht für alle Anwendungsgebiete geeignet. Die Einstellparameter des PID-Reglers sind der Proportionalbeiwert K_p , die Nachstellzeit T_n sowie die Vorhaltzeit T_v . [Bei13]

2.3 Messtechnik

Zur Regelung der Ofentemperatur und zur Überwachung des Ofenzustandes werden verschiedene Sensoren benötigt. Daher werden in diesem Kapitel die Funktionsprinzipien und Besonderheiten der verwendeten Messtechnik näher erläutert. Verwendung finden folgende Sensoren:

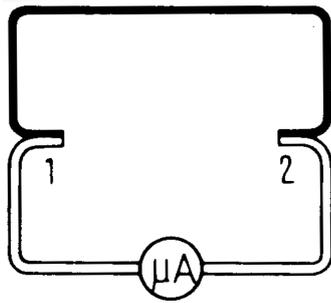
- Temperatursensor innerhalb des Sinterofens,
- Drucksensor zur Messung des Drucks innerhalb des Sinterofens,
- kontaktloser Temperatursensor zur Messung der Oberflächentemperatur des Sinterofens,
- Gassensor zur Detektion von Rauch oder Schutzgasaustritt,
- Rauchsensor zur Detektion von entzündeten Materialien sowie
- ein Stromsensor zur Stromregelung der Energiezufuhr.

2.3.1 Thermoelement

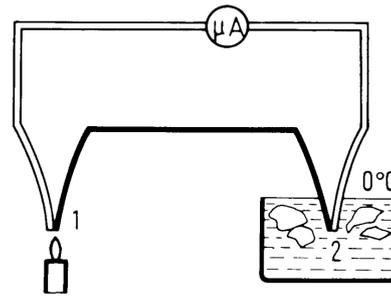
Thermoelemente dienen der Temperaturmessung und beruhen auf dem Seebeck-Effekt. In Metallen befinden sich die Elektronen innerhalb der Gitterstruktur in ständiger Bewegung. Ist ein Elektron in der Lage, die Austrittsarbeit zu verrichten, so kann es die Bindungskräfte überwinden und die Oberfläche des Stoffes verlassen. Die kinetische Energie der Teilchen ist von der Temperatur abhängig. Somit treten bei hohen Temperaturen mehr Teilchen aus dem Körper aus als bei niedrigen. Werden zwei verschiedene Metalle miteinander verbunden, so werden Elektronen vom Stoff niedriger Austrittsarbeit in den Stoff höherer Arbeit übertragen. Durch die Aufladung des zweiten gegenüber des ersten Stoffes entsteht eine elektrische Spannung zwischen den Materialien². Sind die Materialien wie in Abbildung 2.16(a) nun an zwei Stellen bei identischer Temperatur verbunden, so fließt dennoch kein Strom, da die Spannungen identisch sind und somit kein Spannungsabfall entsteht. Ist jedoch wie in Abbildung 2.16(b) die Temperatur der Stelle 1 gegenüber der Stelle 2 erhöht, ist auch die davon abhängige Spannung über 1 größer als über 2. Infolgedessen fließt ein Ausgleichsstrom von Stelle 1 nach 2. Berechnen lässt sich die Temperaturdifferenz zwischen den Stellen über die Spannung durch Gleichung 2.6³, wobei $\alpha_{1,2}$ als der Seebeckkoeffizient der Materialien 1 und 2 bezeichnet wird. [Dob10]

² Durch die Entstehung des elektrischen Feldes stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen den Elektronen, die von 1 nach 2 diffundieren und denen, die durch das Feld eine Kraft in entgegengesetzte Richtung erfahren, ein. [Sch14]

³ Diese Gleichung drückt einen vereinfachten linearen Zusammenhang zwischen den Größen aus. Dies ist nur für kleine Temperaturbereiche zulässig. Zur genauen Berechnung sind Polynome höherer Ordnung notwendig. [Sch14]



(a) Spannung über 1 und 2 bei gleicher Temperatur (in Anlehnung an: [Dob10])



(b) Spannung über die Stelle 1 und 2 bei verschiedenen Temperaturen (in Anlehnung an: [Dob10])

Abbildung 2.16: Veranschaulichung des Seebeck-Effektes

$$\Delta T = \frac{U}{\alpha_{1,2}} \quad (2.6)$$

Thermoelemente ermöglichen einen weiten Messbereich von ca. $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis ca. $2300\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei wenigen hundert Millivolt Ausgangsspannung. Außerdem haben sie eine geringe Wärmekapazität, da sie als kleine massearme Metallperlen ausgeführt werden. Daraus wiederum folgt, dass sie ihre Temperatur schnell an die Umgebung anpassen. Dadurch erfolgt die Messung mit einer geringen Verzögerung bei Erwärmungs- oder Abkühlvorgängen. Des Weiteren ist eine Messung in aggressiven Umgebungen möglich, indem das Thermoelement in einer korrosionsfesten Hülle aus Edelstahl eingelassen wird. Da Thermoelemente keine Spannungsversorgung zur Messung benötigen, findet auch keine Selbsterwärmung statt, die das Messergebnis verfälschen würde. [Par16]

Von Nachteil ist jedoch die Notwendigkeit der Verstärkung des Ausgangssignales sowie der Kaltstellenkompensation. Bei Anschluss des Thermoelementes an das Messgerät entstehen an den Anschlussstellen zwei weitere parasitäre Thermoelemente durch die Verbindung zum Metall der Messleitung. Die Temperaturmessung mittels Thermoelement beruht auf einer Differenzmessung zwischen der Temperatur an der Messstelle und der Temperatur an den Kontaktstellen zum Messgerät. Da somit auch die Temperatur beider Anschlussstellen Einfluss auf die Messung hat, muss diese zum einen konstant bleiben und zum anderen müssen beide Anschlussstellen stets die selbe Temperatur haben. Gelöst wird dieses Problem entweder mit einer Beheizung der Anschlussstellen auf eine identische Temperatur oder mithilfe einer temperaturempfindlichen Brückenschaltung. Die von dieser erzeugte Korrekturspannung wird in den Messkreislauf eingespeist und überlagert den Einfluss der parasitären Thermoelemente. Durch diese Variante kann auf kosten- und energieintensive Thermostate verzichtet werden, die sonst zur Beheizung der Kontaktstellen nötig wären. [Par16]

2.3.2 Piezoresistive Drucksensoren

Bei der piezoresistiven Druckmessung werden Dehnmessstreifen aus Halbleitermaterial verwendet. Verformen sich diese durch den anliegenden Druck, so ändert sich der spezifische Widerstand des Materials und proportional dazu der elektrische Widerstand. Zum Zweck der Druckmessung werden, wie in Abbildung 2.17 dargestellt, vier Dehnmessstreifen als Mikrostruktur in Form einer Wheatstone'schen Messbrücke verschaltet und in einer gemeinsamen Membran verbaut. Die Widerstandsänderung der Dehnmessstreifen wird durch die Messbrücke zu einer proportionalen Spannungsänderung umgewandelt. Die Sensoreinheit muss gegenüber äußeren Einflüssen gekapselt werden, da sie empfindlich gegen aggressive gasförmige oder flüssige Medien ist. [Tra15]

Vorteil der Halbleiter-Dehnmessstreifen ist eine deutlich höhere Empfindlichkeit gegenüber Metall-Dehnmessstreifen. Nachteilig ist allerdings die höhere Temperaturabhängigkeit der einzelnen Widerstände. Deren Einfluss wird allerdings durch die Verschaltung zu einer Messbrücke minimiert. Da das Ausgangssignal des Sensors im Bereich von wenigen hundert Millivolt liegt, ist eine Verstärkung des Signals zur genauen Messung notwendig. [Tra15]

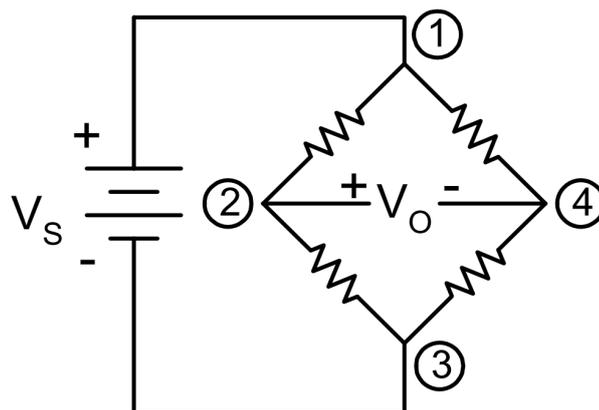


Abbildung 2.17: Verschaltung der Piezowiderstände zur Messbrücke (aus: [Hon02])

2.3.3 Pyrometer

Pyrometer können als berührungslose Temperatursensoren eingesetzt werden. Sie bestehen, wie in Abbildung 2.18 abgebildet, aus einer dünnen pyroelektrischen Scheibe, die beidseitig metallisiert und kontaktiert ist. Bei einer Temperaturänderung der Scheibe erfolgt eine proportionale Ladungstrennung, wodurch sich eine Spannung aufbaut. Diese Spannung ist abhängig vom Temperaturhub. Ursache für die Erwärmung ist die auf die Scheibe einfallende Infrarotstrahlung. Die durch den Temperaturhub verursachte Spannung baut sich durch Ableitströme über die Zeit ab. [Sch14]

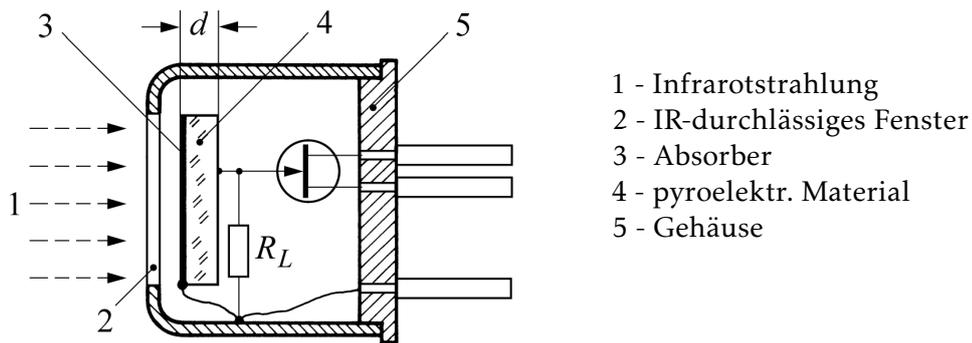


Abbildung 2.18: Aufbau eines Pyrometers (aus: [Sch14])

Um diesen Effekt für eine kontinuierliche Messung nutzbar zu machen, wird das Einfallsloch periodisch verdeckt. Während dieser Zeit misst der Sensor die Strahlung der Blende oder einer Referenzstrahlungsquelle. Sobald sich die Blende wieder öffnet, erfolgt die Messung der Abstrahlung des Messobjektes. Durch den permanenten Wechsel der Erwärmung des Sensors entsteht eine kontinuierliche Ladungstrennung und dadurch eine konstante Spannung am Ausgang. Die Realisierung dieses Messprinzips wird in Abbildung 2.19 dargestellt. [Sch14]

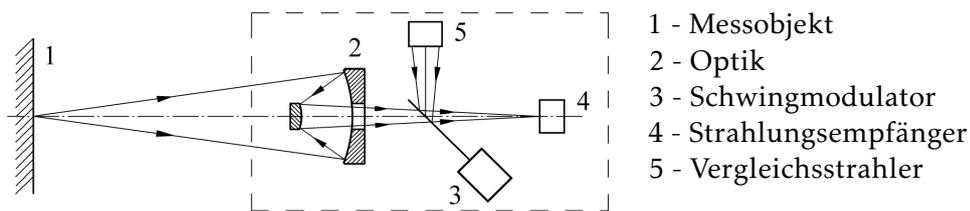


Abbildung 2.19: Aufbau des Messkopfes (aus: [Sch14])

2.3.4 Metalloxidhalbleiter-Gassensor

Metalloxidhalbleiter-Gassensoren beruhen auf einer Widerstandsmessung. Zur Messwerterfassung wird eine Metalloxidschicht beheizt. Wenn Chemikalien auf der Oberfläche absorbiert werden, ändert sich der elektrische Widerstand. Aufgrund der Widerstandsänderung über die Zeit kann eine Aussage über das Vorhandensein von bestimmten Gasen oder Rauch getroffen werden. Die Bestimmung des erfassten Gases ist jedoch nicht möglich. Vor dem Start der ersten Messung ist eine Aufheizphase von circa 30 Sekunden notwendig, bis der Sensor ein Signal liefert. [Ltd07]

2.3.5 Photoelektrischer Rauchsensor

Optische Rauchmelder werden in Streu- und Durchlichtrauchmelder unterteilt. Anwendung findet innerhalb dieser Arbeit das erstgenannte Messprinzip. Im Inneren des Sensors sind, wie in Abbildung 2.20 dargestellt, eine Lichtquelle und eine Photodiode so angeordnet, dass das von der Quelle emittierte Licht nicht auf die Photodiode fällt. Gelangen nun aber aufgrund eines Feuers Rauchpartikel in die Messkammer, so wird das Licht an den Partikeln gestreut. Dadurch bedingt fällt ein höherer Anteil des emittierten Lichtes auf die Photodiode, woraufhin diese einen von Lichteinfall und Rauchdichte abhängigen Strom treibt. Bei Überschreitung eines Grenzwertes wird anschließend der Alarm des Rauchmelders ausgelöst. [Tra15]

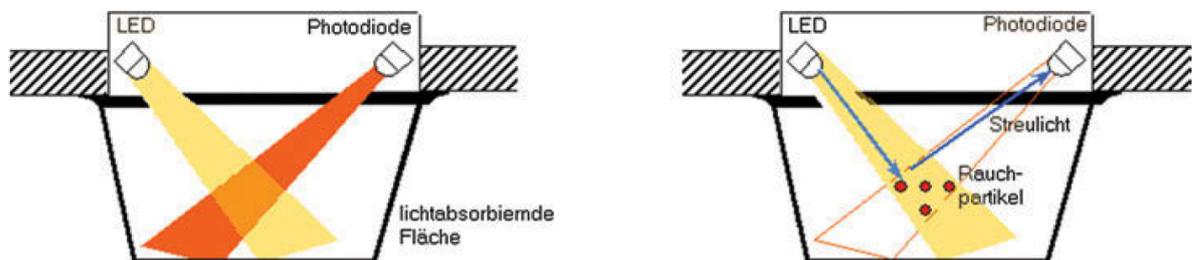


Abbildung 2.20: Prinzip des Streulichtrauchmelders (aus: [Tra15])

2.3.6 Kompensationsstromwandler

Das Messprinzip des Kompensationsstromwandlers beruht auf dem Halleffekt. Fließt ein Strom längs durch ein Blech mit geringer Höhe, welches von einem Magnetfeld durchsetzt ist, so bildet sich eine Spannung an den Seitenflächen des Blechs aus. Diese entsteht durch die Lorentzkraft, die sich bewegende elektrische Teilchen abhängig von der magnetischen Feldstärke ablenkt. Dadurch bedingt entsteht an der einen Seite des Bleches ein Elektronenüberschuss und an der anderen ein Elektronenmangel. Das Resultat ist ein elektrisches Feld, welches eine

Gegenkraft zur Lorentz-Kraft auf die Elektronen ausübt. Zwischen beiden Kräften entsteht ein Gleichgewicht. Die durch das elektrische Feld entstehende Spannung ist proportional zum durchfließenden Strom und zur magnetischen Flussdichte. Technische Anwendung findet dieser Effekt als Hallensensor zur Strommessung. [Sch14]

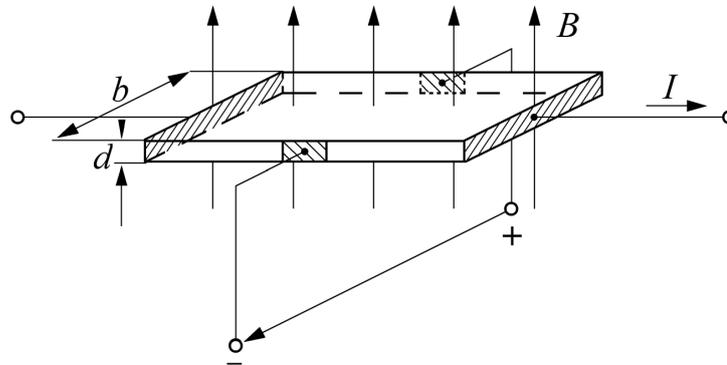


Abbildung 2.21: Darstellung des Halleffektes (aus: [Sch14])

Der Kompensationsstromwandler besteht aus einem Eisenkreis, in dessen Luftspalt sich ein Hallensensor befindet. Auf der Primärseite wird der Eisenkreis vom Strom der zur messenden Leitung durchsetzt. Die durch den resultierenden magnetischen Fluss im Hallensensor erzeugte Spannung wird an einen Operationsverstärker angelegt. Dieser gibt daraufhin einen Strom aus, der den Fluss der Primärseite kompensiert und die Spannung des Hallensensors auf null Volt reduziert. Dieser Kompensationsstrom ist über die Windungsverhältnisse des Eisenkreises proportional zum Primärstrom und kann durch externe Beschaltung gemessen werden. Innerhalb dieser Arbeit geschieht dies mithilfe eines Messshunts, über dem der Spannungsabfall als Messgröße erfasst wird. [Sch14]

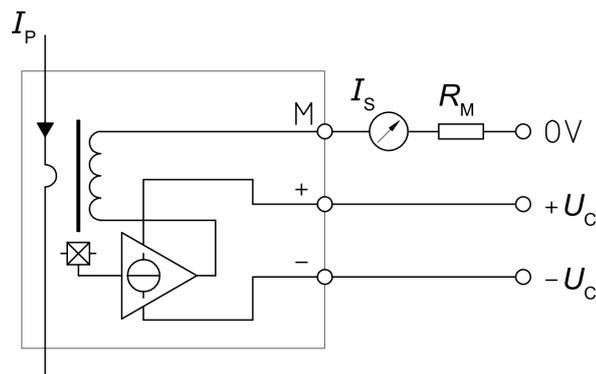


Abbildung 2.22: Prinzipschaltung des Kompensationsstromwandlers(aus: [LEM15])

2.4 Programmierumgebungen

Zur Automatisierung des Sinterprozesses ist die Wahl einer Programmierumgebung notwendig. Innerhalb dieser erfolgt mit geeigneter Hardware die Ansteuerung und Auswertung der verwendeten Sensoren und Aktoren anhand der hinterlegten Algorithmen. LabVIEW ist im Bereich der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik aufgrund seiner vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie weit verbreitet, wohingegen die Arduino-IDE vorrangig Verwendung im Hobbybereich findet. Letztere dient zur Erstellung von Programmen auf Mikroprozessorbasis. Für beide Plattformen existiert eine große Nutzerbasis, wodurch eine Vielzahl an Tutorien und Softwarebibliotheken vorhanden ist. Dies spart im Entwicklungsprozess beträchtlich Zeit und ermöglicht im Nachhinein eine einfache Wartung des Versuchsstandes. Des Weiteren ist durch die genutzten Umgebungen sichergestellt, dass notwendige Erweiterungen mit geringer Einarbeitungszeit durchgeführt werden können. Innerhalb der Arbeit findet LabVIEW Anwendung in der Programmierung der Prozesssteuerung. Ein mittels der Arduino-IDE programmierter Mikrocontroller stellt parallel dazu die Funktionstüchtigkeit des Versuchsstandes sicher. Beide Entwicklungsumgebungen werden anschließend näher erläutert.

2.4.1 LabVIEW

„Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench“ (LabVIEW) ist eine Programmierumgebung für Anwendungen in der Mess-, Regelungs- und Steuerungstechnik, der Simulation, der Datenerfassung und -visualisierung. Die Umgebung unterscheidet sich von textbasierten Programmiersprachen darin, dass der Quellcode mithilfe von grafischen Elementen erzeugt wird. Die Grundidee dahinter ist, alle Prüf- und Messeinrichtungen als „virtuelle Instrumente“ (VIs) zu betrachten, welche wiederum auf VIs einer niedrigeren Ebene zugreifen können. Diese virtuellen Instrumente werden in Frontpanel und Blockdiagramm unterteilt. Das Frontpanel beziehungsweise die Bedienoberfläche enthält die Eingabe- und Ausgabeelemente, während im Blockdiagramm die eigentliche Programmierung erfolgt. [Mü09, Gei14]

In den nachfolgenden Abbildungen ist ein einfaches VI zur Berechnung von $c = a + b$ aufgeführt, wobei in Abbildung 2.23(a) das Frontpanel und in Abbildung 2.23(b) das Blockdiagramm dargestellt ist. Im Frontpanel ist es sowohl möglich, den Eingabeelementen a und b Werte zuzuweisen, als auch das Ausgabeelement c anzuzeigen. Die Eingabeelemente werden anhand des Programmcodes im Blockdiagramm verarbeitet und im Indikator c im Frontpanel ausgegeben. Als Schnittstelle zwischen Blockdiagramm und Frontpanel dienen Terminals, die in beiden Ebenen vorhanden sind. Die einzelnen Funktionsblöcke werden durch sogenannte Drähte miteinander verbunden. Diese sind je nach Datentyp spezifisch eingefärbt. Wie in Abbildung 2.23(b) dargestellt, steht die Farbe „Blau“ für ganzzahlige Werte. Außerdem enthalten die Terminals des Blockdiagramms im Symbol den Wertebereich des Datentyps - im vorliegenden Fall handelt es sich folglich um ganzzahlige Werte mit einem Bereich von 32 Bit. [Gei14]

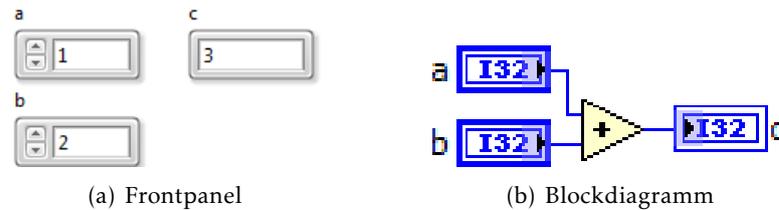


Abbildung 2.23: Beispiel zur Funktionsweise von LabVIEW

2.4.2 Arduino-Plattform

Arduino ist eine quelloffene Plattform für Soft- und Hardware. Die Arduino-IDE dient als Programmcode-Editor sowie als Compiler. Die Programmiersprache der Entwicklungsumgebung basiert auf Wiring, welches auf C/C++ aufbaut. Mithilfe der Arduino-IDE ist es möglich, die Arduino-Boards zu programmieren. Diese Boards vereinen einen Mikrocontroller mit der erforderlichen externen Beschaltung auf einer Platine und sind somit sofort einsatzbereit. Die meisten Boards basieren auf einem Atmel AVR-Mikrocontroller und werden über einen onboard USB-to-Serial-Converter programmiert. [Ard16]

Arduinos gibt es in verschiedenen Ausführungen mit verschiedener Anzahl an Schnittstellen und unterschiedlicher Rechenleistung⁴. Die meisten Beispiele und Projekte bauen auf dem Arduino Uno R3 auf, der in Abbildung 2.24 dargestellt wird. Eine große Stärke der Arduino-Plattform ist die große Community, durch die eine Vielzahl an Projekten und Softwarebibliotheken entstanden ist. Durch diese ist eine schnelle Realisierung von Projekten möglich. Des Weiteren können Arduino-Boards durch sogenannte „Shields“ in ihrem Funktionsumfang erweitert werden. Beispielsweise ermöglicht ein Ethernet-Shield die Kommunikation mit einem Netzwerk.



Abbildung 2.24: Arduino Uno R3-Board [Ard16]

⁴ siehe <http://www.arduino.org/products/boards>

3 Konzeption

In diesem Kapitel wird die Entstehung des Konzeptes dargestellt. Dabei wird anhand der Anforderungen der letztendliche Versuchsstand entworfen.

3.1 Ausgangssituation

Grundlage dieser Arbeit bildet ein bereits funktionstüchtiger Sinterofen mit der Option, unter Schutzatmosphäre zu sintern. Dieser ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Der Ofen bietet die Möglichkeit, manuell die Temperatur über ein Spannungsnetzteil und den Druck der Schutzatmosphäre über Ventile zu steuern. Gemessen wird die Temperatur über ein Thermoelement vom Typ K, welches in den Ofen eingeschoben wird. Die Thermospannung wird mithilfe eines Multimeters gemessen und in eine Temperatur gewandelt. Durch händische Regelung kann so eine spezifische Temperatur eingestellt werden. Die Druckmessung erfolgt mit einem Manometer.

Zur Leistungsregelung der Heizelemente ist ein Thyristorsteller mit Phasenanschnittsteuerung vom Typ A-senco SSR-800 vorhanden. Angesteuert wird dieser über einen analogen Eingang mit null bis zehn Volt Steuerspannung.

Drei Ventile sind für die Steuerung des Gasdruckes verbaut. Ein Ventil dient dem Verschluss der Gaszufuhr, ein weiteres befindet sich vor der Sinterkammer und ein drittes dahinter. Hinter dem letzten Ventil ist eine Unterdruckpumpe positioniert. Diese ist in der Lage, das Schutzgas aus der Sinterkammer abzusaugen oder einen Unterdruck zu erzeugen. Diese Ventile werden durch elektrisch ansteuerbare Magnetventile ersetzt.

Innerhalb dieser Arbeit erfolgt die Inbetriebnahme eines neuen Sinterofens, der in Abbildung 2.6 dargestellt ist. Dieser bietet ein höheres Volumen, um größere Werkstücke zu bearbeiten. Im Unterschied zum bisher genutzten Ofen existiert kein zweites Gefäß zur Erzeugung der gasdichten Atmosphäre innerhalb des Ofens. Der neue Ofen ist aufgrund konstruktiver Maßnahmen gasdicht.

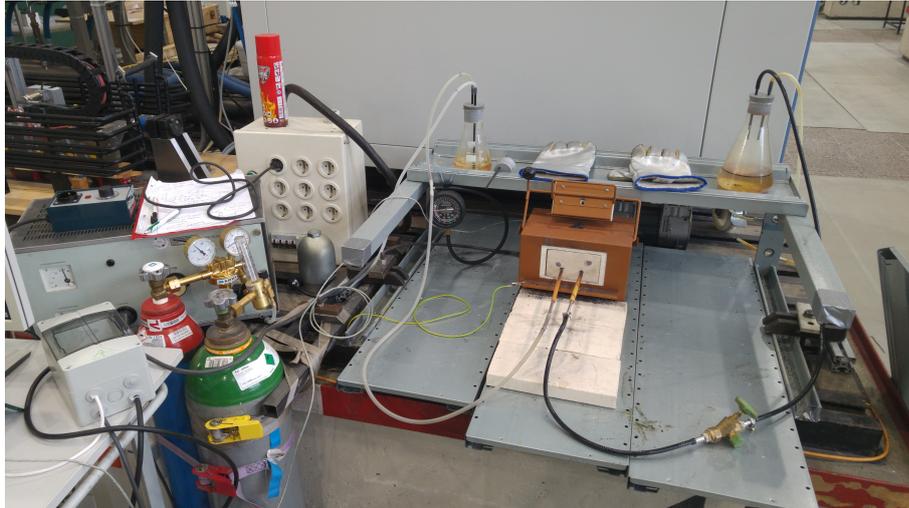


Abbildung 3.1: Versuchsaufbau mit manueller Bedienung vor der Automatisierung

3.2 Anforderungen an den Versuchsstand

Zu Beginn der Konzeptphase müssen die Anforderungen an den Versuchsstand festgelegt werden. Als Kernfunktionen stehen die Handlungsabläufe im Vordergrund, welche die Parameter des Sintervorganges beeinflussen. Dies bedeutet, dass die zu entwerfende Versuchsstandssteuerung in der Lage sein muss, die Zeit-Temperatur-Kurve des Sinterofens zuverlässig zu regeln. Da in Kapitel 2.1.2 auch der Druck als Parameter des Sintervorganges eingeführt wurde, soll über die Aufgabestellung hinaus eine vereinfachte Druckregelung integriert werden. Zur späteren Nachvollziehbarkeit der Entstehung der Eigenschaften des Sinterobjektes müssen die Parameter des Sintervorganges, also die Zeit-Druck-Temperatur-Kurve, in einer gemeinsamen Datei zusammen mit allen anderen aufgetretenen Einflüssen gespeichert werden. Solche Einflüsse sind beispielsweise der Druckverlust durch das Öffnen der Ventile während der Entbinderung⁵. Auf diese Art und Weise können in der Auswertungsphase des Sinterobjektes etwaige unvermutete Zusammenhänge nachvollzogen werden. Die erwähnten Ventile müssen ebenfalls steuerbar sein. Des Weiteren müssen diese zur Versuchsautomatisierung auch innerhalb eines Prozessablaufes automatisch gesteuert werden können.

Die zu erstellende Prozessablaufsteuerung muss in der Lage sein, auf alle Parameter beziehungsweise Eingangsgrößen des Versuchsstandes zuzugreifen. Ein einmal erstellter Prozessablauf muss abgespeichert und später wieder neu geladen werden können. Essentiell ist die Vorgabe der Zeit-Temperatur-Kurve mittels einer variablen Anzahl an Eckpunkten sowie der linearen Interpolation der Sollwerte zwischen den Eckpunkten. Des Weiteren muss auch die Steuerung der Ventile und anderer Komponenten in die Prozessablaufsteuerung integriert werden, damit die hohe Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses und somit der Werkstücke erreicht wird.

⁵ Siehe Kapitel 2.1.2.

Die Sintervorgänge finden in einem Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 1100 °C, bei einem Differenzdruck zur Umgebung von -1 bis 1 bar und einer Zeitdauer von bis zu 48 Stunden statt. Die aus diesen Angaben resultierenden Anforderungen sind die Wahl geeigneter Messmittel sowie einer geeigneten Programmstruktur. Bei dieser muss für den sparsamen Umgang mit Ressourcen gesorgt werden, da bei sehr langer Laufzeit des Programmes auch kleinere Fehler zu Abstürzen führen können. Beispiel hierfür ist das Überlaufen des Speichers aufgrund eines Speicherlecks. In der Softwareentwicklung wird von einem Speicherleck gesprochen, wenn Speicher angefordert, jedoch nicht wieder freigegeben wird. Des Weiteren sollen folgende Drücke gemessen werden: der Zuleitungsdruck zwischen dem Druckminderungsventil der Gasflasche und dem Eingangsventil des Sinterofens, der Kammerdruck zwischen dem Eingangs- und Ausgangsventil, sowie der Ableitungsdruck zwischen Ausgangsventil und Umgebung. Die Sensoren vor und hinter dem Sinterofen dienen der Überprüfung des Zustandes des Ofens. Sie werden genutzt, um Fehlerzustände zu detektieren. Für diese ist es ausreichend, wenn sie die Unterscheidung zwischen Überdruck, Unterdruck und Umgebungsdruck erlauben. Der Sensor zur Messung des Drucks innerhalb des Ofens jedoch muss verstärkt und temperaturkompensiert sein, da er essentiell für die Genauigkeit der Druckregelung ist.

Die Heizwendeln sind für einen Effektivwert des Stromes von vierzig Ampere konstruiert. Da der Widerstand der Heizwendeln durch Alterung mit der Zeit steigt, muss dieser Einfluss durch eine höhere maximale Stellgröße kompensiert werden. Dies ist nötig, um über die gesamte Lebensdauer des Versuchsstandes mit maximalem Temperaturanstieg heizen zu können. Erforderlich ist daher eine permanente Stromüberwachung.

Eine weitere Anforderung ist eine hohe Benutzerfreundlichkeit. Dies bedeutet, dass alle relevanten Prozessgrößen in geeigneter Weise visualisiert werden. Des Weiteren muss die Oberfläche so gestaltet sein, dass eine Bedienung des Programmes auch nach einer kurzen Einarbeitungsphase problemlos möglich ist. Weil die Sintervorgänge mit einem hohen Zeitaufwand verbunden sind, ist eine Überwachung des Versuchsstandes über das Netzwerk notwendig. Dafür muss eine geeignete Darstellungsform gewählt werden. Da es in Bezug auf Industrie 4.0 möglich sein soll, von überall Daten zu senden und zu empfangen, soll die Überwachung auch mittels Smartphone erfolgen können. Die Möglichkeit der Fernüberwachung stellt allerdings erhöhte Sicherheitsanforderungen an den Versuchsstand. Es muss gewährleistet werden, dass der Versuchsstand bei Fehlfunktion einer beliebigen Komponente in einen definierten, sicheren Zustand übergeht. Die möglichen Gefahrenquellen sind zu analysieren und Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Da es sich bei dem Versuchsaufbau um ein Forschungsprojekt handelt, besteht die Möglichkeit, dass sich die Anforderungen an den Versuchsstand nach Abschluss der Arbeiten ändern können. Daher ist es wichtig, dass die Programmierung modular realisiert wird. Dies ermöglicht es, im Nachhinein die Software zu erweitern und vereinfacht die Wartung.

3.3 Funktionsumfang der Sinterofensteuerung

Aus den Anforderungen im vorherigen Kapitel wird der notwendige Funktionsumfang der Prozessablaufsteuerung abgeleitet.

3.3.1 Temperaturregelung

Für die Temperaturregelung kommen nur Regler in Frage, die eine vollständige Anpassung an die Führungsgröße erlauben. Das bedeutet, dass entweder der I, PI- oder der PID-Regler angewendet werden. Da der I-Regler langsamer als ein Regler mit P-Anteil ist, wird zwischen dem PI- und dem PID-Regler gewählt. Aufgrund des guten Verhaltens bei der Regelung mit veränderlichen Sollwerten, empfiehlt Honeywell International Inc. [Hon16] einen PID-Regler. Vorteilhaft ist die höhere Stellgeschwindigkeit im Vergleich zum PI-Regler.

Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen empfiehlt sich ein Thermoelement vom Typ K. Dieses ist von -180 °C bis 1350 °C einsetzbar [Par16]. Zur korrekten Messung ist eine Kaltstellenkompensation zwingend notwendig. Diese muss in der gewählten Auswertelektronik integriert sein.

Wie bereits erwähnt, muss die Stellgröße dynamisch an den Widerstand der Heizwendel angepasst werden. Dies ist notwendig, um trotz der Alterung der Heizwendeln die maximale Heizleistung in den Ofen einprägen zu können. Dazu wird der Effektivwert des Stromes mithilfe einer Strommessung via Kompensationsstromwandler so geregelt, dass bei 100 Prozent der Stellgröße knapp I_{\max} fließen. I_{\max} stellt den maximal zulässigen Heizstrom dar und darf aufgrund der Dimensionierung maximal vierzig Ampere betragen. Da die Heizwendeln teilweise parallel geschaltet sind, würde sich bei Ausfall einer Heizwendel der Gesamtstrom auf die übrigen aufteilen. Dies würde jene noch schneller verschleifen und zur vorzeitigen Zerstörung des Ofens führen. Aus diesem Grund muss I_{\max} innerhalb der Steuerung frei einstellbar sein, um auf dieses Szenario reagieren zu können. Zur Realisierung der Stromanpassung ist eine geeignete Software- und Hardwarestruktur nötig, die mit der notwendigen Geschwindigkeit das Messsignal erfasst. Diese liegt bei hundert Messwerten pro Periode des Stromes.

3.3.2 PID-Reglerparametrierung

Zur Einstellung des Reglers ist zuerst die Bestimmung der Regelstrecke notwendig. Dazu wird an den Sinterofen eine konstante Stellgröße angelegt und der resultierende Temperaturverlauf bis zum stationären Endwert gemessen. Aus der aufgezeichneten Kurve wird anschließend ein mathematisches Modell der Regelstrecke erstellt und der Regelkreis mittels Matlab/Simulink simuliert. Mithilfe der Simulation werden die Reglerparameter so bestimmt, dass ein schnellstmöglicher Einschwingvorgang mit einer maximal zulässigen Überschwingweite von $\pm 10^\circ\text{C}$ stattfindet.

Die Reglerparametrierung erfolgt über die in Simulink integrierte „PID-Tune“-Funktion, welche in Abbildung 3.2 dargestellt ist. Über die in der Abbildung oben dargestellten Schieberegler „Response Time“ und „Transient Behavior“ werden die Reglerparameter schrittweise verändert. Nach jeder Veränderung beziehungsweise Iteration wird ein Einschwingvorgang simuliert. Führt die Änderung zu unerwünschtem Verhalten wie starkem Überschwingen oder zu einem verlängerten Einschwingvorgang, so wird die Veränderung verworfen. Führt die Veränderung jedoch zu einem erwünschten Verhalten, so wird diese gespeichert und bildet die Basis für einen weiteren Iterationsschritt. Dieses Verfahren wird durchgeführt, bis die zu Beginn des Prozesses definierten Anforderungen erfüllt sind. Innerhalb der Umsetzung der Temperaturregelung werden anschließend die durch die Simulation gewonnenen Parameter im realen Betrieb validiert. Falls notwendig, werden die Parameter abschließend am Versuchsstand nochmals angepasst.

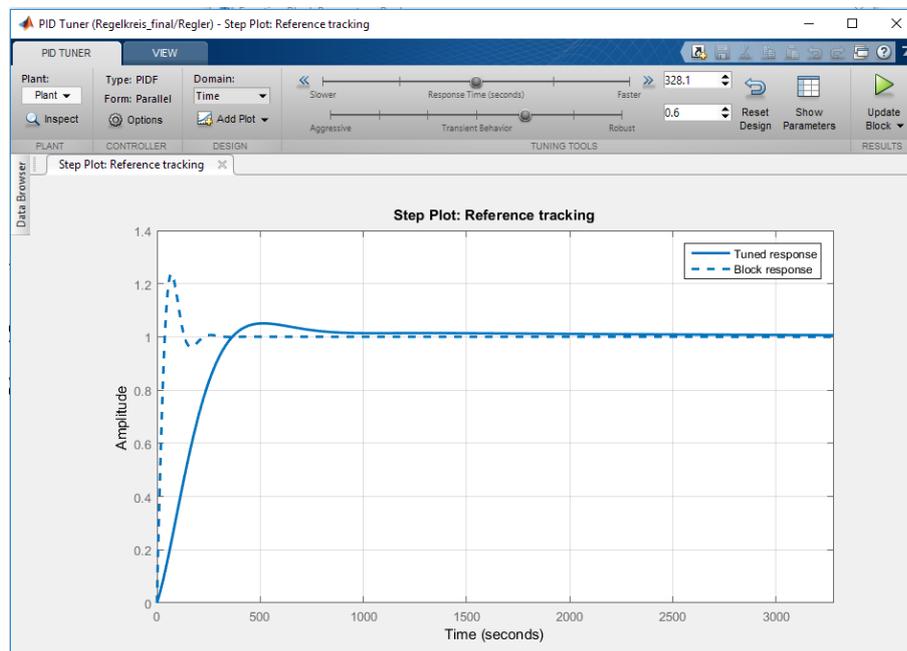


Abbildung 3.2: PID-Tune Funktion von Matlab/Simulink

3.3.3 Druckregelung

Bei der hier angestrebten Regelung wird eine niedrige Genauigkeit von ± 250 Millibar gefordert. Dies ist zum einen dadurch bedingt, dass primär die Faktoren Temperatur und Zeit Einfluss auf den Sintervorgang nehmen. Zum anderen sind die zur genauen Regelung notwendigen Druckregelventile für diesen Anwendungszweck zu kostenintensiv. Daher soll die Druckregelung als eine Zweipunktregelung ausgeführt werden. Dabei muss die Toleranz der Regelung so dimensioniert werden, dass ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit der Regelung und der Lebensdauer der Ventile erreicht wird. Notwendig ist hierfür ein verstärkter und kompensierter Drucksensor zur Überwachung des Druckes des Sinterofens. Bei einer empirisch zu ermittelnden Abweichung vom Sollwert soll der Druck nachgeregelt werden. Dabei ist eine geeignete Soft- und Hardwarearchitektur zu wählen, die eine hohe Mess- und Regelfrequenz ermöglicht. Für die Sensoren zur Zustandsüberwachung vor und hinter dem Ofen ist ein unverstärkter und unkompensierter Drucksensor ausreichend. Die durchschnittliche maximale Ausgangsspannung eines unverstärkten Drucksensors von circa ± 200 Millivolt reicht aus, um mit einem Messgerät zwischen Unter- und Überdruck unterscheiden zu können. Für die Druckregelung wird zu Versuchsbeginn ein konstanter Sollwert für die gesamte Ausführungsdauer vorgegeben. Dieser ist variabel wählbar.

3.3.4 Prozessablaufsteuerung

Die Prozessablaufsteuerung muss die in den Anforderungen genannten Aufgaben erfüllen. Zum einen muss sie für die Temperaturregelung die Sollwerte für jeden Zeitpunkt bereitstellen. Der Kurvenverlauf wird durch einzelne Zeit-Temperatur-Paare beschrieben, zwischen denen linear interpoliert wird. Innerhalb dieser Arbeit werden diese Paare als Eckpunkte der Sollwertkurve bezeichnet. So ist bei geringem Zeitaufwand zur Erstellung der Sollwertkurve eine Beschreibung für den Ofenzustand zu jedem Zeitpunkt möglich. Des Weiteren ist eine Zeit-Temperatur-Event-Struktur notwendig, um die automatisierte Schaltung der Ventile und der Pumpe zu erlauben. Diese Struktur erlaubt die Ausführung von Schaltvorgängen innerhalb definierter Zeit- und Temperaturwerte. Auf diese Art lässt sich beispielweise die Entbinderung zwischen einer halben und ganzen Stunde nach Beginn des Prozesses ausführen, sobald die Temperatur zwischen $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Unabhängig davon soll jedoch auch eine manuelle Bedienung des Versuchsstandes möglich sein.

Die Prozessablaufsteuerung hat außerdem die Aufgabe, den Zustand des Ofens zu überwachen. Ein Beispiel ist die Überprüfung, ob unplausible Drücke vor oder hinter der Sinterkammer herrschen. Außerdem muss die Steuerung den Zustand des Ofens zu jedem Zeitpunkt loggen. Dieses Logfile soll als CSV-Datei abgespeichert werden. Um die Datei leicht zuordnen zu können, wird vor dem eigentlichen Dateinamen ein Zeitstempel eingefügt. Als Dezimaltrenner wird ein Semikolon verwendet, um die Kompatibilität mit Excel zu gewährleisten.

3.3.5 Monitoring via Netzwerk

Zum Monitoring via Netzwerk wird zwischen zwei Ansätzen gewählt. Zum einen ist der Remotezugriff mit einem geeigneten Tool möglich. Dies erfordert jedoch je nach Plattform die Installation eines zusätzlichen Programmes für den Zugriff auf das ferngesteuerte Gerät. Zum anderen existiert die Möglichkeit, die Zustandsdaten des Sinterofens über einen Webserver im Internetbrowser zugänglich zu machen. Das hat den Vorteil, dass der Ofenzustand von fast jedem internetfähigen Gerät über den Browser abgerufen werden kann - egal ob von einem PC, Tablet oder Smartphone aus. Nachteilig ist jedoch der deutlich höhere Programmieraufwand im Gegensatz zur nur wenig zeitaufwändigen Installation eines Tools.

Da die beiden Möglichkeiten sich nicht gegenseitig ausschließen, wird für den Versuchsstand vorerst die Lösung mittels Webserver bevorzugt. Diese bietet universell abrufbare Informationen, die zusätzlich aufgrund der beschränkten Zugriffsrechte eine Erhöhung der Sicherheit ermöglichen. Der Remotezugriff würde eine vollständige Bedienung des Programmes über das Netzwerk ermöglichen, da die gesamte Benutzeroberfläche übertragen wird. Damit wäre das Starten des Sinterofens möglich, ohne dass der Ofen vorher auf Funktionstüchtigkeit geprüft wurde. Es bestünde die Gefahr, dass eine dritte Person am Ofen das Sintergut tauscht, während eine andere die Heizwendeln voll aussteuert und die Gaszufuhr zuschaltet. Es ist ersichtlich, dass solche Zustände unterbunden werden müssen. Eine komplette Bedienung aus der Ferne würde einen erhöhten Aufwand der Sicherheitsvorkehrungen bedeuten.

Sinnvoll ist das Auslösen des Stoppbefehls über das Netzwerk. So kann im Fehlerfall wertvolle Zeit gespart werden, da der Bediener sich nicht erst zum physikalischen Standort des Ofens bewegen muss. Dies erfordert einen Passwortschutz, damit unbefugte Dritte den Ofen nicht manipulieren können.

3.3.6 Kommunikationsfähigkeit mit externer Hardware

Zur Ansteuerung der Ventile und der Pumpe müssen mehrere Relais geschaltet werden. Eine Ansteuerung und Auswahl einer geeigneten Plattform für diesen Zweck ist notwendig. Des Weiteren braucht der Thyristorsteller zur Regelung der Heizleistung ein Eingangssignal von null bis zehn Volt, die von einem geeigneten Steuergerät bereitgestellt werden müssen.

3.4 Gefahrenbeurteilung und daraus resultierende Maßnahmen

Um geeignete Maßnahmen für den sicheren Betrieb des Versuchsstandes zu treffen, müssen zuerst die zu erwartenden Gefahren ermittelt und beurteilt werden. Je nach Schwere der möglichen Verletzung und Wahrscheinlichkeit des Eintreffens, werden anschließend geeignete Schutzmaßnahmen getroffen. Innerhalb dieser Arbeit erfolgt eine Analyse in Anlehnung an die Maschinenrichtlinie. Dabei ist zu beachten, dass keine vollständige Erfüllung der Richtlinie erforderlich ist, da es sich um einen Versuchsstand innerhalb der Forschung handelt. Vielmehr dient dieses Vorgehen als Betrachtung, um eine grundlegende Sicherheit zu gewährleisten. Da in dieser Arbeit der Schwerpunkt auf der Automatisierung des Versuchsstandes liegt, wird der Fokus auf die Analyse der Sicherheit der Steuerung und der genutzten Mess- und Prüftechnik gelegt.

Die Maschinenrichtlinie fordert nach Krey [Kre15] die Erfüllung folgender Anforderungen:

- Beurteilung der Risiken,
- Integration der Sicherheit anhand der Grundsätze⁶,
- Maschinenkennzeichnung und
- Erstellung der Betriebsanleitung.

Krey [Kre15] empfiehlt ebenfalls, die Richtlinie folgendermaßen zu erfüllen: zu Beginn müssen die erforderlichen Normen und technischen Spezifikationen recherchiert werden, deren Erfüllung für die Maschine notwendig sind. Anschließend wird auf deren Grundlage eine Risikobeurteilung durchgeführt. Diese verdeutlicht, an welchen Stellen eine Verbesserung der Sicherheit notwendig ist. Anhand der ermittelten Risiken wird anschließend ein Konzept von technischen Sicherheitsmaßnahmen erstellt und realisiert. Im Anschluss daran erfolgt die Erstellung einer Gebrauchsanleitung und einer technischen Dokumentation. Da die Erstellung der Dokumente das Ausmaß dieser Arbeit übersteigen würden, wird ausschließlich auf die Risikobeurteilung und die Konzeptionierung sowie Realisierung der Sicherheitsmaßnahmen eingegangen.

⁶ Schutzmaßnahmen werden in drei Stufen unterteilt. Die erste Stufe erfolgt durch konstruktive Maßnahmen, die zweite beinhaltet technische Maßnahmen beziehungsweise Schutzeinrichtungen und die dritte beruht auf Benutzerinformationen. Da die Maßnahmen der dritten Stufe ausschließlich vom Verhalten des Bedieners abhängen, sind diese erst zulässig, wenn die Sicherheit durch Maßnahmen der vorherigen Stufen nicht weiter erhöht werden kann. Dieses Vorgehen wird als Drei-Stufen-Prinzip bezeichnet und ist eine andere Bezeichnung für die Einhaltung der Grundsätze. [Kli06]

3.4.1 Risikobeurteilung

Die Risikobeurteilung hat die Entstehung eines „sicheren Produktes“ zum Ziel. Dazu werden, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, zu Beginn die Produktangaben der Maschine spezifiziert. Diese dienen als Basis für die Durchführung der nachfolgenden Risikobeurteilung. Anschließend werden alle Gefahren für Mensch und Umwelt, die vom Produkt ausgehen können, ermittelt, eingeschätzt und bewertet. Nach Definition der mindestens zu erreichenden Sicherheit erfolgt die Festlegung der Sicherheitsmaßnahmen, wonach die Risikobeurteilung nochmals wiederholt wird. Abschließend wird die Bewertung des verbleibenden Restrisikos ausgeführt. Ist dieses oberhalb des Sicherheitszieles, müssen weitere Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Dieser Vorgang der Festlegung der Sicherheitsmaßnahmen und anschließenden Neubewertung des Restrisikos wiederholt sich solange, bis das Restrisiko ausreichend minimiert wurde. Im Normalfall muss die Risikobeurteilung für alle Lebensphasen des Produktes⁷ erfolgen. Im Fall der hier vorliegenden Arbeit wird jedoch ausschließlich der Normalbetrieb beziehungsweise die Bedienung betrachtet. Dabei wird sowohl auf die vorhergesehenen Verhaltensweisen im Umgang mit dem Produkt eingegangen als auch auf die vorhersehbaren Fehlverhaltensweisen. Allgemeine Beispiele für letzteres sind die Verwendung eines flachen Schraubendrehers als Meißel oder die Reparatur eines Elektrogerätes, ohne das Gerät vom Netz zu trennen. [Kre15]

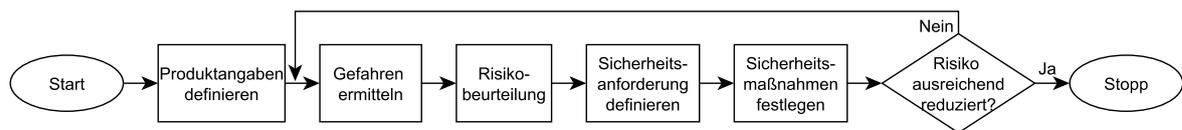


Abbildung 3.3: Schema der Risikobeurteilung

3.4.1.1 Definition der Produktangaben

Zu Beginn der Risikobeurteilung erfolgt als erstes die Definition des Produktes. Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen Sinterofen, welcher speziell für den Versuchsstand angefertigt wurde. Momentan besteht dieser aus dem Sinterofen an sich, in welchen eine Heizwendel, eine Schutzgaskammer und eine Verkleidung aus Schamottsteinen zur thermischen Isolierung eingebaut sind. Des Weiteren besitzt er Anschlüsse für das Schutzgas und für die elektrische Kontaktierung. Externe Baugruppen sind im fertig automatisierten Zustand eine Steuereinheit sowie ein Thyristorsteller zur Phasenanschnittsteuerung. [Kre15]

Bestimmungsgemäß verwendet wird der Sinterofen zum Sintern von 3D-Druckmodellen aus Keramik oder Metall, in einem Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 1100 °C und bei

⁷ Lebensphasen sind beispielsweise: Transport, Lagerung, Inbetriebnahme, Wartung, Bedienung, Außerbetriebnahme, Entsorgung, ... [Kre15]

einem Druck von -1 bar bis +1 bar Differenzdruck zur Umgebung⁸. Dabei soll der Versuchsstand eine autonome Regelung und Steuerung der Betriebszustände anhand einer Sollwertkurve ausführen.

3.4.1.2 Ermittlung von Gefahren

In Tabelle 3.1 sind die typisch auftretenden Gefahrenarten dargestellt. Dabei findet die Betrachtung ausschließlich während des Normalbetriebes statt. Die auftretenden Gefahren werden nach Ausmaß des Schadens⁹ und der Eintrittswahrscheinlichkeit¹⁰ eingeteilt. Das resultierende Risiko wird nach einer Rechenvorschrift aus diesen Größen berechnet. [Kre15]

Tabelle 3.1: Typische Gefahrenarten und zugehörige Beispiele (in Anlehnung an: [Kre15])

Gefahrenart	Beispiel
mechanische Gefahren	rotierende Teile
elektrische Gefahren	spannungsführende Teile
thermische Gefahren	heiße oder kalte Materialien
Gefahren durch Lärm	laute Herstellungsprozesse
Gefahren durch Vibration	schwingende Ausrüstung
Gefahren durch Strahlung	optische Strahlung
Gefahren durch Substanzen	Einatmung von Staub
ergonomische Gefahren	Heben schwerer Lasten
biologische Gefahren	Viren
sonstige Gefahren	durch Tiere und Pflanzen

Innerhalb dieser Arbeit existieren vor allem thermische und elektrische Gefährdungen. Die detaillierte Erläuterung und Analyse befindet sich in den nachfolgenden Abbildungen 3.4, 3.5 und 3.6. Die Beurteilung wurde mit der Software „Safeexpert“ erstellt.

⁸ Innerhalb der vollständigen Risikoanalyse muss auch auf vorhersehbare Fehlanwendungen eingegangen werden. Ein Beispiel wäre Sintern von Objekten bei höheren Temperaturen als die Spezifikation von 1100 °C erlaubt. Darauf soll an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden.

⁹ Ausmaß des Schadens (AMS) ist ein numerischer Wert zwischen 0 - 3, der die Schwere der Verletzung angibt. bei AMS=0 handelt es sich um keine Personen oder Sachschäden, bei AMS=3 resultieren jedoch schwere, irreversible oder tödliche Verletzungen. [Kre15]

¹⁰ Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens = Dauer der Gefahrensituation · Wahrscheinlichkeit des Gefahrenereignisses · Möglichkeit der Schadensvermeidung; nähere Informationen unter [Kre15], Seite 60.

Risikobeurteilung

Sinterofen	
Projektdaten	
Projektbezeichnung	Sinterofen
Projektnummer	0000-0000
Produkt / Erzeugnis	
Funktion	Ofen zum Sintern von 3D-Druckmodellen
Typ	
Auftrag	
Handelsbezeichnung	
Modell	
Maschinennummer	
Seriennummer	
Druckoptionen	
Ansicht	Gefährdungen - Gefahrenstellen - Lebensphasen (Standard)
Anzeigen	Ja (Gefährdung tritt auf)
Legende	
<p>Safexpert Risikograf W = Wert (0 - 10): 0 = Geringstes Risiko 10 = Höchstes Risiko SA = Schadensmaß: K = keine Verletzung L = leichte Verletzung S = schwere Verletzung T = Tod AD = Außenrisikofaktor im Gefahrenbereich: S = selten bis oft H = häufig bis dauernd EA = Möglichkeiten zum Erkennen und Ausweichen: M = Möglich unter bestimmten Bedingungen K = Kaum möglich WE = Wahrscheinlichkeit des Eintritts: KL = Klein (unwahrscheinlich) MI = Mitte (wahrscheinlich einige Male im Leben) GR = Groß (wird häufig eintreten)</p>	<p>Steuerungsbau</p> <p>Maßnahmenarten</p> <p> Kat = Kategorie PU = erforderliche Performance Level (vorher) PL = Performance Level (nachher) SIL = SIL - erforderlich (vorher) SIL = SIL (nachher) </p> <p> TSC = Interferenzen / Konstruktion TES = Technische / ergänzende Schutzmaßnahme PSC = personelle Schutzmaßnahme PAK = Hinweis auf die Risikofolge (Prüfprogramm,...) EA = Hinweis in der Betriebsanleitung </p>

Abbildung 3.4: Gefahrenbeurteilung mittels geeignetem Toolkit, Produktinformation

Risikobeurteilung		0000-0000 - Sinterofen	Druckdatum: 29.10.2016
Grenze der Maschine: Verwendungs-, räumliche, zeitliche und weitere Grenzen			
Gefährdung		Gefahrenstelle	Lebensphase
Gefahrenbeschreibung			
Risiko IN (vor der Maßnahme)		Nr.	Maßnahmen zur Risikominderung
SA	AD	EA	WE
W	PL	r	SIL
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein / <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Name	Datum
1.3.- Quetschen		Deckel des Sinterofens	Normalbetrieb
Quetschungen der Hand beim Verschluss des Sinterofens			
L	M	MI	0
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	12.10.2016
L		BA	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	12.10.2016
L		KL	0
2.6 - Feuer			
Heizwendel, Phasenanschnittsteuerung sowie Zuleitungen		Normalbetrieb	
Durch Überströme ist eine thermische Beschädigung der oben genannten Teile möglich.			
S	H	M	KL
3			
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	21.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	21.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	21.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	21.10.2016
S		TES	K
2.8 - (Elektrischer) Schlag			
Elektrischer Schlag an unter Spannung stehende Komponenten		Normalbetrieb	
Elektrischer Schlag an unter Spannung stehenden Teilen möglich.			
T	S	K	KL
6			
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	21.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	21.10.2016
S		TES	K
3.1 - Verbrennungen			
Erhitzte Oberfläche des Sinterofens		Normalbetrieb	
Verbrennungen am Sinterofen während des Betriebes möglich			
S	H	K	MI
5			
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	K
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	29.10.2016
S		TES	S
Risiko hinreichend vermindert <input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian	

Risiko beurteilung		0000-0000 - Sinterofen		Druckdatum: 29.10.2016	
Grenze der Maschine: Verwendungs-, räumliche, zeitliche und weitere Grenzen					
Gefahrenbeschreibung			Lebensphase		
Risiko IN (vor der Maßnahme)		Nr.		Maßnahmen zur Risikominderung	
SA	AD	EA	WE	W	PL / SIL
Risiko hinreichend vermindert		Nein / Ja		Angewandte Dokumente, angefügte Bilder und Dateien	
L	K	KL	0	Datum	
Risiko hinreichend vermindert		3		Schutz vor Übertemperatur mittels Bimetallstreifens am Kühlkörper der Thyristorschaltung	
Risiko hinreichend vermindert		<input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian 21.10.2016	
3.6 - Verbrühung					
Druckablassventil					
Beim Druckablass bzw. beim Entbinden strömt kurzzeitig Gas mit erhöhter Temperatur aus dem Druckablassventil aus.					
S	S	K	MI	3	Positionierung des Druckablassventils innerhalb einer für Bediener gesicherten Fläche
S	S	M	KL	1	Gasabkühlgefäß zur Verringerung der Temperatur des ausströmenden Gases
Risiko hinreichend vermindert		<input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian 20.10.2016	
7.6 - Feuer					
Oberfläche des Sinterofens					
Ofenoberfläche erhitzt sich während des Betriebes und strahlt Wärme ab. Durch hohe Temperatur ist eine Entzündung brennbarer Materialien in unmittelbarer Nähe möglich					
S	H	K	GR	6	Verbot des Lagerns von thermisch empfindlichen Gegenständen in direkter Nähe zum Sinterofen
S	H	K	KL	4	Überwachung und Begrenzung der Ofentemperatur mithilfe eines Rauch- und eines Temperatursensors, bei Überhitzung oder Raucherentwicklung erfolgt ein sofortiges Abschalten des Ofens
S	S	M	MI	2	Bimetallstreifen auf der Ofenoberfläche begrenzt Maximaltemperatur
Risiko hinreichend vermindert		<input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian 21.10.2016	
20.1 - Kontakt mit Objekten hoher oder geringer Temperatur					
Sinterobjekt					
Im Anschluss an den Sinterprozess hat das gesinterte Objekt eine hohe Restwärme					
S	H	K	MI	5	Entnahme des Sinterobjektes nur mit geeignetem Werkzeug und hitzebeständigen Arbeitshandschuhen.
S	S	M	MI	2	Schulung des Bedieners, Sinterobjekt darf frühestens nach 1h abgekühlt entnommen werden
Risiko hinreichend vermindert		<input type="checkbox"/> Nein <input checked="" type="checkbox"/> Ja		Geidel Maximilian 12.10.2016	

Abbildung 3.6: Gefahrenbeurteilung mittels geeignetem Toolkit, zweite Seite

3.4.1.3 Festlegung der Sicherheitsmaßnahmen

Wurde bei den auftretenden Gefährdungen festgestellt, dass das vorhandene Risiko vermindert werden muss, sind Schutzmaßnahmen festzulegen. Dazu wird anhand von Vorschriften ein realistisches Sicherheitsziel definiert. Anschließend erfolgt eine Festlegung der notwendigen Maßnahmen, so dass diese Ziele erreicht werden. Dabei erfolgt die Reduzierung der Gefahr, wie in Abbildung 3.7 dargestellt, innerhalb von drei Stufen: zuerst wird das Risiko der Gefahr durch konstruktive Maßnahmen verringert, anschließend wird es durch weitere technische Maßnahmen reduziert und bei einem verbleibenden Restrisiko müssen Benutzer mit Sicherheitshinweisen instruiert werden. Nach Festlegung einer Sicherheitsmaßnahme muss eine weitere Risikobeurteilung durchgeführt werden, da durch die Sicherheitsmaßnahme an sich eine weitere Gefahrenquelle entstehen kann. In den Abbildungen 3.4, 3.5 und 3.6 werden bereits die Sicherheitsmaßnahmen vorgeschlagen. Diese sind innerhalb der zu entwickelnden Sicherheitseinrichtung umzusetzen. [Kre15]

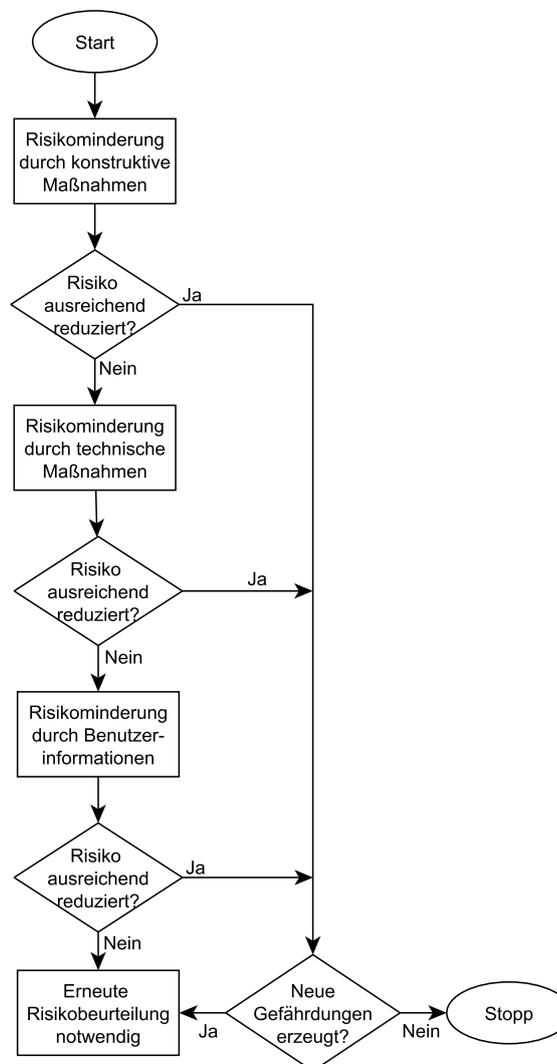


Abbildung 3.7: Festlegung der notwendigen Sicherheitsmaßnahmen

3.4.1.4 Beispiel zur Risikobeurteilung

Zur Verdeutlichung des Vorganges wird an dieser Stelle ausführlicher die Risikobeurteilung der Gefahr „Verbrennung“ an der Gefahrenstelle „erhitzte Oberfläche des Sinterofens“ durchgeführt. Zur Veranschaulichung wird eine Risikoeinschätzung in Abbildung 3.8 dargestellt.

Sollte ein Unfall geschehen und sich der Bediener am Ofen verbrennen, so sind schwere, irreversible Verbrennungen an der Kontaktstelle, wie zum Beispiel der Hand, zu erwarten. Da der Benutzer das Sintergut tauschen muss, hält er sich häufig in der Nähe der Gefahrenstelle auf. Dabei kann er anhand des Ofens an sich nicht wahrnehmen, ob dieser noch erhitzt ist oder nicht. Daher wird das Risiko vor Anwendung der Sicherheitsmaßnahmen mit „fünf“ bewertet. Nun erfolgen zielgerichtete Sicherheitsmaßnahmen und eine anschließende Neubewertung des Risikos. Als erstes wird festgelegt, dass der Benutzer das Sintergut nur tauschen darf, solange der Ofen an der Oberfläche eine Temperatur unterhalb der Gefährdungsschwelle hat. Dadurch hält sich der Benutzer seltener an der Gefährdungsstelle auf, da der abgekühlte Ofen keine Gefahr darstellt. Außerdem ist die Möglichkeit zur Vermeidung des Schadens durch den Einbau einer Lampe gegeben, die nur leuchtet, solange die Oberflächentemperatur im ungefährlichen Bereich liegt. Aufgrund dieser Maßnahmen wird nun das Risiko neu bewertet. Die Verletzungsgefahr ist noch immer erheblich, jedoch befindet sich der Benutzer nur noch selten in der Nähe der Gefährdungsstelle und es existiert eine Möglichkeit zur Vermeidung der Verletzung. Dies lässt das Restrisiko auf „zwei“ fallen. Dieses Restrisiko wird jedoch noch immer als zu hoch angesehen. Daher erfolgt eine weitere Schutzmaßnahme, nämlich der Einbau eines physischen Berührungsschutzes nach IP20¹¹. Dadurch ist eine Berührung der heißen Oberfläche nicht mehr möglich und das Restrisiko beträgt „null“.

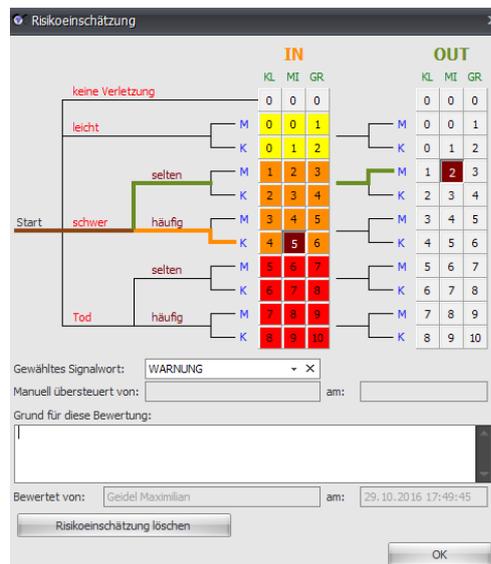


Abbildung 3.8: Einschätzung der Gefahr mithilfe von „Safeexpert“ - Risikobeurteilung vor und nach Einbeziehung der ersten Schutzmaßnahme

¹¹ Schutz gegen Berührung mit einem Finger.

3.4.2 Definition des sicheren Zustandes

Da sich Fehlzustände einer Software nie vollständig ausschließen lassen, ist eine gezielte Reaktion auf einen Ausnahmefall zu definieren. Dazu invertiert die Prozessablaufsteuerung einen digitalen Ausgang aller hundert Millisekunden. Dieses Signal wird von einer geeigneten Überwachungseinheit empfangen, die sicher stellt, dass die Prozessablaufsteuerung noch aktiv ist. Empfängt die Überwachungseinheit jedoch in einem definierten Zeitraum, beispielsweise innerhalb von zwanzig Sekunden, keine Änderung des Signals, so wird von einem Fehlzustand der Prozesssteuerung ausgegangen. Als Reaktion wird der Versuchsstand in einen „sicheren Zustand“ überführt.

Dieser Zustand ist jedoch nicht pauschal definierbar. In vielen Fällen reicht es aus, die Energieversorgung des Versuchsstandes zu deaktivieren. Somit wäre beispielsweise ein Motorprüfstand zum Stillstand gezwungen. Bei medizinischen Geräten, wie beispielsweise einem Herzschrittmacher, ist der sichere Zustand allerdings nicht so trivial definierbar, da ein Abschalten der Energieversorgung für den Patienten potentiell lebensgefährlich ist.

Die Kernfunktionen der Prozessablaufsteuerung sind die Druck- und die Temperaturregelung. Wird nun die Energieversorgung des Versuchsstandes unterbrochen, so schließen sich die Magnetventile der Druckleitungen und die Spannungsversorgung des Thyristorstellers. Dadurch bedingt kann sich der Ofen nicht weiter erwärmen und wird mit seiner Zeitkonstante abkühlen. Mit Gefahren während des Abkühlvorgangs ist nicht zu rechnen. Dieser Zustand kann folglich als sicherer Zustand definiert werden.

3.4.2.1 Anforderungen an die Überwachungseinheit

Die Überwachungseinheit muss innerhalb einer echtzeitfähigen und zuverlässigen Plattform realisiert werden. Des Weiteren ist angestrebt, die Sicherheitsfunktionen redundant und mittels verschiedener Funktionsweisen zu realisieren. Überführt die Überwachungseinheit den Versuchsstand in den sicheren Zustand, so soll der Benutzer in geeigneter Art benachrichtigt werden. Außerdem werden innerhalb der gewählten Plattform Sensoren zur Überwachung der Rauchentwicklung, Oberflächentemperatur des Kühlkörpers der Phasenanschnittsteuerung sowie der Oberflächentemperatur des Ofens eingebunden.

3.5 Softwarekonzept

3.5.1 Auswahl der Programmierumgebung der Prozessablaufsteuerung und der Überwachungseinheit

Für die Programmierung der Prozessablaufsteuerung wird zuerst die Programmierumgebung gewählt. Dabei sind verschiedene Aspekte der Anforderungen relevant. Aufgrund der weiten Verbreitung von LabVIEW und der Arduino-IDE wird zwischen diesen beiden Möglichkeiten gewählt. Grund hierfür ist, dass durch den hohen Bekanntheitsgrad der Umgebungen eine Vielzahl an Tutorien verfügbar ist. Des Weiteren wird die Wartung des Versuchsstandes vereinfacht, wenn der Quellcode allgemein verständlich und für viele auftretende Probleme eine Lösung online verfügbar ist. Wichtig ist auch der Fakt, dass sowohl für LabVIEW, als auch für die Arduino-IDE eine Vielzahl an Bibliotheken existiert, welche die Anbindung von Peripherie, Messgeräten und Sensoren an die Steuerung zeitlich deutlich beschleunigt.

Da im Anwendungsfall der Prozessablaufsteuerung Netzwerkkommunikation, Mess- und Regelungstechnik sowie eine gute Visualisierung gefordert werden, fällt die Wahl zugunsten von LabVIEW aus. In der Aufgabenstellung ist eine ausführbare Datei gewünscht, um das Programm problemlos auf andere Computer zu übertragen. Dies ist mit LabVIEW unkompliziert umsetzbar. Problematisch wäre mittels eines Arduinos auch die Netzwerkkommunikation. Diese stößt bei Arduinos aufgrund der Rechenleistung schnell an ihre Grenzen.

Im Gegensatz zur Prozessablaufsteuerung ist für die Überwachungseinheit eine gute Visualisierung nebensächlich. LabVIEW kann zwar auch auf Realtime-Targets ausgeführt werden, jedoch sind diese Geräte äußerst kostenintensiv und bieten im Gegensatz zu einem Arduino-Board in diesem Anwendungsfall keinen größeren Mehrwert. Die geforderten Sensoren zur Temperaturmessung und zur Messung der Rauchentwicklung können unkompliziert an das Arduino-Board angeschlossen werden. Die geforderte rudimentäre Netzwerkkommunikation kann mit einem Ethernet-Shield realisiert werden. Da die Ausführung des Quellcodes auf einem Mikrocontroller ohne Betriebssystem stattfindet, ist hier die notwendige Echtzeitfähigkeit und Zuverlässigkeit gegeben.

Im Fehlerfall sollen beide Systeme eine Benachrichtigung an den Benutzer absenden. Zu diesem Zweck wird eine Kommunikation via E-Mail genutzt. Grund hierfür ist, dass infolge der weiten Verbreitung dieser Kommunikationsart mit einer langen Verfügbarkeit des Dienstes zu rechnen ist. Außerdem ist der Empfang von E-Mails auf fast allen internetfähigen Geräten möglich.

3.5.2 Auswahl der Softwarearchitektur

3.5.2.1 Prozessablaufsteuerung

Als Softwarearchitektur wird für die Prozessablaufsteuerung eine State-Machine¹² mit einer zweiten parallelen Schleife¹³ zur Messdatenerfassung, Regelung und zum Setzen der Ausgänge verwendet. Der Datenaustausch zwischen den Schleifen findet mittels zweier Notifier¹⁴ statt. Dies stellt sicher, dass stets der aktuellste Wert übergeben und auch gelesen wird. Dadurch wird das doppelte Lesen eines Wertes, aufgrund schlechter Synchronisierung zwischen den Schleifen, verhindert. Grund für die Anwendung dieses Verfahrens ist folgender: durch die Trennung von Messwerterfassung und –verarbeitung ist die Performance des Gesamtsystems erhöht, da die Aufgaben so parallel auf zwei Prozessorkernen ausgeführt werden. Des Weiteren vereinfacht diese Struktur das in Kapitel 3.3.1 dargestellte Problem der Strommessung. Da zur Effektivwertberechnung des Stromes eine Periode möglichst hochauflösend abgetastet werden muss, ist eine hohe Samplerate notwendig. Innerhalb des Messschleife kann außerdem der Regler angesteuert werden. Dies ermöglicht, die maximale Stellgröße des Reglers mit minimalem Zeitverzug zu verringern, sobald eine Überschreitung des Maximalstroms festgestellt wird. Gibt die Steuerung das Signal, dass das Programm beendet werden soll, so findet nach der Fallunterscheidung die Deinitialisierungsroutine statt. Dabei wird auch die parallele Schleife gestoppt. Solange der Befehl zum Beenden nicht gesendet wird, wiederholt sich die Steuerungsschleife. Die parallele Schleife arbeitet unabhängig von der Steuerungsschleife. Dadurch kann diese während einer Ausführung der Steuerungsschleife mehrfach durchlaufen werden. Dies ermöglicht eine deutlich schnellere Messwerterfassung und eine Ausführung der Regelung in wesentlich kürzeren Zeitabständen.

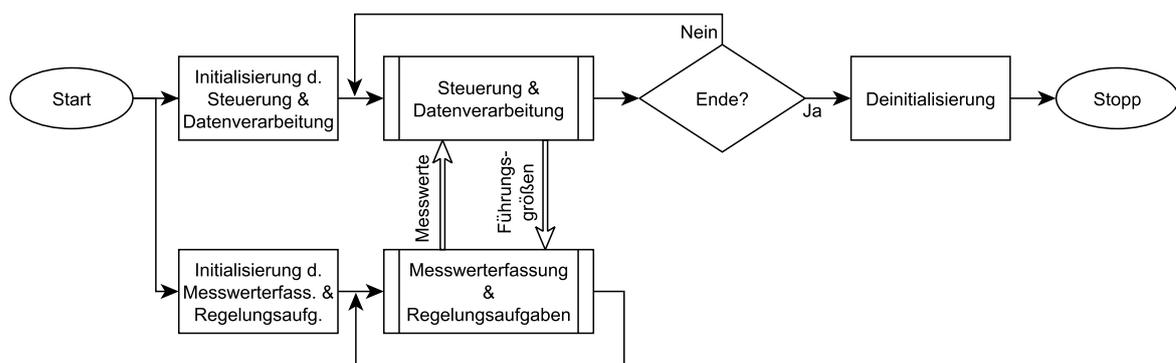


Abbildung 3.9: gewählte Softwarearchitektur der Prozessablaufsteuerung

¹² <http://www.ni.com/tutorial/7595/en/>

¹³ <http://www.ni.com/webcast/2745/de/>

¹⁴ Ein Notifier kann vereinfacht als Queue mit nur einem speicherbaren Element beschrieben werden. Sie ermöglichen die Kommunikation zwischen zwei unabhängigen VIs oder Schleifen (für mehr Informationen siehe: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/B9398355D9550EAF862566F20009DE19>).

Der Steuerungsalgorithmus ist für die Sollwerterstellung der zu regelnden Parameter zuständig. Wie in Abbildung 3.9 dargestellt, wird dieser zyklisch vom aufrufenden Programm wiederholt, solange kein Befehl zum Beenden der Schleife gesendet wird. Zu Beginn liest der Steuerungsalgorithmus die aktuellen Messwerte der Ofenperipherie aus dem oben genannten Notifier aus, wie in Abbildung 3.10 dargestellt wird. In der anschließenden Zustandsüberwachung wird bestimmt, ob sich alle Parameter im definierten Bereich befinden, wobei zwischen unkritischen und kritischen Fehlern unterschieden wird. Ein unkritischer Fehler, wie zum Beispiel eine kleinere Überschreitung des Solldruckes, resultiert in einer Warnung an den Benutzer. Überschreitet der Druck jedoch den maximal zulässigen Druck, so wird der Versuchsstand sofort in den sicheren Zustand überführt.

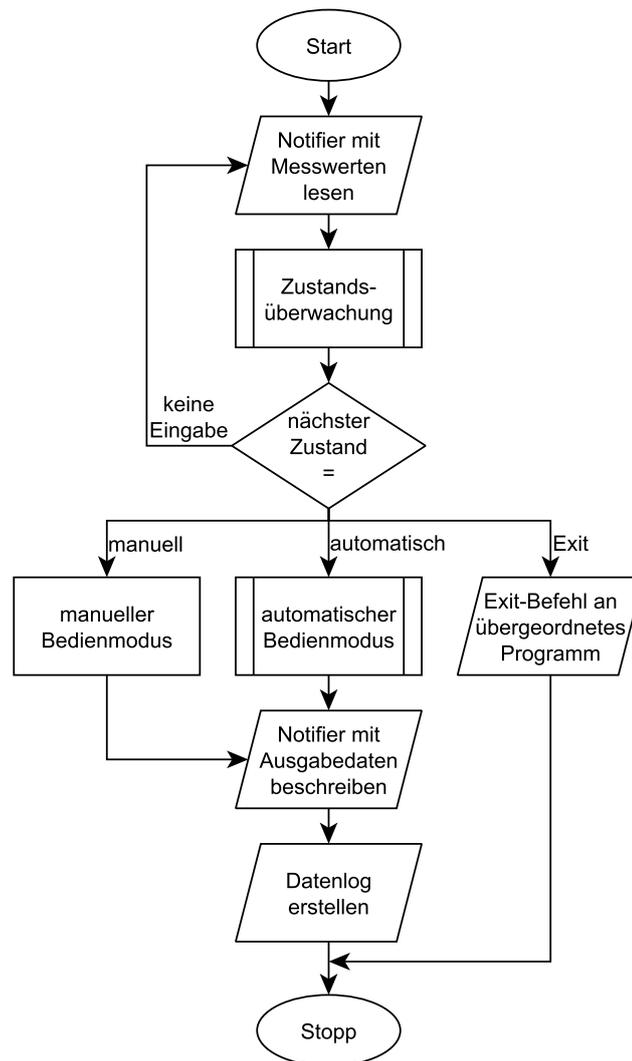


Abbildung 3.10: Ablaufplan der Steuerungsroutine

Trat im vorherigen Prozessschritt kein Problem auf, so wird je nach Benutzereingabe mit dem Schreiben des Exit-Befehls, dem automatischen Bedienmodus oder dem manuellen Bedienmodus fortgefahren. Wurde keine Eingabe getätigt, so springt das Programm zurück in die Routine zum Auslesen des Notifiers. Auf diese Weise verbleibt die Steuerung bis zur Benutzereingabe in einem Zustand der Selbstüberwachung. Im Falle des Exit-Befehls wird nach der aktuellen Ausführung der Steuerung die Schleife beendet. Der manuelle Bedienmodus bietet die Möglichkeit, den Ofen direkt zu steuern. Damit ist es möglich, die Sollwerte für Druck, Temperatur und die Schaltausgänge¹⁵ selbst zu setzen. Durch ein Diagramm zur Visualisierung ist die Auswirkung der gesetzten Größen sofort sichtbar. Des Weiteren werden sämtliche ausgeführten Schritte zur späteren Nachvollziehbarkeit in ein Logfile geschrieben. Die Sollwerte werden anschließend über einen Notifier an die parallele Schleife übergeben. In dieser erfolgt dann die eigentliche Regelung.

In Abbildung 3.11 ist der Ablauf des automatischen Bedienmodus dargestellt. Dieser dient der automatischen Abarbeitung eines „Rezeptes“. Anhand einzelner Punkte wird eine Sollwertkurve für Zeit- und Temperaturwerte beschrieben. Parallel dazu existiert noch ein „Event“-Speicher. Dieser dient dazu, innerhalb eines bestimmten Zeit- und Temperaturbereiches Ventile oder die Pumpe zu schalten. Dadurch wird beispielsweise die automatische Entbinderung ermöglicht, bei der das Bindemittel aus dem Sinterofen durch Verbrauch von Schutzgas „ausgespült“ wird. Diese beiden Vorgabewerte beschreiben den vollständigen Sintervorgang und werden als „Konfiguration“ bezeichnet. Diese Konfiguration soll speicherbar sein, um sie später wieder laden zu können. Dies vermeidet, dass bei jedem Sintervorgang dasselbe Rezept neu eingegeben werden muss. Außerdem dient dies dem eigentlichen Zweck des Programmes - der Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Sintervorganges. Nach erfolgreicher Eingabe der Konfiguration wird diese abgearbeitet. Da nur einzelne Eckpunkte der Sinterkurve gegeben sind, müssen die Zwischenwerte zur Erstellung des aktuellen Sollwertes interpoliert werden. Anschließend wird der Event-Speicher durchsucht, ob zum aktuellen Zeitpunkt ein Event vorliegt. Ist dies der Fall, so wird ein Sollwert für die zu schaltenden Objekte geschrieben. Ansonsten sind alle Schaltausgänge standardmäßig abgeschaltet. Als letzter Schritt werden die erstellten Sollwerte an den Steuerungsalgorithmus übergeben.



Abbildung 3.11: Flussdiagramm des automatischen Bedienmodus

¹⁵ Mithilfe der Schaltausgänge werden die Ventile und die Unterdruckpumpe angesteuert.

3.5.2.2 Monitoring über das Netzwerk

Wie bereits in Kapitel 3.3.5 erwähnt, findet die Realisierung des Monitorings über einen Webservice statt. Dazu bietet LabVIEW Webservices als Funktion an¹⁶. Diese ermöglichen es, Daten zwischen LabVIEW und dem Clienten auszutauschen. Das Konzept sieht vor, die aktuellen Anzeigeelemente der Größenverläufe und ein Bedienelement zum Stoppen des Sintervorganges online darzustellen. Der Datenaustausch zwischen Webservice und der Steuerungssoftware findet wieder über Notifier statt. Des Weiteren ist ein Passwortschutz vorgesehen.

3.5.2.3 Überwachungseinheit

Für die Überwachungseinheit wird eine einfache State-Machine verwendet. Sie soll sukzessive die Sensorwerte erfassen, prüfen, ob die Prozessablaufsteuerung aktiv ist und bei Bedarf eine Meldung an den Benutzer absenden und das System in den sicheren Zustand überführen. Dies ist dargestellt in Abbildung 3.12. Nach Absetzen der Benutzerbenachrichtigung stoppt der Mikrocontroller seinen Programmcode bis zu einem Resetbefehl.

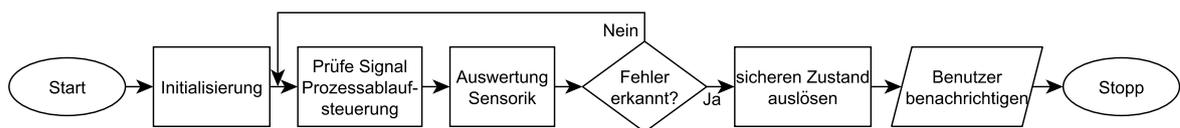


Abbildung 3.12: Softwarearchitektur der Überwachungseinheit

3.5.3 Schnittstellendefinition

In Tabelle 3.2 sind die verwendeten Geräte und ihre Schnittstellen dargestellt. Wie in Kapitel 3.3 erwähnt, wird für die Temperaturregelung ein Thermoelement vom Typ K und für die Druckregelung ein Drucksensor mit Verstärkung des Ausgangssignals verwendet. Für die Drucküberwachung der Zuleitungen werden zwei weitere Drucksensoren benötigt, bei denen allerdings keine Verstärkung notwendig ist. Zur Begrenzung des maximalen Ausgangsstromes des Thyristorstellers ist weiterhin ein analoger Kompensationsstromwandler notwendig. Somit sind an der Prozessablaufsteuerung insgesamt fünf analoge Eingänge erforderlich.

Abgeleitet aus der Risikoanalyse in Kapitel 3.4.1 muss die Oberflächentemperatur des Thyristorstellers und des Sinterofens überwacht und notfalls verringert werden. Des Weiteren ist die Überwachung der Konzentration brennbarer Gase und der Rauchentwicklung erforderlich. Damit kann frühzeitig bei Brandgefahr eingegriffen werden. Für den Gassensor wird ein analoger Eingang zur Auswertung benötigt. Im Falle der Temperatursensoren werden Sensoren mit digitalem Ausgangssignal gewählt.

¹⁶ mehr Informationen unter: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361K-01/lvhowto/build_web_service/

Für das Schalten der Ventile und der Unterdruckpumpe sind vier Relaisausgänge an der Prozessablaufsteuerung notwendig. Zur Unterbrechung der Stromversorgung des Sinterofens ist für die Überwachungseinheit ein weiteres Relais erforderlich.

Tabelle 3.2: Übersicht der verwendeten Geräte und ihrer Schnittstelle

Eigenschaft	Gerät	Signal	Anschluss an
Sensor	Thermoelement Typ K	analog, 100 mV	Prozessablaufsteuerung
Sensor	Drucksensor	analog, 0.5-4.5V	Prozessablaufsteuerung
Sensor	zwei Drucksensoren	analog, 200mV	Prozessablaufsteuerung
Sensor	Komp.-stromwandler	analog, 5V Amplitude	Prozessablaufsteuerung
Sensor	Gassensor	analog, 0-5V	Überwachungseinheit
Sensor	Temperatursensor Ofen	digital, 5V	Überwachungseinheit
Sensor	Temperatursensor Thyr.	digital, 5V	Überwachungseinheit
Aktor	Thyristorsteller	analog, 0-10V	Prozessablaufsteuerung
Aktor	drei Ventile	12V Schaltausgang	Prozessablaufsteuerung
Aktor	Unterdruckpumpe	12V Schaltausgang	Prozessablaufsteuerung
Aktor	Relais	12V Schaltausgang	Überwachungseinheit

3.6 Hardwarekonzept

3.6.1 Auswahl der Messgeräte der Prozessablaufsteuerung

Aus Tabelle 3.2 kann die notwendige Anzahl an Ein- und Ausgängen der benötigten Hardware entnommen werden. Da die Prozessablaufsteuerung mit LabVIEW programmiert wird, vereinfachen vorhandene Treiber die Programmierung enorm. Daher sollen nur Geräte in Betracht gezogen werden, die folgende Anforderungen erfüllen:

- ein analoger Ausgang
- vier analoge Eingänge
- ein analoger Eingang für Thermoelemente mit Kaltstellenkompensation
- vier digitale Schnittstellen
- vier Schaltausgänge

Da es unwahrscheinlich ist, ein Messgerät zu finden, das alle Anforderungen erfüllt, werden stattdessen drei Komponenten ausgesucht. Dies umfasst ein Messgerät mit analogen und digitalen Ein- und Ausgängen, eine Schaltkarte mit Relais sowie ein Messgerät für Thermoelemente mit Kaltstellenkompensation.

Zu Beginn erfolgt nach Tabelle 3.3 die Auswahl der Messgeräte. Dargestellt ist eine Auswahl an infrage kommender Hardware. Für die Messgeräte mit nur fünf Volt Ausgangsspannung wäre eine Operationsverstärkerschaltung zur Ansteuerung der Phasenanschnittsteuerung notwendig, die zehn Volt am Eingang benötigt. Da die Messbox „USB 6001“ von National Instruments einen 10V-Ausgang besitzt und gleichzeitig vom selben Hersteller wie LabVIEW stammt, wird dieses Messgerät verwendet. Durch die in LabVIEW integrierten Treiber ist ein optimales Zusammenspiel gewährleistet.

Tabelle 3.3: Auswahl möglicher Messgeräte

Messgerät	Preis	Analoge Eingänge	Analoge Ausgänge	Anzahl DIO
NI USB 6001	201€	8x $\pm 10V$, 20 kS/s, 14 Bit	2x $\pm 10V$	13
USB-AD14f	199€	16x $\pm 10V$, 20 kS/s, 14 Bit	1x $\pm 5V$	8 In+8 Out
RedLab 1208LS	155€	8x $\pm 20V$, 8 kS/s, 12 Bit	2x $\pm 5V$	16
RedLab 1208FS Plus	227€	8x $\pm 20V$, 50 kS/s, 12 Bit	2x $\pm 5V$	16

Für die Ansteuerung der Schaltausgänge wurde die Relaiskarte „8fach-Relaiskarte 230 V/AC 16 A“ von Conrad Electronic SE bezogen. Diese lässt sich über die RS232-Schnittstelle programmieren und bietet mit der Anzahl an Schaltausgängen noch Reserve für zukünftige Erweiterungen. Des Weiteren ist es möglich, mehrere dieser Relaiskarten zu kaskadieren.

Zur Auswertung des Thermoelementes existieren drei Möglichkeiten. Zum einen der Selbstentwurf einer Operationsverstärkerschaltung, der Kauf einer solchen Schaltung oder ein digitales Messgerät mit USB-Schnittstelle. Da die Qualität des Messgerätes die Genauigkeit der Temperaturregelung bestimmt, empfiehlt sich der Eigenbau einer Operationsverstärkerschaltung nicht, da eine Umsetzung der Kaltstellenkompensation äußerst aufwendig ist. Beim Kauf einer fertigen Verstärkerschaltung, zum Beispiel für Arduinos, ist meist eine schlechte LabVIEW-Kompatibilität gegeben. Auch aufgrund der höheren Zuverlässigkeit und besseren Wartung des fertigen Versuchsstandes wurde daher, ebenfalls von National Instruments, das Thermoelementmessgerät „NI USB-TC01“ mit Kaltstellenkompensation bezogen.

3.6.2 Auswahl der Messgeräte der Überwachungseinheit

Als Basis für die Überwachungseinheit wird ein Arduino Mega mit Ethernet-Shield ausgewählt, da dieser unwesentlich teurer als ein Arduino Uno ist, jedoch eine höhere Rechenleistung besitzt. Wie in Tabelle 3.2 dargestellt, sind ein analoger Gassensor und zwei digitale Temperatursensoren notwendig. Als Gassensor wird der „MiCS5534“ der Firma SGX Sensortech verwendet, dessen Funktionsprinzip in Kapitel 2.3.4 dargestellt wurde. Für die Temperatursensoren werden zwei verschiedene Sensortypen verwendet. Zur Überwachung der Temperatur des Thyristor-stellers wird ein „DS18B20“-Sensor verwendet. Dieser ist spezifiziert für Temperaturen bis 125 °C. Diese Temperatur sollte vom Kühlkörper nicht überschritten werden. Da bei der Oberflächentemperatur des Ofens mit Temperaturen bis über 200 °C gerechnet werden muss, ist eine Temperaturmessung mit direktem Kontakt des Sensors erschwert. Zusätzlich muss davon ausgegangen werden, dass die Oberfläche des Ofens keine einheitliche Temperatur besitzt. Aus diesen Gründen wird das Pyrometer „MLX90614KSF“ der Firma Melexis verwendet, welches kontaktlos die Temperatur einer wärmeabstrahlenden Fläche misst. Außerdem wurde ein Relais mit Optokoppler gewählt. Dieses Relais ist notwendig, um mit dem geringen Strom eines digitalen Ausgangs schlussendlich das Relais zur Trennung der Energiezufuhr zu schalten. In Abbildung 3.13 sind die einzelnen Komponenten dargestellt.

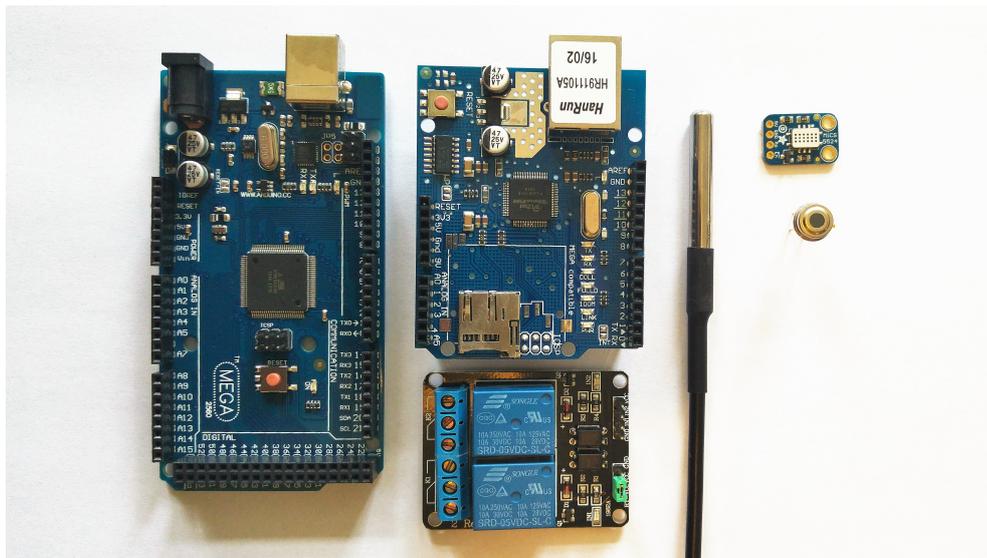


Abbildung 3.13: Komponenten der Überwachungseinheit, von links nach rechts: Arduino Mega, Ethernet-Shield, Relaiskarte, DS18B20 in Edelstahlgehäuse, Gassensor und Pyrometer

4 Umsetzung der Sinterofensteuerung

Dieses Kapitel dient der Veranschaulichung des Realisierungsprozesses des Konzeptes. Da die grundlegende Struktur bereits erläutert wurde, wird auf diese nicht nochmals eingegangen.

4.1 Herausforderung bei der Umsetzung

Die größte Herausforderung bei der Umsetzung stellt die vergleichsweise lange Laufzeit des Programmes dar. Aufgrund dessen kann ein Feld zum Speichern von Messwerten nach etlichen Stunden zu einem Speicherüberlauf und damit verbunden zum Absturz der Steuerung führen. Auch die Anzeigeelemente, wie zum Beispiel der Verlaufsgraph der Temperatur, können zu solchen Problemen führen. Um diese zu umgehen, wird mit festen Größen der Speicherbereiche gearbeitet. Im Falle des Speicherns von Messwerten wird ein Feld mit „n“ Werten initialisiert. Sobald dieses voll ist, wird der älteste Wert überschrieben. Dadurch kann der Speicherbedarf nicht über die Feldgröße ansteigen. Ein weiteres Problem stellt der Verlaufsgraph der Temperatur im automatischen Modus dar. Würde in jedem Zyklus ein Wert in den Diagrammspeicher übergeben, wiese dieser mit der Zeit eine beachtliche Größe auf. Um dieses Problem zu umgehen, wird die maximale Größe des Speichers fest auf 2^{17} Elemente programmiert. Da im automatischen Bedienmodus die Programmlaufzeit bekannt ist, kann über Gleichung 4.1 berechnet werden, in welchen Zeitintervallen ein Messwert gespeichert werden darf. Die Speicherfrequenz passt sich demzufolge dynamisch an die Programmdauer an. Unabhängig davon findet jedoch die Berechnung der Zwischenwerte statt. Diese werden nach Erstellung des Steuerbefehles nicht länger benötigt und verworfen.

$$\text{Zeitabstand zwischen Speichervorgängen} = \frac{\text{Programmlaufzeit}}{\text{Größe des Speicherbereiches}} \quad (4.1)$$

4.2 Programmierung der Prozessablaufsteuerung

Das Konzept der Programmablaufsteuerung wurde in Kapitel 3.5.2.1 erläutert und wird anschließend im folgenden Kapitel umgesetzt. Wie im Konzept existieren zwei parallele Schleifen, wobei die eine die Steuerung des Sinterofens übernimmt und die andere die Steuerung mit Eingangsdaten versorgt und die Befehle der Steuerung umsetzt.

4.2.1 Messwerterfassung, Reglerausgabe und Setzen der Ausgänge

Zu Beginn der parallelen Schleife ist eine Initialisierung der Messgeräte, Notifier, Speicherbereiche und der Schnittstelle zur Relaiskarte notwendig. Anschließend starten zwei voneinander unabhängige Teilprozesse. Ein Prozess bearbeitet die Messwerterfassung mit anschließender Überwachung des Stromflusses durch die Heizwendeln. Wird eine Überschreitung des Maximalstroms festgestellt, so wird die zulässige Stellgröße des Reglers verringert. Anschließend werden die gemessenen Werte über einen Notifier an den Steuerungsalgorithmus übergeben. Der andere Prozess dient der Ansteuerung der Peripherie. Die Sollwerte der Ausgabegeräte werden vom Steuerungsalgorithmus über einen zweiten Notifier an die parallele Schleife übergeben. Daraufhin werden die Reglerparameter beziehungsweise Sollwerte innerhalb der parallelen Schleife aktualisiert und anschließend alle Ausgänge gesetzt. Dies betrifft zum einen die Relaiskarte und zum anderen den analogen Ausgang zum Steuern der Phasenanschnittsteuerung. Zu beachten ist, dass nur Befehle geschrieben werden, die sich vom vorherigen Wert unterscheiden. Dies reduziert die Anzahl der Zugriffe auf die Schnittstellen und erhöht somit die Performance und Stabilität des Programmes.

In LabVIEW existiert ein vorgefertigter PID-Regler. Dieser benötigt als Informationen die minimale und maximale Stellgröße, die Führungsgröße und die Regelgröße sowie die Reglerparameter. Dargestellt ist dieser Regler in Abbildung 4.1. Mit einem internen Timer passt der Regler automatisch seine Ausgangsdaten an die Schleifenfrequenz an.

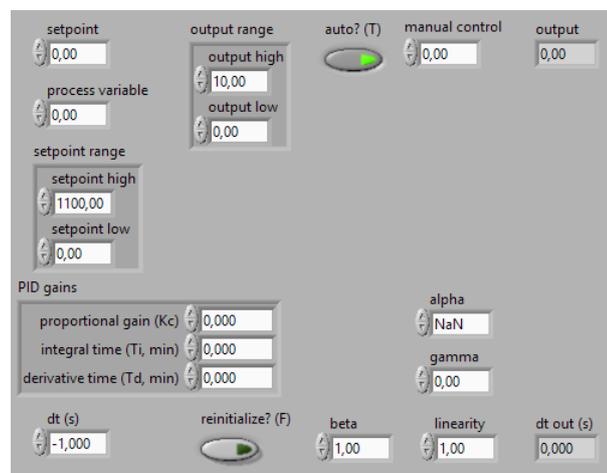


Abbildung 4.1: in LabVIEW hinterlegter PID-Regler

Im Unterschied zum Konzept wurde auf eine Messung des Zuleitungs- und Ableitungsdruckes verzichtet. Dafür gibt es zwei Gründe. Zum einen ist der maximale Zuleitungsdruck durch das Druckminderungsventil an der Gasflasche begrenzt und der Ableitungsdruck liefert nur eine Information über die Funktionstüchtigkeit der Unterdruckpumpe. Der Zuleitungsdruck gibt an, ob die Gasflasche entleert ist oder ob ein unzulässig hoher Druck vorliegt. Diese Information wird jedoch auch von der Druckmessung innerhalb des Ofens erfasst und ein Überdruck kann aufgrund des Druckminderungsventils nicht entstehen. Die Funktionstüchtigkeit der Pumpe kann ebenfalls durch eine kurze Sichtprüfung sichergestellt werden. Demzufolge stellen die beiden Druckmessungen keine Priorität für die Funktion des Versuchsstandes dar. Zum anderen bietet die verwendete Messkarte eine Messfrequenz von zwanzig Kilohertz, welche sich aufgrund des gemeinsamen Analog-Digital-Wandlers auf die einzelnen Messkanäle aufteilt. Durch die Halbierung der Messkanäle kann so das Messsignal der Druckregelung und der Strombegrenzung mit doppelter Geschwindigkeit erfasst werden, was eine genauere Auswertung der beiden Verfahren ermöglicht. Dies wird durch Verwendung statistischer Methoden zur Verringerung der Messfehler erreicht.

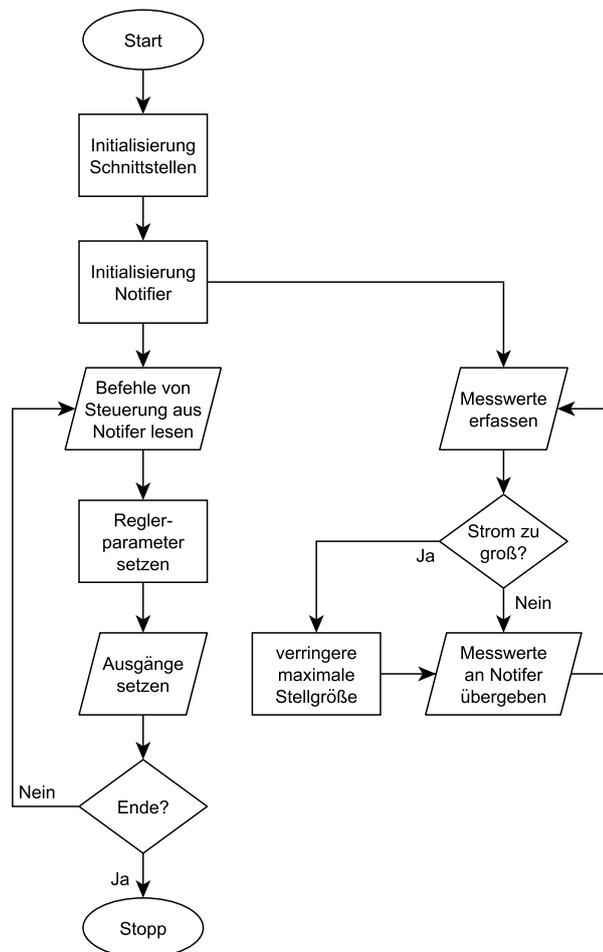


Abbildung 4.2: Ablaufdiagramm der parallelen Schleife zur Messwernerfassung, Reglerausgabe und zum Setzen der Ausgänge

4.2.2 Steuerungsalgorithmus

In Kapitel 3.5.2.1 wurde für die Steuerung und den automatischen Bedienmodus ein ausführliches Konzept erstellt, welches analog dazu umgesetzt wurde. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nur auf einige Teilproblemstellungen eingegangen, die sich innerhalb der Umsetzung der Arbeit als wichtig herausgestellt haben.

4.2.2.1 Berechnung der Zwischenwerte zur Sollwerterstellung

Wie bereits erörtert, wird die Sollwertkurve, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, durch einzelne Eckpunkte beschrieben. Aus diesen Punkten muss nun für jeden Zeitschritt ein gültiger Sollwert für die Temperaturregelung berechnet werden. Gespeichert wird jeder Punkt innerhalb eines eindimensionalen Feldes aus Clusterelementen. Jedes Clusterelement beinhaltet als Informationen einen Eckpunkt der Sollwertkurve, welcher aus einem Zeitstempel und einer zugehörigen Solltemperatur besteht.

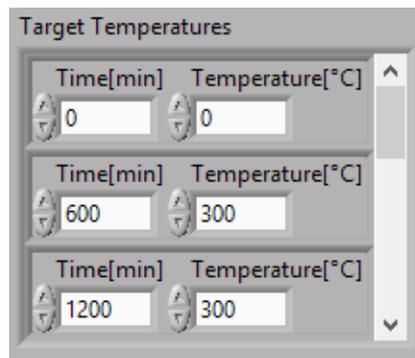


Abbildung 4.3: Beschreibung der Sollwertkurve über einzelne Punkte

Wie in Abbildung 4.4 dargestellt, wird zur Berechnung zuerst die Sollwertkurve eingelesen. Anschließend wird bei erstmaligem Aufruf des Programmes der Laufzeitimer gestartet. Dieser bestimmt, zu welchem Zeitpunkt ein Sollwert berechnet werden muss. Um die benachbarten Eckpunkte des aktuellen Zeitstempels zu finden, wird verglichen, ob der aktuelle Timerwert kleiner als der zukünftige, aber größer als der vergangene Zeitstempel der Eckpunkte ist. Dies geschieht, indem das Sollwertfeld im Index null und eins indiziert wird und der darin befindliche Zeitstempel ausgelesen wird. Befindet sich der Wert des Timers nicht zwischen den Zeitstempeln, so wird das erste Element des Feldes solange gelöscht, bis die Bedingung erfüllt ist. Wird die Bedingung nie erfüllt, so wird der automatische Modus beendet. Wird sie jedoch erfüllt, so wird der Sollwert der Temperatur linear interpoliert. Der Anstieg ergibt sich aus der Temperatur- und Zeitdifferenz zwischen den Eckpunkten. Die aktuelle Zeit ist

über den Laufzeittimer gegeben und der Offset entspricht der Temperatur des vergangenen Eckpunktes. Anschließend werden die Daten zur Nachvollziehbarkeit in einen Speicher geschrieben, aus dessen Daten das Diagramm zur Visualisierung erstellt wird. Wie in Kapitel 4.1 dargelegt, werden nur Werte innerhalb eines bestimmten Zeitabstandes abgespeichert. Die dazwischenliegenden werden verworfen, um Speicherplatz zu sparen. Dieser Programmablauf wird zyklisch wiederholt und als Unterprogramm aufgerufen.

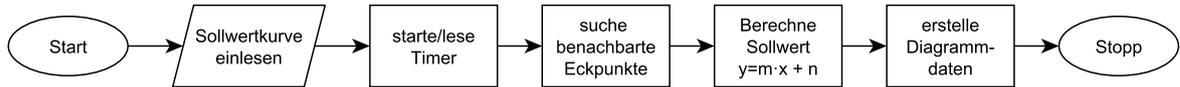


Abbildung 4.4: Berechnung der Zwischenwerte aus den Eckdaten

4.2.2.2 Validierung der Konfiguration

Die Konfiguration beinhaltet, wie in Kapitel 3.5.2.1 dargelegt, alle Sollwertvorgaben im automatischen Betriebsmodus. Sie unterteilt sich einmal in Eingaben zur Zeit-Temperatur-Kurve und zum anderen in eine Sollwertkurve der Schaltausgänge. Die letztgenannte Struktur wird als „Event“ bezeichnet und wird innerhalb eines bestimmten Zeit- und Temperaturbereiches ausgeführt. Wichtig für die Ausführung des automatischen Bedienmodus ist, dass zu jedem Zeitpunkt ein definierter Zustand existiert. Außerdem müssen typische Bedienfehler abgefangen werden. Zu diesem Zweck existiert das in Abbildung 4.5 dargestellte SubVI „validation of input data.vi“.

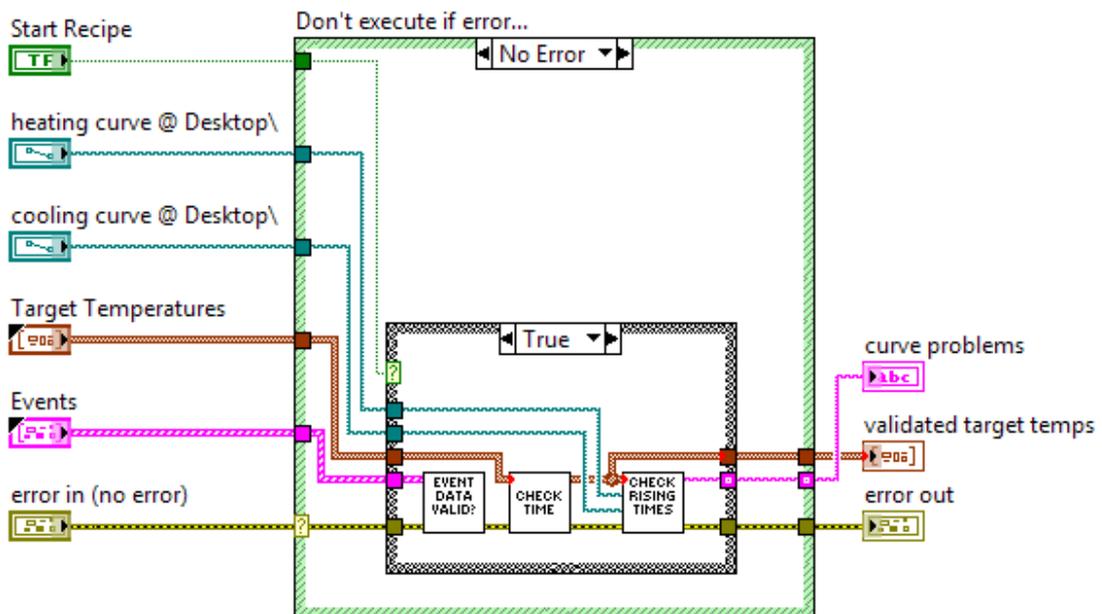


Abbildung 4.5: Unterprogramm zu Validierung der Eingabedaten

Dabei werden die Eingabedaten auf drei verschiedene Fehler untersucht. Zuerst wird, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, geprüft, ob sich die Event-Daten überlagern. Diese liegen grundsätzlich in zeitlicher Reihenfolge geordnet vor. Wären zwei Events gleichzeitig gültig, so wäre nicht sichergestellt, welches ausgeführt wird. Daher wird zuerst geprüft, ob die obere Zeitschranke des letzten Events größer als die minimale des nächsten ist. Überlagern sich zwei Events, so wird ein entsprechender Fehler auf der „Error-Leitung“ generiert, der Benutzer benachrichtigt und das Programm gestoppt. Diese Überprüfung findet innerhalb einer Schleife für alle Events statt. Anschließend wird in einer zweiten Schleife überprüft, ob innerhalb eines einzelnen Events die obere Temperaturschranke größer als die untere ist. Falls hier ein Fehler vorliegt, wird ebenfalls der Benutzer benachrichtigt und das Programm gestoppt.

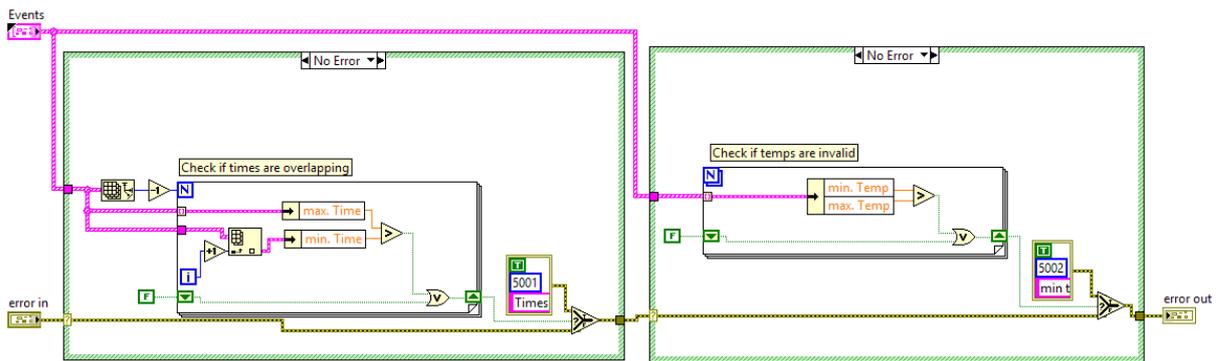


Abbildung 4.6: Überprüfen der Events auf Überlagerungen

Als zweites wird geprüft, ob die Zeit-Temperatur-Kurve zum Zeitpunkt „null“ beginnt und mit der Temperatur „null“ endet. Ist dem nicht so, werden diese beiden Werte eingefügt. Anschließend wird überprüft, ob die Sollwerte der Zeit aufsteigend geordnet sind. Ist dies nicht der Fall, so wird wieder ein Fehler generiert.

Als drittes erfolgt die Prüfung, ob die Anstiege der eingegebenen Temperaturkurve mit dem Ofen möglich sind. Dazu muss ein Aufheiz- und Abkühlvorgang bei maximal zulässiger Stellgröße des Ofens als Referenzkurve hinterlegt sein¹⁷. Je näher sich die Temperatur dem Maximum beim Heizen, beziehungsweise der Raumtemperatur beim Abkühlen annähert, desto kleiner wird der Anstieg der Referenzkurve. Demzufolge muss der Anstieg der Sollwertkurve stets kleiner als der Anstieg im zukünftigen Eckpunkt der Referenzkurve sein, da dieser den maximal möglichen Anstieg der Sollwertkurve beschreibt. Folglich wird im Programm der Temperaturwert des zukünftigen Eckpunktes ausgelesen und diese Temperatur wird innerhalb der Referenzkurve gesucht. Anschließend wird über ein Steigungsdreieck in der Referenzkurve der Anstieg berechnet. Die Berechnung erfolgt über die benachbarten Werte, um die Genauigkeit

¹⁷ Innerhalb dieser Arbeit wurde ein zweites Programm erstellt, dass diese Kennlinien automatisch aufnimmt. Dadurch ist die Inbetriebnahme eines neuen Sinterofens schnell und unkompliziert möglich.

zu erhöhen. Als nächstes wird der Anstieg der Sollwertkurve mit dem der Referenzkurve verglichen. Wird festgestellt, dass die Sollwertkurve nicht eingehalten werden kann, erfolgt eine Meldung an den Benutzer. Das Programm wird jedoch davon unbeeinträchtigt ausgeführt. Da die Sollwertkurve aus mehreren Elementen besteht, führt das Programm diesen Algorithmus dynamisch innerhalb einer Schleife aus, da die Anzahl der Eckpunkte unbekannt ist.

4.2.2.3 Erstellung des Webservices

Wie im Konzept erwähnt, wird zur Überwachung des Versuchstandes ein Webservice erstellt. Dieser Webservice ist in der Lage, auf einen Screenshot der wichtigsten Ofenparameter zuzugreifen und stellt diesen unter einer Adresse im Netzwerk zur Verfügung. Wird die entsprechende Netzwerkadresse im Browser eingegeben, so wird eine Anfrage an den Webservice gesendet, woraufhin dieser mit dem gewünschten Bild antwortet. Da sich das Bild jedoch nicht von allein aktualisiert, ist das Programm nicht komfortabel nutzbar. Aufgrund dessen wird das Bild in eine HTML-Seite eingebettet, die durch ein Javascript in regelmäßigen Zeitabständen aktualisiert wird. Somit ist kein manuelles Neuladen der Seite mehr notwendig.

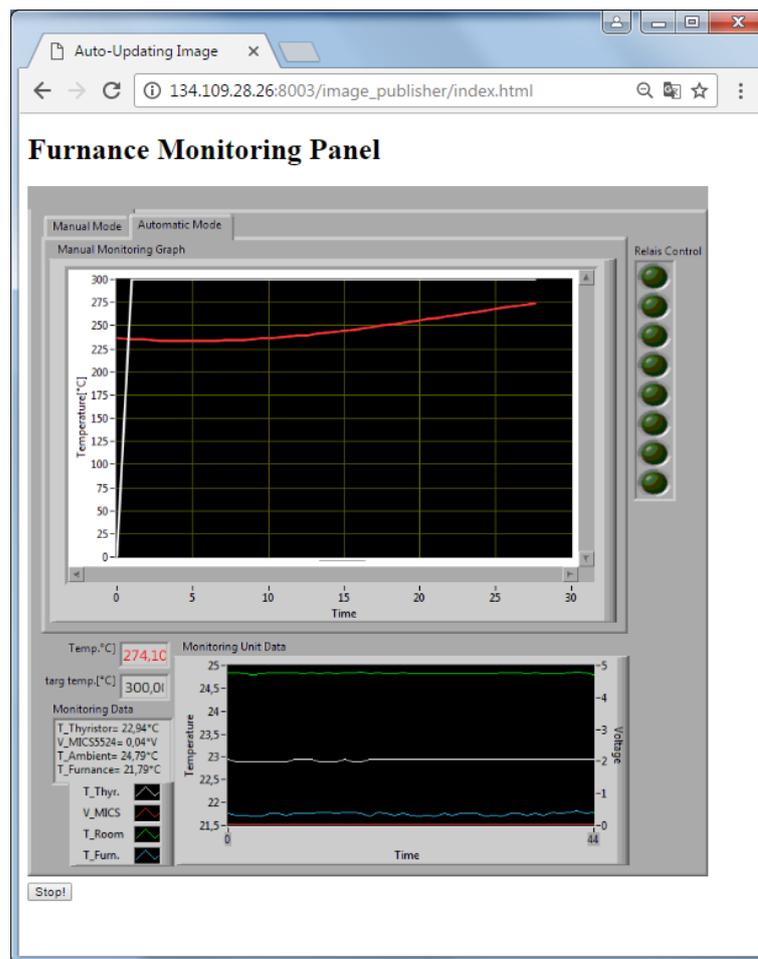


Abbildung 4.7: Einbettung des Screenshots in eine selbstaktualisierende HTML-Seite

Um den Ofen aus der Ferne abschalten zu können, beinhaltet die HTML-Seite ein Bedienelement zum Stoppen des Versuchsstandes. Aus sicherheitstechnischen Gründen muss eine Authentifizierung der Anfrage erfolgen, um unbefugten Personen den Zugriff zu verweigern. In Abbildung 4.8 wird die Lösung dieses Problems dargestellt. Wird das Bedienelement „Stop“ gedrückt, so erfolgt anschließend eine Anfrage an den Webservice. Dieser fordert daraufhin den Clienten dazu auf, sich zu authentifizieren, was in Abbildung 4.9 dargestellt wird. Der Benutzername und das Passwort sind Base64 codiert. Der Webservice prüft daraufhin, ob die Anmeldedaten korrekt sind. Falls ja, so wird über einen Notifier der Stoppbefehl an das Hauptprogramm übergeben. Wenn nicht, wird erneut nach den Anmeldedaten gefragt. Das Monitoring inklusive Authentifizierung und automatischem Neuladen ist durch diese Lösungsvariante sowohl vom Desktop-PC als auch vom Smartphone aus möglich.

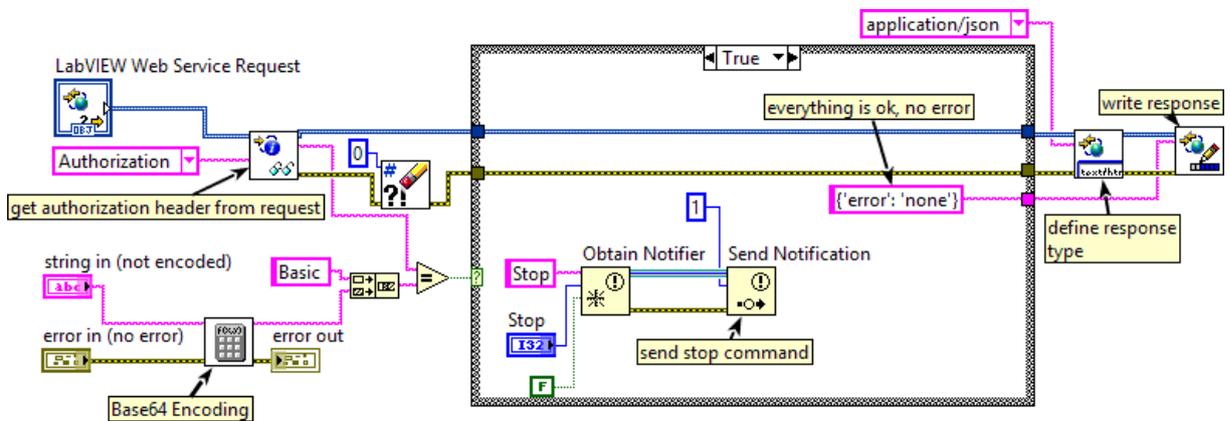


Abbildung 4.8: Webservice zur Erstellung des Stopbefehls

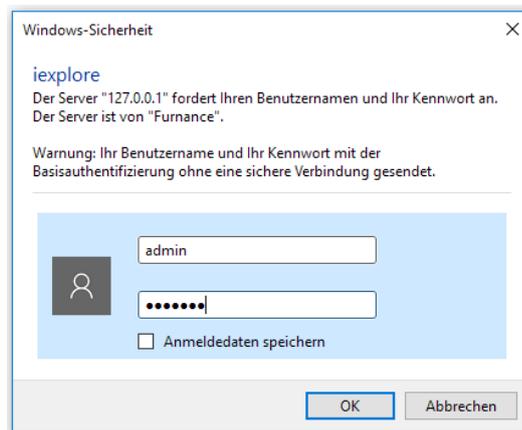


Abbildung 4.9: Authentifizierung des Benutzers zum Stoppen des Versuchsstandes

4.3 Realisierung der Reglerparametrierung

4.3.1 Bestimmung der Regelstrecke

Zur Bestimmung der Regelstrecke wird eine Sprungantwort des Systems auf eine konstante Eingangsgröße aufgenommen. Dazu wird die Eingangsspannung des Thyristorstellers auf 5,2 Volt gestellt, wodurch ein durch den Widerstand der Heizwendeln begrenzter Strom fließt. Durch die simultane Strommessung wurde festgestellt, dass aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Widerstands der fließende Strom von 22 Ampere auf 18 Ampere zurückgeht. Da nach Gleichung 4.2 eine quadratische Abhängigkeit zwischen der Heizleistung und dem fließenden Strom besteht, muss dieser Einfluss kompensiert werden.

$$P_{\text{Heiz}} = I^2 \cdot R_{\text{Heizwendel}} \quad (4.2)$$

Wie in Kapitel 3.3.1 bereits erwähnt, wird dazu ein Algorithmus programmiert, der die maximale Stellgröße des Reglers so manipuliert, dass ein Strom von I_{max} fließt. Wird während der Strommessung festgestellt, dass bei maximaler Stellgröße ein Strom kleiner als I_{max} fließt, so erfolgt eine Vergrößerung der maximalen Stellgröße um 0,01 Volt. Wird jedoch ein Strom größer als I_{max} gemessen, so wird die Stellgröße um 0,2 Volt verringert. Ziel ist, dass sich die Stellgröße langsam an ihren maximalen Wert annähert und sich anschließend auf einem Endwert stabilisiert. Durch die kleine Erhöhung der Stellgröße beim Annähern ist eine möglichst genaue Angleichung der Größen gewährleistet. Wird die maximale Stellgröße jedoch zu stark erhöht, so fließt ein Strom größer I_{max} , der die Heizwendeln beschädigen könnte. Aus diesem Grund wird die maximale Stellgröße bei Überschreitung um 0,2 Volt vergleichsweise stark verringert. Anschließend erfolgt wieder die schrittweise Erhöhung. Um zu verhindern, dass eine ständige Veränderung der maximalen Stellgröße stattfindet, wird diese nur soweit erhöht, dass maximal ($I_{\text{max}}-1$ Ampere) fließen. So findet zwischen ($I_{\text{max}}-1$ Ampere) und I_{max} keine Veränderung statt. Der maximal zulässige Strom ist innerhalb des Programmes variabel wählbar. Der Algorithmus passt die maximale Stellgröße so an, dass ($I_{\text{max}} - 1$ Ampere) fließen. Des Weiteren wird die minimale Stellgröße auf 1,9 Volt festgelegt. Da der Thyristorsteller über einen Optokoppler angesteuert wird, ist eine Mindestspannung notwendig, um Strom zu leiten. Durch diese hier beschriebenen Maßnahmen wird die Stellgröße zwischen null Ampere und I_{max} skaliert. Mit diesem Algorithmus ist es ebenfalls möglich, die Sprungantwort bei einem konstanten Strom aufzunehmen. Dazu wird der Sinterofen im manuellen Modus betrieben. Wird nun eine annähernd unendliche Solltemperatur vorgegeben, so gibt der Regler dauerhaft die maximale Stellgröße aus. Diese wiederum ist durch den einstellbaren Maximalstrom begrenzt. Dadurch bedingt fließen dauerhaft ($I_{\text{max}} - 1$ Ampere). Mit dieser Methode wurde die in Abbildung 4.10 dargestellte Sprungantwort aufgenommen. Die Stromstärke beträgt konstant 23 Ampere. Aus Sicherheitsgründen musste die Messung bei 1100 °C abgebrochen werden, da der Sinterofen für höhere Temperaturen nicht konstruiert ist.

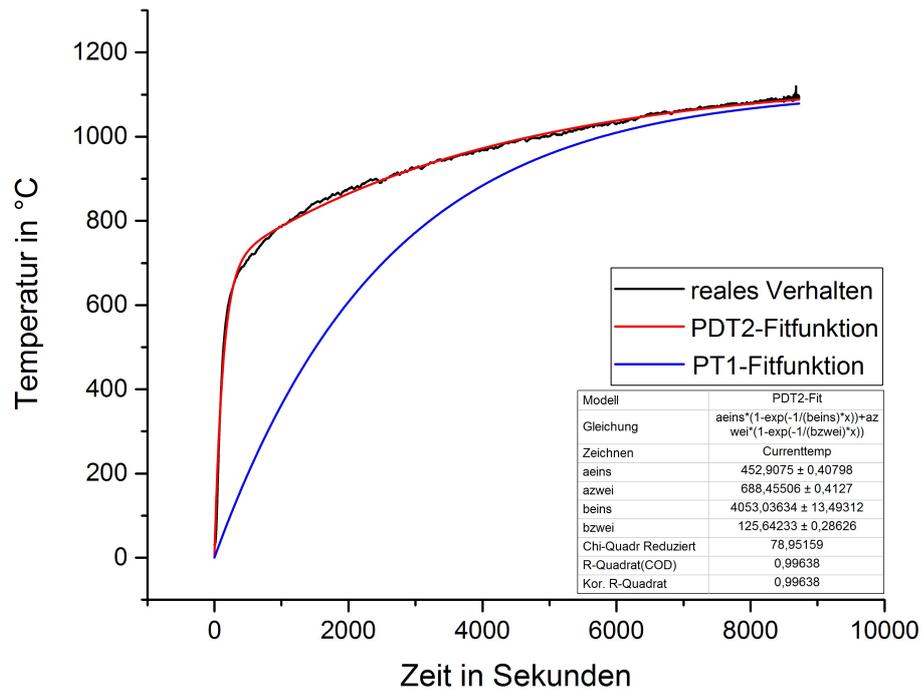


Abbildung 4.10: Gemessene Sprungantwort und Regression der Sprungantwort

Wie Abbildung 4.10 zu entnehmen ist, handelt es sich bei der Regelstrecke weder um PT1- noch um PT2-Verhalten. Im Vergleich zum blau dargestellten PT1-Verhalten ist die quadratische Abweichung zur Kurve $y(t) = y_{\max} \cdot (1 - e^{-t/T})$ deutlich zu groß. Auch die charakteristische Kurvenform des PT2-Verhaltens ist nicht mit vertretbarer Abweichung modellierbar. Ersichtlich ist jedoch, dass die Kurve augenscheinlich mindestens zwei Zeitkonstanten beinhaltet, da die Abweichung zu einer Strecke mit nur einer Zeitkonstanten deutlich zu groß ist. Da eine Ähnlichkeit zum PT1-Verhalten jedoch vorhanden ist, erfolgt eine Regression der Kurve mittels der Funktion zweier sich addierender PT1-Glieder. Dabei werden die Zeitkonstanten und stationären Endwerte der Gleichung 4.3 durch Regression bestimmt. Ersichtlich ist, dass die Abweichung der Funktion zum realen Verhalten in Abbildung 4.10 nur geringfügig ist. Demnach ist die Modellierung der Regelstrecke durch die bestimmte Funktion zulässig.

$$y(t) = y_{\max 1} \cdot (1 - e^{-t/T_1}) + y_{\max 2} \cdot (1 - e^{-t/T_2}) \quad (4.3)$$

Für die Regelstrecke ergibt sich folgender Zusammenhang im Bildbereich:

$$G(s) = \frac{\frac{y_{\max 1}}{23A}}{s \cdot T_1 + 1} + \frac{\frac{y_{\max 2}}{23A}}{s \cdot T_2 + 1} \quad (4.4)$$

$$G(s) = \frac{K_{S1}}{s \cdot T_1 + 1} + \frac{K_{S2}}{s \cdot T_2 + 1} \quad (4.5)$$

$$G(s) = \frac{K_{S1}}{s \cdot T_1 + 1} + \frac{K_{S2}}{s \cdot T_2 + 1} = \frac{K_{S1} \cdot s \cdot T_2 + K_{S2} \cdot s \cdot T_1}{(s \cdot T_1 + 1) + (s \cdot T_2 + 1)} \quad (4.6)$$

Durch Umstellen und Zusammenfassen ergibt sich aus Gleichung 4.6 Gleichung 4.7. Es ist ersichtlich, dass es sich beim hier vorliegenden Verhalten um eine PDT2-Strecke handelt.

$$G(s) = \frac{K_P \cdot (1 + s \cdot K_D)}{s^2 \cdot T_1 \cdot T_2 + s \cdot (T_1 + T_2) + 1} \quad (4.7)$$

4.3.2 Simulation des Regelkreises

in Abbildung 4.11 ist das Streckenmodell zu Berechnung der Sprungantwort auf 23 Ampere Eingangsstrom dargestellt. Grundlage der Simulation bilden die im vorherigen Kapitel ermittelten Parameter. In Abbildung 4.12 wird sowohl die simulierte Sprungantwort als auch die reale Messkurve dargestellt. Ersichtlich ist, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den Kurvenverläufen vorhanden ist, was auf eine plausible Modellierung schließen lässt.

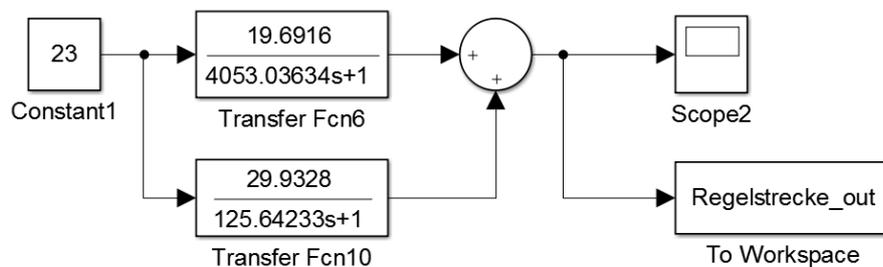


Abbildung 4.11: Simulation der Sprungantwort in Simulink

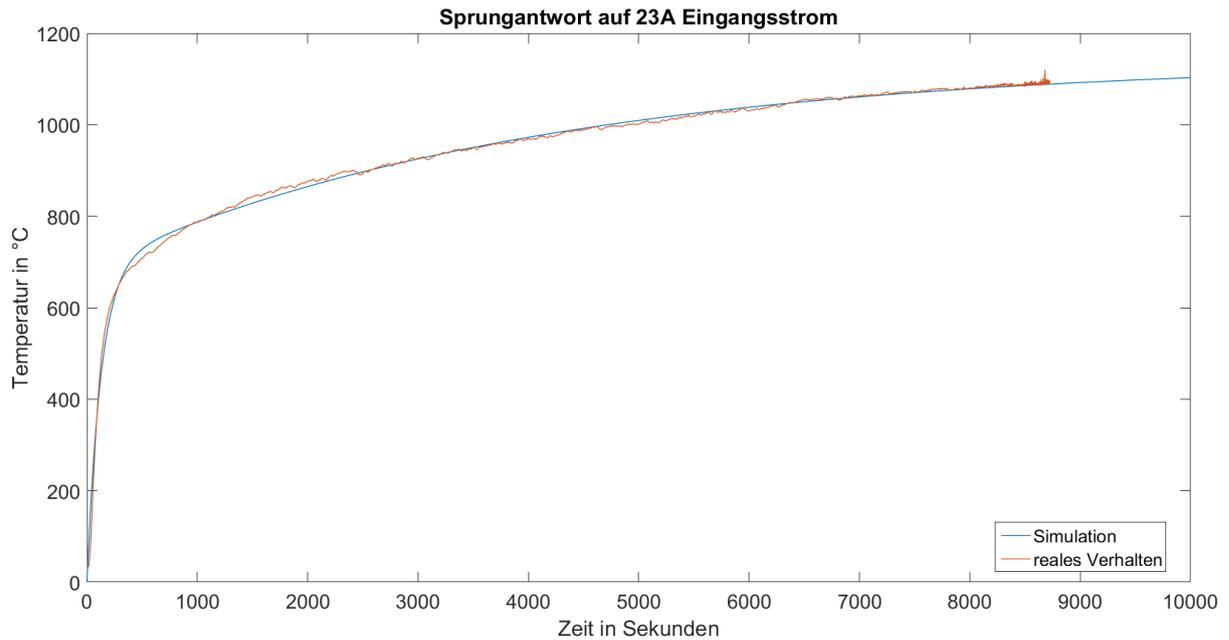


Abbildung 4.12: Vergleich der simulierten mit der realen Sprungantwort

Zur Simulation der Regelung wird anschließend die oben beschriebene Regelstrecke in den Regelkreis integriert. Als Regler wird ein PID-Regler mit Stellgrößenbeschränkung verwendet. Dargestellt wird der Regelkreis in Abbildung 4.13. Als Führungsgröße wird eine konstante Größe vorgegeben. Die Reglerparameter K_P , K_I und K_D wurden mit dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Vorgehen iterativ bestimmt. Dazu wurden mittels der „PID-Tune“-Funktion die Parameter schrittweise verändert, bis eine minimale Einschwingzeit bei einer maximalen Überschwingweite von ± 10 °C erreicht wurde. Als optimales Ergebnis wurden die Reglerparameter angesehen, die für die Simulation in Abbildung 4.14 verwendet wurden. Dazu wurden folgende Parameter ermittelt: $K_P = 0,13 \frac{V}{K}$, $K_I = 0,0062 \frac{V}{K \cdot s}$ sowie $K_D = 0,156 \frac{V \cdot s}{K}$.

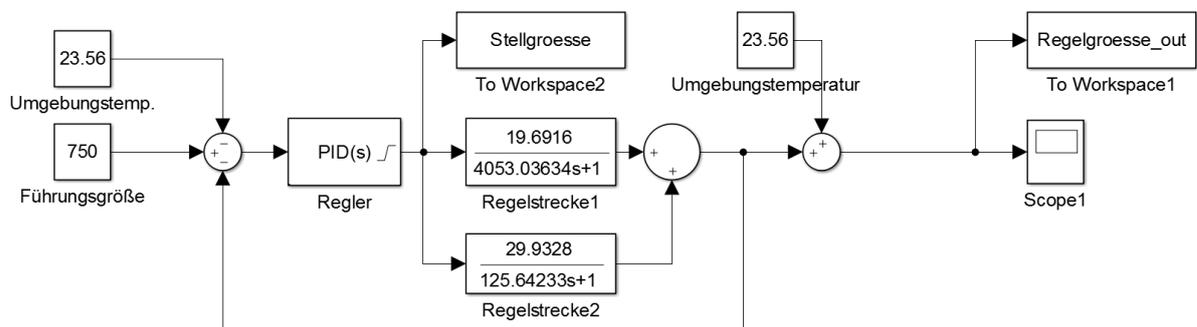


Abbildung 4.13: Simulation des Regelkreises in Simulink

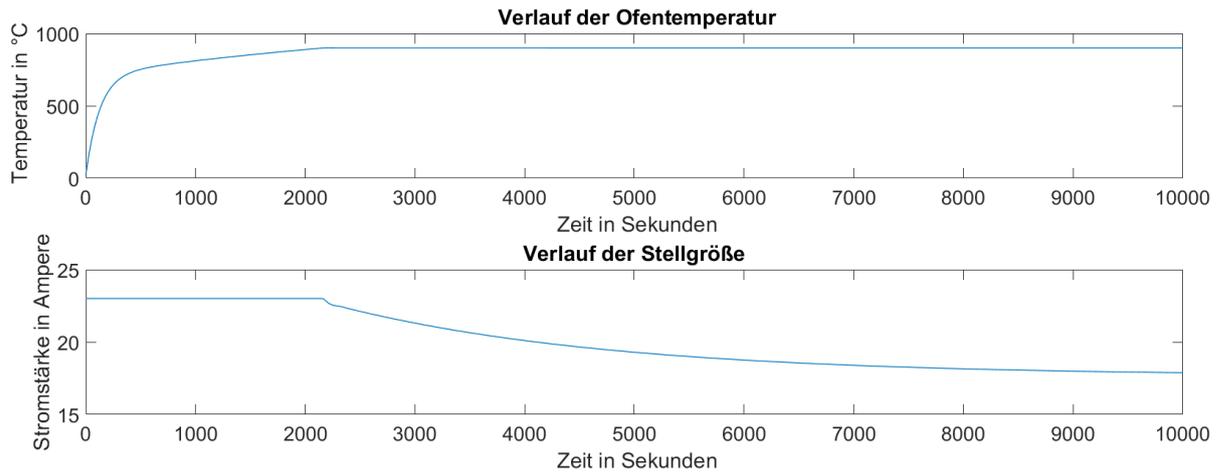


Abbildung 4.14: Temperatur- und Stellgrößenverlauf der Regelung mit den ermittelten Parametern

Während eines Sinterprozesses werden statt einer konstanten Führungsgröße Temperatur-Zeit-Kurven mit linearem Anstieg vorgegeben. Aus diesem Grund wird innerhalb der Simulation ebenfalls geprüft, ob die Regelgröße der variablen Führungsgröße mit ausreichender Genauigkeit folgt. Dazu wurde als Führungsgröße der Temperaturverlauf eines typischen Sintervorganges verwendet. Wie in Abbildung 4.15 zu sehen ist, führen die Reglerparameter im unteren Temperaturverlauf zu einem leichten Überschwingen. Dieses befindet sich jedoch innerhalb der definierten Grenzwerte und stellt somit kein Problem dar. Des Weiteren kann die Regelgröße beim Abkühlvorgang der Regelgröße ab circa 200 °C nicht mehr folgen, da die hier wirkenden Zeitkonstanten zu groß sind. Bis auf diese beiden Ausnahmen gleicht sich die Regelgröße jedoch nahezu vollständig an den jeweiligen Sollwert an. Die ermittelten Reglerparameter stellen somit auch hier eine optimale Lösung dar.

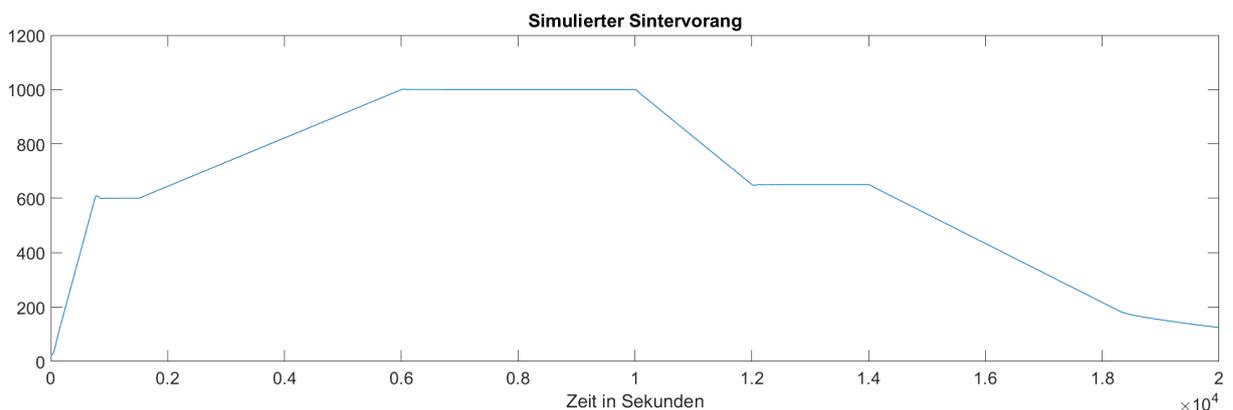


Abbildung 4.15: Simulation des Temperaturverlaufes eines Sinterprozesses

4.3.3 Validierung der Ergebnisse

Die mittels der Simulation ermittelten Parameter müssen am realen Versuchsstand validiert werden. Zu diesem Zweck wird innerhalb der Simulation als auch am realen Versuchsstand eine Regelung von Raumtemperatur auf 750 °C vorgenommen. Die ermittelten Temperaturkurven werden in Abbildung 4.16 dargestellt. Wie zu sehen ist, besteht eine hohe Übereinstimmung zwischen den Kurven, womit die Regelung als funktionstüchtig betrachtet wird. Zu weiteren Testzwecken wurden mehrere Sinterprozesse ausgeführt, wobei keine Auffälligkeiten oder größere Abweichungen festgestellt wurden. Beispiele sind in Abbildung A.3 und A.4 dargestellt.

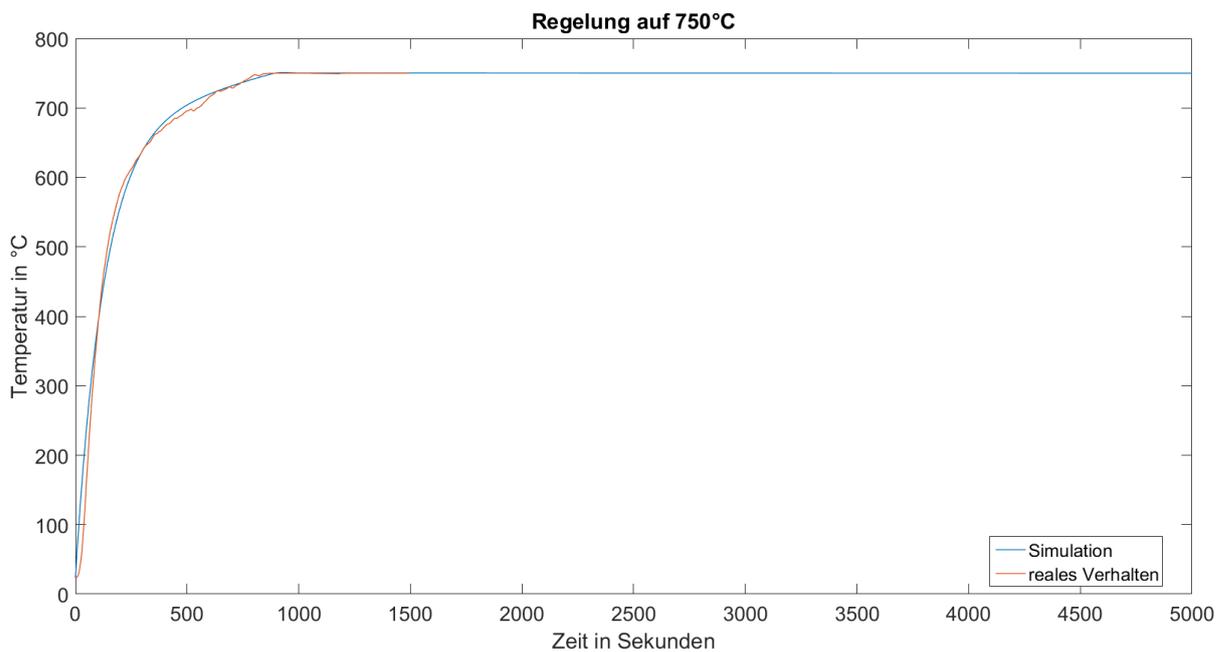


Abbildung 4.16: Vergleich zwischen Simulation und realem Verhalten der Regelung

4.4 Umsetzung der Überwachungseinheit

Die Umsetzung der Überwachungseinheit erfolgt analog dem in Kapitel 3.5.2.3 dargestellten Konzept. Zur Umsetzung wurden Sensoren gewählt, für die frei zugängliche Bibliotheken bereit stehen. Innerhalb des Programmcodes werden die Grenzwerte der Sensoren mit folgenden Werten initialisiert:

- $T_{\text{Ofen}}=250\text{ °C}$
- $T_{\text{Thyristorsteller}}=80\text{ °C}$
- $V_{\text{Gassensor}}=2,0\text{ Volt}$
- $t_{\text{Timeout}}=20\text{ Sekunden}$

Diese Grenzwerte sind folglich nur durch Neukompilierung des Quellcodes veränderbar, was im Betrieb jedoch umständlich ist. Daher wird der im Ethernet-Shield vom Typ „w5100“ enthaltende SD-Kartenleser genutzt, um von einer Speicherkarte eine Konfigurationsdatei einzulesen. Ist eine Karte vorhanden, so werden die Grenzwerte mit den darin befindlichen Werten während der Setup-Routine des Arduinos überschrieben. Es ist durch Verbindung der SD-Karte mit einem Lesegerät folglich möglich, die Grenzwerte ohne Neukompilierung des Quellcodes zu verändern. Des Weiteren ist es durch das Ethernet-Shield möglich, eine E-Mail zu versenden, sobald eine Überschreitung eines Grenzwertes festgestellt wurde. Die Emailadresse des Empfängers ist ebenfalls über die SD-Karte ohne Neukompilierung des Quellcodes änderbar.

Als zweites Feature wurde eine Kommunikation zwischen Überwachungseinheit und Prozessablaufsteuerung erstellt, wobei jedoch ausschließlich Daten von der Überwachungseinheit zur Prozessablaufsteuerung gesendet werden. Dies ermöglicht, die Messwerte der Überwachungseinheit innerhalb des LabVIEW-Programmes zu visualisieren. Dargestellt ist dies in Abbildung 4.17. Im angezeigten Graphen sind die Messwertverläufe dargestellt. Blau visualisiert wird die gemessene Temperatur des Pyrometers. Zu Testzwecken wurde eine Hand kurzzeitig circa zwanzig Zentimeter vom Sensor entfernt positioniert und wieder weggenommen. Gut sichtbar ist, dass daraufhin eine Temperatur von 30 °C gemessen wurde. Durch das Messprinzip des Sensors wird die Temperatur mit äußerst geringer Trägheit gemessen, wodurch die messbaren Temperaturanstiege sehr steil sind. Im Gegensatz dazu ist die Messwernerfassung des DS18B20-Sensors aufgrund des Edelstahlgehäuses relativ träge. Zum Test wurde dieser Sensor zur Erwärmung in der Hand gehalten. Deutlich erkennbar ist die thermische Zeitkonstante der weißen Messkurve. Das Pyrometer „MLX90614“ misst neben einer Objekttemperatur auch die Umgebungstemperatur des Sensors. Diese ist in Grün dargestellt. Der Gassensor wurde mittels Kontakt mit Feuerzeuggas getestet und der Verlauf wird im Graphen rot dargestellt. Ersichtlich ist auch hier eine geringe Trägheit. Eine Totzeit bis zum Einsetzen der Reaktion war nicht wahrnehmbar.

Während der Umsetzung der Überwachungseinheit wurde zusätzlich zum Konzept ein handelsüblicher photoelektrischer Rauchmelder als Sensor integriert. Anhand des Datenblattes wurde festgestellt, dass die integrierte Status-LED des Rauchmelders bei Auslösung des Alarms wiederholt blinkt. Diese Versorgungsspannung konnte mit geringem schaltungstechnischen Aufwand direkt mittels einer Interruptroutine vom Mikrocontrollerboard ausgewertet werden. Ein alternativer Lösungsweg wäre der Abgriff des Signals der Alarmsirene. Diese befand sich jedoch auf einer höheren Spannung als die Spezifikation des Mikrocontrollers erlaubte. Des Weiteren oszillierte jene mit hoher Frequenz, was die zuverlässige Auswertung des Signals zusätzlich erschwert hätte.

Ein Problem stellt die automatische Resetfunktion des Arduino-Boards bei der Initialisierung der Kommunikation dar. Dies muss mittels eines Kondensators mit zehn Mikrofarad zwischen dem Reset-Anschluss und Ground unterbunden werden.

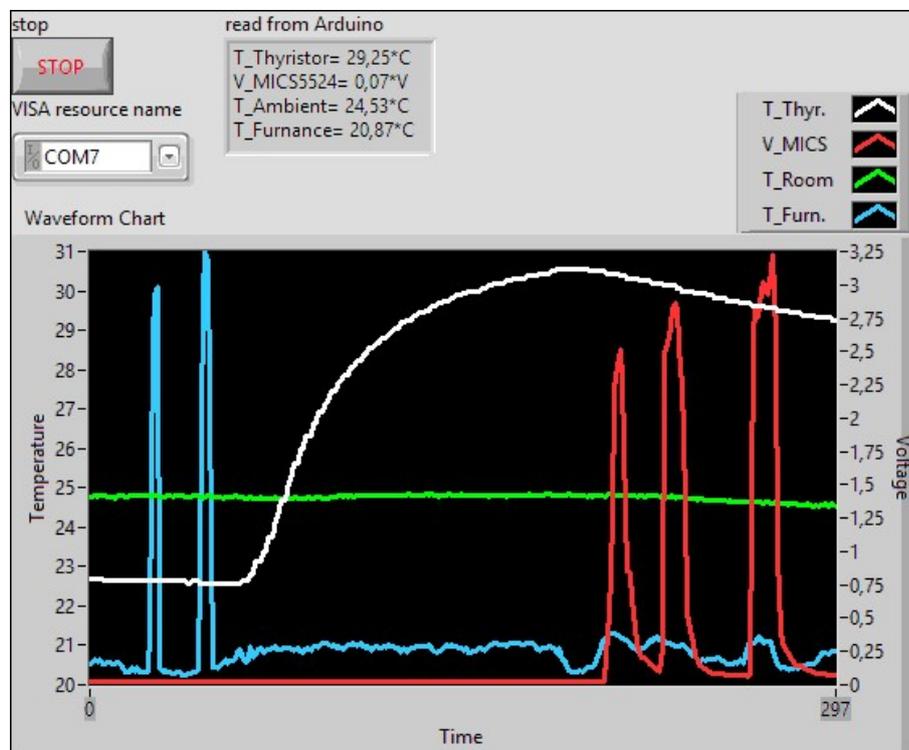


Abbildung 4.17: Auslesen der Messwerte der Überwachungseinheit

Zum Aufbau der Überwachungseinheit wurde auf das Ethernet-Shield das in Abbildung 4.18 dargestellte Prototyping-Shield montiert. Dies ermöglicht eine auch in Zukunft schnell veränderbare Verdrahtung, beziehungsweise schnelle Kontaktierung von neuen Sensorgruppen. Des Weiteren sind LEDs mit Vorwiderständen zur Anzeige von Zuständen eingebaut. Zusätzlich wird so eine kompakte Bauform ermöglicht.

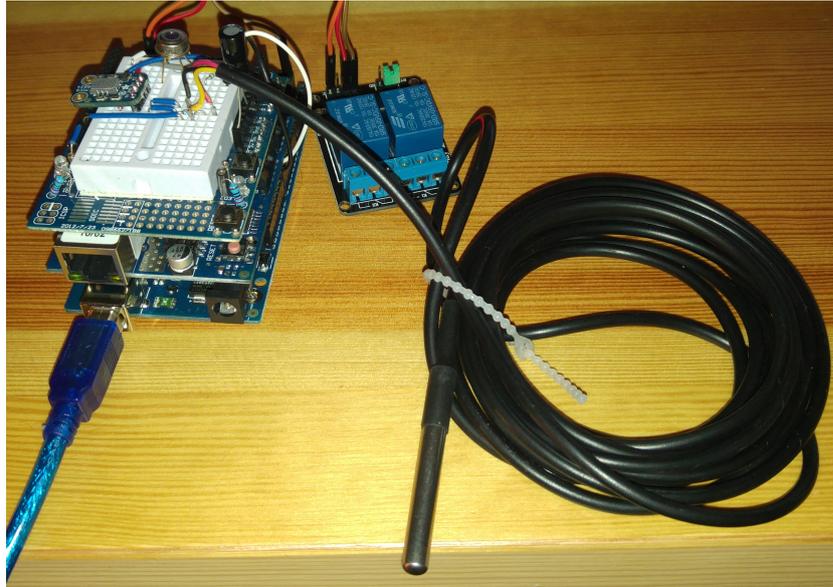


Abbildung 4.18: Versuchsaufbau der Überwachungseinheit

4.5 Bedieneroberfläche

Die in Abbildung 4.19 dargestellte Benutzeroberfläche unterteilt sich in einen Container mit fünf Reitern, sowie zwei weiteren Anzeigebereichen links und rechts des Containers. Im Bereich links des Containers befinden sich die Bedienelemente zum Starten des „manuellen Bedienmodus“ oder des „automatischen Bedienmodus“. Direkt darunter befindet sich das Anzeigeelement „Remote Stop?“. Dieses zeigt an, ob der Sinterofen über den Webservice gestoppt wurde. Auf der rechten Seite, neben dem Container, befindet sich zur Steigerung der Benutzerfreundlichkeit eine Anzeige der wichtigsten Parameter. In Rot angezeigt wird die aktuelle Isttemperatur und rechts daneben der Sollwert der Temperatur. Darüber befindet ein Datenlog des Systemstatus. Im ordnungsgemäßen Zustand ist dieser leer. In diesem Anzeigeelement werden ausschließlich unkritische Fehler veranschaulicht, da kritische Probleme zum Übergang in den sicheren Zustand und Abschaltung der Steuerung führen. Unterhalb der Temperaturanzeige befindet sich die momentane Stellgrößenausgabe des Reglers sowie der Messwert des aktuellen Heizstroms. Darunter befindet sich der Stop-Schalter in roter Farbe. Die Betätigung des Schalters führt zur Deinitialisierung und Abschaltung der Steuerung. Innerhalb des nachfolgenden Anzeigeelementes „read from Arduino“ sowie des Graphen „Arduino Data Graph“ werden die Messdaten der Überwachungseinheit visualisiert. Damit ist es möglich, auch von der PC-Ebene heraus die Ofenoberflächen-, Thyristorsteller- und Umgebungstemperatur zu visualisieren. Außerdem werden die Messdaten des Gassensors dargestellt. Im letzten Anzeigeelement „error out“ werden Fehlermeldungen des Programmablaufes, wie zum Beispiel nicht existierende Speicherpfade für die hinterlegten Referenzkurven, visualisiert. Die beiden Anzeigebereiche neben dem Container werden unabhängig von der Auswahl des aktuellen Reiters dauerhaft angezeigt.

4.5.1 Initialisierung

In Abbildung 4.19 ist der Reiter „Initialisierung“ dargestellt. Innerhalb dieses Reiters wird der Speicherort und Name des Logfiles festgelegt. Außerdem wird definiert, von welchem Speicherort die Referenzkurven für die Abkühl- und Aufheizkurve geladen werden¹⁸. Durch die Cluster „output Range[V]“, „setpoint range[V]“ und „PID-Gains“ werden die Eigenschaften des PID-Reglers zur Temperaturregelung beschrieben. Ersteres Cluster beschreibt die minimale und maximale Stellgröße, „setpoint range[°C]“ legt den Wertebereich der Führungsgröße fest und als „PID-Gains“ werden die Parameter der Temperaturregelung bezeichnet. „Maximum pressure[bar]“ legt fest, ab welchem Druck eine Warnung an den Benutzer ausgegeben wird. Im Bedienelement „Current_RMS_Max[A]“ wird festgelegt, welcher Strom maximal fließen darf. Anhand dieses Eingabewertes findet die Stellgrößenbeschränkung der Temperaturregelung statt. Mithilfe von „Samplerate P&I“ wird die Geschwindigkeit der Messdatenerfassung der analogen Eingänge festgelegt. Im Bedienelement „Relays if no event“ wird der Zustand der Relaisausgänge festgelegt, während kein Element der Event-Struktur aktiv ist.

Das Cluster „init Data“ dient der Initialisierung der Datenhaltung mit Startwerten. In dieser werden alle Größen, die zur Generierung der Ausgangsbefehle relevant sind, temporär gespeichert. Dazu zählen:

- aktuelle Sensorwerte,
- Solltemperatur,
- Relaiskartenstatus,
- Konfiguration zum Ansprechen der Relaiskarte (COM-Port, Kartenadresse und Schnittstellenreferenz zur Karte),
- Konfigurationen zum Ansprechen der Messkanäle sowie
- der Anzeigewert, ob der automatische Bedienmodus ausgeführt wird.

Die Initialisierungsdaten werden vom Programm nur zu Beginn eingelesen. Während der Laufzeit wird auf diese Daten nicht zugegriffen. Im Cluster „Messwerverfassung“ im rechten Bereich des Reiters werden die Initialisierungsdaten der parallelen Messschleife visualisiert.

¹⁸ Diese Kurven sind, wie in Kapitel 4.2.2.2 erläutert, zur Validierung der Eingabedaten des automatischen Bedienmodus notwendig.

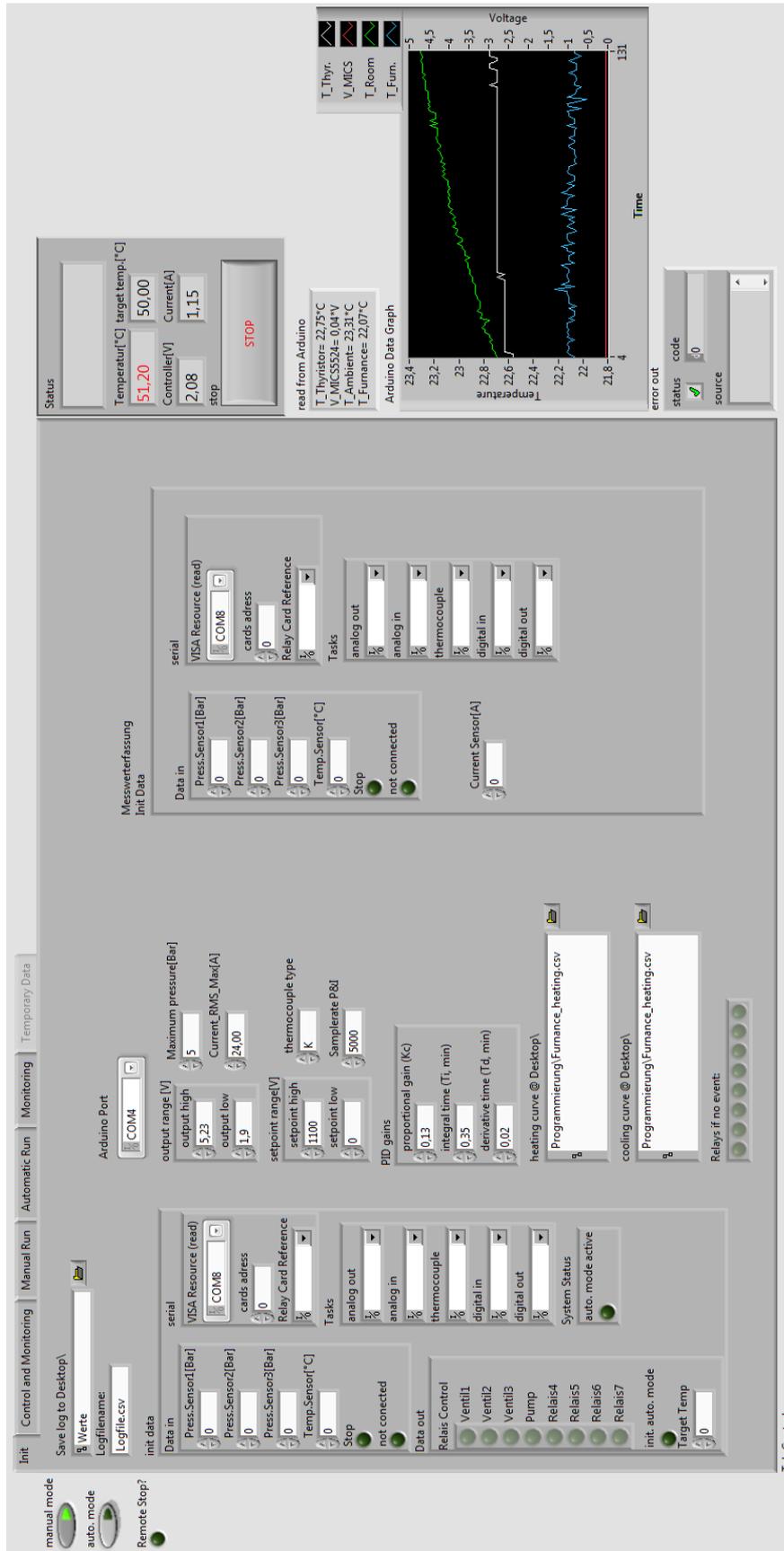


Abbildung 4.19: Darstellung des Initialisierungs-Reiters der Benutzeroberfläche

4.5.2 Monitoring

Im Reiter „Monitoring“ werden die in Abbildung 4.7 dargestellten Zustandsdaten des Sinterofens dem Webservice bereitgestellt. Je nachdem, ob gerade der automatische oder der manuelle Bedienmodus ausgeführt wird, erfolgt die Übergabe des entsprechenden Graphs an den Webservice. Da dieser Reiter ausschließlich für das Monitoring über das Netzwerk relevant ist, erfolgen an dieser Stelle keinerlei Eingaben.

4.5.3 Manueller Bedienmodus

Der in Abbildung 4.20 dargestellte manuelle Bedienmodus ermöglicht die händische Eingabe von Sollwerten. Gestartet wird dieser, indem links neben dem Container das Bedienelement „manual Mode“ betätigt wird. Innerhalb des linken Containers lassen sich im Cluster „Data out“, die Solltemperatur und die Schaltausgänge einstellen. Neue Sollwerte werden erst vom Programm übernommen, sobald der Schalter „Confirm New Data“ betätigt wurde. Dies ist ein Schutz vor Fehlbedienung. Nach Betätigung des Schalters werden die Daten dann von der Prozessablaufsteuerung verarbeitet und es stellen sich die gewünschten Ausgangsgrößen ein. Im Diagramm in der Mitte des Reiters befindet sich die Anzeige der Solltemperatur in weiß und der Isttemperatur in rot. Wie zu sehen ist, gleicht sich die Isttemperatur über die Zeit der Solltemperatur an. Auf der rechten Seite unten werden die bisher eingestellten Werte angezeigt. Dies dient als Logfile der manuellen Eingaben. Über die darüber befindlichen Elemente lässt sich das Logfile an einem gewünschten Ort speichern. Mithilfe des Eingabeelements „manual volts“ ist es möglich, die Stellgröße unabhängig vom Regler fest vorzugeben. Dazu muss eine gewünschte Stellspannung angegeben und anschließend der Schalter „manual volts?“ betätigt werden.

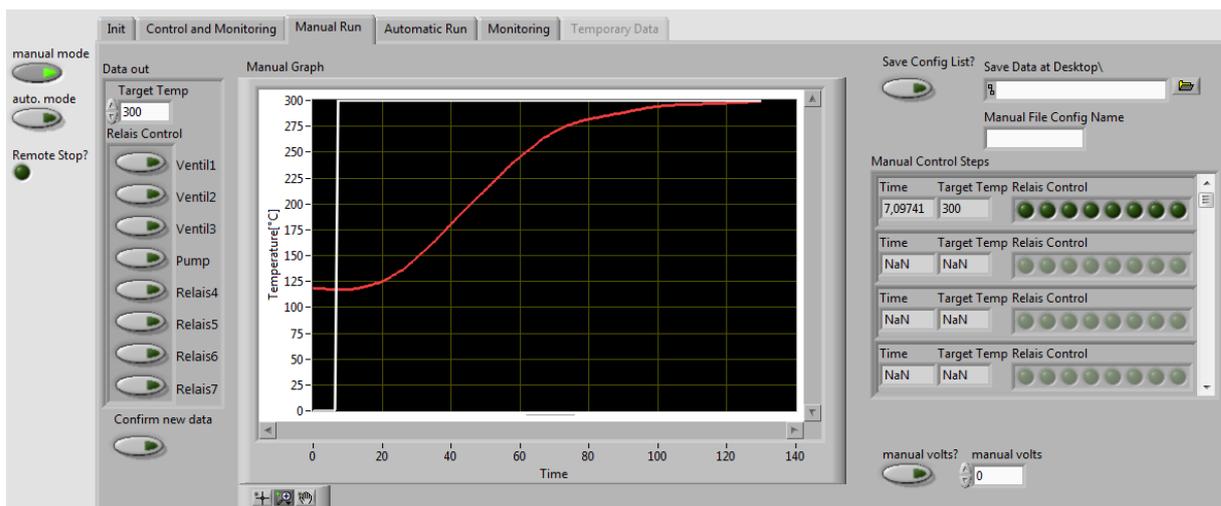


Abbildung 4.20: Darstellung der Oberfläche zur manuellen Bedienung

4.5.4 Automatischer Bedienmodus

Der automatische Bedienmodus wird durch Betätigung des Schalters „auto. Mode“ links neben dem Container ausgelöst. Dadurch beginnt die Initialisierung des automatischen Programmablaufes, während der die Stellgrößenausgabe der Temperaturregelung „null“ ist. Zur Initialisierung existieren zwei Möglichkeiten. Die erste Variante ist die Erstellung einer Konfiguration. Dies bedeutet, dass in das Cluster „Target Temperatures“ über die Eckpunkte der Sollwertkurve eine Temperaturkurve eingegeben wird. Diese Kurve wird zeitgleich zur Eingabe im rechten oberen Diagramm „Preview Graph“ angezeigt, welches in Abbildung 4.21 dargestellt ist. Anschließend werden die bereits beschriebenen Events erstellt. Diese werden als vertikale Cursors ebenfalls in das Diagramm eingezeichnet. Dabei werden jeweils zwei gleichfarbige Cursors für den zeitlichen Beginn und das Ende des Events abgebildet. Die zweite Variante ist das Laden einer Konfiguration über den Menüpunkt „Load config“. Über das Bedienelement „Save Config“ kann die aktuelle Konfiguration in einem frei wählbaren Dateipfad als CSV-Datei gespeichert werden. Wurde die Konfiguration festgelegt, so kann diese mit „Start Recipe“ gestartet werden. Dabei ist es durch die Eingabelemente rechts des Schalters zum einen möglich, zu einem bestimmten Punkt innerhalb der Sollwertkurve zu starten, beispielsweise nach einer halben Stunde. Zum anderen kann das Programm erst verzögert gestartet werden, zum Beispiel nach vier Stunden. Dadurch können Sinterprozesse im Voraus geplant werden.

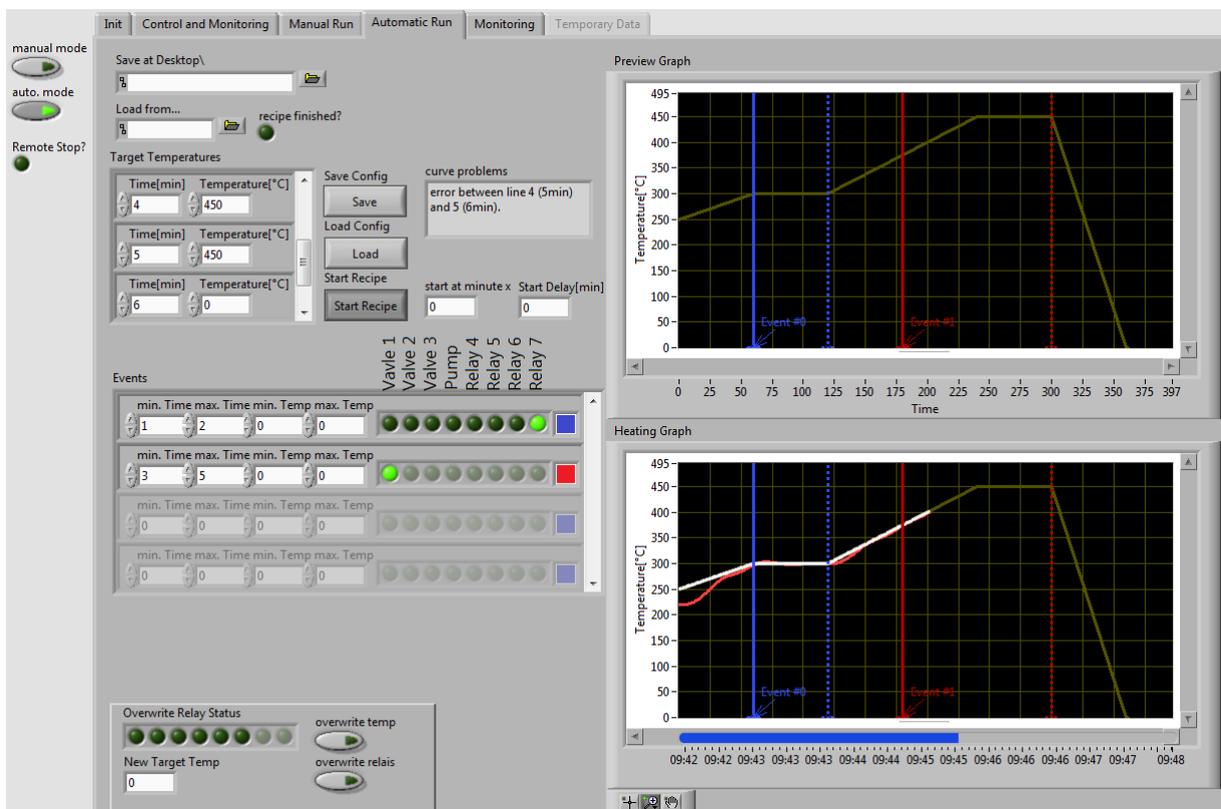


Abbildung 4.21: Darstellung der Oberfläche zur automatischen Sollwertvorgabe

Während der Laufzeit des automatischen Sintervorganges wird die Soll- und Isttemperatur im Diagramm rechts unten dargestellt. Auf der x-Achse ist statt einer Minutenanzeige die Uhrzeit dargestellt, um so besser den Versuch planen zu können. Unten links befinden sich Eingabelemente, mit denen die Sollwerte, welche von der Prozessablaufsteuerung berechnet wurden, überschrieben werden können. Dadurch wird ermöglicht, die Sollwertkurve im laufenden Betrieb zu verändern.

5 Nachweis der Funktionstüchtigkeit

5.1 Funktionstüchtigkeit der Prozessablaufsteuerung

Zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit und Zuverlässigkeit des Versuchsstandes wird eine geeignete Testreihe definiert, durchgeführt und ausgewertet.

5.1.1 Definition der Versuchsreihe

Zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit wird die Prozessablaufsteuerung auf ihre Grenzwerte und Funktionalitäten hin getestet. Dabei wird auf die erstellten Anforderungen in Kapitel 3.2 zurückgegriffen, deren Erfüllung das Ziel der Arbeit darstellen. Zu diesem Zweck wird folgendes Testszenario ausgeführt:

- Beginn im manuellen Modus, bei einem Druck von 0,5 bar bei 250 °C Solltemperatur. Dabei Test aller Schaltausgänge durch Einzelbetätigung.
- Anschließender Wechsel zum automatischem Modus, dabei wird eine Konfiguration erstellt und gespeichert, verändert und die gespeicherte Datei wieder geladen. Danach wird die Konfiguration ausgeführt.
- Die Konfiguration umfasst einen Sintervorgang von 48 Stunden Laufzeit, mit Temperaturzyklen von 50 °C bis 1050 °C, die Druckvorgabe liegt bei 0,75 bar. Jeder Relaisausgang muss mindestens einmal geschaltet werden.
- Überwachung des Programmes während der gesamten Laufzeit über den Webservice.
- Test der Strombegrenzung, indem mit einer Stromzange der maximal fließende Strom gemessen wird. Dies wird während eines steilen Aufheizvorganges bei maximaler Stellgröße des Reglers durchgeführt.

Ausgewertet werden die Abweichung der Regelungen von den Sollwerten, der Speicherverbrauch des Programmes während der Laufzeit sowie die Überprüfung der Logfiles auf Unstimmigkeiten.

5.1.2 Auswertung der Versuchsreihe

Während der Ausführung des oben beschriebenen Testszenarios wurden keine Probleme festgestellt. Die Programmablaufsteuerung führte den Testzyklus ohne Auffälligkeiten vollständig aus. Programmabstürze traten nicht auf und Eingaben wurden wie erwartet umgesetzt. Das Speichern und Laden von Konfigurationen war problemlos möglich. Der in Kapitel 4.2.2.2 beschriebene Algorithmus zur Validierung der eingegebenen Kurve erlaubte es, schon vor Versuchsbeginn zu prüfen, ob die eingegebene Kurve realisierbar ist. Die Solltemperaturen im automatischen Betriebsmodus wurden, wie erwartet, zwischen den einzelnen Eckpunkten interpoliert. Die Event-Struktur funktionierte zuverlässig und schaltete die Relaisausgänge erwartungsgemäß.

Die Abweichung der Temperaturregelung wurde mit einer Regelung auf 750 °C im manuellen Betriebsmodus zusätzlich getestet. Zur Bestimmung der Abweichung wurde die mittlere Abweichung vom Sollwert während des eingeschwungenen Zustandes bestimmt, welche bei 0,049 °C lag. Auch in anderen Temperaturbereichen lag die mittlere Abweichung während des eingeschwungenen Zustandes weit unter den geforderten ± 5 °C.

Dass das Programm bis zum Abschluss ausgeführt wurde, lässt auf eine saubere Allokation des benötigten Speicherbereiches schließen. Innerhalb des Windows Task Managers wurde keine größere Zunahme des benötigten Arbeitsspeichers festgestellt.

Mithilfe der Logfiles konnten die Schaltzustände der Relais nachvollzogen werden. Diese wurden wie im Testszenario vorgegeben geschaltet. Die Überwachung des Versuchsstandes mithilfe des Webservices war über die gesamte Programmlaufzeit möglich.

Da parallel zur Inbetriebnahme des Sinterofens weitere konstruktive Arbeiten am Sinterofen ausgeführt wurden, konnte die Druckregelung zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit nicht überprüft werden.

5.2 Funktionstüchtigkeit der Überwachungseinheit

Im Falle der Überwachungseinheit kann jede Komponente einzeln auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft werden, da jede speziell für einen Fehlerfall entworfen wurde. In Tabelle 5.1 werden die getesteten Funktionen und die Testmethode dargestellt.

Tabelle 5.1: Test der Funktionstüchtigkeit der Überwachungseinheit

Funktion	Testmethode
Rauchdetektion MICS5524	Test mit Feuerzeuggas
Rauchmelder	Test mit brennendem Papier
Temperaturmessung DS18B20	Test durch Messung der Handwärme mit Kontakt
Temperaturmessung Pyrometer	Messung der Handwärme auf Distanz
Abschaltung bei Übertemp. d. Ofens	Verringerung des Grenzwertes, Test auf Schaltvorgang
Abschaltung bei Übertemp. d. Thyr.	Verringerung des Grenzwertes, Test auf Schaltvorgang
Abschaltung bei Detektion v. Rauch	Verringerung des Grenzwertes, Test auf Schaltvorgang
Abschaltung bei Timeout	Verringerung des Grenzwertes, Test auf Schaltvorgang
Absendung der Benutzerbenachr.	automatisch während der vorherigen Tests
Serielle Kommunikation	Test während Kommunikation mit LabVIEW
Relais abschalten	automatisch während vorheriger Tests

Der Test der Temperatursensoren erfolgt nur auf Plausibilität. Die Genauigkeit der Sensorik ist mit $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausreichend. Weichen die Sensoren unplausibel ab, ist eine Kalibrierung und anschließende Justierung notwendig. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Überwachungseinheit auch bei Überschreitung der realen Grenzwerte zuverlässig auslöst, wenn die Messung der Größen und die Abschaltfunktionalität funktionstüchtig sind.

Die aufgeführten Tests wurden erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurden die Tests zwischen 24 und 48 Stunden Betriebszeit durchgeführt. Somit ist die Überwachungseinheit funktionstüchtig und zuverlässig.

6 Zusammenfassung

Innerhalb dieser Arbeit ist eine Prozessablaufsteuerung zum Sintern von 3D-Druckmodellen entstanden. Dabei sind die zwei für diesen Prozess einflussreichsten Parameter, Temperatur und Druck, mithilfe der Software regelbar. Da der Versuchsstand autonom und unbeaufsichtigt betrieben wird, wurde ein besonderer Schwerpunkt auf die Betriebssicherheit des Versuchsstandes gelegt. Zu diesem Zweck wurde eine Risikobeurteilung durchgeführt und entsprechende Lösungsvorschläge zur Verringerung der Gefahren auf ein Minimum erarbeitet. Ein Ansatz stellt eine parallel laufende Überwachungseinheit dar, die permanent den Status des Sinterofens überwacht. Bei auftretenden Fehlzuständen überführt diese den Versuchsstand in einen sicheren Zustand und benachrichtigt den Benutzer. Zur weiteren Überwachung des Ofenzustandes wurde ein Webservice erstellt, der die Beobachtung über das Netzwerk ermöglicht.

Zur Realisierung des Versuchsstandes wurde in dieser Arbeit ein ausführliches Konzept erarbeitet, wobei der Fokus auf der Wahl der verwendeten Messgeräte, Sensoren, Soft- und Hardwareplattformen sowie Softwarestrukturen lag. Als Entwicklungsumgebung wurde LabVIEW für die Prozessablaufsteuerung und die Arduino-IDE für die Überwachungseinheit verwendet. Beide Umgebungen stellen aufgrund der großen Nutzergemeinschaft und der breiten Unterstützung durch Drittanbieter eine zukunftssichere und einfach erweiterbare Wahl dar.

Im Anschluss an die Konzeptphase fand die Umsetzung des Projektes statt. Aufgrund der verhältnismäßig langen Programmlaufzeit wurde, um Speicherüberläufe auszuschließen, ausschließlich auf Speicherbereichen mit fester Größe gearbeitet. Die Speicherfrequenz in der internen Datenhaltung passt sich dynamisch der Programmlaufzeit an. Des Weiteren wurde Wert auf eine intuitive und übersichtliche Benutzeroberfläche gelegt, um eine komfortable Bedienung des Versuchsstandes zu gewährleisten. Mit einer festen Speicherfrequenz wird parallel dazu ein Logfile mit sämtlichen Parametern gespeichert. Dieses ermöglicht die spätere Nachvollziehbarkeit des Sintervorganges und die Ermittlung der Auswirkung von verschiedenen Prozessparametern.

Die Ausführung eines Sintervorganges ist innerhalb eines manuellen und eines automatischen Betriebsmodus möglich. Ersterer ermöglicht es, händisch Sollwerte vorzugeben, die der Versuchsstand sofort übernimmt und entsprechende Befehle ausführt. Im automatischen Modus werden Sollwertkurven mittels einzelner Eckpunkte vorgegeben. Zwischen diesen Punkten

werden die Sollwerte linear interpoliert. Dabei wird mit einer Referenzkurve bei maximalem Eingangsstrom überprüft, ob die angestrebten Anstiege im praktischen Betrieb realisierbar sind. Ist dies nicht der Fall, wird der Benutzer benachrichtigt und der Programmcode dennoch ausgeführt. Parallel dazu können die Relaiszustände mittels einer Event-Struktur gesetzt werden. Dies ermöglicht das Schalten von Ventilen und der Unterdruckpumpe zu bestimmten Zeitpunkten. Die vorgegebene Temperaturkurve und die Event-Struktur können innerhalb einer Konfigurationsdatei gespeichert und während eines späteren Versuches wieder geladen werden.

Eine Herausforderung während der Umsetzung stellte die Temperaturregelung dar. Aufgrund der Widerstandsabhängigkeit der Heizwendeln von der Temperatur war diese zu Beginn ungenügend genau. Zur Kompensation des Einflusses wird die Stellgröße mittels einer Strommessung von null bis I_{\max} skaliert, so dass die eigentliche Spannungsregelung zu einer Stromregelung umgeformt wird¹⁹. Weiterer Vorteil dieser Lösung ist, dass der Strom seinen maximal zulässigen Grenzwert somit nicht überschreiten kann. Dies schützt die Heizwendeln und die thermische Isolierung des Ofens vor Beschädigung.

Eine weitere Herausforderung stellt bei der langen Programmausführung die Kommunikation mit der Peripherie dar. Die Relaiskarte wird beispielsweise über die RS232-Schnittstelle angesprochen. Im Verlauf der Programmierung hat sich herausgestellt, dass die Karte bei Übertragung eines Befehls in jedem einzelnen Zyklus unter der Last der Anfragen instabil wird und abstürzt. Durch eine Reduzierung der Anfragen wurde dieses Problem behoben. Dies geschah, indem vor dem Schreiben eines neuen Befehls immer geprüft wurde, ob dieser sich vom vorherigen unterscheidet. War dem nicht so, wird der Befehl verworfen.

Den Abschluss der Arbeit bildet der Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Versuchsstandes. Dazu wurde ein Testszenario entworfen, das alle Funktionen des Sinterofens beinhaltet und testet. Dieses wurde durchgeführt und ausgewertet. Dabei wurde die vollständige Betriebsfähigkeit des Sinterofens festgestellt.

¹⁹ Die Skalierung der Stellgröße erfolgt statt zwischen 0 - 10 Volt zwischen 0 - I_{\max} . I_{\max} ist vom Benutzer variabel wählbar.

7 Ausblick

Während der Umsetzung des Versuchsstandes wurden über die Aufgabenstellung hinaus notwendige und sinnvolle Erweiterungen integriert. Beispielsweise wurde eine Risikobeurteilung durchgeführt, eine Überwachungseinheit erstellt und eine Druckregelung integriert. Aus diesem Grund existieren zum Zeitpunkt des Abschlusses dieser Arbeit keine weiteren Ansätze zur Erweiterung des Funktionsumfangs.

Spannend sind die vielfältigen Möglichkeiten, die der Sinterofen bietet. So können Sinterobjekte mit vielfältigen Temperaturkurven, Drücken und Zeitspannen bearbeitet werden. Durch die Logfiles können später die Auswirkung der verwendeten Parameter systematisch ausgewertet werden. Aufgrund dessen wäre eine mögliche anschließende Arbeit die systematische Ermittlung der Abhängigkeit der Eigenschaften des gefertigten Werkstückes von den Parametern des Fertigungsprozesses. Wird zusätzlich noch die Verwendung verschiedenster Sintermaterialien und Schutzgase untersucht, so besteht ein erheblich weiteres Forschungspotential.

Literaturverzeichnis

- [Ard16] Arduino S.r.l.: *What is Arduino*. <http://www.arduino.org/>. Version: 10, 2016, zuletzt besucht am: 16.10.2016.
- [Awi12] Birgit Awiszus, Jürgen Bast, Holger Dürr und Klaus-Jürgen Matthes: *Grundlagen der Fertigungstechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, M, 2012.
- [Bei13] Thomas Beier und Petra Wurl: *Regelungstechnik - Basiswissen, Grundlagen, Beispiele*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, M, 2013.
- [Dob10] Paul Dobrinski, Gunter Krakau und Anselm Vogel: *Physik für Ingenieure*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2010.
- [Fri15] Fritz Fritz, Schulze Schulze und Günter Schulze: *Fertigungstechnik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2015.
- [Geb13] Andreas Gebhardt: *Generative Fertigungsverfahren - Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, M, 2013.
- [Gei14] Maximilian Geidel: *Aufbau, Programmierung und Inbetriebnahme einer Steuerung für eine CNC-Drehmaschine*. Deutschland, Technische Universität Chemnitz, Bachelorarbeit, 2014.
- [Gir16] Gira Giersiepen GmbH & Co. KG: *Elektronik-Handbuch*. <https://www.gira.de/data2/elektronik-handbuch.pdf>. Version: 10, 2016, zuletzt besucht am: 16.10.2016.
- [Hon02] Honeywell International Inc.: *Installation Instructions for the 24PC Series Pressure Sensors*. http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=49846&1a. Version: 2002, zuletzt besucht am: 16.10.2016.
- [Hon16] Honeywell International Inc.: *Grundlagen der Reglerparametrierung*. www.honeywell.de/FP/PI/regler/Reglerparametrierung.pdf. Version: 10, 2016, zuletzt besucht am: 18.10.2016.

- [Ils10] Bernhard Ilschner und Robert F. Singer: *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik - Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2010.
- [Kli06] Thomas Klindt, Thomas Kraus, Dirk von Locquenghien, Hans-J. Ostermann, DIN e.V. und VDMA VDMA: *Die neue EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG*. Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich, 2006.
- [Klo15] Fritz Klocke: *Fertigungsverfahren 5 - Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2015.
- [Kre15] Volker Krey und Arun Kapoor: *Praxisleitfaden Produktsicherheitsrecht - CE-Kennzeichnung - Gefahrenanalyse - Betriebsanleitung - Konformitätserklärung - Produkthaftung - Fallbeispiele*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, M, 2015.
- [LEM15] LEM Holding SA: *Current Transducer LA 55-P*. http://www.lem.com/docs/products/1a_55-p_e.pdf. Version: 06, 2015, zuletzt besucht am: 07.11.2016.
- [Ltd07] SGX Sensortech (IS) Ltd: *Frequently Asked Questions for MiCS Gas Sensors*. https://sgx.cdistore.com/datasheets/e2v/AN2_FAQ_MiCS.pdf. Version: 08, 2007, zuletzt besucht am: 20.10.2016.
- [Lun14] Jan Lunze: *Regelungstechnik 1 - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2014.
- [Mic11] Manfred Michel: *Leistungselektronik - Einführung in Schaltungen und deren Verhalten*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2011.
- [Mü09] Bernward Mütterlein: *Handbuch für die Programmierung mit LabVIEW*. Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- [Par16] Rainer Parthier: *Messtechnik - Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2016.
- [Sal06] Hermann Salmang, Horst Scholze und Rainer Telle: *Keramik*. Springer Science & Business Media, Berlin Heidelberg, 2006.
- [Sch06] Werner Schatt, Klaus-Peter Wieters, Bernd (Eds.) Kieback, Werner Schatt, Klaus-Peter Wieters und Bernd Kieback: *Pulvermetallurgie - Technologien und Werkstoffe*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [Sch08] Wolfgang Schneider: *Praktische Regelungstechnik - Ein Lehr- und Übungsbuch für Nicht-Elektrotechniker*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2008.

- [Sch14] Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl und Bernhard Zagar: *Elektrische Messtechnik - Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, München; Wien, 2014.
- [Tec16] Technische Universität Chemnitz: *3D-Druck: Schicht für Schicht mal etwas anders*. <https://www.tu-chemnitz.de/uk/pressestelle/2016/04.12-08.03.html>. Version: 04, 2016, zuletzt besucht am: 16.10.2016.
- [Tra15] Hans-Rolf Traenkler und Leonhard M. Reindl: *Sensortechnik - Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2015.
- [Zac10] Franz Zach: *Leistungselektronik - Ein Handbuch Band 1 /*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2010.

Eidstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, gegenüber der Technischen Universität Chemnitz, dass ich die vorliegende Praktikumsarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die vorliegende Arbeit ist frei von Plagiaten. Alle Ausführungen, die wörtlich oder inhaltlich aus anderen Schriften entnommen sind, habe ich als solche gekennzeichnet.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht und auch noch nicht veröffentlicht.

Chemnitz, der 16.01.2017

(Geidel, Maximilian)

A Anhang

A.1 Prozessablaufsteuerung

A.1.1 Hinweise

Die Referenzkurven des Aufheiz- und des Abkühlvorgangs müssen zwingend auf dem Desktop abgespeichert werden, sonst kann das Programm nicht ausgeführt werden!

Ist das Programm nach Neuverbindung von USB-Geräten nicht mehr ausführbar, so wurden für die Überwachungseinheit und die Relaiskarte falsche COM-Ports im Initialisierungsreiter ausgewählt. Die richtigen Ports können im Gerätemanager innerhalb des Systemsteuerung ermittelt werden.

Standardpasswort und Adresse des Webmonitoring-Tools:

- Benutzer: admin
- Passwort: sintern
- Netzwerkadresse: http://134.109.28.26:8003/image_publisher/index.html

A.1.2 Beispiel eines Logfiles

In Tabelle A.1 ist ein Auszug aus einem Logfile dargestellt. Gespeichert werden dabei von links nach rechts der aktuelle Zeitstempel in Sekunden, die Soll- und Isttemperatur in Grad Celsius, sowie die Zustände der Relaisausgänge R1 bis R8. Abschluss bilden die Messwerte der drei Drucksensoren. Diese konnten aufgrund anderer konstruktiver Maßnahmen am Ofen zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch nicht in Betrieb genommen werden. Daher liegen hier noch keine gültigen Messwerte vor.

Tabelle A.1: Beispiel für ein Logfile

Time	Targ.temp	Cur.temp	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	P1	P2	P3
0,098	25	72,079	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,595	25,144	72,065	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,095	25,29	72,042	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,595	25,436	72,028	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,094	25,582	72,015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,595	25,727	72,005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,095	25,873	71,978	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,595	26,019	71,965	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,095	26,165	71,948	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,595	26,311	71,938	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,095	26,457	71,915	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A.1.3 Beispiel einer Konfigurationsdatei

In Tabelle A.2 ist eine Konfigurationsdatei zum Sintern eines Grünkörpers aus Eisen dargestellt. Gespeichert werden dabei in den beiden linken Spalten die Eckpunkte der Temperaturkurve. In den Spalten rechts davon werden die Events gespeichert. Existiert eine unterschiedliche Anzahl von Events und Eckpunkten der Temperaturkurve, so wird die kleinere Struktur mit „NaN“ aufgefüllt. Dies ist zum Einlesen und Abspeichern der Konfiguration in LabVIEW notwendig. In der Konfigurationsdatei werden ausschließlich Zahlenwerte gespeichert. Die Beschriftung wurde zur Übersichtlichkeit in die Tabelle eingefügt. Die Zeiten werden in Sekunden angegeben und die Temperaturen in Grad Celsius.

Tabelle A.2: Beispielkonfigurationsdatei zum Sintern von Eisen

Time Stamp	Target Temperature	Event Starttime	Event Endtime	Event Starttemp.	Event Endtemp.	Status of Relays	Cursor Color
0	0	1	2	1	2	0	0
3600	550	2,1	3	2	3	0	0
7200	650	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
7201	900	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
21600	950	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

A.2 Überwachungseinheit

A.2.1 Hinweise

Bedeutung der Status-LED:

- dauerhaft an: Fehler liegt vor
- dauerhaft aus: Normalbetrieb
- blinkend: Überwachungseinheit wartet auf Signal der Messkarte

MAC-Adresse des Ethernet-Shields: 00 0F EA 31 89 D1

Bei Verwendung des Ethernet-Shields stehen die digitalen Ausgänge vier und zehn des Arduinos nicht mehr zur Verfügung und dürfen nicht innerhalb des Programmcodes verwendet werden.

Das E-Mail-Konto für die Überwachungseinheit wurde bei Google Mail mit 2-Wege-Authentifizierung angelegt. Die Anmeldung von einem unbekanntem Gerät muss daher mit einem „Ersatzcode“ stattfinden. Diese sind in Abbildung A.1 aufgelistet.

- E-Mail-Konto: sinterofen.arduino@gmail.com
- Passwort: QTW(e(9;

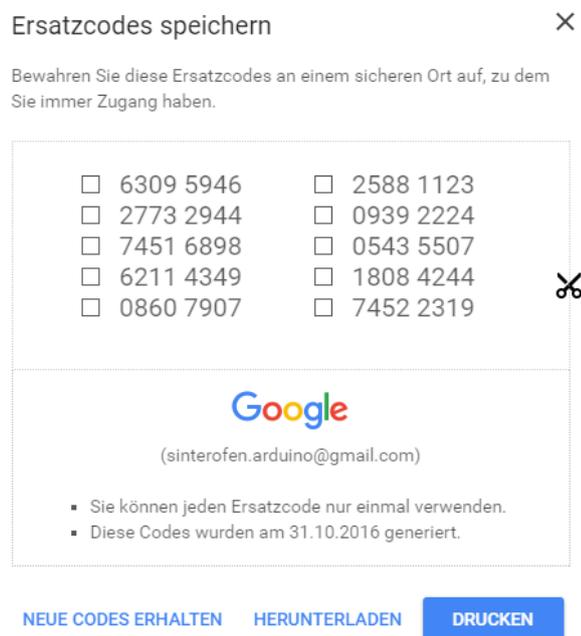


Abbildung A.1: Ersatzcodes für Anmeldung im Gmail-Account

A.2.2 Schaltplan

Schaltplan Überwachungseinheit

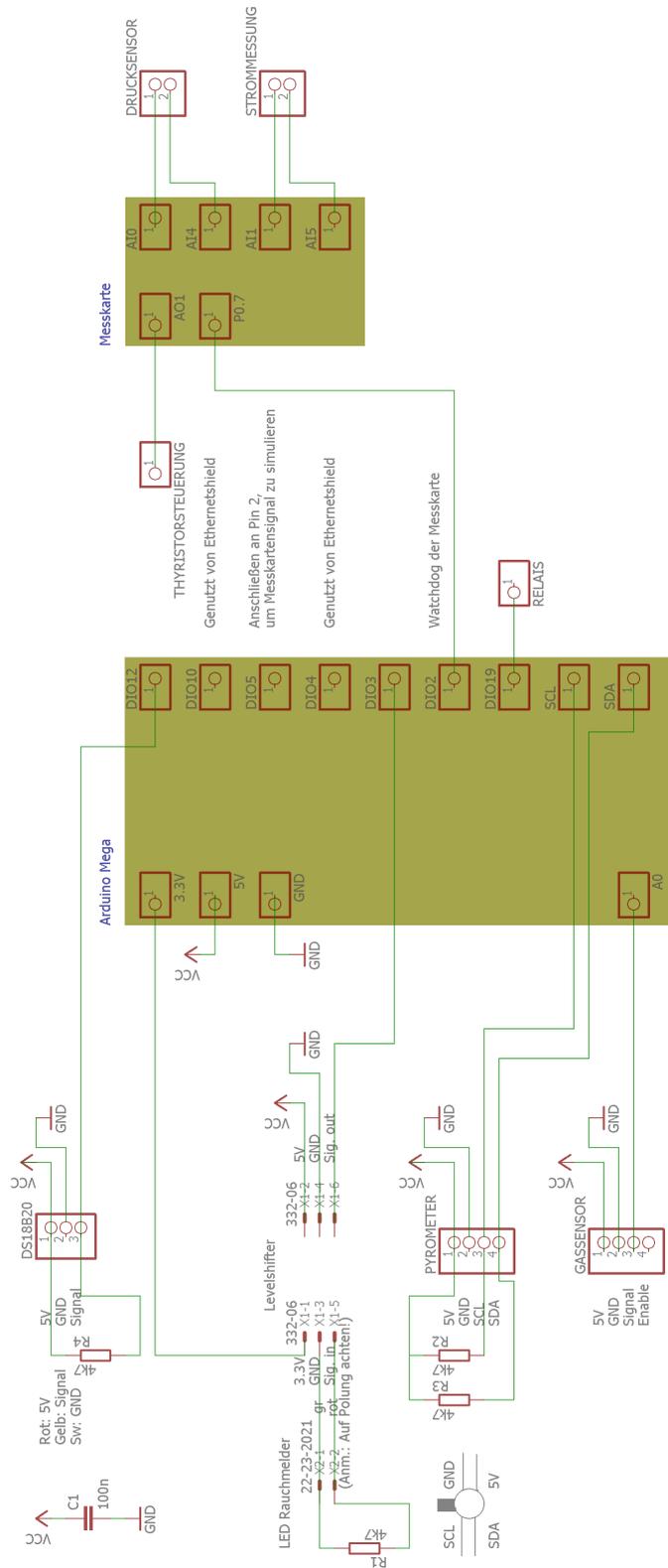


Abbildung A.2: Schaltplan der Überwachungseinheit

A.3 Weitere Abbildungen

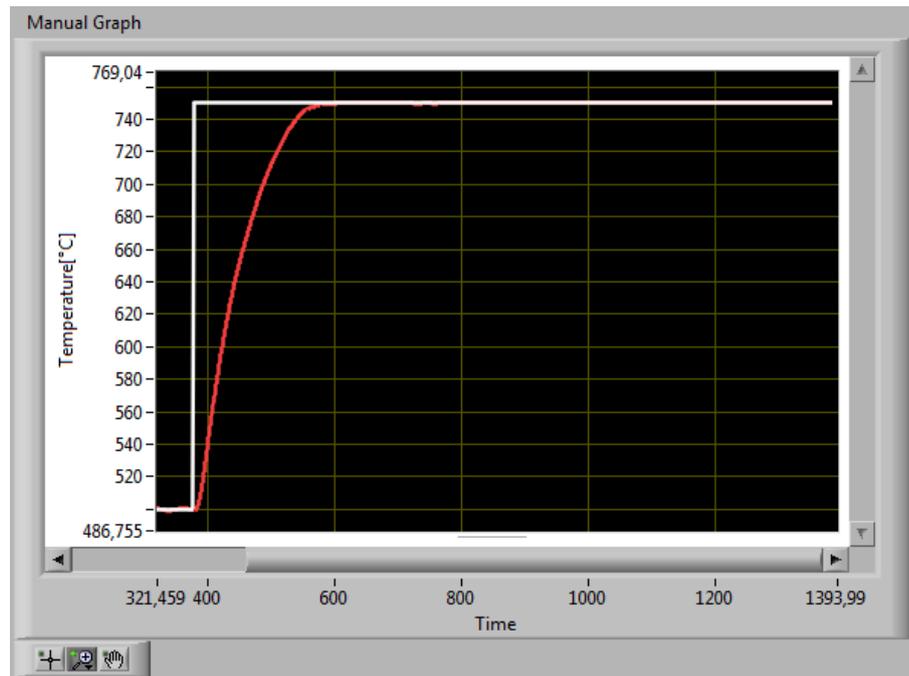


Abbildung A.3: Einschwingvorgang der Temperatur auf 750°C

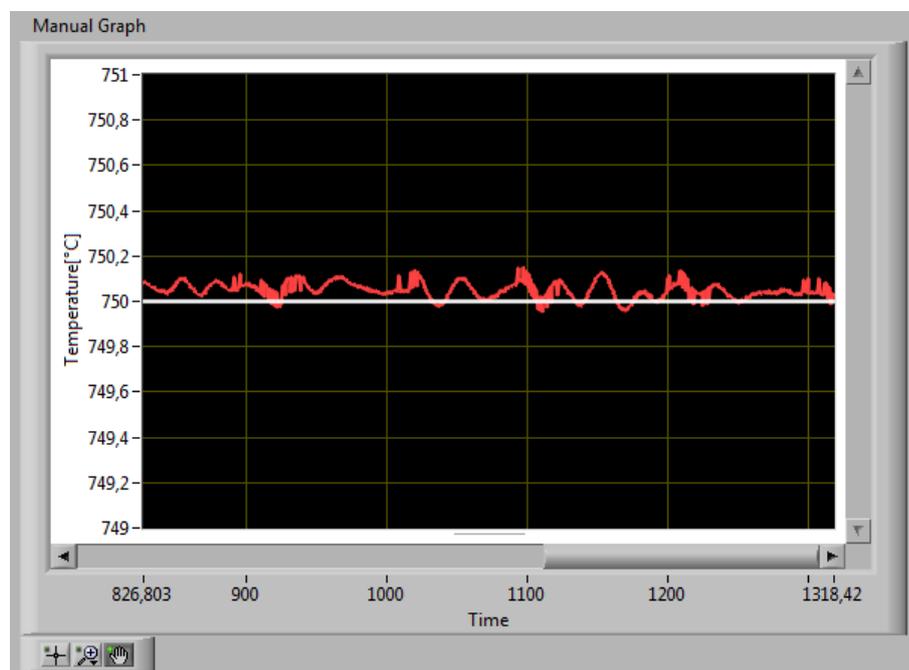


Abbildung A.4: Vergrößerte Darstellung der Messwerte nach Abschluss des Einschwingvorganges