



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Masterthesis

Stephan Schulze

Entwicklung eines Mehrgrößenheizsystems und  
Implementierung unterschiedlicher Temperaturre-  
gelungskonzepte für wissenschaftliche Untersu-  
chungen an einem Rheometer

Stephan Schulze

Entwicklung eines Mehrgrößenheizsystems und Implementierung  
unterschiedlicher Temperaturregelungskonzepte für  
wissenschaftliche Untersuchungen an einem Rheometer

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung  
im Masterstudiengang Automatisierung  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Florian Wenck  
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Gheorghiu

Abgegeben am 28. Januar 2016

**Stephan Schulze**

**Thema der Masterthesis**

Entwicklung eines Mehrgrößenheizsystems und Implementierung unterschiedlicher Temperaturregelungskonzepte für wissenschaftliche Untersuchungen an einem Rheometer

**Stichworte**

Temperaturregelung, Rheologie, Mehrgrößenregelung, Wärmeübertragung, Röntgenstrahlung, Lasersintern, dezentrale Regelung

**Kurzzusammenfassung**

Das Forschungszentrum DESY betreibt ein Rheometer mit einem Heizsystem zur Röntgenstrukturanalyse von komplexen Fluiden. Das Heizsystem muss hohe Anforderungen erfüllen, weil die viskoelastischen Eigenschaften der meisten Fluide stark temperaturabhängig sind, die bisher nicht erreicht werden.

Die Aufgabe im Rahmen dieser Masterthesis besteht darin, ein neuartiges Gas-Heizsystem zu entwickeln. Hierzu werden mit Hilfe moderner 3D-Druck Technologie optimierte Heizschalen gefertigt und Heizpatronen integriert.

Mittels unterschiedlicher Mehrgrößenregelungskonzepte werden die Temperaturen präzise geregelt.

**Stephan Schulze**

**Title of the paper**

Development of a heating system and implementation of different control concepts for a science grade rheological instrument

**Keywords**

Temperature control, rheology, multivariable control, heat transfer, X-rays, laser sintering, decentralised control

**Abstract**

The research centre DESY runs a rheometer in combination with a heating system for x-ray structure of complex fluids. The heating system has got high demands, because the viscoelastic properties of most fluids are highly dependent on temperature, which have not been fulfilled in the previous setup.

It is the object of this master thesis to build a new gas heating. Using the modern 3D printing technology new heating shells will be produced and cartridge heaters will be integrated. Different concepts of multivariable control will be used to control the temperature previously.

# Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis .....	IV
Abbildungsverzeichnis .....	V
Formelzeichen .....	VI
1 Einleitung .....	1
1.1 Deutsches Elektronen Synchrotron und Forschung mit Photonen .....	1
1.2 PETRA III und Röntgenstrahlung .....	2
1.3 Rheometer .....	2
1.3.1 Kapillarrheometer .....	2
1.3.2 Rotationsrheometer .....	3
2 Ausgangszustand .....	5
2.1 Rheometer und Heizsystem .....	5
2.2 Steuerung und Temperaturregelung .....	9
2.3 Spezifikation des Ausgangszustandes .....	9
3 Aufgabenstellung .....	11
4 Theoretische Grundlagen .....	13
4.1 Zustandsregelung .....	13
4.1.1 Zustandsregler von Ein- und Mehrgrößensystemen .....	13
4.1.2 Beobachterentwurf eines Mehrgrößensystems .....	20
4.2 Experimenteller PI-Mehrgrößenregler .....	22
4.2.1 Bestimmung der Verstärkungsmatrix .....	22
4.2.2 Bedingungen für die Umsetzung .....	22
4.2.3 Einstellung der Reglermatrizen .....	23
4.3 Dezentrale Regelung .....	25
4.3.4 Entwurfsmöglichkeiten und Analyse .....	26
4.3.5 Experimentelle Auslegung der dezentralen Reglerparameter .....	27
4.4 Wärmeübertragung .....	29
4.4.1 Einleitung und Definitionen .....	29
4.4.2 Strahlung .....	32
4.4.3 Erzwungene Konvektion .....	33
5 Entwicklung der Hardware und Analyse .....	36
5.1 Konstruktion und Fertigung neuartiger Heizschalen .....	36
5.2 Integration der Heizpatronen und Temperaturfühler .....	40
5.3 Umsetzung einer Temperaturregelung mit der vorhandenen Steuerung .....	41
5.4 Ergebnisse der Analyse und Optimierungsmaßnahmen .....	43

6	Umsetzung eines Mehrgrößensystems .....	44
6.1	Konzept.....	44
6.2	Integration der leistungsstärkeren Heizpatronen und Temperatursensoren.....	44
6.3	Embedded PC mit Steuerungssoftware.....	45
6.4	Busklemmen .....	46
6.5	Installation der Komponenten .....	47
7	Entwicklung der Software .....	48
7.1	Programm.....	48
7.2	Bedienoberfläche .....	48
7.3	Einbindung von Matlab/Simulink.....	50
8	Regelungskonzepte .....	51
8.1	Linearisierung der Ausgangskennlinie.....	52
8.2	Dezentrale Regelung der Heizschalen .....	53
8.2.1	Ermittlung der Übertragungsfunktionsmatrix und Auslegung der Regler .....	53
8.2.2	Nachweis .....	60
8.2.3	Integration des Simulink Modells.....	62
8.2.4	Ermittlung der Temperaturgradienten.....	64
8.2.5	Vergleich Probenräger 1 ohne und mit Klappen.....	68
8.2.6	Ergebnisse mit dem Probenräger 1.....	70
8.2.7	Ergebnisse mit dem Probenräger 2.....	74
8.3	PI-Mehrgrößenregler.....	77
8.3.1	Bestimmung der Verstärkungsmatrix der Strecke .....	77
8.3.2	Einbindung des PI Mehrgrößenreglers.....	79
8.3.3	Ermittlung der Tuningfaktoren.....	80
8.3.4	Ergebnisse des PI-Mehrgrößenreglers am Probenräger 2.....	83
9	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	86
9.1	Vergleich der Regelungskonzepte .....	86
9.2	Zusammenfassung.....	87
10	Ausblick .....	88
	Literaturverzeichnis.....	90

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abweichung der Temperaturen am Probenräger 1 ohne Klappen.....	65
Tabelle 2: Abweichung der Temperaturen am Probenräger 1 mit Klappen.....	65
Tabelle 3: Abweichung der Temperaturen am Probenräger 2 mit Klappen.....	67

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messeinrichtungen (Platte-Platte, Kegel-Platte und Zylinder) .....	3
Abbildung 2: Platte-Platte Geometrie mit Röntgenstrahl [9] .....	3
Abbildung 3: Rheometer mit einer handelsüblichen Heizvorrichtung [9] .....	5
Abbildung 4: CAD Modell des Rheometers mit dem vorherigen Heizsystem.....	6
Abbildung 5: Schalen und gesamtes Oberteil des vorhandenen Heizsystems .....	6
Abbildung 6: CAD Modell des geschlossenen Heizsystems V1.1 .....	7
Abbildung 7: Detailansicht des Heizsystems V1.1.....	8
Abbildung 8: Funktionsprinzip des Heizsystems V1.1 in Anlehnung an [9] .....	8
Abbildung 9: Temperaturgradient des Heizsystems V1.1 .....	9
Abbildung 10: Temperaturabweichung auf dem Probenträger .....	10
Abbildung 11: Zustandsraummodell Eingrößensystem in Anlehnung an [4].....	14
Abbildung 12: Zustandsregler in Anlehnung an [4].....	15
Abbildung 13: Übertragungsfunktion Ein- und Mehrgrößensystem [5] .....	16
Abbildung 14: Zustandsraummodell Mehrgrößensystem in Anlehnung an [4].....	17
Abbildung 15: Eingrößensystem mit Beobachter in Anlehnung an [4] .....	20
Abbildung 16: Eigenwerte der offenen Kette in Anlehnung an [2].....	23
Abbildung 17: Dezentrale Regelung [6].....	25
Abbildung 18: Arten der Wärmeübertragung.....	29
Abbildung 19: Temperaturverlauf in einem Wärmeüberträger [7] .....	30
Abbildung 20: Funktionsprinzip des Mehrgrößenheizsystems im Querschnitt .....	37
Abbildung 21: CAD Modell der Schalen.....	38
Abbildung 22: Strahlengang durch die neuen Schalen .....	39
Abbildung 23: Temperaturverlauf bei Erhöhung der Leistung einzelner Patronen .....	41
Abbildung 24: Einsatz und Analyse des Heizsystems an der Beamline.....	42
Abbildung 25: Heizsystem mit Klappen.....	43
Abbildung 26: Schalen mit Heizpatronen und Temperatursensoren.....	45
Abbildung 27: Embedded PC [8].....	45
Abbildung 28: I/O Modul [8] .....	46
Abbildung 29: Schaltkasten mit Steuerung und Schnittstellen .....	47
Abbildung 30: Bedienoberfläche "User" .....	49
Abbildung 31: Bedienoberfläche "Admin" .....	49
Abbildung 32: Integration TwinCAT Target (Screenshot).....	50
Abbildung 33: Faktoren zur Umrechnung der analogen Ausgänge .....	52
Abbildung 34: Sprungantworten der 6 Heizpatronen.....	55
Abbildung 35: Sprungantworten Regelkreis 1.....	57
Abbildung 36: Sprungantworten Regelkreis 2.....	57
Abbildung 37: Sprungantworten Regelkreis 3.....	58
Abbildung 38: Sprungantworten Regelkreis 4.....	58
Abbildung 39: Sprungantworten Regelkreis 5.....	59
Abbildung 40: Sprungantworten Regelkreis 6.....	59
Abbildung 41: Auswahl TcCOM Objekt (Screenshot) .....	62
Abbildung 42: Dezentrale Regelung in TwinCAT .....	63
Abbildung 43: Heizsystem mit Probenträger 1 und Nomenklatur.....	64
Abbildung 44: Temperaturgradient bei 180 °C am Probenträger 1 mit Klappen.....	66
Abbildung 45: Probenträger mit Thermoelementen (l.), Probenträger mit Nomenklatur (r.) .....	66
Abbildung 46: Temperaturgradient bei 200 °C am Probenträger 2 mit Klappen.....	68

Abbildung 47: Vergleich der Temperaturverläufe ohne und mit Klappen.....	69
Abbildung 48: Vergleich der Leistungsverläufe ohne und mit Klappen .....	69
Abbildung 49: Sollwertsprung der Temperatur am Probenträger 1 auf 50 °C.....	70
Abbildung 50: Sollwertsprung der Temperatur am Probenträger 1 von 125°C auf 150 °C .....	70
Abbildung 51: Abweichung der Temperaturen am Probenträger 1 .....	71
Abbildung 52: Regel- und Standardabweichung mit dem Probenträger 1 .....	72
Abbildung 53: Mittlere Temperatur- und Standardabweichung auf dem Probenträger 1.....	73
Abbildung 54: Sprung der Solltemperatur am Probenträger 2 auf 50 °C.....	74
Abbildung 55: Sprung der Solltemperatur am Probenträger 2 von 125 °C auf 150 °C .....	74
Abbildung 56: Abweichung der Temperaturen bei unterschiedlichen Sollwerten.....	75
Abbildung 57: Regel- und Standardabweichung mit dem Probenträger 2 .....	75
Abbildung 58: Mittlere Temperatur- und Standardabweichungen auf dem Probenträger 2.....	76
Abbildung 59: Integration des Simulink Modells in TwinCAT .....	79
Abbildung 60: Sprungantwort bei Variation von $\alpha=0,05$ ; $\alpha=0,2$ .....	80
Abbildung 61: Sprungantwort bei $\alpha=0,5$ ; $\alpha=0,1$ ; $\alpha=0,08$ .....	81
Abbildung 62: Sprungantworten bei $\beta=4$ .....	81
Abbildung 63: Sprungantwort bei $\beta=6$ .....	82
Abbildung 64: Sprungantwort bei $\beta=8$ .....	82
Abbildung 65: Sprung der Solltemperatur von 100°C auf 150°C mit PIMR.....	83
Abbildung 66: Sprung der Solltemperatur auf 50°C mit PIMR.....	83
Abbildung 67: Abweichung der Temperaturen bei unterschiedlichen Sollwerten mit PIMR .....	84
Abbildung 68: Regel- und Standardabweichung mit dem Probenträger 2 und PIMR .....	84
Abbildung 69: Mittlere Temperaturabweichung auf dem Probenträger.....	85
Abbildung 70: Heizsystem mit Piezo und Testaufbau für Befeuchtung.....	88

## Formelzeichen

A	Systemmatrix	
b	Eingangsvektor	
$c^T$	Ausgabevektor	
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	m/s
$C_s$	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers	$W \cdot m^2 \cdot K^{-4}$
$d_L$	Charakteristische Länge	
h	Planck'sche Wirkungsquantum	$J \cdot s$
F(s)	Rückführdifferenzmatrix	
$k_w$	Wärmedurchgangszahl	
$k^T$	Zustandsregler	
$K_s$	Verstärkungsmatrix	
$K_i, K_p$	Matrizen für PI-Mehrgrößenregler	
k	Boltzmannkonstante	J/K
$S_s, S_B$	Steuerbarkeitsmatrix, Beobachtbarkeitsmatrix	
$T_m$	Überschwingzeit	
$\Delta h$	Überschwingweite	
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante	$W \cdot m^2 \cdot K^{-4}$
$\alpha, \beta$	Tuningfaktoren für PI-Mehrgrößenregler	
$\alpha_w$	Wärmeübergangszahl	
$\nu$	Viskosität des Fluids	
$\Delta \vartheta_m$	Mittlere Temperaturdifferenz	K

# 1 Einleitung

Einleitend zu der Thesis folgen einige Informationen zum Deutschen Elektronen Synchrotron, speziell von dem Ringbeschleuniger Petra III und den Aufbau und Einsatz von Rheometern.

## 1.1 Deutsches Elektronen Synchrotron und Forschung mit Photonen

Das Deutsche Elektronen Synchrotron (DESY) wurde im Dezember 1959 gegründet und gehört zu der Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren. Die Forschung am DESY ist extrem vielseitig und reicht von den naturwissenschaftlichen Grundlagen und der Suche nach den kleinsten Materiebausteinen der Welt, über die Entwicklung von Hightech-Werkstoffen bis zur Fahndung nach neuen Wirkmechanismen für künftige Medikamente. Die Forschung besteht aus drei Schwerpunkten.

Der erste Schwerpunkt sind die Beschleuniger. DESY entwickelt, vertreibt und nutzt modernste Teilchenbeschleuniger. Der zweite Schwerpunkt behandelt die Forschung mit Photonen. Die Lichtquellen mit Ihrem speziellen Röntgenlicht machen atomare Strukturen und Reaktionen im Nanokosmos sichtbar und der letzte Bereich ist die Teilchenphysik. In Zusammenarbeit mit Wissenschaftler aus der ganzen Welt erforschen die Teams am DESY die fundamentalen Bausteine und Kräfte im Universum.

Insgesamt hat DESY vier Ringteilchenbeschleuniger und vier Linearbeschleuniger entwickelt, darunter drei Vorbeschleuniger für Elektronen, Positronen und Protonen. Der Bau des 5. Linearbeschleunigers XFEL (X-Ray Free-Electron-Laser) steht kurz vor dem Abschluss.

Das Forschungszentrum ist nach dem ersten Ringbeschleuniger DESY benannt. Der Beschleuniger wurde später zu einem Elektronen/Positronen-Synchrotron (DESY II) sowie einem Protonen-Synchrotron (DESY III) umgebaut. Von 1969 bis 1974 wurde der zweite Ringbeschleuniger DORIS gebaut. Der Doppel-Ring-Speicher besitzt eine Länge von ungefähr 300 Meter. Nach dem Bau des dritten Ringbeschleunigers, PETRA, mit einer Länge von über zwei Kilometer wurde DORIS zum Vorbeschleuniger umgebaut und in DORIS II umbenannt. Von 1984 bis 1990 wurde der größte Ringbeschleuniger errichtet. Der Name des Beschleunigers lautet HERA und der Vorbeschleuniger PETRA wurde in PETRA II umbenannt. Der Umbau von PETRA II auf PETRA III startete 2007, nach dem Abschluss des Baus ist der Beschleuniger einer der weltweit führenden Synchrotrons.

Seit 2005 erzeugt FLASH, der weltweit erste Freie-Elektronen Laser im Röntgenbereich, extrem intensiv ultrakurz gepulste Röntgenlaserblitze. Diese Blitze ermöglichen den Forschern die Bewegungen von Atomen und Molekülen zu verfolgen. FLASH beschleunigt Elektronen fast auf Lichtgeschwindigkeit. Anschließend zwingen spezielle Magnetanordnungen, die Undulatoren, die Elektronen auf einen Slalom Kurs. In den Kurven geben die schnellen Teilchen Röntgenlaserblitze ab, die sich überlagern und im Gleichtakt schwingen. Die Besonderheit ist der Einsatz supraleitender Beschleunigertechnik. In den auf minus 271 Grad Celsius gekühlten Resonatoren fließt der Strom verlustfrei, so dass praktisch die gesamte eingespeiste elektrische Leistung auf die Teilchen übertragen werden kann.

## 1.2 PETRA III und Röntgenstrahlung

Seit 2010 liefert PETRA III Röntgenstrahlung, die stärker und gebündelter ist als bei allen anderen Speicherringen auf der Welt. An 14 Strahlführungen und 30 Messstationen bietet die Anlage damit optimale Forschungsmöglichkeiten für die Medizin bis zur Nanotechnologie. Anwendungen liegen beispielweise in der Entwicklung von neuen Medikamenten, die gezielt und punktgenau dort ansetzen, wo ein Krankheitserreger angreift oder in der Materialforschung. Die Untersuchung von Schweißnähten, Ermüdungserscheinungen von Werkstücken und neue Legierungen für den Automobilbereich oder Flugzeugbau sind Beispiele aus der Materialkunde.

Eine dieser Messstationen befindet sich an der Strahlführung P10 und ist auf die Untersuchung komplexer Fluide spezialisiert. An dieser Messstation wird auch das hier beschriebene Mehrgrößenheizsystem, als wesentlicher Bestandteil des Rotationsrheometers, eingesetzt.

## 1.3 Rheometer

Trotz der steigenden Einsatzmöglichkeiten sind auf dem Markt nicht viele Hersteller von Rheometern zu finden, drei bekannte Hersteller sind *Anton Paar*, *TA Instruments* und *Thermo Fischer Scientific*. Die Letzte von den drei genannten Firmen ist der Lieferant des vorhandenen Rheometers am DESY. Moderne Rheometer erlauben die Durchführung von Spann- und Kriechversuchen, die Messung elastischer und viskoser Eigenschaften, sowie die Durchführung dynamisch mechanischer Analysen. Die Untersuchung von viskoelastischen Eigenschaften weicher Materie und Flüssigkeiten erfolgt mittels kontinuierlicher oder oszillativer Scherung der zu untersuchenden Proben. Im Folgenden werden zwei Arten von Rheometern näher erläutert.

### 1.3.1 Kapillarrheometer

Bei einem Kapillarrheometer wird die Flüssigkeit aus einem Vorratsbehälter mit einer konstanten Geschwindigkeit durch eine Düse extrudiert. Die Schubspannung in dem Kapillarrheometer ergibt sich aus der Geometrie der Düse und dem sich einstellendem Extrusionsdruck. Ebenfalls aus der Geometrie und dem Volumenstrom ergibt sich die Schergeschwindigkeit. Diese Art von Rheometers bietet ausschließlich die Messung der Viskositätsfunktion. Das Material wird wegen der hohen Schergeschwindigkeiten großen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Der Einsatz für Emulsionen ist an dem beschriebenen Kapillarrheometer daher zum Beispiel nur sehr eingeschränkt möglich.

### 1.3.2 Rotationsrheometer

Die zweite Art von Rheometer ist das Rotationsrheometer. Diese Art der Rheometer wird am DESY, genauer gesagt an der Beamline P10 eingesetzt. Dem Namen entsprechend können die Proben entweder stetig durch Rotation belastet werden oder dynamisch-mechanisch, durch Oszillation. Die Messung der Rotation erfolgt über einen optisch entkoppelten Encoder, das Drehmoment dagegen wird über die Stromstärke gemessen. Die Regelung erfolgt über die Drehzahl oder das Drehmoment.

Prinzipiell werden drei unterschiedliche Messeinrichtungen des Rotationsrheometer unterschieden. Diese sind Platte-Platte, Kegel-Platte und die Zylindergeometrie und werden auf der Abbildung 1 schematisch dargestellt.

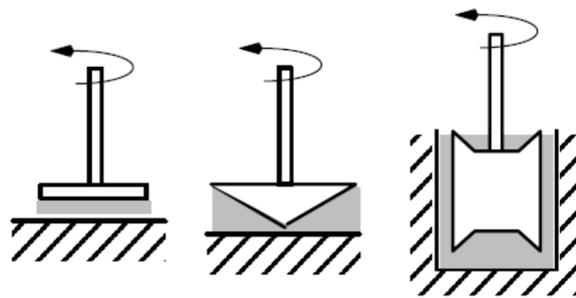


Abbildung 1: Messeinrichtungen (Platte-Platte, Kegel-Platte und Zylinder)

Bei Platte-Platte Geometrie befindet sich die Probe zwischen zwei coaxialen, kreisrunden Platten, von denen eine rotiert, siehe Abbildung 2. Der linke Teil der Abbildung 2 zeigt den Standardaufbau von Rheometern mit einem horizontalen Röntgenstrahl. Der rechte Teil dagegen zeigt einzigartige Konfiguration am DESY mit einem vertikalen Röntgenstrahl durch die Platte-Platte Geometrie.

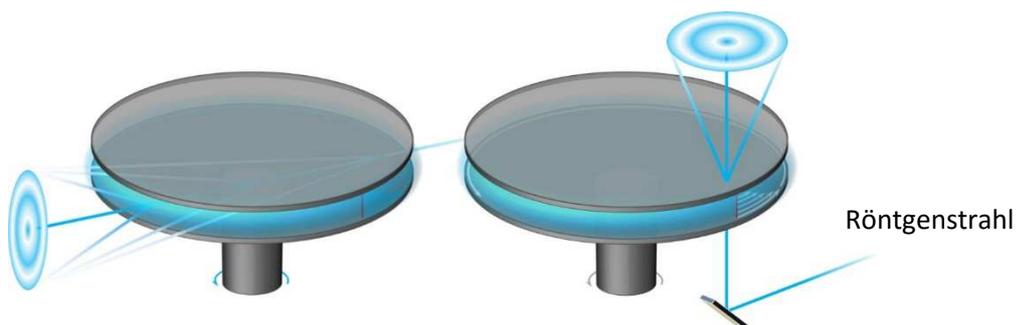


Abbildung 2: Platte-Platte Geometrie mit Röntgenstrahl [9]

Deformationsgeschwindigkeit ist im Gegensatz zum Kegel-Platte-System nicht konstant, sondern steigt von der Mitte nach außen an. Die Messung bzw. Steuerung erfolgt über das Drehmoment bzw. der Drehzahl.

Das Merkmal der Kegel-Platte Geometrie ist, dass sich die Probe in einem Scherspalt befindet, der jedoch aus einem sehr flachen Kegel und einer coaxialen Platte gebildet wird. Durch die Wahl des Kegelwinkels wird eine gleichmäßige Schergeschwindigkeitsverteilung im Meßspalt erzeugt.

Bei der Zylinder Geometrie befindet sich der Scherspalt in paralleler Ausrichtung zur Drehachse und am äußeren Rand der Geometrie. Die Schergeschwindigkeit über die Probe ist hier ebenfalls konstant, wobei die Bereiche am Boden der Geometrie vernachlässigbar sind, weil der Scherspalt groß ist und die Schergeschwindigkeit zum Zentrum abnimmt. Der Vorteil in dieser Methode besteht vor allem in der Möglichkeit niederviskose Flüssigkeiten untersuchen zu können.

Das verwendete System wird anhand der gängigen Platte-Platte Geometrie charakterisiert, allerdings besteht die Möglichkeit alle drei Geometrien aufnehmen zu können. Somit kann der komplette Funktionsumfang des Rotationsrheometers gewährleistet werden.

## 2 Ausgangszustand

In dem folgenden Abschnitt werden das Rheometer und der Ausgangszustand der Probenumgebung erläutert. Weitere Inhalte sind die Beschreibung der bisherigen Steuerung und Regelung.

### 2.1 Rheometer und Heizsystem

Für die Strukturanalyse komplexer Fluide mittels Röntgenstrahlung und optischer Mikroskopie wird ein invertiertes *Haake MARS II Rheometer* der Firma *Thermo Fischer Scientific* eingesetzt. Invertiert bedeutet, dass im Gegensatz zu konventionellen Rheometern nicht der obere, sondern der untere Probenträger drehbar gelagert ist. Die Positionierung des Antriebes im Fuß des Rheometers, also unterhalb des Probenträgers, ermöglicht den Röntgenstrahl senkrecht durch die Probenumgebung zu leiten und dessen Streubild oberhalb der Proben zu detektieren. Weitere Baugruppen des Rheometers sind ein Schlitten und eine luftgelagerte Welle, auf der der Probenträger befestigt ist. Der zweite Probenträger wird an der Platte des Schlittens befestigt und definiert somit die Spaltgröße.

Zur Untersuchung der Probe werden die beiden Probenträger bis auf wenige Millimeter zusammengefahren. Weil die viskoelastischen Eigenschaften der meisten Fluide, z.B. Thermoplaste, stark von deren Temperatur abhängig sind, ist die Erweiterung des Rheometers mit einer Heizkammer zwingend notwendig. Die auf dem Markt vorhandenen Heizvorrichtungen sind nicht für das invertierte Rheometer ausgelegt und eine Spezialanfertigung käme aufgrund der vielen Anpassungen einer Neukonstruktion gleich und sprengt damit den finanziellen Rahmen. Zudem erfüllen kommerziell erhältliche Systeme teilweise nicht die hohen Anforderungen im wissenschaftlichen Betrieb in Bezug auf Temperaturverteilung und Dynamik. Die Abbildung 3 zeigt das reale Rheometer mit einer handelsüblichen Heizvorrichtung.



Abbildung 3: Rheometer mit einer handelsüblichen Heizvorrichtung [9]

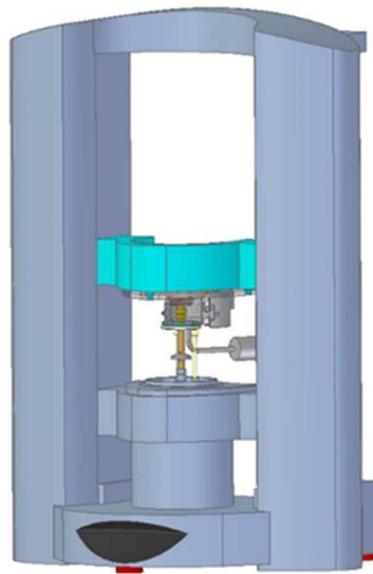


Abbildung 4: CAD Modell des Rheometers mit dem vorherigen Heizsystem

Die ersten, am HASYLAB entwickelten, Prototypen bestehend aus einer Heizkammer und einer SPS-Steuerung mit verschiedenen Schnittstellen sind im Laufe der letzten Jahre häufig verändert und optimiert wurden. Trotz der Optimierungen wurden die Anforderungen an die Regelgüte, die noch definiert werden, nicht erfüllt. Die zuletzt verwendete Probenumgebung besteht aus Halbschalen, das verwendete Halbzeug ist ein Aluminiumrohr (Abb. 5), einer Bodenplatte mit Öffnung für den Gaseinlass und einem oberen Probenträger, der auch als Verschluss des Probenraumes dient. Das CAD Modell des Rheometers mit dem vorherigen Heizsystem ist auf der Abbildung 4 zu sehen.



Abbildung 5: Schalen und gesamtes Oberteil des vorhandenen Heizsystems

In der ersten Variante wird das Gas direkt über die Öffnung der Bodenplatte in den Probenraum geleitet. Der Ausgangszustand des Systems wird in den folgenden Kapiteln mit Heizsystem V1 bezeichnet. Nach den ersten Messungen wurde jedoch deutlich, dass das erwärmte Gas während der Aufwärmphase homogener verteilt werden muss. Die optimierte Variante, im Folgenden mit V1.1 bezeichnet, besitzt eine zusätzliche Bodenplatte, die mit kleinen Bohrungen versehen ist. Das Gas strömt dann über den Gaseinlass in die Bodenplatte und über die symmetrisch verteilten Bohrungen in den geschlossenen Probenraum. In den folgenden Abschnitten wird die Funktionsweise näher erläutert.

Die Erwärmung des Gases im Heizsystem V1 und V1.1 erfolgt über eine Heizspindel in der Rohrheizung. Die Leistungsregelung der Heizspindel wird über eine Dimmerklemme der SPS realisiert. Die Leistung der Klemme beträgt 600 W bei 230 V und wird über den Ansteuerwinkel im Phasenanschnitt verändert. Die Probenträger sind aus VESPEL, weil dieses Material besonders transparent für Röntgenstrahlung und gleichzeitig hochtemperaturfest ist.

Die Abbildung 6 zeigt den Aufbau des vorhandenen Systems V1.1, mit der unteren Isolierplatte als Verteiler für den Gaseinlass im geschlossenen Zustand. Die Schalen sind drehbar gelagert und können über einen Schlitten manuell verfahren werden. Das ist von Vorteil für die Präparation der Proben auf dem Probenträger. Die Verbindung zwischen den Wellen und den Schalen erfolgt über Scharniere aus Keramik. Dadurch wird die Wärmeübertragung auf den Schlitten verringert. Eine weitere Isolierung befindet sich an der großen Probenplatte, um die Wärmeübertragung auf den Schlitten des Rheometers zu verringern.

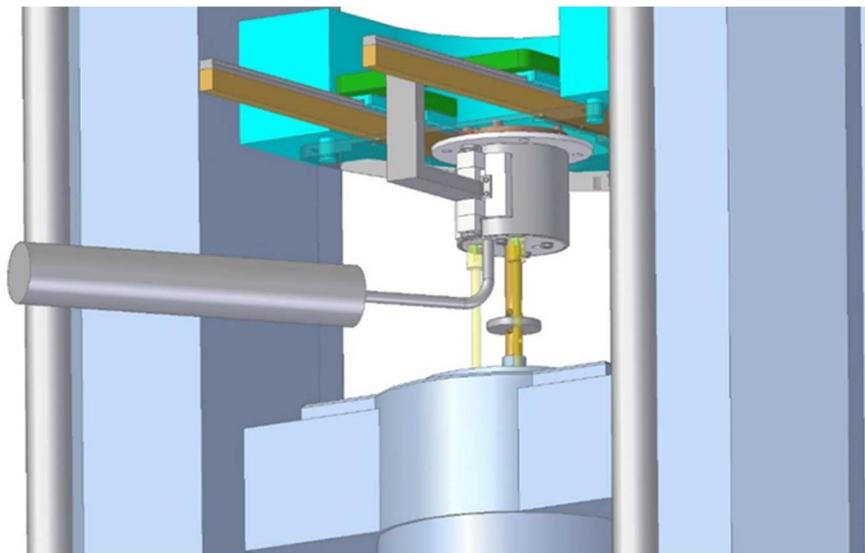


Abbildung 6: CAD Modell des geschlossenen Heizsystems V1.1

Die Funktionsweise des Systems wird anhand der folgenden Abbildungen 7 und 8 näher erläutert. Das Gas wird mit einer Heizspindel erwärmt und strömt über das Rohrstück an der Heizung in die Bodenplatte und gelangt von dort in den Probenraum. Durch die kleinen Bohrungen in der Isolierplatte strömt das Gas von unten nach oben durch den Probenraum. Beim Einsatz des Rheometers an der Beamline durchläuft der Röntgenstrahl den Probenraum ebenfalls von unten nach oben. Zur Umsetzung des Systems sind spezielle Materialien, wie Macor und Vespel notwendig. Die Fertigung der Komponenten ist aufgrund der komplexen Geometrie sehr aufwendig und teuer.

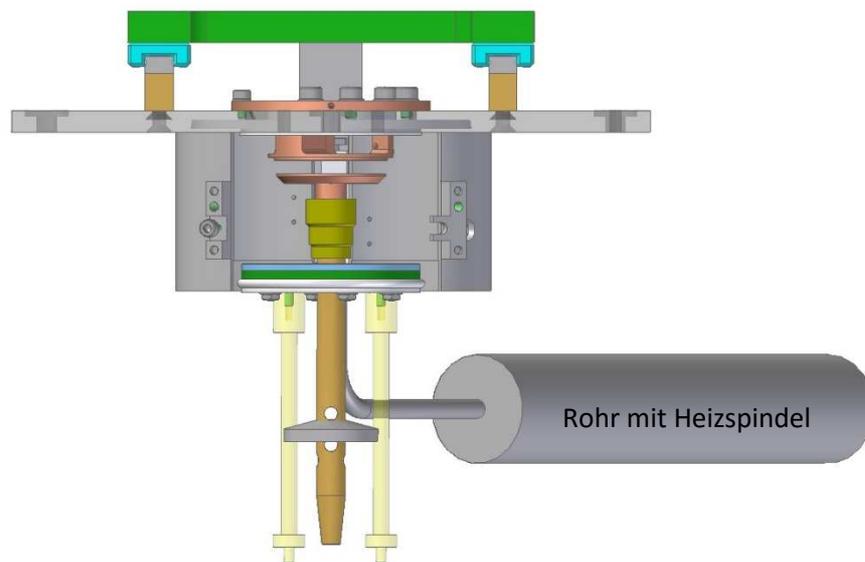


Abbildung 7: Detailansicht des Heizsystems V1.1

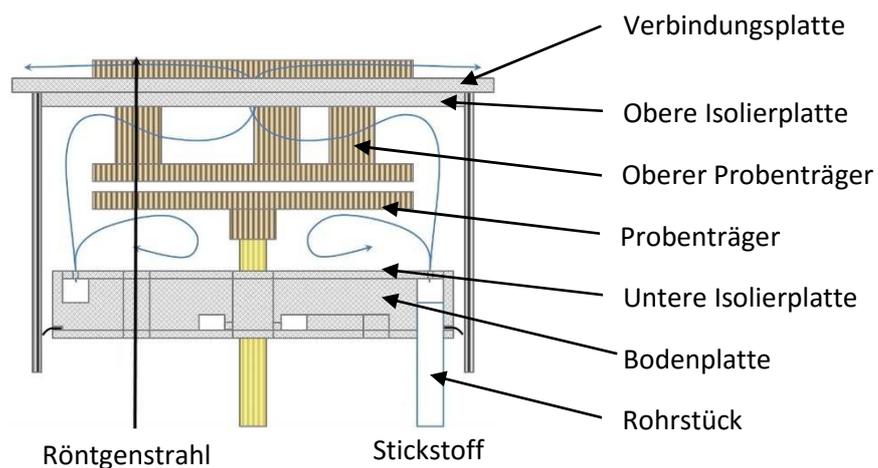


Abbildung 8: Funktionsprinzip des Heizsystems V1.1 in Anlehnung an [9]

## 2.2 Steuerung und Temperaturregelung

Das Herz der speicherprogrammierbaren Steuerung, SPS, bildet ein Embedded PC von Beckhoff, genauer gesagt der CX9010. Die Kommunikation der Module erfolgt über einen K-Bus und die verwendete Software heißt TwinCAT 2. Der Embedded PC und die I/O Module sind in einem 19 Zoll Rack installier. Neben der bereits erwähnten Dimmerklemme sind weitere I/O Module bereits vorhanden, z.B. eine Klemme zur Temperaturerfassung mit Thermoelementen, analoge Eingänge und Ausgänge und eine Klemme zur Temperaturerfassung mit Widerstandsthermometer, z.B. PT100.

Die Messung der Temperatur erfolgt in der Heizspindel über ein Thermoelement und in der feststehenden Welle des Rheometers mit einem PT100. Die Temperatur der Welle wird als Istwert an einen PI-Regler geschickt. In der Bibliothek der verwendeten Software sind die Regler-Bausteine als Standard vorhanden. Die Ermittlung der Reglerparameter ist über Messungen am bestehenden System durchgeführt worden. Nach der Eingabe eines Sollwertes kann die Regelung gestartet werden. Zur Eingabe der Parameter und zum Beobachten der Temperaturverläufe ist eine Bedienoberfläche vorhanden. Eine Historisierung der Daten ist ebenfalls eingerichtet.

## 2.3 Spezifikation des Ausgangszustandes

Zur Verdeutlichung der Schwachpunkte des bisherigen Heizsystems V1.1 werden der Temperaturgradient und die Temperaturabweichung auf dem Probenträger auf den folgenden Abbildungen 9 und 10 dargestellt. Dafür wird die Temperatur auf dem Probenträger an mehreren Positionen gemessen. Auf der Abbildung 9 ist die Temperatur an der Heizspindel über die mittlere Temperatur am Probenträger aufgetragen.

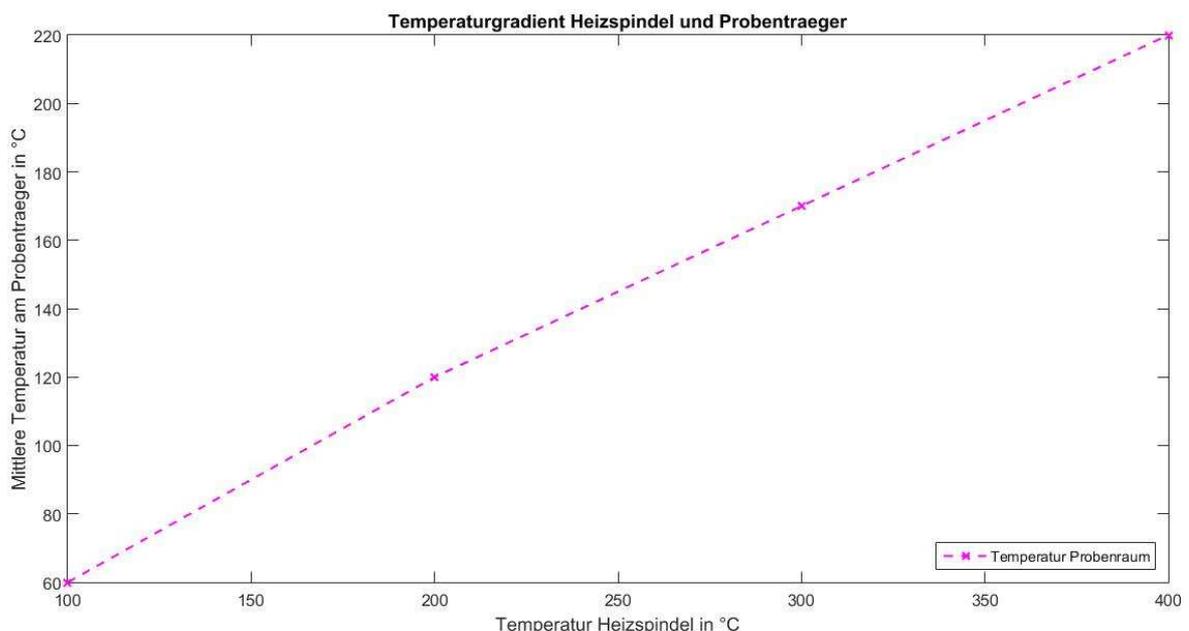


Abbildung 9: Temperaturgradient des Heizsystems V1.1

Bei einer Temperatur an der Heizspindel von 100 °C werden also 60 °C im Probenraum gemessen. Der Temperaturversatz von 40 K steigt bis auf 180 K bei 400 °C an der Heizspindel an und repräsentiert vor allem die Wärmeverluste in der langen Zuleitung und der unteren Isolierplatte.

Die Temperaturabweichung auf dem Probenträger (Abb. 10) zeigt den maximalen Gradient zwischen den erfassten Temperaturen auf dem Probenträger über den Mittelwert der Messwerte. Die Messpunkte sind an dem Gaseinlass und der gegenüberliegenden Seite.

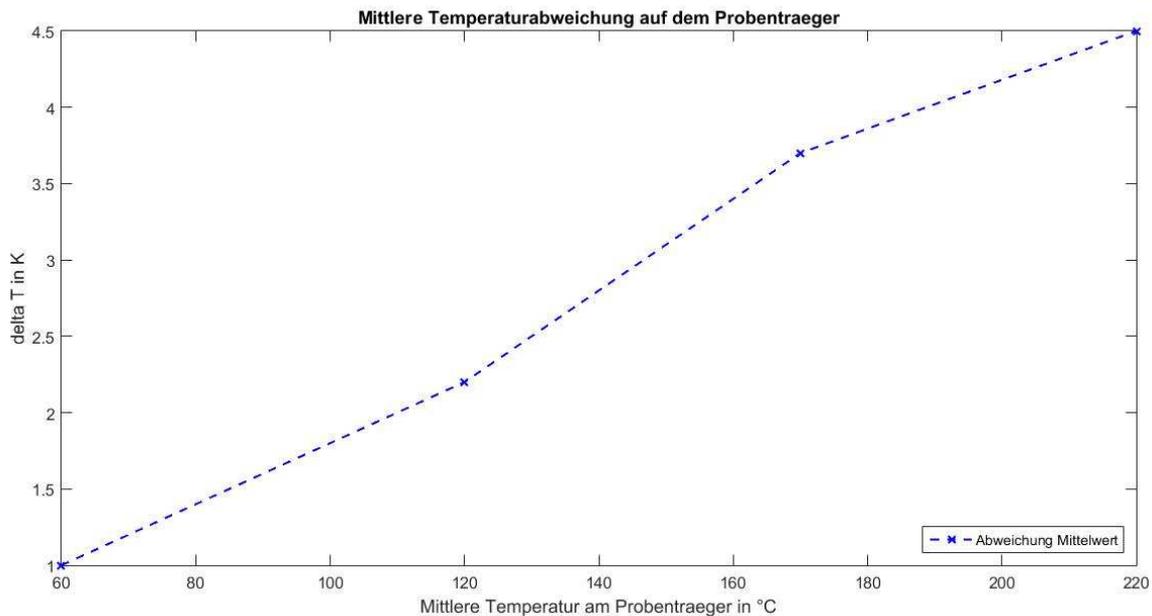


Abbildung 10: Temperaturabweichung auf dem Probenträger

Der Gradient steigt von 1 K bis auf 4,5 K bei einer maximalen Temperatur im Probenraum von 220 °C. Die ungleichmäßige Temperaturverteilung ist bedingt durch die asymmetrische Konstruktion mit punktförmiger Wärmezufuhr.

### 3 Aufgabenstellung

Aus dem Projekt Konstruktion einer Heizkammer für das Rotationsrheometer, das von der Abteilung Probenumgebung an dem Teilchenbeschleuniger Petra III umgesetzt wird, ist aufgrund der komplexen Anforderungen des federführenden Wissenschaftlers eine Aufgabenstellung für eine Masterthesis entstanden. Das Projekt umfasst die Entwicklung, Fertigung und Umsetzung eines neuartigen Mehrgrößenheizsystems für ein Rheometer. Die Konstruktion des Heizsystems, bestehend aus zwei Schalen und einer Befestigungsvorrichtung an das Rheometer, sind Bestandteile des Projektes allerdings nicht der Schwerpunkt der Master Thesis, weil die Entwicklung in sehr enger Zusammenarbeit mit dem Wissenschaftler entstanden ist. Die Anforderungen und Vorgaben an das neue Heizsystem werden in dem folgenden Abschnitt definiert.

Die erste Anforderung an die Entwicklung des Mehrgrößenheizsystems ist eine homogenere Aufheizung des Probenraums. Die Spezifikation der Version V1.1 zeigt, dass der bisherige Gradient bei maximal 4,5 K liegt, die Vorgabe an das neue System ist ein Temperaturgradient auf dem Probenträger von 1 K bis 200 °C. Die Temperaturdifferenz von 4,5 K auf dem Probenträger ist sehr problematisch, weil das Rheometer seine Messwerte über die gesamte Fläche mittelt und die Proben sich dabei in unterschiedlichen Phasen befinden können, z.B. kristallin bis flüssig.

Eine weitere Vorgabe an das neue System ist die Verbesserung des Wirkungsgrades, d.h. die Verringerung des Temperaturgradienten zwischen Heizvorrichtung und Probenraum, bei geringer Heizleistung. Das bisherige System erreicht bei einer Leistung von 600 W eine Temperatur an der Heizspindel von 400 °C und eine Temperatur von 220 °C im Probenraum. Weitere Ziele sind die Verringerung der Totzeit der Strecke und die Temperaturen in der Heizvorrichtung auf unter  $\pm 0,2$  K zu halten. Die Totzeiten stammen aus dem Rohrstück zwischen Heizspindel und Probenraum, sowie den Bodenplatten, die isolierend wirken.

Aus Sicherheitsgründen ist die Vorgabe, die Spannung an der Wärmequelle von 230 V auf eine Spannung von 24V zu reduzieren. Spezielle Anforderungen beim Einsatz des Rheometers mit dem Heizsystem im Labor und vor allem an der Beamline sind bestimmend für die Idee und die Geometrie der beiden Halbschalen. Die speziellen Anforderungen sind die Gewährleistung einen Röntgenstrahl in einem Winkel von 90 ° und 45 ° durch das Heizsystem zu lenken ohne den Strahl am Gehäuse des Heizsystems zu brechen. Außerdem soll ein Austausch der Proben mit einem geringen Aufwand möglich sein. Eine offene Gestaltung der Probenumgebung zur optischen Kontrolle der Fluide ist eine weitere Vorgabe. Eine weitere Anforderung ist die Erweiterbarkeit des Systems bereitzustellen. Die Experimente am DESY werden ständig optimiert und mit weiteren Funktionen ausgestattet, deswegen ist dieser Punkt sehr wichtig.

Damit alle Anforderungen an das Mehrgrößenheizsystem umgesetzt werden können, setzt sich die Masterthesis aus mehreren Schwerpunkten und Aufgabenbereichen zusammen, die in dem folgenden Abschnitt erläutert werden.

Die Anforderungen an die Geometrie werden mit der Erstellung eines 3D Modells des Heizsystems und der Integration in das vorhandene CAD Modell des Rheometers gelöst.

Zur Umsetzung der komplexen Struktur der entwickelten Heizschalen wird eine Fertigungsanalyse durchgeführt und Kontakt zu unterschiedlichen Anbietern aufgenommen. Nach der Fertigung der Schalen wird mit einer Machbarkeitsanalyse der Prototyp des Mehrgrößenheizsystems untersucht. Neben der Maßgenauigkeit des Fertigungsprozesses und dem Funktionsprinzip der Schalen wird bei der Machbarkeitsanalyse untersucht, ob die geforderte Temperatur im Probenraum von 250 °C erreicht wird. Nach der Analyse folgen die Implementierung und die Beurteilung unterschiedlicher Temperaturregelungskonzepte, der Fokus der Masterthesis. Die Vorgaben an die Regelgüte und die Erweiterbarkeit des Systems setzen zwingend voraus, dass ein Konzept erarbeitet und umgesetzt wird mit dem die Software- und Hardwareanforderungen eines Mehrgrößenystems realisiert werden können. Nach der Umsetzung der notwendigen Hard- und Software werden die Anforderungen an die Temperaturregelung mit einer dezentralen Regelung, einem PI- Mehrgrößenregler und einer Zustandsregelung untersucht.

Zur Identifikation des Heizsystems ist ein Versuchsaufbau im Labor zu entwickeln. Der Versuchsaufbau dient zum einen zur Analyse der Temperaturregelungskonzepte zum anderen wird eine Messeinrichtung entwickelt, mit der die Koeffizienten zwischen den Temperaturen am Probenträger und in den Schalen ermittelt werden können. Dadurch wird erreicht, dass die Anwender die erforderliche Temperatur an der Probe vorgeben können und die Steuerung die Sollwerte für die Temperaturen in den Schalen berechnet. Die Vorgabe eine übersichtliche und verständliche Bedienoberfläche für den Einsatz des Rheometers im Labor oder an der Beamline zu schaffen wird mit der integrierten PLC HMI umgesetzt.

## 4 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen umfassen Informationen zur Zustandsregelung von Ein- und Mehrgrößensystemen, zu der Ermittlung experimenteller PI-Mehrgrößenregler und zur Auslegung von dezentralen Regelungen. Das Thema Wärmeübertragung wird im zweiten Teil der Grundlagen behandelt und vermittelt theoretische Kenntnisse aus dem Wärmetransport über Strahlung und erzwungenen Konvektion. Die Umsetzung des Systems erfolgt jedoch auf den praktischen Messungen.

### 4.1 Zustandsregelung

Im Folgenden Absatz eine kurze Beschreibung der Zustandsregelungen, zusammengefasst aus dem Kapitel „Allgemeines“ zum Thema Zustandsregelungen aus [1].

Die modernen Methoden der Zustandsbeschreibung ermöglichen die Untersuchung von nichtlinearen und zeitvarianten Systemen, aber auch von Systemen mit mehreren Ein- und Ausgangsvariablen, den sogenannten Mehrgrößensystemen. Vorzugsweise werden die Methoden im Zeitbereich angewendet, allerdings kann die Berechnung von Zustandsreglern im Frequenzbereich vorteilhaft sein, wenn es sich um eine lineare Regelstrecke handelt. Ein eindeutiges Merkmal der Zustandsregelung ist die Umformung von Differentialgleichungen höherer Ordnung in Systeme von Differentialgleichungen erster Ordnung, wird in [1] erläutert. Vor allem werden Zustandsregelungen eingesetzt, wenn die hohen Anforderungen an die Dynamik durch die klassischen Methoden der Regelungstechnik oder Kaskadenregelungen nicht erfüllt werden.

#### 4.1.1 Zustandsregler von Ein- und Mehrgrößensystemen

Zunächst die Beschreibung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen an einem Eingrößensystem. Aus der folgenden Differentialgleichung mit der Übertragungsfunktion  $G(s)$  lässt sich das Zustandsraummodell bestimmen. Hier wird das System in Regelungsnormalform dargestellt.

Lineare Differentialgleich der Ordnung  $n$

$$a_n \cdot \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \cdot \frac{dy(t)}{dt} + a_0 \cdot y(t) = b_n \cdot \frac{d^n u(t)}{dt^n} + \dots + b_1 \cdot \frac{du(t)}{dt} + b_0 \cdot u(t) \quad (4.1)$$

Übertragungsfunktion

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_n \cdot s^n + b_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + b_1 \cdot s + b_0}{a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s + a_0} = \frac{Z(s)}{N(s)} \quad (4.2)$$

## Systemmatrix in Regelungsnormalform

$$A_R = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{a_0}{a_n} & -\frac{a_1}{a_n} & -\frac{a_2}{a_n} & \dots & -\frac{a_{n-1}}{a_n} \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

## Eingangsvektor in Regelungsnormalform

$$b_R = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{a_n} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

## Ausgabevektor in Regelungsnormalform

$$c_R^T = \left( b_0 - \frac{b_n \cdot a_0}{a_n} \quad b_1 - \frac{b_n \cdot a_1}{a_n} \quad \dots \quad b_{n-1} - \frac{b_n \cdot a_{n-1}}{a_n} \right) \quad (4.5)$$

Nach der Modellierung eines Systems und der Berechnung des Zustandsraummodells, einige allgemeine Informationen zu der Regelung durch Zustandsrückführung, bevor auf die Berechnung von Zustandsreglern eingegangen wird. Das Zustandsraummodell eines Eingrößensystems ist auf der Abbildung 11 dargestellt.

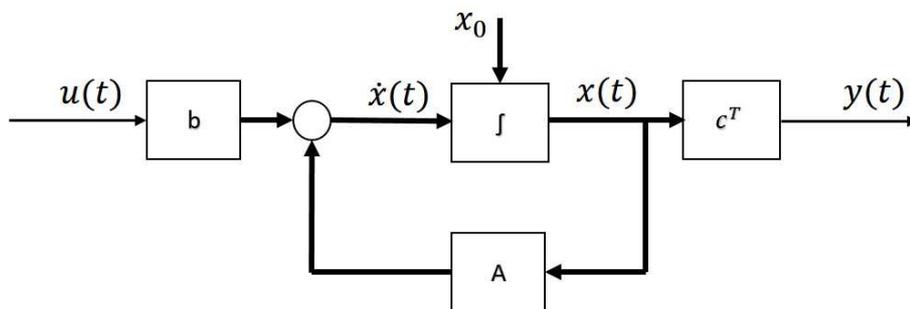


Abbildung 11: Zustandsraummodell Eingrößensystem in Anlehnung an [4]

Die Zustandsvariablen eines Prozesses bzw. einer Regelstrecke beinhalten die Informationen über das dynamische Verhalten. Die Zustandsregelung nutzt diese Informationen indem die Variablen über Proportionalglieder auf den Systemeingang zurückgeführt werden. Dadurch lassen sich die Pole/Eigenwerte des geschlossenen Kreises entsprechend gewünschter Güteforderungen vorgeben. Voraussetzung für die Anwendung der Zustandsregelung ist, dass alle Variablen messbar sind. Falls das nicht der Fall ist, kann ein Zustandsbeobachter implementiert werden, auf den im Kapitel 4.1.2 eingegangen wird. Die Abbildung 12 zeigt das Zustandsraummodell mit dem Zustandsregler  $k^T$ .

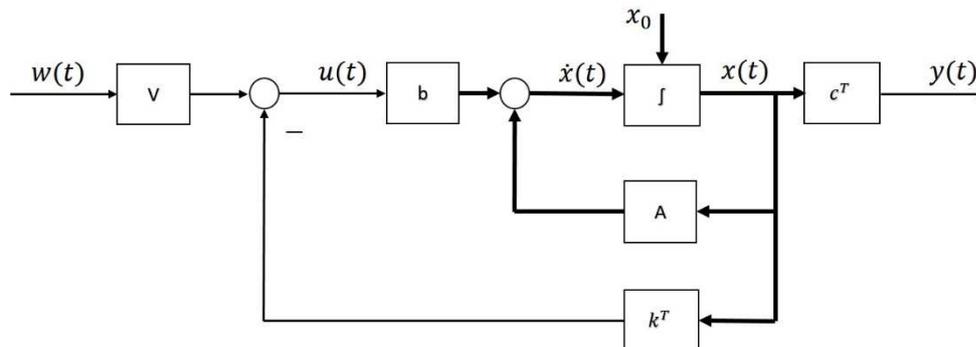


Abbildung 12: Zustandsregler in Anlehnung an [4]

Das Regelungsgesetz, die sogenannte Zustandsrückführung besagt

$$u(t) = -k^T \cdot x(t) + V \cdot w(t) \quad (4.6)$$

Die Zustandsgleichung des geschlossenen Kreises mit Zustandsregler lautet

$$\frac{d}{dt} x(t) = (A - bk^T) \cdot x(t) \quad (4.7)$$

Wenn die Strecke, wie bisher beschreiben, in Regelungsnormalform vorliegt, erfolgt die Ermittlung des Rückführvektors  $k$  über einen Koeffizientenvergleich oder mittels Achermann-Formel, auf die später eingegangen wird. Der Vergleich der Koeffizienten erfolgt zwischen dem charakteristischen Polynom des geschlossenen Kreises

$$\det(\lambda I - \bar{A}) \quad (4.8)$$

und dem gewünschten charakteristischen Polynom, siehe Gleichung 4.9.

$$\bar{p}(\lambda) = \prod_{i=1}^n (\lambda - \bar{\lambda}_i) = \lambda^n + \bar{a}_{n-1} \cdot \lambda^{n-1} + \dots + \bar{a}_1 \cdot \lambda + \bar{a}_0 \quad (4.9)$$

Die Güteforderungen an den geschlossenen Regelkreis stammen aus der Stabilitätsforderung, der Forderung nach Störkompensation und Sollwertfolge oder Dynamikanforderungen. Voraussetzung für die Polvorgabe ist eine vollständig steuerbare Regelstrecke. Die Steuerbarkeit, eine weitere Eigenschaft von dynamischen Systemen, ist Grundvoraussetzung für einige Reglerentwurfsverfahren und besagt, ob ein gegebenes System mit seiner Eingangsgröße in einer vorgegebenen Weise beeinflusst werden kann.

„Ein System  $\Sigma$  heißt vollständig steuerbar, wenn es in endlicher Zeit  $t_e$  von jedem beliebigem Anfangszustand  $x_0$  durch ein geeignet gewählte Eingangsgröße  $u_{[0,t_e]}$  in einen beliebig vorgegeben Endzustand  $x_{(t_e)}$  überführt werden kann [2].“

Die Prüfung erfolgt mit dem Kriterium von Kalman und ist erfüllt, wenn der Rang der Steuerbarkeitsmatrix  $S_s = n$ , also der Ordnung des Systems ist.

Die Steuerbarkeitsmatrix wird mit der folgenden Formel bestimmt

$$S_s = (b \quad Ab \quad A^2b \quad \dots \quad A^{n-1}b) \quad (4.10)$$

Die Regelstrecke mit der Zustandsrückführung ergibt die Zustandsgleichung des geschlossenen Kreises

$$\frac{d}{dt}x_r(t) = (A_R - b_R k_r^T) \cdot x_r(t) = \bar{A}_R \cdot x_r(t) \quad (4.11)$$

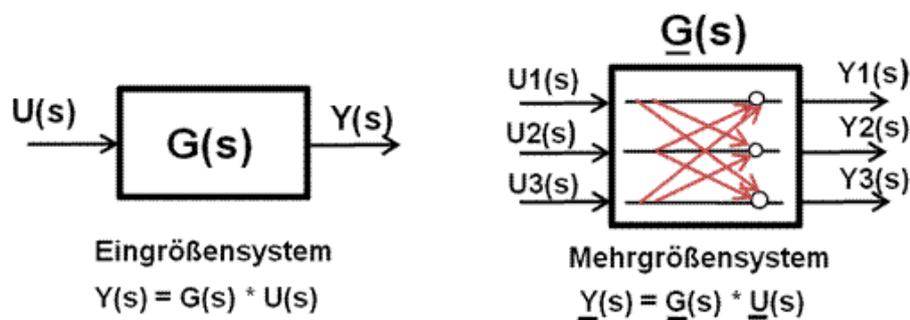
Daraus ergibt sich die Systemmatrix des geschlossenen Kreises

$$\bar{A}_R = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\frac{a_0 - k_{R1}}{a_n} & -\frac{a_1 - k_{R2}}{a_n} & -\frac{a_2 - k_{R3}}{a_n} & \dots & -\frac{a_{n-1} - k_{Rn}}{a_n} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Der Zustandsregler  $k^T$  ergibt sich durch den Koeffizientenvergleich

$$k_R^T = (\bar{a}_0 \quad \bar{a}_1 \quad \dots \quad \bar{a}_{n-1}) - (a_0 \quad a_1 \quad \dots \quad a_{n-1}) \quad (4.13)$$

Nach den allgemeinen Informationen und der Einführung in den Entwurf von Zustandsreglern erfolgt der Übergang auf Mehrgrößensysteme. Das charakteristische Merkmal von Mehrgrößensystemen ist die dynamisch starke Kopplung der Stell- und Regelgrößen (Abb. 13). Wenn die Kopplungen so stark sind, dass sie beim Reglerentwurf nicht mehr vernachlässigt werden können, kann ein dynamisches System nicht über mehrere getrennte Regelkreise gelöst werden.



### Mehrgrößensystem in Matrix / Vektor-Darstellung

Abbildung 13: Übertragungsfunktion Ein- und Mehrgrößensystem [5]

Die Übertragungsfunktionsmatrix  $G(s)$  eines Mehrgrößensystems wird mittels Laplacetransformation aus dem Zustandsraummodell für  $d(t) = 0$  bestimmt.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B + D = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \dots & G_{1m}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \dots & G_{2m}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{r1}(s) & G_{r2}(s) & \dots & G_{rm}(s) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Dabei sind  $m$  die Anzahl der Stellgrößen und  $r$  die Anzahl der Regelgrößen definiert.

Zur Verdeutlichung des Ansatzes für Mehrgrößensysteme werden zwei Beispiele aus [1] angeführt. Zum einen entstehen Mehrgrößenprobleme, wenn die Anforderungen an die Regelstrecke gleichzeitig Bedingungen an mehrere Regelgrößen stellt und dadurch einen koordinierten Eingriff an mehrere Stellglieder fordert. Ein Beispiel sind Industrieroboter, bei denen mehrere Antriebe gleichzeitig verwendet werden, um eine Position anzufahren. Ein weiteres Beispiel ist der Kurvenflug eines Flugzeuges, der nur Hilfe von gleichzeitigen Roll- und Gierbewegungen durchgeführt werden kann.

Ebenfalls erforderlich sind Mehrgrößenregelungen, wenn eine Anlage unterschiedliche physikalische Größen verwendet. Beispiel ist ein Dampferzeuger, bei denen Druck und Temperatur über die Gasgesetze zusammenhängen und aus diesem Grund nicht getrennt voneinander betrachtet werden können.

Das Zustandsraummodell für Mehrgrößensysteme (Abb. 14) ist grundsätzlich wie bei Eingrößensystemen, allerdings werden aus den skalarem Eingang  $u$  und Ausgang  $y$  des Systems Vektoren und aus dem Eingangsvektor  $b$  und dem Ausgabevektor  $c$ , die Steuermatrix  $B$  und die Beobachtungsmatrix  $C$ .

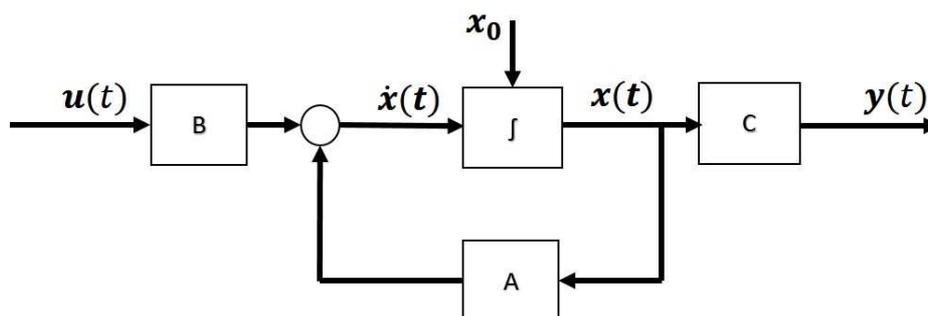


Abbildung 14: Zustandsraummodell Mehrgrößensystem in Anlehnung an [4]

Die wichtigsten regelungstechnischen Eigenschaften von Mehrgrößensystemen sind die Stabilität, Steuerbarkeit, hier können viele Ergebnisse der Stabilitätsanalyse von Eingrößensystemen übernommen werden, und die Beobachtbarkeit, auf die im Kapitel 4.1.2 genauer eingegangen wird.

Stabilität beschreibt die Eigenschaft eines Systems auf eine beschränkte Erregung mit einer beschränkten Bewegung zu reagieren. Kehrt ein System nach einer beschränkten Auslenkung, mittels Anfangswert  $x_0$ , aus einer Gleichgewichtslage  $x_g$  zurück in die Gleichgewichtslage spricht man von asymptotischer Stabilität. Die Definition dieser Zustandsstabilität lautet:

„Der Gleichgewichtszustand  $x_g=0$  ist stabil, wenn es für jede beliebige Umgebung  $\varepsilon$  eine Umgebung um den Gleichgewichtspunkt mit dem Radius  $\delta$  gibt, so dass aus  $\|x_0\| < \delta$  die Beziehung  $\|x(t)\| = \varepsilon$  gilt. Für asymptotische Stabilität wird zusätzlich gefordert, dass  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t)\| = 0$  gilt [2].“

Die regelungstechnischen Eigenschaften von Mehrgrößensystemen aus [4] verdeutlichen, dass das Kriterium für die Zustandsstabilität besagt, dass der Gleichgewichtszustand des von außen ungestörten Systems stabil ist, wenn die Matrix  $A$  diagonalähnlich ist und alle Eigenwerte von  $A$  die Bedingung aus Gleichung 4.15 erfüllen.

$$\operatorname{Re}\{\lambda_i\} \leq 0 \quad (4.15)$$

Der Zustand ist dann asymptotisch stabil, wenn die Eigenwerte die folgende Gleichung 4.16 erfüllen

$$\operatorname{Re}\{\lambda_i\} < 0 \quad (4.16)$$

Neben der Zustandsstabilität ist die Kenntnis über die Ein-/Ausgangs-Stabilität von Mehrgrößensystemen wichtig. Wird das System von außen mit einer beschränkten Eingangsgröße  $u(t)$  erregt, liegt Stabilität dann vor, wenn das System mit einer beschränkten Ausgangsgröße  $y(t)$  antwortet.

Die Definition für die E/A-Stabilität lautet folgendermaßen. „Ein lineares System (2.65) heißt eingangs-ausgangs-stabil (E/A-stabil), wenn für verschwindende Anfangsauslenkung  $x_0=0$  und für jedes beliebige beschränkte Eingangssignal

$$\|u(t)\| < u_{max} \text{ für alle } t > 0 \quad (4.17)$$

das Ausgangssignal beschränkt ist:

$$\|y(t)\| < y_{max} \text{ für alle } t > 0 \text{ [2].} \quad (4.18)$$

Das Kriterium für E/A-Stabilität aus [4] definiert, dass ein System genau dann E/A-stabil ist, wenn die Gewichtsfunktionsmatrix  $G(t)$  des Systems die folgende Bedingung erfüllt

$$\int_0^{\infty} \|G(t)\| dt < \infty \quad (4.19)$$

bzw. wenn alle Pole seiner Übertragungsfunktionsmatrix  $G(s)$

$$\operatorname{Re}\{s_i\} < 0 \quad (4.20)$$

sind.

Nach der kurzen Beschreibung der wichtigsten Eigenschaften von Mehrgrößensystemen folgt eine Erläuterung der Berechnung des Zustandsreglers für Mehrgrößensysteme.

Am Anfang dieses Kapitels wird beschrieben wie ein Zustandsregler über den Koeffizientenvergleich bestimmt wird. Liegt die Strecke allerdings nicht in Regelungsnormalform vor, kann die Formel von Ackermann verwendet werden. Die Formel berechnet aus einem beliebigen ZRM der Strecke und den gegebenen Koeffizienten des gewünschten charakteristischen Polynoms des geschlossenen Kreises den gesuchten Rückführvektor  $k^T$ .

$$k^T = (\bar{a}_0 \quad \bar{a}_1 \quad \dots \quad \bar{a}_{n-1} \quad 1) \begin{pmatrix} s_R^T \\ s_R^T A \\ s_R^T A^2 \\ \vdots \\ s_R^T A^{n-1} \\ s_R^T A^n \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Die Formel zeigt, dass neben den Koeffizienten auch die letzte Zeile der inversen Steuerbarkeitsmatrix benötigt wird.

$$s_R^T = (0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 1) \cdot S_S^{-1} \quad (4.22)$$

## 4.1.2 Beobachterentwurf eines Mehrgrößensystems

Zunächst einige Informationen zum Beobachtungsproblem anhand des Eingrößensystems, um im Laufe dieses Kapitels auf den Entwurf eines Beobachters für ein Mehrgrößensystem einzugehen. Wie bereits erwähnt ist die Voraussetzung für die Implementierung einer Zustandsregelung, dass jede Zustandsvariable kontinuierlich messbar ist. Weil das bei manchen Systemen aus technischen oder finanziellen Gründen nicht möglich ist, spielen Beobachter bei der Integration von Zustandsreglern eine wichtige Rolle. Der Beobachter ist eine Kopie des Modells der Regelstrecke mit der Stell- und Regelgröße als Eingang und der geschätzten Zustandsgröße als Ausgang. Die Abbildung 15 zeigt das Zustandsraummodell eines Eingrößensystems mit einem Beobachter.

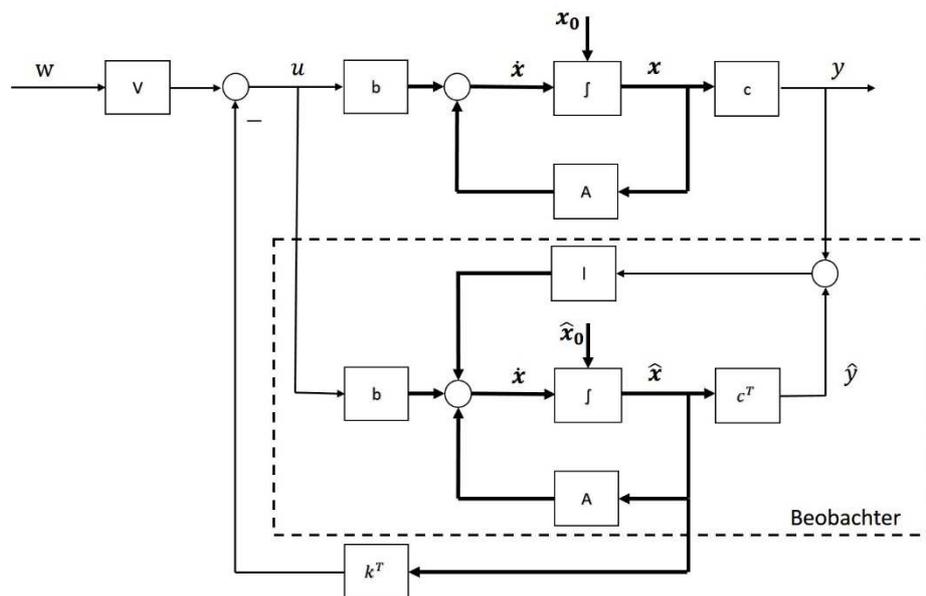


Abbildung 15: Eingrößensystem mit Beobachter in Anlehnung an [4]

Mit zwei Eingängen und einem Ausgang ist der Beobachter bereits ein Mehrgrößensystem. Ähnlich wie bei der Auslegung des Zustandsreglers mit Hilfe der Regulationsnormform existiert auch eine Beobachtungsnormalform. Die folgenden Matrizen zeigen ein System in BNF.

Systemmatrix in Beobachtungsnormalform

$$A_B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{a_0}{a_n} \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -\frac{a_1}{a_n} \\ 0 & 1 & \dots & 0 & -\frac{a_2}{a_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -\frac{a_{n-1}}{a_n} \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Ausgabevektor in Beobachtungsnormalform

$$c_B^T = (0 \quad \dots \quad 0 \quad 1) \quad (4.24)$$

Eingabevektor in Beobachtungsnormalform

$$b_B = \begin{pmatrix} b_0 - \frac{b_n a_0}{a_n} \\ b_1 - \frac{b_n a_1}{a_n} \\ \vdots \\ b_{n-1} - \frac{b_n a_{n-1}}{a_n} \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

Aufgrund der Dualität zwischen dem Entwurf eines Beobachters und eines Zustandsreglers können die gleichen Verfahren verwendet werden.

$$(A - L \cdot C)^T = A^T - (L \cdot C)^T = A^T - C^T \cdot L^T \leftrightarrow A - B \cdot K \quad (4.26)$$

$$K \leftrightarrow L^T$$

$$A \leftrightarrow A^T$$

$$B \leftrightarrow C^T$$

Voraussetzung für den Entwurf eines Beobachters ist die vollständige Beobachtbarkeit der Strecke, die mit dem Kriterium von Kalman untersucht werden kann. Die Strecke ist vollständig beobachtbar, wenn die folgende Bedingung an die Beobachtbarkeitsmatrix  $S_B$  erfüllt ist.

$$\text{Rang } S_B = n$$

$$S_B = (c^T \quad c^T A \quad c^T A^2 \quad \dots \quad c^T A^{n-1})^T \quad (4.27)$$

## 4.2 Experimenteller PI-Mehrgrößenregler

Das in dem Abschnitt 6.1.1 beschriebene Verfahren zur Auslegung von Zustandsreglern von Ein- und Mehrgrößensystemen setzt ein Modell des Systems voraus. Wie bei einschleifigen Regelkreisen, wird auch bei Mehrgrößensystemen das Ziel verfolgt ohne vorherige Modellbildung zweckmäßige Reglerparameter, mit Hilfe von Experimenten an der Regelstrecke, zu ermitteln. Eine Lösungsmöglichkeit, auf die in diesem Kapitel eingegangen wird, ist der experimentelle Entwurf eines PI-Mehrgrößenreglers. Die Herleitung des Ansatzes wird in [2] und [4] näher erläutert. In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Umsetzung des Konzeptes beschrieben.

### 4.2.1 Bestimmung der Verstärkungsmatrix

Die experimentelle Bestimmung der notwendigen Verstärkungsmatrix  $K_s$  erfolgt über die sprungförmige Änderung der einzelnen Stellgrößen und die Messung der statischen Endwerte der Ausgangsgrößen. Bei Änderung der  $i$ -ten Stellgröße wird die  $i$ -te Spalte der Verstärkungsmatrix bestimmt.

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{s11} & k_{s12} \\ k_{s21} & k_{s22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

### 4.2.2 Bedingungen für die Umsetzung

Zur Umsetzung dieses Ansatzes müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Strecke muss stabil sein
- Die Güteforderungen müssen sich auf Stabilität und der Sollwertfolge auf sprungförmige Führungs- und Störsignale beschränken
- Das Experimentieren mit der Regelstrecke und dem geregelten System muss möglich sein, d.h. die Regelstrecke muss bereits vorhanden sein und muss mit unterschiedlichen Stellgrößen beaufschlagt werden können

Das Verfahren sieht vor, dass der Proportionanteil des PI-Reglers zunächst sehr klein gehalten wird, also näherungsweise ein I-Regler zur Lösung der Güteforderung integriert wird. Dazu muss geklärt werden, ob überhaupt eine Reglermatrix  $K_I$  existiert, die diese Forderungen erfüllt. Im Folgenden werden zwei Bedingungen aufgeführt, die die Existenz von I-Mehrgrößenreglern betreffen, mit denen ein Regelkreis stabil ist. In der ersten Bedingung werden die Verstärkungsmatrix und die Reglermatrix verwendet.

1. Wenn ein Regelkreis bestehend aus einer asymptotisch stabilen Regelstrecke und einem I-Regler asymptotisch stabil ist, so gilt die Bedingung aus Gleichung 4.29

$$\det(K_S \cdot K_I) > 0 \quad (4.29)$$

Diese Bedingung schreibt vor, dass der aus dem I-Regler und der Regelstrecke bestehende Regelkreis gegengekoppelt sein muss.

2. Die Folgerung daraus ist, dass die Verstärkungsmatrix  $K_S$  vollen Zeilenrang haben muss

$$\text{Rang}(K_S) = r$$

diese Bedingung gilt bei

$$m \geq r$$

Die Strecke muss also mindestens so viele Stellgrößen wie Regelgrößen haben.

Gilt

$$m = r$$

kann die Bedingung folgendermaßen vereinfacht werden

$$\det(K_S) \neq 0 \quad (4.30)$$

#### 4.2.3 Einstellung der Reglermatrizen

Wie bereits erwähnt ist die Idee des Konzeptes zunächst eine geeignete Einstellung der Reglermatrix  $K_I$  zu bekommen. Das Ziel dabei ist die Eigenwerte des geschlossenen Kreises in die linke komplexe Halbebene zu verlagern. Weil vorausgesetzt wird, dass die Regelstrecke stabil ist, liegen die Eigenwerte der Strecke bereits dort. Allerdings liegen die Eigenwerte der Integratoren der Reglermatrix  $K_I$  im Koordinatenursprung bevor der Regelkreis geschlossen wird. Mit Hilfe der geeigneten Reglerparameter werden diese Eigenwerte ebenfalls in die linke Halbebene verschoben, allerdings besteht die Gefahr, dass die Eigenwerte der Strecke die linke Halbebene verlassen. Zur Veranschaulichung der Problematik dient die Abbildung 16.

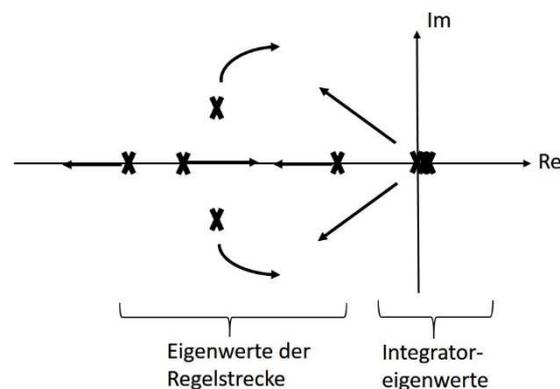


Abbildung 16: Eigenwerte der offenen Kette in Anlehnung an [2]

Durch Zerlegung der Reglermatrix

$$K_I = \alpha \cdot \tilde{K}_I \quad (4.31)$$

in eine Matrix und einen Tuningfaktor  $\alpha$ , lässt sich festlegen, dass die Eigenwerte der Strecke die linke Halbebene bei kleinen  $\alpha$  noch nicht verlassen haben.

In [4] wird hergeleitet, dass ein I-geregeltes System genau dann in einem Intervall  $0 < \alpha < \bar{\alpha}$  asymptotisch stabil ist, wenn die Reglermatrix die folgende Gleichung 4.32 erfüllt.

$$\operatorname{Re}\{\lambda_i\{K_S \tilde{K}_I\}\} > 0, \forall i = 1, 2, \dots, r \quad (4.32)$$

Mit den folgenden Gleichungen lässt sich die Matrix  $\tilde{K}_I$  bestimmen. Sind die Anzahl der Stell- und Regelgrößen einer Regelstrecke gleich groß ( $m=r$ ) ist zweckmäßige Wahl der Reglermatrix die Gleichung 4.33.

$$\tilde{K}_I = K_S^{-1} \quad (4.33)$$

Ansonsten ist die Pseudoinverse der Verstärkungsmatrix zu verwenden.

$$\tilde{K}_I = K_S^T \cdot (K_S \cdot K_S^T)^{-1} \quad (4.34)$$

Die Erweiterung um den P-Anteil dient zur Verbesserung des dynamischen Übergangverhaltens des geschlossenen Kreises. Wie der I-Anteil wird die Reglermatrix  $K_P$  wieder zerlegt.

$$K_P = \beta \cdot \tilde{K}_P \quad (4.35)$$

Wobei  $\beta$  der Tuningfaktor des P-Anteils ist. Wenn das I-geregelte System stabil ist, kann versucht werden durch den Tuningfaktor des P-Anteils die Dynamik des Kreises zu verbessern. Wie bei dem I-Anteil bestehen zwei Möglichkeiten die Matrix zu bestimmen.

$$\tilde{K}_P = K_S^{-1} \quad (4.36)$$

$$\tilde{K}_P = K_S^T \cdot (K_S \cdot K_S^T)^{-1} \quad (4.37)$$

### 4.3 Dezentrale Regelung

Das Hauptmerkmal eines Mehrgrößensystems ist, dass sich eine Stellgröße nicht explizit auf eine Regelgröße auswirkt, sondern auf mehrere Regelgrößen. Charakteristisch für eine Mehrgrößenregelstrecke ist die folgende Übertragungsfunktionsmatrix  $G(s)$ .

$$G(s) = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \dots & G_{1m}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \dots & G_{2m}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{r1}(s) & G_{r2}(s) & \dots & G_{rm}(s) \end{pmatrix} \quad (4.38)$$

$G_{ii}(s)$  bilden dabei die Hauptstrecken und  $G_{ij}(s)$  die sogenannten Koppelstrecken. Die gepunkteten Pfeile in Abbildung 6 zeigen beispielhaft die Kopplungen zwischen zwei Stell- und Regelgrößen. Bei manchen Systemen ist es nicht möglich oder nicht erwünscht, dass der Regler sämtliche Ausgangsgrößen zurückführt, stattdessen wird eine dezentrale Regelung verwendet. Hier wird nur die Regelgröße zu der zugehörigen Stellgröße betrachtet. Die Koppelstrecken, z.B. die Auswirkung von Stellgröße  $u_1$  auf Regelgröße  $y_2$  werden ignoriert. Durch Zusammenfassung aller dezentralen Regler ergibt sich, unter der Bedingung, dass die Sollwerte  $w = 0$  sind, die folgende Beziehung.

$$U(s) = - \begin{pmatrix} K_1(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_2(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & K_n(s) \end{pmatrix} \cdot Y(s) \quad (4.39)$$

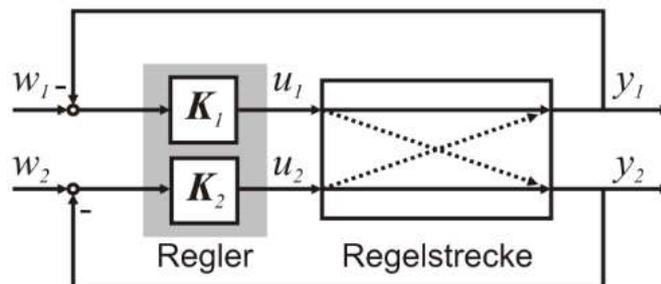


Abbildung 17: Dezentrale Regelung [6]

#### 4.3.4 Entwurfsmöglichkeiten und Analyse

In der Literatur sind verschiedene Ansätze für den Entwurf von dezentralen Reglern zu finden. Das Ignorieren der Koppelstrecken ist einer dieser Möglichkeiten. Zur Verdeutlichung wird in diesem Kapitel der Ansatz näher erläutert. Damit dieses Verfahren angewendet werden kann, müssen die Kopplungen hinreichend schwach sein. Die Analyse erfolgt mit dem direkten Nyquistverfahren.

$$F(s) = I + G_0(s) \quad (4.40)$$

Für die Rückführdifferenzmatrix muss die sogenannte Zeilendominanz gelten. Dies ist der Fall, wenn alle Hauptdiagonalelemente betragsmäßig größer sind als die Summe der Beträge der anderen Elemente der jeweiligen Zeile.

$$|F_{ii}(s)| \geq \sum_{j=1, j \neq i}^m |F_{ij}(s)|, \quad (i = 1, \dots, m) \quad (4.41)$$

Eine offene Kette  $G_0(s)$  führt auf einen geschlossenen Kreis, wenn die Rückführdifferenzmatrix diagonaldominant ist und die Hauptdiagonalelemente von  $F(s)$  die Bedingung

$$\sum_{i=1}^m \Delta \arg F_{ii}(s) = -2 \cdot n^+ \cdot \pi \quad (4.42)$$

erfüllen. Das bedeutet, wenn die Hauptdiagonalelemente  $F_{ii}(s)$  von  $F(s)$  den Ursprung der komplexen Ebene  $-n^+$  mal im Uhrzeigersinn umschließen, mit  $n^+$  als Anzahl der Pole von  $G_0(s)$  mit positiven Realteil.

Bei einer dezentralen Regelung hat die Reglermatrix  $K(s)$  Diagonalform, daher ergibt sich die Rückführdifferenzmatrix.

$$F(s) = \begin{pmatrix} 1 + K_1(s) \cdot G_{11}(s) & F_{12}(s) & \dots & F_{1m}(s) \\ F_{21}(s) & 1 + K_2(s) \cdot G_{22}(s) & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & F_{(m-1)m}(s) \\ F_{m1}(s) & \dots & F_{m(m-1)}(s) & 1 + K_m(s) \cdot G_{mm}(s) \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

Und für jedes Hauptdiagonalelement gilt:

$$F_{ii}(s) = 1 + K_i(s) \cdot G_{ii}(s) = 1 + G_{0i}(s) \quad (i = 1, \dots, m) \quad (4.44)$$

#### 4.3.5 Experimentelle Auslegung der dezentralen Reglerparameter

Zur Lösung von Temperaturregelstrecken werden in der Praxis häufig PI-Regler eingesetzt. Die folgende Gleichung zeigt die Übertragungsfunktion eines PI-Reglers.

$$G_R(s) = K_R \cdot \frac{T_N \cdot s + 1}{T_N \cdot s} \quad (4.45)$$

Bei der Auslegung der Reglerparameter kann auf die klassischen Methoden der Regelungstechnik zurückgegriffen werden. Die Ermittlung der Streckenparameter erfolgt beispielsweise über die Sprungantwort. In den meisten Fällen besteht die Strecke aus einem Totzeitelement und einem Verzögerungselement I. Ordnung, mit der Streckenverstärkung  $K_S$  und der Verzögerungszeit  $T_n$ . Die Ermittlung und Optimierung der Reglerparameter erfolgt in diesem Fall über Ziegler und Nichols.

$$K_P = 0,9 \cdot \frac{K_S}{K_S \cdot T_t} \quad T_N = 3,33 \cdot T_t \quad (4.46)$$

Liegen die Streckenparameter nicht vor, kann über den Proportional-Regler die kritische Verstärkung  $K_{RKrit}$  bestimmt werden, indem der Anteil so lange erhöht wird bis die Stabilitätsgrenze erreicht wird. Dabei wird die Periodendauer  $T_{RKrit}$  der entstehenden Schwingungen gemessen.

$$K_P = 0,45 \cdot K_{RKrit} \quad T_N = 0,83 \cdot T_{RKrit} \quad (4.47)$$

Eine weitere Möglichkeit ist die Bestimmung der Übertragungsfunktion des Systems und die Bestimmung der Reglerparameter über den Koeffizientenvergleich. Die Koeffizienten werden aus den technischen Vorgaben an die Strecke berechnet.

Zusammenhänge zwischen Funktionen des geschlossenen Kreises und den dynamischen Güteforderungen

Dämpfung	$d = \cos\phi_d$	(4.48)
----------	------------------	--------

Überschwingzeit	$T_m = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1-d^2}} = \frac{\pi}{\omega_e}$	(4.49)
-----------------	--	--------

Überschwingweite	$\Delta h = e^{-\frac{\pi d}{\sqrt{1-d^2}}} = e^{-\frac{\delta_e}{\omega_e} \pi} = e^{-\pi \cot\phi_d}$	(4.50)
------------------	---	--------

Beruhigungszeit	$T_{5\%} \approx \frac{3}{\delta_e} = \frac{3}{d\omega_0}, T_{2\%} \approx \frac{4,5}{\delta_e}$	(4.51)
-----------------	--	--------

Mit Hilfe der Übertragungsfunktionen des Reglers und der Strecke, Temperaturregelstrecke häufig mit PT<sub>1</sub>-Verhalten, kann die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises bestimmt werden, siehe Gleichung 4.52. Die bestimmte Übertragungsfunktion G<sub>W</sub>(s) aus PI-Regler und Strecke mit PT<sub>1</sub>-Verhalten ergibt eine Übertragungsfunktion mit PT<sub>2</sub>-Verhalten.

$$G_W(s) = \frac{G_S(s) \cdot G_R(s)}{1 + G_S(s) \cdot G_R(s)} \quad (4.52)$$

Nach der Lösung der Differentialgleichung, Herleitung in [1], kann das PT<sub>2</sub>-Element mit der Gleichung 4.53 angegeben werden.

$$s^2 + 2d\omega_0 s + \omega_0^2 = 0 \quad (4.53)$$

Mit den Vorgaben an die Strecke und dem Gleichsetzen der Gleichungen 4.52 und 4.53 können die Reglerparameter K<sub>P</sub> und T<sub>N</sub> berechnet werden.

## 4.4 Wärmeübertragung

### 4.4.1 Einleitung und Definitionen

Die Wärmeübertragung kann durch zwei Arten geschehen, nämlich durch Wärmeleitung und durch Strahlung. Detaillierter beschrieben erfolgt die Wärmeleitung in einem Festkörper oder ruhenden Fluid oder von einer Oberfläche zu einem bewegten Fluid. Der Wärmeaustausch durch Strahlung erfolgt dagegen zwischen nicht kontaktierten Oberflächen.

Bei der Wärmeleitung in ruhenden Stoffen ist die Wärmeübertragung nur vom Temperaturgradienten und den Stoffeigenschaften abhängig. Zwischen einer Wand und einem Fluid erfolgt ebenfalls ein Wärmeaustausch durch Wärmeleitung. Dabei sind die Wärmeleitung und Temperaturgrenzschicht des Fluids bestimmend.

Die Temperaturgrenzschicht wird von der Strömung beeinflusst. Die Wärmeübertragung zwischen einer Wand und einem strömenden Fluid wird Konvektion genannt. Hier wird zwischen freier Konvektion und erzwungener Konvektion unterschieden. Bei freier Konvektion entsteht die Strömung durch Temperatur- und damit verbundener Dichteunterschiede im Fluid, bei erzwungener Konvektion durch einen äußeren Druckunterschied. Die Unterschiede der Wärmeübertragungsarten werden schematisch auf der Abbildung 18 gezeigt.

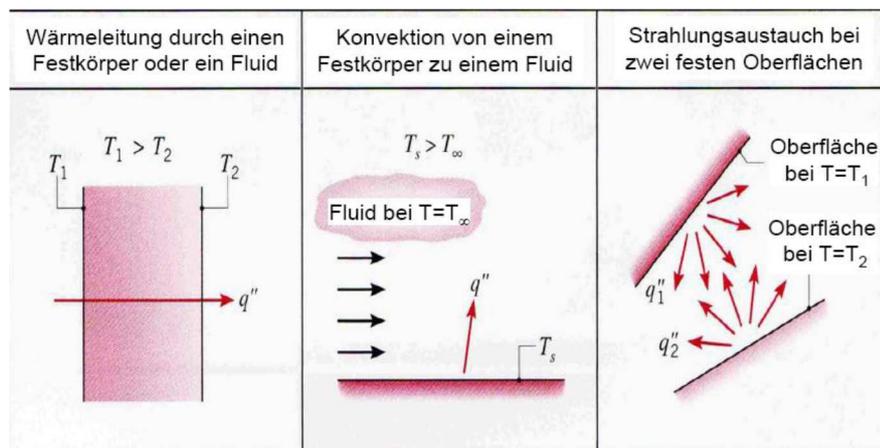


Abbildung 18: Arten der Wärmeübertragung

Die folgenden Definitionen und Festlegungen beschreiben die notwendigen Größen der Wärmeübertragung. Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  gibt an, wie viel Wärme pro Zeiteinheit übertragen wird, mit der Einheit W.

Die Wärmestromdichte  $\dot{q}$  beinhaltet, welcher Wärmestrom pro Flächeneinheit übertragen wird, mit der Einheit  $\text{W}/\text{m}^2$ .

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (4.54)$$

Die Wärmeübergangszahl  $\alpha_w$  gibt an, welcher Wärmestrom pro Flächeninhalt und pro Grad Temperaturdifferenz übertragen wird. Die Einheit ist  $W/(m^2 \cdot K)$ . Um den Wärmestrom von einem Fluid auf das andere zu bestimmen kann auch die Wärmedurchgangszahl  $k$  verwendet werden. Sie hat die gleiche Einheit wie die Wärmeübergangszahl.

Neben den physikalischen Größen spielen die kinetischen Kopplungsgleichungen eine wichtige Rolle in der Wärmeübertragung. Die Gleichungen definieren den Wärmestrom, der bei einer Wärmeübergangs- bzw. Wärmedurchgangszahl  $k_w$  über die Austauschfläche pro Kelvin Temperaturdifferenz transferiert werden kann.

$$\delta \dot{Q} = k_w \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot dA \quad (4.55)$$

Mit Hilfe der Wärmeübergangszahlen kann an jeder Stelle eines Wärmeüberträgers der transferierte Wärmestrom bestimmt werden. Weil in den meisten Anwendungen nicht der lokale Wärmestrom interessant ist, sondern eher der insgesamt ausgetauschte Wärmestrom eines Wärmeüberträgers muss über die Fläche integriert werden.

$$\dot{Q} = \int_0^A k_w \cdot (\Delta\vartheta) \cdot dA \quad (4.56)$$

Nach der Herleitung aus [3] ergibt sich für den gesamten Wärmestrom

$$\dot{Q} = k_w \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m \quad (4.56)$$

Für die Bestimmung des Wärmestromes in einem Wärmeüberträger ist die Temperaturdifferenz maßgebend. Sie heißt mittlere Temperaturdifferenz und ist die integrierte mittlere Temperaturdifferenz des Wärmeüberträgers. Zur Bestimmung der mittleren Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_m$  werden die Temperaturdifferenzen am Ein- und Austritt des Wärmeüberträgers benötigt. Die Beschreibung und Gleichung 4.55 wird in [3] ausführlich erläutert. Die größere Temperaturdifferenz wird mit  $\Delta\vartheta_{gr}$  und die kleine mit  $\Delta\vartheta_{kl}$  bezeichnet.

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl}}{\ln(\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl})} \quad \text{für } \Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl} \neq 0 \quad (4.57)$$

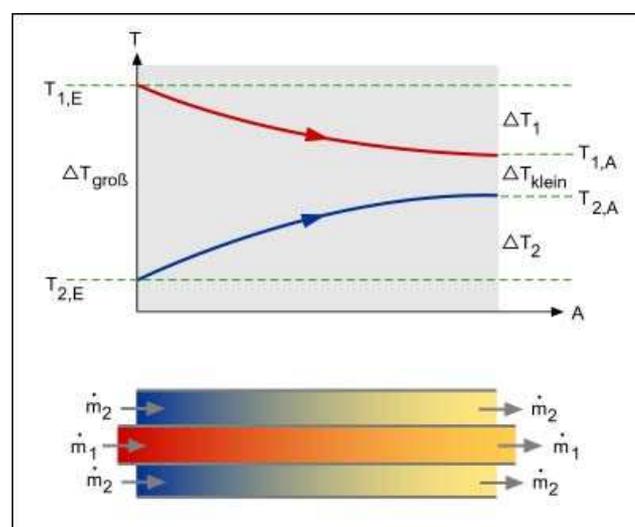


Abbildung 19: Temperaturverlauf in einem Wärmeüberträger [7]

Bei der Wärmeübertragung gilt der erste Hauptsatz der Thermodynamik uneingeschränkt. Weil in den meisten praktischen Fällen der Wärmeübertragung die mechanische Arbeit und die Änderung der kinetischen und potentiellen Energie vernachlässigbar sind, vereinfacht sich die Energiebilanzgleichung laut [3] zu

$$\frac{dE_{KV}}{dt} = \dot{Q}_{KV} + \sum_e \dot{m}_e \cdot \dot{h}_e - \sum_a \dot{m}_a \cdot h_a \quad (4.58)$$

Durch die speziellen Anforderungen die bei Wärmeübertragungsproblemen auftreten, kann die Gleichung in einer für die Wärmeübertragung gebräuchlichen Form angegeben werden

$$V_{KV} \cdot \rho \cdot c_p \frac{d\vartheta}{dt} = \dot{Q}_{12} + \dot{Q}_{Quelle} + \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (4.59)$$

Beschreibung der Zusammenhänge der Energiebilanzgleichung aus [3]:

Speziell ist, dass meistens nur ein Massenstrom in den sogenannten Kontrollraum hinein- und herausströmt. Die Änderung der Enthalpie und der Energie des Kontrollraumes kann als eine Funktion der Temperatur angegeben werden. Der Wärmestrom wird über die Systemgrenze dem Kontrollraum zu- oder abgeführt oder er stammt aus einer Wärmequelle innerhalb des Kontrollraumes. Dabei ist  $\dot{Q}_{12}$  der Wärmestrom, der bei der Zustandsänderung über die Systemgrenzen dem System zu- oder abgeführt wird und  $\dot{Q}_{Quelle}$  der Wärmestrom aus einer Quelle. Für stationäre Vorgänge wird die linke Seite der Gleichung zu null und es gilt die folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_{12} + \dot{Q}_{Quelle} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (4.60)$$

Als letzte Definition sei die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  aufgeführt. Sie ist eine Stoffeigenschaft, die angibt, welcher Wärmestrom pro Längeneinheit des Materials in Richtung des Wärmestromes und pro Grad Temperaturdifferenz übertragen werden kann. Sie hat die also die Dimension  $W/(m \cdot K)$ .

Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes hängt von der Temperatur und dem Druck ab. Auf einer Skala betrachtet haben Metalle eine sehr hohe, Flüssigkeiten eher eine mittel große und Gase eine kleine Wärmeleitfähigkeit.

Weil die Wärmeleitfähigkeit nur eine relativ schwache Temperaturabhängigkeit besitzt, darf bei nicht zu großen Temperaturänderungen mit einer konstanten mittleren Wärmeleitfähigkeit gerechnet werden.

Die beiden folgenden Kapitel sollen die Wärmeübertragung durch Strahlung und erzwungene Konvektion näher erläutern. Die anderen Möglichkeiten zum Transport von Wärme werden nicht weiter erläutert.

#### 4.4.2 Strahlung

Die Wärmeübertragung durch Strahlung benötigt keine Materie, die Wärme wird über elektromagnetische Wellen transferiert.

„Die Länge der elektromagnetischen Wellen, durch die die Wärme übertragen wird, liegt zwischen 0,8 und 400  $\mu\text{m}$ . Dieser Wellenbereich wird auch als ultraroter Wellenbereich bezeichnet. Zum Vergleich: Licht liegt im sichtbaren Wellenbereich zwischen 0,35 und 0,7  $\mu\text{m}$  [3].“

Das bedeutet, dass bei tiefen Temperaturen der sichtbare Anteil der Strahlung so gering ist, dass dieser nicht wahrgenommen wird. Bei hohen Temperaturen dagegen steigt der Anteil der sichtbaren Strahlen und kann vom Auge registriert werden, z.B. bei einem Glühfaden.

Je nach Eigenschaften eines Körpers werden die elektromagnetischen Wellen teilweise reflektiert, absorbiert oder durchgelassen. Das Kirchhoff'sche Gesetz besagt, dass das Emissionsverhältnis  $\epsilon$  eines Körpers gleich seines Absorptionsverhältnisses  $\alpha$  ist.

Die spektralspezifische Intensität der schwarzen Strahlung  $i_{\lambda,s}$  wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben.

$$i_{\lambda,s} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/(\lambda \cdot T)} - 1)} \quad (4.61)$$

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h = 3,7418 \cdot 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2 \quad (4.62)$$

$$C_2 = \frac{c \cdot h}{k} = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{K} \cdot \text{m} \quad (4.63)$$

$$c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}, h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}, k = 1,380641 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Von schwarzer Strahlung wird gesprochen, wenn Wärme ausschließlich per Strahlung durch eine Öffnung eines Hohlraumes abgegeben wird. Dabei wird angenommen, dass die Wände des Hohlraumes innen überall die gleiche Temperatur haben.

Die Wärmestromdichte eines schwarzen Körpers wird durch Integration der Intensität der schwarzen Strahlung über den gesamten Wellbereich bestimmt.

$$\dot{q}_s = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} i_{\lambda,s} \cdot d\lambda = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot h^4 \cdot c^2} = \sigma \cdot T^4 \quad (4.64)$$

$$\sigma = (5,6696 + 0,0075) \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-4} \quad (4.65)$$

Durch Vereinfachung lassen sich die folgenden Formeln für schwarze und nicht schwarze Körper verwenden

$$\dot{q}_s = C_s = \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (4.66)$$

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot C_s = \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (4.67)$$

$$C_s = 10^8 \cdot \sigma = 5,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Die Strahlung zwischen zwei umschlossenen Körpern, z.B. eine Kugel in einer Hohlkugel oder ein Zylinder in einem Hohlzylinder, lässt sich mit der folgenden Formel bestimmen

$$C_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (4.68)$$

Dabei sind  $A_1$  und  $A_2$  die Flächen und  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  die Emissionsgrade der Körper.

#### 4.4.3 Erzwungene Konvektion

Bei dieser Art der Wärmeübertragung bestimmen die Temperaturunterschiede und die Strömung den Wärmeübergang. Die Strömung wird durch eine äußere Druckdifferenz aufrechterhalten, die durch eine Pumpe oder einen Höhenunterschied erzwungen wird.

Die Wärmestromdichte eines Fluids mit der Temperatur  $\vartheta_F$ , das in einem Rohr, dessen Wandtemperatur  $\vartheta_W$  ist, entlangströmt, ist an jeder Stelle:

$$\dot{q} = \alpha_W \cdot (\vartheta_F - \vartheta_W) \quad (4.69)$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass die Temperatur im gesamten Raum konstant ist. Erfahrungen aus der Praxis zeigen allerdings, dass im Fluid in Wandnähe ein Verlauf der Temperatur entsteht. Bei turbulenter Strömung ist in der Nähe der Wand eine Temperaturgrenzschicht, vorhanden, in der sich die Temperatur von der Wandtemperatur zur Fluidtemperatur ändert. Weil die Grenzschicht im Vergleich zum Rohrdurchmesser sehr klein ist, kann angenommen werden, dass die Fluidtemperatur der Temperatur in der Mitte des Fluids entspricht.

Weil die Messung der Temperaturgrenzschicht in den meisten Fällen nicht möglich ist und eine experimentelle Bestimmung aus technischen Gründen nicht realisierbar ist, bleibt nur die empirische Ermittlung. Diese ist nur durch eine Vielzahl an Messungen möglich, deshalb wird auf Modellvorstellungen und Kennzahlen zurückgegriffen.

Die Nußeltzahl ist das Verhältnis der für die Strömung charakteristischen Länge  $d$  und der Dicke der Temperaturgrenzschicht  $\delta_\vartheta$ .

$$Nu = \frac{d}{\delta_\vartheta} \quad (4.70)$$

Mit der Gleichung für die Wärmeübergangszahl

$$\alpha_W = \frac{\lambda}{\delta_\vartheta} \quad (4.71)$$

ergibt sich die Nußeltzahl zu

$$Nu_l = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (4.72)$$

Die Nußeltzahl wird als eine Funktion der Strömungsparameter, Stoffwerte und Geometrie angegeben. Aus ihr kann die Wärmeübergangszahl bestimmt werden.

Die Reynoldszahl bildet das Verhältnis der Trägheits- zu den Reibungskräften.

$$Re_d = \frac{c \cdot d}{\nu} = \frac{c \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{\dot{m} \cdot d}{A \cdot \eta} \quad (4.73)$$

*c: Geschwindigkeit der Strömung, d: Charakteristische Länge,  $\nu$ : Viskosität des Fluids*

Die Prandtlzahl ist das Verhältnis der kinematischen Viskosität zur Temperaturleitfähigkeit oder auch das Verhältnis der Dicke der laminaren Strömungsgrenzschicht zur Temperaturgrenzschicht. Gase haben eine Prandtlzahl von ungefähr 0,7. Die Prandtlzahl bestimmt die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl von den Stoffwerten und ist temperaturabhängig.

Die Wärmeübergangszahl hängt von der Reynoldszahl, den Stoffeigenschaften, der Geometrie und Richtung des Wärmestromes ab. Wie bereits erwähnt wird die Wärmeübergangszahl aus der Nußeltzahl bestimmt.

$$Nu_d = f(Re_d, Pr, \text{Geometrie}, \vartheta/\vartheta_W)$$

Im Folgenden wird die Nußeltzahl für laminare Rohrströmung bei konstanter Wandtemperatur bestimmt. Die charakteristische Länge ist in dem Fall der Innendurchmesser  $d_i$  des Rohres.

In sehr langen Rohren ist bei laminarer Strömung die Wärmeübergangszahl von der Reynolds- und Prandtlzahl unabhängig.

$$Nu_{d_i, lam} = 3,66$$

Bei kürzeren Rohren ergibt sich die Nußeltzahl zu

$$Nu_{d_i, lam} = 0,644 \cdot \sqrt[3]{Pr} \cdot \sqrt{Re_{d_i} \cdot \frac{d_i}{l}} \quad (4.74)$$

Aufgrund des asymptotischen Überganges gilt folgende Ausgleichgerade

$$Nu_{d_i, lam} = \sqrt[3]{3,66^3 + 0,644^3 \cdot Pr \cdot \left(Re_{d_i} \cdot \frac{d_i}{l}\right)^2} \quad (4.75)$$

Die Wärmedurchgangszahl bezogen auf die Außenfläche des Rohres wird mit folgender Formel bestimmt

$$k_W = \left( \frac{1}{\alpha_a} + \frac{d_a}{2 \cdot \lambda_R} \cdot \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{d_a}{d_i \cdot \alpha_i} \right)^{-1} \quad (4.76)$$

## 5 Entwicklung der Hardware und Analyse

Die Schwerpunkte im Kapitel 5 liegen in der Entwicklung und Analyse der Probenumgebung. Nach der Umsetzung der komplexen Schalen als 3D Modell wird kurz auf die Fertigung eingegangen, um danach die Eindrücke der Machbarkeitsanalyse zu beschreiben.

### 5.1 Konstruktion und Fertigung neuartiger Heizschalen

Die bisherige Umsetzung des Heizsystems V1 und V1.1 mit zwei aufklappbaren Halbschalen bietet Vorteile hinsichtlich der Baugröße und der Integration in das Rheometer in Verbindung mit dem vorgegeben Strahlengang des Röntgenstrahls. Außerdem ermöglicht der Klappmechanismus einen schnellen Probenwechsel und die Kontrolle der Probe zwischen den Experimenten. Allerdings steigt der Temperaturgradient des Systems mit der externen Wärmequelle und der Rohrverbindung einen Wirkungsgrad bis auf 180 K. D.h. bei einer Leistung von 600 W erreicht die Temperatur an der Heizspindel 400 °C und im Probenraum 220 °C. Neben dem Wärmeverlust führt die lange Zuleitung zu einer großen Totzeit im System, wodurch das System beim Ausregeln von Sollwertsprüngen zum Schwingen neigt. Das Hauptproblem der bisherigen Konstruktion ist die ungleichmäßige Wärmeverteilung über den Probenträger von maximal 4,5 K bei 220 °C. Aus diesen Gründen bleibt das Konzept mit den Halbschalen erhalten, jedoch muss die Geometrie und die Einbindung der Heizquelle komplett überarbeitet werden, um die vorgegeben Ziele zu erreichen. Eine direkte Erwärmung der Probenträger ist aufgrund der freidrehenden luftgelagerten Achse des Rheometers nicht möglich.

Der neue Lösungsansatz besteht aus zwei ausgehöhlten Halbschalen mit jeweils drei symmetrisch verteilten Passbohrungen. Die Bohrungen dienen als Einsätze für die Heizpatronen. Das entwickelte Heizsystem wird in dieser Ausarbeitung mit V2 bezeichnet. Die Innenwände der Schalen sind rippenförmig, um die Oberfläche für den Wärmetransport zu erhöhen und bei Abkühlung die Wärme schneller abzutragen. Die innere Struktur der Schalen ist auf der Abbildung 20 dargestellt. Über Druckluftanschlüsse wird das Gas durch die hohlen Schalen geblasen, an den inneren Oberflächen temperiert und über symmetrisch verteilte Bohrungen mit einem Durchmesser von  $D = 1$  mm in den Probenraum geleitet.

Die Ziele der Neuentwicklung sind, die Verbesserung des Wirkungsgrades durch die Verringerung der Wärmeverluste in der Zuleitung und eine homogenere Aufheizung des Probenraumes mittels symmetrisch angeordneten Heizpatronen in den Schalen.

Die Integration der Heizpatronen in die Schalen soll außerdem die Totzeit der Regelstrecke minimieren. Die Entwicklung und Konstruktion der Schalen erfolgt mit Hilfe des am DESY eingesetzten CAD Programms Solid Edge. Ein großer Vorteil dieser Programme ist, dass bereits in der Entwicklungsphase Analysen hinsichtlich der Kollision, dem Strahlengang und des thermodynamischen Verhaltens durchgeführt werden können. Das Abmaß einer Schale ist ungefähr 120 mm x 50 mm x 70 mm. Der Probenraum hat einen Durchmesser von 50 mm und eine Höhe von 30 mm. Das Gas strömt mit einem konstanten Volumenstrom von 13 l/min in die Schalen. Die Abbildung 20 zeigt schematisch die Funktionsweise des entwickelten Mehrgrößenheizsystems mit zwei von insgesamt sechs Heizpatronen.

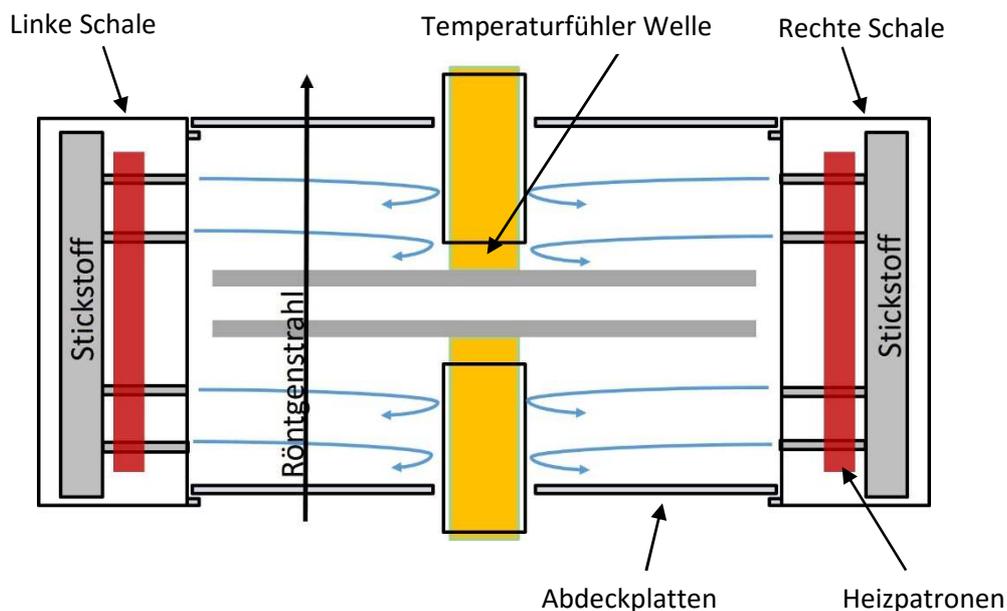


Abbildung 20: Funktionsprinzip des Mehrgrößenheizsystems im Querschnitt

Aufgrund der komplexen Struktur und den hohen Anforderungen an das Material wurde parallel die Machbarkeit der Fertigung analysiert. Recherchen über die Fertigung von Bauteilen mit 3D-Druck versprachen zwar Gutes, jedoch sind die Einschränkungen des Fertigungsprozesses nach der Fertigstellung des Modells gestiegen. Deshalb mussten Wandstärken und Bohrungen im Laufe des Projektes immer wieder angepasst werden und auch die Materialauswahl war nicht frei.

Aufgrund der Materialeigenschaften, geringe Dichte und hohe Wärmeleitfähigkeit, wäre Aluminium das ideale Material für die Fertigung der Schalen gewesen. Allerdings waren die Angebote mehrerer Anbieter für die Fertigung eines entsprechenden Prototypens im Vergleich zu einem Online Versand sehr hoch und die Machbarkeit der Fertigung nur bedingt garantiert. Der Online Versand, der auf automatisierte Bestellung und Lieferung verschiedener Materialien im Bereich 3D-Druck spezialisiert ist, bot die günstigste und schnellste Variante für die Fertigung des Prototypens. Allerdings mit Abstrichen bei der Auswahl des Materials, weil weder Aluminium noch Titan als mögliche Alternative ausgewählt werden können. Das verfügbare Material stellt eine nicht weiter definierte Legierung aus 40 % Edelstahl und 60 % Bronze dar. Wegen des sehr geringen Preises und der schnellen Lieferung von zwei Wochen ist die Wahl des Lieferanten auf den Online Versand gefallen.

Die Fertigung der Schalen erfolgt in diesem Fall nicht über selektives Lasersinter 3D-Druck in Metall (SLS), sondern über ein lasergesinteres Wachsmodell (positives Modell). Das gedruckte Wachsmodell wird mit einer temperaturfesten Keramiksicht überzogen und in Sand gestützt. Anschließend wird das sehr warme Legierungslot eingelassen, wobei das Wachs verdampft und sukzessive durch das flüssige Metall ersetzt wird. Die Fertigung der Heizschalen ist also eine Kombination aus Wachausschmelzverfahren und selektives Lasersintern von Polymeren.

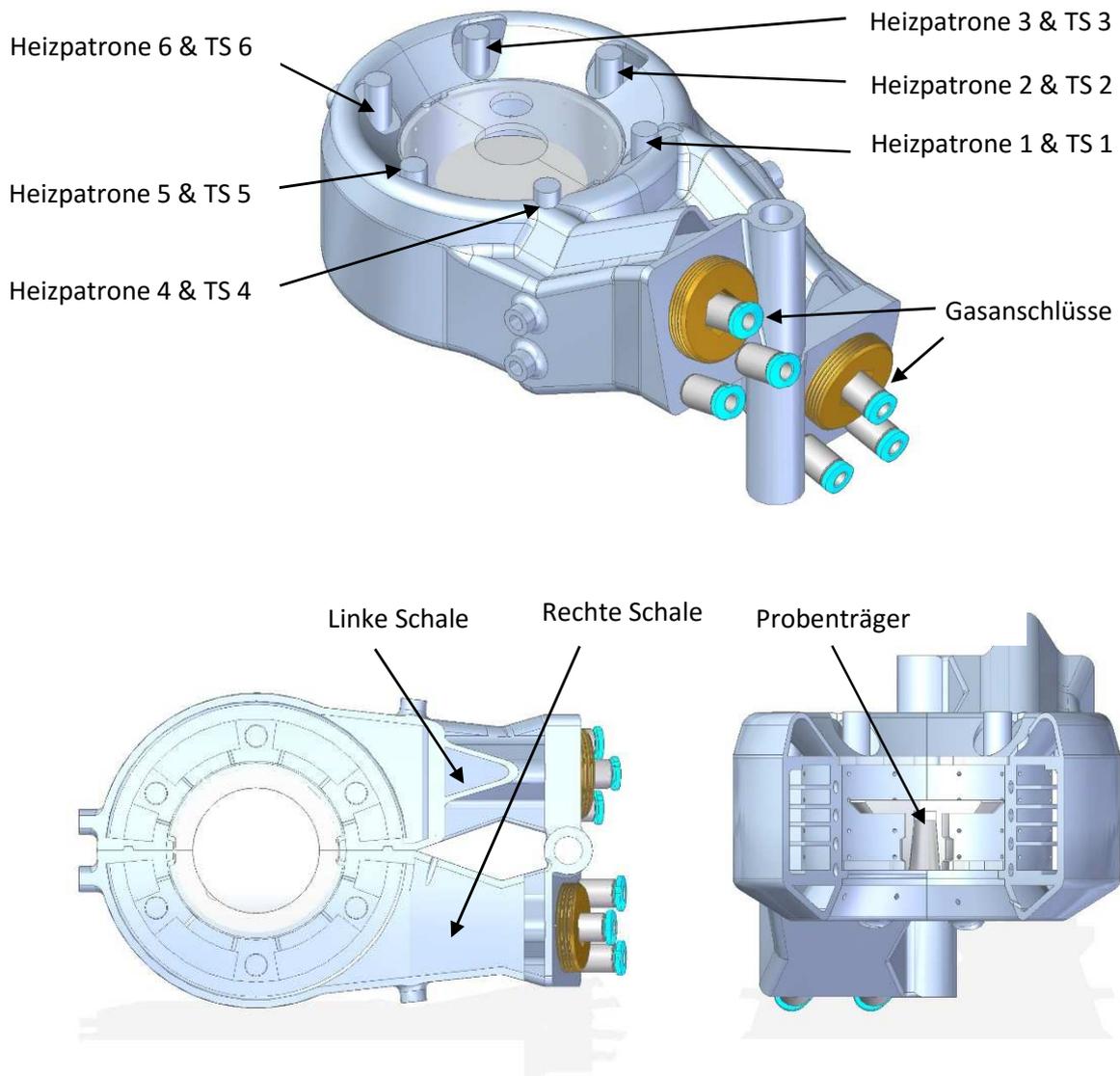


Abbildung 21: CAD Modell der Schalen

Die Geometrie der Schalen (Abb. 21) ist für den Einsatz des Heizsystems an einem Rheometer unter Röntgenstrahlung optimiert. Die Anforderungen einen Röntgenstrahl unter 90° oder 45° durch den Probenraum zu lenken sind durch die Geometrie gewährleistet.

Durch den offen gestalteten Probenraum, der mittels Abdeckplatten aus Messing oder Glas verschlossen werden kann, ist nicht nur der Betrieb im Röntgenstrahl, sondern auch die optische Analyse mittels Polarisationsmikroskopie möglich. Der Aufbau eröffnet außerdem die Möglichkeit eine Vielzahl von Materialien, über einen großen Temperaturbereich sowohl auf nanoskopischer als auch auf mikroskopischer Ebene zu untersuchen. Die Schalen haben ein Gesamtgewicht von 1120 g.

Die Abbildung 22 zeigt die montierten Schalen an dem Rotationsrheometer und neuartige Probenträger mit einer Oberfläche aus Glas, sowie den Strahlengang durch die Schalen.

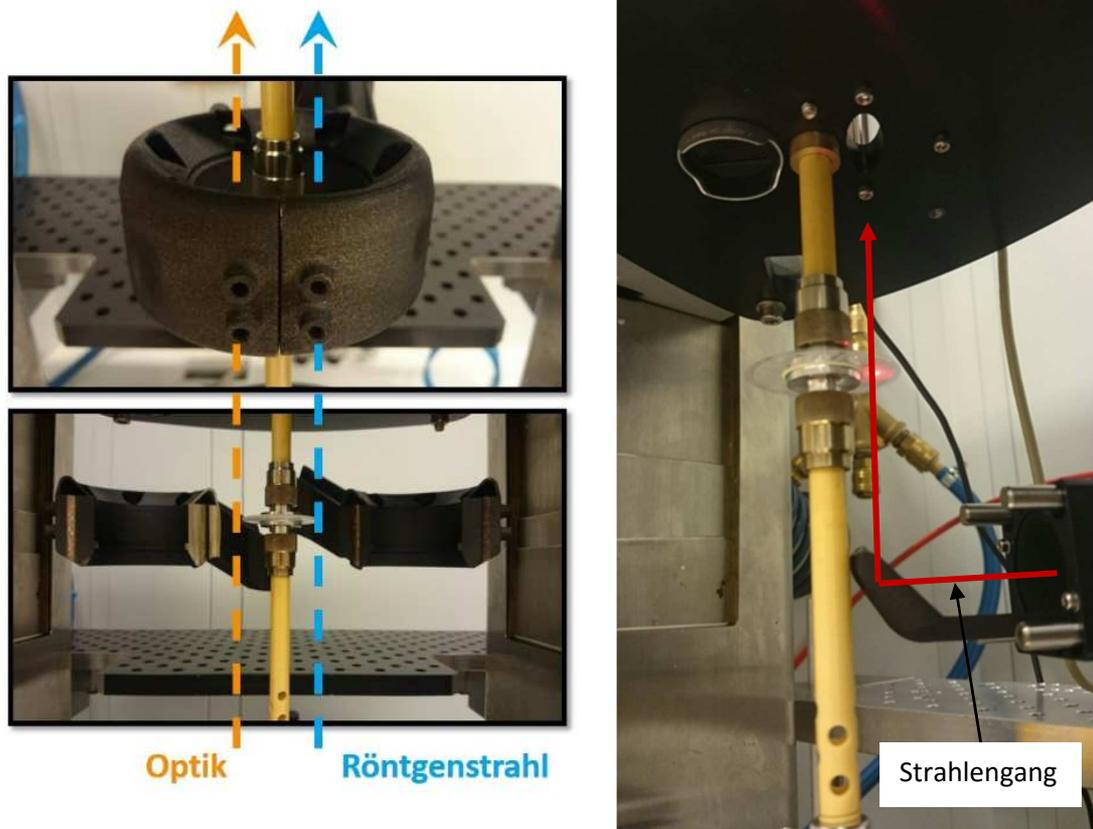


Abbildung 22: Strahlengang durch die neuen Schalen

## 5.2 Integration der Heizpatronen und Temperaturfühler

Nach der Fertigung und Montage ist die Idee mit einfachen Mitteln die vorhandene Steuerung so zu erweitern, dass das Konzept mit den neuen Schalen in Bezug auf die Erfüllung der Anforderungen analysiert werden kann. Für die Analyse des Systems sind zunächst Heizpatronen notwendig. Die gewählten Heizpatronen haben das Standardmaß  $\frac{1}{4}$  Zoll, so dass diese bei Bedarf durch andere Patronen ersetzt werden können. Außerdem ist ein Mittelweg zwischen ausreichend Leistung und Bauraum des Heizsystems gefunden worden. Die Passbohrungen weisen eine Tiefe von nur 30 mm auf und können mit Heizpatronen bestückt werden, die jeweils eine Leistung von bis zu 80 W liefern. Der minimierte Bauraum des Heizsystems bietet Vorteile hinsichtlich der geringeren Wärmespeicherkapazität und der Integration in das Rheometer. Außerdem ist noch Platz für die Installation von optischen Komponenten.

Die sechs Heizpatronen mit jeweils 45 W und integrierten Thermoelementen werden in die Schale eingesetzt. Die Auswahl der Heizpatronen erfolgt durch Erfahrungswerte, die durch die bisherigen Heizsysteme gesammelt wurden. Zur Ansteuerung der Patronen wird die vorhandene Steuerung mit zwei I/O Modulen erweitert. Jedes Modul besitzt vier potentialfreie digitale Ausgänge, die jeweils eine Leistung von 48 W schalten (24 V, 2 A) können. Zum Auslesen der Thermoelemente werden ebenfalls I/O Module benötigt. Die Klemmen können jeweils bis zu vier Sensoren aufnehmen. In diesem Fall werden Thermoelemente von Typ J verwendet, die in den Heizpatronen integriert sind. Außerdem wird noch ein Transformator eingebaut, der mit 480 W ausreichend Leistung für die Heizpatronen zur Verfügung stellt.

### 5.3 Umsetzung einer Temperaturreglung mit der vorhandenen Steuerung

In der folgenden Abbildung ist der Verlauf der Temperatur an der zugehörigen Patrone bei unterschiedlichen Leistungen dargestellt (Abb. 23). Zur Leistung von Heizpatrone 1 gehört die Temperatur TS 1 in der Schale. Aufgrund der Bedingung, dass das Verhalten der Heizpatronen in der linken und rechten Schale symmetrisch ist, sind nur die Temperaturen TS 1,2 und 3 dargestellt. Aufgezeichnet sind die Messungen bei einem konstanten Volumenstrom des Gases von 13 l/min.

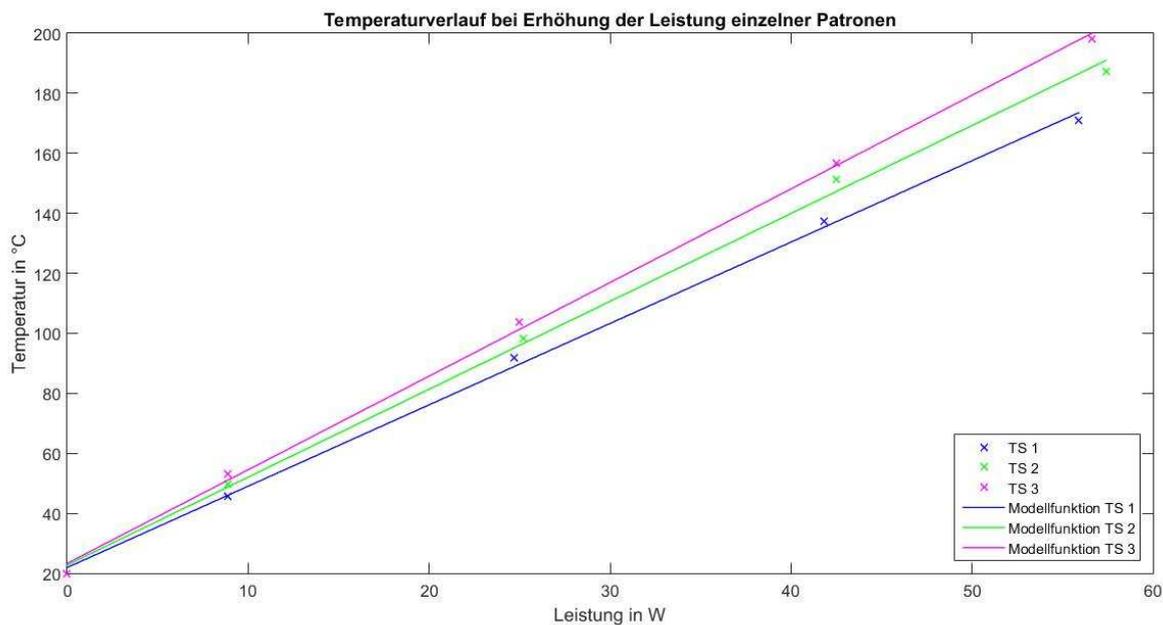


Abbildung 23: Temperaturverlauf bei Erhöhung der Leistung einzelner Patronen

Die Daten zeigen, dass der Temperaturanstieg nach einer gewissen Ausgleichzeit im System nahezu linear verläuft und die Heizpatrone, die am weitesten von dem Gaseinlass entfernt ist die höchste Temperatur erreicht. Zu den Messpunkten sind als Modellfunktionen die Ausgleichgeraden über das Polynom erster Ordnung bestimmt. Nach der Auswertung des Zusammenhangs zwischen Leistung und Temperatur erfolgt die Auslegung der Regler über die im Folgenden beschriebene Methode.

Zur Analyse der Regelstrecke und den Kopplungen in einem Mehrgrößensystem ist die Aufzeichnung der Sprungantworten eine geeignete Maßnahme, wenn die Strecke vorhanden ist und einem Sprung der Stellgröße ausgesetzt werden darf. Beide Anforderungen sind bei dem Mehrgrößensystem gegeben. Nach der Integration der neuen I/O Module ist über die vorhandene Software TwinCAT2 das Aufzeichnen der Sprungantwort jeder Patrone möglich. Durch das Einschalten des zugehörigen digitalen Ausgangs wird die Patrone so lange mit dem maximalen Strom belastet bis die Temperatur die Sättigung erreicht hat. Dabei werden alle Temperaturen in den Schalen aufgezeichnet.

Weil in dem ersten Schritt der Umsetzung vor allem die Analyse des Heizsystems im Vordergrund steht sind bei der Auslegung der Regler die Kopplungen vernachlässigt worden. Die Auslegung der dezentralen PI-Regler wird im Kapitel Regelungskonzepte näher erläutert. Die Leistungsregelung der Patronen erfolgt bei dem Heizsystem V2 über digitale Ausgänge, die je nach Ausgangswert des Reglers länger oder kürzer während einer vorgegebenen Periodendauer eingeschaltet werden. Die folgende Abbildung 24 zeigt das Rheometer mit dem Heizsystem an der Beamline.

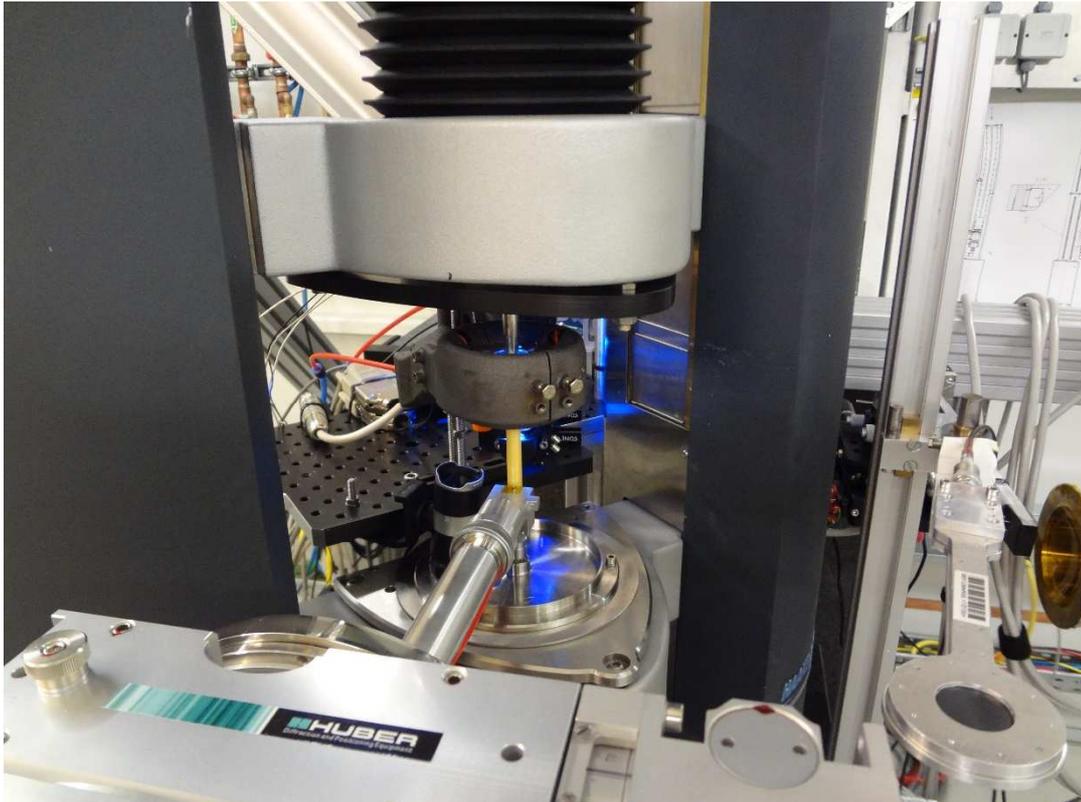


Abbildung 24: Einsatz und Analyse des Heizsystems an der Beamline

## 5.4 Ergebnisse der Analyse und Optimierungsmaßnahmen

Nach der Integration der neuen Komponenten zeigte die Leistungsanalyse des Heizsystems V2, dass die Patronen mit einer Leistung von 45 W nicht ausreichend sind, um in dem Probenraum eine Temperatur von 250 °C zu erreichen. Die Patronen 1 und 4 sind bereits bei einer Temperatur von 200 °C an Ihrem Leistungsmaximum angekommen.

Die Funktionsanalyse des entwickelten Systems ist bis hierhin positiv zu bewerten. Über die symmetrisch in den Schalen eingesetzten Heizpatronen wird das einströmende Gas erwärmt und strömt gleichmäßig in den Probenraum. Die Strategie eine dezentrale Regelung mit jeweils einem PI-Regler pro Heizpatrone zu implementieren zeigt ebenfalls positive Ergebnisse. Die Analyse erfolgte durch Erwärmung des Heizsystems auf unterschiedliche Temperaturen und die Beobachtung von Phasenübergängen bei einer definierten Probe. Auffällig ist jedoch, dass die Heizpatronen, die dem Gasanschluss am nächsten sind, die meiste Leistung benötigen. Dieser Effekt ist der Tatsache geschuldet, dass die Heizpatronen bezogen auf die Strömungsrichtung in Reihe geschaltet sind. Eine Parallelschaltung der Heizpatronen im Sinne der Strömungsrichtung war aufgrund der Vorgaben, an die Geometrie der Schalen, nicht möglich. Um diesen Effekt zu minimieren und das in den Probenraum strömende Gas zu brechen sind nachträglich Klappen eingebaut wurden. Die Abbildung 25 zeigt das CAD Modell der Schalen mit den eingesetzten Klappen. Die Klappen sind aus Edelstahl mit einer Stärke von 2 mm gefertigt und zur Verdeutlichung in grün dargestellt.

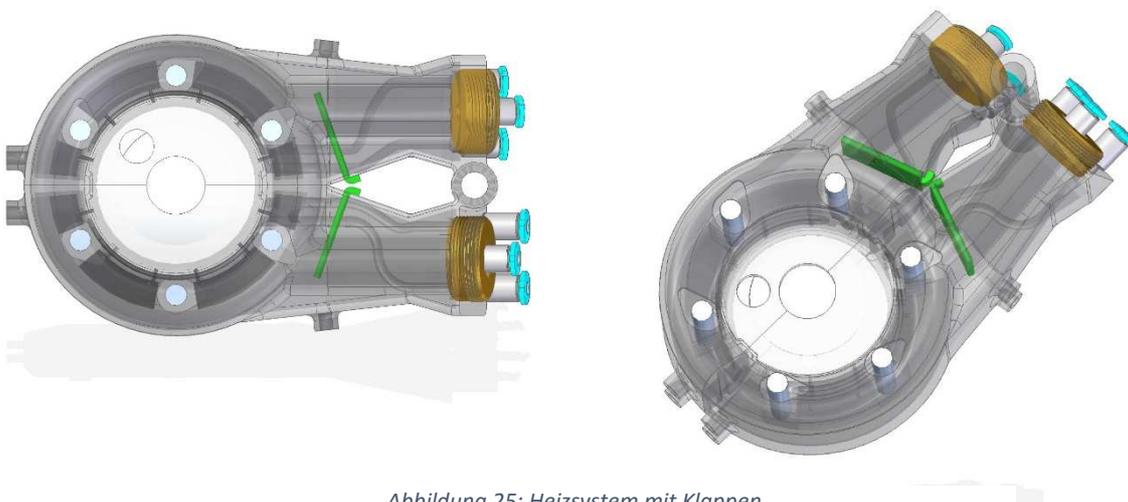


Abbildung 25: Heizsystem mit Klappen

Zur Messung und Minimierung des Temperaturgradienten auf dem Probenträger ist bei der Analyse des Systems die Idee entstanden, die Temperaturen an symmetrisch angeordneten Messpunkten direkt auf dem Probenträger zu messen. Auf diese Weise wird die Temperaturverteilung auf dem Probenträger in Sektoren eingeteilt, die über die Heizpatronen beeinflusst werden. Der Radius des Teilkreises, auf dem die Sensoren verteilt sind, entspricht dabei genau dem Abstand des Röntgenstrahles zur Achse und somit dem tatsächlichen Messpunkten in der wissenschaftlichen Anwendung.

## 6 Umsetzung eines Mehrgrößensystems

In dem Kapitel 6 wird die Idee des Konzeptes zur Realisierung eines Mehrgrößensystems erläutert und welche Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen notwendig sind. Die Maßnahmen beinhalten die Umrüstung der Hard- und Software.

### 6.1 Konzept

Nach Abschluss der Marktanalyse in Bezug auf die vorhandene Infrastruktur ist die Entscheidung gefallen, dass vorhandene System von Beckhoff zu verwenden bzw. zu erweitern. Die Argumente für das System sind, dass bisher eingesetzte Komponenten weiter verwendet werden können und dass eine modulare Lösung installiert wird, die beliebig erweiterbar ist. Die Steuerung bietet außerdem eine hohe Zuverlässigkeit, eine hinreichende Präzision von 0,01 K und Netzwerkfähigkeit.

Neben den vielfältigen Programmierungsmöglichkeiten bietet die Software eine Bibliothek und Oberfläche zur Gestaltung von Visualisierungen mit der die Bedienoberfläche geschaffen werden kann. Mit der Möglichkeit Simulink Modelle in die TwinCAT Umgebung einzubinden können Regelungsalgorithmen für Mehrgrößensysteme realisiert werden. Der Wunsch einen Beobachter für den Temperaturverlauf auf einem definierten Probenträger nachzubilden, ist deshalb ebenfalls realisierbar. Außerdem sind am DESY Lizenzen für Matlab/Simulink und Erfahrungen mit der Soft- und Hardware von Beckhoff vorhanden. Damit die Lösung in das vorhandene System integriert werden kann, ist ein leistungsstärkerer Embedded PC mit einem speziellem Betriebssystem notwendig, sowie die Umstellung der Software von TwinCAT2 auf TwinCAT3. Detaillierter werden die einzelnen Komponenten im folgenden Kapitel erläutert.

### 6.2 Integration der leistungsstärkeren Heizpatronen und Temperatursensoren

Zur Erfüllung der Anforderungen an das neue System ist eine Umrüstung der Hard- und Software unerlässlich. Um die Vorgabe einer maximalen Temperatur von 250 °C zu erreichen sind leistungsstärkere Patronen notwendig. Durch die Passbohrungen in den Schalen ist der Durchmesser der Patronen vorgegeben. Nach Recherche bei einigen Lieferanten konnten leistungsstärkere 80W Patronen, allerdings ohne Temperaturfühler, geliefert werden. Damit die Temperatur in der Schale weiterhin geregelt werden kann, ist jeweils ein PT1000 als Temperatursensor pro Heizpatrone in die Schale eingesetzt wurden, mit dem Vorteil einer höheren Auflösung von 0,01 °C im Gegensatz zu 0,1 °C im Fall von Thermoelementen. Die digitalen Ausgänge aus der ersten Phase mussten auch ausgewechselt werden, weil die 80 W Patronen einen Strom von über 3 A benötigen. Leistungsstärkere digitale Ausgänge sind nicht im Portfolio von Beckhoff vorhanden. Deswegen besteht die Lösung der Leistungsreglung jeder Heizpatrone aus einem analogen Ausgang der SPS und einem externen PWM-Modul, das eine Stromstärke von bis zu 5 A schalten kann.

Die Abbildung 26 zeigt das Mehrgrößenheizsystem mit den integrierten Heizpatronen, die jeweils bis zu 80 W leisten, den Temperatursensoren und die Abdeckplatten aus Messing, außerdem ist der obere Probenträger zu sehen.



Abbildung 26: Schalen mit Heizpatronen und Temperatursensoren

### 6.3 Embedded PC mit Steuerungssoftware

Die Anforderung ein Mehrgrößensystem zu realisieren erfordert ebenfalls einen leistungstärkeren Embedded PC. Ein gutes Preis-/Leistungsverhältnis bietet die Embedded-PC-Serie CX5100. Die Entscheidung ist auf den Hutschienen-Industrie-PC CX5120 mit dem Betriebssystem Embedded Standard 7 gefallen. Die Auswahl des Betriebssystems ergibt sich durch die Notwendigkeit des Matlab/Simulink Targets, auf das in dem Unterkapitel 7.3 eingegangen wird. Das Herzstück des PCs ist ein single-core Prozessor mit 1,46 GHz. Zur möglichen Erweiterung der Steuerung oder den Anschluss eines Touch Panels sind zwei RJ-Ethernet-Anschlüsse, eine DVI-I-Schnittstelle und 2 USB Ports vorhanden. Der PC bietet außerdem ein K-Bus/E-Bus-Interface, d.h. die Auswahl des Bussystems ist, anders als bei dem vorher eingesetzten CX9010, frei wählbar.



Abbildung 27: Embedded PC [8]

## 6.4 Busklemmen

Ein weiterer Grund, der für den Einsatz einer Speicherprogrammierte Steuerung spricht, sind die beliebigen Erweiterungsmöglichkeiten mit einer großen Auswahl an Busklemmen. Im Folgenden werden die eingesetzten Busklemmen mit Ihren Eigenschaften und Verwendung erläutert.

KL4404-

Eigenschaften: Analoge Ausgangsklemme mit vier Ausgängen, die jeweils 0-10V ausgeben

Verwendung: Steuerspannung für Leistungsregelung der Heizpatronen

KL3222-

Eigenschaften: PT100 Eingangsklemme, hochpräzise (Auflösung 0,01°C)

Verwendung: Messung der Temperaturen in den Heizschalen und am Probenträger

KL3314-

Eigenschaften: Thermoelement Eingangsklemme

Verwendung: Messung der Temperaturen am Probenträger und in der Probe

KL9505-

Eigenschaften: 5V Spannungsversorgung

Verwendung: Spannungsversorgung für Piezo zur Befeuchtung des Probenraumes

KL2794-

Eigenschaften: Potentialfreie digitale Ausgänge

Verwendung: Ansteuerung des Piezo



Abbildung 28: I/O Modul [8]

Auf die Befeuchtung des Probenraumes wird nur kurz im Ausblick eingegangen, weil die Umsetzung nicht Inhalt der Masterthesis ist.

## 6.5 Installation der Komponenten

Nach Auswahl der Hardware hat sich herausgestellt, dass der vorhandene Platz im Rack nicht mehr ausreicht und ein neues Gehäuse ausgewählt werden muss. Die Entscheidung ist auf einen Schaltkasten (Abb. 29) aus dem Lagerbestand vom DESY gefallen. Die montierte Hutschiene bietet noch Reserve für weitere I/O Module oder andere Komponenten. Der Anschluss des Heizsystems an die Steuerung erfolgt über Steckverbindungen, die in austauschbare Montageplatten integriert sind. Die Platten sind ebenfalls vorrätig und können beliebig erweitert oder verändert werden. Die vier Steckverbindungen, jeweils zwei für die Heizpatronen und zwei für die Temperaturfühler, bieten einen einfachen und schnellen Anschluss des entwickelten Heizsystems. Zusätzliche Schnittstellen für Messungen am wissenschaftlichen Experiment sind ebenfalls vorgesehen.

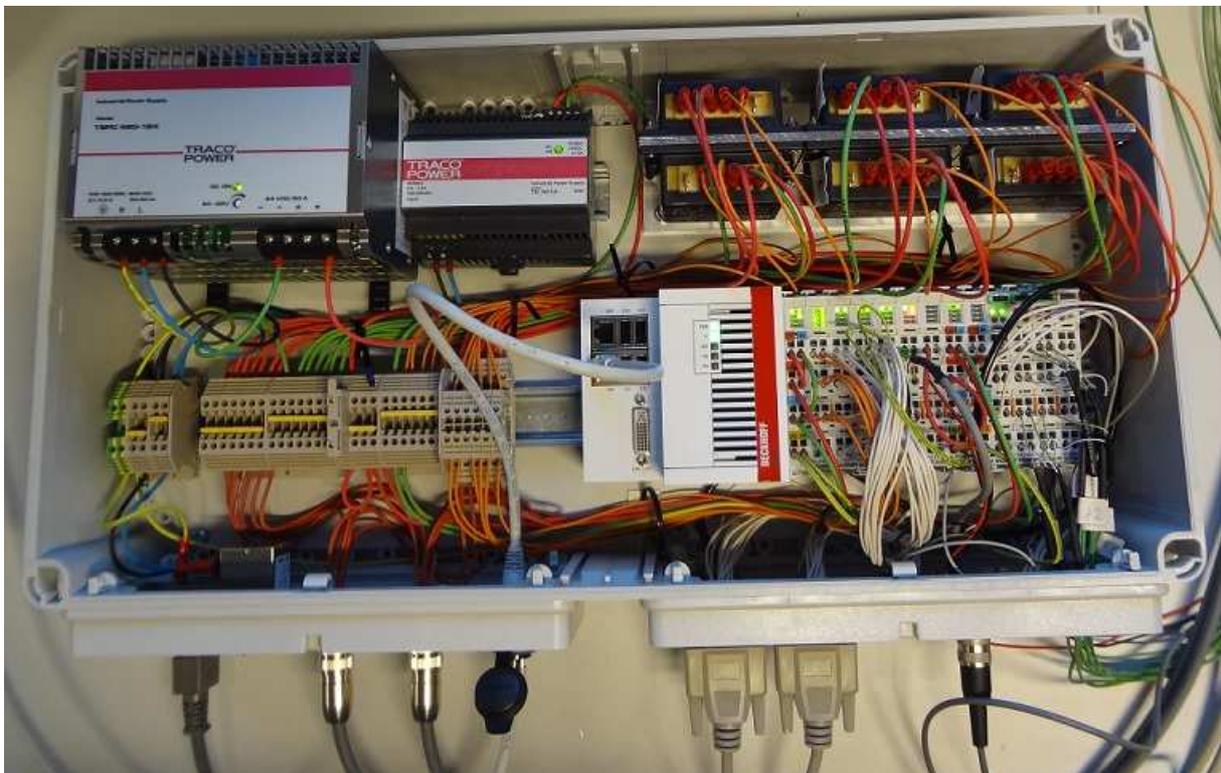


Abbildung 29: Schaltkasten mit Steuerung und Schnittstellen

## 7 Entwicklung der Software

Zur Analyse der Regelungskonzepte muss zunächst ein Programm und eine Bedienoberfläche nach den Anforderungen des Wissenschaftlers integriert werden. Das Kapitel 7 gibt einen Eindruck in das Programm, die Umsetzung der Bedienoberflächen und abschließend die Möglichkeit der Einbindung von Matlab/Simulink in die TwinCAT Umgebung.

### 7.1 Programm

Die Programmierumgebung von TwinCAT 3 ist in Visual Studio eingebettet, ansonsten ist das Handling von anderen speicherprogrammierbaren Steuerungen bekannt. Zunächst wird ein Hautprogramm angelegt, aus dem die einzelnen Funktionsbausteine und Funktionen gestartet werden. Die Programmiersprache ist für jeden der genannten POU's frei wählbar. Die Software bietet auch die Möglichkeit objektorientiert zu programmieren, aufgrund der geringen Betriebsmittel ist die Vorgehensweise in diesem Projekt nicht notwendig.

Das Hauptprogramm besteht aus Funktionen zur Umrechnung der Temperaturen, aus einem Funktionsbaustein zur Eingabe einer Tabelle und einem Baustein zur Eingabe einer Sollwerttrampe. Die Regelungskonzepte werden über TcCOM Objekte, auf die später eingegangen wird, zugefügt und untersucht. Nach der Untersuchung wird ein Konzept ausgewählt und eingepflegt.

### 7.2 Bedienoberfläche

Die Bedienoberfläche besteht aus einem User- und einem Admin-Interface, dadurch wird verhindert, dass die Nutzer des Rheometers den Zugriff auf wichtige Parameter, z.B. Einstellung der Regler, haben. Außerdem bietet das Admin-Interface die Möglichkeit die Patronen einzeln anzusteuern. Neben diesen Funktionen werden auf dem Admin-Interface alle Temperaturen und Sollwerte dargestellt. Der Admin hat auch die Rechte, die Koeffizienten zwischen den Sollwerten der Temperaturen im Probenraum und in den Schalen zu verändern. Auf die Ermittlung der Koeffizienten wird in dem Unterkapitel 8.2.4 ausführlich eingegangen. Das User-Interface bietet primär die Möglichkeit einen Temperatursollwert vorzugeben. Neben der Vorgabe nur eines Sollwertes hat der User jedoch auch die Möglichkeit eine Sequenz von bis zu zehn Sollwerten vorzugeben, mit jeweils frei definierbaren Sollwerttrampen und Haltezeiten.

Angezeigt werden auf dem User Interface nur die Temperaturen in der Schale und in der Achse. Die folgenden Abbildungen 30 und 31 zeigen beispielhaft die Umsetzung der beiden Bedienoberflächen für die dezentrale Regelung.

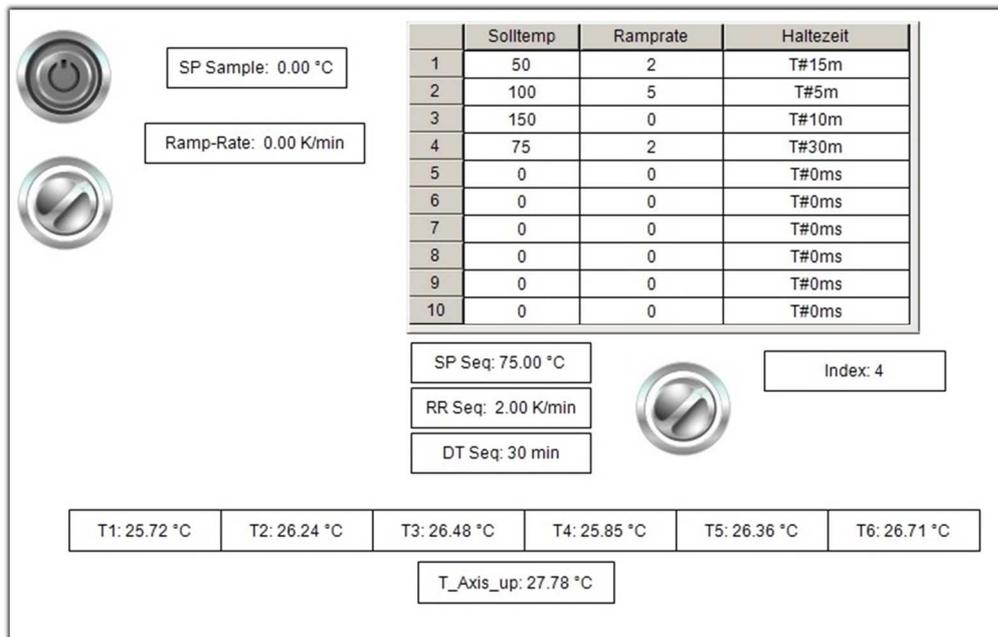


Abbildung 30: Bedienoberfläche "User"

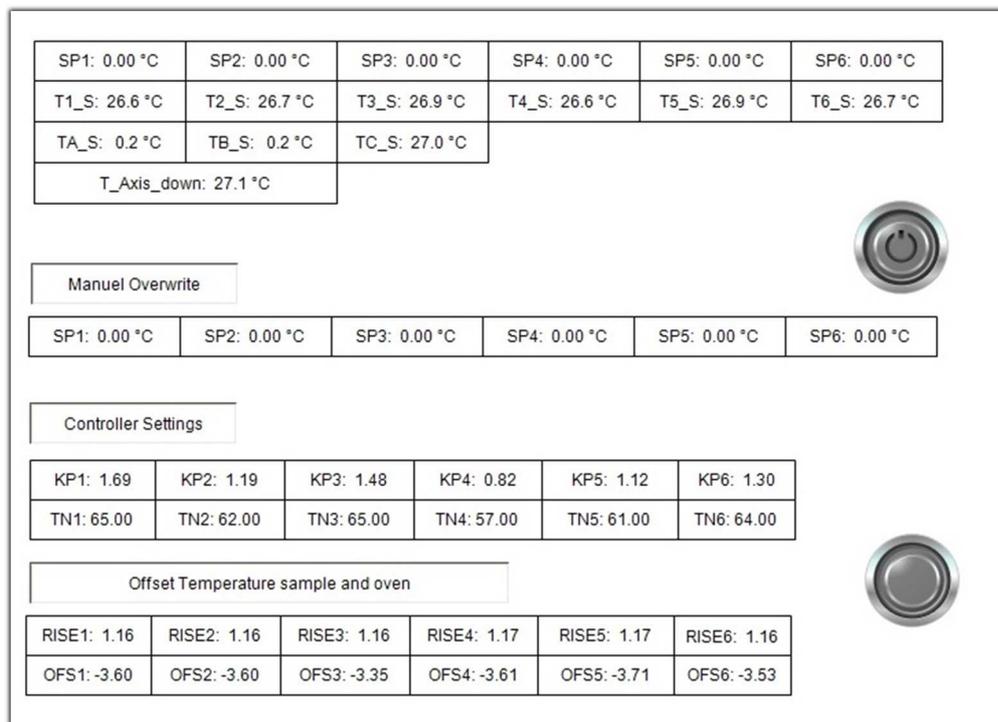


Abbildung 31: Bedienoberfläche "Admin"

### 7.3 Einbindung von Matlab/Simulink

Die Firma Beckhoff bietet für die Modellierung von Regelungsstrecken und die Umsetzung komplexer Regelungsalgorithmen ein TwinCAT Target für Matlab/Simulink. Das TwinCAT Target arbeitet auf Basis des Simulink Coders. Nach erfolgreicher Konfiguration wird ein TcCOM-Modul mit den Ein- und Ausgangsverhalten des Simulink-Modells erstellt, das in die TwinCAT3-Umgebung eingebunden werden kann, diese und weitere Informationen finden sich auf dem Portal infosys von Beckhoff. Das Portal ist unter [8] zu finden. Weitere Einsatzbereiche sind die Echtzeitsimulation, HiL Simulation und Rapid Control Prototyping.

Im Folgenden wird die Installation und Konfiguration beschrieben, die Erläuterung zu der Integration der Module erfolgt bei der Umsetzung der Regelungskonzepte.

Nach dem Herunterladen und dem Ausführen der Datei mit dem Target muss in Matlab ein Skript ausgeführt werden, welches sich unter dem TwinCAT Ordner befindet und für die Installation der TwinCAT Bibliotheken sorgt.

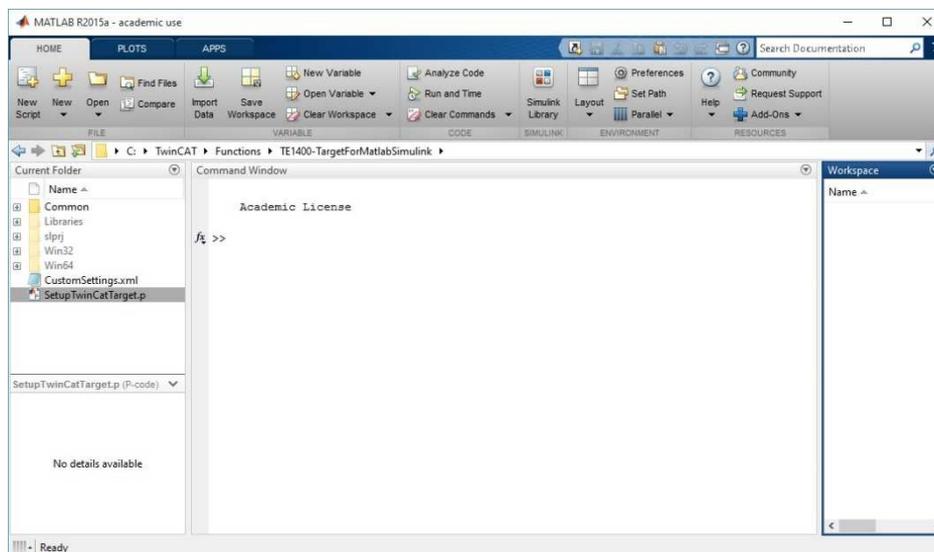


Abbildung 32: Integration TwinCAT Target (Screenshot)

Weil der Entwicklungsrechner eine 64-Bit Plattform besitzt, muss der Treiber mit einem Zertifikat signiert sein, die Erstellung und Installation des Treibers kann ebenfalls unter [8] nachgelesen werden.

## 8 Regelungskonzepte

In dem Kapitel 8 werden die Umsetzung und die Ergebnisse der Regelungskonzepte vorgestellt. Aufgrund der aufwendigen Umsetzung der Hardware und Software werden die Konzepte dezentrale Regelung und PI-Mehrgrößenregler vorgestellt. Die Umsetzung einer Zustandsregelung mit Beobachter wurde Ansatzweise durchgeführt, allerdings ohne vorzeigbare Ergebnisse.

Nach der positiven Machbarkeitsanalyse mit dem Heizsystem V2 und dem Grundgerüst der Software steht die Auslegung und Integration der Regelungskonzepte im Kapitel 8 im Vordergrund. Das erste Konzept, die dezentrale Regelung, ist ansatzweise bereits in der Machbarkeitsanalyse umgesetzt, allerdings besteht Optimierungspotential in der Auslegung der Regler. Die Bestimmung der Reglerparameter wird nicht wie bei der Analyse für die Heizpatronen 1-3, sondern für alle sechs Patronen durchgeführt. Außerdem werden die Systemantworten bei der Vorgabe von unterschiedlichen Überschwingzeiten verglichen.

Bei der Durchführung des zweiten Konzeptes, der PI-Mehrgrößenregler, wird ebenfalls die experimentelle Untersuchung der vorhandenen Strecke genutzt, um die Reglermatrizen zu bestimmen.

Das dritte Konzept, die Zustandsregelung mit Beobachter, war geplant als eine Mischung aus Messdaten und theoretischen Kenntnissen. Aufgrund der zeitaufwendigen Entwicklung eines Testaufbaus und Zusammenstellung der Hardware konnten nur Ansätze des Zustandsreglers mit Beobachter für eine Heizpatrone umgesetzt werden. Diese Ergebnisse sind in dieser Thesis nicht ausgeführt.

## 8.1 Linearisierung der Ausgangskennlinie

Bei dem Heizsystem V3.1, mit den Klappen und einer Leistung von 80 W pro Heizpatrone, wird die Leistung jeder Heizpatrone mit einem externen Modul geregelt. Die Höhe der Leistung ist abhängig von der Steuerspannung, die von der SPS gesendet wird. Die Spannung wiederum wird in der Software als Integer Wert vorgegeben. Zur Ermittlung der Skalierungsfaktoren wird die Leistung an der Heizpatrone 1 bei unterschiedlichen Steuerspannungen gemessen.

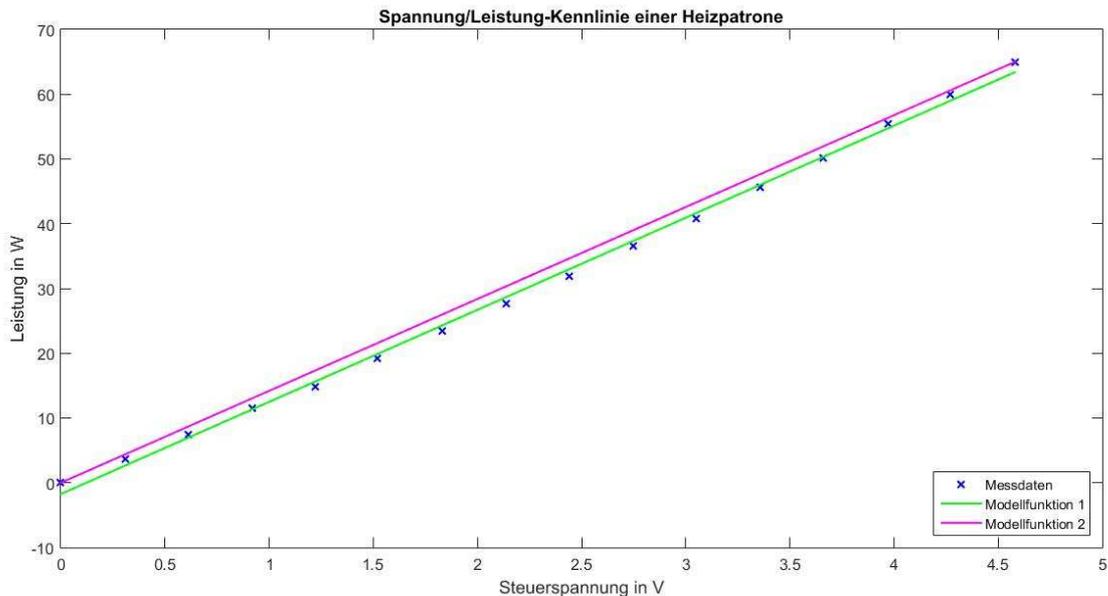


Abbildung 33: Faktoren zur Umrechnung der analogen Ausgänge

Die Messdaten sind mit blauen Kreuzen auf der Abbildung 33 gekennzeichnet. Die Messdaten werden mit zwei unterschiedlichen Modellfunktionen linearisiert. Die Modellfunktion 1 ist ein Faktor und die Modellfunktion 2 ein Polynom erster Ordnung. Die Abweichungen der gemessenen Werte stammen aus der Temperaturabhängigkeit des Widerstands der Heizpatrone und den Messfehlern der Strommessung. Die Ausgleichsgerade ist mit grün dargestellt und wird für den Leistungsbereich oberhalb von 10W eingesetzt. Für den Leistungsbereich bis ungefähr 10 W wird die Höhe der Steuerspannung allerdings über einen Faktor bestimmt, weil der Offset der Geradengleichung ansonsten zu einer minimalen Leistung an den Patronen führen würde. Dadurch ergeben sich für die Einbindung in die Software folgende Parameter:

Leistung  $\leq$  10W

Integer Wert = Ausgang Regler \* 236.5

Leistung  $>$  10W

Integer Wert = Ausgang Regler \* 224.3 + 533.3

Der Ausgang jedes Reglers ist auf einen Wert zwischen 0 bis 65 skaliert und entspricht dem verwendeten Leistungsbereich einer Heizpatrone.

## 8.2 Dezentrale Regelung der Heizschalen

### 8.2.1 Ermittlung der Übertragungsfunktionsmatrix und Auslegung der Regler

Zum Vergleich sind zunächst die Übertragungsfunktionen und Parameter der Regler für das Heizsystem ohne Klappen aufgeführt, bevor die detaillierte Identifikation der Strecke mit Klappen beschrieben wird. In beiden Fällen erfolgt die Auslegung der Regler über Sprungantworten. Die Aufzeichnung und Auswertung der Daten ist mit der neuen Software von Beckhoff sehr komfortabel. Die Daten werden mit der Software Scope Viewer von Beckhoff aufgezeichnet und können in beliebige Formate, z.B. csv konvertiert werden. Bei der Auslegung des Systems ohne Klappen V3 ist davon ausgegangen worden, dass sich die Schalen symmetrisch verhalten. Aus diesem Grund sind nur drei Parameterpaare ermittelt wurden. Die Vorgaben für die Reglerparameter sind eine Überschwingweite  $h = 5 \%$  und eine Überschwingzeit  $T_m = 250 \text{ s}$ . Mit folgenden Übertragungsfunktionen  $G_1(s)$  bis  $G_6(s)$  und den Vorgaben werden die PI-Regler mit den Verstärkungen  $K_{P1}$  bis  $K_{P6}$  und die Nachstellzeiten  $T_{N1}$  bis  $T_{N6}$  berechnet. Zusätzlich werden dafür die Gleichungen 4.48 bis 4.53 benötigt.

$$G_1(s) = G_4(s) = \frac{3,0}{180s + 1}$$

$$K_{P1} = K_{P4} = 1,2 \quad T_{N1} = T_{N4} = 65,0$$

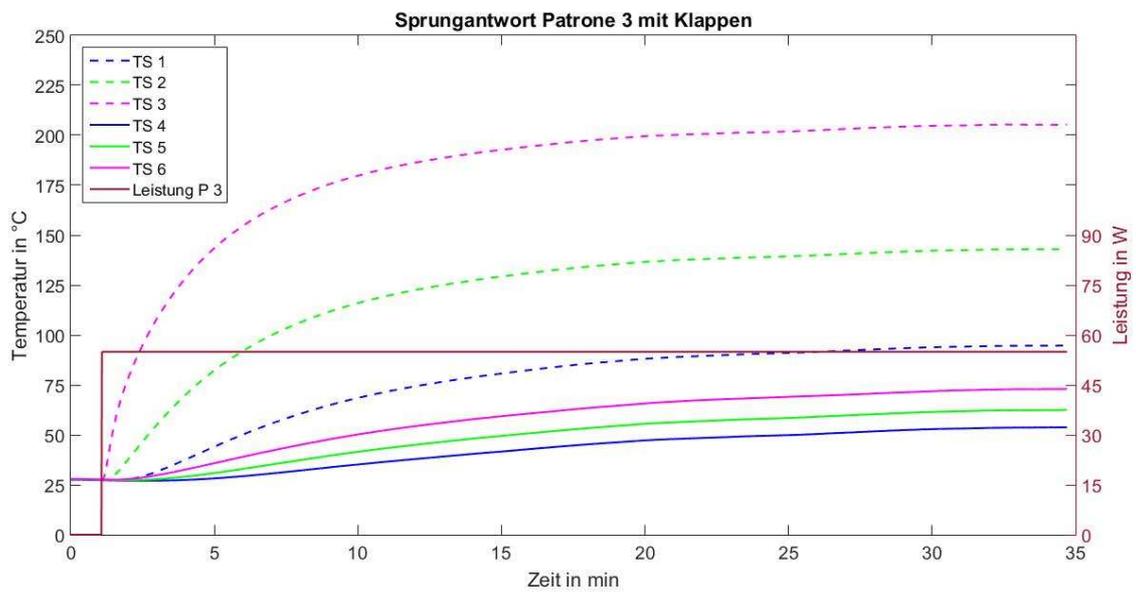
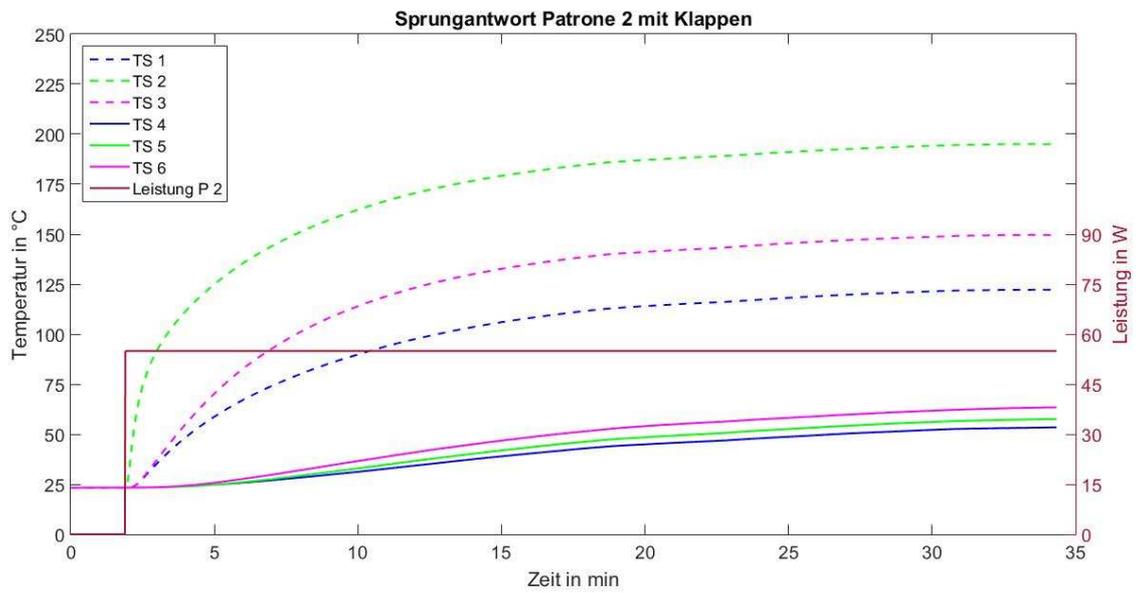
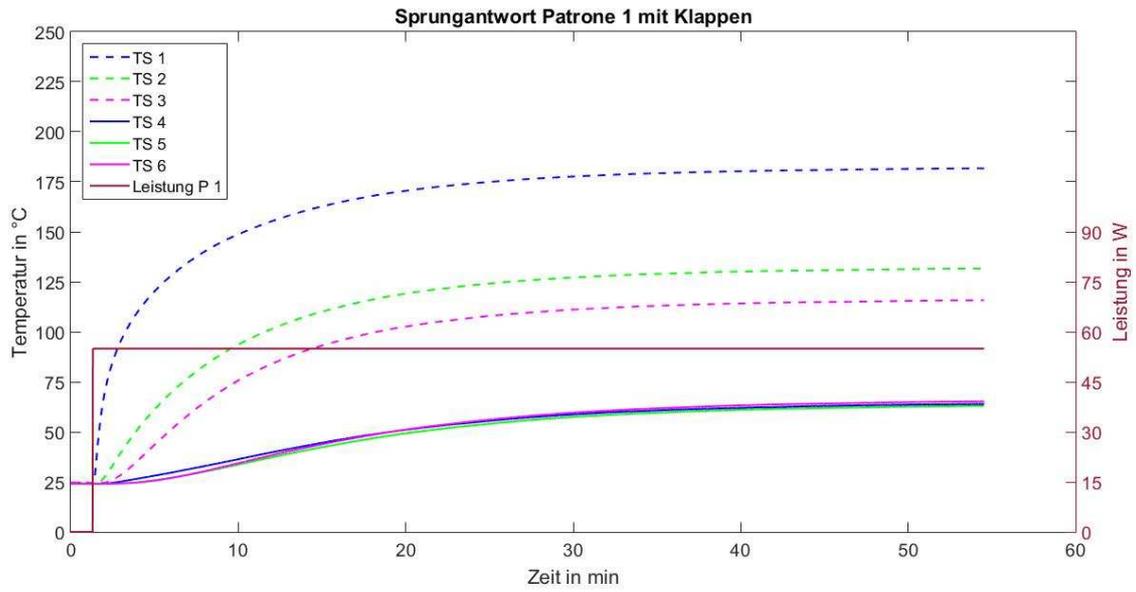
$$G_2(s) = G_5(s) = \frac{3,1}{175s + 1}$$

$$K_{P2} = K_{P5} = 1,1 \quad T_{N2} = T_{N5} = 61,5$$

$$G_3(s) = G_6(s) = \frac{3,5}{175s + 1}$$

$$K_{P3} = K_{P6} = 1,0 \quad T_{N3} = T_{N6} = 61,5$$

Aufgrund der Erfahrungen aus den Messungen mit dem Heizsystem V3, die aufzeigen, dass zwischen den Heizpatronen in den Schalen keine Symmetrie herrscht, sind für Heizsystem mit Klappen V3.1 die Sprungantworten für jede der sechs Patronen aufgenommen und ausgewertet worden. Zusätzlich wird die Übertragungsfunktionsmatrix für jede Schale ermittelt. Die folgenden Abbildungen zeigen zunächst die Verläufe der Temperaturen in den Schalen bei Anregung der einzelnen Stellgrößen.



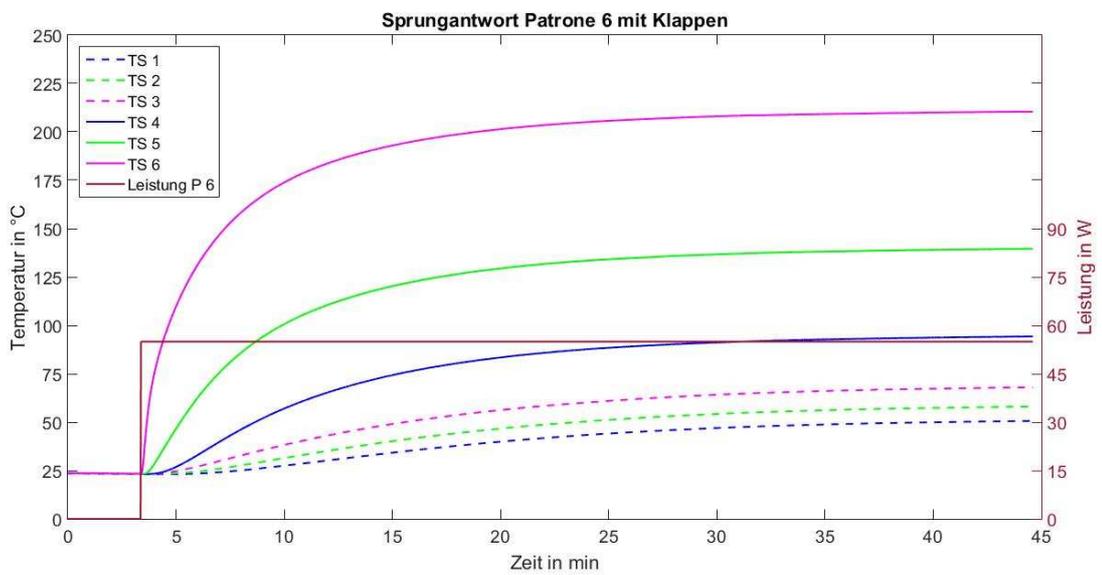
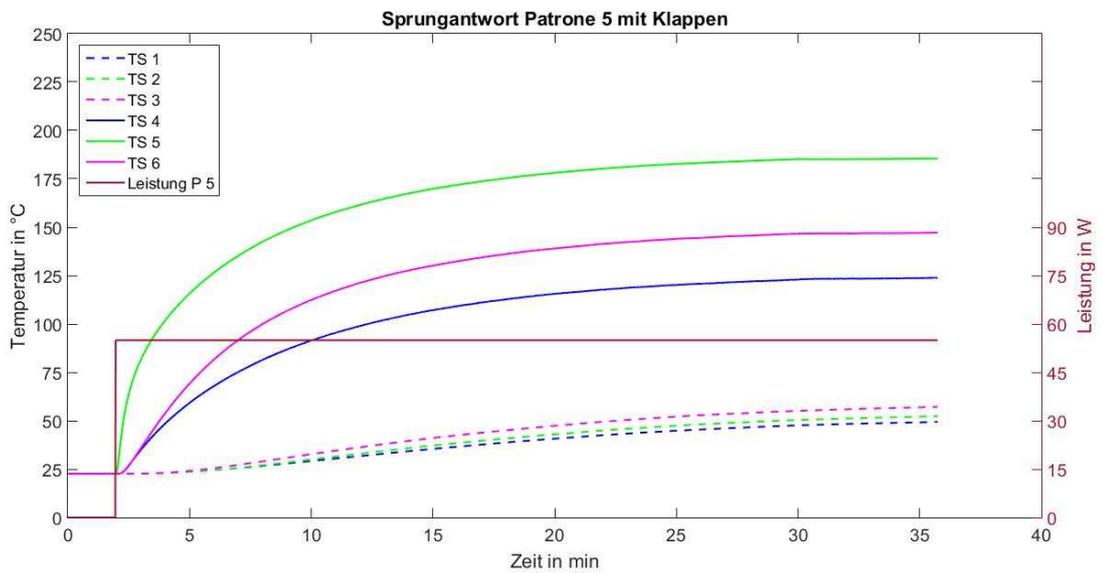
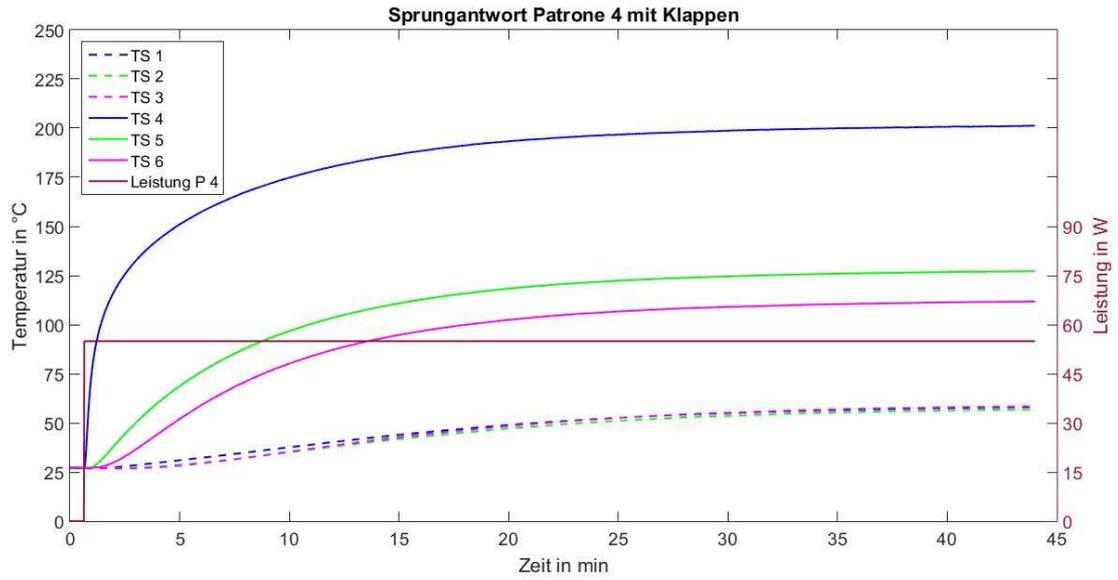


Abbildung 34: Sprungantworten der 6 Heizpatronen

Aus den Sprungantworten sind die folgenden Übertragungsfunktionsmatrizen mit Hilfe der Identifikation Toolbox von Matlab mit Klappen bestimmt wurden. Die Diagonalen der Matrizen zeigen PT1-Verhalten, also die Übertragungsfunktion von der angeregten Stellgröße zur jeweiligen Regelgröße. Der Koppelstrecken der Matrizen bestehen überwiegend aus PT2-Strecken, die auf PT1-Strecken approximiert werden können. Betrachtet werden nur die Kopplungen innerhalb einer Schale, weil die Sprungantworten zeigen, dass die Kopplungen zwischen den Schalen vernachlässigbar sind. Die Verstärkung ist normiert.  $G_L(s)$  ist die linke Schale, also die Patronen 1-3 und  $G_R(s)$  ist die rechte Schale, demnach die Heizpatronen 4-6.

$$G_L(s) = \begin{pmatrix} \frac{2,7}{221,5s + 1} & \frac{1,8}{440,0s + 1} & \frac{1,3}{590,5s + 1} \\ \frac{1,9}{500,5s + 1} & \frac{3,0}{180,0s + 1} & \frac{2,1}{364,0s + 1} \\ \frac{1,7}{599,0s + 1} & \frac{2,3}{386,0s + 1} & \frac{3,1}{222,0s + 1} \end{pmatrix}$$

$$G_R(s) = \begin{pmatrix} \frac{3,0}{139,0s + 1} & \frac{1,8}{430,0s + 1} & \frac{1,3}{596,0s + 1} \\ \frac{1,8}{464,0s + 1} & \frac{2,8}{222,0s + 1} & \frac{2,1}{374,0s + 1} \\ \frac{1,6}{550,5s + 1} & \frac{2,3}{384,0s + 1} & \frac{3,3}{166,0s + 1} \end{pmatrix}$$

Während die Sprungantworten für die Auslegung der Regler notwendig sind, dienen die Übertragungsfunktionsmatrizen für den Nachweis der dezentralen Regelung im folgenden Unterkapitel. Die Vorgaben aus den Messungen mit dem System V3, also Überschwingweite  $h = 5\%$  und Überschwingzeit  $T_m = 250\text{ s}$  sind übernommen wurden, allerdings wird bei der Simulation des geschlossenen Kreises die Überschwingzeit variiert und auf  $150\text{ s}$  und  $350\text{ s}$  verändert. Matlab bietet zusätzlich die Funktion `pidentune` zur Ermittlung der optimalen Reglerparameter an, diese Daten sind ebenfalls aufgeführt.

Die folgenden Abbildungen 35-41 zeigen die Sprungantworten der Regelkreise der jeweiligen Heizpatrone bei unterschiedlichen Vorgaben nach Ausführung der Funktion `step` in Matlab. Zusätzlich werden die berechneten Reglerparameter und die Übertragungsfunktionen der jeweiligen Strecke dargestellt.

$$G_1(s) = \frac{2,7}{222s + 1}$$

Reglerparameter bei $T_m=150$ s	$K_{P1} = 3,1$	$T_{N1} = 42,6$
Reglerparameter bei $T_m=250$ s	$K_{P1} = 1,7$	$T_{N1} = 65,3$
Reglerparameter bei $T_m=350$ s	$K_{P1} = 1,1$	$T_{N1} = 83,4$
pidtune	$K_{P1} = 0,4$	$T_{N1} = 192,0$

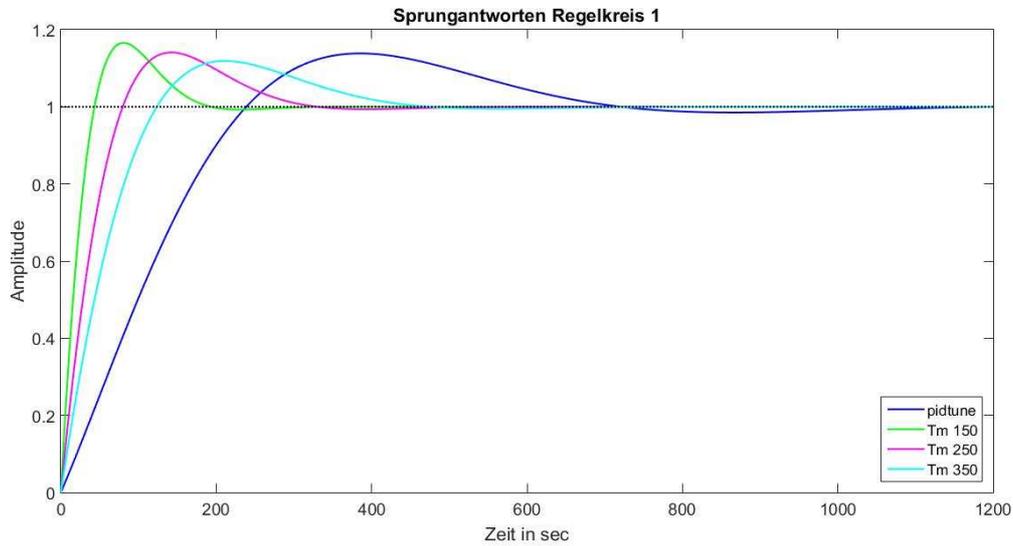


Abbildung 35: Sprungantworten Regelkreis 1

$$G_2(s) = \frac{3,0}{180s + 1}$$

Reglerparameter bei $T_m=150$ s	$K_{P2} = 2,2$	$T_{N2} = 41,4$
Reglerparameter bei $T_m=250$ s	$K_{P2} = 1,2$	$T_{N2} = 62,0$
Reglerparameter bei $T_m=350$ s	$K_{P2} = 0,8$	$T_{N2} = 77,0$
pidtune	$K_{P2} = 0,3$	$T_{N1} = 171,0$

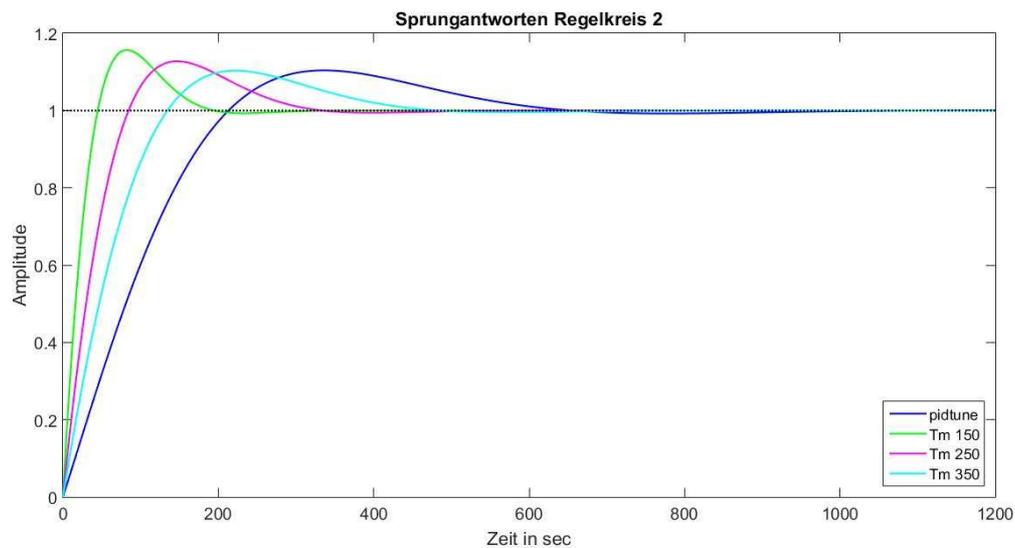


Abbildung 36: Sprungantworten Regelkreis 2

$$G_3(s) = \frac{3,1}{222s + 1}$$

Reglerparameter bei $T_m=150$ s	$K_{P3} = 2,7$	$T_{N3} = 42,6$
Reglerparameter bei $T_m=250$ s	$K_{P3} = 1,5$	$T_{N3} = 65,3$
Reglerparameter bei $T_m=350$ s	$K_{P3} = 1,0$	$T_{N3} = 83,4$
pidtune	$K_{P3} = 0,3$	$T_{N3} = 217,4$

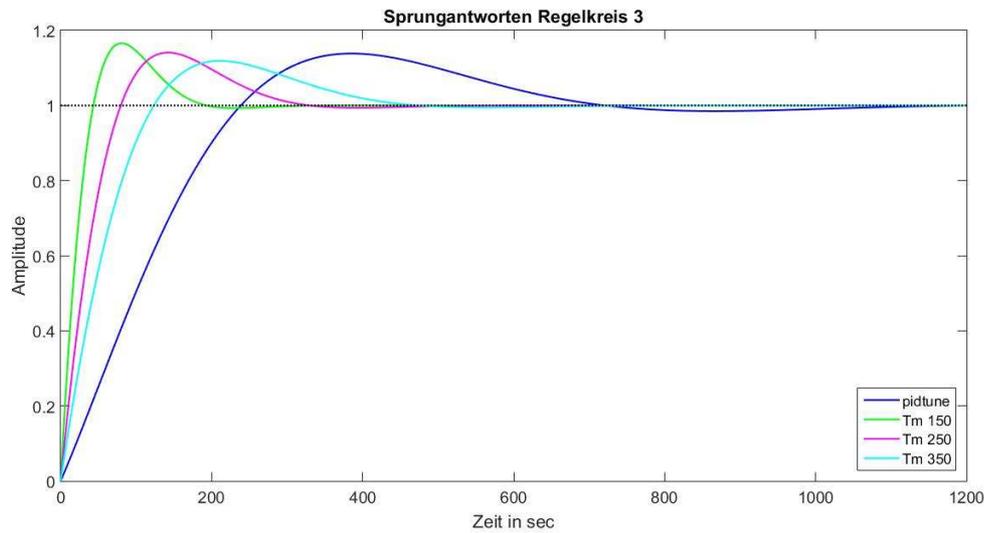


Abbildung 37: Sprungantworten Regelkreis 3

$$G_4(s) = \frac{3,0}{139s + 1}$$

Reglerparameter bei $T_m=150$ s	$K_{P4} = 1,6$	$T_{N4} = 39,5$
Reglerparameter bei $T_m=250$ s	$K_{P4} = 0,8$	$T_{N4} = 56,7$
Reglerparameter bei $T_m=350$ s	$K_{P4} = 0,5$	$T_{N4} = 66,6$
pidtune	$K_{P4} = 0,4$	$T_{N4} = 133,0$

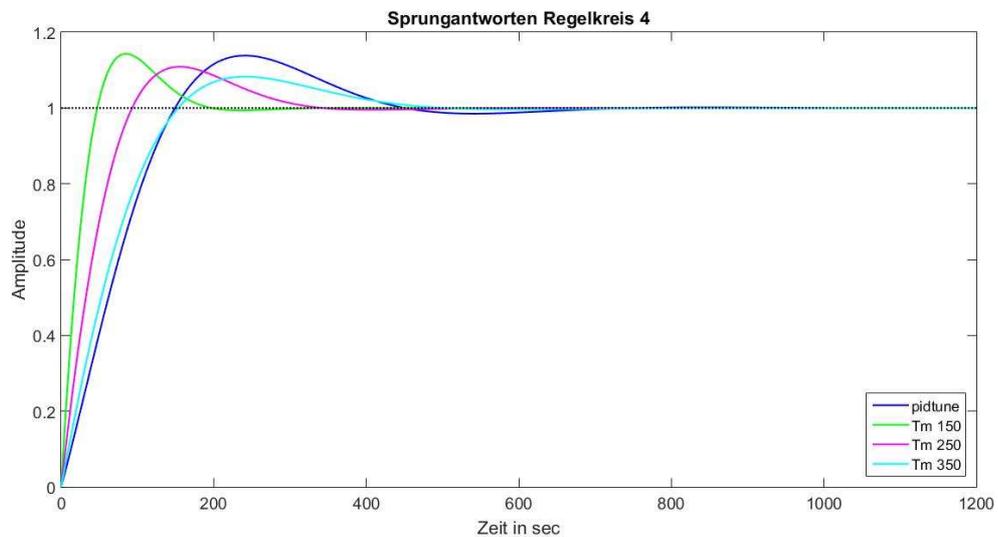


Abbildung 38: Sprungantworten Regelkreis 4

$$G_5(s) = \frac{2,8}{222s + 1}$$

Reglerparameter bei $T_m=150$ s	$K_{P5} = 2,1$	$T_{N5} = 41,0$
Reglerparameter bei $T_m=250$ s	$K_{P5} = 1,1$	$T_{N5} = 60,5$
Reglerparameter bei $T_m=350$ s	$K_{P5} = 0,7$	$T_{N5} = 74,1$
pidtune	$K_{P5} = 0,4$	$T_{N5} = 151,5$

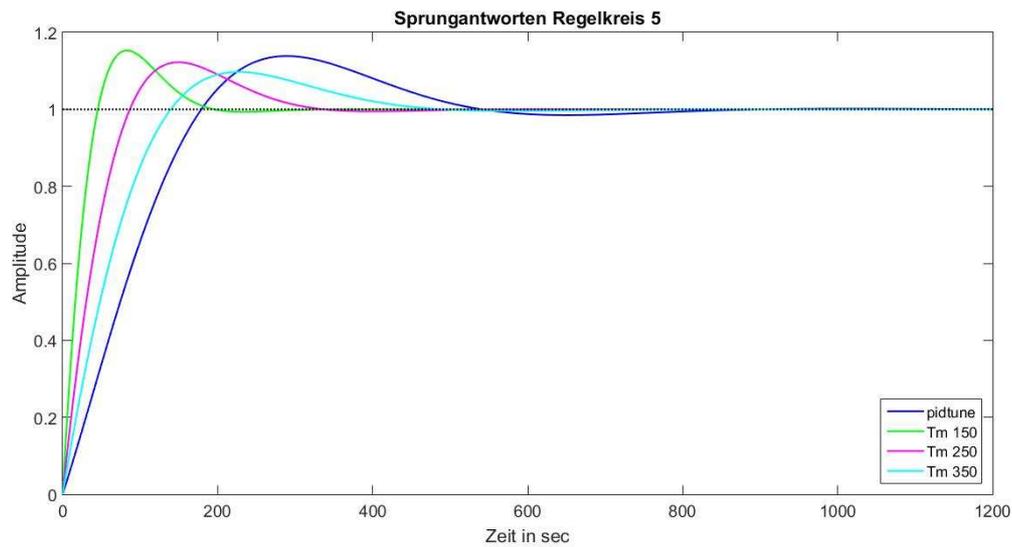


Abbildung 39: Sprungantworten Regelkreis 5

$$G_6(s) = \frac{3,3}{166s + 1}$$

Reglerparameter bei $T_m=150$ s	$K_{P6} = 2,4$	$T_{N6} = 42,3$
Reglerparameter bei $T_m=250$ s	$K_{P6} = 1,3$	$T_{N6} = 64,3$
Reglerparameter bei $T_m=350$ s	$K_{P6} = 0,8$	$T_{N6} = 81,5$
pidtune	$K_{P6} = 0,3$	$T_{N6} = 217,4$

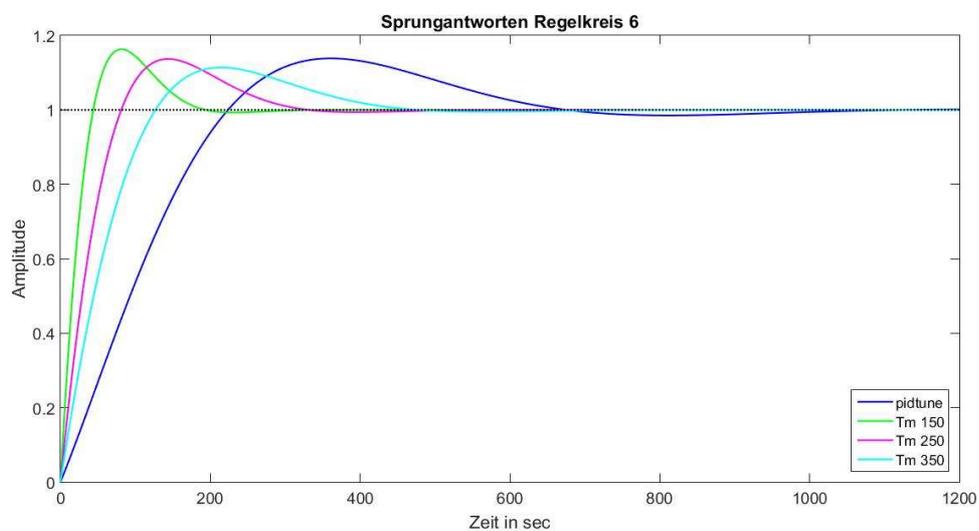


Abbildung 40: Sprungantworten Regelkreis 6

Die Auswertung des Systems V3.1 bestätigt, dass sich die Schalen nicht symmetrisch verhalten und sechs unterschiedliche Parameterpaare für die Regler bestimmt werden mussten, um die Vorgaben zu erfüllen. Das ist begründet durch die unterschiedliche Geometrie der Gasanschlüsse, die Lage der Temperaturfühler in den Schalen und die Montage der Klappen, die aufgrund des Nachrüstens nicht identisch erfolgen konnte. Ansonsten haben die Klappen zu einem langsameren Aufheizen mit einer geringeren Verstärkung der Strecke geführt. Diese Nachteile wirken sich jedoch positiv auf das homogene Aufheizen im Probenraum aus. Die Auswahl ist auf eine Überschwingzeit von 250 s gefallen, weil alle Temperaturruten in der Schale sich nach einem Überschwingen dem Sollwert annähern und nicht wie bei  $T_m = 150$  s erst unter den Sollwert fallen. Bei einer Überschwingzeit von  $T_m = 350$  s dagegen ist die Ausregelzeit zu lang, dass führt zu einem Überschwingen auf dem Probenträger.

### 8.2.2 Nachweis

Der Nachweis für den Einsatz einer dezentralen Regelung erfolgt über die Berechnung der Rückführdifferenzmatrix. In diesem Fall wird mit den Gleichungen 4.40 eine Matrix  $F_1(s)$  für die linke Schale und eine Matrix  $F_2(s)$  für die rechte Schale ermittelt. Dadurch entstehen zwei  $3 \times 3$  Matrizen, die mit der Gleichung 4.41 auf Zeilendominanz geprüft werden.

Die Zahlenwerte, der Matrizen  $K_1(s)$ ,  $K_2(s)$ ,  $G_1(s)$  und  $G_2(s)$  sind in dem vorherigen Kapitel einzusehen und werden nicht nochmal aufgeführt. Mit den Beträgen der Amplitude wird gezeigt, ob die Bedingungen für den Einsatz einer dezentralen Regelung erfüllt sind.

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$K_1(s) = \begin{pmatrix} (K_{P1} \cdot (T_{N1} + 1)) / (T_{N1} \cdot s) & 0 & 0 \\ 0 & (K_{P2} \cdot (T_{N2} + 1)) / (T_{N2} \cdot s) & 0 \\ 0 & 0 & (K_{P3} \cdot (T_{N3} + 1)) / (T_{N3} \cdot s) \end{pmatrix}$$

$$G_1(s) = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{pmatrix}$$

$$F_1(s) = I + K_1(s) \cdot G_1(s)$$

$$|F_{1,11}(s)| = 57 \text{ dB} \not\approx |F_{1,12}(s) + F_{1,13}(s)| = 59 \text{ dB}$$

$$|F_{1,22}(s)| = 51 \text{ dB} \not\approx |F_{1,21}(s) + F_{1,23}(s)| = 60 \text{ dB}$$

$$|F_{1,33}(s)| = 49 \text{ dB} \not\approx |F_{1,31}(s) + F_{1,32}(s)| = 61 \text{ dB}$$

$$K_2(s) = \begin{pmatrix} (K_{P4} \cdot (T_{N4} + 1))/(T_{N4} \cdot s) & 0 & 0 \\ 0 & (K_{P5} \cdot (T_{N5} + 1))/(T_{N5} \cdot s) & 0 \\ 0 & 0 & (K_{P6} \cdot (T_{N6} + 1))/(T_{N6} \cdot s) \end{pmatrix}$$

$$G_2(s) = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{pmatrix}$$

$$F_2(s) = I + K_2(s) \cdot G_2(s)$$

$$|F_{2,11}(s)| = 51 \text{ dB} \not\approx |F_{2,12}(s) + F_{2,13}(s)| = 52 \text{ dB}$$

$$|F_{2,22}(s)| = 50 \text{ dB} \not\approx |F_{2,21}(s) + F_{2,23}(s)| = 59 \text{ dB}$$

$$|F_{2,33}(s)| = 48 \text{ dB} \not\approx |F_{2,31}(s) + F_{2,32}(s)| = 61 \text{ dB}$$

Weil keines der Hauptdiagonalelemente der beiden Matrizen  $F_1(s)$  und  $F_2(s)$  größer ist als die Summe der Elemente der jeweiligen Zeile ist die Bedingung für den Einsatz einer dezentralen Regelung nicht erfüllt. Die Bedingung gilt für dieses System jedoch nur bedingt, weil der Aufbau für eine homogene Aufheizung im Probenraum konzipiert ist.

Die Experimente während der Machbarkeitsanalyse haben gezeigt, dass die Kopplungen vernachlässigt werden können, aber auch, dass die Vorgabe von unterschiedlichen Sollwerten innerhalb einer Schale durch die thermischen Kopplungen nur eingeschränkt möglich ist.

### 8.2.3 Integration des Simulink Modells

Nach der Auslegung der Reglerparameter in Matlab und dem Verknüpfen der notwendigen Blöcke in Simulink kann das Modell konvertiert und in TwinCAT eingefügt werden. Weil die notwendige Lizenz aus Unterkapitel 7.3 bereits installiert ist, kann das TwinCAT Target in dem Simulink Modell ausgewählt unter Simulation und dem Reiter Model Configuration Parameters ausgewählt werden.

Eine weitere wichtige Einstellung ist der Simulink Solver. Für die Wandlung des Modells muss dieser auf die gleiche Zykluszeit wie die Task in TwinCAT eingestellt werden, z.B. 10ms. Außerdem müssen die Priorität der Task und des Simulink Modells übereinstimmen.

Nach der richtigen Konfiguration kann das Modell mit dem Button Generate Code übersetzt werden. Durch die Wandlung entsteht ein sogenanntes TcCOM Object, das in das TwinCAT Projekt eingefügt wird. In dem Projekt besteht die Möglichkeit aus allen erstellten TcCOM Objects das passende auszuwählen (Abb. 41).

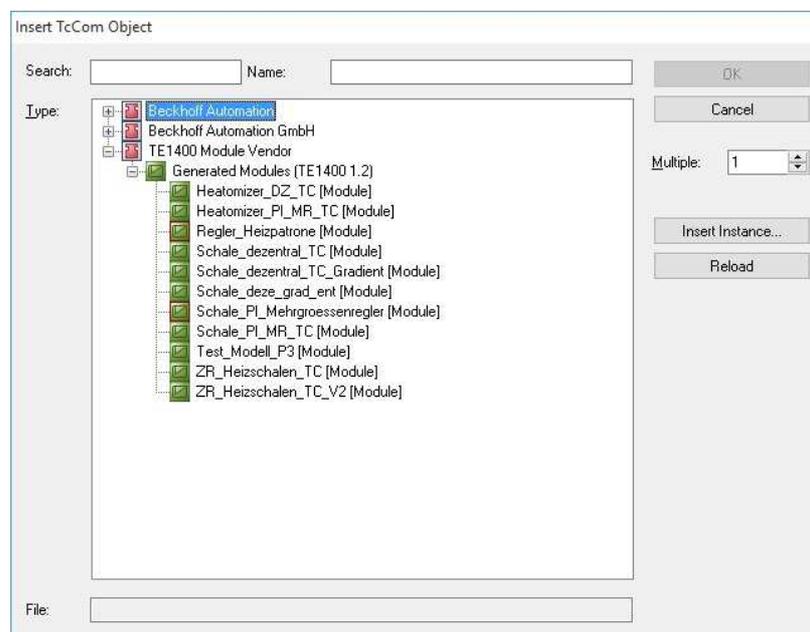


Abbildung 41: Auswahl TcCOM Objekt (Screenshot)

Das ausgewählte Objekt erscheint auf der Oberfläche, wie auf der Abbildung 41 dargestellt und kann aktiviert werden. Weiterhin erscheinen die konfigurierten Ein- und Ausgänge als Input und Output Variablen und müssen mit den passenden globalen Variablen des TwinCAT Projektes verknüpft werden. Hinter dem großen Block auf dem unteren Screenshot der Abbildung 42 befinden sich die sechs dezentralen PI-Regler mit dem ermittelten Koeffizienten für die Sollwerte der Schalentemperaturen. Damit der User einen Sollwert, in diesem Fall Setpoint\_S vorgeben kann, wird der Sollwert jeder Patrone mit Koeffizienten ermittelt. Die berechneten Sollwerte werden dann an die Software übergeben und in der Visualisierung angezeigt.

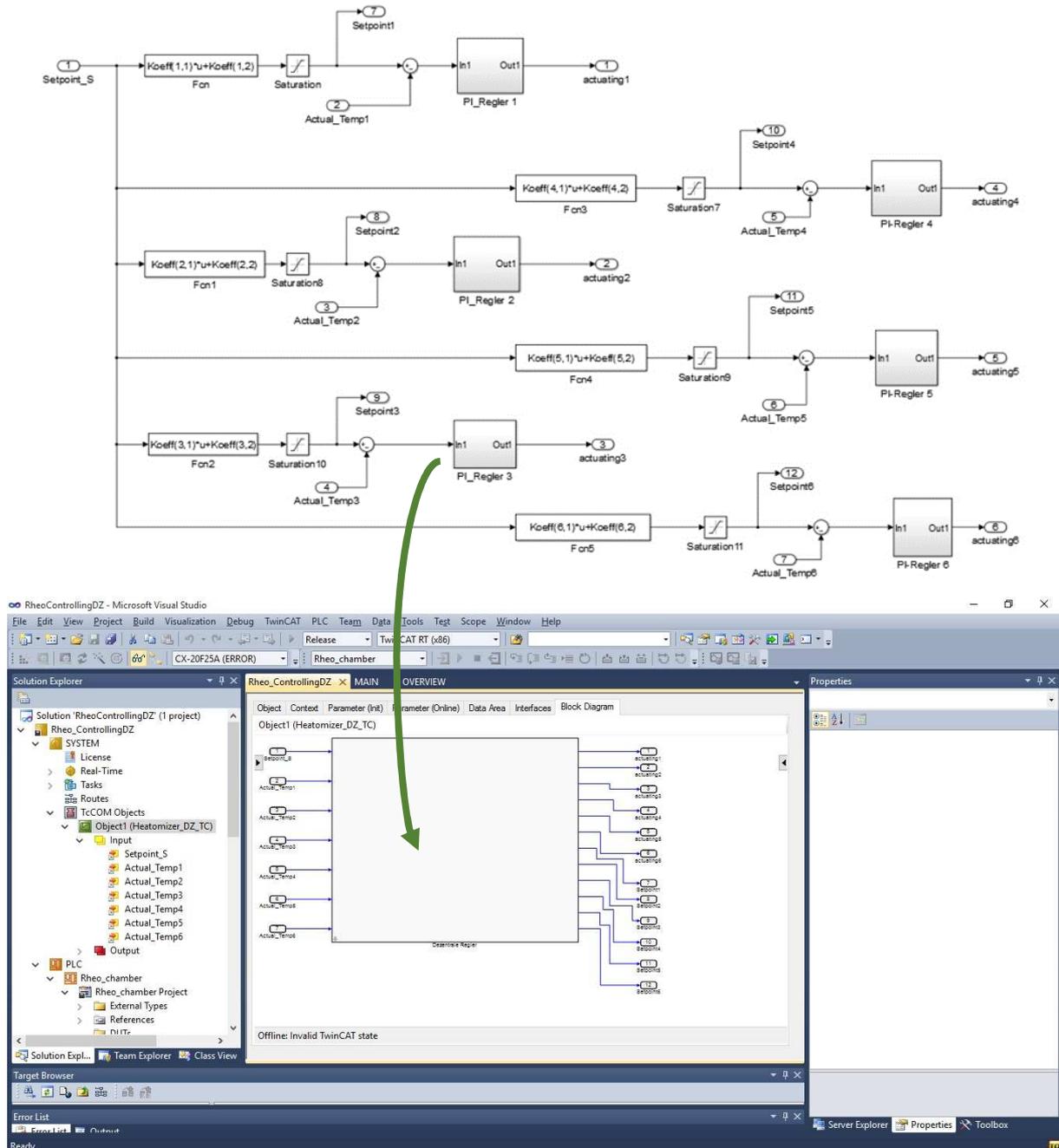


Abbildung 42: Dezentrale Regelung in TwinCAT

### 8.2.4 Ermittlung der Temperaturgradienten

Nach der erfolgreichen Integration der dezentralen Regelung, ist das nächste Ziel den Temperaturgradienten zwischen den Schalen und dem Probenträger und die Verteilung der Temperatur auf dem Probenträger zu ermitteln und ggf. zu optimieren. Der erste Ansatz den Gradienten über einen Temperaturfühler an verschiedenen Positionen auf dem Probenträger zu bestimmen, zeigte vielversprechende Ergebnisse, allerdings zeigte sich auch, dass diese Methode nicht hinreichend genau ist. Hieraus ist die Idee entstanden, eine Messgeometrie zu entwickeln und mit deren Hilfe die Temperatur gleichzeitig an verschiedenen Positionen zu messen. Die Temperaturverteilung soll auf einer originalen Messeinrichtung aus Aluminium mit thermisch fest kontaktierten und radial symmetrisch angeordneten Sensoren gemessen werden. Aufgrund der Geometrie des Probenträgers und des Temperaturbereichs wurden Thermoelemente verwendet, die mit Hilfe eines Keramikklebers in 1,5mm tiefe Bohrungen auf der Rückseite der Messeinrichtung eingeklebt wurden (Abb. 43). TS 1 bis TS 6 sind die Messpunkte für die Temperaturen in den Schalen und TP 1 bis TP 6 die Messpunkte auf dem Probenträger.

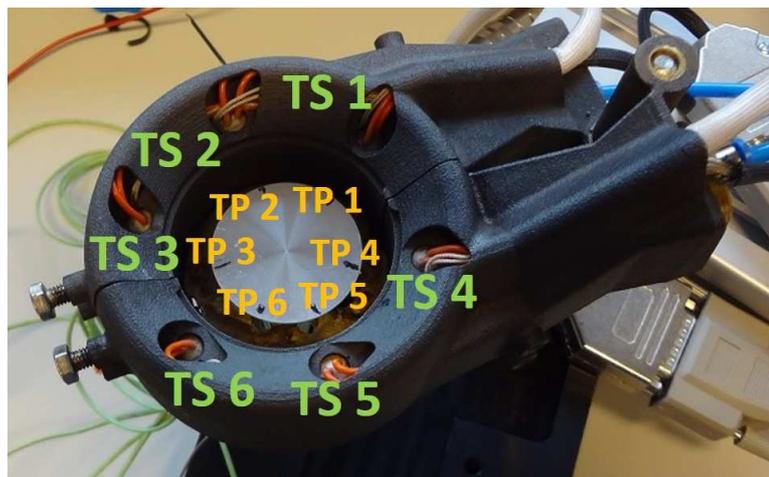


Abbildung 43: Heizsystem mit Probenträger 1 und Nomenklatur

Die folgenden Tabellen zeigen den Temperaturgradienten zwischen Schale und Probenträger 1 und die Abweichung auf dem Probenträger 1 ohne und mit Klappen.

TS in °C	50,0	84,0	113,0	136,0	150,0	180,0	202,0
TP 1 in °C	47,2	78,8	106,0	126,6	140,0	166,2	187,2
TP 2 in °C	46,9	78,0	104,9	125,1	138,6	164,9	186,2
TP 3 in °C	47,4	78,6	105,6	126,3	139,5	165,8	187,0
TP 4 in °C	47,0	78,6	105,6	126,3	139,7	165,6	186,7
TP 5 in °C	47,1	78,3	104,6	125,1	138,0	162,6	184,3
TP 6 in °C	47,7	79,0	105,7	126,3	139,6	165,5	186,7
Max. T in °C	47,7	79,0	106,0	126,6	140,0	166,2	187,2
Min. T in °C	46,9	78,0	104,6	125,1	138,0	162,6	184,3
$\Delta T_{\max}$ in K	0,8	1,0	1,4	1,5	2,0	3,6	2,9

Tabelle 1: Abweichung der Temperaturen am Probenträger 1 ohne Klappen

Mit den Abweichungen aus Tabelle 1 ergeben sich die folgenden Koeffizienten für die Solltemperaturen in der Schale:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 1,08 & b_1 &= -1,84 \\
 m_2 &= 1,10 & b_2 &= -1,44 \\
 m_3 &= 1,09 & b_3 &= -1,94 \\
 m_4 &= 1,09 & b_4 &= -1,79 \\
 m_5 &= 1,12 & b_5 &= -3,17 \\
 m_6 &= 1,10 & b_6 &= -2,67
 \end{aligned}$$

TS in °C	50,0	84,0	113,0	136,0	150,0	180,0	200,0	250,0
TP 1 in °C	47,0	78,2	104,6	125,6	138,1	164,8	182,3	228,8
TP 2 in °C	47,0	78,2	104,9	126,0	138,8	165,6	183,4	229,4
TP 3 in °C	47,8	79,4	106,1	127,5	140,3	167,5	185,5	231,9
TP 4 in °C	47,0	78,0	104,2	125,3	137,8	164,3	182,0	227,3
TP 5 in °C	47,6	79,0	105,6	125,3	139,5	166,1	183,8	229,6
TP 6 in °C	47,5	78,9	105,3	126,8	139,3	166,3	184,3	230,3
Max. T in °C	47,8	79,4	106,1	127,5	140,3	167,5	185,5	231,9
Min. T in °C	47,0	78,0	104,2	125,3	137,8	164,3	182,0	227,3
$\Delta T_{\max}$ in K	0,8	1,4	1,9	2,2	2,5	3,2	3,5	4,6

Tabelle 2: Abweichung der Temperaturen am Probenträger 1 mit Klappen

Mit den Abweichungen aus Tabelle 2 ergeben sich die folgenden Koeffizienten für die Solltemperaturen in der Schale:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 1,10 & b_1 &= -2,24 \\
 m_2 &= 1,09 & b_2 &= -2,00 \\
 m_3 &= 1,09 & b_3 &= -2,37 \\
 m_4 &= 1,11 & b_4 &= -2,68 \\
 m_5 &= 1,10 & b_5 &= -3,05 \\
 m_6 &= 1,09 & b_6 &= -2,36
 \end{aligned}$$

$$\text{Solltemperatur Schale}_n = m_n \cdot \text{Solltemperatur Probe} + b_n$$

Die Bestimmung der Gradienten zwischen den Temperaturen in der Schale und im Probenträger erfolgt nach einer Sättigungszeit von ca. 9 min, wenn die Schalentemperatur mit einer Genauigkeit von ungefähr  $\pm 0,2$  K gehalten wird (Abb. 44). Die Tabelle 2 zeigt, dass der Gradient auf dem Probenträger bei der Temperatur von 250 °C im Probenraum auf 4,6 K wächst.

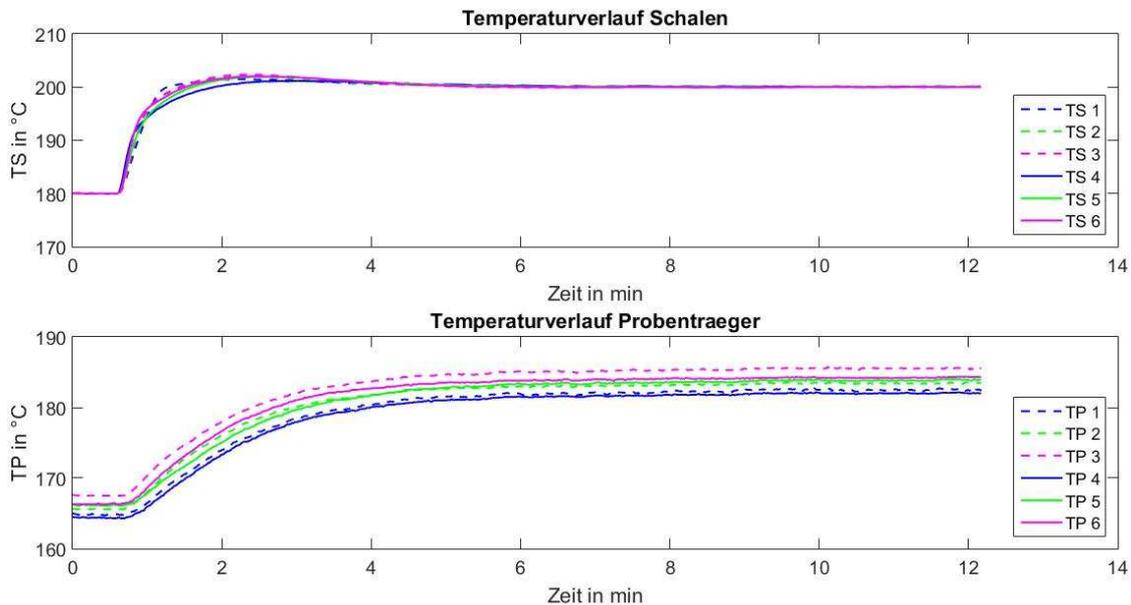


Abbildung 44: Temperaturgradient bei 180 °C am Probenträger 1 mit Klappen

Der Schwachpunkt der ersten Variante des Probenträgers, mit den auf der Rückseite eingeklebten Thermoelementen, ist die instabile und ungleichmäßige Kontaktierung der Sensoren. Zur Gewährleistung einer stabilen und guten thermischen Kontaktierung aller Thermoelemente ist ein zweiter originaler Probenträger entworfen worden. Dafür wird ein weiterer originaler Probenträger aus Aluminium mit symmetrisch angeordneten Nuten (1x1mm) versehen in denen Mantelthermoelemente mit einem Durchmesser von 0,75 mm eingelegt werden. Zur Verbesserung des thermischen Kontaktes werden die Thermoelemente mit einem gesättigten Gemisch aus 2k Epoxy und Kupfer Mikrogranulat eingeklebt. Die Abbildung 45 zeigt den Probenträger mit den Nuten und Thermoelementen.



Abbildung 45: Probenträger mit Thermoelementen (l.), Probenträger mit Nomenklatur (r.)

Die Hoffnung dabei ist, dass die Sensoren gleichermaßen auf der Oberfläche geführt sind und ein thermischer Wackelkontakt aufgrund der maximierten Kontaktfläche auszuschließen ist. Außerdem ist durch die Führung der Thermoelemente in der Welle eine Zugentlastung gewährleistet. Ein weiterer Vorteil dieses Aufbaus ist die drehbare Welle. Bei konstant gehaltener Temperatur in den Schalen kann durch Drehung der Welle mit dem Probenträger das Offset zwischen den Sensoren untereinander genau bestimmt werden.

Die Tabelle 3 zeigt den Temperaturgradienten zwischen Schalen und Probenträger 2 und die Temperaturabweichung auf dem Probenträger 2 mit Klappen.

TS in °C	50,0	75,0	100,0	150,0	175,0	200,0	225,0	250,0
TP 1 in °C	45,3	66,9	88,6	133,2	155,5	177,7	199,8	222,1
TP 2 in °C	45,3	66,9	88,6	133,3	156,0	178,0	200,1	222,2
TP 3 in °C	45,5	67,1	89,0	133,7	156,0	178,4	200,5	222,6
TP 4 in °C	45,4	67,0	88,6	133,2	155,5	177,8	199,8	222,0
TP 5 in °C	45,6	67,3	88,8	133,6	156,0	178,1	200,3	222,5
TP 6 in °C	45,7	67,2	89,0	133,6	155,8	178,1	200,3	222,5
Max. T in °C	45,7	67,3	89,0	133,7	156,0	178,4	200,5	222,6
Min. T in °C	45,3	66,9	88,6	133,2	155,5	177,7	199,8	222,0
$\Delta T_{\max}$ in K	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,7	0,7	0,6

Tabelle 3: Abweichung der Temperaturen am Probenträger 2 mit Klappen

Mit den Abweichungen aus Tabelle 3 ergeben sich die folgenden Koeffizienten für die Solltemperaturen in der Schale:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 1,13 & b_1 &= -0,52 \\
 m_2 &= 1,13 & b_2 &= -0,43 \\
 m_3 &= 1,13 & b_3 &= -0,65 \\
 m_4 &= 1,13 & b_4 &= -0,62 \\
 m_5 &= 1,13 & b_5 &= -0,82 \\
 m_6 &= 1,13 & b_6 &= -0,90
 \end{aligned}$$

$$\text{Solltemperatur Schale}_n = m_n \cdot \text{Solltemperatur Probe} + b_n$$

Durch den Einsatz des optimierten Probenträgers kann die maximale Temperaturabweichung auf dem Probenträger von 4,6 K auf 0,7 K reduziert werden. Der Temperaturgradient zwischen Schale und Probenträger wächst mit der Temperatur im Probenraum bis auf 28 K bei 250 °C.

Die Bestimmung der Gradienten zwischen den Temperaturen in der Schale und im Probenträger erfolgt nach einer Sättigungszeit von ca. 12 min, wenn die Schalentemperatur mit einer Genauigkeit von ungefähr  $\pm 0,2$  K gehalten wird.

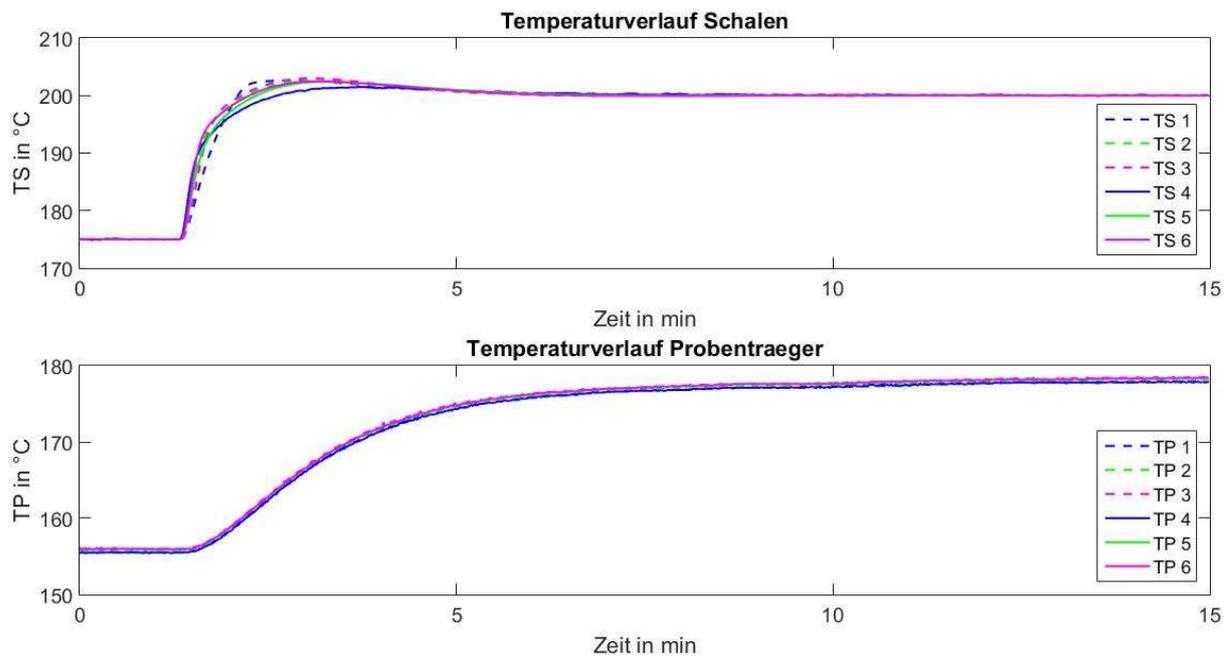


Abbildung 46: Temperaturgradient bei 200 °C am Probenträger 2 mit Klappen

Die Abbildung 46 zeigt ebenfalls, dass die Abweichung auf dem Probenträger deutlich verkleinert werden kann.

### 8.2.5 Vergleich Probenträger 1 ohne und mit Klappen

Zunächst der Vergleich zwischen dem Heizsystem ohne und mit den Klappen, welche im Folgenden als V3 und V3.1 bezeichnet werden. Diese Messungen wurden an dem Probenträger 1 durchgeführt und vergleichen die Systeme hinsichtlich der Regeldifferenz und dem Leistungsverbrauch der Heizpatronen. In dem Temperaturbereich von 20 °C bis zunächst 180 °C werden unterschiedliche Sollwerte für die Temperatur im Probenraum vorgegeben. Mit den berechneten Koeffizienten für den Probenträger 1 werden daraus die jeweiligen Sollwerte für die Temperaturen in den Schalen ermittelt. Die Abbildung 47 vergleicht die Regeldifferenzen der Temperaturen TS vom berechneten Sollwert und die Abweichungen der Temperaturen auf dem Probenträger TP ohne und mit Klappen.

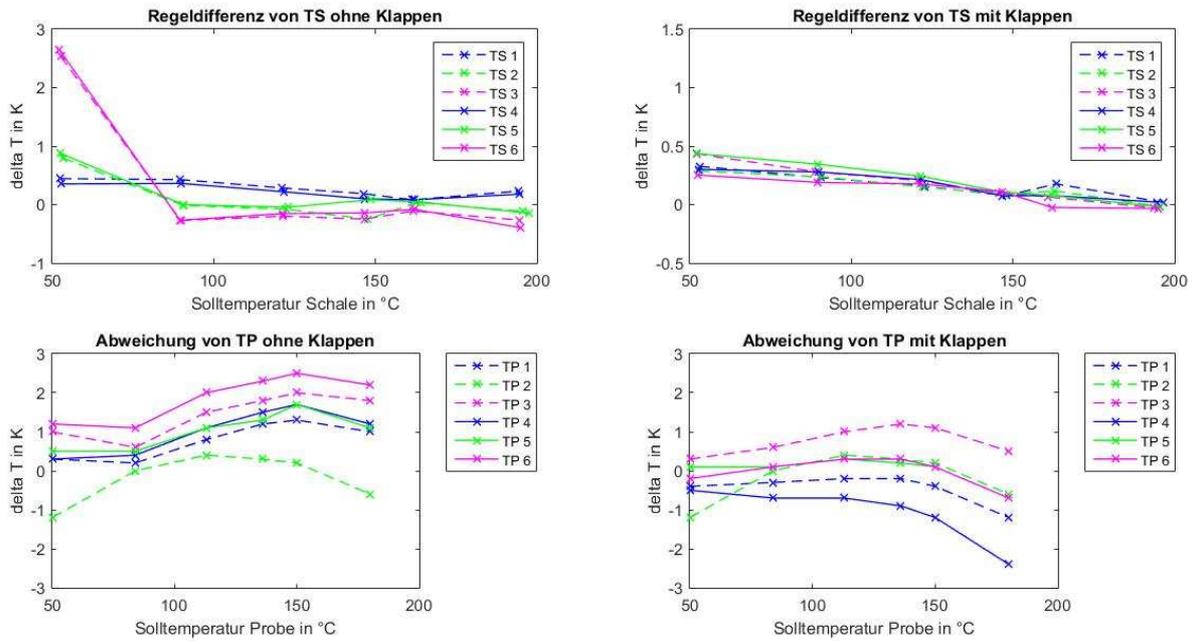


Abbildung 47: Vergleich der Temperaturverläufe ohne und mit Klappen

Der Temperaturverlauf ohne Klappen zeigt, dass die Temperaturen im hinteren Bereich der Schalen, also TS 3 und 6, bei niedrigen Temperaturen bis 80 °C oberhalb des Sollwertes liegen. In der folgenden Leistungskurve (Abb. 48) ist zu erkennen, dass in dem Temperaturbereich vor allem die Patronen 1 und 4 Wärme abgeben (ohne Klappen). Die Wärmekopplung in Strömungsrichtung ohne Klappen ist also so stark, dass die Patronen 3 und 6 nicht mehr auf den Sollwert regeln können.

Ein weiteres Argument für die installierten Klappen ist die Regeldifferenz der Temperaturen in den Schalen. Die Regeldifferenz ist im ganzen Bereich homogener, das zeigen die oberen Graphen der Abbildung 47.

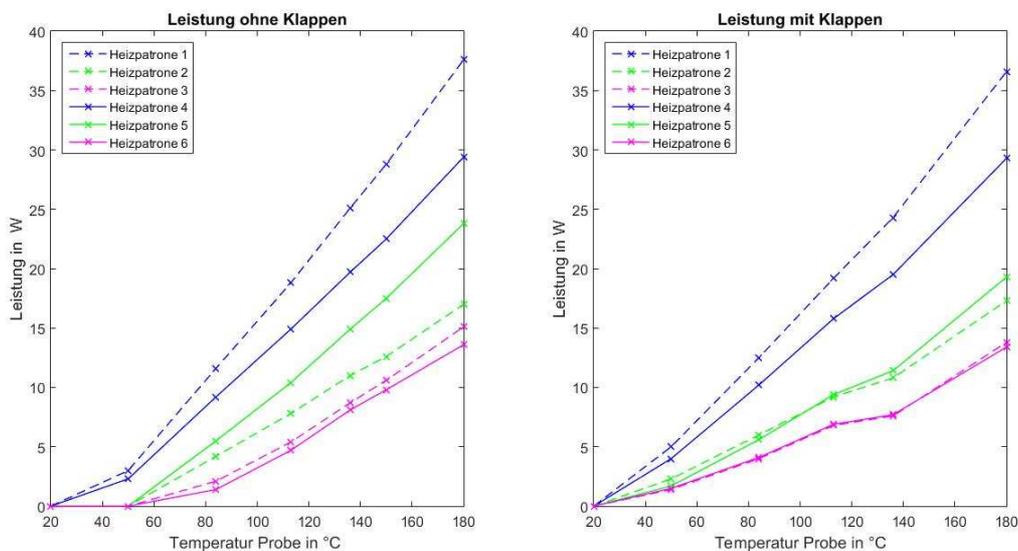


Abbildung 48: Vergleich der Leistungsverläufe ohne und mit Klappen

### 8.2.6 Ergebnisse mit dem Probenträger 1

Nach dem Vergleich des Systems ohne und mit Klappen folgt die Auswertung der dezentralen Regelung mit den beiden unterschiedlich präparierten Probenträgern 1 und 2. Aufgrund der reduzierten Regeldifferenz erfolgen alle weiteren Messungen mit den Klappen.

Die folgenden Abbildungen 49 und 50 zeigen die Auswertungen der dezentralen Regelung bei Sprüngen von Umgebungstemperatur im Labor ungefähr 20 °C auf die Solltemperatur 50 °C und von 125 °C auf 150 °C. Diese Werte wurden ausgewählt, weil in den Temperaturbereichen wichtige Arbeitspunkte des Heizsystems liegen.

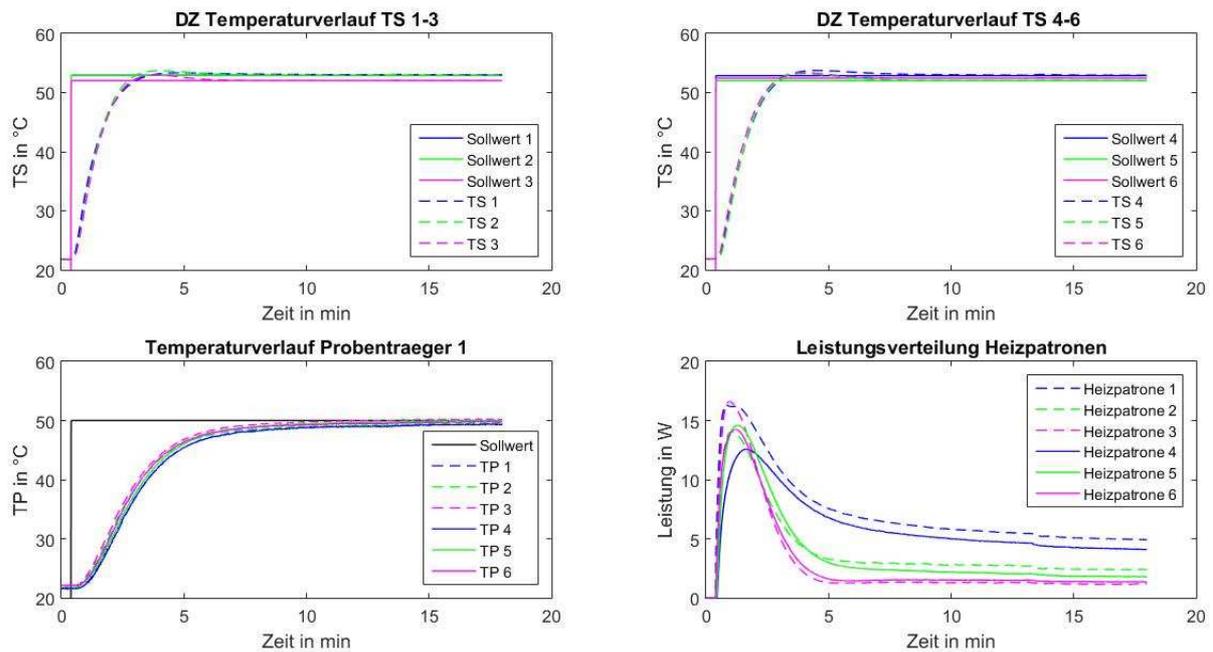


Abbildung 49: Sollwertsprung der Temperatur am Probenträger 1 auf 50 °C

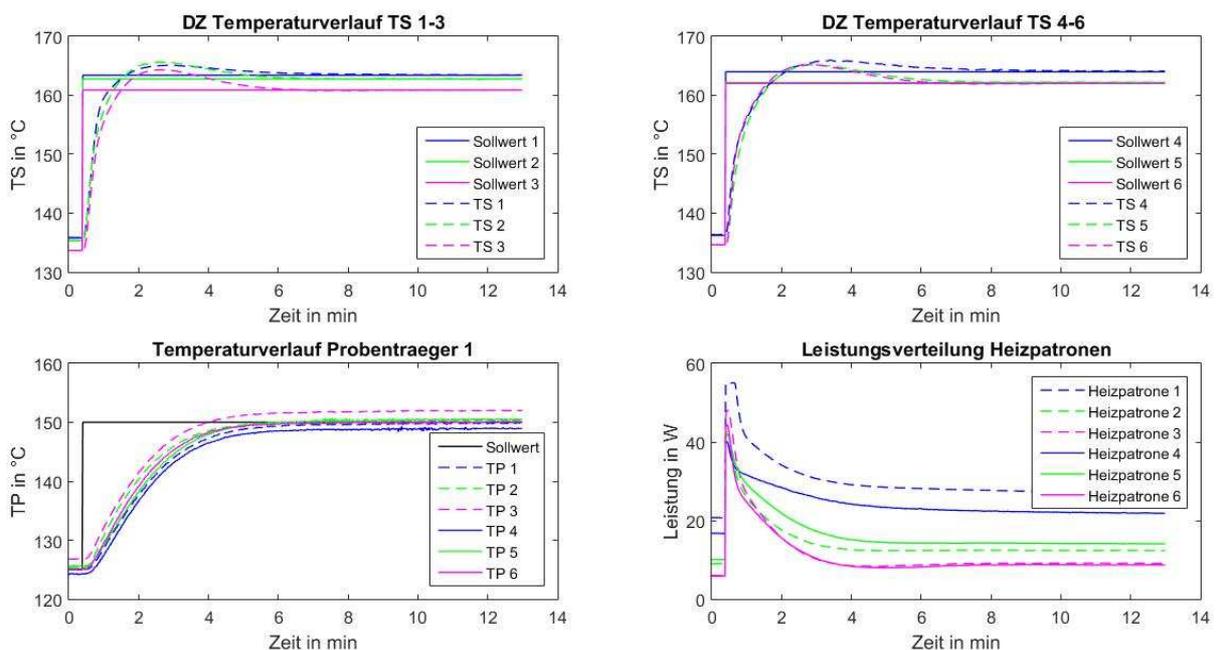


Abbildung 50: Sollwertsprung der Temperatur am Probenträger 1 von 125°C auf 150 °C

Die Sprünge auf die Solltemperatur bilden die Temperaturverläufe in den Schalen und am Probenträger mit den optimierten Reglerparameter ab. Unten links auf den Abbildungen 48 und 49 sind zusätzlich die Leistungsverläufe an den Heizpatronen dargestellt. Während die Sollwerte für die Temperaturen in der Schale bei 50 °C nahezu gleich sind, liegen die Werte bei 150 °C genau 3 K auseinander. Ausschlagend für die unterschiedlichen Sollwerte sind die ermittelten Koeffizienten.

Wie bei der Auslegung der Regler beschrieben, führen die ermittelten Reglerparameter zu einem Überschwingen der Temperaturen in den Schalen. Weil das Überschwingen zum schnelleren Aufheizen des Probenraumes führt und kein Überschwingen der Temperaturen an dem Probenträger zur Folge hat, können die Einstellungen der Regler beibehalten werden. Bei der Auswertung des Sprunges auf 150 °C ist außerdem auffällig, dass die Temperaturen TP 3 und 4 am weitesten von dem Sollwert abweichen. Die folgenden Ergebnisse werden zeigen, dass diese Abweichungen vor allem durch die schlechte Kontaktierung der Messpunkte im Probenträger und den damit ermittelten Koeffizienten begründet sind. Mit den folgenden Abbildungen wird detaillierter auf die Regeldifferenzen der Temperaturen TS eingegangen.

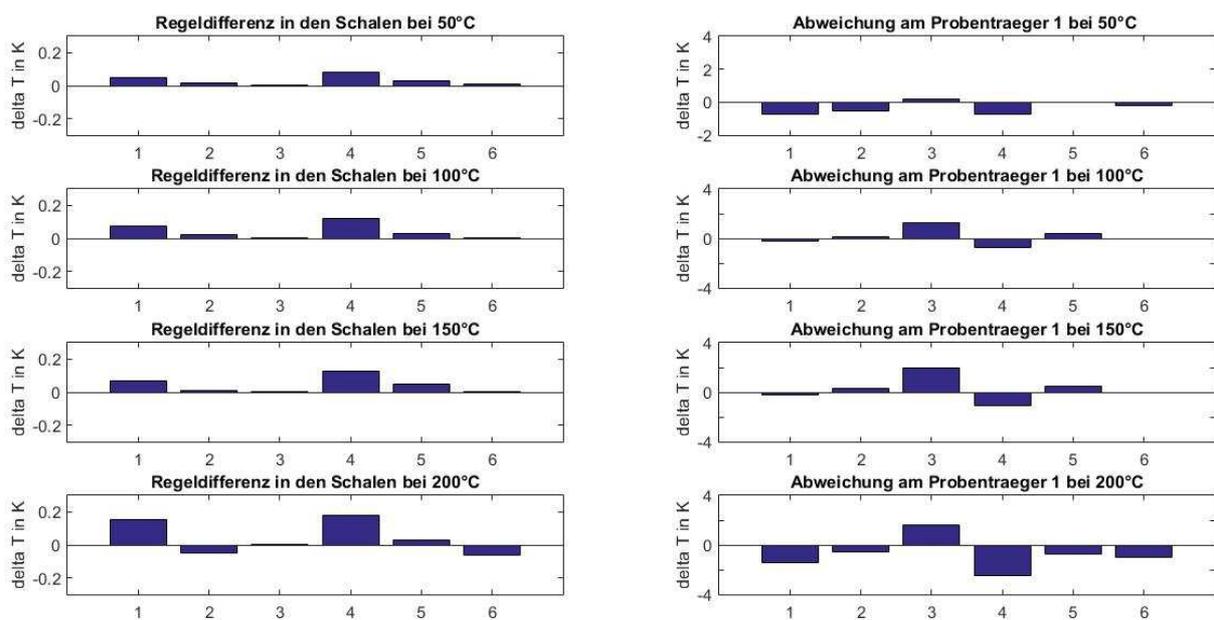


Abbildung 51: Abweichung der Temperaturen am Probenträger 1

Die Balkendiagramme auf der linken Seite der Abbildung 50 zeigen, dass der dezentrale Ansatz des Regelungskonzeptes die Anforderungen an das System noch nicht erfüllt, weil die Regeldifferenz der Temperaturen in den Schalen nicht innerhalb von  $\pm 0,1$  K liegt. Die Ausreißer der Temperaturen am Probenträger stammen, wie später belegt wird, von der schlechten thermischen Kontaktierung der Sensoren. Die schlechte Kontaktierung führt ebenfalls zu dem maximalen Temperaturgradienten am Probenträger von 4,6 K.

Eine andere Darstellung der Abweichung zeigt die nächste Abbildung. Aufgezeichnet sind die Regel- und Standardabweichung der Temperaturen in den Schalen nach einer Sättigungszeit von ca. 15 min für unterschiedliche Sollwerte. Bei jeder Solltemperatur werden die Daten über eine Messzeit von 3 min ermittelt. Die Bestimmung der Temperaturunterschiede erfolgt über die Subtraktion des Istwertes vom Sollwert. Positive Werte zeigen, dass der Istwert über dem Sollwert liegt und negative Werte, dass der Istwert unter dem Sollwert liegt.

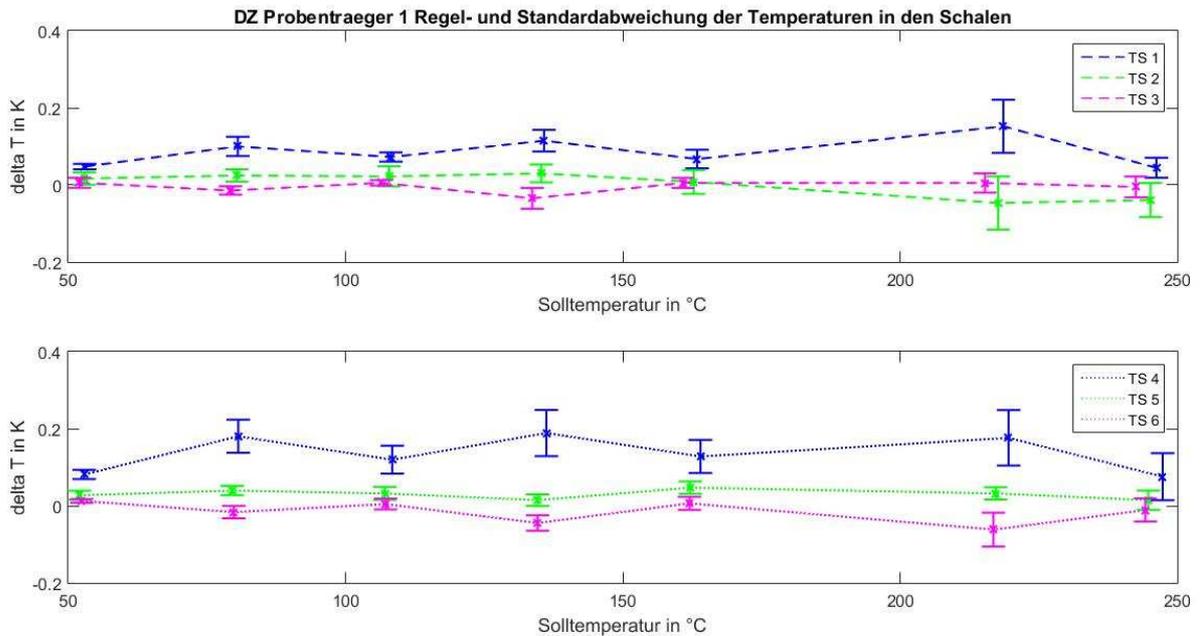


Abbildung 52: Regel- und Standardabweichung mit dem Probenträger 1

Die Ergebnisse zeigen eine Symmetrie zwischen den Temperaturen 1-3 und 4-6, also der linken und rechten Schale. Wie schon bei den Balkendiagrammen zu erkennen ist, liegt die Regelabweichung bei maximal  $\pm 0,2$  K. Die maximale Standardabweichung bei dem jeweiligen Sollwert beträgt  $\pm 0,07$  K.

Die letzte Abbildung zu diesem Unterkapitel zeigt die mittlere Temperaturabweichung aller sechs Sensoren am Probenträger und deren Standardabweichung.

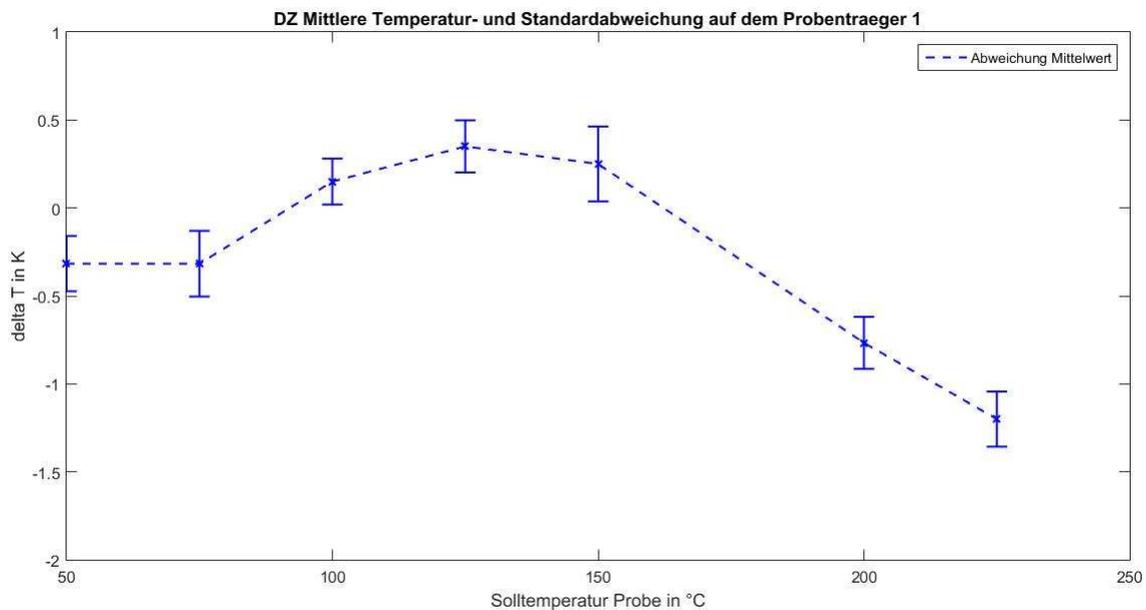


Abbildung 53: Mittlere Temperatur- und Standardabweichung auf dem Probenträger 1

Die Abbildung 53 zeigt, dass die Abweichungen der Temperaturen TP 3 und 4 am Probenträger durch die Berechnung des Mittelwertes nicht zu tragen kommen. Die Abweichung der Temperatur oberhalb von 200 °C ist auf die fehlerhaften Koeffizienten zurückzuführen, die durch die Messungen mit dem Probenträger 1 ermittelt wurden. Diese werden bei der Auswertung des Probenträgers 2 minimiert. Trotzdem ist das Ergebnis, mit einer mittleren Abweichung von 1 K bis 200 °C, bereits innerhalb der Vorgaben.

## 8.2.7 Ergebnisse mit dem Probenräger 2

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für den Probenräger 2. Zum Vergleich mit dem Probenräger 1 umfassen die Ergebnisse ebenfalls die Sprünge der Sollwerte von 20 °C auf 50 °C und von 125 °C auf 150 °C, die Balkendiagrammen und Diagramme mit den Regeldifferenzen und Abweichungen. Allerdings wird bei den Messungen mit dem Probenräger 2 auch die geforderte maximale Temperatur von 250 °C betrachtet.

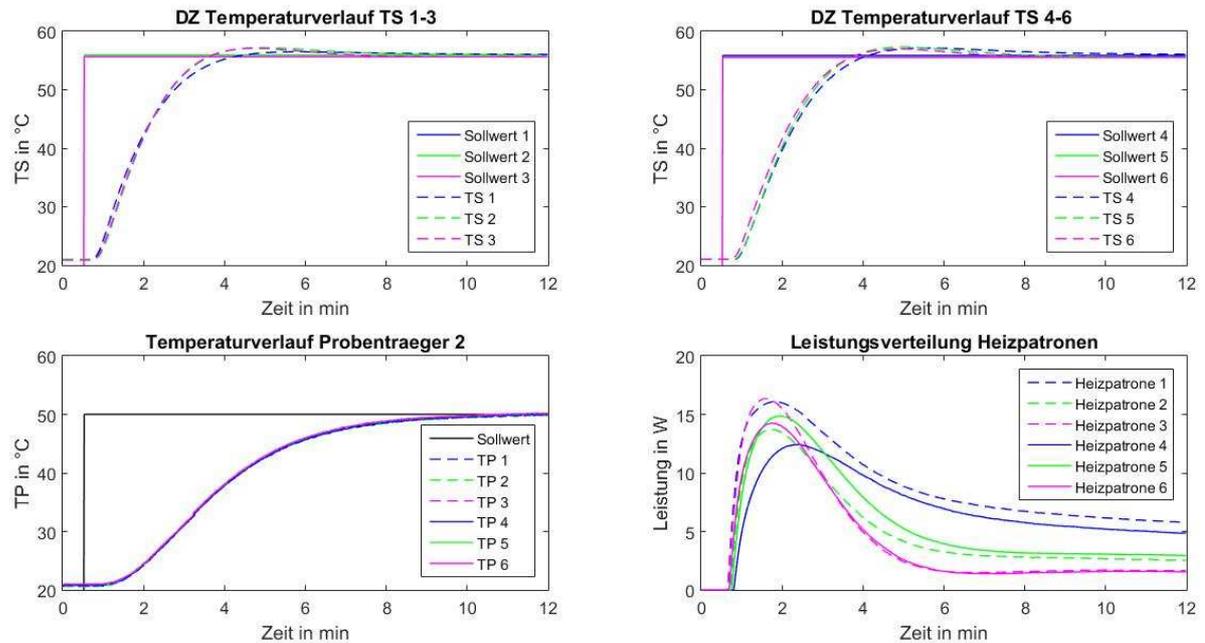


Abbildung 54: Sprung der Solltemperatur am Probenräger 2 auf 50 °C

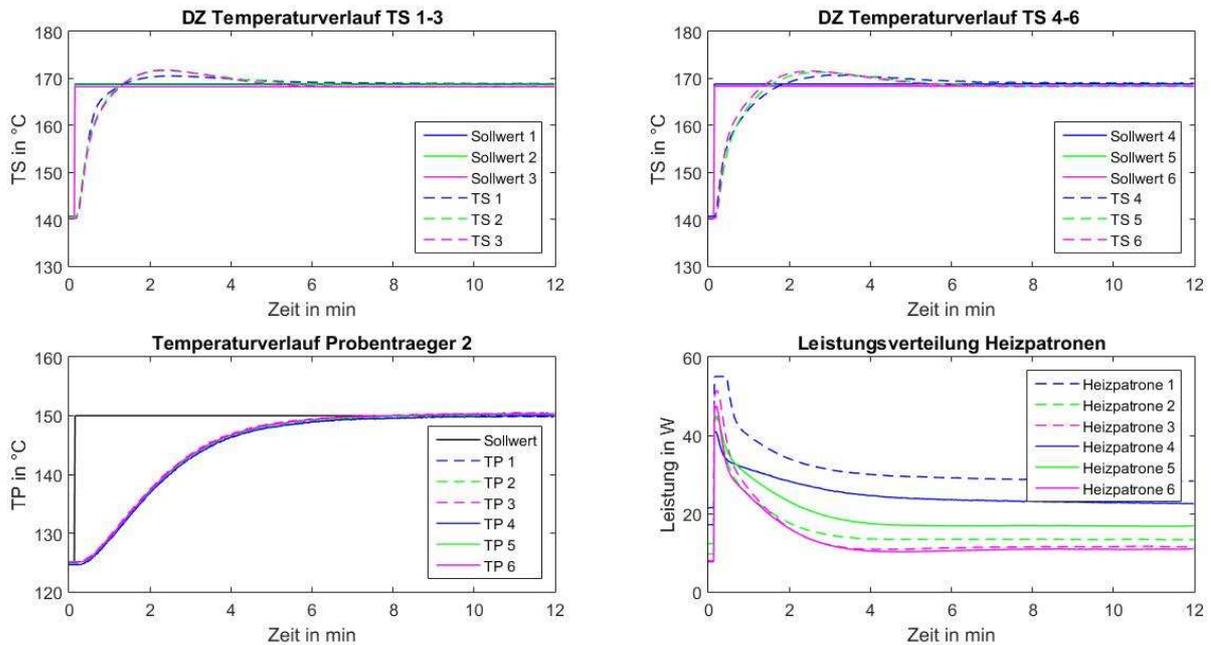


Abbildung 55: Sprung der Solltemperatur am Probenräger 2 von 125 °C auf 150 °C

Der Sprung auf 150 °C (Abb. 55) zeigt, dass die Sollwerte für die Temperaturen in der Schale näher zusammen liegen. Die Sollwerte weisen eine maximale Abweichung von 0,6 k auf. Dadurch können auch die Abweichungen auf dem Probenträger minimiert werden. Ansonsten bleibt das Verhalten des Systems erhalten. Diese Aussage wird mit den folgenden Abbildungen bekräftigt.

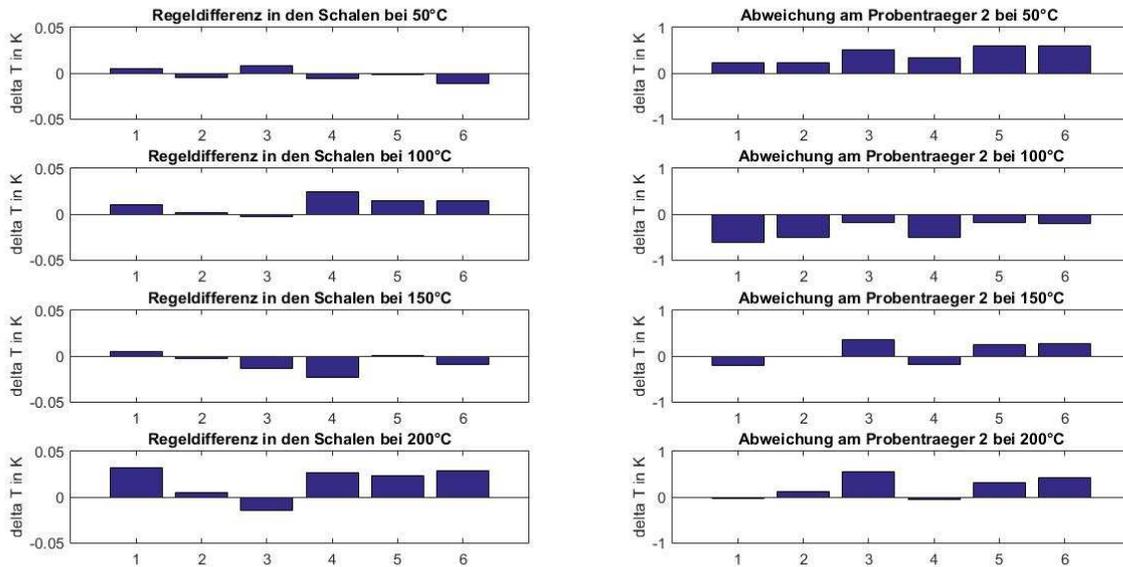


Abbildung 56: Abweichung der Temperaturen bei unterschiedlichen Sollwerten

Die linken Balkendiagramme zeigen, dass die Regeldifferenzen der Temperaturen in der Schale innerhalb von  $\pm 0,1$  K bleiben. Die verbesserte thermische Kontaktierung mit dem Probenträger 2 zeigt eine homogenere Temperaturverteilung in den Schalen und auf dem Probenträger. Die Regelabweichung in den Schalen wird auf der nächsten Abbildung genauer dargestellt. Die Durchführung der Messungen erfolgt wie bei dem Probenträger 1.

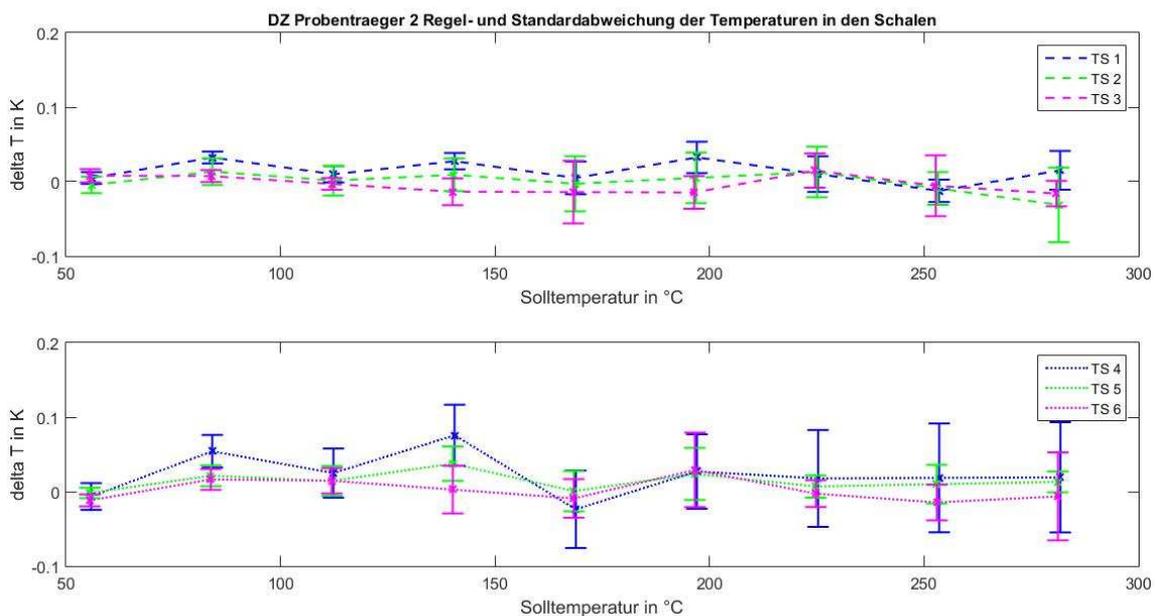


Abbildung 57: Regel- und Standardabweichung mit dem Probenträger 2

Mit den Koeffizienten von Probenräger 2 und den gewählten Einstellungen für die Regler lassen sich die Temperaturen in der Schale über den gesamten Temperaturbereich auf  $\pm 0,1$  K regeln (Abb. 57). Die Standardabweichung der jeweiligen Sollwerte von  $\pm 0,07$  K bleibt bestehen.

Die geregelten Temperaturen der Schalen führen zu der mittleren Temperaturabweichung der sechs Temperatursensoren am Probenräger (Abb. 58).

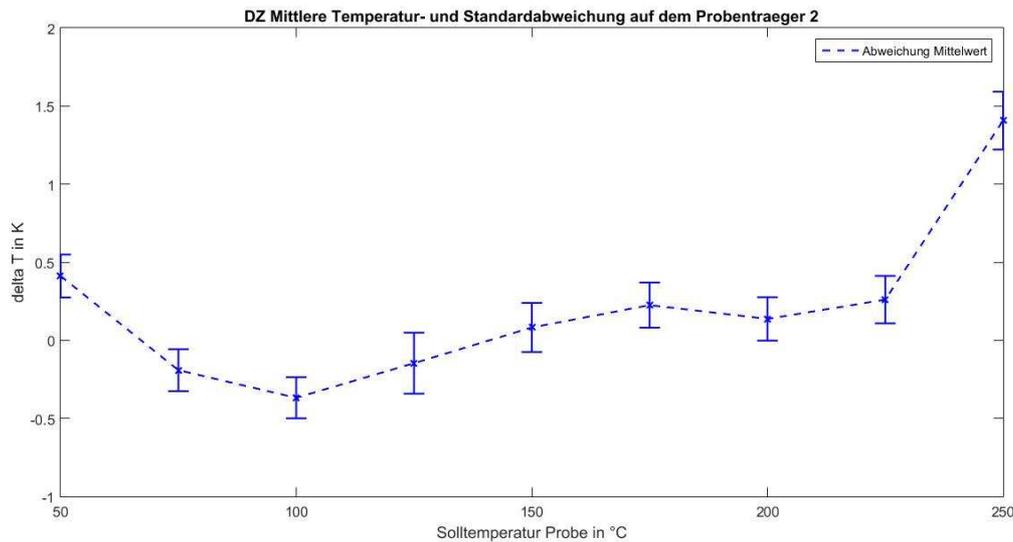


Abbildung 58: Mittlere Temperatur- und Standardabweichungen auf dem Probenräger 2

Die Abbildung 58 zeigt, dass die mittlere Temperaturabweichung am Probenräger 2 mit  $\pm 0,5$  K innerhalb der Anforderungen liegt. Ausnahme bilden die Temperaturen über 225 °C, die die Anforderung von  $\pm 1$  K nicht einhalten können. Weil die Solltemperaturen in den Schalen um  $\pm 0,1$  K gehalten werden und der Graph keinen Trend erkennen lässt, liegt es nahe, dass die beobachteten Abweichungen weiterhin auf Messungenauigkeiten bei der Bestimmung der Koeffizienten basieren. Weitere Quellen für Messungenauigkeiten bilden die Temperatur des Gases und der manuell einstellbare Volumenstrom des Gases. Die Temperatur wird als konstant angenommen, jedoch messtechnisch nicht erfasst. Der Durchfluss wird zwar bei allen Messungen auf den gleichen Wert eingestellt, jedoch führt die manuelle Einstellung zu geringen Abweichungen. Die Hoffnung, mit den in die Oberfläche des Probenr agers eingelassenen Thermoelementen aussagekräftigere Daten zu erhalten, wird erfüllt. Der dezentrale Ansatz mit dem Probenräger 2 erfüllt die Anforderungen an die Regelgüte des Mehrgrößenheizsystems.

### 8.3 PI-Mehrgrößenregler

#### 8.3.1 Bestimmung der Verstärkungsmatrix der Strecke

Bei dem experimentellen Entwurf des Mehrgrößenreglers spiegelt die Verstärkungsmatrix das Verhalten des Systems wieder, deswegen spielt die Bestimmung der Matrix eine wichtige Rolle. Nach der Anregung der einzelnen Stellgrößen, in diesem Fall die Leistung der einzelnen Patronen, werden die Verläufe der Temperaturen in den Schalen, also die Regelgrößen, aufgezeichnet. Wie in dem Kapitel theoretische Grundlagen beschrieben, ergibt sich für jede Stellgröße eine Spalte der Verstärkungsmatrix.

Die Sprungantworten sind bereits bei der dezentralen Regelung dargestellt, deswegen folgt in diesem Kapitel direkt die Verstärkungsmatrix  $K_S$  mit den gemessenen Endwerten.

$$K_S = \begin{pmatrix} \frac{\Delta T_{11}}{\Delta P_1} & \frac{\Delta T_{12}}{\Delta P_2} & \frac{\Delta T_{13}}{\Delta P_3} & \frac{\Delta T_{14}}{\Delta P_4} & \frac{\Delta T_{15}}{\Delta P_5} & \frac{\Delta T_{16}}{\Delta P_6} \\ \frac{\Delta T_{21}}{\Delta P_1} & \frac{\Delta T_{22}}{\Delta P_2} & \frac{\Delta T_{23}}{\Delta P_3} & \frac{\Delta T_{24}}{\Delta P_4} & \frac{\Delta T_{25}}{\Delta P_5} & \frac{\Delta T_{26}}{\Delta P_6} \\ \frac{\Delta T_{31}}{\Delta P_1} & \frac{\Delta T_{32}}{\Delta P_2} & \frac{\Delta T_{33}}{\Delta P_3} & \frac{\Delta T_{34}}{\Delta P_4} & \frac{\Delta T_{35}}{\Delta P_5} & \frac{\Delta T_{36}}{\Delta P_6} \\ \frac{\Delta T_{41}}{\Delta P_1} & \frac{\Delta T_{42}}{\Delta P_2} & \frac{\Delta T_{43}}{\Delta P_3} & \frac{\Delta T_{44}}{\Delta P_4} & \frac{\Delta T_{45}}{\Delta P_5} & \frac{\Delta T_{46}}{\Delta P_6} \\ \frac{\Delta T_{51}}{\Delta P_1} & \frac{\Delta T_{52}}{\Delta P_2} & \frac{\Delta T_{53}}{\Delta P_3} & \frac{\Delta T_{54}}{\Delta P_4} & \frac{\Delta T_{55}}{\Delta P_5} & \frac{\Delta T_{56}}{\Delta P_6} \\ \frac{\Delta T_{61}}{\Delta P_1} & \frac{\Delta T_{62}}{\Delta P_2} & \frac{\Delta T_{63}}{\Delta P_3} & \frac{\Delta T_{64}}{\Delta P_4} & \frac{\Delta T_{65}}{\Delta P_5} & \frac{\Delta T_{66}}{\Delta P_6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 157,5 & 99,0 & 67,0 & 31,0 & 27,0 & 27,0 \\ 55 & 55 & 55 & 55 & 55 & 55 \\ 107,5 & 171,5 & 115,0 & 30,0 & 30,0 & 34,0 \\ 55 & 55 & 55 & 55 & 55 & 55 \\ 91,5 & 126,5 & 177,0 & 31,5 & 34,5 & 44,0 \\ 55 & 55 & 55 & 55 & 55 & 55 \\ 40,0 & 30,5 & 26,0 & 174 & 101,5 & 71,0 \\ 55 & 55 & 55 & 55 & 55 & 55 \\ 39,0 & 35,0 & 35,0 & 100,0 & 163,0 & 116,0 \\ 55 & 55 & 55 & 55 & 55 & 55 \\ 41,0 & 41,0 & 45,5 & 85,0 & 124,5 & 187,0 \\ 55 & 55 & 55 & 55 & 55 & 55 \end{pmatrix}$$

Die Endwerte der Verstärkungsmatrix bestätigen die Aussagen und Ergebnisse, die bei der Entwicklung der dezentralen Regelung ausgeführt wurden. Nur der Endwert von Patrone 5 passt nicht ins Schema, das kann an der Passbohrung der Heizpatrone oder an der Platzierung des Temperatursensors liegen.

Die Kopplungen innerhalb einer Heizschale sind primär durch die Wärmeleitung in dem Metall hergestellt und den Gastrom besonders ausgeprägt. Das Gas strömt jeweils von Heizpatrone 1 und 4 in die Schalen und kann näherungsweise als eine Reihenschaltung betrachtet werden. Die Richtung des Flusses wird vor allem durch die folgende normierte Matrix deutlich. Das Maximum in jeder Spalte präsentiert die angesteuerte Heizpatrone.

$$K_S = \begin{pmatrix} 2,85 & 1,80 & 1,21 & 0,57 & 0,49 & 0,49 \\ 1,95 & 3,11 & 2,09 & 0,55 & 0,55 & 0,62 \\ 1,66 & 2,30 & 3,22 & 0,57 & 0,63 & 0,80 \\ 0,73 & 0,55 & 0,47 & 3,17 & 1,84 & 1,30 \\ 0,71 & 0,63 & 0,64 & 1,82 & 2,96 & 2,11 \\ 0,75 & 0,74 & 0,83 & 1,54 & 2,27 & 3,40 \end{pmatrix}$$

Die Existenzbedingung für einen I-Regler ist für diese Verstärkungsmatrix erfüllt

$$\det(Ks) = 89,6$$

Weil in dem System genauso viele Stell- wie Regelgrößen vorhanden sind, werden die Reglermatrizen  $\tilde{K}_I$  und  $\tilde{K}_P$  aus der Inversen der Statikmatrix berechnet

$$\tilde{K}_P = \tilde{K}_I = K_S^{-1} = \begin{pmatrix} 0,59 & -0,33 & 0,00 & -0,04 & 0,00 & 0,00 \\ -0,30 & 0,79 & -0,40 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -0,07 & -0,39 & 0,61 & 0,00 & 0,00 & -0,06 \\ -0,06 & 0,00 & 0,00 & 0,50 & -0,31 & 0 \\ -0,02 & 0,00 & -0,01 & -0,27 & 0,82 & -0,40 \\ -0,01 & 0,00 & -0,06 & -0,04 & -0,40 & 0,57 \end{pmatrix}$$

Im nächsten Unterkapitel werden die Tuningfaktoren  $\alpha$  und  $\beta$  durch Messreihen optimiert. Die folgenden Formeln zeigen beispielhaft die Zahlenwerte für den I- und P- Anteil eines Tuningfaktors.

$$\alpha = 0,2$$

$$K_I = \alpha \times \tilde{K}_I = \begin{pmatrix} 0,12 & -0,07 & 0,00 & -0,01 & 0,00 & 0,00 \\ -0,06 & 0,16 & -0,08 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -0,01 & -0,07 & 0,12 & 0,00 & 0,00 & -0,01 \\ -0,01 & 0,00 & 0,00 & 0,10 & -0,06 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,05 & 0,16 & -0,08 \\ 0,00 & 0,00 & -0,01 & -0,01 & -0,08 & 0,11 \end{pmatrix}$$

Mit  $\alpha = 0,2$  ist auch die Gegenkopplungsbedingung erfüllt

$$\det(K_S K_I) = 0,000064$$

$$\beta = 6$$

$$K_P = \beta \times \tilde{K}_P = \begin{pmatrix} 3,52 & -1,98 & 0,00 & -0,26 & 0,00 & 0,00 \\ -1,83 & 4,73 & -2,37 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -0,41 & -2,34 & 3,63 & 0,00 & 0,00 & -0,38 \\ -0,33 & 0,00 & 0,00 & 3,00 & -1,85 & 0,00 \\ -0,13 & 0,00 & -0,06 & -1,61 & 4,89 & -2,40 \\ -0,04 & 0,00 & -0,36 & -0,21 & -2,41 & 3,43 \end{pmatrix}$$

### 8.3.2 Einbindung des PI Mehrgrößenreglers

Die Einbindung des PI Mehrgrößenreglers erfolgt wie bei der dezentralen Regelung. Das in Simulink erstellte Modell wird mit Hilfe des Matlab/Simulink Coders gewandelt und in die TwinCAT Umgebung integriert. Die in Simulink erstellten Ein- und Ausgänge können danach mit den Variablen aus der Software verbunden werden. Die Abbildung 59 zeigt das eingebettete Modul bestehend aus einem Block zur Berechnung der Sollwerte für die Temperaturen der Schale, einem Block zur Begrenzung der Stellgrößen auf maximal 65 Watt sowie die Matrizen  $K_I$  und  $K_P$ . Auf der linken Seite des unteren Screenshots sind die automatisch erzeugten Variablen des Simulink Modells zu sehen.

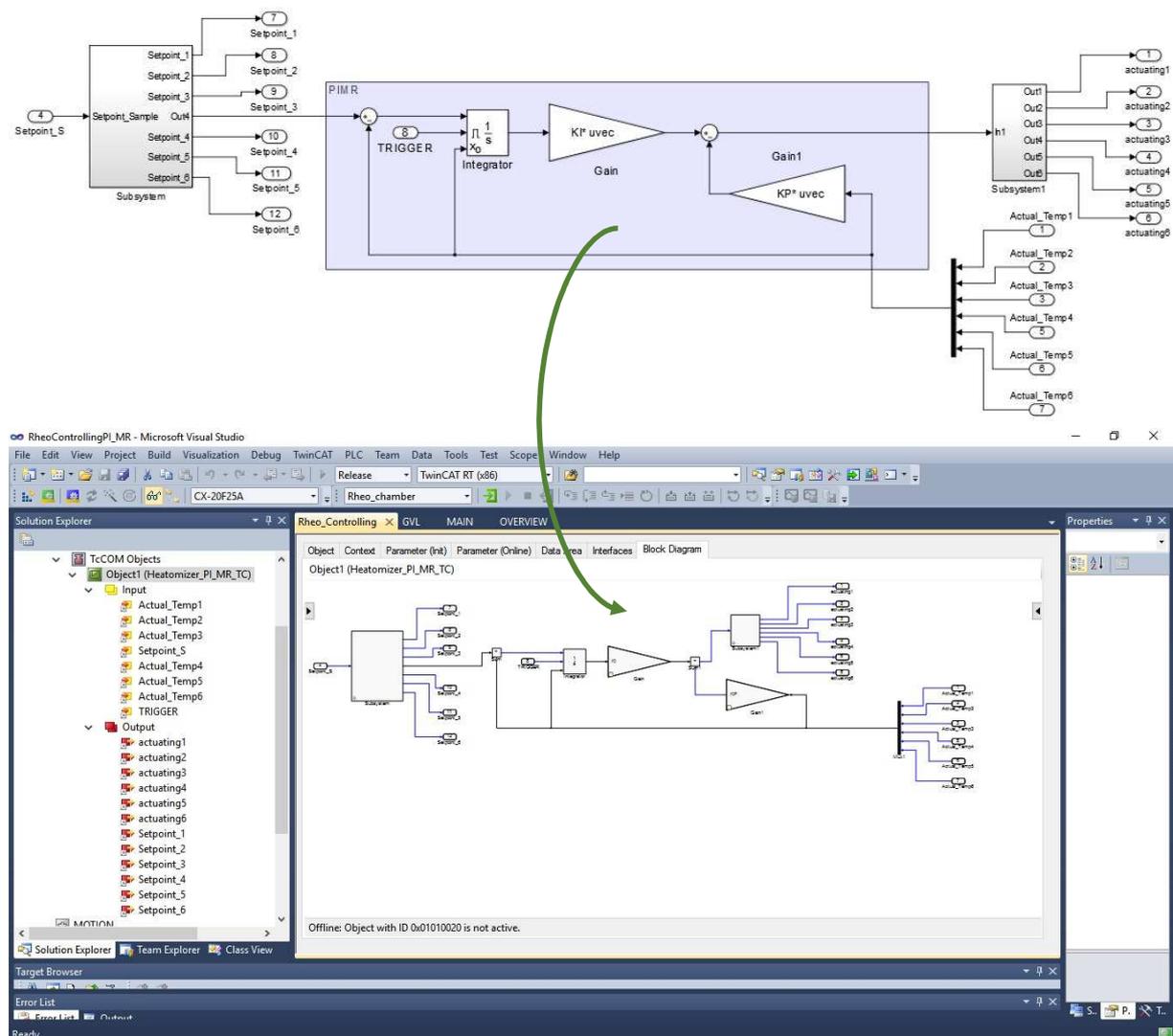


Abbildung 59: Integration des Simulink Modells in TwinCAT

Durch Aktivierung der Freigabe des „External Mode“ in Simulink besteht die Möglichkeit die Tuningfaktoren während des Betriebs des Heizsystems zu verändern. Die Tuningfaktoren werden eingestellt, der Matlab Code ausgeführt und anschließend das Modell mit dem Target verbunden. Die Ergebnisse der Auswahl der Faktoren und des PI- Mehrgrößenreglers werden auf den nächsten Seiten präsentiert und erläutert.

### 8.3.3 Ermittlung der Tuningfaktoren

Nach der Einbindung des Reglers erfolgt die Ermittlung der Tuningfaktoren bei der Verwendung des Probenträgers 2. Aus den Erfahrungen mit dem Probenträger 1, die Daten werden aufgrund der Ergebnisse der dezentralen Regelung nicht aufgeführt, und den theoretischen Grundlagen, die besagen, dass  $\alpha$  klein gehalten werden sollte, kann abgeleitet werden in welchem Bereich sich der Tuningfaktor  $\alpha$  befinden muss. Zum Auffinden der optimalen Einstellung werden Sprünge auf den Sollwert der Temperatur am Probenträger gegeben. Mit den berechneten Koeffizienten wird der Sollwert der einzelnen Patronen bestimmt. Zur Übersichtlichkeit ist in den folgenden Diagrammen nur ein Sollwert aufgezeichnet. Die folgenden Messungen zeigen die Ergebnisse bei Variation des Tuningfaktors  $\alpha$ . Der Regelkreis wird mit unterschiedlichen Regelmatrizen  $K_i$  geschlossen. Die Abbildung 60 zeigt die Verläufe bei den Werten  $\alpha=0,05$  und  $\alpha=0,2$ .

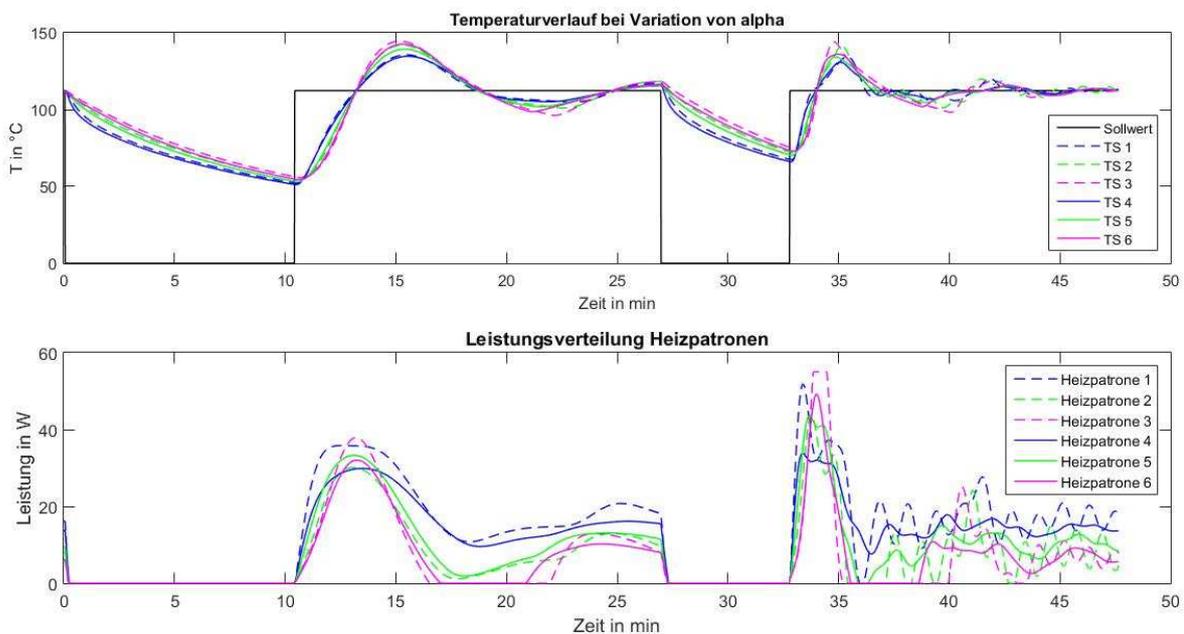


Abbildung 60: Sprungantwort bei Variation von  $\alpha=0,05$ ;  $\alpha=0,2$

Bei  $\alpha \geq 0,2$  beginnen die Stellgrößen zu schwingen, das Überträgt sich auch auf die Regelgrößen. Besonders anschaulich ist das Verhalten bei einem Tuningfaktor von 0,5. Aus Erfahrungen mit dem Probenträger 1 und den Messergebnissen aus der dezentralen Regelung ist die Entscheidung auf einen Tuningfaktor  $\alpha = 0,05$  gefallen. Die Stellgrößen steigen ohne zu schwingen auf einen maximalen Wert und nehmen mit der Zeit einen konstanten Wert an. Die Temperaturen in den Schalen verhalten sich so ähnlich wie bei der dezentralen Regelung. Nach dem Überschwingen erfolgt allerdings noch ein Schwingen um den Sollwert herum.

Um die Auswahl des Tuningfaktors zu festigen sind die Temperatur- und Leistungsverläufe bei  $\alpha=0,5$ ,  $\alpha=0,1$  und  $\alpha=0,08$  dargestellt.

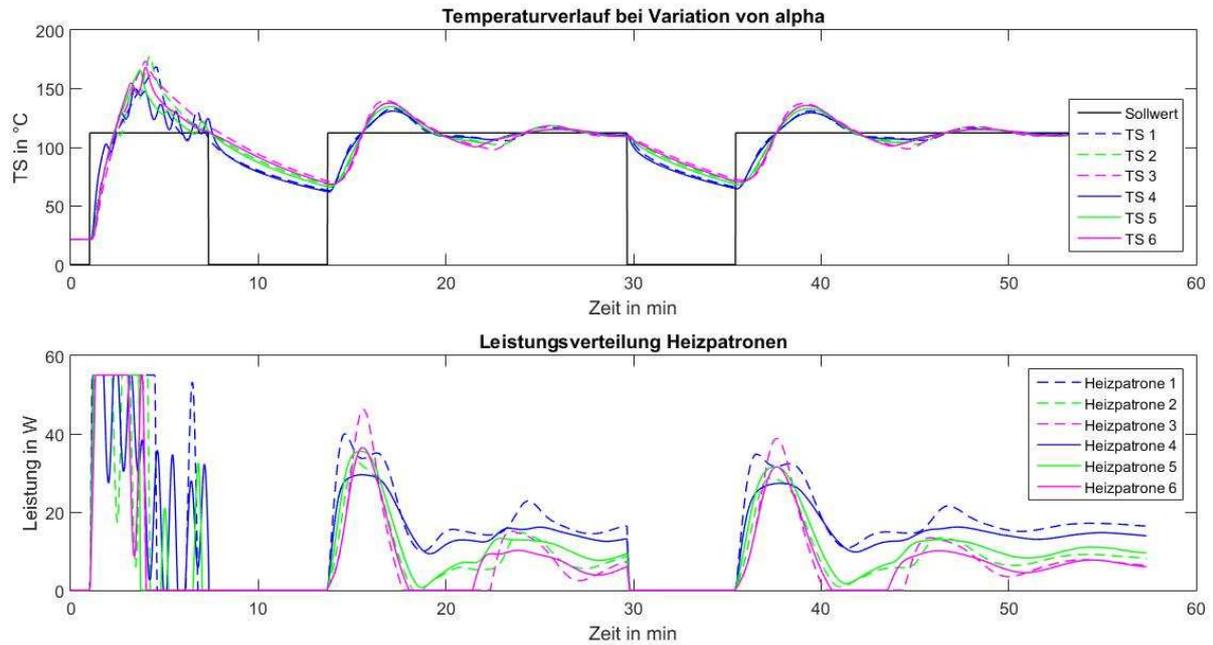


Abbildung 61: Sprungantwort bei  $\alpha=0,5$ ;  $\alpha=0,1$ ;  $\alpha=0,08$

Die Ergebnisse aus der Abbildung 60 werden bestätigt und die Wahl des Tuningfaktors  $\alpha$  bleibt bestehen.

Durch die Einstellung des zweiten Tuningfaktors  $\beta$  wird die Dynamik des Systems optimiert. Als erster Ansatz werden mit einem Wert von  $\beta = 4$  unterschiedliche Solltemperaturen angefahren. Die Auswertung dieser Sollwertsprünge zeigt die folgende Abbildung 62.

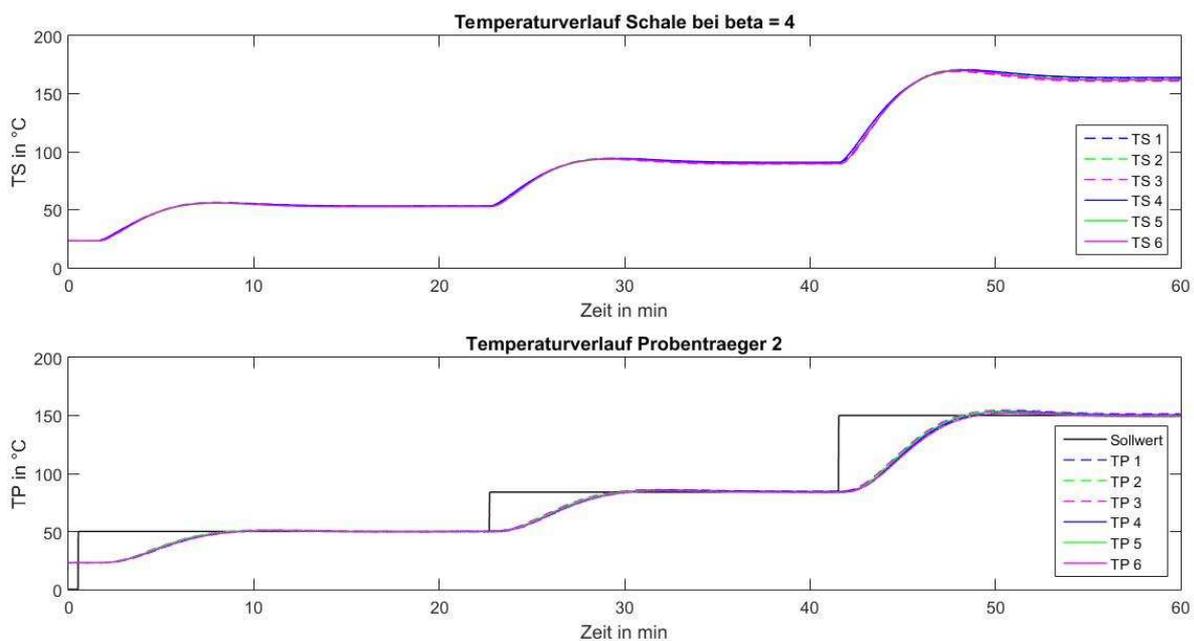


Abbildung 62: Sprungantworten bei  $\beta=4$

Bei Temperaturen unterhalb von 100 °C ist der Faktor ausreichend, allerdings zeigt die Abbildung 62, dass die Temperatur im Probenraum bei höheren Temperaturen zum Überschwingen neigt. Aus diesem Grunde ist der Faktor für höhere Temperaturen durch mehrere Aufheizvorgänge separat ermittelt wurden.

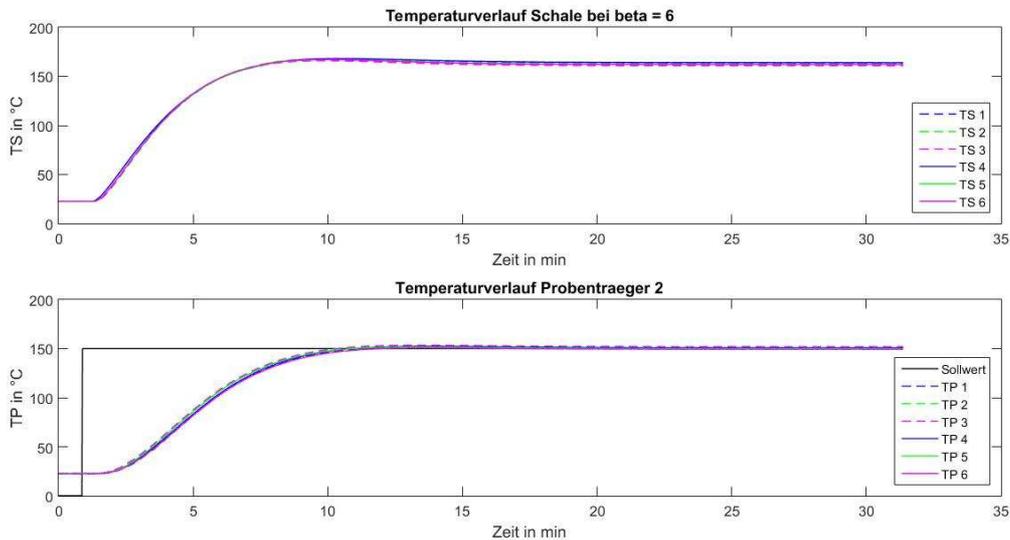


Abbildung 63: Sprungantwort bei  $\beta=6$

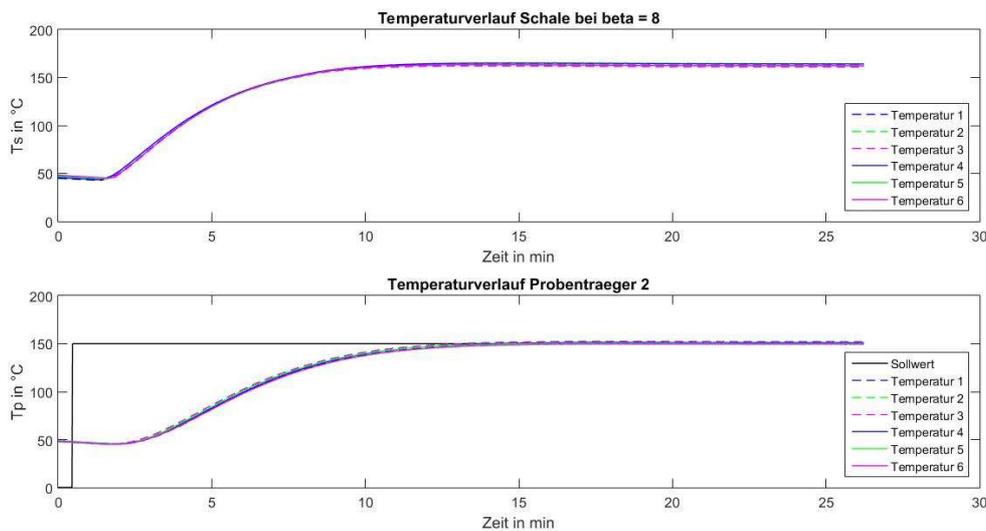


Abbildung 64: Sprungantwort bei  $\beta=8$

Die Auswertungen zeigen, dass für Temperaturen unterhalb von 200 °C im Probenraum  $\beta = 8$  optimal ist. Die Ergebnisse im folgenden Kapitel werden aufzeigen, dass für Temperaturen über 200 °C der Faktor auf 10 erhöht werden kann.

Mit der Erhöhung des Tuningfaktors  $\beta$  steigt die Steilheit der Verläufe der Stellgrößen und die Endtemperatur in der Schale wird schneller erreicht. Diese Maßnahme führt dazu, dass die Temperatur im Probenraum sich dem Sollwert ohne ein Überschwingen annähert. Für die Untersuchungen im nächsten Unterkapitel wird der Tuningfaktor  $\beta = 8$  gesetzt wurden.

### 8.3.4 Ergebnisse des PI-Mehrgrößenreglers am Probenträger 2

Bei dem zweiten Konzept PI-Mehrgrößenregler sind die Temperaturverläufe nach einer sprungartigen Sollwertänderung von 20 °C auf 50 °C und von 100 °C auf 150 °C aufgezeichnet wurden.

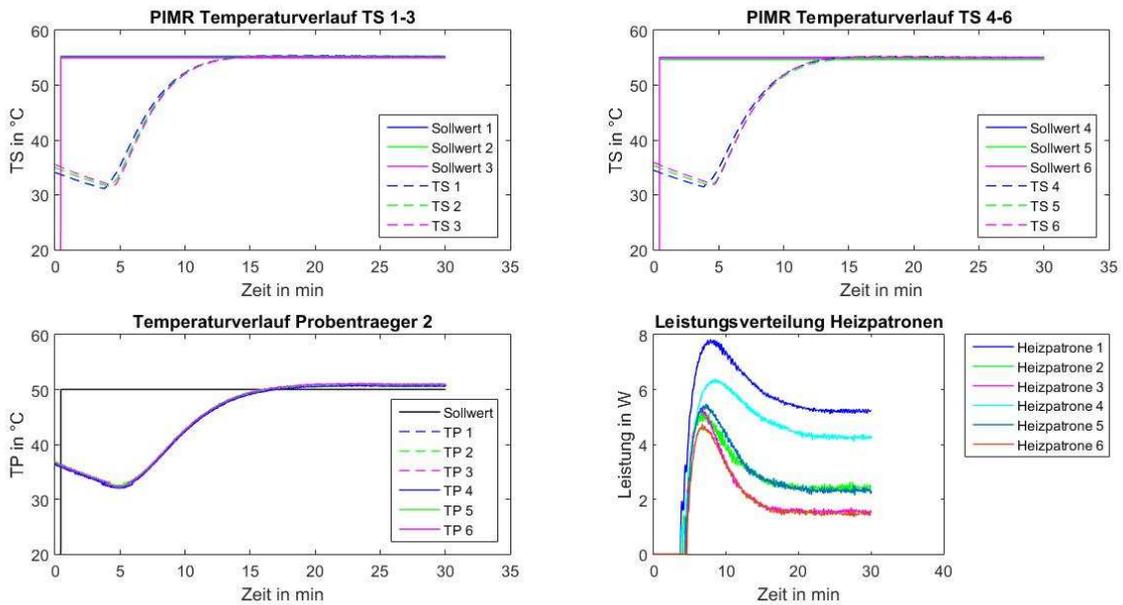


Abbildung 66: Sprung der Solltemperatur auf 50°C mit PIMR

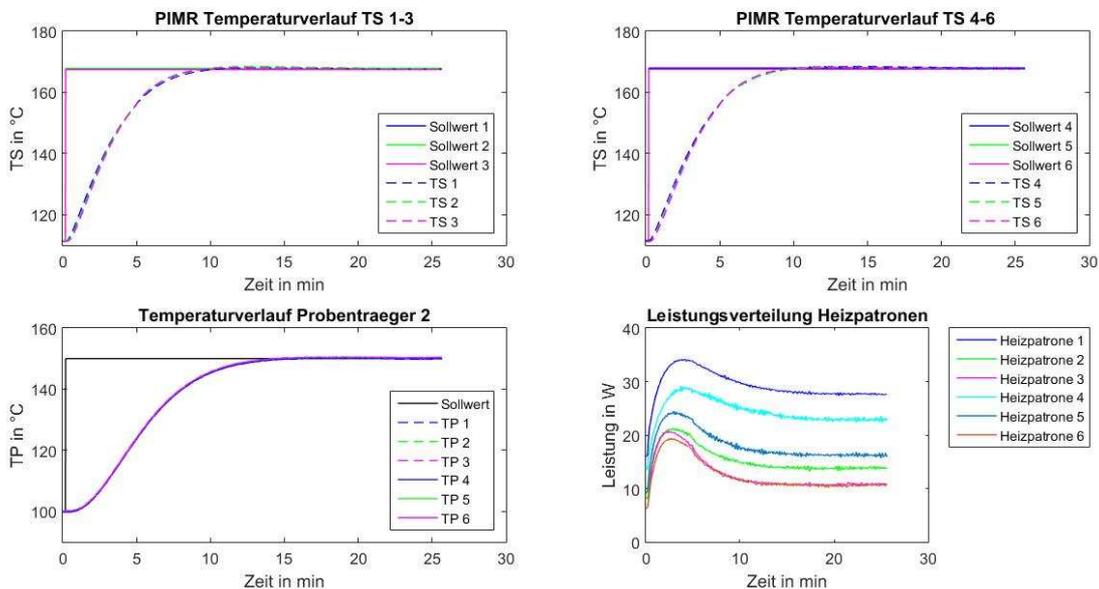


Abbildung 65: Sprung der Solltemperatur von 100°C auf 150°C mit PIMR

Die eingestellten Tuningfaktoren  $\alpha = 0,05$  und  $\beta = 8$  des PI-Mehrgrößenreglers führen dazu, dass die Solltemperatur auf dem Probenträger 2 nach einem Sprung von 100 °C auf 150 °C nach ca. 15 min ausgeregelt ist. Die Temperaturverläufe auf dem Probenträger und in den Schalen weisen kein Überschweigen auf. Die Leistungen an den Patronen steigen auf einen maximalen Wert, allerdings nicht so dynamisch wie bei der dezentralen Regelung.

Zum Vergleich der beiden Konzepte werden die Daten gleichermaßen dargestellt.

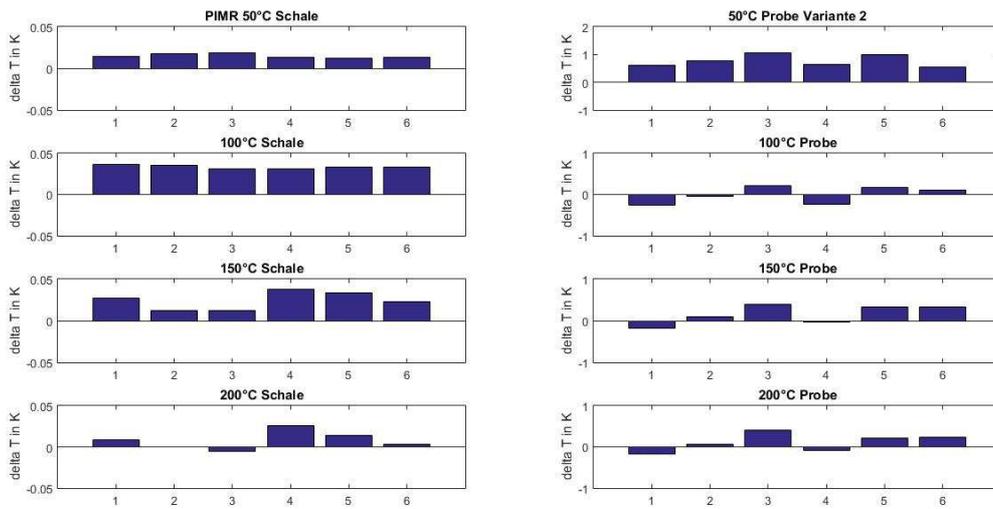


Abbildung 67: Abweichung der Temperaturen bei unterschiedlichen Sollwerten mit PIMR

Die linken Balkendiagramme zeigen, dass die Regeldifferenzen der Temperaturen in den Schalen innerhalb der vorgegeben Toleranz von  $\pm 0,1$  K liegen. Die Regeldifferenzen zeigen keine Ähnlichkeiten zu den Abweichungen auf dem Probenträger, die auf den rechten Balkendiagrammen dargestellt werden (Abb. 67). Die Ungenauigkeiten auf dem Probenträger 2 rühren daher von dem Testaufbau und den somit ermittelten Koeffizienten.

Die Regel- und Standardabweichungen der Temperaturen in den Schalen bestätigen die Messwerte aus den Balkendiagrammen.

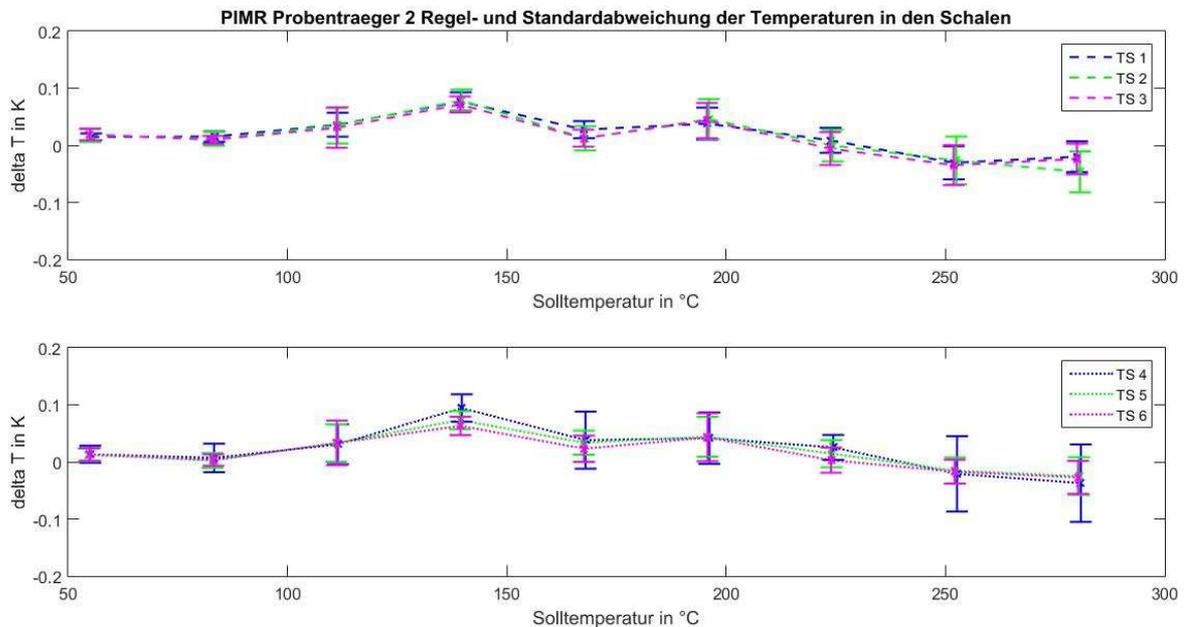


Abbildung 68: Regel- und Standardabweichung mit dem Probenträger 2 und PIMR

Wie bei der dezentralen Regelung können die Regelabweichungen im gesamten Temperaturbereich in den Schalen unterhalb von  $\pm 0,1$  K gehalten werden (Abb. 68). Der Mittelwert der Temperaturabweichungen am Probenträger 2 ist nahezu gleich geblieben, siehe Abbildung 69.

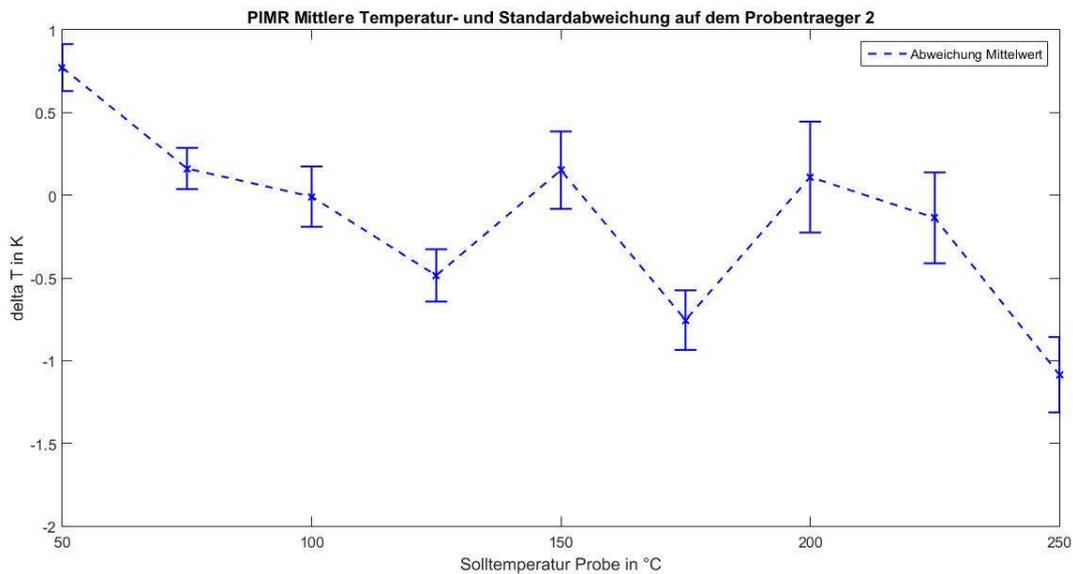


Abbildung 69: Mittlere Temperaturabweichung auf dem Probenträger

Die mittlere Temperaturabweichung auf dem Probenträger, die von den ermittelten Koeffizienten abhängig ist, liegt innerhalb der Vorgabe von  $\pm 1$  K bis 200 °C. Die Ausreißer bei 50 °C und bei 175 °C sind in den Ungenauigkeiten der ermittelten Koeffizienten begründet, weil keine Auffälligkeiten in den Temperaturverläufen der Schale zu beobachten sind.

## 9 Zusammenfassung der Ergebnisse

### 9.1 Vergleich der Regelungskonzepte

Bei dem Vergleich der beiden Regelungskonzepte sind vor allem die unterschiedlichen Verläufe der Temperaturen in den Schalen auffällig. Diese Temperaturen dienen in beiden Fällen als Ist-Werte für die Regler. Durch die Vorgabe einer Überschwingweite besitzt die dezentrale Regelung eine bessere Dynamik und regelt einen Sollwertsprung von 125°C auf 150°C in ca. 9min aus. Die Einstellungen des PI-Mehrgrößenreglers sind nicht so dynamisch, deswegen beträgt die Zeit zum Ausregeln des Sollwertsprunges von 100°C auf 150°C ca. 16 min. Eine größere Dynamik führt zum Überschwingen der Temperatur im Probenraum.

Bei beiden Konzepten werden die Temperaturen in den Schalen über den gesamten Temperaturbereich um  $\pm 0,1$  K gehalten. Die Temperaturabweichungen in dem Probenträger liegen zwischen  $\pm 1,0$  K. Ausnahmen bilden bei beiden Konzepten die bisherige Endtemperatur von 250 °C. Bei der dezentralen Regelung liegt der Mittelwert am Probenträger ungefähr 1,5 K oberhalb und bei der PI-Mehrgrößenregler ungefähr 1,2 K unterhalb des Sollwertes.

Eine weitere Vorgabe ist die Steigerung des Wirkungsgrades. Diese Anforderung ist unabhängig von dem Konzept und wird definitiv verbessert. Bei einer Temperatur von 280 °C in den Schalen steigt die Temperatur im Probenraum bis auf 250 °C. Der gesamte Leistungsverbrauch der Patronen beträgt dabei ungefähr 230 W.

Auf den ersten Blick ist die Leistungsreserve des Systems sehr hoch, allerdings ist die Leistungsverteilung noch ein Schwachpunkt des Systems. Die Heizpatronen 1 und 4 sind mit Abstand die größten Verbraucher. Die Heizpatronen benötigen 56 W und 47 W bei einer Temperatur von 250 °C. Die Heizpatronen 2 und 4 folgen mit 36 W und 32 W. Die geringsten Leistungen benötigen die Patronen 3 und 6 mit Werten von 29 W und 26 W.

Trotz der schwachen Leistungsverteilung bieten die eingesetzten Heizpatronen noch Leistungsreserve, um höhere Temperaturen zu erreichen. Allerdings ist eine Änderung der Kabelanschlüsse der Patronen notwendig.

Aufgrund der besseren Dynamik, der Auslegung der Regler mit den klassischen Verfahren der Regelungstechnik und weil die Schnittstelle zwischen TwinCAT und Matlab/Simulink nicht zwingend notwendig ist, war die Umsetzung mit der dezentralen Regelung die erste Wahl.

## 9.2 Zusammenfassung

In Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern an der Strahlführung P10 ist unter Anwendung moderner 3D-Druck Technologie ein neuartiges Heizsystem für wissenschaftliche Untersuchungen in der Röntgen-Strukturheologie entwickelt wurden. Die Entwicklung und Inbetriebnahme einer speicherprogrammierbaren Steuerung für Mehrgrößensysteme ist erfolgreich umgesetzt wurden. Zwei Temperaturregelungskonzepte sind erfolgreich an dem realen System ausgelegt und optimiert wurden.

Das entwickelte Mehrgrößenheizsystem funktioniert zuverlässig über den geforderten Temperaturbereich von 25 °C bis 250 °C.

Die Anforderungen an die Regeldifferenzen der Temperaturen in den Schalen mit  $\pm 0,1$  K und die Abweichungen auf dem Probenträger mit  $\pm 1$  K bis 200 °C werden mit dem entwickelten Mehrgrößenheizsystem erfüllt.

Sprungartige Änderungen der Sollwerte führen nicht zum Überschwingen der Temperaturen auf dem Probenträger. Diese Optimierung ist für den Einsatz des Rheometers mit stark temperaturabhängigen Proben sehr wichtig.

Der entwickelte Probenträger 2 dient als Messeinrichtung zur Erfassung der Verteilung der Temperatur im Probenraum und konnte bereits erfolgreich am realen System eingesetzt werden. Mit Hilfe der Messeinrichtung kann der Temperaturgradient auf dem Probenträger von 4,5 K auf unter 1 K reduziert werden. Eine Messeinrichtung dieser Art ist auf dem Markt nicht erhältlich.

Das Offset zwischen der Temperatur der Wärmequelle und dem Probenraum von maximal 30 K bei 250 °C wurde im Vergleich zu 180 K bei 220 °C im Ausgangszustand minimiert und somit die Effizienz signifikant verbessert.

Die programmierte Software und die Bedienoberflächen ermöglichen den Betrieb des Heizsystems an der Beamline und im Labor und beinhalten Funktionen wie die Eingabe einer Sequenz und den Anstieg des Sollwertes über eine Rampe. Außerdem werden die die Temperaturverläufe über die Zeit graphisch dargestellt und im Hintergrund gespeichert.

Der Aufbau des Mehrgrößenheizsystems, mit symmetrisch angeordneten Patronen, bietet die Möglichkeit gezielt einen Temperaturgradienten zu erzeugen.

Die notwendige Spannung wird von 230 V auf 24V reduziert, das ist eine wichtige Änderung in Bezug auf Sicherheit.

Die offene Konstruktion des vorgestellten Heizsystems ist einzigartig im Forschungsbereich der Rheologie. Sie erlaubt die Untersuchung der strukturellen Eigenschaften komplexer Fluide im Fluss über mehrere Größenskalen von 0,5-250 nm und 3-5000  $\mu$ m hinweg und eröffnet der wissenschaftlichen Grundlagen- und Anwendungsforschung neue Möglichkeiten.

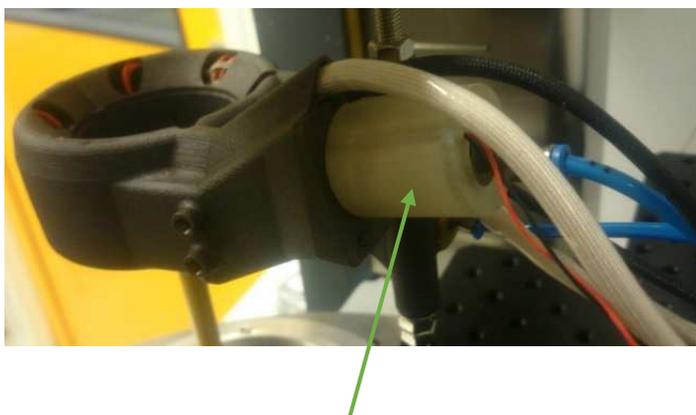
## 10 Ausblick

Das Mehrgrößenheizsystem bietet der Forschung an der Beamline P10 neuartige Möglichkeiten bei der Untersuchung komplexer Fluide. Die Einzigartigkeit der Konstruktion und die Erfüllung der hohen Anforderungen werden hoffentlich zu weiteren Erkenntnissen in der Wissenschaft führen.

Weil während der Umsetzung eines Konzeptes häufig schon Ideen für zusätzliche Funktionen wachsen, ist bei der Entwicklung auf die Erweiterbarkeit geachtet wurden. Mögliche Erweiterungen des Systems, wie die Aktive Kühlung der Schalen mit einem Kühlmittel und die Befeuchtung des Probenraumes sind bereits vorbereitet, aber aus unterschiedlichen Gründen noch nicht umgesetzt.

Die Kühlkanäle in den Schalen sind eine Option, wenn die Fertigung der Schalen aus Aluminium doch in Frage kommt. Dadurch kann der Temperaturbereich sowie die Dynamik des Systems je nach Kühlmitteltemperatur und Kühlmitteldurchfluss nochmals erweitert werden.

Zur Befeuchtung des Probenraumes wurde ein Ultraschall-Vernebler eingesetzt. Diese sind neuerdings im Bereich des Bürobedarfs erhältlich und können mit ihrer Ansteuerelektronik verwendet werden. Die Elektronik benötigt eine Spannungsversorgung von 5 V und einen maximalen Strom von 500 mA. Anstatt des direkten Gasanschlusses wird ein Adapter mit dem Vernebler in die Schale geschraubt. Das feuchte Gas strömt bei maximalen Durchfluss von 13 l/min und maximalen Strom von 500 mA in den Probenraum. Mit den eingesetzten Ultraschall-Verneblern ist auch eine Regelung der Feuchtigkeit in dem Probenraum möglich. Hierfür wird der Strom des Piezoantriebs als Stellgröße verwendet. Die folgende Abbildung 70 zeigt das Heizsystem mit dem Adapter und den Testaufbau mit einer Schale aus Kunststoff.



Adapter mit Piezo und Wasserspeicher



Abbildung 70: Heizsystem mit Piezo und Testaufbau für Befeuchtung

Die entwickelte Lösung der Befeuchtung zeigt also gute Ergebnisse, jedoch scheint die Methode störanfällig zu sein. Das Problem bei dauerhafter Anwendung ist, dass der Vernebler nicht wie bei dem üblichen Gebrauch in einem Gehäuse auf die Wasseroberfläche gelegt wird, sondern aufrecht in den Adapter geklebt wird. Dieser Aufbau führt gelegentlich dazu, dass sich ein Wassertropfen auf der siebartigen Oberfläche des Antriebes bildet und die Funktion nicht mehr gegeben ist.

Falls die hohe Nachfrage für Messzeiten an der Beamline mit dem Rotationsrheometer und dem entwickelten Mehrgrößenheizsystem bestehen bleibt, kann eine bereits vorhandene Idee für die Befeuchtung integriert werden und die Anfangs erwähnte Fertigung der Schalen aus Aluminium wäre eine weitere Optimierungsmaßnahme. Die Maßnahme führt zu einer Gewichtsreduzierung einer Schale von 560 g auf ca. 180 g und dadurch zu einer geringeren Wärmespeicherkapazität und einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Außerdem können die Kanäle für die Wasserkühlung angepasst und eingebunden werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Lutz, Holger und Wendt, Wolfgang: Taschenbuch der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2010, ISBN 978-3-8171-159-5
- [2] Lunze, Jan: Regelungstechnik 2, Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung, Springer Vieweg, 2008, ISBN 978-3-642-53943-5
- [3] von Böckh, Peter und Wetzel, Thomas: Wärmeübertragung, Grundlagen und Praxis, Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-03042-0
- [4] Wenck, Florian: Mehrgrößenregelung, Manuskript einer Vorlesung an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hamburg 2015
- [5] o. V.: Zustandsraumdarstellung,  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Zustandsraumdarstellung>, Einsichtnahme: 01.12.2015
- [6] o. V.: Dezentrale Regelung,  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Regelkreis#Dezentrale\\_Regelung](https://de.wikipedia.org/wiki/Regelkreis#Dezentrale_Regelung), Einsichtnahme: 01.12.2015
- [7] o. V.: Wärmeübertragung,  
[http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/7/tc/waerme/praktikum/waerme\\_praktikum.vlu/Page/vsc/de/ch/7/tc/waerme/praktikum/einfuehrung/w\\_apparat\\_e.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/7/tc/waerme/praktikum/waerme_praktikum.vlu/Page/vsc/de/ch/7/tc/waerme/praktikum/einfuehrung/w_apparat_e.vscml.html), Einsichtnahme: 15.12.2015
- [8] o. V.: <http://www.beckhoff.de>, Einsichtnahme: 15.11.2015
- [9] Stellamanns, Eric: Xvis Rheology, Präsentation zum Thema Rheologie, Hamburg 2015



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Schulze

Vorname: Stephan

dass ich die vorliegende Masterarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung eines Mehrgrößenheizsystems und Implementierung unterschiedlicher Temperaturregelungskonzepte für wissenschaftliche Untersuchungen an einem Rheometer

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

27.01.2016

Datum

Stephan Schulze  
Unterschrift im Original