

Hochschule für angewandte Wissenschaften München
Fakultät für Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik



Projektarbeit „Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung an einem Borosilikatdampfboiler“

Project “Test setup and test execution on a borosilicate steam boiler“

Wintersemester 2019/2020

Erstellt von:	Florian Fritz	00535917,	MBB
	Sebastian O'Reilly	12415316,	LRB
	Tim Kittelmann	45341216,	FAB
	Johannes Kastner	38432617,	MBB

Betreuer: Dipl.-Ing. Armin Rohnen

Kurzfassung / Abstract

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Konstruktion und den Versuchsaufbau eines Wasserboilers aus Borosilikatglas, der als optionale Premiumausstattung in einer zukünftigen serienreifen Kaffeemaschine zum Einsatz kommen soll.

Das grundlegende Konzept basiert auf einer Bachelorarbeit von Tobias Tritschler [1]. Im Verlauf des Projekts werden für die Versuchsdurchführung benötigte Teile unter Berücksichtigung einer späteren Serienfertigung konstruiert, gefertigt und anschließend in einem Versuchsaufbau montiert. Der Boiler wird dabei mit umfangreicher Messtechnik versehen.

This paper deals with the construction and experimental setup and procedure of a steam-boiler made from borosilicate glass, which is planned to be a prospective optional equipment on a coffee maker.

The primary concept is based on a bachelor thesis written by Tobias Tritschler [1]. In the course of the project missing parts are, considering a future series-production readiness, designed, crafted and mounted to an experimental setup which is covered by extensive measurement instrumentation.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG / ABSTRACT	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLENVERZEICHNIS	VI
NOMENKLATUR	VII
1 EINLEITUNG (SEBASTIAN O'REILLY).....	1
2 AUFGABENANALYSE (FLORIAN FRITZ).....	2
3 RISIKOBETRACHTUNG (FLORIAN FRITZ)	3
3.1 AUFBAU	3
3.2 INBETRIEBNAHME.....	3
4 ENTWICKLUNG VERSUCHSAUFBAU.....	5
4.1 DICHTUNGSKONSTRUKTION (JOHANNES KASTNER)	5
4.1.1 <i>Konzept 1 – Dichtband</i>	5
4.1.2 <i>Konzept 2 – Dichtring</i>	6
4.1.3 <i>Konzeptbewertung/Auswahl</i>	6
4.1.4 <i>Bestellungen</i>	7
4.1.5 <i>Konstruktion der PTFE-Einlage</i>	7
4.1.6 <i>Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten</i>	7
4.2 KONSTRUKTION VERSpannung ZWISCHEN DECKEL UND BODEN (FLORIAN FRITZ)	8
4.2.1 <i>Konzept 1 – Federn und Stäbe</i>	9
4.2.2 <i>Konzept 2 – Verbindungsloser Klebeentwurf</i>	10
4.2.3 <i>Konzeptbewertung/Auswahl</i>	10
4.2.4 <i>Konstruktion der Verbindungsstäbe</i>	11
4.2.5 <i>Berechnungen</i>	11
4.2.6 <i>Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten</i>	15
4.3 KONSTRUKTION BUCHSEN (TIM KITTELMANN).....	16
4.3.1 <i>Buchse für Heizelement</i>	16
4.3.2 <i>Buchsen für Temperatursensoren</i>	17
4.3.3 <i>Buchsen für Steigrohr und Druckrohr</i>	17
4.3.4 <i>Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten</i>	17
4.4 HYDRAULIKPLANUNG (TIM KITTELMANN)	18
4.4.1 <i>Komponenten</i>	18

4.4.2	Hydraulikplan.....	19
4.4.3	Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten.....	19
4.5	ELEKTROPLAN (FLORIAN FRITZ).....	20
4.5.1	Elektronische Komponenten.....	20
4.6	MESSTECHNIK (JOHANNES KASTNER).....	26
4.6.1	Temperatursensoren.....	26
4.6.2	Drucksensor.....	30
4.6.3	Dehnungsmessstreifen.....	30
4.6.4	Softwareanforderungen.....	31
4.7	VERSUCHSAUFBAU (TIM KITTELMANN).....	33
4.7.1	Versuchsrahmen.....	33
4.7.2	Montage Boiler.....	33
4.7.3	Montage Hydraulik.....	33
4.7.4	Montage Elektronik.....	34
4.7.5	Kalibrierung der Messtechnik.....	34
4.7.6	Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten.....	38
5	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG (SEBASTIAN O'REILLY).....	39
5.1	DICHTHEITSPRÜFUNG.....	39
5.2	TEMPERATUR- UND DRUCKPRÜFUNG.....	40
5.3	PROBLEME, SCHWIERIGKEITEN UND TIPPS FÜR FOLGENDE ARBEITEN.....	40
6	AUSBLICK (JOHANNES KASTNER + SEBASTIAN O'REILLY).....	41
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	42
	EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG.....	VIII
	ANHANG.....	IX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: O-Ring [4] und X-Ring [5].....	6
Abbildung 2: Konzeptbewertung Dichtung.....	7
Abbildung 3: Boden, Deckel, Glaszylinder.....	9
Abbildung 4: Verspannungskonzept 1	9
Abbildung 5: Verspannungskonzept 2	10
Abbildung 6: Bewertung Verspannung	10
Abbildung 7: Boden (links) und Deckel (rechts)	16
Abbildung 8: Hydraulikplan.....	19
Abbildung 9: Anschlussplan der Temperaturmessplatinen	21
Abbildung 10: SSR-Platine	22
Abbildung 11: Anschlussplan GPIO-Expander.....	23
Abbildung 12: Verschaltung Heizelement	24
Abbildung 13: Anschluss Raspberry Pi.....	25
Abbildung 14: Anschluss AD/DA Board	25
Abbildung 16: NTC innerer Zylinder.....	26
Abbildung 17: NTC äußerer Zylinder innen	27
Abbildung 18: NTC äußerer Zylinder außen.....	27
Abbildung 19: Stromverlauf verschiedener Vorwiderstände	30
Abbildung 20: grafische Benutzeroberfläche der Messtechnik.....	31
Abbildung 21: Kritische Temperaturdifferenz	32
Abbildung 21: Polynom ersten Grades (gelb)	35
Abbildung 22: Messkurve (blau) und Kalibrierkurve (gelb).....	36
Abbildung 23: Verlauf der DMS-Messwerte	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Toleranzen Schott AG [8]	15
Tabelle 2: Nachgemessene Toleranzen	15
Tabelle 3: Übersicht über Anbringung der NTCs	28
Tabelle 4: Differenzwerte DMS-Messung	37

Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
d_m	[m]	mittlerer Zylinderdurchmesser
e	[m]	Wandstärke des Zylinders
F	[N]	Kraft
F_0	[N]	Vorspannkraft
F_D	[N]	Druckkraft
I	[A]	Strom
Δl	[m]	Längenänderung
m	[kg]	Masse
P	[W]	Leistung
p	[Pa]	Druck
R	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}}\right]$	Federrate
s	[m]	Vorspannweg der Feder
T	[K]	Temperatur
U	[V]	Spannung
α	$\left[\frac{1}{\text{K}}\right]$	Wärmeausdehnungskoeffizient
ε	-	Verformung
σ	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	Druckspannung
φ	[%]	relative Luftfeuchte

Abkürzung	Bedeutung
ca.	circa
bzw.	beziehungsweise
DMS	Dehnungsmessstreifen
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
FDA	Food and Drug Administration
GPIO	General Purpose Input Output
GUI	Graphical User Interface
LED	Light-Emitting Diode
NI	National Instruments
NTC	Negative Temperature Coefficient Thermistor
PTFE	Polytetrafluorethylen
RGB	rot-grün-blau
SSR	Solid State Relais
USB	Universal Serial Bus

1 Einleitung (Sebastian O'Reilly)

Das Projekt rund um den Borosilikatglasboiler ist ein innovativer Ansatz zur Aufwertung einer Kaffeemaschine. Ein futuristisches, offenes Design, welches auch in immer mehr alltäglichen Bereichen des Lebens zu sehen ist, findet auch hier Einzug.

In Anlehnung an die theoretische Ausarbeitung in der Bachelorarbeit von Tobias Tritschler [1] sind die Aufgaben des Teams um Florian Fritz, Sebastian O'Reilly, Johannes Kastner und Tim Kittelmann die konstruktive Auslegung und die Entwicklung eines Versuchsaufbaus, welche in der folgenden Ausarbeitung behandelt und beschrieben werden.

Der Borosilikatboiler besteht aus zwei Glaszylindern, welche ineinandergesteckt werden und mit einem Deckel und einem Boden aus Messing abgeschlossen werden. Die Abdeckungen sind mit Federn und Stäben miteinander verbunden.

Der Versuchsaufbau dient der Überprüfung der aufgestellten These, welche nach Berechnungen aus der Bachelorarbeit das Funktionieren des Borosilikatboilers vorhersagt. Um dies zu gewährleisten, wird das Konzept nochmals überarbeitet und Verbesserungen aus neuen Erkenntnissen hinzugefügt, welche teils durch Berechnungen unterstützt werden.

Um zu beweisen, dass der ausgelegte Boiler aus Glas in einer realen Umgebung nutzbar ist, muss der Boiler im Versuchsaufbau den Belastungen, die später als Serienprodukt zu erwarten sind, standhalten. Dies beinhaltet eine Druckprüfung bei Raumtemperatur, sowie ein Aufheizen auf Betriebstemperatur im befüllten Zustand. Letzteres konnte nicht durchgeführt werden und ist daher nicht Teil dieser Dokumentation.

2 Aufgabenanalyse (Florian Fritz)

Aufbauend auf eine vorrangegangene Bachelorarbeit umfasst diese Projektarbeit den Versuchsaufbau für einen Dampfboiler aus Borosilikatglas 3.3. In jener Arbeit wurde bereits ein konzeptioneller Aufbau entwickelt und nachgerechnet. Um die durchgeführten Festigkeitsberechnungen nicht zu verletzen, dürfen die Maximalwerte für Innendruck, Wärmespannung und Temperatur nicht überschritten werden. Diese müssen folglich messtechnisch erfasst und begrenzt werden.

Da das einst entwickelte Konzept noch einige Unsicherheitsfaktoren aufweist, ist eine der anfallenden Aufgaben, neue Konzepte für die Verspannung von Deckel und Boden sowie neue Dichtungsmöglichkeiten zu entwerfen. Des Weiteren ist der bestehende Hydraulikplan zu überarbeiten. Auch wird ein Plan für die erforderliche Elektrik und Messtechnik ausgearbeitet.

Neben den theoretischen Planungen müssen alle benötigten Komponenten bestellt beziehungsweise in der Fakultätswerkstatt zur Fertigung in Auftrag gegeben werden.

Am Ende des Projektes wird der gesamte Versuchsaufbau in dem Labor für Maschinendynamik aufgebaut und getestet.

Eine zusammenfassende Anforderungsliste befindet sich in Anhang 1.

3 Risikobetrachtung (Florian Fritz)

Um die sichere Durchführung des Versuchs gewährleisten zu können, ist eine im Vorfeld durchzuführende Sicherheitsbetrachtung unabdingbar. Der Versuch wird in fünf kritische Phasen, nämlich Aufbau, Aufheizphase, Haltephase, Dampfbezug und Abkühlphase untergliedert. Bei jeder dieser Stufen müssen die Sicherheitsrisiken gefunden und durch passende Maßnahmen minimiert werden. Folgend werden die relevantesten Risiken und ihre Gegenmaßnahmen beschrieben.

Die gesamte ausführliche Sicherheitsbetrachtung mit allen Risiken und dafür vorgesehenen Maßnahmen ist in Anhang 2 zu finden.

3.1 Aufbau

Das größte Risiko beim Aufbau ist eine falsche Verkabelung. Dies kann schlimmstenfalls zu einer Beschädigung oder Fehlfunktion von Bauteilen führen. Deshalb muss hier mit großer Sorgfalt gearbeitet und später alles geprüft werden. Um die Übersicht über die vielen Kabel zu wahren, werden alle zusammengehörigen Kabel gebündelt und genau beschriftet. Auch wird auf die übliche Anwendung der Kabelfarben für Phase (Schwarz), Masse (Blau) und Sicherheitsleiter (Gelb) geachtet. Dadurch kann die Gefahr auf Verwechslung minimiert werden.

Beim generellen Aufbau wird eine gewisse Arbeitssorgfalt vorausgesetzt, um unnötige Beschädigungen der Elektronik oder des Glases zu vermeiden.

3.2 Inbetriebnahme

Der insgesamt risikoreichste Arbeitsschritt ist die Inbetriebnahme des Versuchsaufbaus. Um generelle Sicherheit im Umgang mit Netzspannung zu gewährleisten, kann diese über einen Not-Aus-Schalter jederzeit abgeschaltet werden. Nach erfolgreichem Abschluss der Funktionstests aller elektrischen Komponenten sowie der Software wird die Elektronik von einem Fachmann abgenommen. Danach kann eine Druckprüfung durchgeführt werden. Bei dieser wird der Prüfdruck von $1,7\text{bar}$ beaufschlagt. Um hierbei wiederum das geringste Risiko zu gewährleisten, wird der Borosilikatboiler nahezu vollständig mit Wasser gefüllt. Danach kann mit einer Luftpumpe der benötigte Druck eingebracht werden. Im Falle eines Platzens existiert nur ein kleines Druckvolumen der Luftblase und somit nur eine kleine Wirkung.

Nach erfolgreichem Abschluss der hier genannten Sicherheitsprüfungen kann mit der eigentlichen Befuerung fortgefahren werden.

Während des Aufheizens herrscht eine ungleichmäßige Temperaturverteilung im inneren Zylinder. Das führt zu hohen Thermospannungen im Glas. Diese beanspruchen das Material enorm und können zu Bruchversagen führen. Um während des Aufheizens die Sicherheit gewährleisten zu können, werden über den gesamten Versuch die Temperaturmessstellen am inneren Zylinder überwacht. Ebenso werden über DMS-Messtellen die Spannungswerte im Glas überprüft. Sobald diese einen kritischen Wert aufweisen, wird das Aufheizen von der Software gestoppt.

Für den Extremfall des Glasbruchs befindet sich um den inneren Borosilikatzylinder ein weiterer Glaszylinder. Dieser fängt mögliche umherfliegende Teile ab.

Außerdem muss während des Versuches immer darauf geachtet werden, dass sich das Heizelement komplett im Wasser befindet. Andernfalls überhitzt es bis hin zum Defekt.

Der Dampfaustritt des Überdruckventils und der Dampfzanze ist so gerichtet, dass weder der Bediener noch die Elektronik davon getroffen werden können.

Ein ungewollter Dampfaustritt an der Verschlauchung kann durch die vorangegangene Druckprüfung ausgeschlossen werden.

Sobald der Betriebsdruck erreicht wird, beginnt die Haltephase. In dieser können immer noch die oben genannten Probleme auftreten. Da sich über die Zeit eine gleichmäßigere Erwärmung einstellt, sinkt die Gefahr auf Glasbruch. Ein neues Risiko stellt jedoch die Beanspruchung über die Zeit dar. Vom Bediener ist eine Berührung der zugänglichen Messingelemente wegen der eingebrachten Hitze zu vermeiden.

Beim Dampfbezug ist darauf zu achten, dass der heiße Dampf nur über die dafür vorgesehene Dampfzanze in ein Gefäß abgeleitet wird.

Nach Abschalten des Versuchs darf der Aufbau erst nach einer gewissen Wartezeit angefasst werden. Komponenten wie Glas oder Messing können über längere Zeit Wärme speichern.

4 Entwicklung Versuchsaufbau

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Konstruktion, Nachrechnung und Planung aller für den erfolgreichen Versuchsaufbau nötigen Bestandteile.

4.1 Dichtungskonstruktion (Johannes Kastner)

Um den Innenraum gegen Leckage abzusichern und eine Druckbeaufschlagung zu ermöglichen, werden die Übergänge vom Glaszylinder zu Boden und Deckel mit statischen Dichtungen versehen. Der in der Bachelorarbeit [1] angeführte Lösungsansatz, die Dichtwirkung über eine PTFE-Einlage zu realisieren, wird als nicht umsetzbar verworfen. Aufgrund der zu niedrigen Fließgrenze von PTFE wird die Einlage im Verlauf des Abkühlens und der damit verbundenen Längenänderung des Glaszylinders als Dichtung unwirksam. Die Alternative muss temperaturfest bis mindestens 130°C sowie druckfest bis mindestens $1,7\text{bar}$ sein und darf sich unter der gegebenen Belastung nicht verformen. Auch wenn es für den Versuch noch nicht Vorschrift ist, ist eine Lebensmittelzertifizierung nach FDA [2] oder EG 1935-2004 [3] von Vorteil, um den Versuch unter möglichst seriennahen Bedingungen durchzuführen. Eine Gleichteilverwendung an Boden und Deckel sorgt zudem in der späteren Serienfertigung für eine Kostenersparnis.

4.1.1 Konzept 1 – Dichtband

Der naheliegendste und sicherlich kostengünstigste Ansatz ist die Verwendung eines in Meterware erhältlichen, selbstklebenden Dichtbandes. Ein weiterer Vorteil ist, dass eine geklebte Dichtung nach einmaligem Anbringen auch bei Öffnen und Wiederverschließen des Boilers an Ort und Stelle bleibt. Wird der Glaszylinder jedoch getauscht, muss auch die Dichtung erneuert werden.

Das Anbringen der Dichtung ist kompliziert, da zunächst ein exakter Zuschnitt erforderlich ist, damit die Enden des Dichtbandes nicht überlappen. Das Aufkleben an sich scheitert an der fehlenden Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, weshalb dieses Konzept verworfen wird.

4.1.2 Konzept 2 – Dichtring

Die einzige Möglichkeit, die Ungenauigkeit eines Zuschnitts auszuschließen, ist ein kreisförmig gefertigtes Dichtelement. Hierbei gibt es verschiedene Varianten, gängig sind sogenannte O-Ringe und X-Ringe (siehe Abbildung 1). Auch wenn O-Ringe weiter verbreitet sind, wird für den Borosilikatboiler eine X-Ring-Dichtung verwendet. Durch die doppelte Anzahl an Dichtflächen wird eine bessere Dichtwirkung erreicht.



Abbildung 1: O-Ring [4] und X-Ring [5]

4.1.3 Konzeptbewertung/Auswahl

Neben den zuvor aufgeführten Konzepten sind in der folgenden Liste weitere Konzepte und Variationen vertreten, die sich jedoch recht bald als nicht realisierbar herausstellen. Alle Konzepte werden nach sechs verschiedenen stark gewichteten Kriterien bewertet, die maximal erreichbare Punktzahl sind fünf Punkte.

Die oben genannte Variante „X-Ring“ tritt in dieser Tabelle noch nicht auf, sie wird in einer später stattfindenden Rücksprache mit dem Betreuer als sinnvoll befunden und vereinbart.

Gewichtete Punktebewertung			
für		Projekt:	Borosilikatboiler
Konzeptvariation: Dichtung		Semester:	WS 19/20

Pos.	Kriterium	Gewichtung	1 - U-Profil		2 - selbsttätige Dichtung		3 - Profildichtung		4 - selbstklebender Dichtstreifen	
			Pkt. o. G.	Pkt. m. G.	Pkt. o. G.	Pkt. m. G.	Pkt. o. G.	Pkt. m. G.	Pkt. o. G.	Pkt. m. G.
1.	Dichtwirkung/Sicherheit	0,10	4	0,40	4	0,40	5	0,50	5	0,50
2.	Bauraum/Ästhetik	0,20	5	1,00	5	1,00	5	1,00	5	1,00
3.	Kosten	0,15	4	0,60	3	0,45	2	0,30	5	0,75
4.	Montierbarkeit/Wartung	0,20	5	1,00	5	1,00	5	1,00	3	0,60
5.	Realisierbarkeit	0,30	4	1,20	4	1,20	3	0,90	5	1,50
6.	Wiederverwendbarkeit/Lebensdauer	0,05	4	0,20	5	0,25	5	0,25	2	0,10
Summe		1,00	26	4,40	26	4,30	25	3,95	25	4,45
Bewertung in Prozent			86,67%	14,67%	86,67%	14,33%	83,33%	13,17%	83,33%	14,83%

Abstufung der Punkte	
Sehr gut	5
gut	4
befriedigend	3
mangelhaft	2
ungenügend	1

Resultat der Bewertung:	
1 - U-Profil	14,67%
2 - selbsttätige Dichtung	14,33%
3 - Profildichtung	13,17%
4 - selbstklebender Dichtstreifen	14,83%

Abbildung 2: Konzeptbewertung Dichtung

4.1.4 Bestellungen

Nach Auswahl des Konzepts wird aufgrund der schnellen Verfügbarkeit bei der Dichtelemente arcus GmbH bestellt. Bei den bestellten Dichtringen handelt es sich um X-Ringe mit einer Schnurstärke von 2,62mm und einem Innendurchmesser von 82,22mm. Die Dichtringe bestehen aus EPDM, sind von -40°C bis 150°C einsetzbar und FDA-konform. Insgesamt sind vier Dichtringe bestellt, um einen möglichen Verschleiß im Verlauf der Versuchsdurchführung aufzufangen.

4.1.5 Konstruktion der PTFE-Einlage

Bei der Konstruktion der PTFE-Einlage wird auf das Konzept der zugrundeliegenden Bachelorarbeit zurückgegriffen und dieses an die vorhandenen Teile (Deckel, Boden und Glas des Innenzylinders) sowie die Dichtung angepasst. Es handelt sich um ein gedrehtes Werkstück, in dem Nuten für die Dichtung und das Glas vorgesehen sind. In der Mitte sind Bohrungen eingebracht. Um eine leichte Montage und Demontage bei der Wartung zu gewährleisten, wird eine Spielpassung für die Kavität in Deckel und Boden vorgesehen.

In Anhang 3 befinden sich die Zeichnungen, nach deren Stand die Einlagen gefertigt wurden.

4.1.6 Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten

Bei den bestellten Dichtringen kam es bis zum Projektende zu keinen Problemen. Bei der Montage ist auf ein korrektes Einlegen zu achten, sodass der Dichtring korrekt in der Nut

liegt und nicht gequetscht wird. Werden in der Serienfertigung die gleichen Dichtringe verwendet, so ist auf eine korrekte Lagerung zu achten: Nach Herstellerempfehlung sollen die Dichtungen deformations- und kompressionsfrei bei Dunkelheit bei 5°C bis 25°C und maximal 70% relativer Luftfeuchte gelagert werden. Des Weiteren ist ein Kontakt mit Sauerstoff und Ozon zu vermeiden.

Bei einer Neukonstruktion der PTFE-Einlagen sind ebenfalls einige Punkte zu beachten; Trotz Vermessen des Innenzylinders und Anpassen der Maße der Nut für das Glas auf die gemessenen Werte ist eine Montage nur in einer bestimmten Lage zueinander möglich. Das zeigt, dass die großen Toleranzen des Glases ganz ausgereizt werden. Die Nut für das Glas muss folglich verbreitert werden.

Die Dichtungen sind maßhaltig und die Dichtungsnuten können nach dem Datenblatt des Dichtungsherstellers gefertigt werden. Bei den Bohrungen ist darauf zu achten, dass diese nur minimal entgratet werden dürfen. Bei einer zu großen Phase kann die nötige Dichtwirkung über das Gegenstück nicht erreicht werden. Ein entsprechender Hinweis ist auf der Zeichnung zu hinterlassen, da dies sonst unter Umständen vom Werker automatisch und überdimensioniert erledigt wird. Im aktuellen Versuchsaufbau ist genau dieses Problem aufgetreten. Die Einlage im Boden wird daher an der Innenfläche nachträglich um 1mm abgedreht. Außer optischen Einbußen resultieren damit zumindest für den Versuchsaufbau keine negativen Konsequenzen.

4.2 Konstruktion Verspannung zwischen Deckel und Boden

(Florian Fritz)

Da das in der vorangegangenen Bachelorarbeit bereits auskonstruierte Konzept zur Verspannung von Deckel und Boden mit Dehnschaftschrauben nach Einschätzung des Betreuers aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungen der Schrauben und des Glases nicht funktionsfähig ist, wird folgend die Konstruktion und Nachrechnung eines neuen Entwurfes behandelt.

Die neue Konstruktion muss gewährleisten, dass sie die Längenänderung des Borosilikatglases, welche durch Erwärmung zwangsläufig entsteht, mit ihrer Verspannung nicht einschränkt. Diese beläuft sich bei einem Temperaturanstieg von 110K und einer Länge der Glasröhre von 300mm nach der Berechnung (siehe 4.2.5.2, Gl. (2)) auf ca. $1,1\text{mm}$. Lässt der Verspannungsmechanismus diese Veränderung nicht zu, wird das Glas

brechen. Folgend werden zwei grundsätzliche Konzepte vorgestellt und der finale Entwurf bestimmt.

Abbildung 3 zeigt die zu verspannenden Bauteile (Boden, Deckel, Glaszylinder).

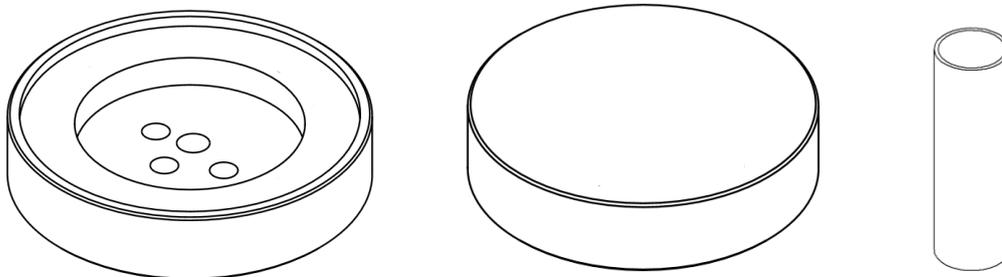


Abbildung 3: Boden, Deckel, Glaszylinder

4.2.1 Konzept 1 – Federn und Stäbe

Das in Abbildung 4 dargestellte Konzept beruht grundlegend darauf, die Längenänderung mithilfe von Zugfedern abzufangen. Auch kann so ein definierter Federweg vorgegeben und damit die richtige Vorspannkraft eingestellt werden. Bei diesem Entwurf wird der untere Verbindungsstab fest in den Boden eingeschraubt. Gegenüberliegend wird ein zweiter Stab durch den Deckel geführt. Zwischen diesen beiden Elementen befindet sich eine Zugfeder. Diese kann durch das jeweilige Durchgangsloch der Stäbe eingefädelt werden.

Die Verspannung erfolgt nun dadurch, dass über die obere Mutter der dazugehörige Stab nach oben geschraubt werden kann. Über den Sicherungsring als Anschlag ist ein definierter Federweg und somit auch eine definierte Kraft einstellbar.

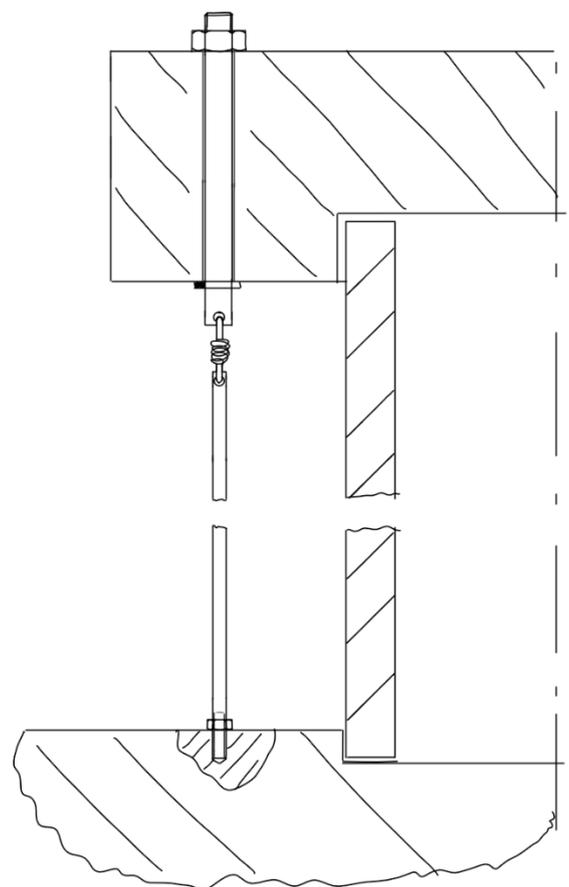


Abbildung 4: Verspannungskonzept 1

4.2.2 Konzept 2 – Verbindungsloser Klebeentwurf

Das hier in Abbildung 5 gezeigte Konzept veranschaulicht eine Idee der verbindungslosen Verspannung zwischen Deckel und Boden. Hier wird an den oberen und unteren Enden des Zylinders ein Messingring auf den Glaszylinder geklebt. Dieser wird jeweils mit dem Deckel- bzw. Bodenelement verschraubt. Bei dieser Lösung ist die Längenausdehnung des Glases zwischen den Verbindungsstücken vernachlässigbar klein.

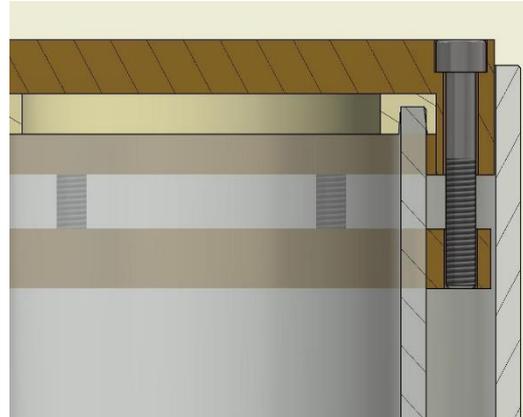


Abbildung 5: Verspannungskonzept 2

Problematisch hierbei ist jedoch, dass aufgrund der großen Durchmessertoleranzen des Glases keine gleichmäßige Klebung durchführbar ist. Außerdem wird der Glaszylinder bei Erwärmung durch den Messingring eingeschnürt. Dadurch erzeugen die geklebten Ringe in der angedachten Konstruktion eine Kerbwirkung am Glas. Somit wird eine Bruchstelle provoziert. Aus diesen angeführten Gründen wird generell kein Konzept mit Klebungen an dem Borosilikatglas verwendet.

4.2.3 Konzeptbewertung/Auswahl

Nach Rücksprache der Konzeptansätze und deren Bewertung (siehe Abbildung 6) wird das Konzept mit Federverspannung zum finalen Konzept bestimmt. Es ist von konstruktiver Seite nicht kompliziert und relativ leicht fertigbar. Auch kann bei diesem Konzept die garantierte Funktion vorausgesagt werden. Nun folgen die weitere Auskonstruktion und Nachrechnung der dafür benötigten Bauteile.

Kriterium	Gewichtung	Konzept 1 - Klebung V1		Konzept 2 - Federverspannung		Konzept 3 - Bajonett		Konzept 4 - Klebung V2	
		Pkt. o. G.	Pkt. m. G.	Pkt. o. G.	Pkt. m. G.	Pkt. o. G.	Pkt. m. G.	Pkt. o. G.	Pkt. m. G.
Kosten	0,10	4	0,40	4	0,40	3	0,30	4	0,40
Bauraum /Ästhetik	0,20	5	1,00	4	0,80	4	0,80	5	1,00
Krafteinwirkung/Längenausgleich	0,15	5	0,75	5	0,75	3	0,45	5	0,75
Montierbarkeit/Wartung	0,15	5	0,75	4	0,60	4	0,60	5	0,75
Realisierbarkeit/Komplexität	0,25	3	0,75	4	1,00	3	0,75	3	0,75
Sicherheit	0,15	4	0,60	5	0,75	5	0,75	4	0,60
Summe	1,00	26	4,25	26	4,30	22	3,65	26	4,25
Bewertung in Prozent		86,67%	14,17%	86,67%	14,33%	73,33%	12,17%	86,67%	14,17%

Abbildung 6: Bewertung Verspannung

4.2.4 Konstruktion der Verbindungsstäbe

Mit den gegebenen Maßen für Deckel, Boden und Zylinder wird die Dimensionierung der Verbindungsstäbe vorgenommen. Dabei fällt die Entscheidung darauf, die Federn aus optischen Gründen möglichst weit oben zu platzieren. Das heißt, der obere Verbindungsstab wird möglichst kurz, der untere dementsprechend lang konzipiert. In den Verbindungsstäben wird ein Langloch vorgesehen, um ein einfaches und gleichmäßiges Einhängen der Federn zu ermöglichen.

Damit die Konstruktion korrosionsbeständig ist, wird als Material ein Edelstahl (V2A 1.4301) verwendet.

Der Durchmesser der Stäbe wird mit 6mm möglichst klein gewählt. Die Länge der unteren Stäbe beträgt $268,7\text{mm}$. Die oberen Stäbe haben eine Länge von 55mm . Alle genauen Fertigungszeichnungen mit genauen Angaben sind in Anhang 4 zu finden.

4.2.5 Berechnungen

Die Berechnung wird mit den branchenüblichen Betriebsparametern durchgeführt. Somit ist der definierte Betriebsdruck von $1,3\text{bar}$ in der Praxis vollkommend ausreichend. Für solch einen Druck wird laut AD 2000 Merkblatt ein Prüfdruck vom 1,25-fachen des Betriebsdrucks empfohlen [6]. Der für alle nachfolgenden Rechnungen verwendete Prüfdruck wird zu $1,7\text{bar}$ definiert. Der Durchmesser der mit Druck beaufschlagten Fläche beträgt 80mm . Alle weiteren Auslegungs- und Festigkeitsberechnungen werden mit Hilfe von [7] durchgeführt. Die komplette ausführliche Berechnung ist in Anhang 5 zu finden.

4.2.5.1 Federauswahl

Mit den oben genannten Angaben und einem Eigengewicht des Deckels von $1,9\text{kg}$ ergibt sich die resultierende Druckkraft zu:

$$F_D = 1,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{(80\text{mm})^2 \cdot \pi}{4} - (9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,9\text{kg}) = 835,874\text{N} \quad (1)$$

Diese Kraft wird auf sechs Federn zu je $139,321\text{N}$ aufgeteilt. Mit der errechneten Kraft wird über den vorhandenen Einbauraum eine Feder vorausgewählt. Diese hat ungespannt eine Länge von $29,6\text{mm}$. Die Federrate ist mit $R = 31,25 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$ gegeben. Die schon vorhandene innere Vorspannkraft F_0 der Feder beträgt $23,6\text{N}$ (Datenblatt Feder siehe Anhang 6).

4.2.5.2 Berechnung der Längenänderungen

Durch die Erwärmung des Versuchsaufbaus entstehen verschiedene Längenänderungen an den Bauteilen. Davon sind hauptsächlich das Glas und die Verbindungselemente betroffen. Für die Längenänderung des Glases wird eine Temperaturdifferenz von maximal $110K$ angenommen. Mit einer Länge von $300mm$ und dem linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha = 3,3 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$ [8] ergibt sich eine Längung des Glases bei vollständiger Erwärmung von:

$$\Delta l_{\text{Glas-Erwärmung}} = 110K \cdot 300mm \cdot 3,3 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K} = 0,109mm \quad (2)$$

Die Längenänderungen des Glases und der Verbindungsstäbe aufgrund der Verspannungskraft ist vernachlässigbar klein. Dort ergeben sich Werte von $\Delta l_{\text{Glas-Druck}} = 0,003mm$ und $\Delta l_{\text{Stäbe-Zug}} = 0,008mm$. Detaillierte Rechnungen dazu sind in Anhang 5 zu finden.

Interessant hingegen ist die Längenänderung der Verbindungsstäbe aufgrund von Erwärmung. Dafür werden $80K$ Temperaturdifferenz angesetzt. Der verwendete Edelstahl V2A 1.4301 hat einen Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha = 16 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$ [9]. Die Gesamtlänge der Verbindungsstäbe beträgt $323,7mm$. Mit diesen Werten errechnet sich die Längenänderung der Verbindungsstäbe zu:

$$\Delta l_{\text{Stäbe-Erwärmung}} = 80K \cdot 323,7mm \cdot 16 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K} = 0,414mm \quad (3)$$

Dieses Ergebnis zeigt, dass die Ausdehnung der Verbindungselemente bei vollständiger Erwärmung fast um den Faktor 4 größer ist als die des Glases.

4.2.5.3 Berechnung des kritischen Belastungsfalles

Für die folgenden Berechnungen werden zwei verschiedene Belastungsfälle untersucht. Bei Fall 1 wird allein die Erwärmung des Glases betrachtet. Fall 2 berücksichtigt, dass sowohl Glas und Verbindungselemente vollständig erwärmt sind.

Die Gesamtlängenänderung bei Fall 1 errechnet sich zu:

$$\begin{aligned}\Delta l_{Fall_1} &= -\Delta l_{Glas-Druck} - \Delta l_{Stäbe-Zug} + \Delta l_{Glas-Erwärmung} \\ &= (-0,003 - 0,008 + 0,109)mm = 0,098mm\end{aligned}\quad (4)$$

Das bewirkt an jeder Feder eine Krafterhöhung, nämlich:

$$F_{Erhöhung} = \Delta l_{Fall_1} \cdot R = -0,098mm \cdot 31,25 \frac{N}{mm} = 3,048N \quad (5)$$

Identische Rechnung wird für Fall 2 durchgeführt:

$$\begin{aligned}\Delta l_{Fall_2} &= -\Delta l_{Glas-Druck} - \Delta l_{Stäbe-Zug} + \Delta l_{Glas-Erwärmung} - \Delta l_{Stäbe-Erwärmung} \\ &= (-0,003 - 0,008 + 0,109 - 0,41)mm = -0,317mm\end{aligned}\quad (6)$$

Hier bewirkt die Längenänderung an jeder Feder eine Kraftminderung von:

$$F_{Minderung} = \Delta l_{Fall_2} \cdot R = -0,317mm \cdot 31,25 \frac{N}{mm} = -9,9N. \quad (7)$$

Also werden die Federn bei Belastungsfall 2 entspannt. Folglich wird die Gesamthaltekraft vermindert. Deshalb wird Fall 2 als die ausschlaggebende kritische Belastung angesehen. Alle weiteren Berechnungen sind auf diesen Fall bezogen. Um auch bei vollständiger Erwärmung die Haltekraft zu gewährleisten, muss die oben berechnete Kraftminderung zusätzlich bei der Auslegung des Federwegs berücksichtigt werden.

Da damit die Gesamthaltekraft größer wird, ist automatisch auch Belastungsfall 1 abgedeckt.

4.2.5.4 Berechnung des Vorspannwegs der Feder und der finalen Gesamtkraft der Verspannung

Die Haltekraft jeder einzelnen Feder wird nun folgend berechnet:

$$F_{Feder'F2} = \frac{F_D + (6 \cdot F_{Minderung})}{6} = 149.212N \quad (8)$$

Zieht man davon die bereits vorhandene innere Vorspannkraft der Feder ab und teilt alles durch die Federrate erhält man den erforderlichen Vorspannweg der Feder s :

$$s = \frac{F_{Feder'F2} - F_0}{R} = 4,02mm \quad (9)$$

Aus Konstruktionsgründen wird der Vorspannweg zu $4,1mm$ definiert. Dadurch erhöht sich die Federkraft zu $151,725N$. Die Gesamtkraft der Verspannung beträgt damit $F_{Gesamt} = 910,35N$.

4.2.5.5 Probe der Druckfestigkeit des Borosilikatglases

Der Maximalwert für Druckbelastung des Borosilikatglases liegt bei $\sigma = 7 \frac{N}{mm^2}$ [8]. Der Druck, welcher durch die Verspannung aufgebracht wird, wirkt auf die Ringfläche des inneren Glases. Diese errechnet sich bei $5mm$ Dicke zu $A_{Druckwirk} = 1335mm^2$. Mit dieser Fläche und der Gesamtkraft aus 4.2.5.4 belaufen sich die vorhandenen Druckspannungen zu:

$$\sigma_{Druck-Vorhanden} = \frac{F_{Gesamt}}{A_{Druckwirk}} = 0,628 \frac{N}{mm^2} \quad (10)$$

Diese Spannungen stellen kein Problem für das Borosilikatglas dar.

4.2.6 Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten

Als eine der größten Schwierigkeiten erweist sich die große Maßtoleranz des Glases. Die dazu vorhandenen Herstellerangaben von dem Lieferanten „Schott AG“ sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Toleranzen Schott AG [8]

Toleranzen Borosilikatzylinder		
Außendurchmessertoleranz	± 1.2	mm
Wanddickentoleranz	± 0.4	mm
Längentoleranz auf 300 mm	± 1	mm

Tabelle 2: Nachgemessene Toleranzen

Toleranzen Borosilikatzylinder nachgemessen (messschiebergenu, Durchschnittswerte)		
Außendurchmessertoleranz	$\pm 0,6$	mm
Wanddickentoleranz	± 0.3	mm
Längentoleranz auf 300 mm	$+ 0.5$	mm

Solch große und ungleichmäßige Toleranzen machen die passende Federkrafteinstellung per Anschlag nahezu unmöglich. Die genaue Kraft kann nur mit einem vorgeschriebenen Anzugsmoment und einem Drehmomentschlüssel eingestellt werden.

Ein weiteres Problem bei der aufgebauten Lösung ist, dass die Ösen der Federn fertigungsbedingt zu klein ausgefallen sind. Dadurch können die Federn in den dünnen Verbindungsstraßen nicht optimal gerade eingehängt werden. Vorgesehen war ein Langloch (siehe Anhang 4), das jedoch in der Werkstatt der Fakultät 03 nicht fertigbar ist; stattdessen sind die Stäbe mit einer 4mm Bohrung versehen. Diese Kausalität verstärkt den Effekt der ohnehin schon großen Glastoleranzen nochmals.

Eine weitere Komplikation ist, dass die Federrate der bestellten Federn nicht mit dem Datenblatt übereinstimmt. Um für den Versuch trotzdem die richtige Federkraft einstellen zu können, müssen alle Federn mit einem Ersatzgewicht ($m = 15kg$) ausgemessen werden. Dieser gemessene Federweg wird bei dem finalen Aufbau wiederum mittels Messschieber eingestellt.

Um diese Problematik in neuen Konstruktionen zu verhindern, ist wie oben schon angesprochen ein definiertes Anzugsmoment vorzusehen. Falls die Probleme der jetzigen Konstruktion umgangen werden, ist das Konzept durchaus für die Serienfertigung geeignet.

4.3 Konstruktion Buchsen (Tim Kittelmann)

Um diverse Anschlüsse und Leitungen vom Außenbereich in das Innere des Boilers zu verlegen, ist die Konstruktion von Buchsen nötig. Bei direktem Verschrauben von zum Beispiel dem Heizelement mit dem Boden besteht die Möglichkeit, dass Wasser zwischen PTFE-Einlage und Boden drückt und so entweicht. Durch den Hut der Buchse wird die PTFE-Einlage beim Verschrauben auf den Boden gepresst und dichtet somit. Um diesen Effekt zu unterstützen, werden die Buchsen im Bereich der PTFE-Einlage mit einer Passung versehen. Da die Buchsen aufgrund ihrer Dimensionen keine nennenswerten temperaturbedingten Längenänderungen erfahren, stellt an dieser Stelle auch die niedrige Fließgrenze von PTFE kein Problem dar. Abbildung 7 veranschaulicht die Anordnung der Buchsen in Boden und Deckel, Fertigungszeichnungen der einzelnen Buchsen finden sich in Anhang 7.

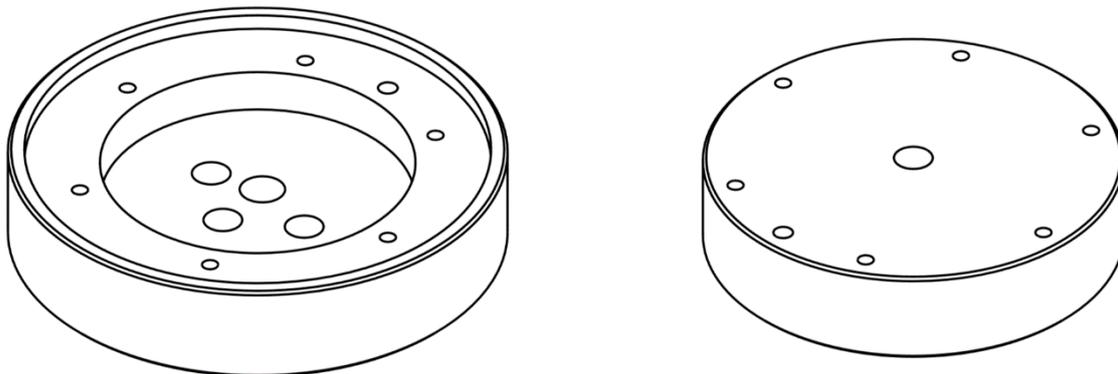


Abbildung 7: Boden (links) und Deckel (rechts)

4.3.1 Buchse für Heizelement

Das Heizelement wird mittig am Boden des Boilers platziert. Da die Anbringung der Heizspirale exzentrisch ist, ergeben sich geringe Abweichungen in x- und y-Richtung, die genauen Maße sind Anhang 8 zu entnehmen. Das Heizelement verfügt über eine vormontierte Schneidringverschraubung mit einem NPT1/8-27 Gewinde, deren Gegenstück das Innengewinde der Buchse bildet. Als Außengewinde kommt ein M16 Standardgewinde zum Einsatz. Der Hutdurchmesser beträgt 19mm.

4.3.2 Buchsen für Temperatursensoren

In Boden und Deckel wird je ein Temperatursensor verbaut. Beide Sensoren verfügen über ein M8x1 Feingewinde und werden von der Außenseite in die Buchse geschraubt. Als Außengewinde der Buchsen wird ein M14 Gewinde gewählt, da die Buchsen für Steigrohr und Druckrohr ebenfalls dieses Maß verwenden und so kein weiterer Werkzeugwechsel nötig wird. Die Buchse für den oberen Temperatursensor wird mittig platziert, sie ist die einzige Buchse im Deckel. Der Hutdurchmesser beträgt bei beiden Buchsen 20mm. Die untere Buchse wird so platziert, dass auch bei den umliegenden Buchsen möglichst große Hutdurchmesser möglich sind und der Sensor dennoch nicht direkt unter der Spirale des Heizelements liegt, um die Messwerte nicht zu stark zu beeinflussen.

4.3.3 Buchsen für Steigrohr und Druckrohr

Um dem Boiler Wasser zuführen und Dampf entnehmen zu können, werden im Boden ein Steigrohr und ein Druckrohr mit jeweils 6mm Durchmesser und 1mm Wandstärke eingesetzt. Die genaue Ausführung dieser ist in der Bachelorarbeit von Tobias Tritschler [1] beschrieben. Für die Rohre ist jeweils eine Schneidringverschraubung vorgesehen, die ein G1/4“ Außengewinde hat. Aufgrund dieses recht großen Gewindes sitzt zwischen der Schneidringverschraubung und der Buchse ein Adapter, der auf ein G1/8“ Innengewinde der Buchsen führt. Die Buchsen haben jeweils ein M14 Außengewinde, um ausreichend Materialstärke zu gewährleisten. Die Positionierung der Buchsen erfolgt jeweils links und rechts außermittig, um die beiden Rohre berührungslos im Inneren der Heizspirale verlaufen zu lassen. Die genauen Maße sind Anhang 7 zu entnehmen. Aus Platzgründen ist der Hutdurchmesser einer Buchse lediglich mit 16mm möglich, der der anderen Buchse beträgt 20mm.

4.3.4 Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten

Ein nicht unerhebliches Problem stellt der Platzmangel im Boden aufgrund des geringen Boilerdurchmessers dar. Die dadurch gering ausfallenden Hutdurchmesser der Buchsen erfordern eine sehr präzise Fertigung und Montage, da es andernfalls zu Undichtigkeiten kommen kann. Des Weiteren sind bereits geringe Winkelabweichungen im Gewinde ausreichend, dass sich Steigrohr und Druckrohr berühren beziehungsweise theoretisch durchdringen. Die Verwendung eines Adapters zwischen der Schneidringverschraubung von

Steigrohr und Druckrohr und der jeweiligen Buchse sorgt für zusätzliche Kosten, um diese zu eliminieren ist die Verwendung einer Schneidringverschraubung mit einem geringeren Gewindedurchmesser zu empfehlen.

Die vormontierte Schneidringverschraubung des Heizelements weist ein sehr unübliches NPT1/8-27 Gewinde auf, das unter Umständen zu erhöhten Werkzeugkosten führen kann. Falls möglich, ist ein Heizelement mit einem Standardgewinde zu verwenden.

Für die Serienfertigung kann zudem die Anbringung der Buchsen für die Temperatursensoren über ein Linksgewinde in Betracht gezogen werden, da sich diese mit einem Rechtsgewinde bei Einschrauben des Temperatursensors wieder lösen.

4.4 Hydraulikplanung (Tim Kittelmann)

Vor der Bestellung und Montage der Hydraulikkomponenten wird zunächst ein Plan erstellt. Er dient der Material- und Montageplanung und soll auch sich zukünftig mit dem Projekt befassenden Personen helfen, sich zügig in das Thema einzuarbeiten.

4.4.1 Komponenten

Die Verschlauchung findet mittels AVS-Römer-Anschlüssen und einem PTFE-Schlauch mit *6mm* Außendurchmesser und *1mm* Wandstärke statt.

Die Pumpe dient der Wasserversorgung des Boilerinnenraums und wurde im Vorfeld durch die Kaffeewerkstatt München UG bereitgestellt. Auf der Saugseite wird ein Schlauch aufgeschoben, auf der Druckseite verfügt die Pumpe über einen AVS-Römer-Anschluss.

Zur Steuerung von Befüllung und Dampfbezug werden zwei Magnetventile eingesetzt, die auf beiden Seiten mit AVS-Römer-Anschlüssen bestückt werden.

Aus der Risikobetrachtung ergibt sich die Notwendigkeit eines Überdruckventils. Dieses wird über einen AVS-Römer-Schraubanschluss mit einem Schlauchende verbunden. Um einem beim Abkühlen entstehenden Vakuum entgegenzuwirken, ist des Weiteren ein Unterdruckventil nötig. Dieses ist selbst bereits mit AVS-Römer-Anschlüssen versehen und wird im Schlauch verbaut.

Die Dampfzange wird, wie auch die Pumpe, von der Kaffeewerkstatt München UG zur Verfügung gestellt und wird über einen AVS-Römer-Schraubanschluss an das entsprechende Schlauchende angeschlossen.

Steigrohr und Druckrohr werden über Adapter mit den Buchsen verbunden, mit welchen sie im Boden verschraubt werden. Diese Buchsen sind mit einem G1/8“-Gewinde konstruiert, sodass von der Unterseite AVS-Römer-Anschlüsse eingeschraubt werden können.

4.4.2 Hydraulikplan

Im Folgenden ist der Hydraulikplan abgebildet:

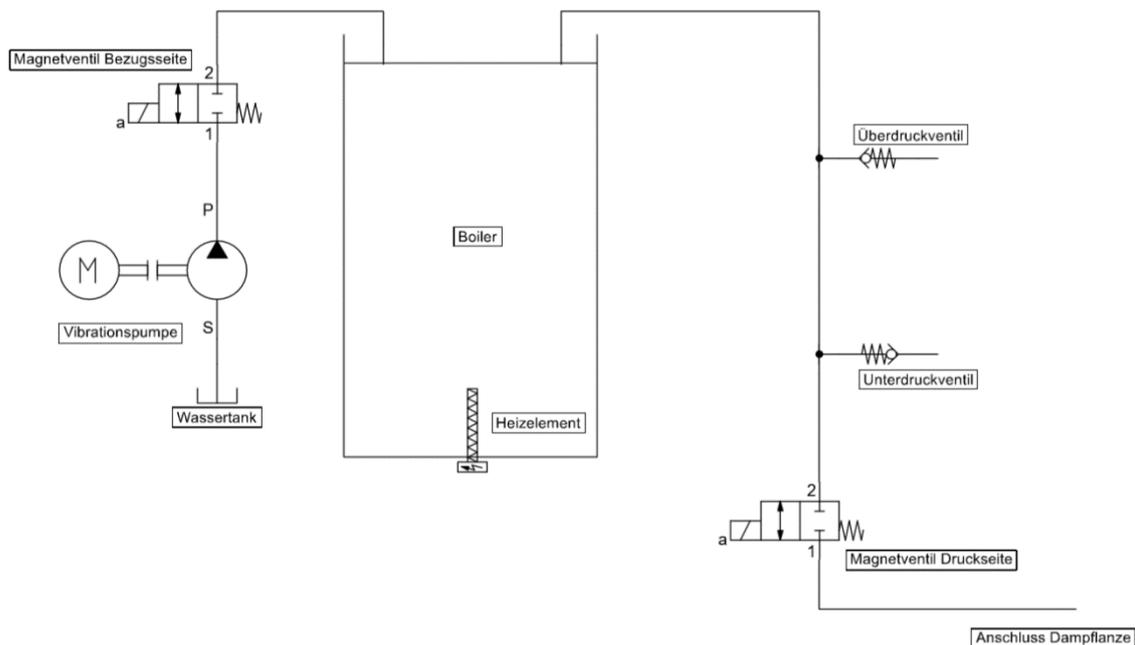


Abbildung 8: Hydraulikplan

Das Wasser wird über die Rotationspumpe aus dem Tank bezogen und im Boiler mithilfe des Heizelements verdampft, wobei das Magnetventil auf der Bezugsseite den Zufluss steuert. Der Wasserdampf wird über das Magnetventil auf der Druckseite abgelassen. Ist der Druck im Boiler zu hoch oder zu niedrig, wird dies über Unter- und Überdruckventil ausgeglichen. An der Dampflanze kann der Dampf schließlich bezogen werden.

4.4.3 Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten

Die verwendete Pumpe kann nicht über das dafür vorgesehene Relais gesteuert werden, die Ursache ist unbekannt. Die provisorische Beschaltung findet über eine schaltbare Mehrfachsteckdose statt. Für die Serie ist, solange die Ursache unklar bleibt, eine andere Pumpe zu verwenden.

4.5 Elektroplan (Florian Fritz)

Um den Aufbau der Elektronik verständlich abzubilden, wird ein Elektroplan erstellt. Dieser hat auch die Funktion, dass nachfolgende Projekte problemlos an dem vorhandenen Aufbau weiterarbeiten können.

4.5.1 Elektronische Komponenten

Die Elektronik soll eine einfache und genaue Bedienung des Versuchsaufbaues ermöglichen. So sollen das Heizelement, die Vibrationspumpe und die beiden Magnetventile zum Wasser- bzw. Dampfbezug einzeln und unabhängig voneinander schaltbar sein. Dies wird durch Relais ermöglicht, welche jeweils eine dieser Komponenten ansteuern. Neben dem Schalten der Bauteile muss durch die Elektronik ein Kommunikationsfluss von den messtechnischen Komponenten bis hin zur MATLAB® Schnittstelle gegeben sein. Gesteuert wird der gesamte Versuch mit einer vom Betreuer programmierten Software, welche auf einem Raspberry Pi ausgeführt wird. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass im Notfall alle potenziellen Gefahren über einen Notstromschalter abgeschaltet werden können.

Grundlegend sind sieben elektronische Komponenten in dem Versuchsaufbau vorhanden. Diese sind Temperaturmessplatinen, Magnetventile, Vibrationspumpe, Raspberry Pi, SSR-Verteilerplatine, AD-Board und das Heizelement.

Die Platinenlayouts und Schaltpläne für die SSR-Verteilerplatine und für die Temperaturmessplatinen werden direkt vom Betreuer entwickelt.

Um die Kabel richtig zuweisen zu können, folgt nun ein kurzer Überblick. Die in den Schaltplänen auftauchende Bezeichnung „L“ meint die Phase des Netzes und bezieht sich auf das schwarze Kabel. „N“ steht für den Neutralleiter. Dafür wird das blaue Kabel verwendet. Das Gelbe Kabel ist dem Schutzleiter „PE“ zugeordnet.

4.5.2 Temperaturmessplatinen

An die drei Temperaturmessplatinen (Abbildung 9) können jeweils acht Temperatursensoren angeschlossen werden. Zur Kommunikation mit dem Computer sind die Platinen an dem GPIO Expander (PORT A-0x20) des Raspberry Pi angeschlossen. Die einzelnen Messsignale der Platinen werden an die Eingänge A00, A01, A02 des High-Precision AD/DA Boards (Abbildung 14) gesendet. Abbildung 9 zeigt auch, welcher Temperatursensor wo auf der Platine sitzt. Wo genau diese auf den Glaszylindern angebracht sind, ist in Kapitel 4.6.1 zu finden.

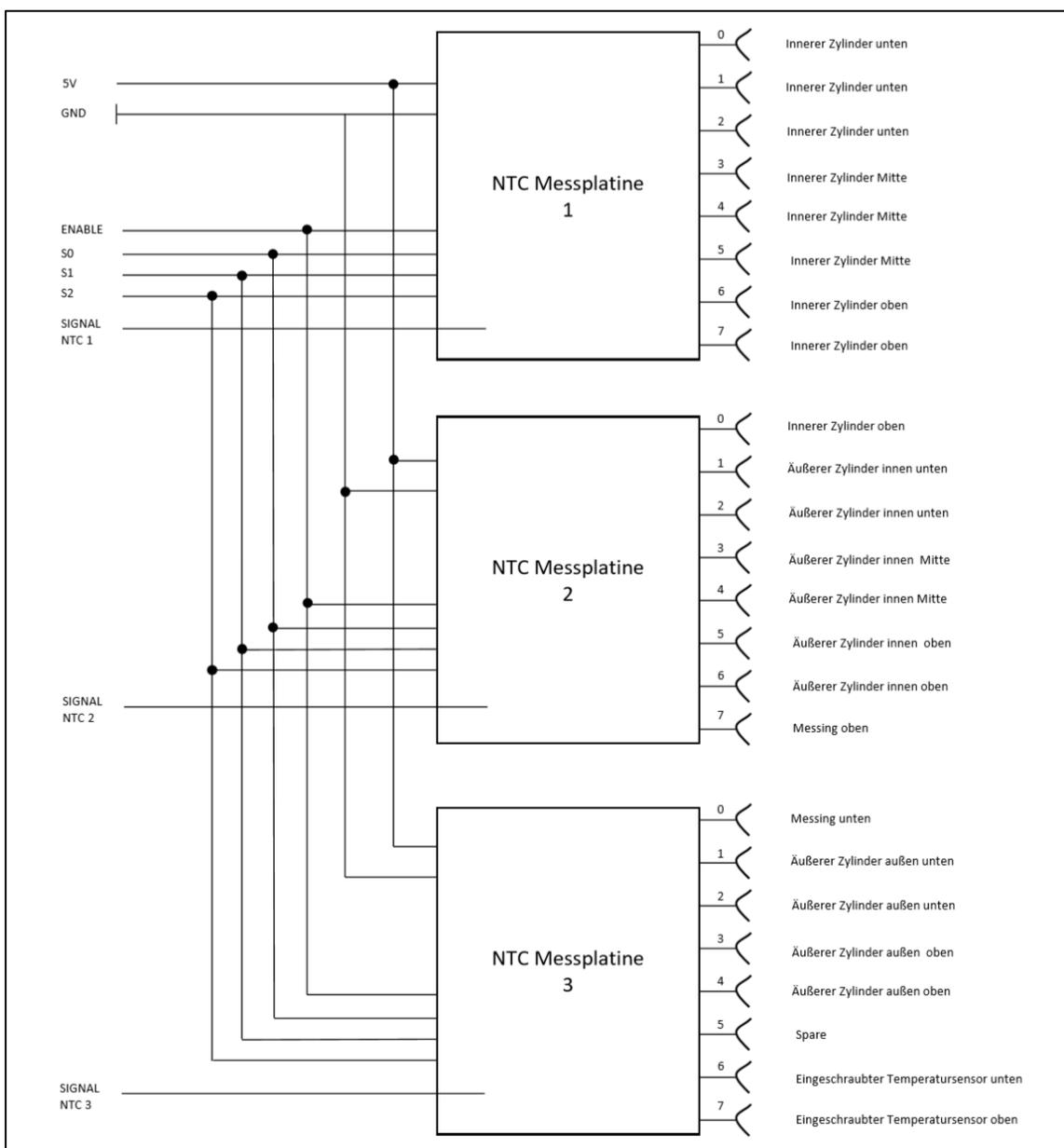


Abbildung 9: Anschlussplan der Temperaturmessplatinen

4.5.3 Solid-State-Schaltplatine

In Abbildung 10 ist die SSR-Verteilerplatine dargestellt. Diese wird direkt mit Netzspannung versorgt. Damit können die zwei Magnetventile (Y1, Y2), das Heizelement und die Vibrationspumpe (M) betrieben werden. Zum Schalten der drei Relais ist die Platine an ein 24V Netzteil angeschlossen. Über den Anschluss am GPIO-Expander (PORT B-0x20 und PORT A-0x21, siehe Abbildung 11) ist die Platine mit dem Raspberry Pi verbunden. Dadurch können die Relais der Platine einzeln vom Bediener geschaltet werden.

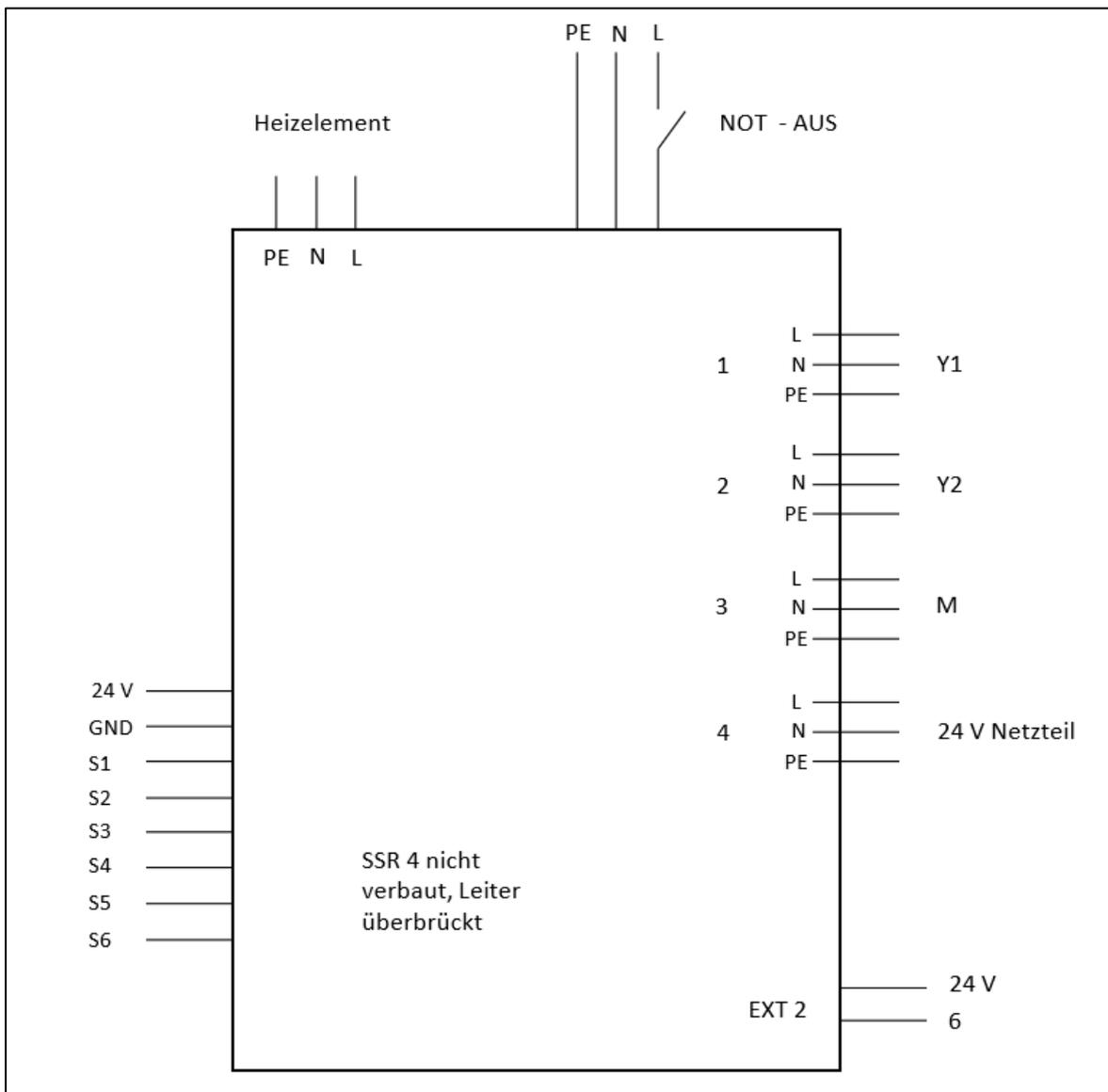


Abbildung 10: SSR-Platine

4.5.4 Anschlussplan GPIO-Expander

Der genaue Anschlussplan des oben schon angesprochenen GPIO-Expanders mit seinen verschiedenen PORTS ist hier in Abbildung 11 dargestellt.

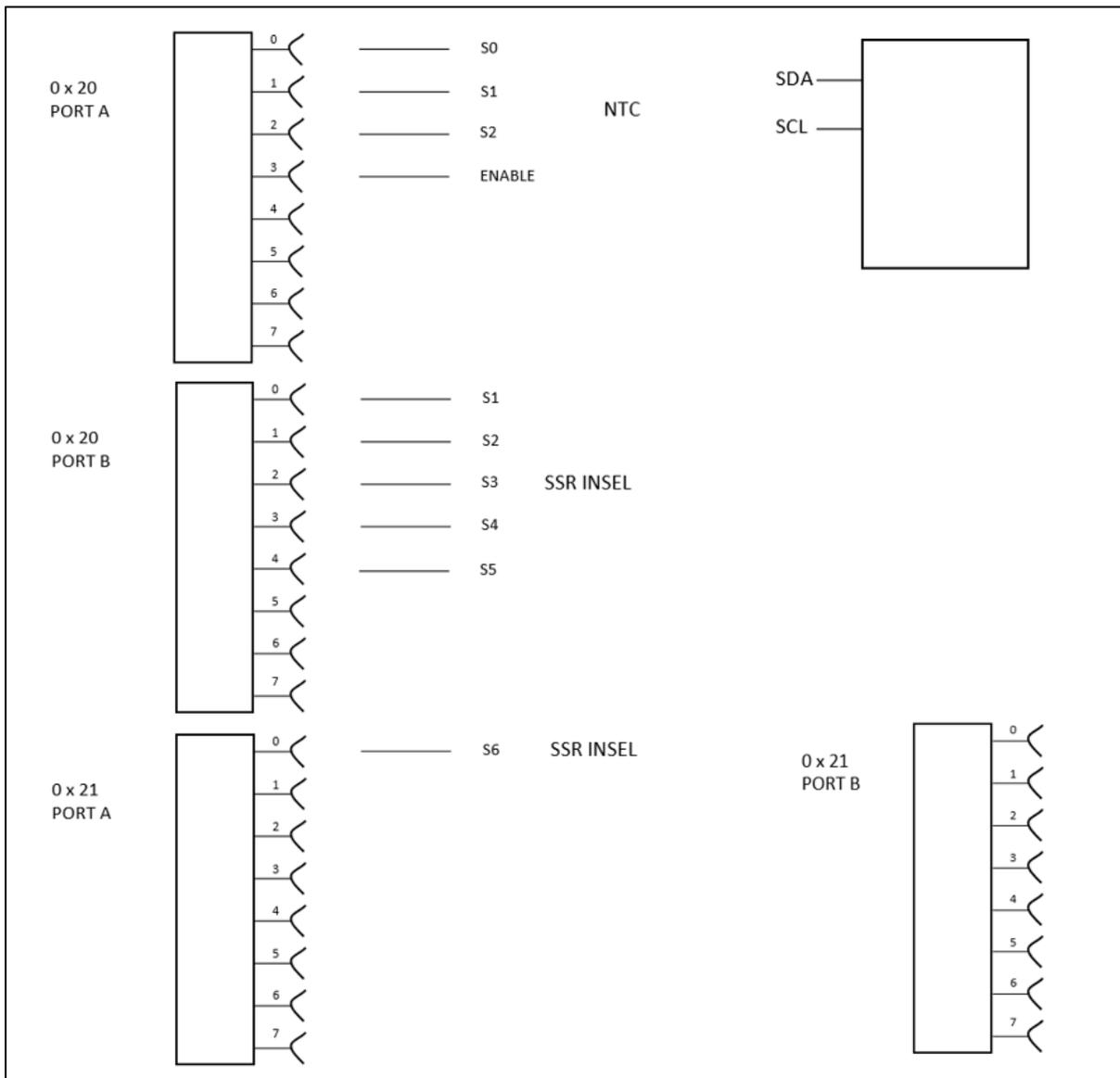


Abbildung 11: Anschlussplan GPIO-Expander

4.5.5 Solid-State-Relais Ansteuerung Heizelement

Das Heizelement wird nicht direkt über die SSR-Platine geschaltet. Dafür wird ein externes, großes SSR verwendet. Den Anschlussplan zwischen SSR-Platine und Heizelement zeigt Abbildung 12.

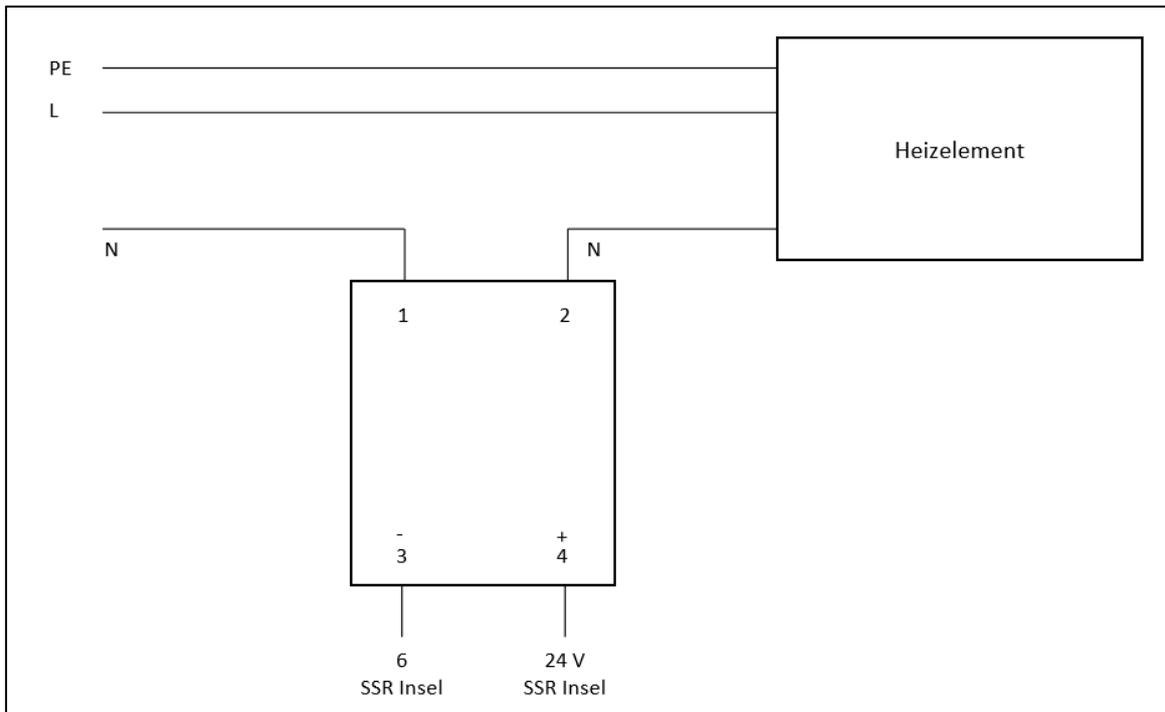


Abbildung 12: Verschaltung Heizelement

4.5.6 Anschluss Raspberry Pi und AD/DA - Board

Der Raspberry Pi wird durch ein 5V Netzteil versorgt und mit dem GPIO Expander verbunden. Um die Kommunikation zwischen MATLAB® und Raspberry Pi herzustellen, wird der Pi über ein LAN-Kabel an den Laborlaptop angeschlossen. Den Kontaktplan des Raspberry zeigt Abbildung 13.

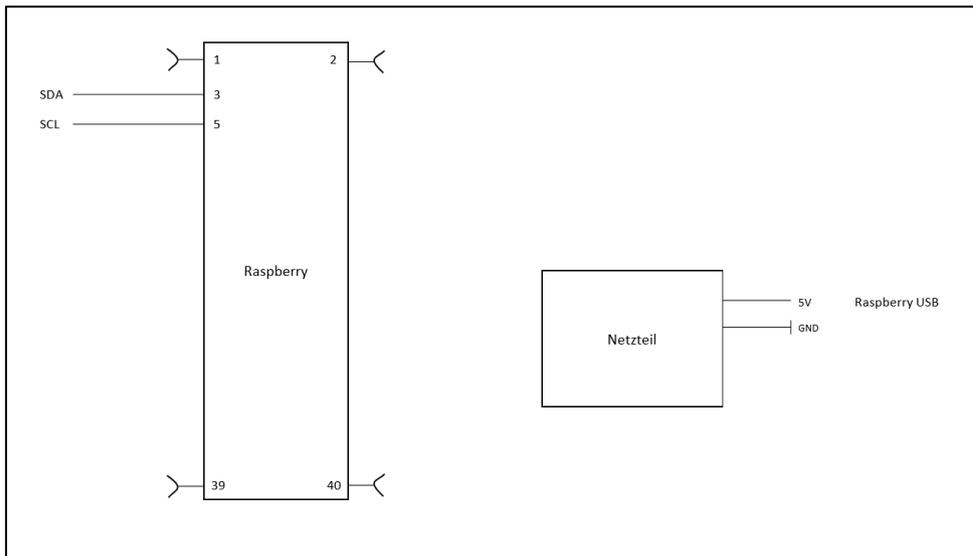


Abbildung 13: Anschluss Raspberry Pi

Das in Punkt 4.5.2 schon aufgegriffene AD/DA Board zur Umwandlung der Messsignale erhält neben den drei Signalen der Temperaturmessplattenen auch das Signal des Drucksensors. Die Anschlüsse werden in Abbildung 14 gezeigt.

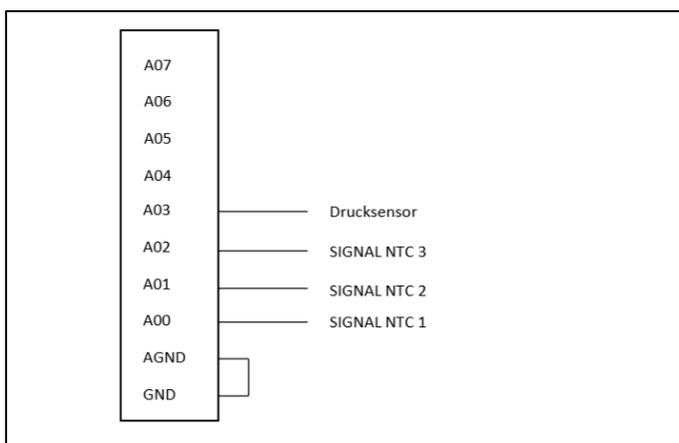


Abbildung 14: Anschluss AD/DA Board

4.6 Messtechnik (Johannes Kastner)

Zur Versuchsauswertung wird der Boiler intensiv mit Messtechnik ausgestattet. Diese umfasst 24 Temperatursensoren, einen Drucksensor und vier DMS-Messstellen, um sämtliche versagenskritischen Parameter des inneren Glaszylinders zu überwachen. Im Folgenden soll ein genauer Überblick über die Messtechnik und die überwachten Parameter gegeben werden.

4.6.1 Temperatursensoren

Zur Auswertung der Temperatur werden 24 Temperaturmessstellen bestimmt. Die Temperatursensoren sind wie folgt angeordnet:

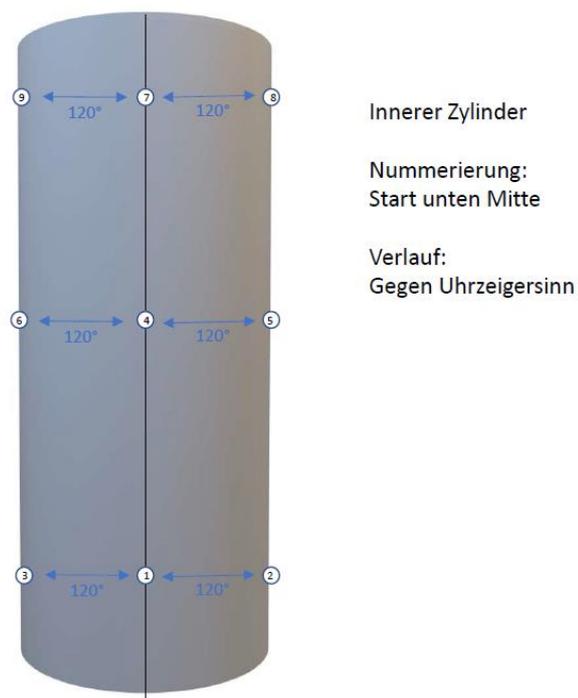
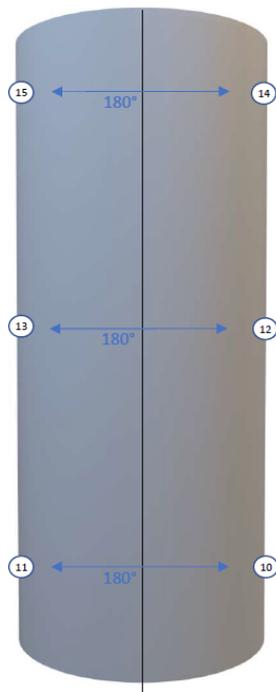


Abbildung 15: NTC innerer Zylinder



Äußerer Zylinder innen

Nummerierung:
Start unten Rechts

Verlauf:
Gegen Uhrzeigersinn

Abbildung 16: NTC äußerer Zylinder innen



Äußerer Zylinder außen

Nummerierung:
Start unten Rechts

Verlauf:
Gegen Uhrzeigersinn

Abbildung 17: NTC äußerer Zylinder außen

Tabelle 3: Übersicht über Anbringung der NTCs

Messplatine 1	Anbringung	Nummerierung
Kanal 1	Innerer Zylinder unten	1
Kanal 2	Innerer Zylinder unten	2
Kanal 3	Innerer Zylinder unten	3
Kanal 4	Innerer Zylinder Mitte	4
Kanal 5	Innerer Zylinder Mitte	5
Kanal 6	Innerer Zylinder Mitte	6
Kanal 7	Innerer Zylinder oben	7
Kanal 8	Innerer Zylinder oben	8
Messplatine 2		
Kanal 1	Innerer Zylinder oben	9
Kanal 2	Äußerer Zylinder innen unten	10
Kanal 3	Äußerer Zylinder innen unten	11
Kanal 4	Äußerer Zylinder innen Mitte	12
Kanal 5	Äußerer Zylinder innen Mitte	13
Kanal 6	Äußerer Zylinder innen oben	14
Kanal 7	Äußerer Zylinder innen oben	15
Kanal 8	Messing oben	16
Messplatine 3		
Kanal 1	Messing unten	17
Kanal 2	Äußerer Zylinder außen unten	18
Kanal 3	Äußerer Zylinder außen unten	19
Kanal 4	Äußerer Zylinder außen oben	20
Kanal 5	Äußerer Zylinder außen oben	21
Kanal 6	Spare/Umgebung	22
Kanal 7	Temperatursensor einschraubbar unten	23
Kanal 8	Temperatursensor einschraubbar oben	24

Als Sensoren kommen aus kostentechnischen Gründen NTCs zum Einsatz. Das sind Halbleiter, die eine von der Temperatur abhängige Widerstandscharakteristik besitzen.

In dem Versuchsaufbau sind 22 Sensoren der Firma Epcos mit der Teilenummer B57861S0103+040 verbaut. Relevante Auszüge aus dem Datenblatt dazu finden sich in Anhang 9.

Die vorhandenen Temperaturmessplatinen (siehe Kapitel 4.5.2) müssen für die ausgewählten NTCs angepasst werden. Die Messung der Temperatur erfolgt indirekt als Spannungsmessung an einem Spannungsteiler, wovon ein Widerstand der NTC ist, an dem der Spannungsabfall gemessen wird. Der zweite Widerstand ist ein Festwiderstand, dessen Auslegung nachfolgend beschrieben wird:

Mittels einer Tabellenkalkulation kann der Widerstand des NTC bei einer bestimmten Temperatur errechnet werden. Anschließend wird mit der Formel für den Spannungsteiler der Strom durch den Halbleiter bei verschiedenen Temperaturen und Vorwiderständen berechnet. Der maximal zulässige Wert von $60mW$ darf dabei nicht überschritten werden.

Es stellt sich bei den Berechnungen heraus, dass die $60mW$ in keinem Fall überschritten werden bevor die Spannungsreferenz (MCP1525/41) an die Grenze ($2mA$) kommt. Es bleiben daher bei acht Sensoren pro Platine nur $0,25mA$ pro Sensor übrig. Bei $150^{\circ}C$ wird erst bei einem Vorwiderstand von $1,2k\Omega$ diese obere Grenze nicht mehr überschritten. Der empfohlene Strom von $0,1mA$ an der Spannungsreferenz ($0,0125mA$ pro Sensor) wird ab einem Widerstand von $3,3k\Omega$ erreicht.

Die Platinen sind sicherheitshalber mit $4,7k\Omega$ Widerständen bestückt. Die Steckplätze für die zwei weiteren möglichen Widerstände sind überbrückt.

Zwei weitere Temperatursensoren sind in Boden und Deckel des Boilers eingeschraubt. Diese haben zwar eine andere Bauform, jedoch die gleiche Kennlinie, sodass sie in der Auswertung gleich behandelt werden können.

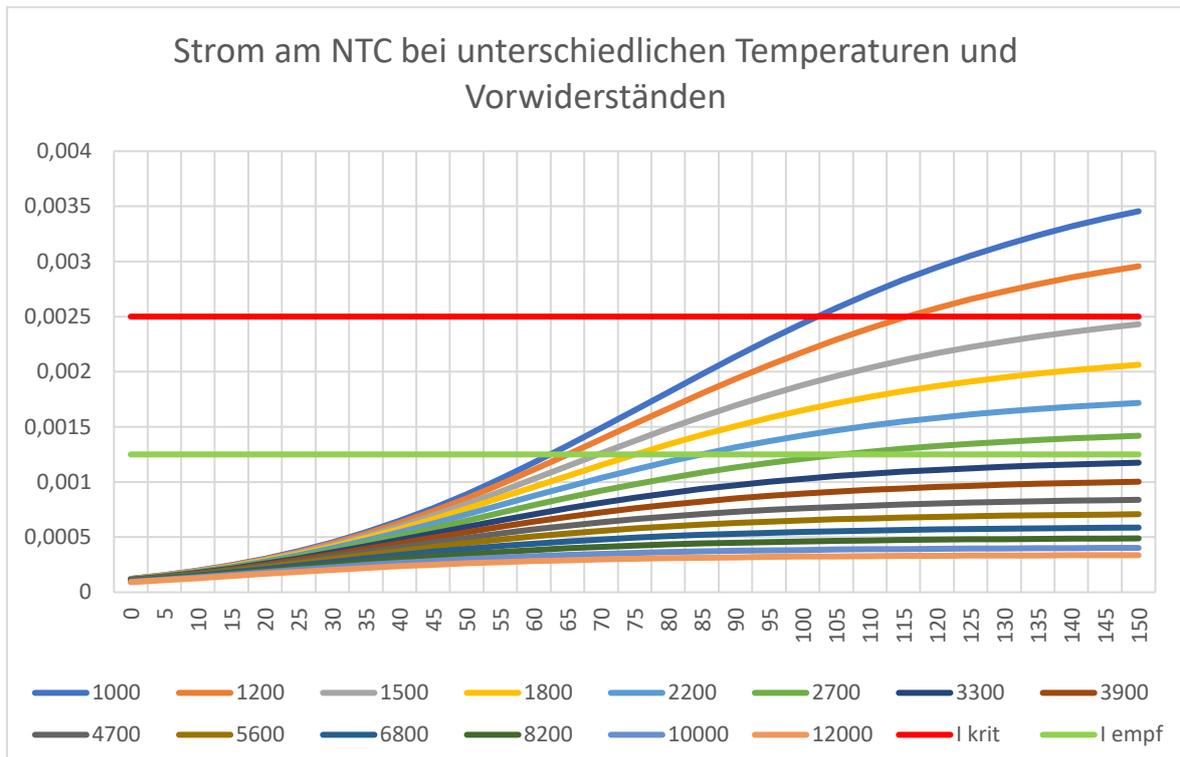


Abbildung 18: Stromverlauf verschiedener Vorwiderstände

4.6.2 Drucksensor

Der Drucksensor ist auf der Druckseite des Boilers vor dem Magnetventil in den Schlauch eingebaut. Er wird mit 5V Versorgungsspannung versorgt und liefert abhängig vom Druck linear einen Wert zwischen 0,5V und 4,5V, der am AD-Wandler umgewandelt wird. Der Zusammenhang zwischen Druck und Ausgangsspannung wird aus dem Datenblatt in Anhang 10 ersichtlich.

4.6.3 Dehnungsmessstreifen

Zur Überwachung der Längenänderung des Glases, die sich aus Temperatursausdehnung und den Spannungen aus der mechanischen Belastung durch Druckbeaufschlagung des Boilers ergibt, werden Dehnungsmessstreifen eingesetzt. Diese verändern je nach Dehnung ihren Widerstand. Diese geringen Widerstandsänderungen lassen sich mit einer Wheatstoneschen Messbrücke auswerten.

Die Auswertung übernimmt im Messaufbau eine NI-Messkarte, an der die DMS angeschlossen werden. Die Werte werden per USB-Interface an den Rechner, auf dem die Auswertungssoftware läuft, weitergeleitet.

4.6.4 Softwareanforderungen

Sämtliche Elektronik und Messtechnik des Versuchsaufbaus wird von dem Raspberry Pi angesteuert und ausgewertet. Zur Überwachung der Messwerte und Interaktion mit den Funktionen wie Heizung oder Dampfbezug kommt eine GUI zum Einsatz, die mit MATLAB® App Designer erstellt wird. Bei der Programmierung bekommt das Projektteam dankenswerterweise Unterstützung des Betreuers, der die Umsetzung der GUI und der Raspberry Software übernimmt.

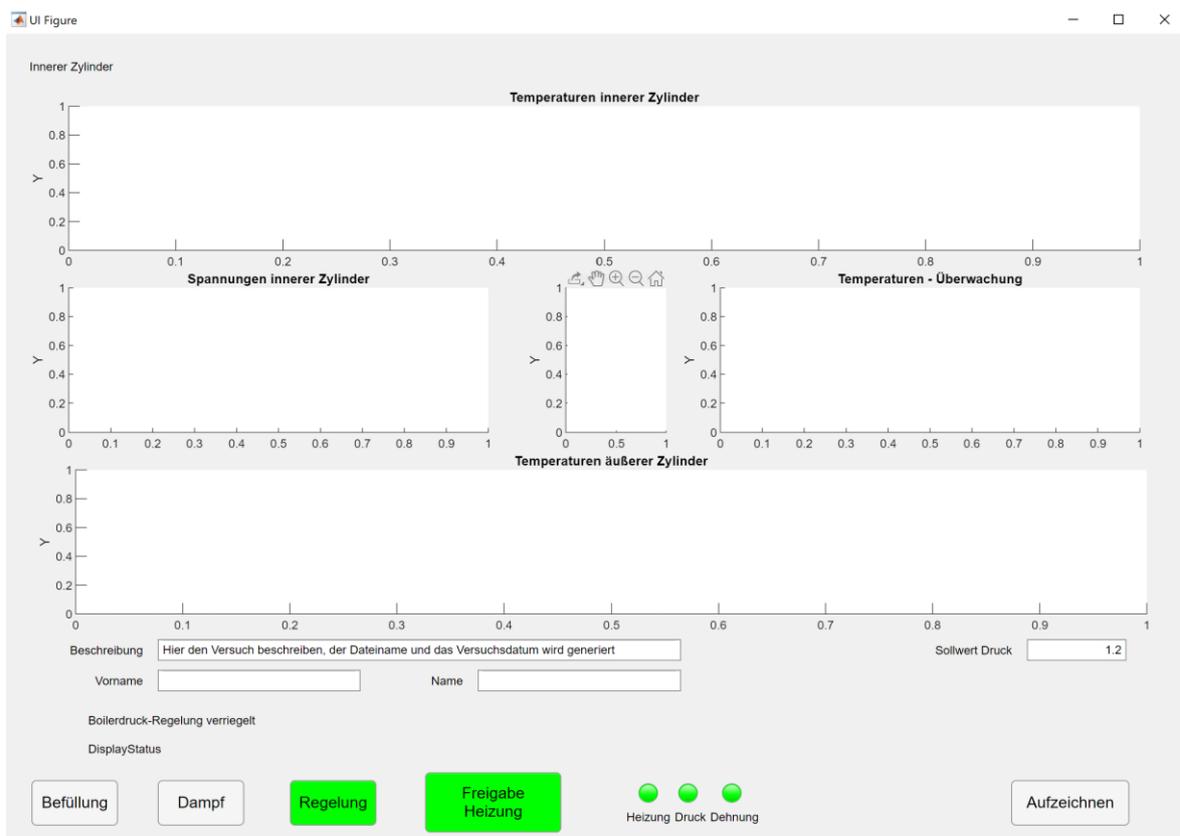


Abbildung 19: grafische Benutzeroberfläche der Messtechnik

Balkendiagramme geben einen schnellen Überblick über den aktuellen Zustand des Boilers. Die klickbaren Schaltflächen steuern die Pumpe und das bezugsseitige Magnetventil (Schaltfläche *Befüllung*), das druckseitige Magnetventil (Schaltfläche *Dampf*) und die Heizwendel (Schaltflächen *Regelung* und *Freigabe Heizung*).

In der aktuellen Softwareversion lassen sich nur Werte anzeigen und die Zustände der SSRs per Schaltfläche ändern. Geplant ist später eine Regelung der Heizleistung, automatische Befüllung nach Bedarf bei niedrigem Füllstand und eine Aufzeichnung der Messwerte.

Auch ist eine Abschaltung bei Überschreitung von sicherheitsrelevanten Werten erforderlich. Diese sind für den Druck $1,7\text{bar}$. Außerdem darf eine bestimmte Temperaturdifferenz zwischen Innentemperatur des Boilers und der Außenwand des Innenzylinders nicht überschritten werden.

Die kritischen Werte sind temperaturabhängig [1]. Da die in der Quelle angegebenen Tabellen ungenau zu lesen sind, wurde für die Ausführung eine erneute Berechnung durchgeführt und geplottet.

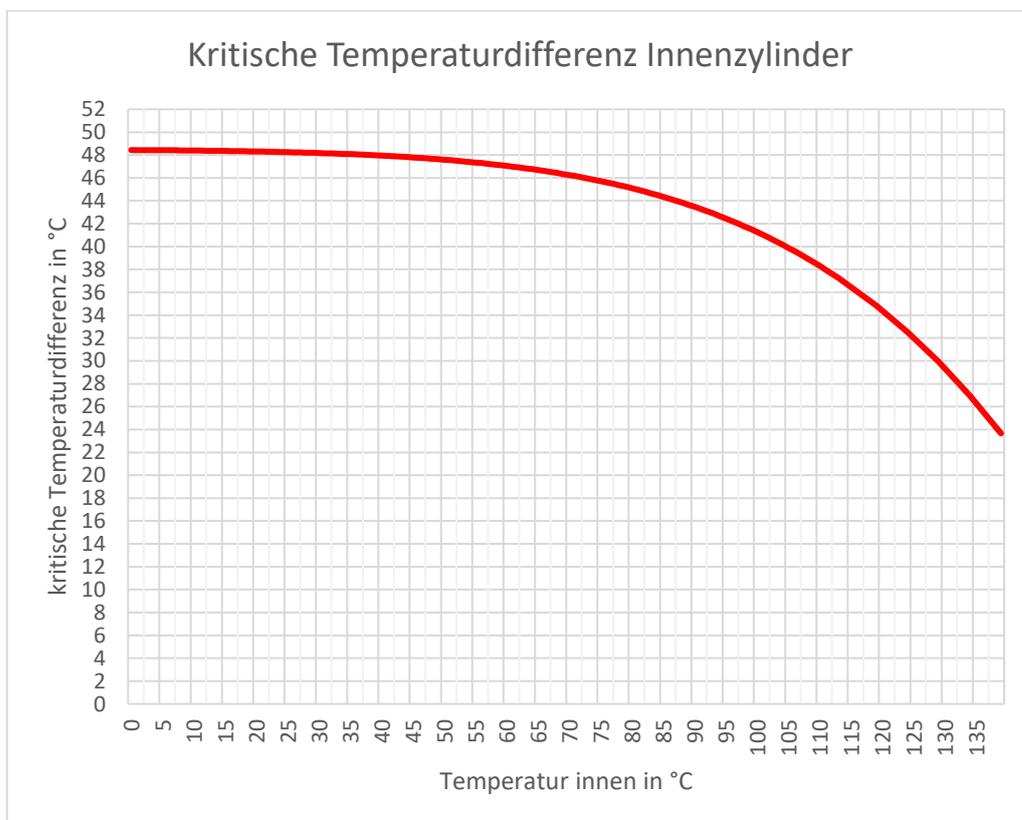


Abbildung 20: Kritische Temperaturdifferenz

Es wird ersichtlich, dass die kritische Temperaturdifferenz ab 100°C stark abnimmt. Um sicherzugehen, dass das Glas nicht versagt, wird empfohlen, die Temperaturdifferenz auch während der Aufheizphase nicht über 24K ansteigen zu lassen. Das geht zwar zu Lasten der Aufheizrate, ist aber aus sicherheitstechnischen Gründen sinnvoll. Bei Umsetzung einer höheren Aufheizrate in der Serie kann sich näher an der Kurve orientiert werden.

4.7 Versuchsaufbau (Tim Kittelmann)

In diesem Kapitel werden der Aufbau des Systems sowie zugehörige Probleme beschrieben.

4.7.1 Versuchsrahmen

Zunächst wird ein grundlegender Aufbau für das System benötigt, auf dem der Boiler sowie die Elektronik und Hydraulik Platz finden. Hierfür wird ein 40mm Aluminium Vierkantmaterial verwendet, das in entsprechende Stücke gesägt und mittels passendem Verbindungsmaterial montiert wird. Der gesamte Versuchsaufbau befindet sich in einer tiefgezogenen Leichtmetallschale auf einer rutschfesten Gummimatte. Die Schale dient als Auffangbecken für einen undichten oder platzenden Boiler.

4.7.2 Montage Boiler

Auf dem Versuchsrahmen wird nun der Boiler aufgebaut. Als erstes werden Heizelement, Druckrohr, Steigrohr und Temperatursensor im Boden befestigt, in den zuvor PTFE-Einlage und Dichtung gelegt werden. Der Boden liegt auf dem Versuchsrahmen und ist durch das spätere Gesamtgewicht des Boilers sowie die Geometrie des Versuchsrahmens gegen Verrutschen und Kippen gesichert. In die sechs kreisförmig angeordneten Bohrungen werden die unteren Stäbe des Verspannungsmechanismus geschraubt.

Im nächsten Schritt wird der innere Zylinder mit den in Abschnitt 4.6.1 und 4.6.3 beschriebenen Sensoren mittels eines lebensmittelverträglichen Zwei-Komponentenklebers beklebt und auf den Boden gesetzt. Anschließend wird der Deckel mit dem Temperatursensor und der dafür vorgesehenen Buchse sowie ebenfalls PTFE-Einlage und Dichtung versehen und auf den inneren Zylinder gelegt. Der Deckel wird mit den oberen Stäben, den Federn und den dazu nötigen Unterlegscheiben und Muttern verspannt, hierzu sind mindestens zwei Personen erforderlich.

Nach dem Bekleben des äußeren Zylinders mit den nötigen Sensoren kann dieser über den inneren Zylinder geschoben werden. Abschließend werden die Kabel durch das Loch in der Abdeckung geführt und selbige wird auf dem Deckel platziert.

4.7.3 Montage Hydraulik

Die Montage der Hydraulik beschränkt sich auf die Positionierung der Komponenten, das Zuschneiden der Schläuche sowie deren Anschluss. Die Pumpe wird mit Kabelbindern

senkrecht am Versuchsrahmen befestigt, sodass ein an der Saugseite aufgesteckter Schlauch direkt in das Wasserbecken reicht. Die Druckseite wird über zwei AVS-Römer L-Anschlüsse mit dem ersten Magnetventil verbunden, welches seinerseits über ein Winkelement senkrecht an den Versuchsrahmen geschraubt wird. Die Verbindung zur Buchse, die das Steigrohr befestigt, erfolgt ebenfalls über zwei AVS-Römer L-Anschlüsse. Auf der Druckseite wird nach zwei AVS-Römer L-Anschlüssen der Drucksensor mit dem Schlauch verbunden. Danach verzweigt sich der Schlauch über einen Y-Anschluss. Der abgezweigte Anschluss führt unmittelbar zu Unterdruck- und Überdruckventil, während der verbleibende Anschluss an das zweite Magnetventil angeschlossen wird. Dieses ist, analog zum ersten Magnetventil, senkrecht mit einem Winkel an den Versuchsrahmen geschraubt und führt auf der Ausgangsseite über einen AVS-Römer L-Anschluss zur Dampfzange. Diese wird mit Kabelbindern an einen seitlichen Ausleger des Versuchsrahmens befestigt, sodass die Dampfzangenrichtung nach unten zeigt.

4.7.4 Montage Elektronik

Um das Risiko eines Kurzschlusses durch eine Berührung mit dem Versuchsrahmen zu verhindern, werden sämtliche Komponenten der Elektronik auf Plexiglasträgerplatten montiert, welche auf zwei seitlichen Auslegern des Versuchsrahmens mittels doppelseitigen Klebebandes befestigt sind. Während der Montage muss, wie auch während des Betriebs, sichergestellt sein, dass alle elektronischen Komponenten vor eventuell austretendem Wasser geschützt sind. Da die gesamte Elektronik über einen Not-Aus-Schalter zunächst stromlos ist, ist die Anschlussreihenfolge nicht von Bedeutung.

4.7.5 Kalibrierung der Messtechnik

Kalibrierung bedeutet, das zu kalibrierende Messgerät (in diesem Fall die Sensoren) mit einem bestätigten Referenzwert zu vergleichen. [10] Eine Kalibrierung der Messtechnik ist nötig, um Toleranzen in der Beschaffenheit der Sensoren auszugleichen.

4.7.5.1 Kalibrierung der Temperatursensoren

Hierfür werden die angeschlossenen Temperatursensoren in einen Behälter mit Eiswasser gegeben, welcher mittels einer Heizplatte kontinuierlich bis zum Siedepunkt aufgeheizt wird. Als Referenz dienen die Messwerte eines ebenfalls in diesem Behälter befindlichen,

kalibrierten Temperatursensors. Während des Aufheizvorgangs werden die Werte der zu kalibrierenden Temperatursensoren via MATLAB® alle fünf Sekunden abgegriffen und gespeichert. Anhand der sich ergebenden Messkurve wird nun ein Polynom aufgestellt, dessen Graph so exakt wie möglich der Messkurve entspricht. [11] Hierzu kommen lediglich Polynome ersten und dritten Grades infrage, da die Graphen aller anderen Polynome nicht monoton fallend sind. Wie in Abbildung 21 zu sehen ist, bildet der Graph eines Polynoms ersten Grades die Messkurve nicht genau ab. Die horizontale Achse beschreibt den Messbereich des NTC von $1mV$ bis $4096mV$ und die vertikale Achse die Temperatur T in $^{\circ}C$.

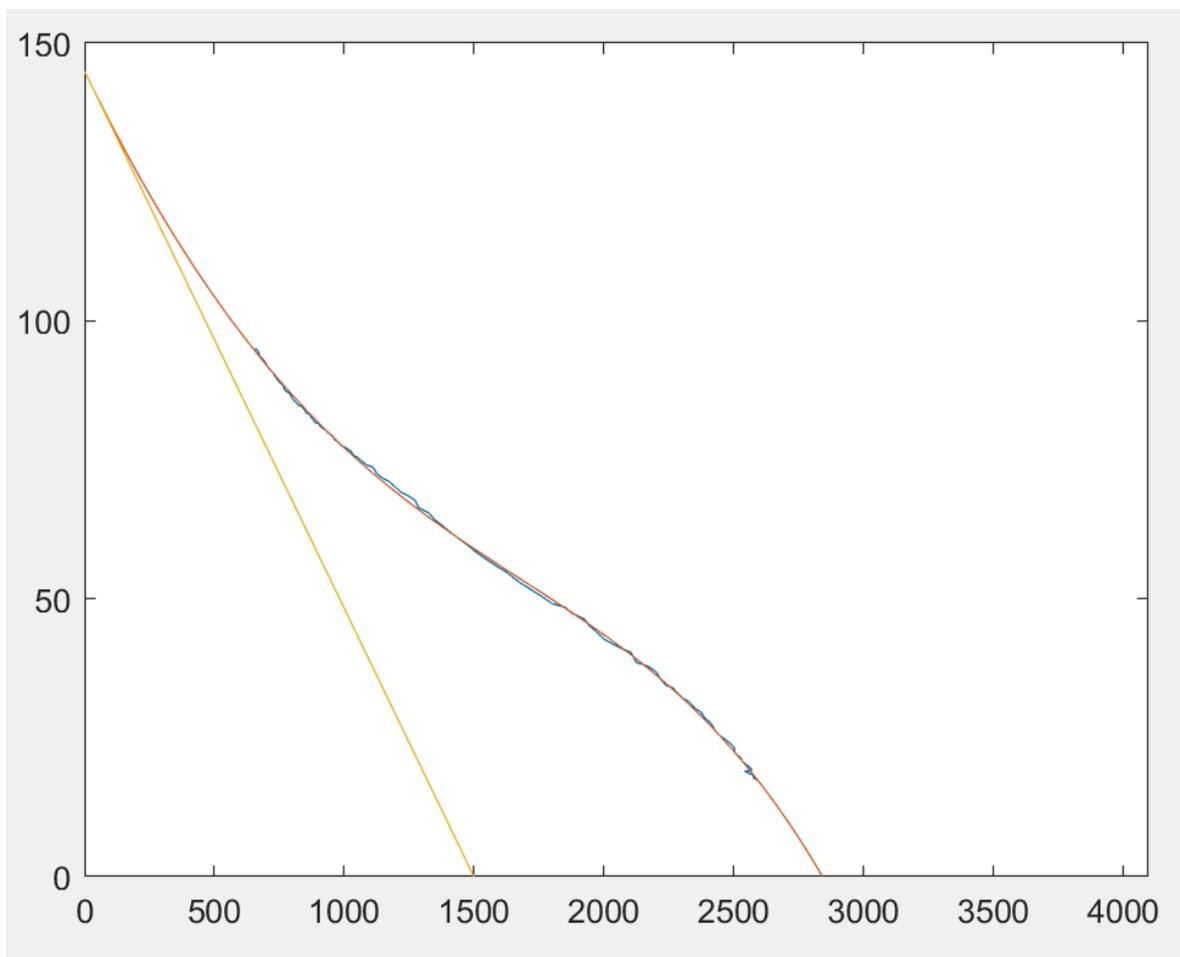


Abbildung 21: Polynom ersten Grades (gelb)

Die final ausgewählte Kalibrierfunktion ist also ein Polynom dritten Grades, sie ist in der folgenden Abbildung zu sehen. Für die spätere Anwendung ist die Messung zwischen etwa $20^{\circ}C$ (Raumtemperatur) und $110^{\circ}C$ (Siedetemperatur unter $1,3bar$ Druck) relevant. [12]

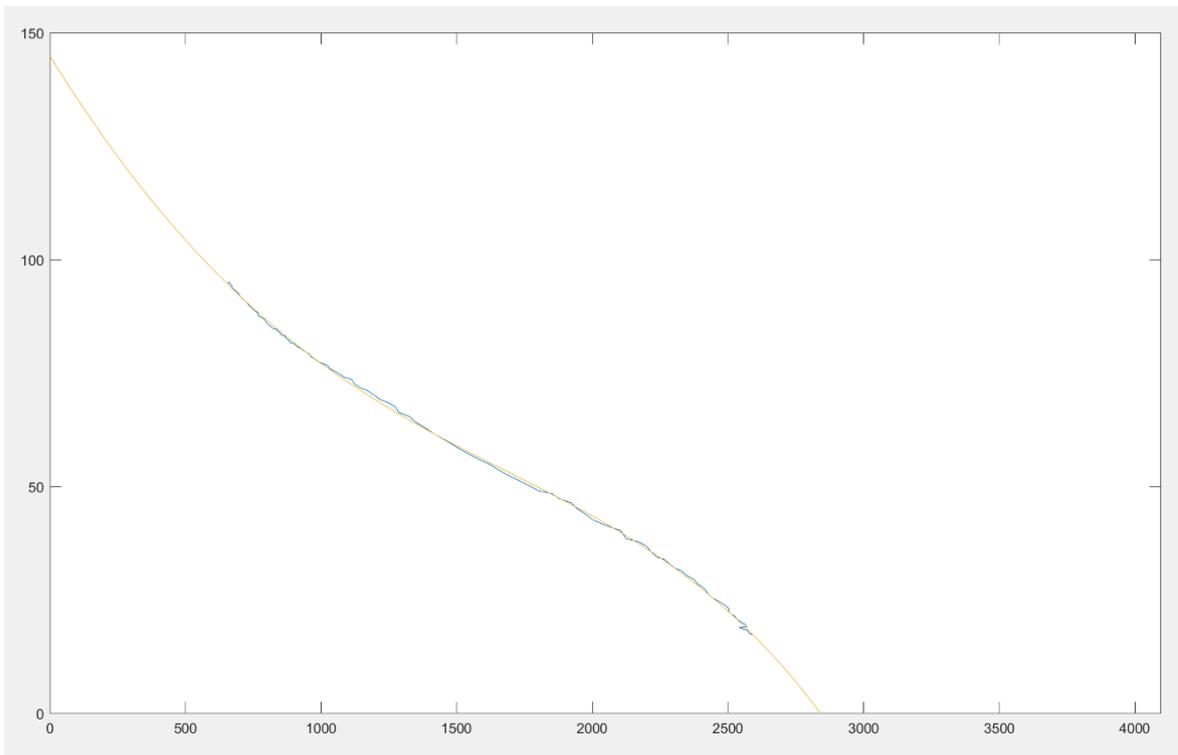


Abbildung 22: Messkurve (blau) und Kalibrierkurve (gelb)

4.7.5.2 Berechnung der Dehnungsmessstreifen

Zur Beobachtung, wie sehr sich das Borosilikatglas unter der Druck- und der Wärmebelastung verformt, werden DMS eingesetzt. Diese werden auf die Oberfläche des Zylinders geklebt und liefern abhängig von ihrer Verformung Werte zwischen $1mV$ und $4096mV$. Um von einem ausgegeben Spannungswert auf einen Verformungsgrad schließen zu können, werden vor Inbetriebnahme Messungen durchgeführt. Im ersten Schritt werden die Spannungswerte der DMS bei Normaldruck, $0,5bar$, $1,0bar$ und bei $1,5bar$ erfasst. Die Messung bei Normaldruck dient dazu, fertigungs- und montagebedingte Vorspannungen herauszufiltern und ein Vergleichspotential für die folgenden Messungen zu schaffen.

Für die Messungen bei $0,5bar$, $1,0bar$ und $1,5bar$ wird dem Boiler mit einer Luftpumpe solange Luft zugeführt, bis der verbaute Drucksensor den gewünschten Druck anzeigt. Die Spannungswerte der DMS werden je Messung dreimal aufgenommen, um Schwankungen abzufangen. Es wird jeweils der Mittelwert gebildet und als Differenzwert zur Messung bei Normaldruck notiert. Die Werte sind in Tabelle 4 notiert, die Bezeichnungen in der ersten Spalte beschreiben, um welche Messstelle es sich handelt.

Tabelle 4: Differenzwerte DMS-Messung

Differenzwerte				
	0,042bar	0,516bar	1,001bar	1,526bar
hinten oben	0	0	-0,00066667	-0,00026667
hinten unten	0	0,20163333	0,8542	0,38113333
vorne oben	0	0,0031	-0,01386667	-0,0202
vorne unten	0	6,6667E-05	0,00056667	0,00043333

Graphisch veranschaulicht zeigt sich, dass weder die Messwerte kontinuierlich ansteigen noch sich die Differenzwerte in ähnlichen Größenordnungen befinden.

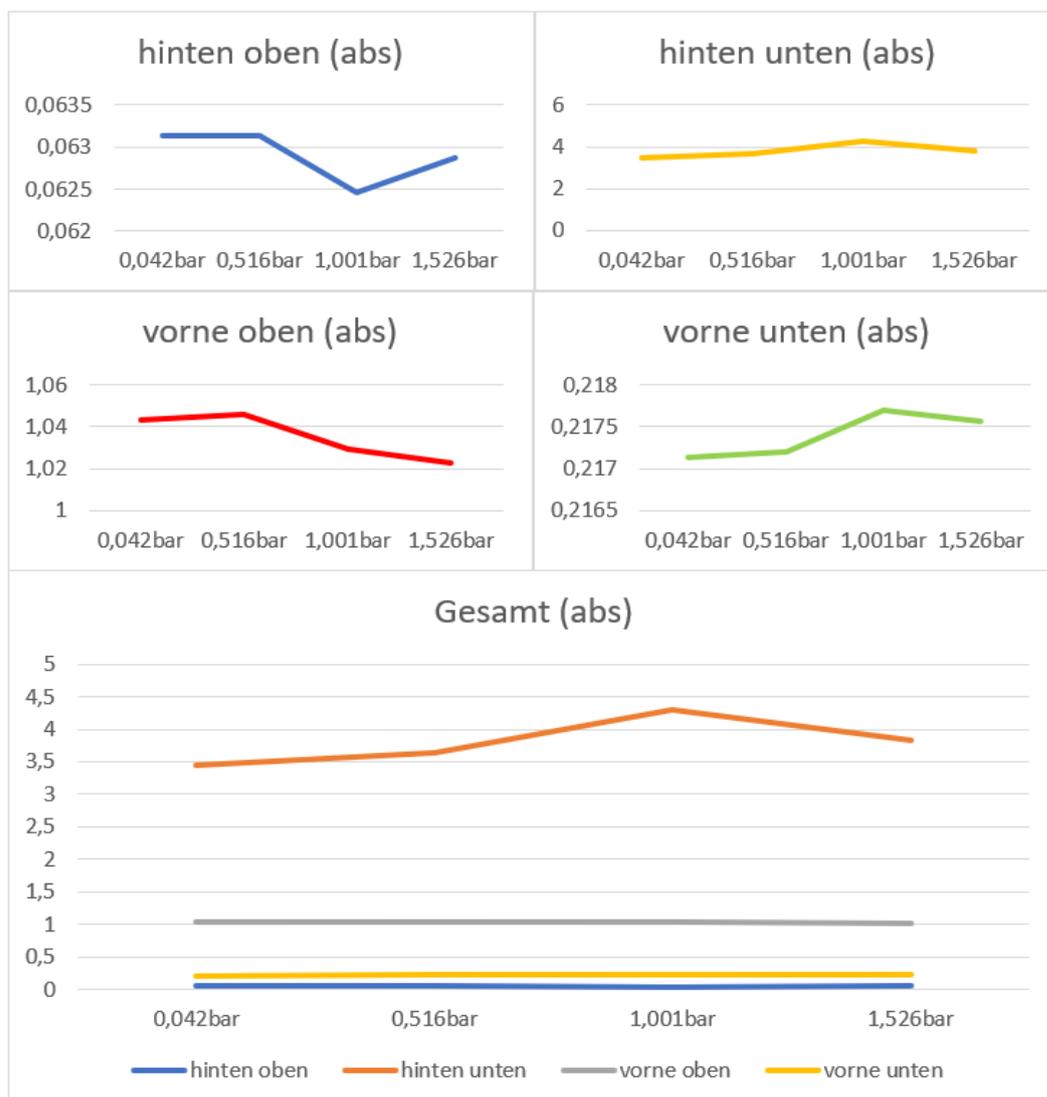


Abbildung 23: Verlauf der DMS-Messwerte

Da anhand dieser Messwerte keine Umrechnung von $\frac{mV}{V}$ in $\frac{\mu m}{m}$ sinnvoll möglich ist, wird dieser Umrechnungswert nachfolgend berechnet.

Zunächst werden die sich aufgrund des Innendrucks ergebenden Spannungen bei $1,5\text{bar}$ berechnet. [13] Hierbei entspricht der Index t den Werten in Tangentialrichtung, während a für axial auftretende Größen steht.

$$\sigma_t = \frac{p \cdot d_m}{2 \cdot s} = \frac{150000\text{Pa} \cdot 0,085\text{m}}{2 \cdot 0,005\text{m}} = 1,275 \cdot 10^6\text{Pa} \quad (11)$$

$$\sigma_a = \frac{p \cdot d_m}{4 \cdot s} = \frac{150000\text{Pa} \cdot 0,085\text{m}}{4 \cdot 0,005\text{m}} = 6,375 \cdot 10^5\text{Pa} \quad (12)$$

Mit einem E-Modul von $63000 \frac{N}{\text{mm}^2}$ laut Herstellerangabe [8] ergeben sich überschlagsweise folgende Verformungen:

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} = \frac{1,275 \cdot 10^6\text{Pa}}{63000 \frac{N}{\text{mm}^2}} = 2,024 \cdot 10^{-5} \quad (13)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{6,375 \cdot 10^5\text{Pa}}{63000 \frac{N}{\text{mm}^2}} = 1,012 \cdot 10^{-5} \quad (14)$$

Dies entspricht einer Längenänderung von $20,24 \frac{\mu m}{m}$ in Tangentialrichtung bzw. $10,12 \frac{\mu m}{m}$ in Axialrichtung. Da die Messgenauigkeit der DMS nicht bekannt ist, lässt sich keine Aussage treffen, ob die errechneten Werte innerhalb der Messgenauigkeit liegen.

Die Überwachung der Spannungen im Glas erfolgt nun mit der Maximalspannung $6 \frac{N}{\text{mm}^2}$, die sich zu einer maximal zulässigen Dehnung von $\varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} = 9,524 \cdot 10^{-5}$ umrechnet. Zusätzlich mit den Faktoren $B = 1,2$ [14] und $k = 2,08$ (siehe Anhang 11) wird ein maximal zulässiger Grenzwert für das Spannungsverhältnis am DMS errechnet:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{\varepsilon_{max} \cdot B \cdot k}{4} = 64,38 \frac{mV}{V}$$

4.7.6 Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten

Die durch das geringe Platzangebot verhältnismäßig klein ausfallenden Hutdurchmesser an den Buchsen sorgen dafür, dass die Verschraubung lediglich mit einer Zange und einem hohen Kraftaufwand möglich wird. Eine Abflachung der Buchsen, um eine Montage mit beispielsweise einem Gabelschlüssel zu ermöglichen, ist denkbar, wenn die Buchsen mit einem größeren Hutdurchmesser versehen werden.

Bei der Montage werden alle Verschraubungen mit einem PTFE-Dichtband versehen, um die Dichtigkeit des Boilerinnenraums zu gewährleisten. Bei der Anbringung dieses

Dichtbandes ist zu beachten, dass bereits durch geringe Fertigungstoleranzen an den beiden zu verschraubenden Bauteilen eine einzelne Lage Dichtband nicht mehr ausreicht und zu Undichtigkeiten führt. Das Dichtband ist sorgfältig und in zwei bis drei Lagen um das Außengewinde des zu verschraubenden Bauteils zu wickeln. Die Verwendung eines Feingewindes verbessert zusätzlich die Dichtwirkung.

Aufgrund des Aufmaßes der Temperatursensoren lässt sich der äußere Zylinder nicht über den inneren schieben, dies wird erst mit zwei nachträglich eingearbeiteten Nuten im Deckel möglich. Wird der Boiler ein weiteres Mal inklusive Messtechnik aufgebaut, ist eine Reduktion des Deckeldurchmessers vorzunehmen. Um das Kleben der Temperatursensoren nicht auf das geringe Platzangebot des Versuchsaufbaus zu beschränken, ist darauf zu achten, die Kabel der Temperatursensoren erst zu verlöten, wenn der Boiler vollständig montiert wird.

5 Versuchsdurchführung (Sebastian O'Reilly)

Im folgenden Kapitel wird die Versuchsdurchführung beschrieben sowie welche Probleme dabei aufgetreten sind.

5.1 Dichtheitsprüfung

Die erste Prüfung soll den Boiler auf Dichtheit untersuchen. Dazu wird der Boiler mit Wasser befüllt und anschließend mit Luftdruck beaufschlagt. Die Dichtheitsprüfung ist erfolgreich, wenn kein Wasseraustritt sichtbar ist und der Druck auch über einen längeren Zeitraum konstant bleibt.

Der erste Versuch der Dichtheitsprüfung ist am 28.02.2020 erfolgt. Ein Befüllen des Boilers hat funktioniert, ein leichtes Tropfen an den ELSA-Schlauchanschlüssen im Messingboden ist aufgetreten. Auch ein Druckabfall an der Druckanzeige ist zu beobachten gewesen, woraus zu folgen ist, dass der Boiler zu diesem Zeitpunkt nicht dicht ist.

Am 06.03.2020 erfolgt nach weiterem Abdichten aller Verschraubungen in Boden und Deckel mit PTFE-Gewindedichtband (mindestens 2-lagig bei G1/8“ Gewinde und mindestens 3-lagig bei allen anderen Gewinden) eine erneute Dichtheitsprüfung. Mittels einer Federgabelpumpe aus dem Radsportbereich, welche an das Unterdruckventil angeschlossen ist, wird ein Druck von 1,7bar im Zylinder erreicht. Dieser Druck wird

10min gehalten, wobei sich kein sichtbarer Druckabfall ergibt, ebenso wenig wie visuelle oder akustische Leckagen. Hiermit ist die Dichtheit des Boilers im kalten Zustand bestätigt und die Prüfung ist erfolgreich abgelegt. Die Beobachtungen müssen sich jedoch noch bei höheren Temperaturen bestätigen.

5.2 Temperatur- und Druckprüfung

Die zweite Prüfung, die der Boiler bestehen muss, ist die Temperaturprüfung. Da das Wasser bei einer bestimmten Temperatur einen gewissen Dampfdruck bildet, stellt diese Prüfung auch eine Druckprüfung dar.

Aufgrund zeitlicher Beschränkungen und des Umzugs des Labors in neue Räumlichkeiten konnte der Boiler bisher noch nicht auf Betriebstemperatur erhitzt werden. Das Projektteam ist aufgrund der durchgeführten Berechnungen und nach der erfolgreichen Dichtheitsprüfung mittels Luftdruck zuversichtlich, dass der Boiler bei Einhaltung der zulässigen Temperaturdifferenzen den entstehenden Spannungen standhält.

5.3 Probleme, Schwierigkeiten und Tipps für folgende Arbeiten

Bei einer Temperaturprüfung durch nachfolgende Projektgruppen ist dringend auf die Einhaltung aller maximalen Druck- und Temperaturdifferenzwerte zu achten. Ein sicherer Betrieb ist bei Überschreiten der Werte nicht mehr gewährleistet.

Der Versuchsaufbau ist im aktuellen Zustand von einem Elektrofachmann geprüft und abgenommen (Herr Weidler, Kaffeewerkstatt München UG). Bei Umbauten ist unter Umständen eine erneute Abnahme notwendig. Dies gilt insbesondere für den Umbau auf neue SSRs.

Die Vibrationspumpe funktioniert bei Beschaltung mit den großen SSRs nicht. Der Steuerstrom aus dem Raspberry Pi ist vermutlich zu klein, um die benötigte Leistung zu schalten.

6 Ausblick (Johannes Kastner + Sebastian O'Reilly)

Die bisherigen Versuche haben gezeigt, dass das Konzept eines Boilers, dessen Wand aus dem optisch ansprechenden Borosilikatglas besteht, funktionieren kann. Eine Prüfung unter Betriebstemperatur steht noch aus.

Das Design kann in der Serie noch aufgewertet werden. Optische Highlights wie eine temperaturgesteuerte Lichtgestaltung mit RGB-LEDs lassen sich noch leicht in den Boiler integrieren. Für Technik- und Kaffeeliebhaber ist ein solcher Boiler dann sicherlich ein Kaufargument.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Tritschler, Tobias: Konstruktion zweier Druckbehälter für eine hochwertige Siebträgermaschine, 2019
- [2] <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/cfrsearch.cfm> (abgerufen am 26.03.2020)
- [3] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:338:0004:0017:de:PDF> (abgerufen 26.03.2020)
- [4] <https://www.globetrotter.de/msr-kocherzubehoer-o-ring-dichtung-1077589/> (abgerufen am 26.03.2020)
- [5] <https://www.directindustry.de/prod/hutchinson-precision-sealing-systems/product-157589-1619986.html> (abgerufen am 26.03.2020)
- [6] RICHTLINIE 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt
- [7] Wittel, Herbert ; Muhs, Dieter ; Jannasch, Dieter ; Voßiek, Joachim: Roloff/Matek Maschinenelemente : Normung, Berechnung, Gestaltung. 20. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013. -ISBN 978-3-8348-1354-8.
- [8] https://www.schott.com/d/tubing/02eb3de3-2c14-4a5d-b35a-6e0f73fd6c8d/schott_duran_brochure_de_final.pdf?highlighted_text=borosilikatglas+3.3+Rohr (abgerufen am 01.03.2020)
- [9] <https://facts.kloeckner.de/werkstoffe/edelstahl-werkstoffe/1-4301/>
- [10] <https://www.beamex.com/de/ressourcen/was-ist-kalibrierung/> (abgerufen am 24.03.2020)
- [11] http://www.carl-engler-schule.de/culm/culm/culm2/th_messtechnik/versuche/ntc-kalibrierung_cdaq.pdf (abgerufen am 24.03.2020)
- [12] <https://www.gutachter-noak.de/app/download/5780431822/Dampfdrucktabelle+Wasser.fix.pdf> (abgerufen am 24.03.2020)
- [13] <https://www.krv.de/artikel/kesselformel-kessel-formel-bockwurst-formel> (abgerufen am 24.03.2020)

[14] <https://www.hbm.com/de/7163/die-wheatstonesche-brueckenschaltung-kurz-erklaert/>
(abgerufen am 24.03.2020)

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit wird erklärt, dass die Arbeit mit dem Titel

Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung an einem Borosilikatdampfboiler

selbstständig verfasst und noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt wurde. Weiterhin sind keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel verwendet und wörtliche sowie sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet worden.

München, den 27.03.20



Florian Fritz



Sebastian O'Reilly



Johannes Kastner



Tim Kittelmann

Anhang

- Anhang 1 – Anforderungsliste**
- Anhang 2 – Risikobetrachtung**
- Anhang 3 – Fertigungszeichnungen PTFE**
- Anhang 4 – Fertigungszeichnungen Verspannung**
- Anhang 5 – Berechnung Verspannung**
- Anhang 6 – Datenblatt Zugfeder**
- Anhang 7 – Fertigungszeichnungen Buchsen**
- Anhang 8 – Bohrungen Boden**
- Anhang 9 – Datenblatt NTC**
- Anhang 10 – Datenblatt Drucksensor**
- Anhang 11 – Datenblatt DMS**
- Anhang 12 – Berechnungen DMS**

Anhang 1 – Anforderungsliste

Anforderungsliste					
Pos.	Forderung/ Wunsch	Anforderung	Variable	Wert	Einheit
1		Allgemein			
	W	Optik ähnlich Röhrenverstärker			
	F	Verwendung vorhandener Borosilikatzylinder			
	W	Verwendung vorhandener Verschlauchung			
2		Geometrie			
	F	Maße Glaszylinder innen			
	F	Durchmesser innen	\varnothing_i	80	mm
	F	Durchmesser außen	\varnothing_a	90	mm
	F	Höhe	h	300	mm
	F	Maße Glaszylinder außen			
	F	Durchmesser innen	\varnothing_i	130	mm
	F	Durchmesser außen	\varnothing_a	140	mm
	F	Höhe	h	300	mm
	F	verfügbarer Platz Versuchsaufbau			
	F	Breite Tisch	b	800	mm
	F	Länge Tisch	l	800	mm
	F	verfügbare Raumhöhe	h	1200	mm
3		Dichtung			
	F	maximal abzudichtender Druck	p	1,7	bar
	F	keine plastische Verformung	σ_D		N/mm ²
	F	Temperaturbeständigkeit	T	130	°C
	F	Lebensdauer Dichtung	t	3	a
	F	Lösbarkeit der Dichtung			
	W	Verwendung Standardteile			
	F	Lebensmittelecht			
	W	Symmetrie Deckel/Boden			
4		Verspannung			
	F	erforderliche Vorspannkraft			
	F	maximale Vorspannkraft			
	F	Lösbarkeit			
	W	Verwendung Standardteile			
	F	Einbauraum			
	F	Temperaturbeständigkeit	T	130	°C
	F	leichte Montierbarkeit			

Anforderungsliste					
Pos.	Forderung/ Wunsch	Anforderung	Variable	Wert	Einheit
5		Energie und Versorgung			
	F	Versorgungsspannung	U	230	V~
	F	minimaler Volumenstrom der Pumpe / Verwendung vorgegebene		0.5	L/min
	F	Verwendung vorhandenes Heizelement	P	975	W
6		Sicherheit/Schutzmaßnahmen			
	F	Sicherheit Versuchsdurchführung			
	F	Durchführung der Risikoanalyse			
	F	Beachtung der geforderten Sicherheitsmaßnahmen aus der Risikoanalyse			
	F	Sicherung gegen Überdruck		>3,38	bar
	F	Sicherung gegen Unterdruck		<1	bar
7		Messen & Steuern			
	F	Temperaturmessung an Innenwand innerer Zylinder			
	F	Temperaturmessung zwischen beiden Zylindern			
	F	Temperaturmessung an Außenwand äußerer Zylinder			
	F	Messung des Zylinderdruckes			
	F	Messung der thermischen Ausdehnung des Zylinders mit Dehnmessstreifen			
	F	Speichern der Messergebnisse			
	F	Anzeige der Messwerte			
	F	Auswertung und Regelung mit Raspberry Pi			
	F	Verwendung vorhandener 8-Kanal Temperaturmessplatinen			
	F	Verwendung vorhandener Magnetschalter/ventile (2-Wege-Öffner)			
	F	Steuerung via Solid State Relais (SSR)			
8		Termine			
	F	Abschlusstermin		27.03.2020	

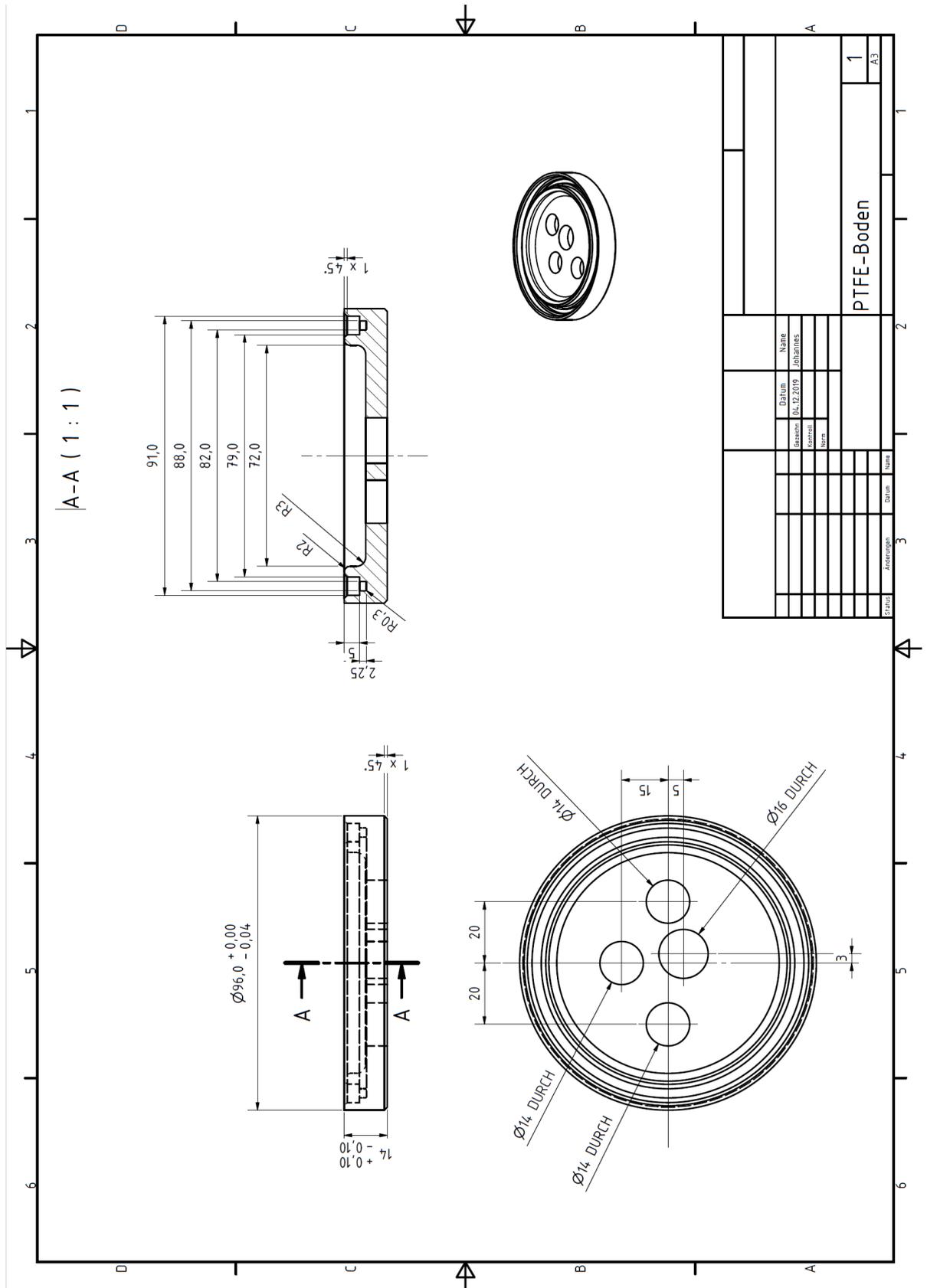
Anhang 2 – Risikobetrachtung

Risikoanalyse Borosilikatboiler							
Übersicht Risiken					Bewertung		
	Nr.	Risiko	Auswirkung	Maßnahmen	Eintrittswahrscheinlichkeit (1-5)	Auswirkung (1-4)	Gefährdungsgrad
Versuchsrisiken:							
Phase 1 Aufbau							
	1.1	Beschädigung der elektrischen Komponenten durch Wasser	Erhöhung Kosten, Zeitverzug, elektrischer Schlag	Auffangwanne, IP-Zertifizierung	2	4	8
	1.2	Stolpergefahr durch lose Kabel/Schläuche	Sturzgefahr	geordnetes Kabelmanagement, Kabelbinder	1	2	2
	1.3	Bruch des Glases durch Umkippen, Fallen	Schnittgefahr	Vorsichtiger Umgang	1	3	3
	1.4	Schnittgefahr an spitzen Kanten, Bauteilen	Schnittgefahr, Stoßgefahr	Vorsicht, Entgraten	2	2	4
	1.5	elektrischer Schlag durch nicht abgesicherte Elektrik	elektrischer Schlag	Isolation soweit möglich	1	4	4
	1.6	Quetschgefahr	kleinere Verletzungen	Vorsicht	2	2	4
	1.7	Falscher Anschluss der Kabel, Schläuche	schwerwiegende Fehlfunktion, elektrischer Schlag	Mehrmalige Kontrolle, Vieraugenprinzip	4	4	16
	1.8	Kratzer werden bei Aufbau in das Glas eingebracht und somit eine Verschwächung des Materials erzeugt	Sollbruchstelle bei Inbetriebnahme	Vorsicht bei Montage der anliegenden Bauteile ggf. Glas einwickeln gegen Kratzer	2	3	6
	1.9	Aufbringen zu hoher Verspannkraft, dadurch Glassprung	Schnittgefahr	Richtige Auslegung, Kontrolliertes Verspannen (Anzugsmoment)	2	3	6
Phase 2 Aufheizphase							
	2.1	Beschädigung durch Hitze (Kabel, Schläuche, Messmittel)	Erhöhung der Kosten, Zeitverzug, Verbrennungsgefahr, Brandgefahr	Kabelführung, Löschmittel	2	3	6
	2.2	Beschädigung Heizelement	Brandgefahr, unerwartetes Verhalten	Muss dauerhaft in Wasser sein	1	3	3
	2.3	Platzen des Glases durch Thermospannungen	Schnittgefahr, Verbrennungsgefahr	Schutzfunktion durch 2. Zylinder, Schutzbrille, Handschuhe	3	3	9
	2.4	Versagen der Dichtung durch Temperatur, Längenänderung	Verbrühungsgefahr durch austretenden Dampf	Richtige Auslegung, Abstand halten	1	3	3
	2.5	Versagen der Verspannung durch Temperatur, Längenänderung	Verbrühungsgefahr	Richtige Auslegung, Abstand halten	1	3	3
	2.6	Schlagartige Druckerhöhung durch Siedeverzug	Glasbruch, Verbrühungsgefahr, Schnittgefahr	ggf. Siedesteinchen	1	3	3
	2.7	Kondensiertes Wasser verfälscht Temperaturmessung	Verbrühungsgefahr, Brandgefahr (Falschregelung)	Abstand halten, Verifizierung der Temperatur durch Vergleichsmessung, Sicherheitsfunktion Regler	1	3	3
	2.8	Fehlerhafte Regelung des Heizelements (Druck > 1,7 bar)	Überhitzung	Überdruckventil	2	3	6
	2.9	Fehlfunktion des Überdruckventils	Platzen des Zylinders	evtl. Vorprüfung	1	3	3
	2.10	Vorspannkraft für Dichtungen zu klein	Verbrühung	Einbaukontrolle, "Trockentest"	1	3	3
	2.11	Zu locker/falsch angeschlossene Schläuche/Ventile (Dampfaustritt)	Verbrühung, flatterndes Schlauchende	Kontrolle, Vieraugenprinzip	2	3	6
	2.12	Dampfaustritt aus Zwischenraum	Verbrühen	Abdeckkappe	3	3	9

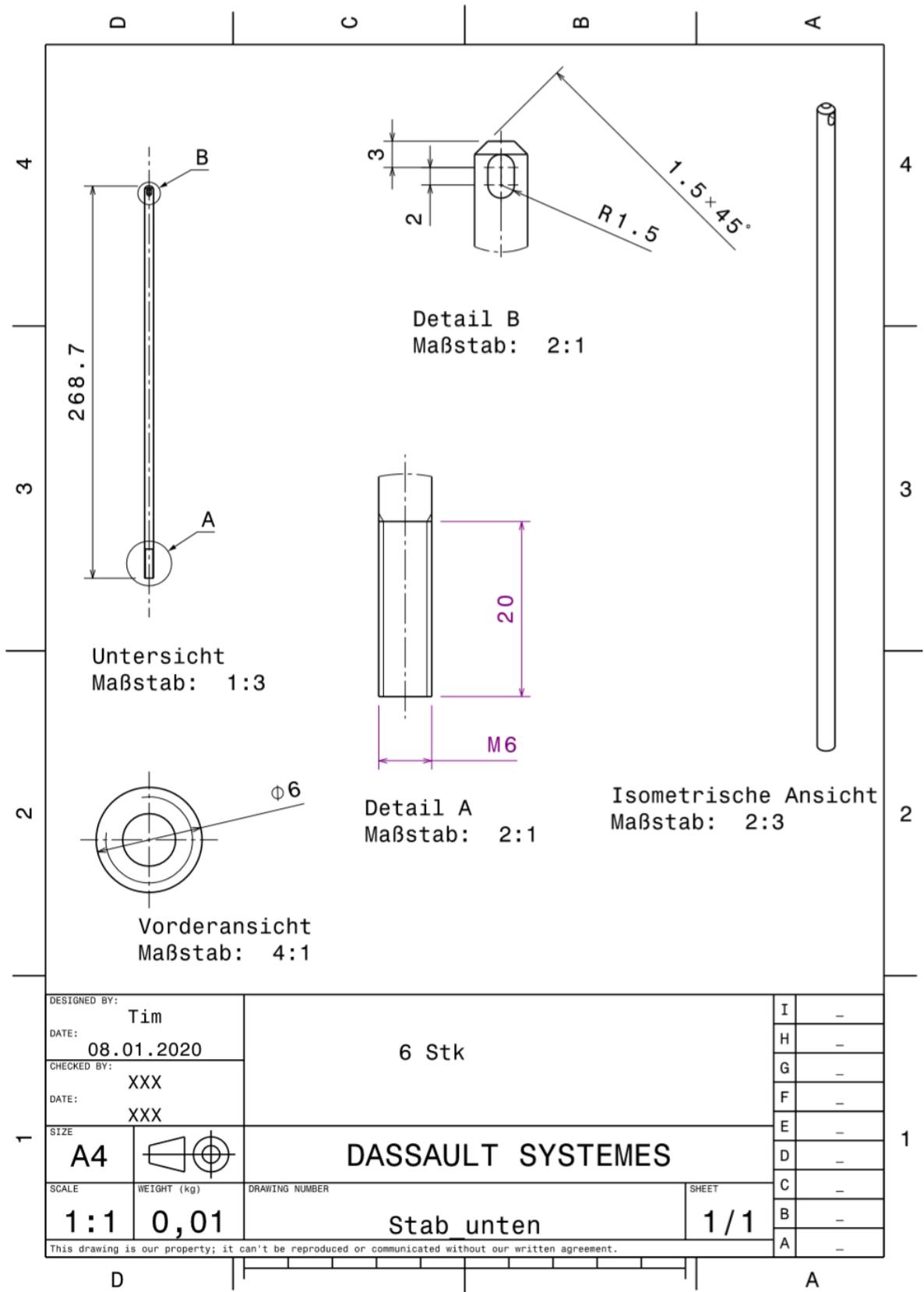
Phase 3 Haltephase							
	3.1	Alle Risiken aus Aufheizphase können hier auch auftreten					
	3.2	Bodenplatte aus Messing wird heiß	Verbrennung	empfindliche Elemente fernhalten	Recherche notwendig	3	#WERT!
Phase 4 Dampfbezug							
	4.1	Undichte Leitungen/Ventile somit ungewollter Dampfaustritt	Verbrühung	Funktionsprüfung, Abstand halten	2	3	6
	4.2	Heißer Dampf bei Dampfablass	Verbrühung	Dampfablass geeinet positionieren	3	3	9
	4.3	Fehlfunktion Steuerungstechnik	Überhitzung	Komponententest	2	3	6
	4.4	Lärmentwicklung bei Dampfaustritt	Gehörschäden	Schalldämpfer, im Extremfall Gehörschutz	3	1	3
Phase 5 Abkühlphase							
	5.1	Fehlfunktion des Unterdruckventils	Glassprung	evtl. Vorprüfung	1	3	3
	5.2	Nachwärme des Glases	Verbrennungen	Vorsicht, Abkühlzeit einhalten	5	2	10
	5.3	Kondensiertes Wasser verfälscht Temperaturmessung	fehlerhafte Messung	mehrere redundante Messstellen, Mittelwerte bilden	1	1	1
	5.4	undichte Stellen durch plastische Verformungen kommend vorherigen Phasen	Undichtigkeiten	Auffangwanne	3	2	6
Projektrisiken							
	1	zu hohe Kosten	-	Kostenkontrolle, Rücksprache mit Betreuer	1	4	4
	2	zeitlicher Verzug	Fertigstellung gefährdet	Einhaltung Projektplan	3	3	9
	3	Falsche Konstruktionsentscheidungen	Kostenexplosion, Projektverzug	Rücksprachen mit Betreuer, interne Teambesprechungen	2	3	6
	4	Personelle Ausfälle	Projektverzug	/	1	3	3
	5	Lieferschwierigkeiten	Projektverzug	Puffer einplanen, frühzeitige Bestellung	3	3	9

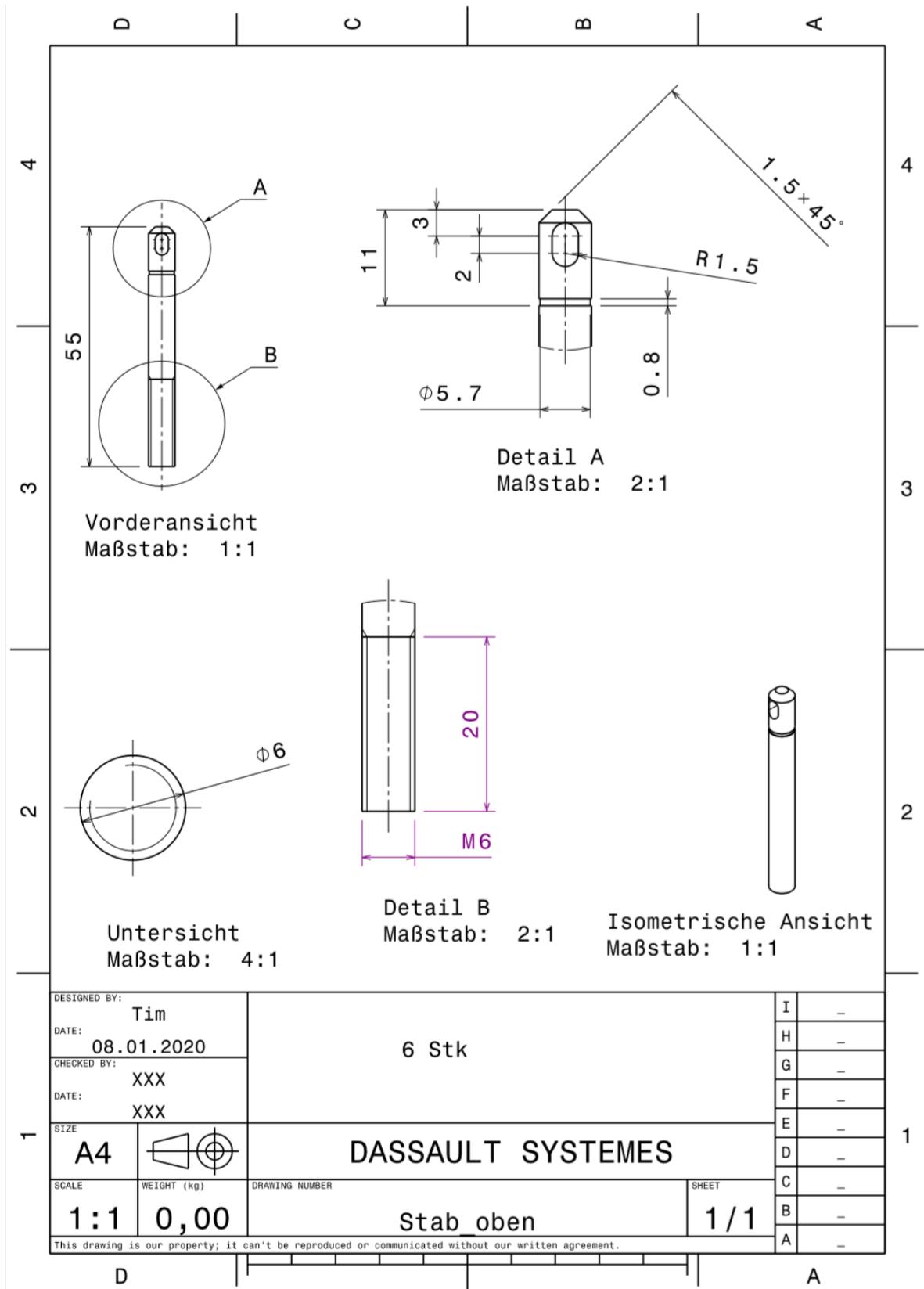
Eintrittswahrscheinlichkeit = EW	%	Auswirkung = Ausw	Mensch	Projekt	Risiko Matrix	Auswirkung			
						Gering (1)	Mässig (2)	Kritisch (3)	KO (4)
5	>90%	4	Lebensgefahr	Show Stopper					
4	>70%	3	schwere Verletzungen	gefährdet den Projekterfolg	Sicher (5)	5	10	15	20
3	>40%	2	Leichte Verletzungen	mindert den Projekterfolg	Sehr gross (4)	4	8	12	16
2	>20%	1	keine Auswirkungen zu befürchten	stört den Projekterfolg geringfügig	Gross (3)	3	6	9	12
1	>5%				Mässig (2)	2	4	6	8
					Unwahrscheinlich (1)	1	2	3	4

Anhang 3 – Fertigungszeichnungen PTFE



Anhang 4 – Fertigungszeichnungen Verspannung





Anhang 5 – Berechnung Verspannung

Berechnungen der Federkraft

Kraft resultierend aus Innendruck auf Deckel

Innendurchmesser

$$d_i := 80 \text{ mm}$$

Prüfdruck

$$p_{\text{prüf}} := 1.7 \text{ bar}$$

Sicherheitsfaktor Laut Norm aus Bachelorarbeit = 1.25.

Am 04.12.2019 wurde der Betriebsdruck vom Betreuer auf 1.3 bar definiert.

Betriebsdruck mal Sicherheitsfaktor ist der auszuhaltende Prüfdruck.

Gewichtskraft des Deckels

$$F_G := 1.9 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 18.639 \text{ N}$$

Resultierende innere Druckkraft:

$$F_{\text{Druck}} := p_{\text{prüf}} \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} - F_G = 835.874 \text{ N}$$

Anzahl der Federn

$$x := 6$$

Diese Kraft muss pro Feder durch Druck gehalten werden !

$$F_{\text{Druck.Feder}} := \frac{F_{\text{Druck}}}{x} = 139.312 \text{ N}$$

Feder aus Datenblatt Gute Kunst

Für die Berechnungen werden die Daten der bestellten Feder RZ-147E-01X verwendet

Federsteifigkeit

$$R := 31.25 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Längung des Glases durch Erwärmung

Angenommene Temperaturdifferenz

$$\Delta T := 110 \text{ K}$$

$$\alpha_{\text{Borosilikat}} := 3.3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\text{K}}$$

$$l_{0\text{Glas}} := 300 \text{ mm}$$

Längenänderung:

$$\Delta l_{\text{Borosilikat}} := l_{0\text{Glas}} \cdot \alpha_{\text{Borosilikat}} \cdot \Delta T = 0.109 \text{ mm}$$

Längenänderung des Glases infolge Vorspannkraft

E-Modul Borosilikatglas bei erhöhter Temperatur
(angenommener Wert aus BA S.73)

$$E_{\text{Boro}} := 60 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

Ringfläche Glas:

$$A_{\text{Druckwirk}} := \left((45 \text{ mm})^2 \cdot \pi \right) - \left((40 \text{ mm})^2 \cdot \pi \right) = (1.335 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

Längenänderung:

$$\Delta l_{\text{Vorspann}} := \frac{F_{\text{Druck}} \cdot l_{0\text{Glas}}}{E_{\text{Boro}} \cdot A_{\text{Druckwirk}}} = 0.003 \text{ mm}$$

Gesamtlänge der Längenänderung des Verbindungsstäbe (V2A 1.4301) aufgrund Wärme

Stablänge

$$l_0 := 312 \text{ mm}$$

Edelstahlstab

$$\alpha := 16 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\Delta T := 80 \text{ K}$$

$$\Delta l_{\text{StabW}} := l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 0.399 \text{ mm}$$

Längenänderung des Stabes aufgrund Zugkraft

E Modul (X6Cr17) unterer Wert

$$E := 194 \frac{kN}{mm^2}$$

Querschnitt Stab

$$A_{Stab} := \pi \cdot (3 \text{ mm})^2$$

Zugspannungen:

$$\sigma_{Stab} := \frac{F_{Druck.Feder}}{A_{Stab}} = 4.927 \frac{N}{mm^2}$$

Längenänderung

$$\Delta l_{Zug} := \sigma_{Stab} \cdot \frac{l_0}{E} = 0.008 \text{ mm}$$

Nachdem alle Längenänderungen erfasst wurden, werden die Kritischen Zustände betrachtet.

Zustand 1: bis jetzt nur Glas erwärmt Verbindungselemente nicht

Auftretende Längungen Glas/Verbindungsstab:

$$\Delta l_{Vorspann} = 0.003 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{Zug} := \sigma_{Stab} \cdot \frac{l_0}{E} = 0.008 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{Borosilikat} = 0.109 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{GesamtZ1} := \Delta l_{Borosilikat} - \Delta l_{Zug} - \Delta l_{Vorspann} = 0.098 \text{ mm}$$

0.098 mm Längung des Systems in Zustand 1

Somit eine Krafterhöhung pro Feder um:

$$F_{erhöhungZ1} := R \cdot \Delta l_{GesamtZ1} = 3.058 \text{ N}$$

Zustand 2: Glas und Verbindungselemente auf maximum erwärmt

Auftretende Längungen Glas/Verbindungsstab:

$$\Delta l_{Vorspann} = 0.003 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{Zug} := \sigma_{Stab} \cdot \frac{l_0}{E} = 0.008 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{Borosilikat} = 0.109 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{StabW} = 0.399 \text{ mm}$$

$$\Delta l_{GesamtZ2} := \Delta l_{Borosilikat} - \Delta l_{Zug} - \Delta l_{Vorspann} - \Delta l_{StabW} = -0.302 \text{ mm}$$

-0.102 mm Längung in Zustand 2.

Somit eine Kraftminderung.

Um diese muss die Vorspannkraft je Feder höher sein

$$F_{erhöhungZ2} := R \cdot \Delta l_{GesamtZ2} = -9.422 \text{ N}$$

Somit ergibt sich die mindestens aufzubringende Haltekraft zu:

$$F_{Verspann} := F_{Druck} + 6 \cdot (-F_{erhöhungZ2}) = 892.408 \text{ N}$$

Somit ergibt sich die Ingesamte Kraft pro Feder mit Vorspannung auf mindestens

$$F_{FederZ2} := \frac{F_{Verspann}}{6} = 148.735 \text{ N}$$

Der mindestens erforderliche Vorspannweg um die Kraft aufzubringen ergibt sich zu

Innere Vorspannkraft der Feder aus Datenblatt

$$F_0 := 23.6 \text{ N}$$

$$R = 31.25 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$s := \frac{F_{\text{FederZ2}} - F_0}{R} = 4.004 \text{ mm}$$

Aus Sicherheits und Konstruktionsgründen wird $s=4\text{mm}$ gesetzt

$$s := 4 \text{ mm}$$

$$F_{\text{Versp.Konstruktion.Feder}} := 4 \text{ mm} \cdot R + F_0 = 148.6 \text{ N}$$

Das ergibt eine konstruktionell bedingte Vorspannkraft von:

$$F_{\text{Versp.Konstruktion}} := F_{\text{Versp.Konstruktion.Feder}} \cdot 6 = 891.6 \text{ N}$$

Zulässige Druckspannungen für Borosilikatglas Güteklasse 3.3 nach Datenblatt verglichen mit der maximalen Druckspannung

$$\sigma_{\text{maxDruckausDatenblatt}} := 7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$F_{\text{Versp.Konstruktion}} = 891.6 \text{ N}$$

Fläche in mm^2 auf die Kraft einwirkt

$$A_{\text{Druckwirk}} := \left((45 \text{ mm})^2 \cdot \pi \right) - \left((40 \text{ mm})^2 \cdot \pi \right) = (1.335 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{\text{Druckvorhanden}} := \frac{F_{\text{Versp.Konstruktion}}}{A_{\text{Druckwirk}}} = 0.668 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Diese Spannungen stellen für das Glas kein Problem dar.

Berechnung des aufzubringenden Anzugsmomentes nach Rolof Mattek

Federkraft

$$F_{\text{FederZ2}} = 148.735 \text{ N}$$

Gewindewerte und Längen:

$$d_2 := 5.35 \text{ mm}$$

$$\mu_{\text{ges}} := 0.12$$

$$\beta := 60^\circ$$

$$d_w := 1.4 \cdot 6 \text{ mm}$$

$$d_h := 6.6 \text{ mm}$$

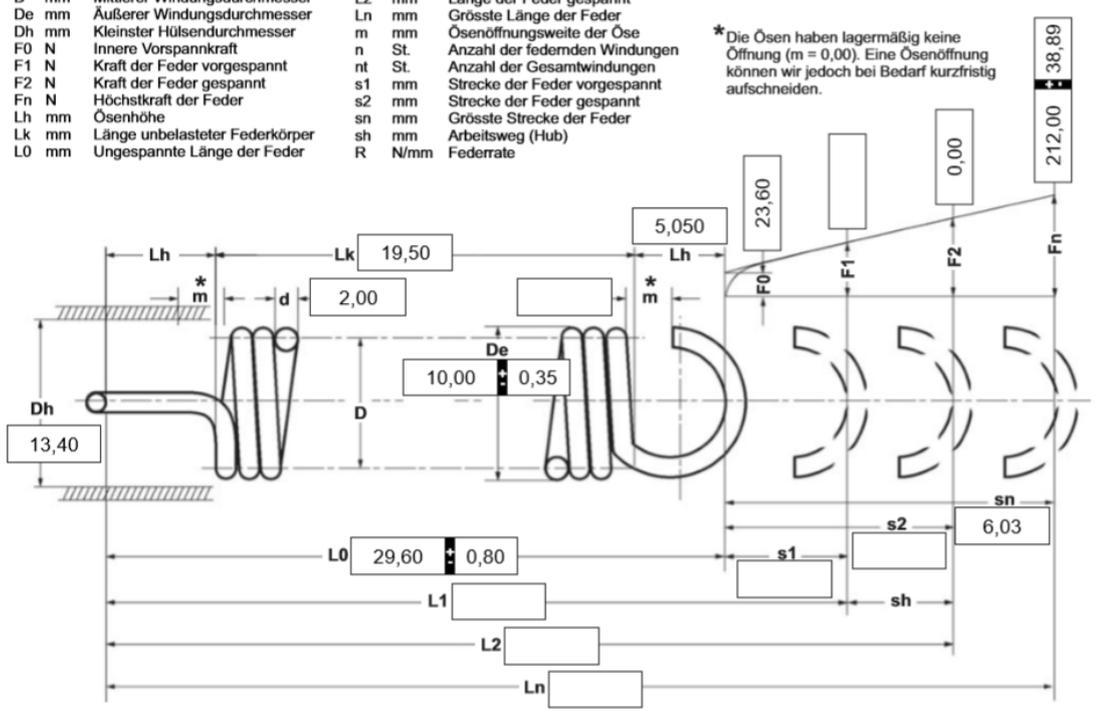
$$\phi := 3.41^\circ$$

Vereinfachte Berechnung für das Anzugsmoment:

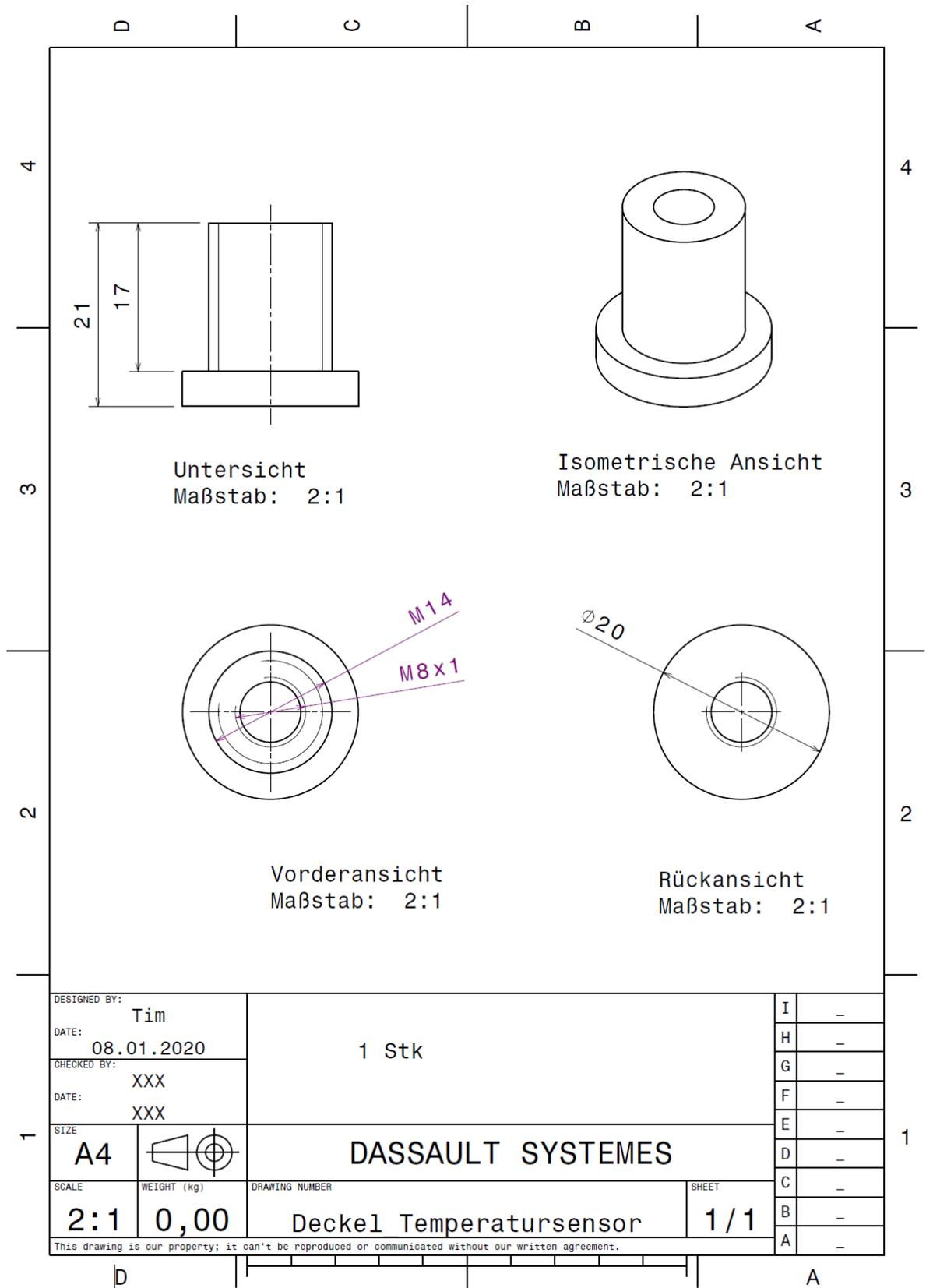
$$M_A := 150 \text{ N} \cdot 0.5 \cdot d_2 \cdot \left[\mu_{\text{ges}} \cdot \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} + \frac{d_w + d_h}{2 \cdot d_2} \right) + \tan(\phi) \right] = [0.147] \text{ N} \cdot \text{m}$$

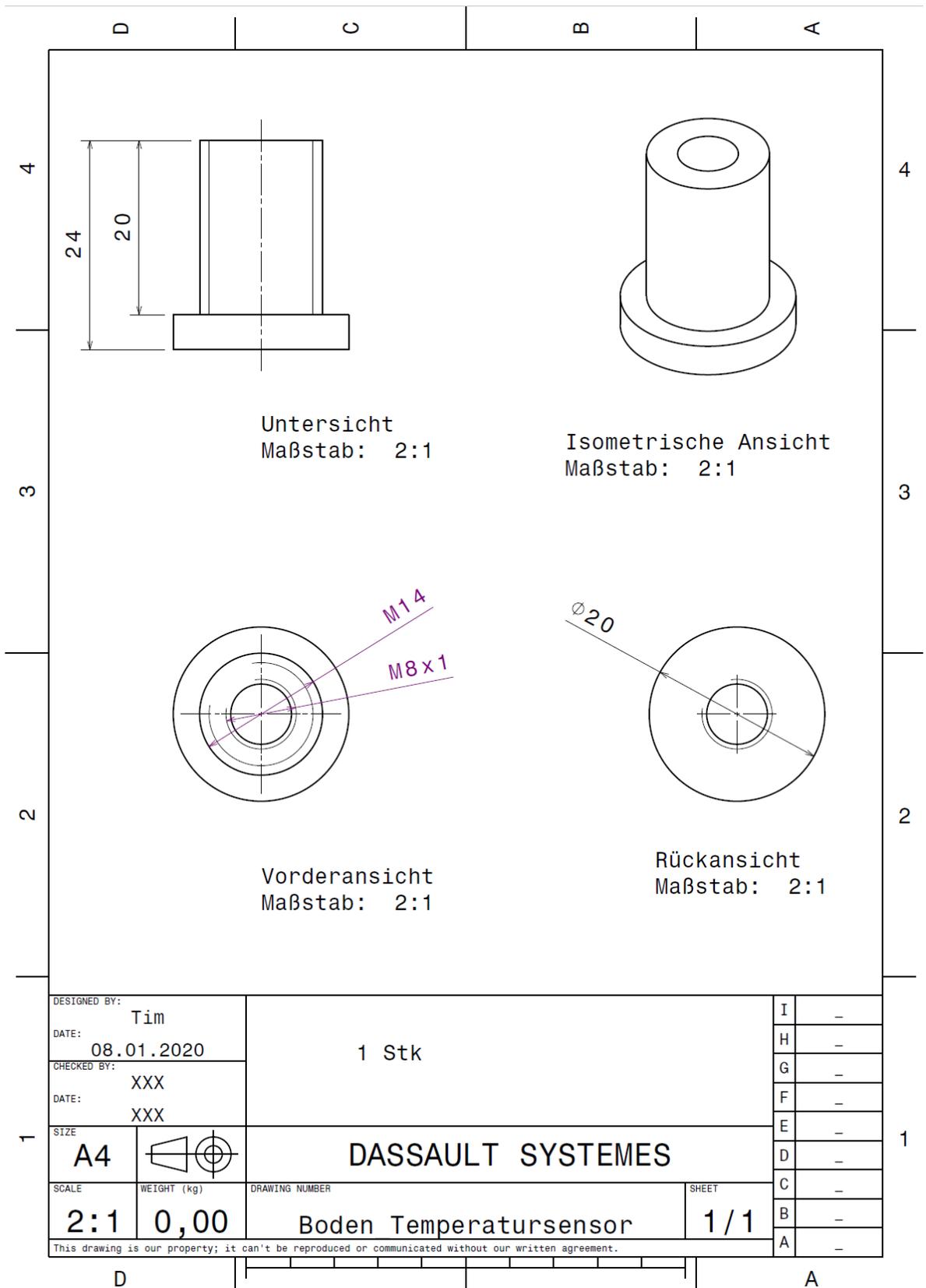
Dieses ist sehr klein und deshalb nicht mit standard Drehmomentschlüsseln einstellbar.

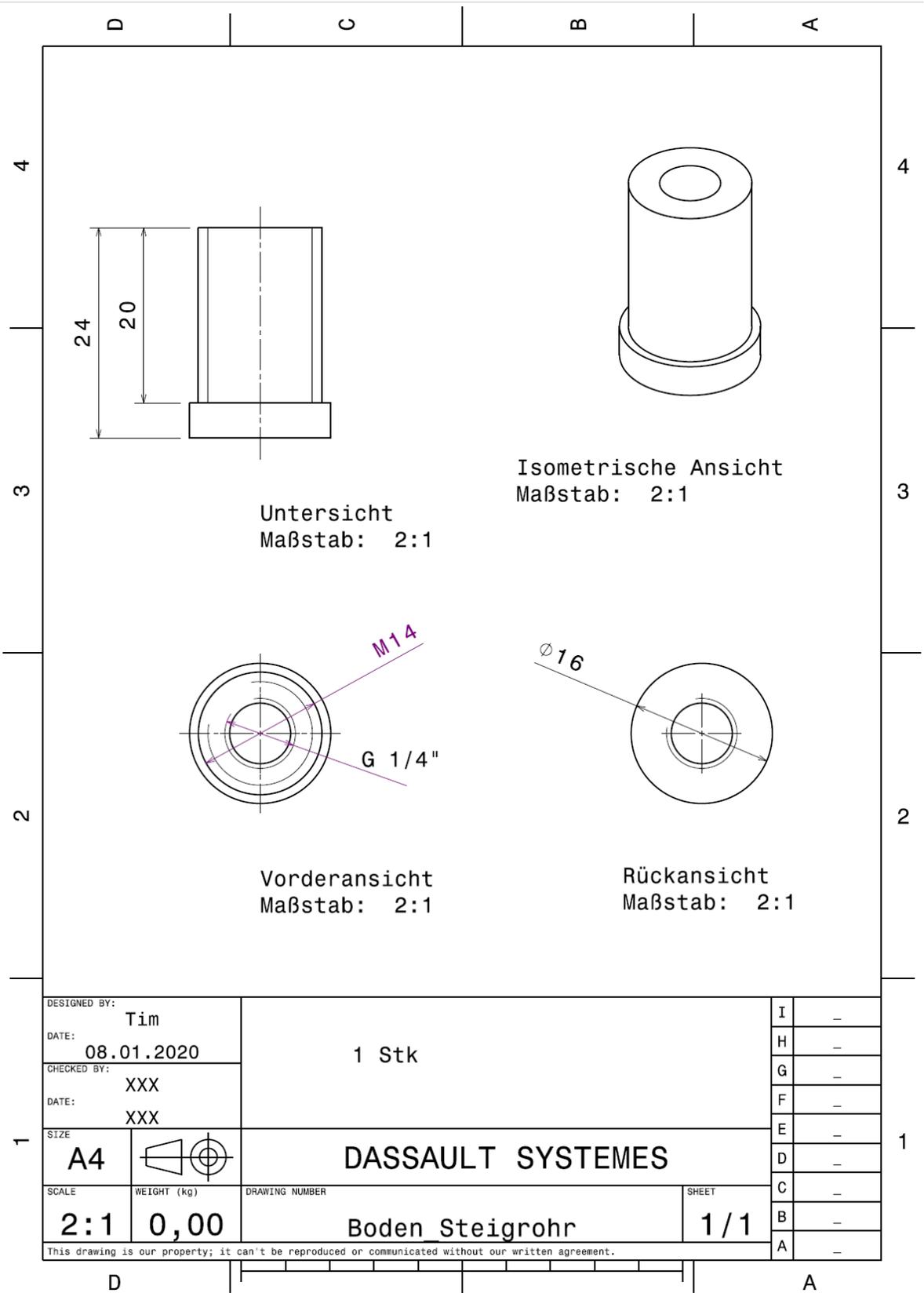
Anhang 6 – Datenblatt Zugfeder

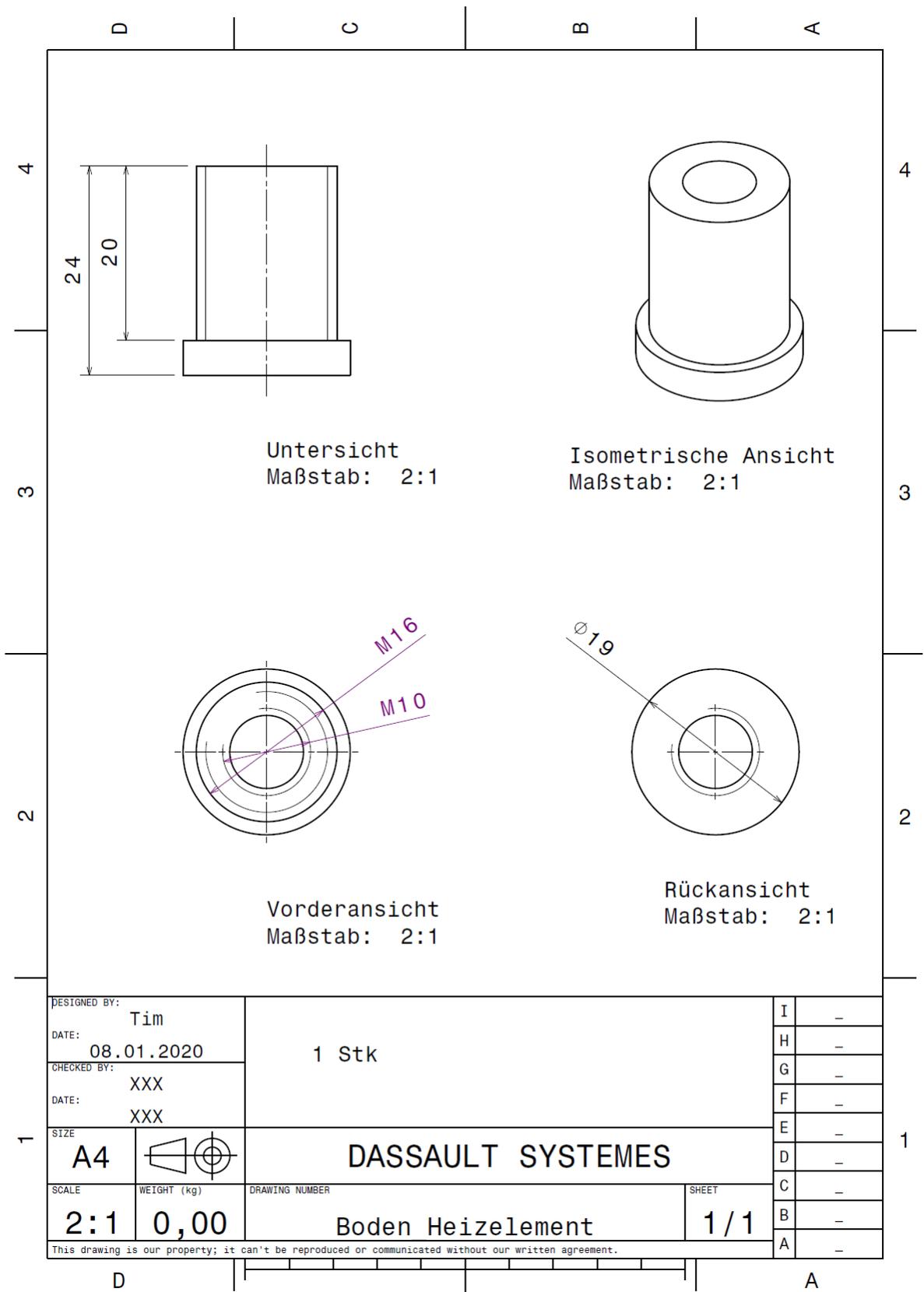
Datenblatt Zugfeder : RZ-147E-01X			GUTEKUNST FEDERN																									
<p>d mm Drahtdurchmesser</p> <p>D mm Mittlerer Windungsdurchmesser</p> <p>De mm Äußerer Windungsdurchmesser</p> <p>Dh mm Kleinsten Hülsendurchmesser</p> <p>F0 N Innere Vorspannkraft</p> <p>F1 N Kraft der Feder vorgespannt</p> <p>F2 N Kraft der Feder gespannt</p> <p>Fn N Höchstkraft der Feder</p> <p>Lh mm Ösenhöhe</p> <p>Lk mm Länge unbelasteter Federkörper</p> <p>L0 mm Ungespannte Länge der Feder</p>	<p>L1 mm Länge der Feder vorgespannt</p> <p>L2 mm Länge der Feder gespannt</p> <p>Ln mm Grösste Länge der Feder</p> <p>m mm Ösenöffnungsweite der Öse</p> <p>n St. Anzahl der federnden Windungen</p> <p>nt St. Anzahl der Gesamtwindungen</p> <p>s1 mm Strecke der Feder vorgespannt</p> <p>s2 mm Strecke der Feder gespannt</p> <p>sn mm Grösste Strecke der Feder</p> <p>sh mm Arbeitsweg (Hub)</p> <p>R N/mm Federrate</p>	<p>Gewicht g Gewicht der einzelnen Feder</p> <p>12.2019</p>	<p>*Die Ösen haben lagermäßig keine Öffnung (m = 0,00). Eine Ösenöffnung können wir jedoch bei Bedarf kurzfristig aufschneiden.</p>																									
																												
<p>n <input type="text"/> nt <input type="text"/> R <input type="text" value="31,250"/> Gewicht <input type="text" value="6,555"/></p>		<p>Federprüfung nach DIN ISO 2859/1 Prüfniveau II</p>																										
<p>1 Windungsrichtung</p> <p><input type="checkbox"/> links <input checked="" type="checkbox"/> rechts</p>		<p>4 Lastspielzahl N <input type="text"/></p>		<p>10 Toleranzen nach DIN 2097</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Gütegrad</th> <th>De,Di,D</th> <th>L0</th> <th>F0-Fn</th> <th>Ösen</th> <th>Drahtstärke d nach DIN 2076</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>	Gütegrad	De,Di,D	L0	F0-Fn	Ösen	Drahtstärke d nach DIN 2076	1	<input type="checkbox"/>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
Gütegrad	De,Di,D	L0	F0-Fn	Ösen	Drahtstärke d nach DIN 2076																							
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																							
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																							
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																							
<p>2 Ösenform und Ösenstellung</p> <p>Ösenform <input type="text" value="1/1 deutsche Öse"/></p> <p>Ösen gegeneinander versetzt <input checked="" type="checkbox"/> um <input type="text" value="270,0 ± 15,0"/> Grad (Im Sinne der Rechtsschraube)</p>		<p>5 Lastspielfrequenz n <input type="text" value=" /"/></p> <p>6 Arbeitstemperatur <input type="text" value=""/> °C</p> <p>7 Werkstoff <input type="text" value="EN 10270-3-1.4310"/></p> <p>8 Draht- oder Staboberfläche <input checked="" type="checkbox"/> gezogen <input type="checkbox"/> gewalzt <input type="checkbox"/> spanend bearbeitet</p> <p>9 Oberflächenschutz <input type="text"/></p>		<p>11 Fertigungsausgleich durch</p> <p>Eine Federkraft, zugehörige Länge der gespannten Feder und L0 <input type="checkbox"/> F0, D <input checked="" type="checkbox"/></p> <p>Eine Federkraft, zugehörige Länge der gespannten Feder und F0 <input type="checkbox"/> L0, D <input type="checkbox"/></p> <p>Zwei Federkräfte, die zugehörigen Längen der gespannten Feder <input type="checkbox"/> L0, n, d <input type="checkbox"/> F0, D <input type="checkbox"/></p>																								
<p>3 Arbeitsweg sh <input type="text"/> mm</p> <p>Bemerkungen</p>		<p>Staffelpreise</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Mengenstaffel</th> <th>Einzelpreis [EUR]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>2.8800 €</td></tr> <tr><td>7</td><td>1.9900 €</td></tr> <tr><td>17</td><td>1.0300 €</td></tr> <tr><td>37</td><td>0.7000 €</td></tr> <tr><td>75</td><td>0.5200 €</td></tr> <tr><td>125</td><td>0.4854 €</td></tr> <tr><td>175</td><td>0.4757 €</td></tr> <tr><td>250</td><td>0.4637 €</td></tr> <tr><td>350</td><td>0.4431 €</td></tr> <tr><td>450</td><td>0.4257 €</td></tr> </tbody> </table>			Mengenstaffel	Einzelpreis [EUR]	1	2.8800 €	7	1.9900 €	17	1.0300 €	37	0.7000 €	75	0.5200 €	125	0.4854 €	175	0.4757 €	250	0.4637 €	350	0.4431 €	450	0.4257 €		
Mengenstaffel	Einzelpreis [EUR]																											
1	2.8800 €																											
7	1.9900 €																											
17	1.0300 €																											
37	0.7000 €																											
75	0.5200 €																											
125	0.4854 €																											
175	0.4757 €																											
250	0.4637 €																											
350	0.4431 €																											
450	0.4257 €																											
<p>Gutekunst + Co.KG Federnfabriken · Carl-Zeiss-Straße 15 · D-72555 Metzingen Verkauf (+49) 07123 / 960-192 · Individuelle Federn (+49) 07123 / 960-193 · Zentrale (+49) 07123 / 960-0 Telefax (+49) 07123 / 960-195 · E-mail: verkauf@gutekunst-co.com</p>																												

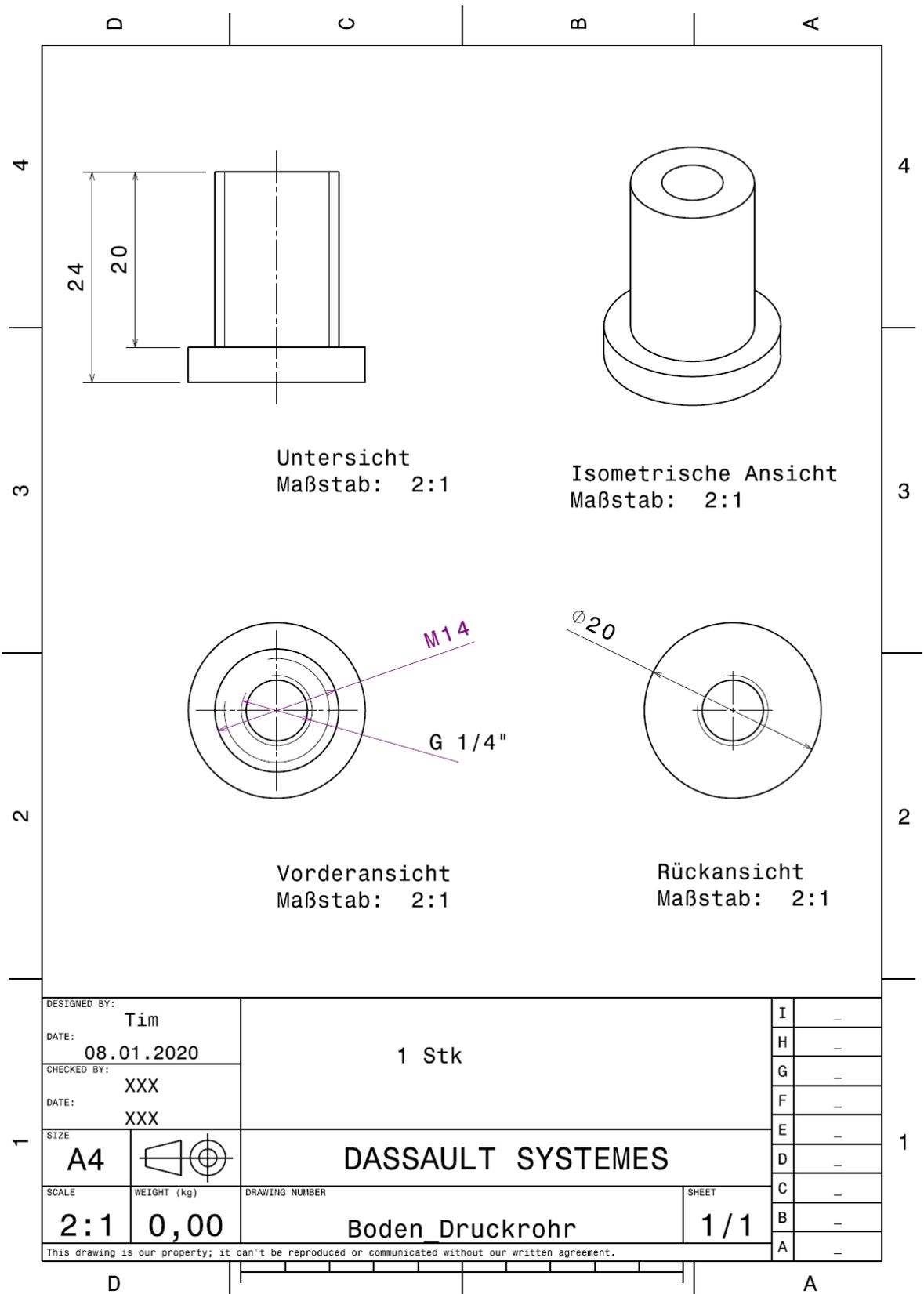
Anhang 7 – Fertigungszeichnungen Buchsen



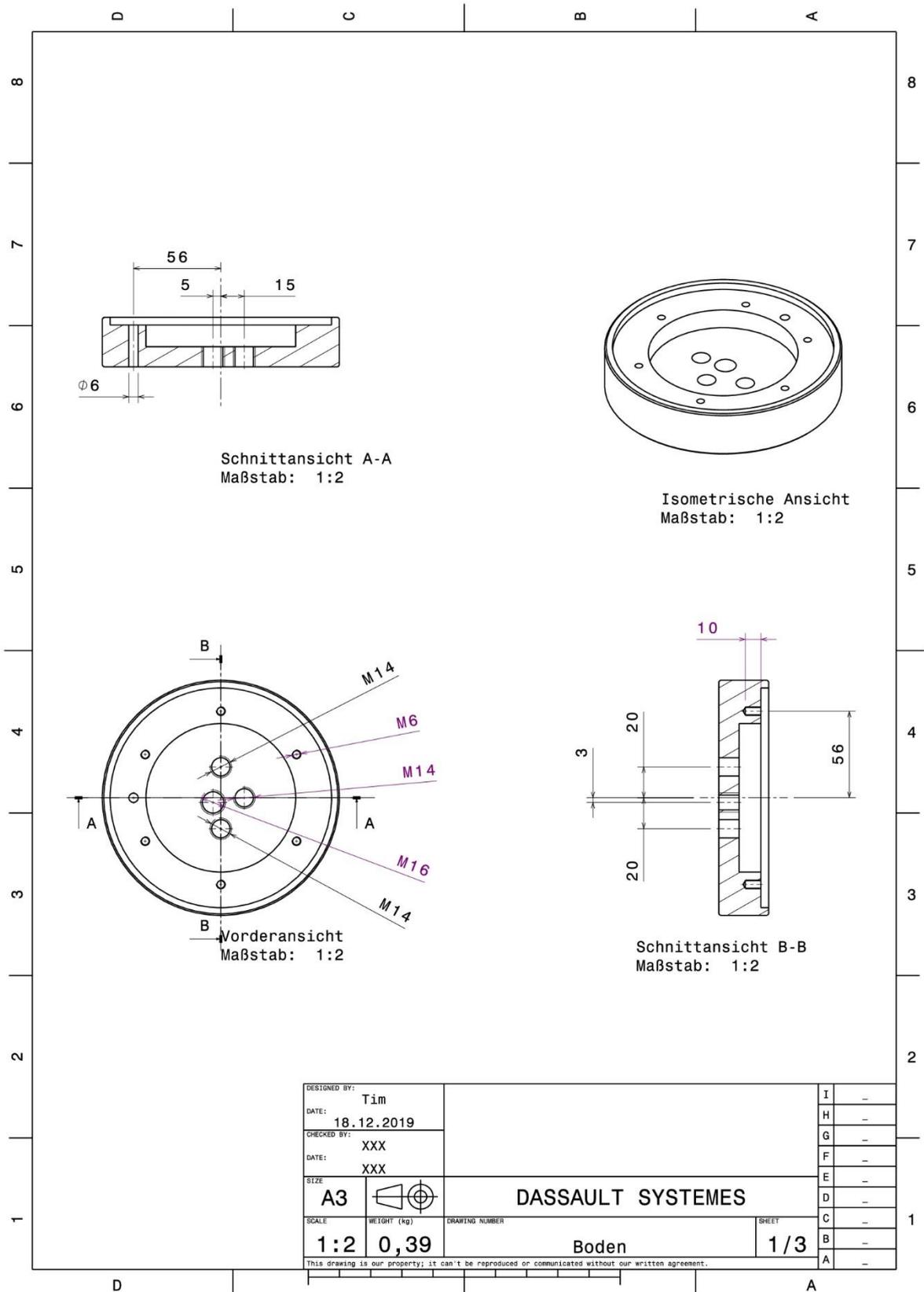








Anhang 8 – Bohrungen Boden



Anhang 9 – Datenblatt NTC

Temperature measurement

B57861S

Miniature sensors with bendable wires

S861

Applications

- Temperature measurement

Features

- Short response time
- High measuring accuracy
- Tight B value tolerances available
- Epoxy resin encapsulation
- PTFE-insulated leads of silver-plated nickel wire, AWG 30
- UL approval (E69802)

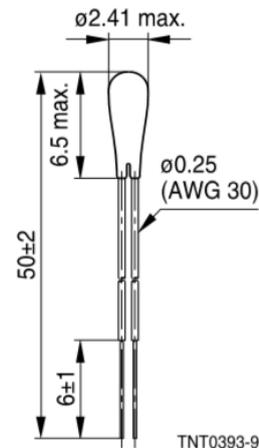
Options

- Alternative lead lengths on request

Delivery mode

Bulk

Dimensional drawing



Dimensions in mm

Approx. weight 60 mg

General technical data

Climatic category	(IEC 60068-1)		55/155/56	
Max. power	(at 25 °C)	P_{25}	60	mW
Resistance tolerance		$\Delta R_R/R_R$	$\pm 1, \pm 3, \pm 5$	%
Rated temperature		T_R	25	°C
Dissipation factor	(in air)	δ_{th}	approx. 1.5	mW/K
Thermal cooling time constant	(in air)	τ_c	approx. 15	s
Heat capacity		C_{th}	approx. 22.5	mJ/K

Temperature measurement

B57861S

Miniature sensors with bendable wires

S861

Electrical specification and ordering codes

R_{25} Ω	No. of R/T characteristic	$B_{25/100}$ K	Ordering code
B value tolerance = 0.3%, resistance tolerance = $\pm 1\%$			
5 k	8016	3988 $\pm 0.3\%$	B57861S0502F045
10 k	8016	3988 $\pm 0.3\%$	B57861S0103F045
30 k	8018	3964 $\pm 0.3\%$	B57861S0303F045
B value tolerance = 1.0%, resistance tolerance = $\pm 1\%$, $\pm 3\%$ or $\pm 5\%$			
2 k	1008	3560 $\pm 1\%$	B57861S0202+040
3 k	8016	3988 $\pm 1\%$	B57861S0302+040
5 k	8016	3988 $\pm 1\%$	B57861S0502+040
10 k	8016	3988 $\pm 1\%$	B57861S0103+040
30 k	8018	3964 $\pm 1\%$	B57861S0303+040
50 k	2901	3760 $\pm 1\%$	B57861S0503+040
100 k	2014	4540 $\pm 1\%$	B57861S0104+040

+ = Resistance tolerance

F = $\pm 1\%$

H = $\pm 3\%$

J = $\pm 5\%$

Reliability data

Test	Standard	Test conditions	$\Delta R_{25}/R_{25}$ (typical)	Remarks
Storage in dry heat	IEC 60068-2-2	Storage at upper category temperature T: 155 °C t: 1000 h	< 2%	No visible damage
Storage in damp heat, steady state	IEC 60068-2-78	Temperature of air: 40 °C Relative humidity of air: 93% Duration: 56 days	< 1%	No visible damage
Rapid temperature cycling	IEC 60068-2-14	Lower test temperature: -55 °C Upper test temperature: 155 °C Number of cycles: 100	< 1%	No visible damage
Long-term stability (empirical value)		Temperature: 70 °C t: 10000 h	< 2%	No visible damage

R/T characteristics

R/T No.	8016		8018	
T (°C)	B _{25/100} = 3988 K		B _{25/100} = 3964 K	
	R _T /R ₂₅	α (%/K)	R _T /R ₂₅	α (%/K)
-55.0	96.3	7.4	–	–
-50.0	67.01	7.2	–	–
-45.0	47.17	6.9	–	–
-40.0	33.65	6.7	30.24	6.3
-35.0	24.26	6.4	22.1	6.1
-30.0	17.7	6.2	16.32	5.9
-25.0	13.04	6.0	12.17	5.8
-20.0	9.707	5.8	9.153	5.6
-15.0	7.293	5.6	6.945	5.4
-10.0	5.533	5.5	5.313	5.2
-5.0	4.232	5.3	4.097	5.1
0.0	3.265	5.1	3.183	4.9
5.0	2.539	5.0	2.491	4.8
10.0	1.99	4.8	1.963	4.7
15.0	1.571	4.7	1.557	4.6
20.0	1.249	4.5	1.244	4.4
25.0	1.0000	4.4	1.0000	4.3
30.0	0.8057	4.3	0.8083	4.2
35.0	0.6531	4.1	0.6572	4.1
40.0	0.5327	4.0	0.5373	4.0
45.0	0.4369	3.9	0.4418	3.9
50.0	0.3603	3.8	0.365	3.7
55.0	0.2986	3.7	0.303	3.7
60.0	0.2488	3.6	0.2527	3.6
65.0	0.2083	3.5	0.2118	3.5
70.0	0.1752	3.4	0.1783	3.4
75.0	0.1481	3.3	0.1508	3.3
80.0	0.1258	3.2	0.128	3.2
85.0	0.1072	3.2	0.1091	3.2
90.0	0.09177	3.1	0.0933	3.1
95.0	0.07885	3.0	0.08016	3.0
100.0	0.068	2.9	0.0691	2.9
105.0	0.05886	2.9	0.05974	2.9
110.0	0.05112	2.8	0.05183	2.8
115.0	0.04454	2.7	0.04512	2.8
120.0	0.03893	2.6	0.0394	2.7
125.0	0.03417	2.6	0.0345	2.6
130.0	0.03009	2.5	0.03032	2.6
135.0	0.02654	2.5	0.02672	2.5
140.0	0.02348	2.4	0.02361	2.5
145.0	0.02083	2.4	0.02091	2.4
150.0	0.01853	2.3	0.01857	2.4
155.0	0.01653	2.3	0.016537	2.3

Anhang 10 – Datenblatt Drucksensor

Drucksensoren Typ IPS PPSU	
<p>Inline Pressure Sensor IPS der neue Inline Drucksensor von AVS-Römer</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">  <div style="text-align: right;">   </div> </div>	
<p>Inline Drucksensor zur Druckmessung von flüssigen und gasförmigen Medien.</p> <p>Die keramische Druckmesszelle kombiniert mit den bewährten ELSA-Steckverschraubungen aus PPSU findet ihren Einsatz vornehmlich im Lebensmittelbereich.</p>	<p>Weitere Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> • geringer Totraum • temperaturkompensierte Auswertelektronik • Werkstoffe und Bauart insb. für Lebensmittel-Anwendungen optimiert
	<p>Varianten / Optionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • andere Schlauchanschlüsse • andere Werkstoffe für Dichtung • andere Druckstufen
KENNGRÖSSEN	
ALLGEMEIN	
Bauart	keramische Druckmesszelle
Benennung	Drucksensor
Typbezeichnung	IPS-958P3-...
Nennweite	DN 2,5 bis DN 6
Anschluss	ELSA-Steckanschluss für Rohr/Schlauch AD 4 bis AD 8
Umgebungstemperatur	0 °C bis +60 °C
Mediumstemperatur	0 °C bis +140 °C
Mediumviskosität	bis ca. 35 mm ² /s
Werkstoff Körper	PPSU (KTW zugelassen, NSF zertifiziert)
Werkstoff Druckmesszelle	Al ₂ O ₃
Werkstoff O-Ringe	FKM (FDA konform) bzw. EPDM (FDA konform, KTW zugelassen, NSF zertifiziert)
Befestigungsart	über Federklammer innere Weite Ø18-22 mm (nicht im Lieferumfang enthalten)
Einbaulage	vorzugsweise stehend
Zulassung	NSF/ANSI 169
PNEUMATISCH - HYDRAULISCH	
Nenndruck	bis PN 16 gemäß Typtabelle
Druckbereich	0 bar bis zulässigem Betriebsüberdruck PB gemäß Tabelle
Durchflusswert	Kv-Wert gemäß Tabelle
Durchflussmedien	gasförmige oder flüssige Medien, die die angegebenen Werkstoffe nicht angreifen
ELEKTRISCH	
Versorgungsspannung	5 V DC (24 V DC auf Anfrage)
Spannungstoleranz	±10 %
Ausgangssignal	0,5 - 4,5 V DC (ratiometrisch) (0-5 V DC, 0-10 V auf Anfrage)
Elektrischer Anschluss	3-poliges geschirmtes Kabel 0,75 m (LiYCY 3 x AWG 26), Litzenenden vorverzinst
Schutzart	IP65
GENAUIGKEIT	
Gesamtfehler	±1,5 % FS
Temperaturfehler Nullpunkt	<±0,02 % FS/K
Temperaturfehler Spanne	-0,012 % FS/K
Ansprechzeit	<2 ms
<p>Achtung! PPSU sollte nicht eingesetzt werden in Kontakt mit aromatischen Kohlenwasserstoffen, oxidierenden Säuren, Aceton, Chlorkohlenwasserstoffen, Ether und Ketonen! Auch sollte PPSU nicht direkt in Kontakt mit anaeroben Klebstoffen gebracht werden!</p>	

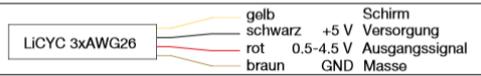
Drucksensor Typ IPS

Produkt
Gruppe **730**

Zul. PB bei Umg.-Temp.
 T_{min} 0°C, T_{max} +60°C



Kunststoff
PPSU

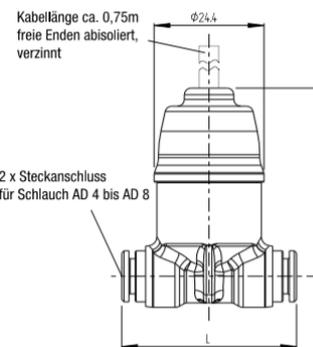
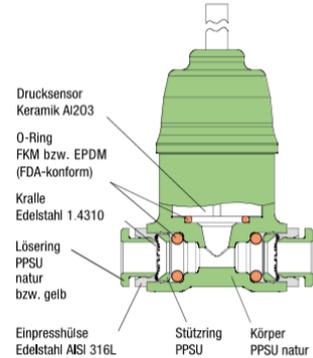


für Schlauch D	DN	Kv-Wert Wasser [l/min]	PN	Zul. PB [bar] bei Mediumstemp.			L	L1	Dicht- werk- stoff	Typ	Bestell- nummer	Preis
				20°C	100°C	140°C						
4	2,5	2,4	4	4	4	4	38	42	FKM (FDA konform)	IPS-958P3-4FF-04	390564	a. A.
4	2,5	2,4	4	4	4	4	38	42	EPDM (FDA konform)	IPS-958P3-4PF-04	390565	a. A.
4	2,5	2,4	16	16	12	6	38	42	FKM (FDA konform)	IPS-958P3-4FF-16	390553	a. A.
4	2,5	2,4	16	16	12	6	38	42	EPDM (FDA konform)	IPS-958P3-4PF-16	390554	a. A.
6	4	8,1	4	4	4	4	39	42	FKM (FDA konform)	IPS-958P3-6FF-04	390562	a. A.
6	4	8,1	4	4	4	4	39	42	EPDM (FDA konform)	IPS-958P3-6PF-04	390563	a. A.
6	4	8,1	16	16	12	6	39	42	FKM (FDA konform)	IPS-958P3-6FF-16	390551	a. A.
6	4	8,1	16	16	12	6	39	42	EPDM (FDA konform)	IPS-958P3-6PF-16	390552	a. A.
8	6	24	4	4	4	4	45	43	FKM (FDA konform)	IPS-958P3-8FF-04	390576	a. A.
8	6	24	4	4	4	4	45	43	EPDM (FDA konform)	IPS-958P3-8PF-04	390577	a. A.
8	6	24	16	16	12	6	45	43	FKM (FDA konform)	IPS-958P3-8FF-16	390572	a. A.
8	6	24	16	16	12	6	45	43	EPDM (FDA konform)	IPS-958P3-8PF-16	390573	a. A.

Kennlinien 0-4 bar bzw. 0-16 bar 0,5-4,5 V (ratiometrisch)



Abbildung



Anhang 11 – Datenblatt DMS

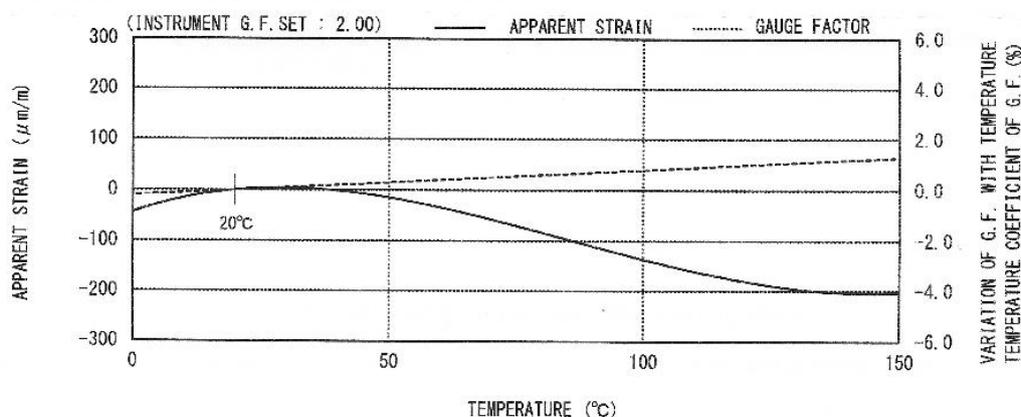
STRAIN GAUGE TEST DATA

GAUGE TYPE	: FLAB-5-8	TESTED ON	: GLASS
LOT NO.	: F501611	COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION	: 8.1 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
GAUGE FACTOR	: 2.08 $\pm 1\%$	TEMPERATURE COEFFICIENT OF G. F.:	: $+0.1 \pm 0.05 \%$ / $^{\circ}\text{C}$
ADHESIVE	: P-2	DATA NO.	: AB0078

THERMAL OUTPUT (ϵ_{app} : APPARENT STRAIN)

$$\epsilon_{\text{app}} = -4.38 \times 10^{-1} + 3.57 \times T - 7.51 \times 10^{-2} \times T^2 + 3.13 \times 10^{-4} \times T^3 - 1.20 \times 10^{-7} \times T^4 \quad (\mu\text{m}/\text{m})$$

TOLERANCE : $\pm 0.85 [(\mu\text{m}/\text{m})/^{\circ}\text{C}]$, T : TEMPERATURE



ひずみゲージ取扱いの注意事項

- ・上記の特性データは、リード線の取付けによる影響を含んでおりません。裏面記載のリード線の測定値への影響に従って補正してください。
- ・ひずみゲージの使用温度は、接着剤の耐熱温度などにより変わります。
- ・絶縁抵抗などの点検は、印加電圧を50V以下にしてください。
- ・ゲージリードに無理な力を加えないでください。
- ・ひずみゲージの裏面に接着剤を塗布して接着してください。
- ・ひずみゲージの裏面は脱脂洗浄してありますので、汚さないように取扱いしてください。
- ・ゲージの包装を開封後は、乾燥した場所で保管してください。
- ・ご使用に際して、ご不明な点などがございましたら、当社までお問い合わせください。

株式会社東京測器研究所
〒140-8560 東京都品川区南大井6-8-2
TEL 03-3763-5611
URL <http://www.tml.jp>

CAUTIONS ON HANDLING STRAIN GAUGES

- The above characteristic data do not include influence due to lead wires. Correct the data in accordance with the influence of lead wires on measured values described overleaf.
- The service temperature of strain gauge depends on the operating temperature of adhesive, etc.
- Check of insulation resistance, etc. should be made at a voltage of less than 50V.
- Do not apply an excessive force to the gauge leads.
- Apply an adhesive to the back of a strain gauge and stick the gauge to a specimen.
- As the back of strain gauge has been degreased and washed, do not contaminate it.
- After unpacking, store strain gauges in a dry place.
- If you have any questions, please feel free to contact us or your local agent.

Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.
8-2, Minami-Ohi 6-Chome, Shinagawa- Ku,
Tokyo 140-8560, JAPAN
URL <http://www.tml.jp/e>



Tokyo Measuring Instruments Lab.

MADE IN JAPAN
3rd ed. Oct. 2018

Anhang 12 – Berechnungen DMS

$$r_i := 40 \text{ mm}$$

$$p := 150000 \text{ Pa}$$

Innendruck 50kPa - 150kPa

$$r_a := 50 \text{ mm}$$

$$s := 5 \text{ mm}$$

$$d_m := 2 \cdot r_i + s = 0.085 \text{ m}$$

$$\sigma_t := \frac{p \cdot d_m}{2 \cdot s} = (1.275 \cdot 10^6) \text{ Pa}$$

$$\sigma_a := \frac{p \cdot d_m}{4 \cdot s} = (6.375 \cdot 10^5) \text{ Pa}$$

$$E_{\text{Boro_RT}} := 63000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Hook'sches Gesetz:

$$\varepsilon_t := \frac{\sigma_t}{E_{\text{Boro_RT}}} = 2.024 \cdot 10^{-5}$$

entspricht $6.746 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ bis $20.24 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$

$$\varepsilon_a := \frac{\sigma_a}{E_{\text{Boro_RT}}} = 1.012 \cdot 10^{-5}$$

entspricht $3.373 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ bis $10.12 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$