



Peter Max Egger, B.Sc.

Entwicklung und Konstruktion eines 3D-Druckkopfes zur Verarbeitung von Natriumacetat-Trihydrat

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Individuelles Masterstudium

Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas

Institut für Fertigungstechnik

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit/Diplomarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Aufgabenstellung

Das Ziel der hier vorliegenden Masterarbeit liegt darin, einen funktionierenden Prototyp eines Druckkopfes zum Auftragen von Natriumacetat-Trihydrat zu entwickeln. Es sollen geeignete Konzepte zur Durchführung des Auftrageprozesses sowie passende Komponenten für den Druckkopf gefunden werden. Es gilt den Druckkopf zu gestalten sowie Entwurfs- und Konstruktionszeichnungen für die Fertigung des Druckkopfes zu erstellen. Abschließende Versuche und Tests mit dem Druckkopf sollen seine Funktionstüchtigkeit unter Beweis stellen.

Danksagung

Mein Dank gebührt dem Institut für Fertigungstechnik unter der Leitung von Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Franz Haas** für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes zur Erstellung dieser Arbeit. Dem Werkstättenteam des Institutes danke ich für die rasche Herstellung der Eigenbauteile sowie die praktische Hilfestellung während der Fertigung.

Gedankt sei weiters dem Institut für Tragwerksentwurf mit seinem stellvertretenden Leiter Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. **Andreas Trummer** für das zur Verfügung stellen des ABB Roboter Labors. Herrn Dipl.-Ing. **Christian Pichkastner** danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Druckversuche.

Einen ganz besonderen Dank spreche ich meinem Diplombetreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. **Markus Brillinger** für die fachliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und die Zusammenarbeit bei den Labortests aus.

Gedankt sei dem Geschäftsführer der Firma Idee & Design The Art Factory GmbH, Herrn **Christian Fuchs**, für die finanzielle Unterstützung des Projekts. Herrn **Robert Liebl** danke ich für die anregenden Gespräche zur praktischen Umsetzbarkeit dieser Arbeit.

Nicht zuletzt gebührt mein ganz besonderer Dank meinen Studienkolleginnen und Kollegen sowie meinen Eltern für die Unterstützung während des Studiums.

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung, dem Bau und dem Funktionstest eines Druckkopfes. Mit ihm soll es möglich sein, eine metastabile Salzlösung, genannt Natriumacetat-Trihydrat, schichtweise und zielgenau auf eine Plattform aufzutragen, um damit 3-dimensionale Objekte zu erzeugen.

In einer vorangegangenen Diplomarbeit von Anna Achatz wurde die verfahrenstechnische Grundlage für diese Arbeit erstellt.

Zu Beginn musste festgestellt werden, welche Anforderungen durch den Einsatz der Salzlösung an künftige Baugruppen und Komponenten gestellt werden müssen. Aus einer Zahl möglicher Komponenten galt es, die Geeigneten auszuwählen.

Anhand erstellter Entwurfs- und Konstruktionszeichnungen sowie Berechnungen wurden vorhandene Komponenten modifiziert, erforderliche Bauteile hergestellt und zu einem kompakten Druckkopf zusammengeführt.

In abschließenden Versuchen und Testläufen konnte die Funktionstüchtigkeit des Druckkopfes sichergestellt und die finalen Systemparameter für ein reproduzierbares Druckergebnis ermittelt werden.

Abstract

This thesis deals with the development, construction and functional testing of a printhead. It provides the opportunity to accurately apply a metastable saline solution, which is called sodium acetate trihydrate, layer by layer on a plate to create three-dimensional objects.

The procedural principles were designed in a preceding diploma thesis by Anna Achatz.

First, the requirements for the usage of the saline solution on future modules and components had to be determined. From a list of possible components, the most suitable were identified.

With reference to previously designed drafts and constructional drawings as well as computation, existing components were modified, required units were produced and all were combined to form a compact printer unit.

Concluding trials and tests guaranteed that the printhead functions properly and provided final system parameters for a repeatable print result.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Vorarbeiten zum Thema	2
3.	Anforderung an Baugruppen und deren Komponenten	3
3.1.	Vorlagebehälter	3
3.2.	Transportleitung	4
3.3.	Fördermechanismus.....	4
3.4.	Temperaturmessung	4
3.5.	Wärmeübertrager	5
3.6.	Düse	5
4.	Auswahl möglicher Komponenten	6
4.1.	Vorlagebehälter	6
4.2.	Transportleitung	6
4.3.	Fördermechanismus.....	6
4.3.1.	Auslegung der Pumpe.....	7
4.3.2.	Pumpenbauarten.....	9
4.4.	Temperaturmessung	11
4.4.1.	Thermoelement.....	11
4.4.2.	Metall-Widerstandsthermometer.....	13
4.4.3.	Heißeiter (NTC-Thermistoren).....	15
4.4.4.	Kaltleiter (PTC-Resistoren).....	16
4.4.5.	Pyrometer	17
4.5.	Wärmeübertrager	19
4.5.1.	Peltierelement	19
4.5.2.	Peltierkühlgerät	20
4.6.	Düse	21
4.6.1.	Kanülen.....	21
4.6.2.	Extruderdüse.....	21
4.6.3.	Dispenser.....	22
5.	Geeignete Komponenten.....	23
5.1.	Vorlagebehälter	23
5.2.	Transportleitung	24
5.3.	Fördermechanismus.....	24
5.4.	Temperaturmessung	26
5.4.1.	Temperatursensor PT 1000.....	26
5.4.2.	NTC (10 k Ω).....	26

5.5.	Wärmeübertrager	27
5.6.	Temperaturregler	27
5.7.	Austrittsdüse	28
6.	Vernetzung und Konstruktion	29
6.1.	Konzept 1: Peltierkühler horizontal	30
6.2.	Konzept 2: Peltierkühler vertikal	31
6.3.	Konzeptdetaillierung	32
6.3.1.	Vorderseite:	32
6.3.2.	Oberseite:	32
7.	Montage des Druckkopfes	34
8.	Versuche und Testläufe	35
8.1.	Versuch 1: Funktionsstudie des Druckkopfes	35
8.1.1.	Versuchsdurchführung	35
8.1.2.	Ergebnisse	36
8.1.3.	Fazit	36
8.2.	Versuch 2: Kühlstudie Plattform	37
8.2.1.	Versuchsdurchführung	37
8.2.2.	Ergebnisse	37
8.2.3.	Fazit	38
8.3.	Versuch 3: Dauerlaufversuch	39
8.3.1.	Versuchsdurchführung	40
8.3.2.	Ergebnisse	40
8.3.3.	Fazit	41
8.4.	Versuch 4: Kühlstudie mit Druckluft und Ventilatoren	42
8.4.1.	Versuchsdurchführung	42
8.4.2.	Ergebnisse	43
8.4.3.	Fazit	43
8.5.	Versuch 5: Kühlstudie mittels Flüssigstickstoff	44
8.5.1.	Versuchsdurchführung	44
8.5.2.	Ergebnisse	45
8.5.3.	Fazit	47
9.	Zusammenfassung	48
10.	Ausblick	49
	Literaturverzeichnis	50
	Abbildungsverzeichnis	52
	Anhang	55

Formelzeichen, Bezeichnungen und häufig verwendete Abkürzungen

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A_D	mm^2	Flächeninhalt einer Auftragsschicht
b_D	mm	Breite einer Auftragsschicht
C	g/l	Konzentration der Salzlösung
d	mm	Düsendurchmesser
E	Ω/K	Empfindlichkeit eines Temperatursensors
f	K	Materialkonstante
h_D	mm	Höhe einer Auftragsschicht
$H_{Düse}$	mm	Abstand Düse – Bauplattform/Auftragsschicht
H_P	m	Förderhöhe Pumpe
I_{PK}	A	Stromstärke am Peltierkühler
I_{ZH}	A	Stromstärke an der Zwischenheizung
K_0	-	mathematische Konstante
$k_{0,8}$	s^2/m^5	Systemwiderstandbeiwert
k_{AB}	mV/K	Proportionalitätsfaktor eines Thermoelements
L_{zu}	m	Länge der Zuleitung
n_P	1/s	Drehzahl der Pumpe
n_q	1/min	Spezifische Drehzahl
P	W/m^2	Strahlungsleistung allgemein
P_M	W/m^2	Strahlungsleistung des Messobjekts
P_V	W/m^2	Strahlungsleistung des Vergleichsstrahlers
Q_P	m^3/h	Volumenstrom der Pumpe
$\dot{Q}_{ab,23}$	W	abgeführte Wärmeleistung Wärmeübertrager
$\dot{Q}_{zu,01}$	W	zugeführte Wärmeleistung Vorlagebehälter
$\dot{Q}_{zu,23}$	W	zugeführte Wärmeleistung Wärmeübertrager
$\dot{Q}_{zu,PK}$	W	zugeführte Wärmeleistung Peltierkühler
$\dot{Q}_{zu,ZH}$	W	zugeführte Wärmeleistung Zwischenheizung
$R(T)$	Ω	elektrischer Widerstand bei Messtemperatur
R_0	Ω	elektrischer Widerstand bei Referenztemperatur
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
T_0	K	Vergleichstemperatur
T_1	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur im Vorlagebehälter

T_2	K	Messtemperatur eines Thermoelements
T_3	$^{\circ}\text{C}$	Düsenaustrittstemperatur
T_A	$^{\circ}\text{C}$	Anfangstemperatur
T_E	$^{\circ}\text{C}$	Endtemperatur
T_{KW}	$^{\circ}\text{C}$	Kühlwassertemperatur
T_N	$^{\circ}\text{C}$	Nenntemperatur
T_R	$^{\circ}\text{C}$	Raumtemperatur
T_{VB}	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur im Vorlagebehälter
U	mV	Thermospannung
U_P	V	Pumpenspannung
U_{PK}	V	Spannung am Peltierkühler
U_{ZH}	V	elektrische Spannung an der Zwischenheizung
V	l	Volumen des Vorlagebehälters
v	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
\dot{v}	m^3/h	Volumenstrom der Pumpe laut Abbildung 4
\dot{V}	ml/min	Fördermenge der Pumpe

Griechische Symbole

α	K^{-1}	Temperaturkoeffizient des linearen Terms
β	K^{-2}	Temperaturkoeffizient des quadratischen Terms
σ	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$	Stephan-Boltzmann Konstante
ε	-	Emissionsgrad
ρ	kg/m^3	Dichte
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Messstellentemperatur

Abkürzungsverzeichnis

EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
KV	Konstruktionsvariante
NTC	Negative Temperature Coefficient
PPS	Polyvenylsulfid
PTC	Positive Temperature Coefficient
PVC	Polyvenylchlorid
SAT	Natriumacetat-Trihydrat (englisch: sodium acetate trihydrate)

1. Einleitung

Der 3D-Druck ermöglicht bestehenden sowie neu gegründeten Unternehmen ihre Produkte in Form von Prototypen rasch und kostengünstig herzustellen, da der Einsatz einer Vielzahl von Designern, Modellbauern und Fertigungstechnikern wegfällt.¹

Durch die Additive Fertigung, wie der 3D-Druck als Überbegriff genannt wird, entstehen neue Arbeitsfelder. Als Beispiel schuf das Smithsonian Institut mit Sitz in Washington D.C. ein eigenes Digitalisierungsteam, welches deren Kunstwerke scannt und daraus 3D-Modelle erstellt. Das Smithsonian hat anhand dieser erstellten Modelle die Möglichkeit deren Kunstwerke als Nachbau an unterschiedlichsten Orten der Welt zu zeigen. Die meist sehr wertvollen Originalkunstwerke verbleiben so unter optimalen Bedingungen im Institut und sind so vor Beschädigung oder gar Verlust geschützt.²

Mit Hilfe des 3D-Drucks ist es weiters möglich, Produkte nachhaltig herzustellen. Im Gegensatz zur Massenproduktion, in welchem die Produkte gefertigt und dann in Lagern gehortet werden, bietet der 3D-Druck die Möglichkeit auf Nachfrage zu produzieren und so eine Überproduktion sowie Lagerkosten zu vermeiden. Das Objekt wird in seiner Endgestalt hergestellt wodurch der Materialeinsatz und die Masse des Produktes reduziert und die Effizienz des Produktes gesteigert wird.³

Ziel dieser Arbeit ist die Konstruktion und der Bau eines Druckkopfes zum Auftrag der Salzlösung Natriumacetat-Trihydrat. Zu diesem Zwecke muss geklärt werden, welche Anforderungen durch den Auftragsprozess und die Salzlösung an die einzusetzenden Komponenten gestellt werden.

Parallel zu dieser Diplomarbeit verfasste Markus Brillinger seine Doktorarbeit wodurch Teile dieser Arbeit bereits in seiner Dissertation mit dem Titel "3D-Druck von Natriumacetat-Trihydrat als Ergebnis eines konsequenten Entwicklungsprozesses" veröffentlicht wurden.

¹ Vgl. Hausman/Horne (2014), S. 115.

² Vgl. Hausman/Horne (2014), S. 116.

³ Vgl. Lachmayer/Lippert/Fahlbusch (2016), S. 31 ff.

2. Vorarbeiten zum Thema

In einer zuvor erstellten Diplomarbeit von Achatz wurde für den 3D-Druck das Material Natriumacetat-Trihydrat gefunden und erforscht.

Achatz fand dabei heraus, dass eine mit 43 gew% Wasser hergestellte Salzlösung sehr gute Eigenschaften bezüglich der Festigkeit aufweist und das Salzhydrat in dieser Konzentration einfach zu verarbeiten ist.

Es wurde gezeigt, dass Natriumacetat-Trihydrat für den Auftrageprozess mit einer Pumpe gefördert werden kann und mit 0,5 – 1 cm/s eine ausreichend hohe Kristallisationsgeschwindigkeit besitzt.

Am Eintritt der Lösung in den Förderbereich empfiehlt Achatz eine Temperatur über 80°C. Innerhalb des Druckkopfes muss die Temperatur des Fluides dann über 58°C (Lösungstemperatur) gehalten werden. Am Austritt aus dem Druckkopf soll die Lösung diesen mit einer Temperatur von 40°C verlassen, um eine rasche Kristallisation zu erreichen.⁴

Im Vergleich zu bereits bekannten 3D-Druckverfahren ist es durch Regelung der Fluidaustrittsgeschwindigkeit aus dem Druckkopf möglich die Oberflächenstruktur der zu fertigenden Objekte zu ändern. Ist die Austrittsgeschwindigkeit gering, so tropft die Lösung auf die Bauplattform, es entsteht eine charakteristische, in Abbildung 1 gezeigte, "punktförmige" Oberflächenstruktur. Wird die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Druckkopf erhöht, so tritt die Salzlösung als Flüssigkeitsstrahl aus dem Druckkopf aus. Die gefertigten Objekte besitzen eine in Abbildung 2 dargestellte Oberfläche in "Raupenform".



Abbildung 1: Punktförmige Oberfläche,
Quelle: Achatz (2017), S. 45.



Abbildung 2: Raupenförmige Oberfläche,
Quelle: Achatz (2017), S. 45.

⁴ Vgl. Achatz (2017), S. 68.

3. Anforderung an Baugruppen und deren Komponenten

Um Natriumacetat-Trihydrat additiv auftragen zu können, sind folgende in Abbildung 3 schematisch dargestellte Komponenten notwendig.

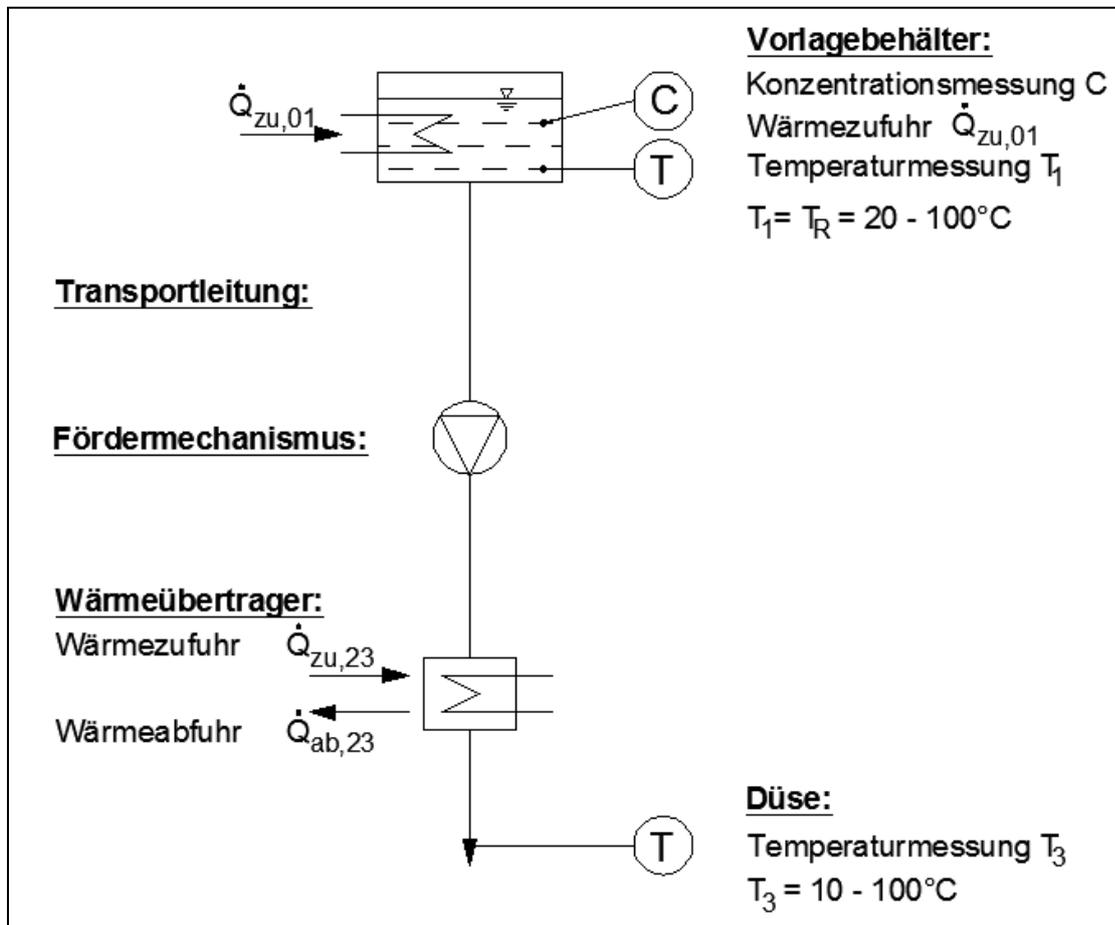


Abbildung 3: Prozessschaubild für die Additive Fertigung mit Natriumacetat-Trihydrat, Quelle: In Anlehnung an Achatz (2017), S. 54.

3.1. Vorlagebehälter

Natriumacetat-Trihydrat liegt im Ausgangszustand in Pulverform vor. Der Wasseranteil des Pulvers liegt bei 39,72 gew%.⁵ Da zur besseren Verarbeitung der Salzlösung ein Wasseranteil von 43 gew% gefordert wird, ist je nach gewünschter Menge an Salzlösung dem Pulver deionisiertes Wasser beizumengen.⁶ Zur Verflüssigung des Pulver-Wassergemisches muss dieses im Vorlagebehälter auf eine Temperatur von 80°C erhitzt werden. Eine gute Durchmischung der Salzlösung ist notwendig um Konzentrations- bzw. Temperaturunterschiede in der Lösung zu vermeiden. Eine Temperaturüberwachung sowie die Überprüfung der korrekten Konzentration sind ebenfalls im Vorlagebehälter durchzuführen.

⁵ Vgl. Achatz (2017), S. 18.

⁶ Vgl. Achatz (2017), S. 68.

3.2. Transportleitung

Die Hauptaufgabe der Transportleitung besteht darin, die flüssige Salzlösung zu den einzelnen Komponenten zu leiten. Aufgrund der hohen Flüssigkeitstemperatur im Vorlagebehälter ist eine Temperaturbeständigkeit der Leitung von über 80°C notwendig. Vor allem bei großen Leitungslängen kann der Fall eintreten, dass die Temperatur der Salzlösung in der Transportleitung unter die Lösungstemperatur von 58°C abfällt.⁷ Die Lösung befindet sich dadurch im metastabilen Zustand.⁸ Kleinste Verunreinigungen in der Leitung wirken als Kristallisationskeime und führen zur Auskristallisation der Lösung und zu einem Verlegen der Transportleitung. Um die erstarrte Lösung wieder zu verflüssigen, muss diese und die Leitung auf 80°C erwärmt werden. Eine benutzerfreundliche Demontage der einzelnen Leitungen ist von Vorteil, um Leitungsbereiche mit auskristallisierter Lösung rasch austauschen oder warten zu können. Einzelne Leitungsbereiche sind zu dem elastisch auszuführen um dem Druckkopf eine größtmögliche Freiheit an Beweglichkeit zu gewähren.

3.3. Fördermechanismus

Mit dem Fördermechanismus wird die Salzlösung vom Vorlagebehälter angesaugt und zur Düse gepumpt. Da sich zu Beginn des Auftragsprozesses noch keine Salzlösung in der Transportleitung befindet und aufgrund der zu erwartenden großen Leitungslängen zwischen Vorlagebehälter und Fördermechanismus, muss der Fördermechanismus gute Trockenlaufefigenschaften aufweisen.

Durch Änderung der vom Fördermechanismus dargestellten Fördermenge, wird die an der Düse austretende Lösungsmenge geregelt. Um Druckobjekte in "Raupenform" zu erhalten, ist eine größere geförderte Fluidmenge notwendig. Will man hingegen Objekte in "Punktform" produzieren, so müssen kleinere Fluidmengen bereitgestellt werden. Um dies ermöglichen zu können muss der Fördermechanismus regelbar sein.

Damit der Druckkopf kompakt gestalten werden kann, ist auf eine geringe Baugröße sowie eine geringe Masse des Fördermechanismus zu achten. Kommt es zur Auskristallisation der Salzlösung im Fördermechanismus, so sollte dieser einfach zu demontieren und zu reinigen sein.

3.4. Temperaturmessung

Der Temperaturmessbereich liegt, wie in Abbildung 3 ersichtlich, für sämtliche Messstellen zwischen +10°C und +100°C. Für alle Messstellen ist eine Messgenauigkeit von ±1°C ausreichend.

Im Bereich des Vorlagebehälters sind für den Prototypen Fluidmengen von 500 ml bis 1000 ml vorgesehen. Da die Salzlösung aufgrund der Durchmischung in Bewegung ist, ist in diesem Bereich ein robuster Sensor einzusetzen.

Im Bereich der Düse ist das Platzangebot zur Temperaturmessung nur sehr gering. Es muss daher ein Sensor geringer Baugröße mit punktförmige Messstelle eingesetzt werden. Da sich der Sensor im Förderstrom befindet, ist ein rasches Ansprechverhalten notwendig um den Wärmeübertrager zu regeln und die gewünschte Temperatur der Salzlösung am Austritt aus dem Druckkopf zu erhalten.

⁷ Vgl. Achatz (2017), S. 11.

⁸ Vgl. Achatz (2017), S. 13.

3.5. Wärmeübertrager

Seine Hauptaufgabe besteht darin, die ca. 80°C heiße Lösung aus dem Vorlagebehälter in den metastabilen (druckbaren) Bereich abzukühlen. Dafür ist eine Temperatur der Salzlösung von 40°C gefordert. Sollte es aufgrund dieser geringen Temperatur zu einer Auskristallisation der Lösung im Wärmeübertrager kommen, so muss diese Komponente in der Lage sein die Lösung auf 80°C aufzuheizen um die erstarrte Lösung aufzuschmelzen.

3.6. Düse

Über die Düse wird die Lösung gezielt auf die Bauplattform aufgebracht. Damit eine gute Qualität des Auftrageprozesses erreichbar ist, muss die Düse ein gutes Punkt- bzw. Raupenbild erstellen. Durch die erforderliche Temperatur des Druckmaterials von 40°C an der Düse ist dieses Bauteil sehr anfällig für eine Auskristallisation der Salzlösung. Ein einfacher Aufbau sowie eine leichte Demontage der Düse sollten deshalb abschließende Bedingungen für deren Verwendung darstellen.

4. Auswahl möglicher Komponenten

4.1. Vorlagebehälter

Je nach Größe des herzustellenden Objekts unterscheidet sich die Menge der benötigten Lösung. Werden nur kleine Körper produziert, so kommen Laborbehälter mit einem Fassungsvermögen von etwa einem Liter zum Einsatz. Will man hingegen große Objekte, wie zum Beispiel ein begehrtes Iglu produzieren, so sind Vorlagebehälter in der Größe von aufstellbaren Bausilos notwendig.

4.2. Transportleitung

Um eine möglichst große Beweglichkeit des Druckkopfes zu erreichen, muss die Transportleitung flexibel ausgeführt werden. Starre Rohre würden den Bewegungsspielraum des Druckkopfes einschränken. Wird die Transportleitung als Schlauchverbindung ausgeführt, so ist diese in der Lage die notwendige Beweglichkeit zu gewährleisten und die Lösung über lange Strecken zu leiten.

Die Größe der verwendeten Schläuche ist von der zu transportierenden Lösungsmenge abhängig. Kunststoffschläuche mit Innendurchmessern von einigen Millimetern ermöglichen den Materialtransport im Bereich von einigen Millilitern pro Minute. Mit Gartenschläuchen im Durchmesserbereich von einem Zoll werden hingegen Fluiddurchsätze von einigen Litern pro Minute erreicht.

Ein weiteres Auswahlkriterium ist die Temperaturbeständigkeit des einzusetzenden Schlauches. Dieser muss aufgrund der Fluidtemperatur am Vorlagebehälter auf über 80°C beständig sein.

Schläuche bestehen zum größten Teil aus Kunststoff (PVC). Deren geringe Wärmeleitfähigkeit macht es im Vergleich zu metallischen Rohren möglich, die Lösung mit einem geringeren Temperaturabfall zu transportieren.

Kommt es zu einer Auskristallisation der Salzlösung in der Leitung, so können Schläuche einfach demontiert und z.B. in einem Wasserbad erhitzt werden, um die erstarrte Lösung wieder zu verflüssigen.

4.3. Fördermechanismus

Da es sich bei der Salzlösung um eine Flüssigkeit handelt, wird zur Förderung eine Pumpe benötigt. Um aus der großen Anzahl verschiedenartigster Pumpen (siehe Abbildung 4) eine Auswahl treffen zu können, wird die mathematische Größe n_q , die sogenannte spezifische Drehzahl, herangezogen.⁹

$$n_q = n_p \cdot \frac{Q_p^{1/2}}{H_p^{3/4}} \quad 4.1$$

Die Variable n_p bezeichnet hier die gewünschte Drehzahl der auszuwählenden Pumpe. Je höher die Drehzahl gewählt wird, desto geringer ist die Anzahl der notwendigen Polpaare des Elektromotors, welcher die Pumpe antreibt. Eine geringe Anzahl von Polpaaren ermöglicht eine geringe Baugröße der Pumpe.

⁹ Vgl. Güllich (2014), S. 93.

Der Durchfluss Q_P bezeichnet die Fluidmenge, welche durch die Pumpe gefördert wird. Ist es hydraulisch nicht anders gewünscht (z.B. Bypasssystem), so entspricht der Durchfluss durch die Pumpe jener Menge an Salzlösung, welche von der Düse auf die Bauplattform aufgetragen wird. Da zunächst nur kleine Modelle hergestellt werden, wird der Wert für den Durchfluss gering angenommen.

Mit H_P wird die gewünschte Förderhöhe der Pumpe bezeichnet. Der geringe Durchmesser der Transportleitung sowie vor allem der geringe Durchmesser der Düse zum Aufbringen der Lösung machen es notwendig, den Wert der Förderhöhe H_P groß zu wählen.

Werden die Parameter n_P sowie H_P hoch geschätzt, den Parameter Q_P jedoch gering, so ergibt dies eingesetzt in Gleichung 4.1 eine geringe spezifische Drehzahl n_q . Dies bedeutet, dass die gewünschte Pumpe laut Abbildung 4 im Bereich der Verdrängermaschinen zu finden ist.

Achtung: Der Durchfluss Q_P in der oben beschriebenen Formel entspricht der Variablen \dot{v} in Abbildung 4.

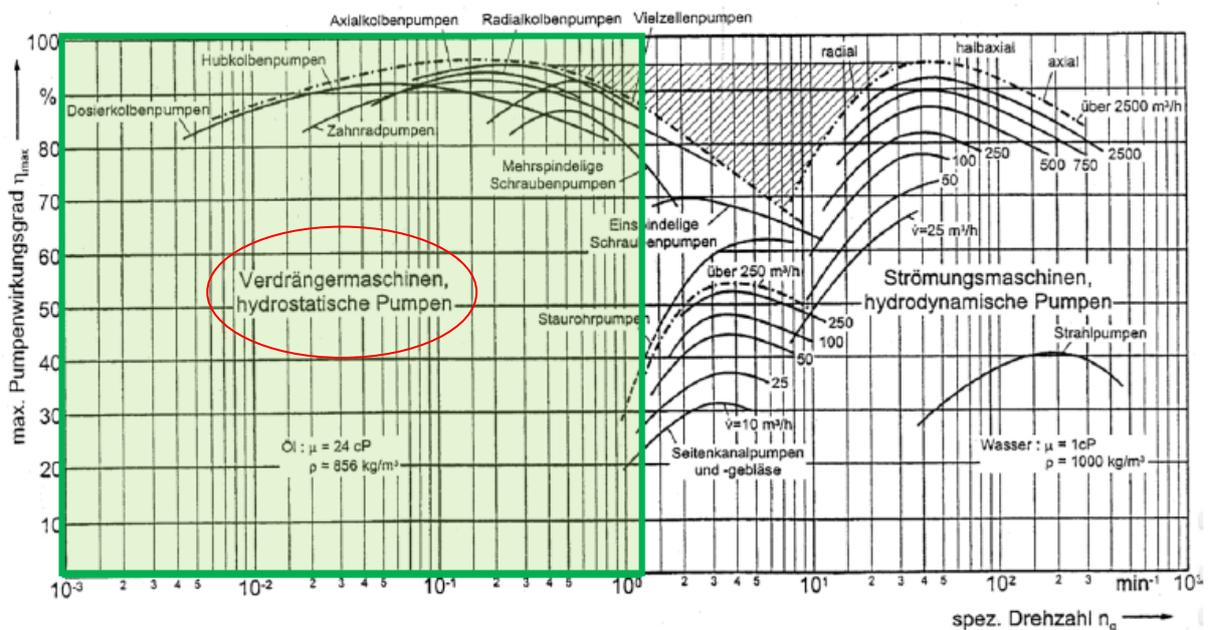


Abbildung 4: Pumpenarten, Quelle: Grabow (1993) (leicht modifiziert).

4.3.1. Auslegung der Pumpe

Um die gewünschte Fördermenge der Pumpe berechnen zu können, wurde anhand bereits fertiggestellter Objekte, das in

Abbildung 5 dargestellte Modell entworfen. Die Variable b_D bezeichnet die Breite der gewünschten Auftragsschicht und wird mit 3 mm festgelegt. Die Höhe dieser Schicht wird mit $h_D = 1$ mm fixiert.

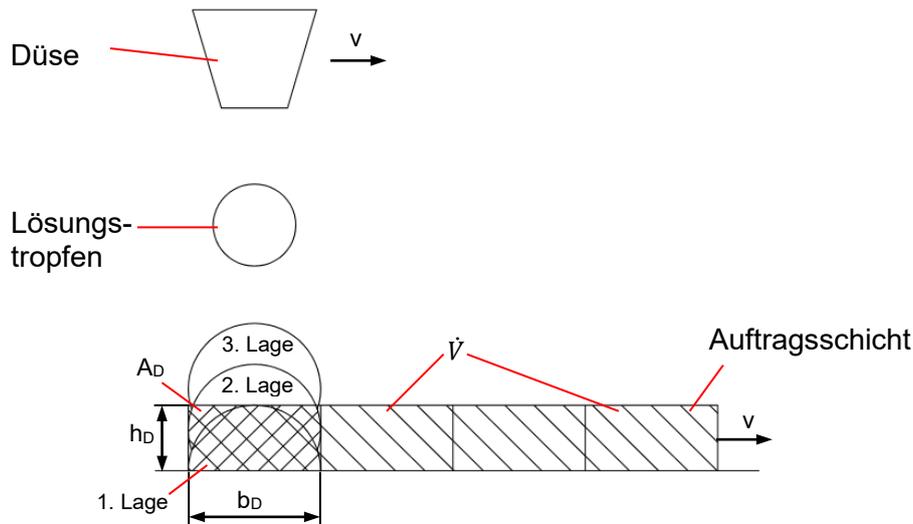


Abbildung 5: Skizze des Druckvorgangs, Quelle: Eigene Darstellung.

Um die Fläche einer Auftragsschicht zu erhalten, wird der Querschnitt als Rechteckfläche idealisiert. Der Querschnitt einer Lage berechnet sich nun durch

$$A_D = b_D \cdot h_D = 3 \cdot 1 = 3 \text{ mm}^2 \quad 4.2$$

Der Druckkopf soll auf einer Werkzeugmaschine montiert werden, welche eine maximale Vorschubgeschwindigkeiten von $v = 12 \text{ m/min}$ erreicht.

Aus dem Schichtquerschnitt A_D sowie der Vorschubgeschwindigkeit v , errechnet sich die Fördermenge der Pumpe durch die Formel:

$$\dot{V} = A_D \cdot v = 3 \cdot 12 \quad 4.3$$

$$\dot{V} = 36 \text{ ml/min}$$

Neben der Fördermenge ist zur Auswahl der geeigneten Pumpe zusätzlich noch die zu erwartende Pumpförderhöhe zu berechnen. Da der genaue Aufbau des Druckkopfes in diesem Stadium noch nicht bekannt ist, der Systemwiderstand aber sehr stark von der Leitungsführung sowie den Einbauten abhängt, wird als erste Näherung der von Achatz ermittelte Systemwiderstand, $k_{0,8} = 3,3 \cdot 10^{12} \text{ s}^2/\text{m}^5$ verwendet.¹⁰

Die Pumpförderhöhe errechnet sich nun zu:

$$H_P = k_{0,8} \cdot \dot{V}^2 = k_{0,8} \cdot A_D^2 \cdot v^2 \quad 4.4$$

$$H_P = 3,3 \cdot 10^{12} \cdot (3 \cdot 10^{-6})^2 \cdot \left(\frac{12}{60}\right)^2$$

$$H_P = 1,188 \text{ m}$$

Dimensionskontrolle:

$$\left[\frac{\text{s}^2}{\text{m}^5} \cdot \text{m}^4 \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] = [\text{m}]$$

¹⁰ Vgl. Achatz (2017), S. 49.

4.3.2. Pumpenbauarten

Die meisten im Grabow-Diagramm dargestellten Verdrängermaschinen weisen einen hohen Förderdruck bzw. eine zu hohe Fördermenge auf. Aufgrund der oben berechneten geringen Fördermenge sowie der kleinen erforderlichen Förderhöhe, stehen somit zwei Arten von Pumpen zur Auswahl.

4.3.2.1. Schlauchpumpe

Wie in Abbildung 6 dargestellt, besteht die Schlauchpumpe aus einem Gehäuse, welches die Aufgabe hat den Schlauch zu führen. Die rotierenden Gleitschuhe pressen den Schlauch gegen die Gehäusewand und fördern so durch mechanische Verformung das im Schlauch befindliche Medium.

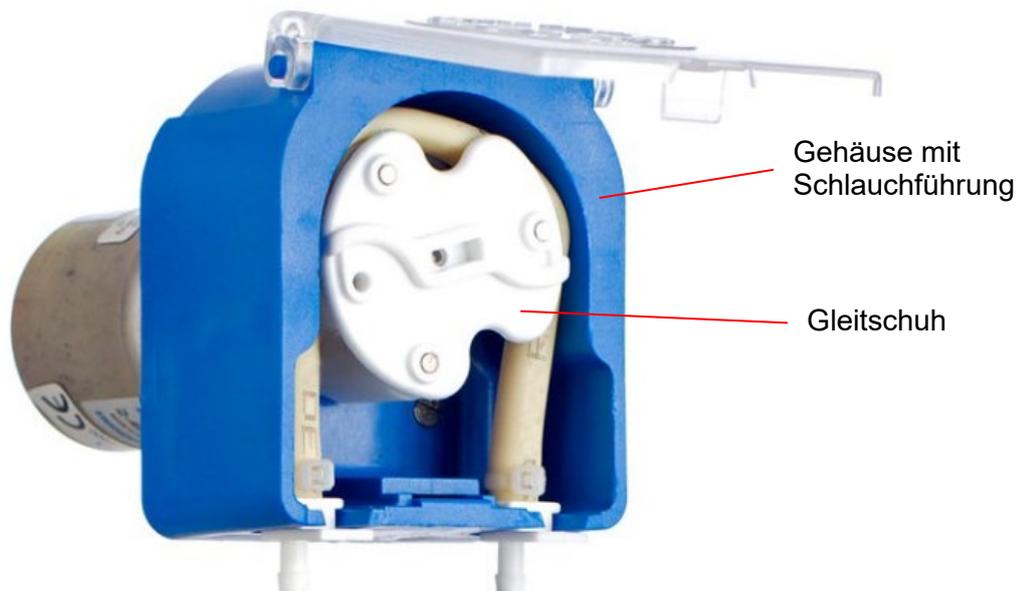


Abbildung 6: Schlauchpumpe, Quelle: pumpen-peters (2019).

Aufgrund ihres sehr einfachen Aufbaus und der geringen Anzahl an Bauteilen ist die Schlauchpumpe sehr wartungsfreundlich. Nachteilig anzumerken ist, dass eine Fehlstellung zwischen Gleitschuhen und Gehäuse einen erhöhten Abrieb des Förderschlauches bewirkt.

Wegen dem schonenden Transport des Fördermediums wird die Schlauchpumpe in Dialysegeräten sowie in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie eingesetzt. Mittelgroße Pumpen (ca. 300 l/h) finden in der Landtechnik zum Beizen von Saatgut ihre Anwendung. Die größten Ausführungen von Schlauchpumpen (ca. 1000 l/h) finden ihre Verwendung als Betonpumpen in der Bautechnik.¹¹

4.3.2.2. Membranpumpe

Wie auch die zuvor genannte Schlauchpumpe gehört die Membranpumpe (siehe Abbildung 7) zur Art der Verdrängermaschinen. Anstelle des Kolbens einer herkömmlichen Kolbenpumpe besitzt die Membranpumpe eine Membrane. Ein Elektromotor treibt einen Exzenter an, welcher über das Pleuel die Membrane in oszillierende Bewegung versetzt. Der Pumpenraum ist durch die Membrane vollständig dicht, wodurch es zu keiner Leckage des Fördermediums kommt.

¹¹ Vgl. Raschdorf (2008), Onlinequelle [05.09.2019].



SP 570 EC-LD

Abbildung 7: Membranpumpe, Quelle: Schwarzer Precision (2018).

Eingesetzt wird dieser Pumpentyp aufgrund seiner geringen Durchflussrate als Dosierpumpe sowie als Pumpe in medizinischen Geräten. Des Weiteren kommt die Membranpumpe als Prozesspumpe in Brennstoffzellen sowie in Kühlgeräten zur Anwendung.¹²

¹² Vgl. Schwarzer Precision (2018).

4.4. Temperaturmessung

Bei der Temperatur handelt es sich um eine physikalische nichtelektrische Größe. Zur Darstellung in elektrischen Messschaltungen ist es daher notwendig den Messwert Temperatur in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Die elektrische Messung der Temperatur kann laut Hoffmann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen.¹³

Berührungsthermometer stehen mit dem zu messenden Medium in Kontakt oder tauchen in das Medium ein. Sie nehmen dessen Temperatur an.

Strahlungsthermometer nehmen die vom Messobjekt abgegebene Wärmestrahlung auf. Da zur Übertragung von Wärmestrahlung kein Trägermedium erforderlich ist, erfolgt hier die Temperaturmessung berührungslos.

4.4.1. Thermoelement

Bei diesem Sensorelement werden zwei Materialien mit unterschiedlichen thermoelektrischen Eigenschaften an einer Stelle miteinander verschweißt, verlötet oder gequetscht. An dieser Verbindungsstelle (Abbildung 8) liegt die Messtemperatur T_2 an. Das freie Ende der Materialien, die sogenannte Anschlussstelle ist mit einer konstanten Vergleichstemperatur T_0 zu beaufschlagen. Die entstehende Thermospannung

$$U = k_{AB} \cdot (T_2 - T_0) \quad 4.5$$

errechnet sich aus der Temperaturdifferenz der Verbindungsstelle T_2 und der Anschlussstelle T_0 sowie einem von den eingesetzten Materialien abhängigen Proportionalitätsfaktor k_{AB} .¹⁴

Die entstehende Spannung liegt im Bereich von einigen mV. Das Signal muss daher zur Weiterverarbeitung über einen Messverstärker angehoben werden.¹⁵

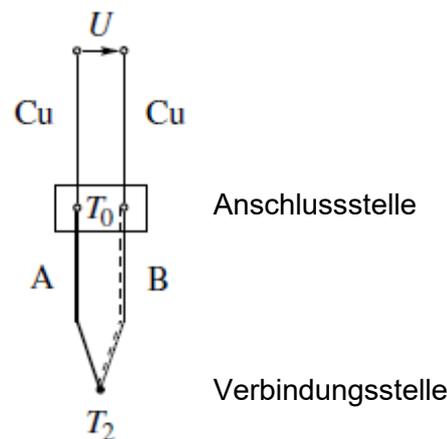


Abbildung 8: Anschluss eines Thermoelementes mit den Materialien A und B, Quelle: Hoffmann (2015), S. 135 (leicht modifiziert).

In Abbildung 9 werden einige Kennlinien bekannter Thermoelementpaarungen dargestellt. Speziell im unteren Temperaturbereich $<300^{\circ}\text{C}$ weisen Thermoelemente einen stark nichtlinearen Verlauf der Sensorkennlinie auf. Für genaue Temperaturmessungen ist es daher notwendig in diesem Bereich, neben dem linearen Proportionalitätsfaktor k_{AB} , noch Koeffizienten höherer Ordnung zu berücksichtigen.¹⁶

¹³ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 134.

¹⁴ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 134.

¹⁵ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 137.

¹⁶ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 136.

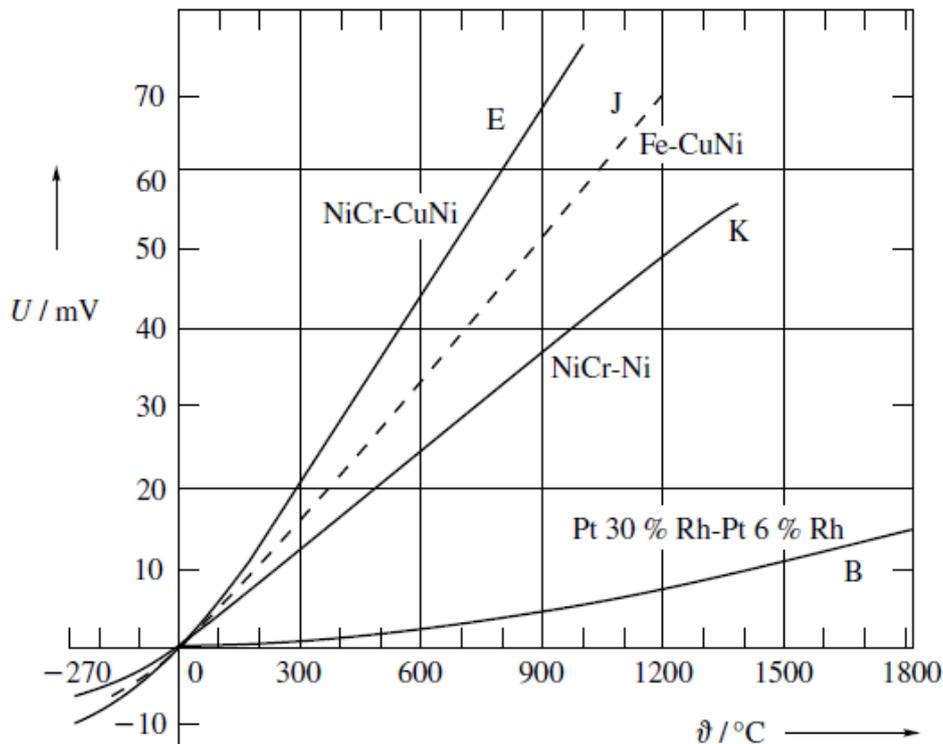


Abbildung 9: Kennlinien verschiedener Thermoelementpaarungen,
 Quelle: Hoffmann (2015), S. 135.

Je nach verwendetem Thermopaar unterscheidet die DIN IEC 584 Teil 2 drei unterschiedliche Genauigkeitsklassen von Thermoelementen. Wird ein NiCr-Ni-Sensor verwendet, so sind laut Norm folgende Grenzabweichungen des Thermoelements vorgeschrieben:¹⁷

Klasse	Grenzabweichung	Verwendungsbereich
1	$\pm(1,5^{\circ}\text{C oder } 0,004 \vartheta)$	-40°C bis 1000°C
2	$\pm(2,5^{\circ}\text{C oder } 0,0075 \vartheta)$	-40°C bis 1200°C
3	$\pm(2,5^{\circ}\text{C oder } 0,015 \vartheta)$	-200°C bis 40°C

Der jeweils höhere Wert der Grenzabweichung ist für das eingesetzte Thermoelement gültig. Bei einem NiCr-Ni-Thermoelement der Klasse 1 gilt im Temperaturbereich von -40°C bis 380°C eine Messunsicherheit von $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$.

Abbildung 10 zeigt verschiedene Ausführungen von sogenannten Mantelthermoelementen. Ist das Thermopaar offen (Version 1) so ist die Messstelle direkt mit dem zu messenden Medium in Kontakt und kann rasch dessen Temperatur annehmen. Die Ansprechzeit des Thermoelementes ist sehr gering. Ein Verschweißen des Thermopaars mit dem Sensormantel (Version 2) dient zum Schutz der Messstelle. Ist das Thermopaar vom Mantel isoliert (Version 3), so ist die Messstelle gegen Beschädigungen geschützt. Gleichzeitig steigt die Ansprechzeit des Sensors sehr stark an, da eine Temperaturänderung des Messmediums über den Mantel und die Isolierung an die Messstelle übertragen werden muss.¹⁸

¹⁷ Vgl. Schrüfer (2018), S. 148.

¹⁸ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 137.

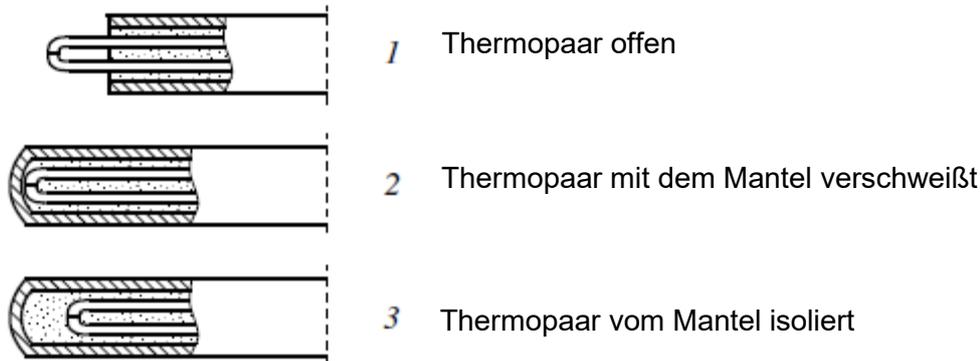


Abbildung 10: Mantelthermoelemente, Quelle: Hoffmann (2015), S. 137.

4.4.2. Metall-Widerstandsthermometer

Die Gleichung

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2] \quad 4.6$$

beschreibt den Widerstand $R(T)$ eines metallischen Leiters bei der zu messenden Temperatur T . R_0 bezeichnet den Wert des Widerstandes bei der Referenztemperatur (meist $T_0 = 0^\circ\text{C}$). α und β sind die Temperaturkoeffizienten des metallischen Leiters. Betrachtet man in Abbildung 11 die Kennlinie des Platinleiters (Pt-100) so kann diese mit guter Näherung als nahezu linear angesehen werden. Der quadratische Term der obigen Gleichung verschwindet. Wird die Referenztemperatur auf den Wert $T_0 = 0^\circ\text{C}$ gesetzt, so vereinfacht sich Gleichung 4.6 zu¹⁹

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot T] \quad 4.7$$

Wird nun der Widerstand R_T bei der Messtemperatur gemessen und Gleichung 4.7 umgeformt, so ergibt sich für die gesuchte Messtemperatur

$$T = \frac{R_T - R_0}{R_0 \cdot \alpha} \quad 4.8$$

Die Empfindlichkeit E eines metallischen Leiters errechnet sich aus der Division der Widerstandsänderung dR zur Temperaturänderung dT . Gleichung 4.7 nach der Temperatur abgeleitet, gibt

$$E = \frac{dR}{dT} = R_0 \cdot \alpha \quad 4.9$$

Der Temperaturkoeffizient α errechnet sich nun zu

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dT} \quad 4.10$$

und wird durch die Einheit K^{-1} angegeben. Die zur Auswertung von Metall-Widerstandsthermometern notwendigen Temperaturkoeffizienten α und β können der DIN 43 760 entnommen werden.

¹⁹ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 138.

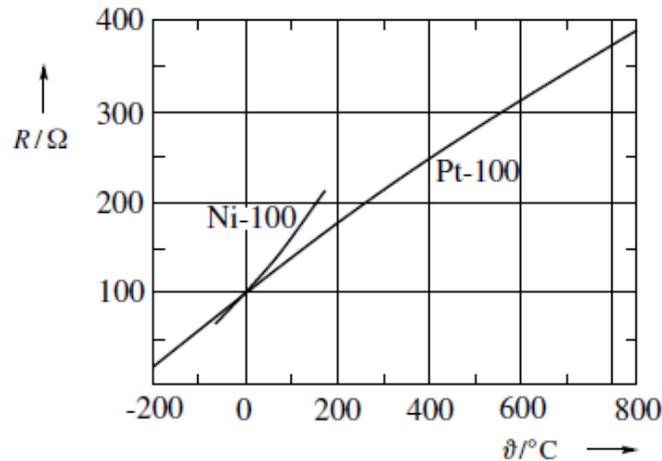


Abbildung 11: Kennlinien zweier Metall-Widerstandsthermometer, Quelle: Hoffmann (2015), S. 137.

Am häufigsten eingesetzt werden Widerstandsthermometer aus Nickel oder Platin. Der sehr bekannte Platin-Widerstandssensor Pt-100 ist bei der Bezugstemperatur auf einen Widerstand von $R_0 = 100 \Omega$ abgeglichen. Erhöht sich die Temperatur am Sensor von 0°C auf 100°C , so erhöht sich der Widerstand auf $R_T = 138,5 \Omega$.²⁰

Für die Messunsicherheit von Platinsensoren sind laut Hoffmann folgende zwei Genauigkeitsklassen definiert:²¹

$$\text{Klasse A: } \pm(0,15 + 0,002|\vartheta|) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Klasse B: } \pm(0,30 + 0,005|\vartheta|) \text{ } ^\circ\text{C}$$

Bei Drahtmesswiderständen (Abbildung 12) wird ein Platindraht (2) auf einen gläsernen oder keramischen Trägerkörper (1) aufgewickelt. Um Beschädigungen vorzubeugen wird der Sensor mit einer Kapsel (3) aus Edelstahl, Glas oder Keramik umhüllt.

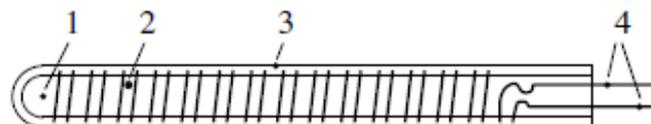


Abbildung 12: Drahtmesswiderstand, Quelle: Hoffmann (2015), S. 139.

Bei Schichtwiderständen (Abbildung 13) wird Platin oder Nickel auf eine isolierende Schicht (1) aufgestäubt oder aufgedampft. Mit Hilfe eines Lasers wird nun die charakteristische meanderförmige Struktur, in den Sensor eingebrannt. Zum Abgleich des Sensorelements auf die gewünschten 100Ω , kommt ein weiterer Laserstrahl zum Einsatz. Eine zusätzlich aufgebrachte Schutzschicht macht den Sensor resistent gegen äußere Einflüsse.²²

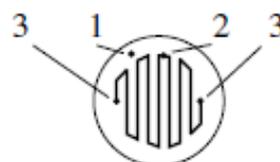


Abbildung 13: Schichtwiderstand, Quelle: Hoffmann (2015), S. 139.

²⁰ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 138.

²¹ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 138.

²² Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 139.

4.4.3. Heißleiter (NTC-Thermistoren)

Der Sensor wird aus Oxiden von Schwermetallen oder seltenen Erden hergestellt. Diese Materialien besitzen die Eigenschaft bei steigender Temperatur elektrische Ladungsträger frei zu geben. Die Eigenleitfähigkeit des Sensors steigt. Der Widerstand R_T nimmt mit steigender Temperatur ab und kann näherungsweise durch folgende Formel beschrieben werden.²³

$$R(T) = R_0 \cdot e^{f\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad 4.11$$

R_0 bezeichnet den Widerstand des Sensorelementes bei der Referenztemperatur T_0 .

f bezeichnet die Materialkonstante (in K) des eingesetzten Materials.

Wird die Gleichung 4.11 aufgelöst, so ergibt sich:

$$R(T) = R_0 \cdot e^{f\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} = R_0 \cdot e^{\frac{f}{T} - \frac{f}{T_0}} = R_0 \cdot e^{\frac{f}{T}} \cdot e^{-\frac{f}{T_0}} \quad 4.12$$

Durch einführen der neuen Konstanten K_0

$$K_0 = R_0 \cdot e^{-\frac{f}{T_0}} \quad 4.13$$

vereinfacht sich die Formel des Widerstandes $R(T)$ bei der Messtemperatur zu

$$R(T) = K_0 \cdot e^{\frac{f}{T}} \quad 4.14$$

Die Empfindlichkeit des Sensors lautet

$$E = \frac{dR}{dT} = -\frac{f}{T^2} \cdot R \quad 4.15$$

Der Temperaturkoeffizient α des Thermistors ergibt nun,

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{f}{T^2} \quad 4.16$$

Der Temperaturkoeffizient α des hier beschriebenen Heißleiters ist im Vergleich zum Temperaturkoeffizienten des Platinsensors sehr stark nichtlinear. Zusätzlich ist in Abbildung 14 der sehr viel höhere Widerstandswert des Thermistors (1) im Vergleich zu einem Pt-1000 Widerstandsthermometer (2) erkennbar.

²³ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 140.

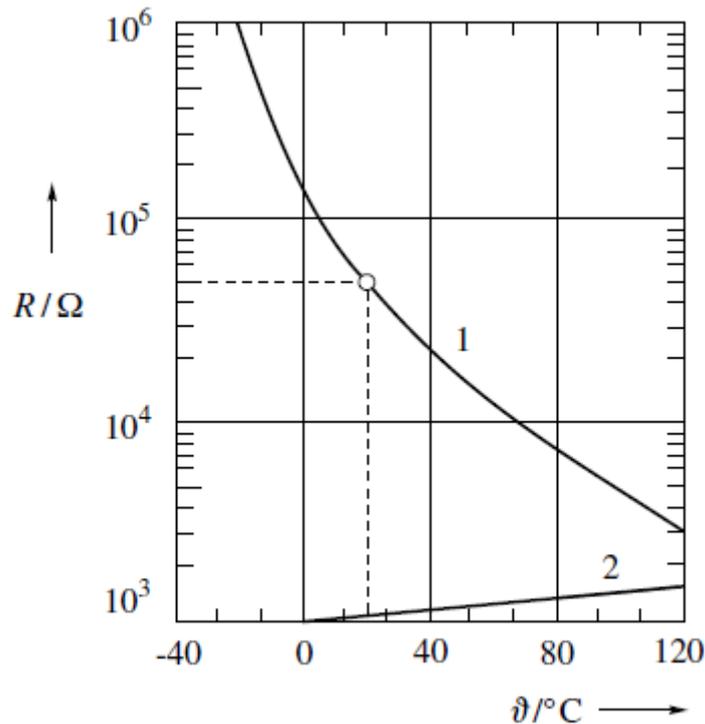


Abbildung 14: Widerstandskennlinie eines Thermistors (1) und eines Widerstandsthermometers Pt-1000 (2), Quelle: Hoffmann (2015), S. 141.

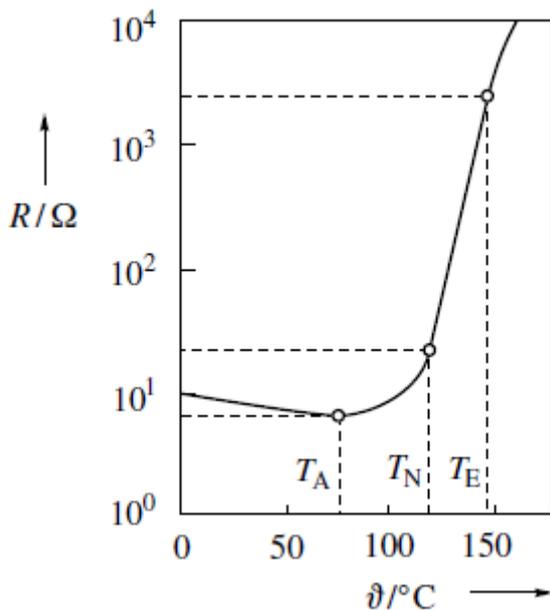
NTCs können in Kugel-, Scheiben- oder Zylinderform hergestellt werden. Der Widerstandswert des Sensorelementes entspricht in der Regel einem Vielfachen des Widerstandes der Messleitung. Ein Abgleich der Messleitung ist somit nicht notwendig. Heißleiter weisen aufgrund ihres Herstellungsverfahrens größere Messunsicherheiten als Widerstandsthermometer auf. Speziell kugelförmig ausgeführte Sensorelemente haben eine nahezu punktförmige Messstelle und erreichen aufgrund ihrer geringen Sensorgröße eine sehr rasche Ansprechzeit.²⁴

4.4.4. Kaltleiter (PTC-Resistoren)

Eingesetzt werden halbleitende ferroelektrische Materialien wie etwa Bariumtitanat. Die Kennlinie des PTC-Widerstandes (Abbildung 15) zeigt in geringen Temperaturbereichen eine Abnahme des Widerstandes bei steigender Temperatur. Dieser Verlauf ist eigentlich bei NTC-Widerständen zu erwarten. Je nach eingesetztem Material kommt es bei der sogenannten Curietemperatur zur Auflösung der einheitlichen Kristallausrichtung. Ab hier steigt der Widerstandswert des Sensors mit steigender Temperatur exponentiell an.²⁵

²⁴ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 141.

²⁵ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 142.



T_A Temperatur bei dem der Temperaturkoeffizient positiv wird

T_N Nenntemperatur, Beginn des steilen Widerstandsanstieges

T_E Endtemperatur, Ende des steilen Widerstandsanstieges

Abbildung 15: Widerstandskennlinie eines PTC-Widerstandes, Quelle: Hoffmann (2015), S. 142.

Der Widerstand des Kaltleiters errechnet sich im Bereich seines rasanten Anstieges mit

$$R(T) = R_0 \cdot e^{f(T-T_0)} \quad 4.17$$

Die Empfindlichkeit des Sensors errechnet sich nun zu

$$E = \frac{dR}{dT} = f \cdot R \quad 4.18$$

Der Temperaturkoeffizient α ergibt

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = f \quad 4.19$$

und ist von der Temperatur unabhängig.

Kaltleiter besitzen im Vergleich zu NTCs einen nahezu um den Faktor 5 größeren Temperaturkoeffizienten. Ähnlich wie Heißeleiter werden sie in Kugel-, Scheiben- oder Zylinderform hergestellt. Die Empfindlichkeit von PTCs ist im Vergleich zu NTCs größer. Aufgrund der Streuung der Materialkonstanten bei der Herstellung des Sensors wird dieser eher für untergeordnete Aufgaben wie der Temperaturüberwachung und weniger zur Temperaturmessung eingesetzt.²⁶

4.4.5. Pyrometer

Mit ihnen ist es möglich die Temperatur eines Objektes berührungslos zu messen. Sie arbeiten nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz.

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad 4.20$$

σ bezeichnet hierbei die Stephan-Boltzmann Konstante mit $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

²⁶ Vgl. Hoffmann (Hrsg.) (2015), S. 142.

Durch Messung der temperaturabhängigen optischen Strahlungsleistung P eines Messobjekts mit dem Emissionsgrad ϵ kann auf die Temperatur des Objektes geschlossen werden.

Gesamtstrahlungs-pyrometer verwenden thermische Strahlungsempfänger (Bolometer), welche den gesamten Strahlungsbereich der abgestrahlten Wärmestrahlung erfassen können. Es ist ihnen möglich einen Temperaturbereich von -50°C bis $>2000^{\circ}\text{C}$ zu messen.

Teilstrahlungs-pyrometer (Abbildung 16) erfassen nur einen vorgegebenen Spektralbereich $\Delta\lambda$ der abgegebenen Strahlung des Messobjekts. Die abgestrahlte Wärmeleistung P_M des zu messenden Körpers wird im Chopper (3) mit der Wärmeleistung eines Vergleichsstrahlers P_V verglichen. Über das Abgleichsystem (8) wird die Strahlungsleistung des Vergleichsstrahlers P_V so lange geändert, bis P_V und P_M den gleichen Wert ergeben. Die Intensität des so erhaltenen Vergleichsspannungssignals ist nun ein Maß für die abgestrahlte Temperatur T_M (P , ϵ) des Messobjekts. Ist der Emissionsgrad ϵ des zu messenden Objektes bekannt und wurde das Pyrometer zuvor noch mit einem schwarzen Strahler (Emissionsgrad $\epsilon = 1$) kalibriert, so kann über T_M (P , ϵ) auf die tatsächliche Temperatur des Messobjekts geschlossen werden.²⁷

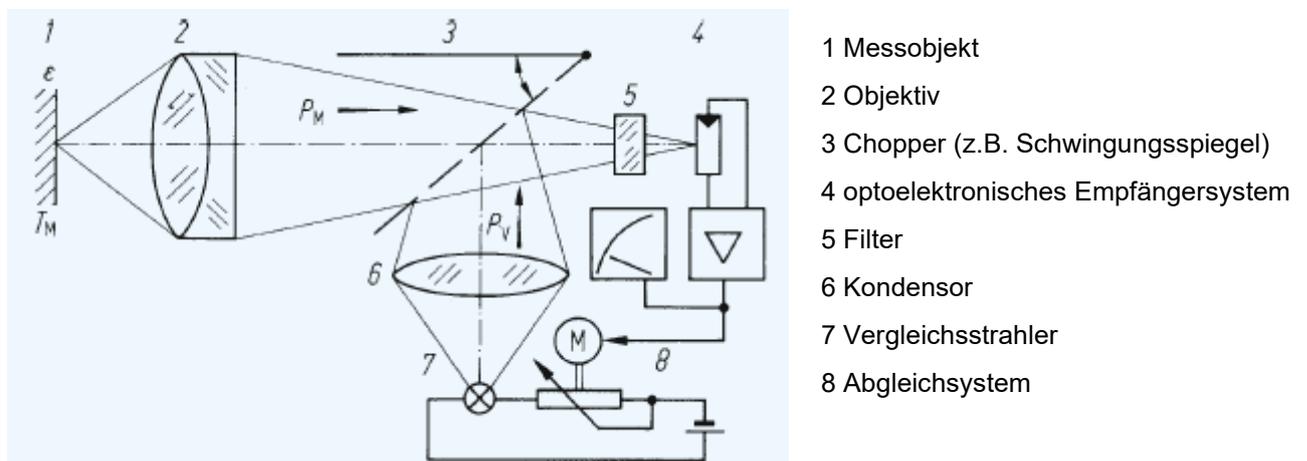


Abbildung 16: Teilstrahlungs-pyrometer, Quelle: Grote/Bender/Göhlich (2018), S. W 23.

²⁷ Grote/Bender/Göhlich (2018), S. W 23 f.

4.5. Wärmeübertrager

4.5.1. Peltierelement

Namensgeber des Elements ist der sogenannte Peltiereffekt. Werden zwei unterschiedliche Materialien (meist Halbleiter) über einen Stromkreis miteinander verbunden, so entsteht zwischen den beiden Materialien eine Temperaturdifferenz.

Das Peltierelement besteht aus einer Reihenschaltung von p- und n-dotierten (meist quaderförmigen) Halbleitern. Diese sind an der Ober- und Unterseite über Metallbrücken miteinander verbunden. Legt man eine Stromquelle an, so nimmt der n-Leiter Elektronen auf um sein Energieniveau zu steigern. Der p-Leiter gibt Elektronen ab, wodurch sein Energieniveau sinkt. Die Verbindung über die Metallbrücken bewirkt, dass sich die Unterseite des Peltierelements abkühlt, während die Oberseite des Elementes aufgeheizt wird. Wird die entstehende Wärme an der Oberseite (Warmseite) des Peltierelements abgeführt, so wird die Unterseite (Kaltseite) des Elementes noch weiter abgekühlt.²⁸

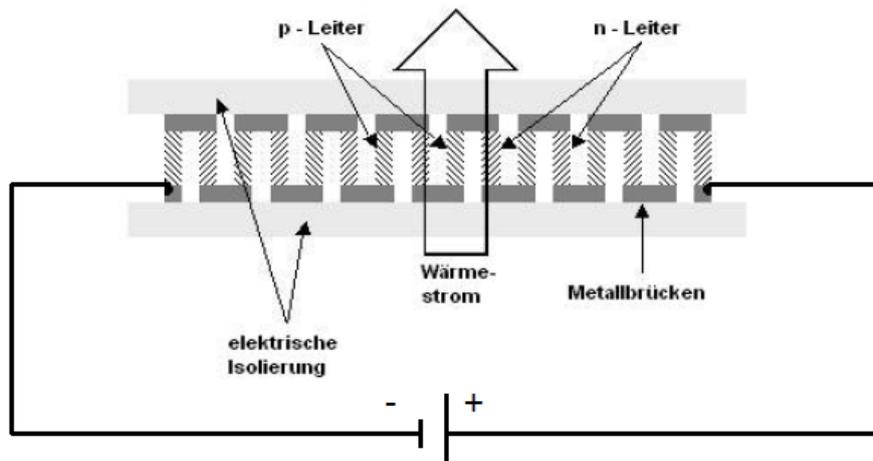


Abbildung 17: Aufbau eines Peltierelements, Quelle: deAcademic (2019) (leicht modifiziert).

Aufgrund des schlechten Wirkungsgrades des Peltierelements ist es notwendig dem Element eine sehr hohe elektrische Leistung zuzuführen, um die gewünschte Kühlleistung zu erreichen. Bei einer vorgegebenen Gleichspannung von 24 Volt muss die zugeführte Stromstärke einen sehr hohen Wert einnehmen.

Das Peltierelement benötigt zur Wärmeübertragung keine beweglichen Teile und zeichnet sich durch seine geringe Baugröße aus. Wird die Stromrichtung umgedreht, so erwärmt sich die Kaltseite des Elementes und die Warmseite kühlt ab. Kommt es auf der Kaltseite zu einer Kristallisation der Salzlösung, so kann durch das Aufheizen dieser die Lösung wieder verflüssigt werden.

²⁸ Vgl. Rüegg (1999).

4.5.2. Peltierkühlgerät

Die Firma Laid Technologies verbindet Peltierelemente an deren Kontaktstellen mit Wärmetauschern um sie zum Kühlen von Flüssigkeiten zu benutzen. Je nach Bauart unterscheidet man zwei Arten von Kühlgeräten:

4.5.2.1. Flüssigkeit-Luft-Kühlgerät

Der an der Kaltseite befindliche Wärmetauscher wird vom Arbeitsfluid durchströmt. Mit dem an der Warmseite des Kühlgerätes angebrachten Lüfter wird dem Element die Wärme entzogen.



Abbildung 18: Bauarten von Flüssigkeits-Luft-Kühlgeräten, Quelle: TelemeterElectronic (2019).

Die geringe erzielbare Kühlleistung sowie der (aufgrund des Lüfters) großen Abmessung des Flüssigkeit-Luft-Kühlgerätes, ist dieses für den Auftragprozess nicht geeignet.

4.5.2.2. Flüssigkeit-Flüssigkeit-Kühlgerät

Auf beiden Seiten der Peltierelemente befinden sich Wärmetauscher welche von Flüssigkeiten durchströmt werden. Die Kaltseite wird vom Arbeitsfluid durchströmt. Durch den Wärmetauscher der Warmseite fließt Kühlmittel und kühlt das Peltierelement ab.



Abbildung 19: Bauarten von Flüssigkeit-Flüssigkeit-Kühlgeräten, Quelle: Knap (2016).

Die geringe Masse in Verbindung mit kompakter Bauweise, im Vergleich zum Flüssigkeit-Luft-Kühlgerät, macht dessen Einsatz sinnvoll.

4.6. Düse

4.6.1. Kanülen

Achatz verwendet zur Herstellung ihrer Druckobjekte sogenannte Standardkanülen (Abbildung 20), wie sie in der Medizin zur Verabreichung von Infusionen verwendet werden. Das Kanülenrohr besteht aus nichtrostendem Chrom-Nickelstahl und besitzt eine geringe Oberflächenrauigkeit. Die feine Silikonbeschichtung der Nadel bewirkt, dass das durchströmende Fluid ungehindert durch die Kanüle geführt wird. Der im Lang-/Kurzschliff (Abbildung 21) ausgeführte 3-fach Facettenschliff dient dazu, die Kanüle schmerzarm in den Körper des Patienten einführen zu können.²⁹

Im Auftragsprozess zeigte sich, dass bei geringer Fördermenge der Pumpe, durch diesen besonderen Schliff, exakt abgetrennte Tropfen gleicher Größe produziert wurden. Diese konnten in konstanter Tropfenfolge auf die Bauplattform aufgebracht werden.

Sterican® Einmalkanülen nach EN ISO 7864 und DIN 13097	ø x Länge [mm]
	0,90 x 40
	0,80 x 40
	0,70 x 30
	0,60 x 30
	0,60 x 25
	0,55 x 25
	0,45 x 25
	0,40 x 20

Abbildung 20: Kanülenarten,
Quelle: Gebrauchs.info (2012).

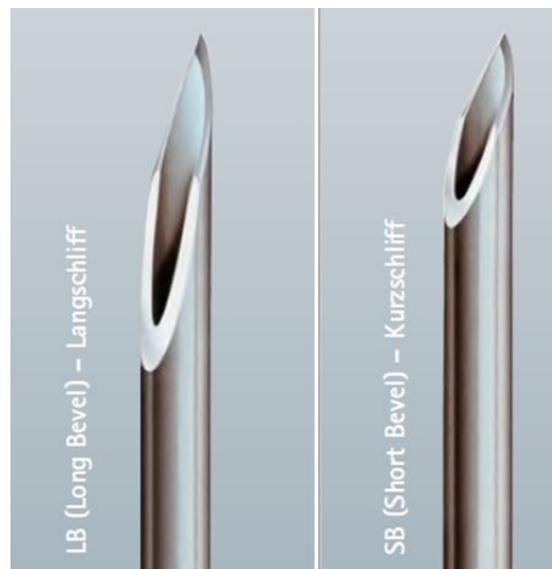


Abbildung 21: Schliffarten von Kanülen,
Quelle: Gebrauchs.info (2012).

4.6.2. Extruderdüse

Diese Art von Düse wird vorwiegend im 3D-Druck mit Kunststofffilamenten eingesetzt. Die Düse besteht aus Messing und ist daher in der Lage ohne negativen Einfluss auf über 80°C aufgeheizt zu werden. Neben der sehr kleinen Bauform besitzt das Bauteil einen Schaft mit M6-Gewinde. Dieser macht es möglich die Düse einfach und rasch zu montieren und im Schadensfall zu wechseln. Ein weiterer Vorteil liegt in der einheitlichen Düsenform bei unterschiedlichen Düsenaustrittsdurchmessern (Abbildung 22). Somit kann bei Bedarf durch Tausch der Extruderdüse die Dicke der applizierten Lösung und damit die Wandstärke des aufgetragenen Objektes geändert werden.³⁰

²⁹ Vgl. Gebrauchs.info (2012), S. 14 f.

³⁰ Vgl. aliexpress.com (2019).



Abbildung 22: Extruderdüsen,
Quelle: aliexpress (2019), Onlinequelle [05.09.2019].

4.6.3. Dispenser

Das Einsatzgebiet des Dispensers liegt in der genauen Dosierung von Flüssigkeiten. Die mit dem Arbeitsmedium in Kontakt stehenden Teile besitzen eine Antihaftbeschichtung um ein Verkleben des Mediums an den Teilen zu verhindern. Die spezielle Rotor-Stator-Geometrie (Abbildung 23) erlaubt eine konstante (pulsationsfreie) und schonende Förderung des Arbeitsmediums. Je nach Rotordrehzahl sind Dosiermengen von einigen Mikrolitern bis nahezu einem Liter möglich. Das Fluid kann somit in Punkt- (Abbildung 24) oder Raupenform (Abbildung 25) auf die Bauplattform aufgetragen werden. Durch kurzzeitige Drehrichtungs-umkehr des Rotors zum Ende des Materialauftrages wird das Arbeitsmedium in den Dispenser zurück gefördert. Dies verhindert ein ungewolltes Nachtropfen des Mediums.³¹

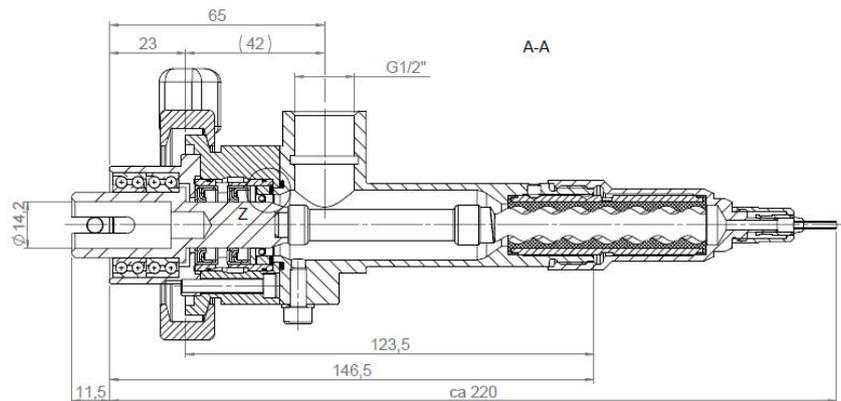


Abbildung 23: Schnittbild eines Dispensers, Quelle: ViscoTec (2015).

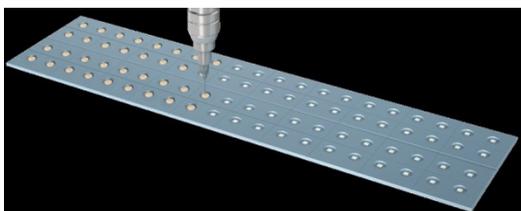


Abbildung 24: Punktueller Fluidauftrag,
Quelle: ViscoTec (2019).



Abbildung 25: Raupenförmiger Fluidauftrag,
Quelle: ViscoTec (2019).

³¹ Vgl. ViscoTec (2015).

5. Geeignete Komponenten

5.1. Vorlagebehälter

Die Salzlösung wird vorab in der gewünschten Konzentration von 43 gew% Wasser hergestellt und im flüssigen Zustand der Druckereinheit zugeführt. Als Vorlagebehälter dient eine Weithalsglasflasche Duran® GLS 80® der Firma Duran. Diese zeichnet sich mit ihrer im Durchmesser von 80 mm großen Einfüllöffnung und ihrer Temperaturbeständigkeit von bis zu 500°C aus.³²

Die Laborhalsflasche befindet sich zum Erhalt der geforderten Prozesstemperatur von 80°C auf einer Magnetheizplatte RCT basic der Firma IKA (siehe Abbildung 28). Mit einer Heizleistung von 600 W ist das Gerät in der Lage die Salzlösung auf bis zu 310°C zu erwärmen. Zusätzlich zur Heizfunktion verfügt die Magnetheizplatte noch über eine Magnetrührfunktion mittels Rührstäbchen. Ein Magnetrührstäbchen mit einer Länge von 20 mm bis 80 mm (Abbildung 27) wird in die Salzlösung gegeben. Über eine Magnetspule in der Heizplatte wird das Rührstäbchen in eine Rotation um seine kurze Achse versetzt und bringt damit das Fluid in eine vertikale Drehbewegung. Damit ist eine ideale Durchmischung der Salzlösung sowie eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Fluid gewährleistet.³³

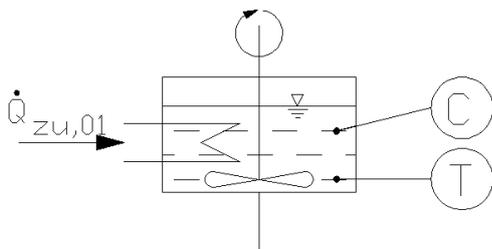
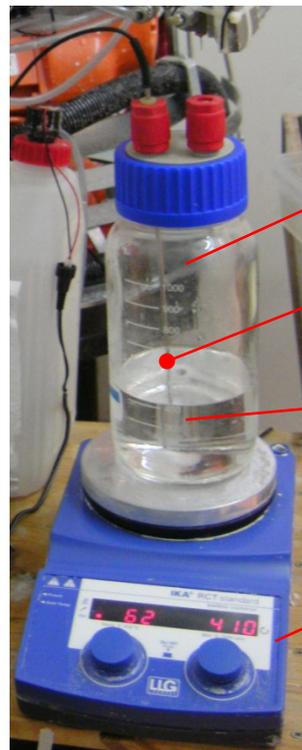


Abbildung 26: Vorlagebehältereinheit schematisch, Quelle: Eigene Darstellung.



Abbildung 27: Magnetrührstäbchen, Quelle: bartelt (2019).



Weithalsglasflasche

Temperatursensor PT 1000

Natriumacetat-Trihydrat-Lösung

Magnetheizplatte

Abbildung 28: Vorlagebehältereinheit, Quelle: Eigene Darstellung.

³² Vgl. Duran (Hrsg.) (2013), S. 4 ff.

³³ Vgl. IKA (Hrsg.) (2017), S. 3.

5.2. Transportleitung

Um die Größe der Vorlagebehältereinheit einzuschränken wurde eine maximale Füllmenge von einem Liter Salzlösung für den Auftragsprozess festgelegt. Aufgrund dieser geringen Fluidmenge sowie der daraus zu erwartenden geringen Auftragsrate, können die Transportleitungen ebenfalls klein dimensioniert werden. Als Zuführung der Salzlösung zur Pumpe und in weiterer Folge zum Kühlgerät hat sich der abriebfeste Polyurethanschlauch NORFLEX® PUR 401 FOOD (Abbildung 29) als besonders geeignet herausgestellt. Der hochflexible, chemikalienbeständige Kunststoffschlauch besitzt einen Innendurchmesser von 4 mm bei einer Wandstärke von 1 mm. Der Schlauch ist bis 13 bar druckbeständig und in der Lage Flüssigkeiten wie auch Gase, in einem Temperaturbereich zwischen -40°C bis 90°C zu leiten. Eine kurzzeitige Überhitzung der Leitung auf 125°C ist ohne Beschädigung möglich. Dies erweist sich als sehr vorteilhaft beim Beseitigen von auskristallisierter Salzlösung in der Leitung.³⁴



Abbildung 29: Transportleitung NORFLEX®, Quelle: NORRES (2019).

5.3. Fördermechanismus

Als Fördermechanismus wurde eine Exzenter-Membranpumpe (Abbildung 30) der Firma Schwarzer Precision ausgewählt. Sie zeichnet sich durch ihre geringe Masse von 90 g sowie ihren kleinen Abmessungen von (L x B x H) 49,4 x 23 x 42 mm aus. Die Pumpe ist in der Lage das Fluid bis zu einer maximalen Ansaughöhe von 4 Metern selbstständig anzusaugen. Ihr Betrieb ist selbstschmierend und wartungsfrei. Die maximale Förderhöhe dieser Pumpe liegt bei 30 Metern bei einer regelbaren Fördermenge zwischen 10 und 50 ml/min (siehe Abbildung 31 (Kennlinie 1) auf Seite 25).³⁵

Der Pumpenkopf besteht aus dem teilkristallinen Kunststoff Polyphenylsulfid (PPS). Dieses Material besitzt eine sehr gute Warmformbeständigkeit und ist, mit Ausnahme von Salzsäure und Salpetersäure, chemikalienbeständig. Außerdem weist der Kunststoff eine gute mechanische Festigkeit auf.³⁶

Die Membrane sowie die Ventile der Pumpe bestehen aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (kurz: EPDM). Dies ist einer der am häufigsten in der Pharma- und Lebensmittelindustrie verwendeten Elastomere. Seine Dauerbelastungstemperatur liegt zwischen -30°C bis maximal 120°C. Wegen seiner hohen Flexibilität, seiner guten Alterungsbeständigkeit und seiner

³⁴ Vgl. NORRES (Hrsg.) (2019), S. 1.

³⁵ Vgl. Schwarzer Precision (2018).

³⁶ Vgl. Baur (Hrsg.) (2013), S. 589.

überdurchschnittlichen Beständigkeit gegen Chemikalien ist er für diese Aufgabe sehr gut geeignet.³⁷



Abbildung 30: Exzenter-Membranpumpe SP 570 EC-LD, Quelle: Schwarzer Precision (2018).

Um kleinere als die oben genannten Volumenströme von 10 ml/min fördern zu können, wurde eine weitere Membranpumpe gleicher Baureihe, jedoch mit geringerem Fördervolumen angeschafft. Der Förderstrom dieser zweiten Membranpumpe (siehe Abbildung 31 (Kennlinie 2)) liegt zwischen 1,5 - 15 ml/min. Die maximale Ansaughöhe ist dabei auf 2 Meter begrenzt.³⁸

Aufgrund der identen Abmessungen der beiden Pumpen können diese sehr rasch und ohne zusätzlichem Material- und Werkzeugaufwand am Druckkopf ausgetauscht werden.

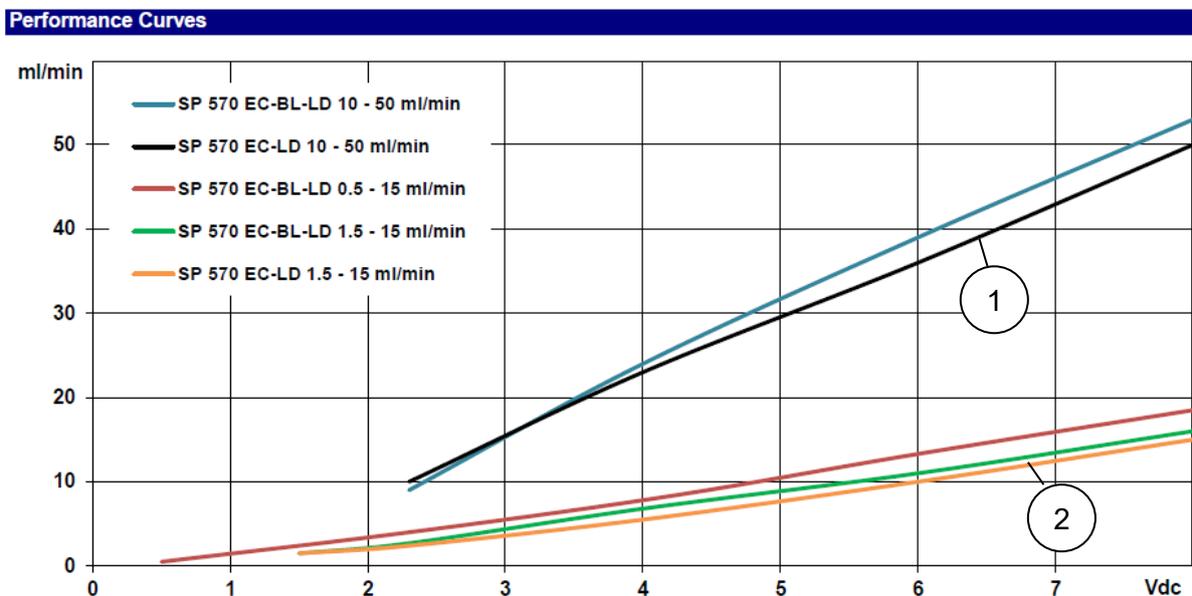


Abbildung 31: Fördermengen einzelner Membranpumpen, Quelle: Schwarzer Precision (2018).

³⁷ Vgl. maschinenbau-wissen.de (2019).

³⁸ Vgl. Schwarzer Precision (2018).

5.4. Temperaturmessung

5.4.1. Temperatursensor PT 1000

Zur Temperaturüberwachung im Vorlagebehälter wurde der Widerstandstempersensor PT 1000.60 gewählt. Der Temperaturmessfühler ist als Zubehörteil zur Magnetheizplatte erhältlich und gibt das Temperatursignal über eine DIN Buchse 12787 (Abbildung 32) an die Heizplatte weiter. Das Messsignal wird in der Magnetheizplatte verarbeitet und mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ am LED-Display angezeigt. Der Temperaturmessfühler besitzt bei einem Durchmesser von 3 mm eine Länge von 230 mm. Er ist daher in der Lage sehr tief in die Salzlösung des Vorlagebehälters einzutauchen. Ein Mantel aus Edelstahl schützt das Sensorelement vor dem Messmedium sowie vor mechanischen Beschädigungen.³⁹



Abbildung 32: Temperaturmessfühler PT 1000.60, Quelle: IKA (2019).

5.4.2. NTC (10 k Ω)

Die Salzlösung soll für ein einwandfreies Modellergebnis mit einer Temperatur von 40°C aus der Düse des Druckkopfes austreten.⁴⁰ Ein dafür unmittelbar an der Düse positionierter NTC-Tempersensor (Abbildung 33) misst und überträgt den Temperaturwert der Salzlösung an den Peltiercontroller. Dieser verarbeitet das Signal und regelt (je nach Temperaturwert) den Kühl- bzw. Heizbetrieb.

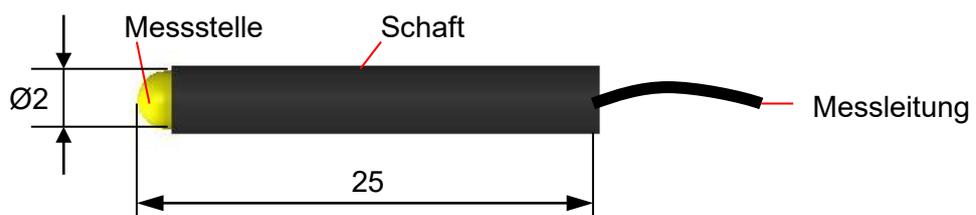


Abbildung 33: NTC-Thermistor (10 k Ω), Quelle: Eigene Darstellung.

³⁹ Vgl. IKA (Hrsg.) (2019), S. 1 f.

⁴⁰ Vgl. Achatz (2017), S. 68.

5.5. Wärmeübertrager

Um die 80°C heiße Salzlösung aus dem Vorlagebehälter auf die geforderten 40°C am Düsenaustritt abzukühlen, wurde ein von der Firma Laird Thermal Systems entwickeltes Direkt-Flüssigkeits-Kühlgerät (Abbildung 34) ausgewählt. Das Kühlgerät besitzt zwischen seinen Wärmetauscherflächen drei Peltierelemente, welche in der Lage sind, eine Gesamtkühlleistung von 208 Watt zu gewährleisten. Die Wärmetauscher bestehen aus anodisiertem Aluminium. Die "Kaltseite" der beiden Wärmetauscher wird von der Salzlösung durchströmt. Die "Warmseite" der Wärmetauscher wird über einen Kühlkreislauf mit 20°C kaltem Kühlwasser durchflossen. Diese geringe Temperatur des Kühlwassers macht es möglich nahezu die gesamte Kühlleistung des Kühlgerätes auszuschöpfen.

Aufgrund seines Aufbaus ist es möglich den Wärmeübertrager lageunabhängig zu montieren, wodurch sich sehr große Freiheiten in der Positionierung des Kühlgerätes am Druckkopf ergeben. Das Peltierkühlgerät zeichnet sich durch seine Zuverlässigkeit und seinen wartungsfreien Betrieb aus. Der größte Vorteil dieses Wärmeübertragers liegt im raschen Wechsel von Kühl- auf Heizbetrieb. Bei einer Auskristallisation der Lösung im Kühlgerät, kann durch Umpolung der Stromversorgung des Peltierkühlers, die "Kaltseite" (bei gleichzeitiger Abkühlung der "Warmseite") aufgeheizt werden, um das erstarrte Medium zu verflüssigen und das Kühlgerät von Kristallisationskeimen zu befreien.⁴¹



Abbildung 34: Direkt-Flüssigkeits-Kühlgerät LL-210, Quelle: Laird Thermal Systems (2019).

5.6. Temperaturregler

Zur Steuerung des oben genannten Peltierkühlers wurde ein Peltiercontroller (Abbildung 35) der Firma Quick-Ohm verwendet. Der Controller ist in einem Temperaturbereich von -40°C bis 100°C in der Lage das Kühlgerät automatisch anzusteuern und je nach Anforderung aufzuheizen bzw. zu kühlen. Die Arbeitstemperatur kann einerseits über ein externes Potentiometer (10 kΩ) oder andererseits über einen im Regler programmierbaren Fixwert eingestellt werden.⁴²

⁴¹ Vgl. Knap (2016).

⁴² Vgl. Quick-Ohm (2016), S. 1 ff.

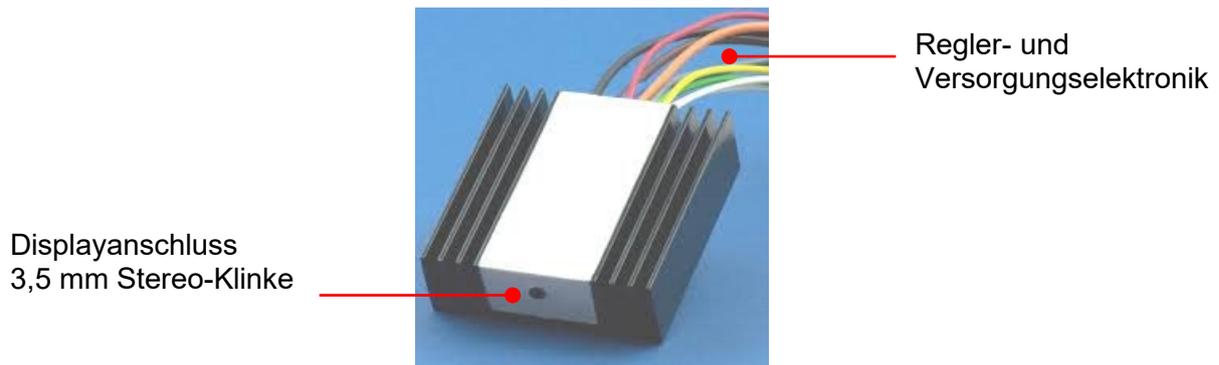


Abbildung 35: Peltiercontroller QC-PC-CO-CH1, Quelle: Quick-Ohm (2016).

Zur Programmierung des Reglers sowie zur Anzeige der Reglerdaten wurde ein Display (Abbildung 36) verwendet. Dieses wird über eine 3,5 mm Stereo-Klinke an den Regler angeschlossen und kann so unabhängig von der Lage des Reglers am künftigen Druckkopf positioniert werden.

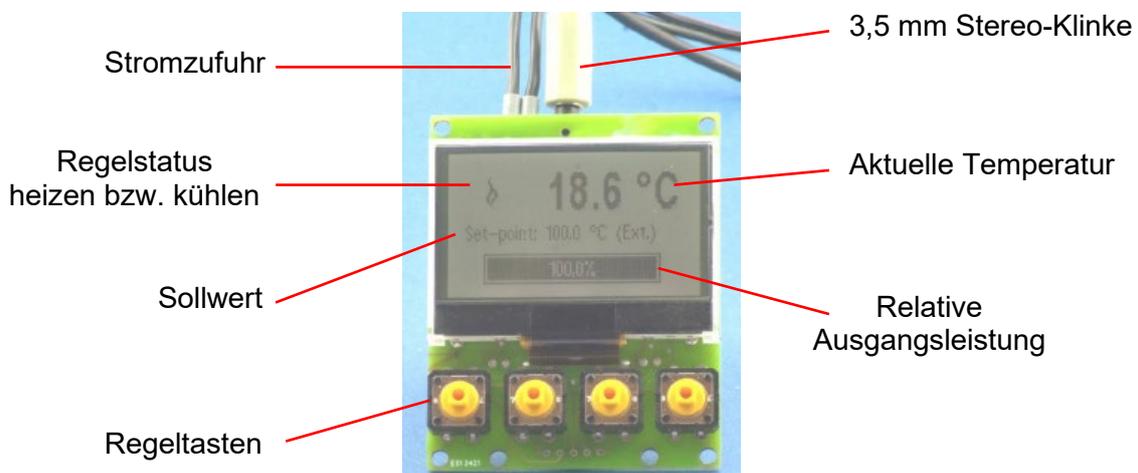


Abbildung 36: Display QC-PC-D-CH1, Quelle: Quick-Ohm (2016).

5.7. Austrittsdüse

Zum positionsgenauen Auftrag der Salzlösung auf die Bauplattform wurde eine Extruderdüse eingesetzt. Ihr Gewinde sowie der sehr einfache Aufbau der Düse ermöglicht bei einer ungewollten Auskristallisation der Salzlösung eine rasche und einfache Demontage sowie Wartung der Düse. Im Vergleich zur Baugröße eines Dispensers ist die Extruderdüse sehr klein. Der Druckkopf kann somit klein und kompakt gebaut werden.



Abbildung 37: Extruderdüsen, Quelle: aliexpress (2019), Onlinequelle [05.09.2019].

6. Vernetzung und Konstruktion

Die einzelnen zum Auftragen der Lösung notwendigen Komponenten wurden im vorhergehenden Kapitel ausgewählt. Im Folgenden werden nun zwei Konzepte vorgestellt, wie die zuvor ausgewählten Komponenten zu einem Druckkopf kombiniert werden können. Das Druckwerkzeug soll auf einer 5-Achsfräsmaschine der Marke Cosmec Conquest 8200 (Abbildung 38) montiert werden.



Abbildung 38: 5-Fräsmaschine, Quelle: Höchsmann (2019)

Am Fräskopfhalter befinden sich bereits Bohrungen mit metrischen Gewinden, welche zur Aufnahme der Druckkopfeinheit dienen sollen (Abbildung 40).

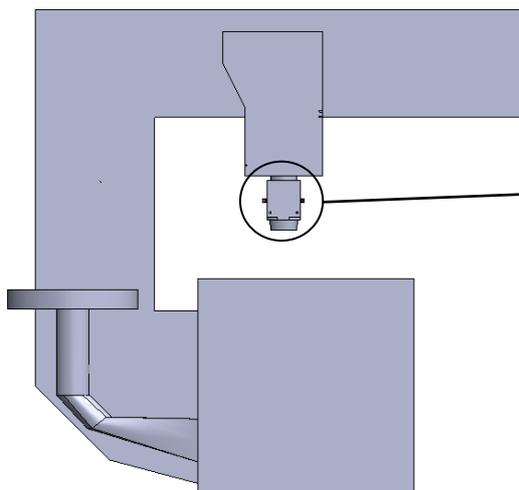


Abbildung 39: Schema der 5-Achsfräsmaschine, Quelle: Eigene Darstellung.

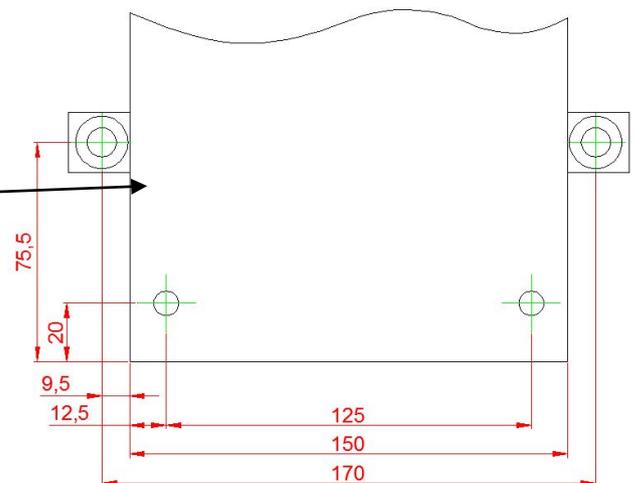


Abbildung 40: Detailbild der Montagebohrungen, Quelle: Eigene Darstellung.

In den folgenden Abschnitten werden nun Konzepte gezeigt, wie eine Positionierung der Arbeitskomponenten am Druckkopf erfolgen könnte.

6.1. Konzept 1: Peltierkühler horizontal

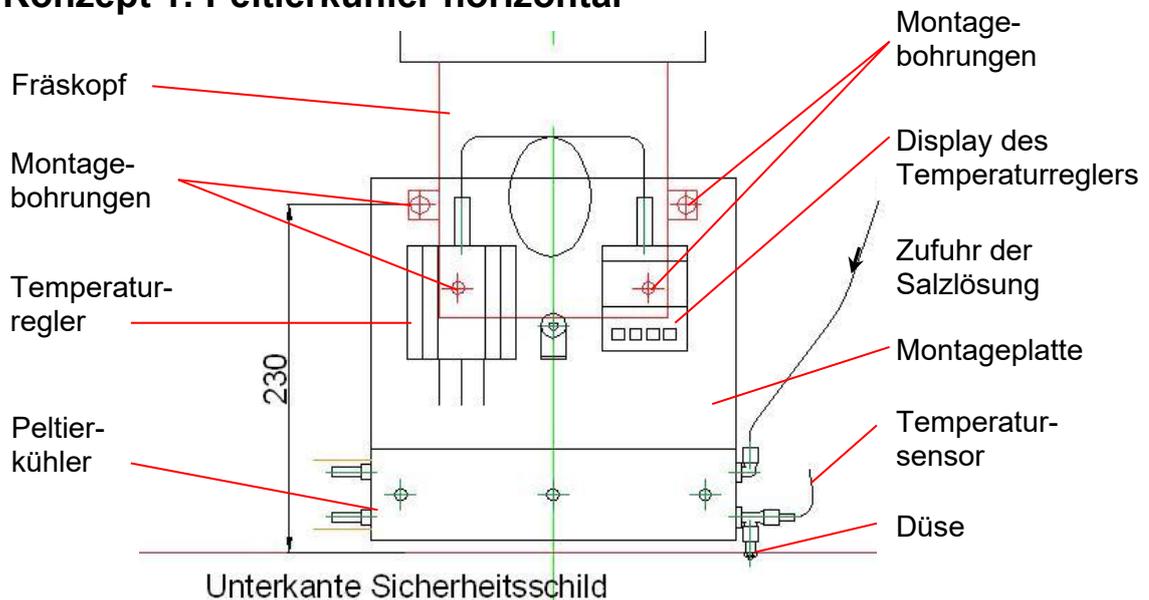


Abbildung 41: Horizontale Anordnung des Peltierkühlers, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Anordnung ermöglicht eine kompakte Ausführung der Montageplatte. Es werden jedoch die unteren beiden der vier Verschraubungspunkte von Komponenten verdeckt. Daher ist es mit dieser Positionierung nicht möglich den Druckkopf als gesamte vormontierte Einheit an den Fräskopfhalter der Maschine zu verschrauben. Die minimale Höhe der Montageplatte ist durch ein an der Maschine fix montiertes Sicherheitsschild (Abbildung 42) vorgegeben. Wie in Abbildung 41 dargestellt, muss die Düsenspitze daher einen Mindestabstand von 230 mm zur oberen Verschraubungsreihe haben.



Abbildung 42: Sicherheitsschild der Fräsmaschine, Quelle: Eigene Darstellung

6.2. Konzept 2: Peltierkühler vertikal

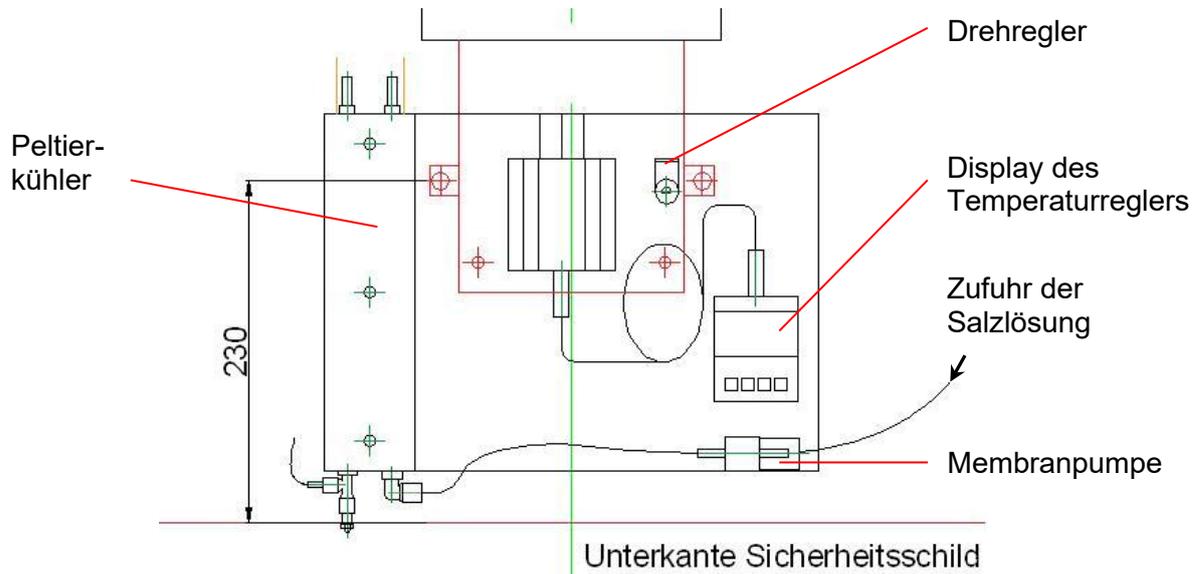


Abbildung 43: Senkrechte Anordnung des Peltierkühlers, Quelle: Eigene Darstellung.

Diese im Vergleich zum vorherigen Konzept etwas breitere Ausführung der Montageplatte erlaubt einen unverbauten Zugang zu den Verschraubungspunkten. Positiv anzumerken ist, dass sowohl der Peltierkühler als auch die Düse vertikal angeordnet sind. Es erfolgt daher im Düsenbereich keine Umlenkung des Fluids. Ein weiterer Vorteil ergibt sich in der Montage der Membranpumpe am Druckkopf. Es werden dabei alle für den Auftragsprozess notwendigen Komponenten zu einer kompletten, montagefähigen Einheit zusammengefügt.

6.3. Konzeptdetaillierung

Aus weiteren Varianten wurde nun die nachfolgend dargestellte Komponentenanzahl gewählt:

- Vertikal positionierter Peltierkühler
- Horizontal platzierte Bedienkomponenten an der Oberseite des Druckkopfes

6.3.1. Vorderseite:

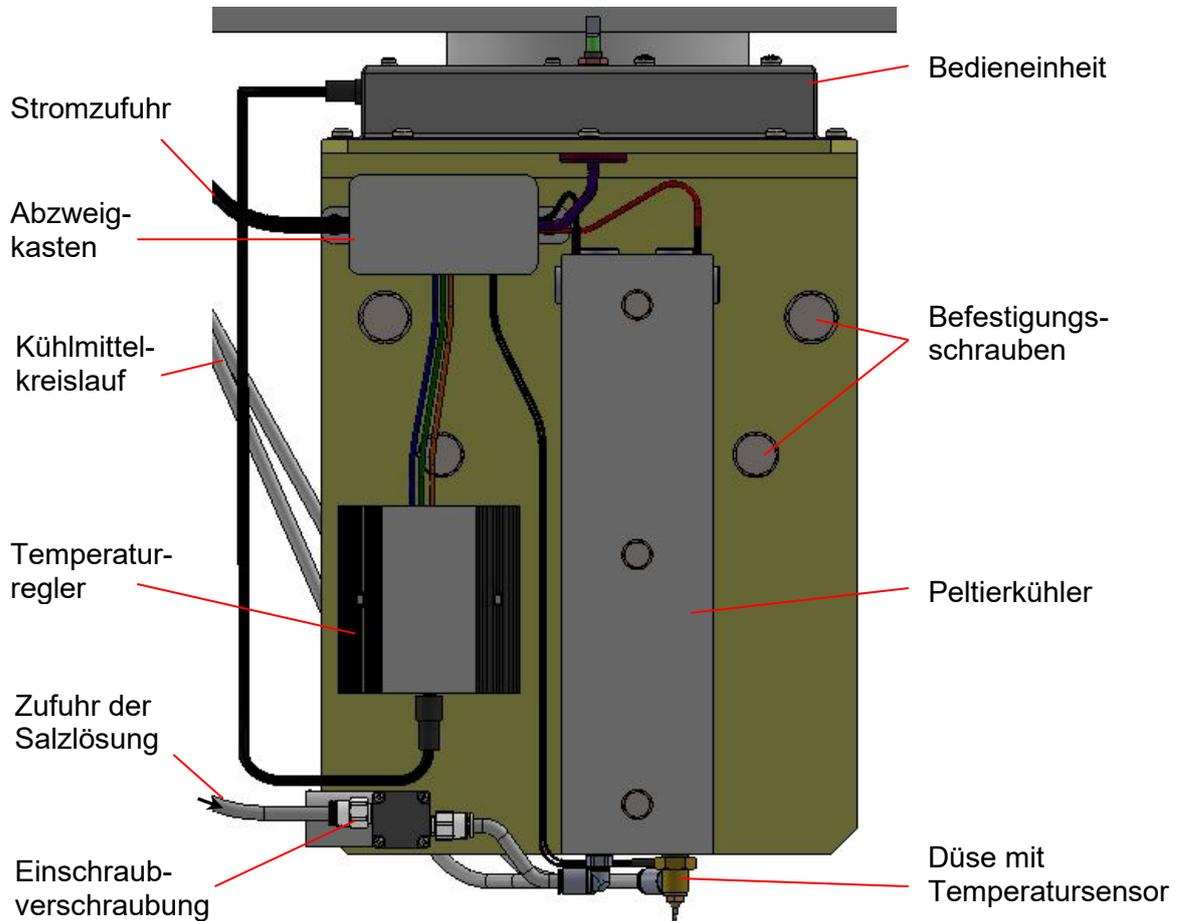


Abbildung 44: Druckkopf in der Vorderansicht, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3.2. Oberseite:

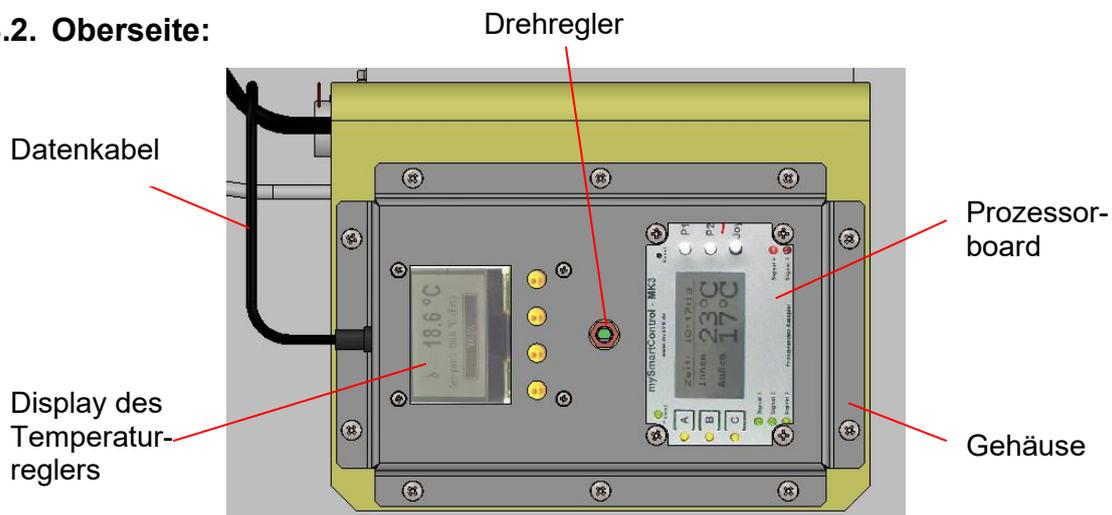


Abbildung 45: Druckkopf in der Draufsicht, Quelle: Eigene Darstellung.

Im Vergleich zu den beiden vorhin ausgeführten Konzepten, ist die Montageplatte nun als Winkelblech ausgeführt. Dies hat den Vorteil, dass die Bedienkomponenten (Display, Prozessorboard sowie der Drehregler) baulich von den Arbeitskomponenten (Membranpumpe, Peltierkühler) getrennt sind. Die Montageplatte kann somit in der Breite schmal ausgeführt werden. Die Bedienelemente sind zu einer Einheit (Abbildung 45) zusammengeführt und werden über ein Stahlblechgehäuse vor Verschmutzung geschützt. Ein an der Arbeitsseite installierter Abzweigkasten dient zur Aufnahme und zum Schutz elektrischer Verbindungsstellen.

Als Schlauchverbindung stellten sich die aus der Drucklufttechnik bekannten Einschraubverschraubungen als praktikabel heraus. Sie sind sowohl pneumatisch als auch hydraulisch dicht. Es kommt bei einer eventuell notwendigen Demontage zu keiner Schädigung und sie ermöglichen einen raschen sowie werkzeuglosen Austausch der Transportleitungen.

Die Düse als Arbeitskomponente des Druckkopfes ist baulich klein ausgeführt. Der Temperatursensor ist somit nahe am Austritt der Lösung positioniert. Dies erlaubt eine exakte Temperaturmessung an der Austrittsstelle der Salzlösung.

7. Montage des Druckkopfes

Der Deckel sowie die Grundplatte wurden aufgrund ihrer Komplexität und mangels interner Fertigungsmöglichkeiten für Biegeteile an eine regionale Firma für Werkzeugbau- und Fertigungstechnik vergeben. Die Teile wurden anhand erstellter Fertigungszeichnungen hergestellt (siehe Anhang).

Der Düsenhalter sowie das Rückschlagventil konnten in der institutseigenen Werkstatt gefertigt werden.

Die Distanzhülsen sowie einzelne Bohrungen und die Anfertigung notwendiger Gewindebohrungen wurden vom Verfasser dieser Arbeit selbstständig hergestellt.

Aufgrund der maßgenauen Herstellung der einzelnen Fertigungsteile konnten die Arbeitskomponenten (Temperaturregler, Peltierkühler,...) einfach an die Befestigungsplatte angebracht werden.



Abbildung 46: Montage des Druckkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 47 zeigt nun den fertigen mit elektronischen Bauteilen bestückten Druckkopf. Dieser kann nun als kompakte Einheit auf eine numerisch gesteuerte Maschine montiert werden.

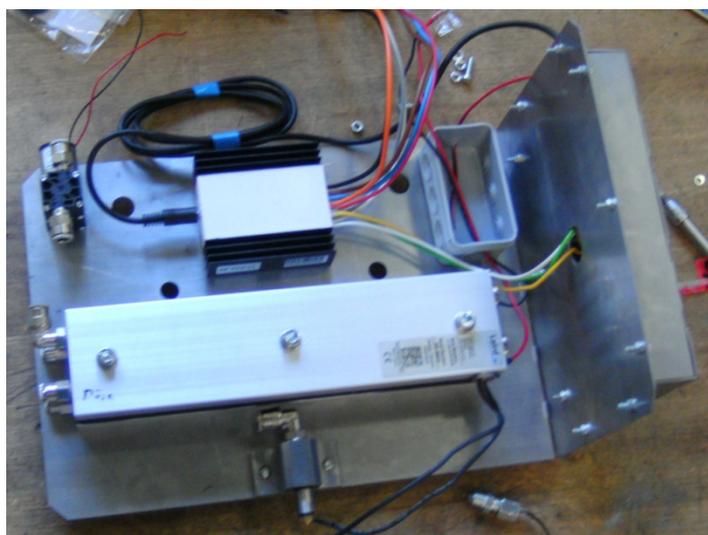


Abbildung 47: Zusammengebaute Druckkopfeinheit, Quelle: Eigene Darstellung.

8. Versuche und Testläufe

Nach dem Zusammenbau des Druckkopfes wurde dieser im Labor für Tragwerksentwurf auf einem Roboterarm der Firma ABB installiert, um die für den schichtweisen Aufbau von Objekten notwendigen Systemparameter (Temperaturen, Vorschubgeschwindigkeiten usw.) herauszufinden.

8.1. Versuch 1: Funktionsstudie des Druckkopfes

Ziel dieses Versuches ist es die Funktionstauglichkeit des Druckkopfes zu testen. Dazu wird Natriumacetat-Trihydrat und Wasser in einen Vorlagebehälter (Weithalsflasche $V = 1$ Liter) gegeben und mittels Magnetheizplatte auf eine Temperatur von 100°C erwärmt. Der Vorteil in der Verwendung einer Magnetheizplatte liegt darin, dass eine gewünschte Temperatur am Gerät eingestellt werden kann und diese automatisch gehalten wird. Ein lebensmittelechter Polyurethanschlauch dient als Verbindung zwischen dem statisch positionierten Vorlagebehälter und dem am Roboterarm geführten Druckkopf. Die Kühlung des Peltierkühlgeräts erfolgt durch einen 4 Liter fassenden Kühlwasserbehälter ($T_{\text{KW}} = 23^{\circ}\text{C}$).

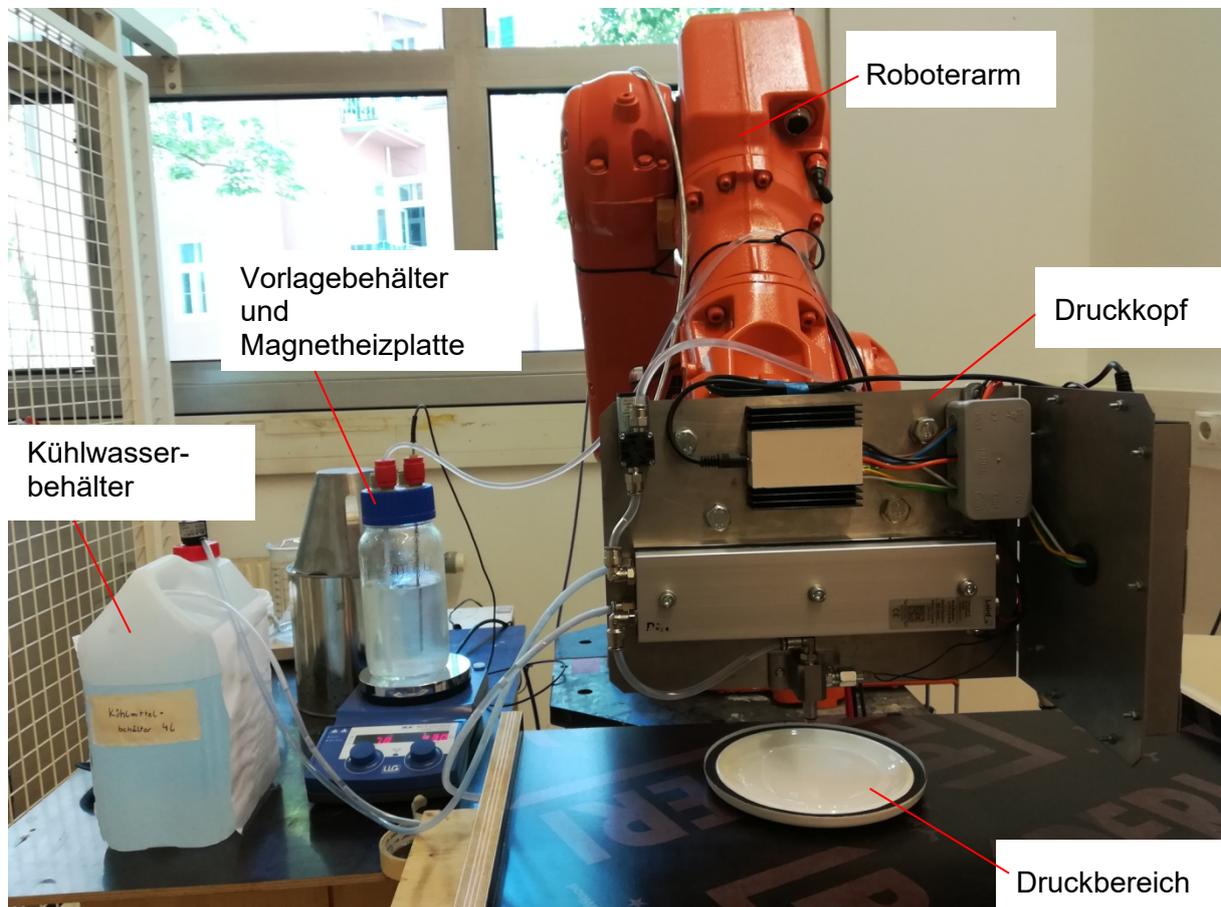


Abbildung 48: Aufbau des ersten Versuches, Quelle: Eigene Darstellung.

8.1.1. Versuchsdurchführung

Die am Druckkopf positionierte Membranpumpe wird über ein in Stufen einstellbares elektrisches Netzteil ($3/4,5/5/6/7,5/9$ V) mit Energie versorgt. Durch Einstellung der vom Netzteil übertragenen Spannung an die Pumpe wird der Fluidförderstrom innerhalb des Druckkopfes stufenweise geregelt.

Über die Temperaturregelung des Peltierkühlers wird die gewünschte Düsenaustrittstemperatur eingestellt.

8.1.2. Ergebnisse

Eine eingestellte Pumpenspannung von 9 Volt ($\dot{V} = 50 \text{ ml/min}$) hat zur Folge, dass eine zu große Menge an Fluid auf das Druckbett aufgetragen wird. Das aufgebrachte Material erstarrte zu langsam und zerfließt deshalb. Ein solches hergestelltes Objekt ist in der Abbildung 49 gezeigt.

Eine Düsenaustrittstemperatur von 40°C bewirkt, trotz maximaler Pumpenförderleistung, eine Kristallisation der Lösung im Peltierkühler.



Abbildung 49: Zu große Fördermenge, Quelle: Eigene Darstellung.

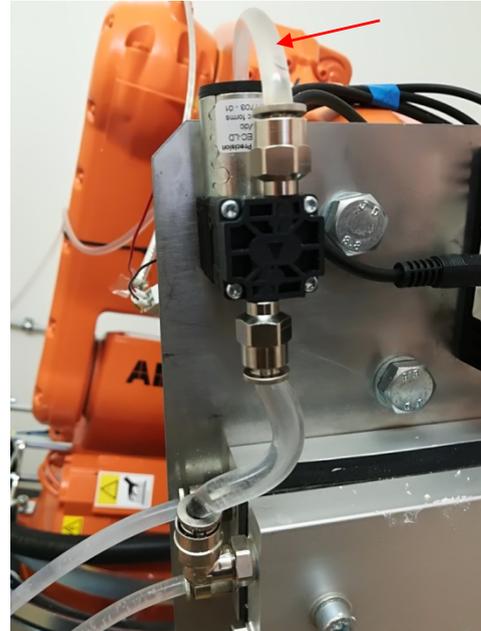


Abbildung 50: Erstarrung im Zulaufschlauch, Quelle: Eigene Darstellung.

Eine Pumpenspannung von 5 Volt ($\dot{V} = 29 \text{ ml/min}$) hat zur Folge, dass aufgrund der geringen Fördermenge das Fluid bereits im Zulaufschlauch zwischen Vorlagebehälter und Membranpumpe erstarrt (Abbildung 50) und der Druckversuch abgebrochen werden muss.

8.1.3. Fazit

Mit einer Pumpenspannung von $7,5 \text{ V}$ ($\dot{V} = 46 \text{ ml/min}$) bei einer Düsentemperatur von 65°C , welche deutlich über der Lösungstemperatur von 58°C des Natriumacetat-Trihydrat-Lösung liegt, erstarrt das Gemisch im Druckkopf nicht mehr. Ein kontinuierliches Aufbringen des Arbeitsmediums auf die Bauplattform wird somit erreicht.

8.2. Versuch 2: Kühlstudie Plattform

Die zuvor als Bauplattform verwendete Holzpressplatte wurde durch ein Aluminiumblech mit einer Wandstärke von 2 mm ersetzt. Die wesentlich bessere Wärmeleitfähigkeit der Metallplatte zeigte eine raschere Erstarrung der aufgetragenen Lösung.

8.2.1. Versuchsdurchführung

Abbildung 51 zeigt die Montage von zwei Peltierelementen mittels einer Klebeverbindung auf der Unterseite der Bauplattform. Die kalten Seiten der Elemente stehen mit der Metallplatte über eine zuvor aufgebraute Wärmeleitpaste in Kontakt und ermöglichen so eine Kühlung der Platte auf eine Temperatur von circa 15°C. Um die entstehende Wärme von der Warmseite der Peltierelemente abzuführen, sind diese über eine als Zwischenschicht aufgebrachte Wärmeleitpaste mit den Wärmetauschern verbunden.

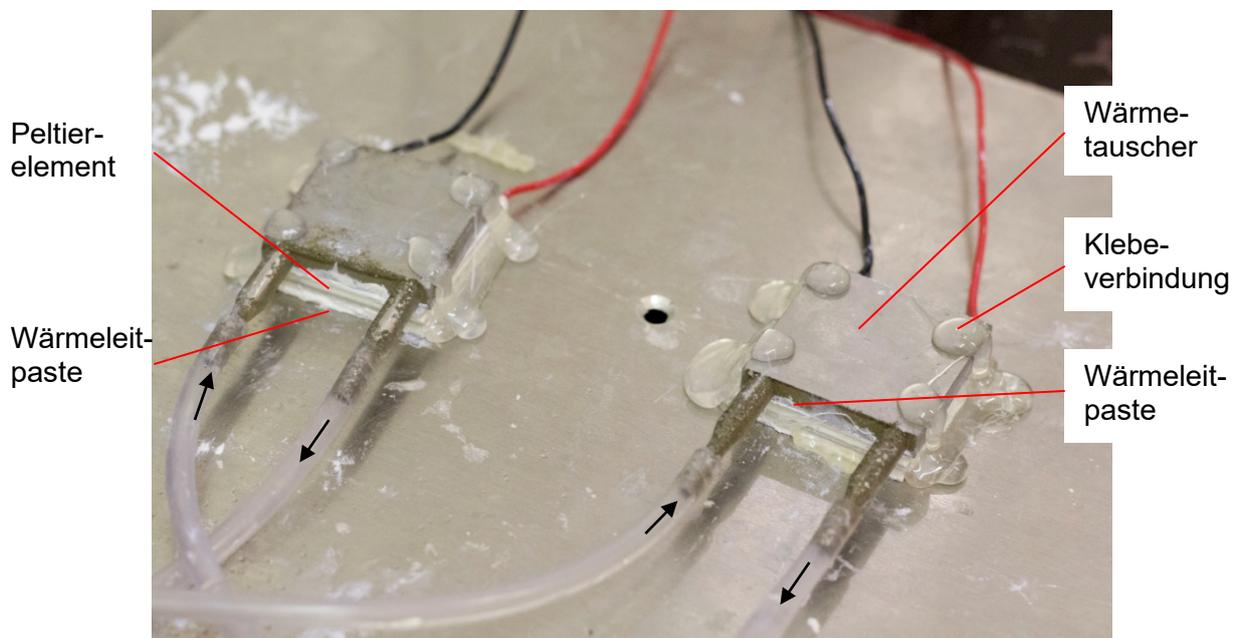


Abbildung 51: Kühlung der Bauplattform, Quelle: Eigene Darstellung.

8.2.2. Ergebnisse

Die erste Auftragsschicht erstarrt aufgrund der gekühlten Plattform gleichmäßig und rasch (erkennbar am äußeren Kreis der Abbildung 52). Im inneren Kreis ist zu erkennen, wie die zweite additive Auftragsschicht an der zuvor aufgetragenen ersten Auftragsschicht anhaftet. Das Aufbringen der zweiten Auftragsschicht führt zu einem Wärmeeintrag und somit zu einer Temperaturerhöhung der vorangegangenen Schicht, wodurch die bereits erstarrte untere Schicht teilweise wieder verflüssigt wird. Die zweite Schicht erstarrt merklich langsamer. Die ersten beiden Schichten bildeten eine Wärmeisolation in Richtung der Bauplattform, wodurch beim Auftragen der dritten Bahn keine Erstarrung mehr einsetzt. Abbildung 53 zeigt im inneren Kreis wie die dritte Bahn zerfließen ist. Daraufhin wurde der Druckversuch abgebrochen.

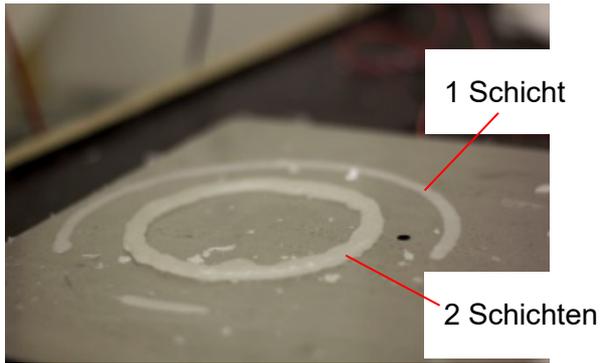


Abbildung 52: Erstarrungsverlauf Schicht 1 und 2, Quelle: Eigene Darstellung.

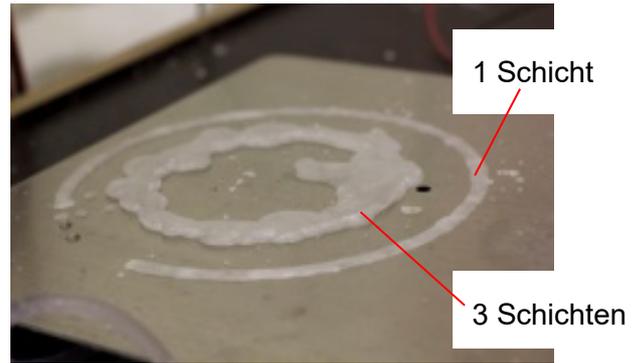


Abbildung 53: Verrinnen der 3. Auftragsschicht, Quelle: Eigene Darstellung.

8.2.3. Fazit

Die Kühlung der Bauplattform funktioniert für die Erstarrung der ersten Auftragsschicht sehr gut. Mit steigender Anzahl an Auftragsschichten nimmt jedoch die Qualität der gefertigten Objekte stark ab.

8.3. Versuch 3: Dauerlaufversuch

Im ersten Schritt wurde der Druckkopf von seiner ursprünglich horizontalen Lage in die vertikale Richtung gedreht. Diese neue Position erlaubt es, den Fließweg des Fluids zwischen dem Peltierkühlgerät und der Düse wesentlich zu verkleinern.

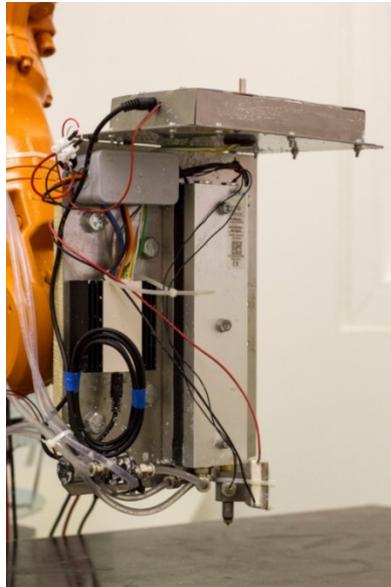


Abbildung 54: Senkrechter Druckkopf, Quelle: Eigene Darstellung.

Die zuvor verwendeten Messingdüsen zeigen bei geringem Durchfluss ein schlechtes Tropfverhalten. Der flache Düsenkegel führt aufgrund der Oberflächenspannung des Fluidtropfens, zu einem unbrauchbaren Abtropfverhalten an der Düsenöffnung und einer vorzeitigen Kristallisation der Lösung.



Abbildung 55: Korrekter Tropfen, Quelle: Eigene Darstellung.



Abbildung 56: Tropfen seitlich angelegt, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Messingdüsen wurden in weiterer Folge so umgestaltet, dass sie zur Aufnahme von medizinischen Infusionsnadeln und Aderendhülsen geeignet waren.

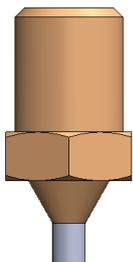


Abbildung 57: Düse mit Aderendhülse, Quelle: Eigene Darstellung.

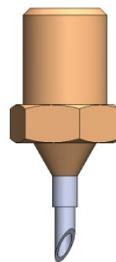


Abbildung 58: Düse mit Infusionsnadel, Quelle: Eigene Darstellung.

8.3.1. Versuchsdurchführung

Der Vorlagebehälter mit der Salzlösung wird mit Hilfe der Magnetheizplatte auf einer Temperatur von 95°C gehalten. Die Membranpumpe saugt über die Zuleitung ($L_{zu} = 1\text{ m}$) das Arbeitsfluid aus dem Vorratsbehälter an und leitet es an den Peltierkühler weiter. Über den zuvor auf 70°C eingestellten Temperaturregler kann das in der Zuleitung abgekühlte Salzhydrat wieder aufgewärmt und mit der gewünschten Temperatur von 70°C durch die Düse in den darunter positionierten Vorratsbehälter rückgefördert werden. In einer zeitlichen Abfolge von drei Minuten wird der Temperaturregler um jeweils 5°C nach unten gestellt um zu erfahren, bei welcher Temperatur in Abhängigkeit der gewählten Pumpenspannung und der damit verbundenen geförderten Lösungsmenge, die Salzlösung an der Düsen Spitze auskristallisiert.

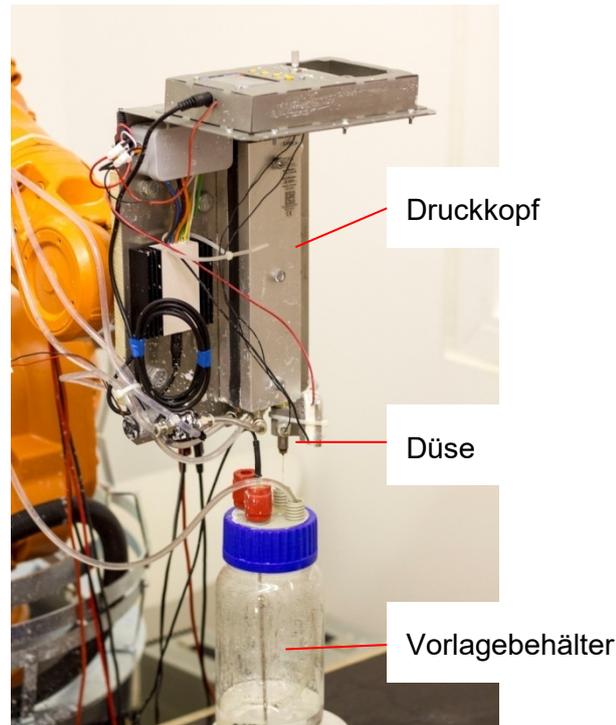


Abbildung 59: Aufbau Dauerlaufversuch, Quelle: Eigene Darstellung.

8.3.2. Ergebnisse

Abbildung 60 sowie Abbildung 61 zeigen, dass mit kleinerem Düsendurchmesser und somit geringerem Strahlquerschnitt, tendenziell geringere Temperaturen bis zur Kristallisation der Lösung erreichbar sind. Der im unteren Diagramm dargestellte Zick-Zack-Verlauf der Aushärtetemperatur ist auf Kristallisationskeime an der Düse zurückzuführen welche speziell bei geringen Düsendurchmessern eine Kristallisation der Lösung in der Düse bewirkten.

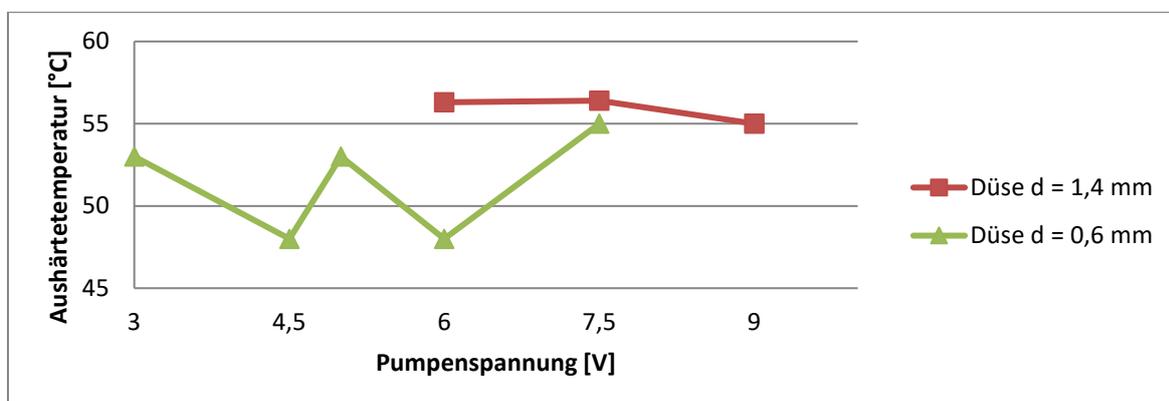


Abbildung 60: Dauerlaufversuch für SAT mit 43 gew% Wasser, Quelle: Eigene Darstellung.

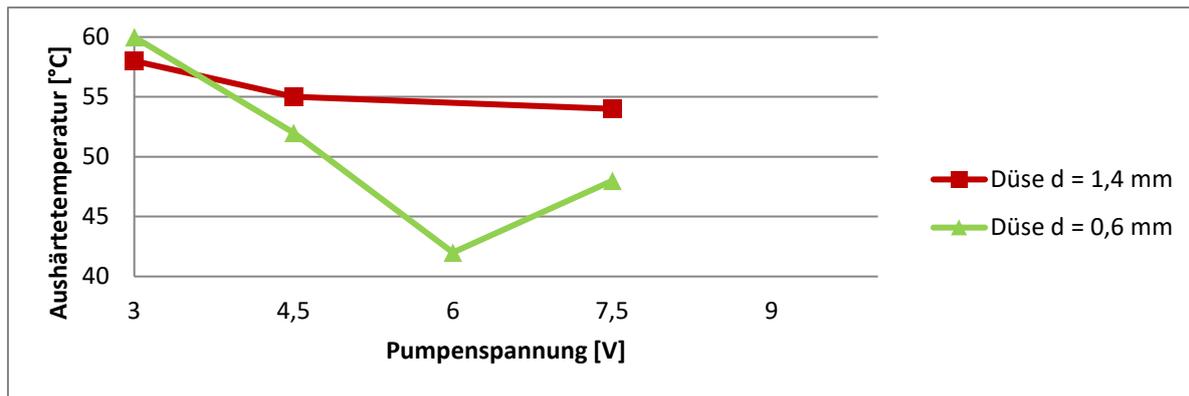


Abbildung 61: Dauerlaufversuch für SAT mit 50 gew% Wasser, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Temperaturregler besitzt einen bestimmten Regelbereich. In den Dauerlaufversuchen stellte sich heraus, dass dieser Regelbereich zu einem Über- bzw. Unterschwingen der tatsächlich eingestellten Temperatur um ca. $\pm 1,5^\circ\text{C}$ führt. Befindet sich der Regler und somit das Kühlgerät im Kühlmodus, so wird die Lösung abgekühlt. Die Dichte der Flüssigkeit nimmt zu, die Fördermenge der Salzlösung nimmt dabei ab. Befindet sich der Temperaturregler im Heizmodus, nimmt die Salzlösung Wärmeenergie auf, die Lösung dehnt sich aus und es wird mehr Salzlösung aus der Düse ausgestoßen. Speziell bei geringen Fördermengen der Pumpe wirkt sich dieses Phänomen sehr stark aus. Während im Kühlmodus Tropfen aus der Düse austreten (Abbildung 62), verlässt das Fluid die Düse im Heizmodus in Form eines Strahles (Abbildung 63).



Abbildung 62: Regler im Kühlmodus, Quelle: Eigene Darstellung.

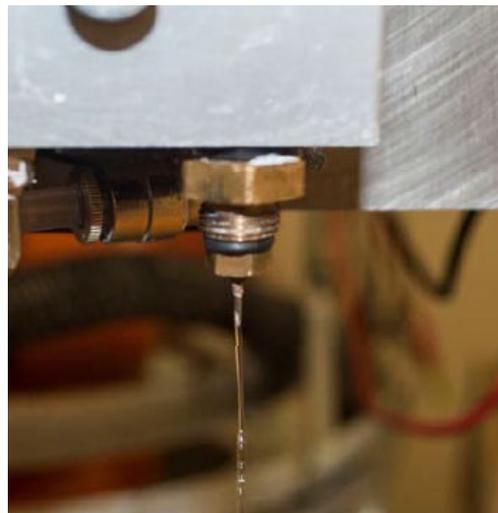


Abbildung 63: Regler im Heizmodus, Quelle: Eigene Darstellung.

8.3.3. Fazit

Anhand der Dauerlaufversuche konnte festgestellt werden, bei welchen Betriebsmodi des Druckkopfes eine Kristallisation der Salzlösung zu erwarten ist.

Die direkte Verbindung der Austrittsdüse mit dem Peltierkühlgerät ermöglicht durch Steigerung der Temperatur, eine in der Düse auskristallisierte Salzlösung wieder aufzuschmelzen und sie damit wieder frei zu legen. Eine Demontage und Reinigung der Düse, sind somit nicht mehr nötig.

8.4. Versuch 4: Kühlstudie mit Druckluft und Ventilatoren

Die Auftragsschichten wurden mittels eines Luftstromes vertikal von oben gekühlt um eine raschere Kristallisation der Salzlösung zu erreichen. Ziel war es ein Verrinnen der Auftragschichten zu unterbinden um Objekte mit größerer Schichtenzahl zu erzeugen.

8.4.1. Versuchsdurchführung

Aus der vorhandenen Druckluftanlage des Labors wird über einen Polyurethanschlauch (siehe Abbildung 64) von oben Luft in einen Wärmetauscher geführt. An den Kontaktflächen des Tauschers werden beidseitig Peltierelemente so positioniert, dass die Kaltseiten der Elemente in Richtung des Wärmetauschers ausgerichtet sind. Um die auftretende Wärme an der Warmseite der Peltierelemente abzutransportieren ist die Kühleinheit an die Flüssigkeitskühlung angeschlossen. Dieser Aufbau erlaubt es die zugeführte Druckluft mit einer Temperatur von 28°C auf 14°C abzukühlen. Über den im Bild grün dargestellten Schlauch strömt die Luft in Richtung Druckerdüse (1).

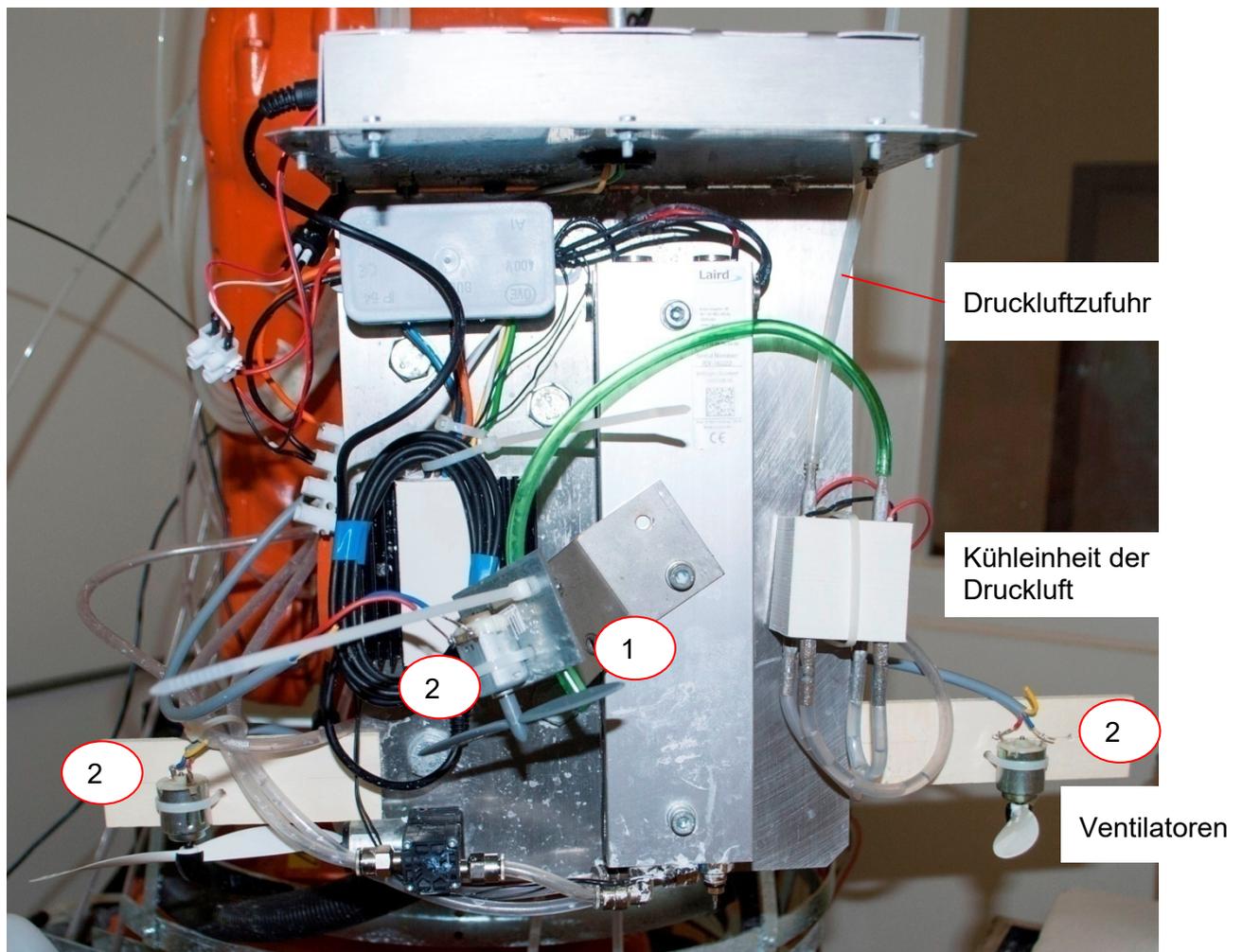


Abbildung 64: Kühlung mit Ventilatoren und Druckluftgebläse, Quelle: Eigene Darstellung.

An der Rückseite des Druckkopfes sowie im Nahbereich der Düse, sind Modellflugzeugpropeller (2) angebracht. Der von den Propellern erzeugte Luftstrom hat die Aufgabe, die zuvor auf die Plattform aufgetragene Auftragsschicht zu kühlen.

8.4.2. Ergebnisse

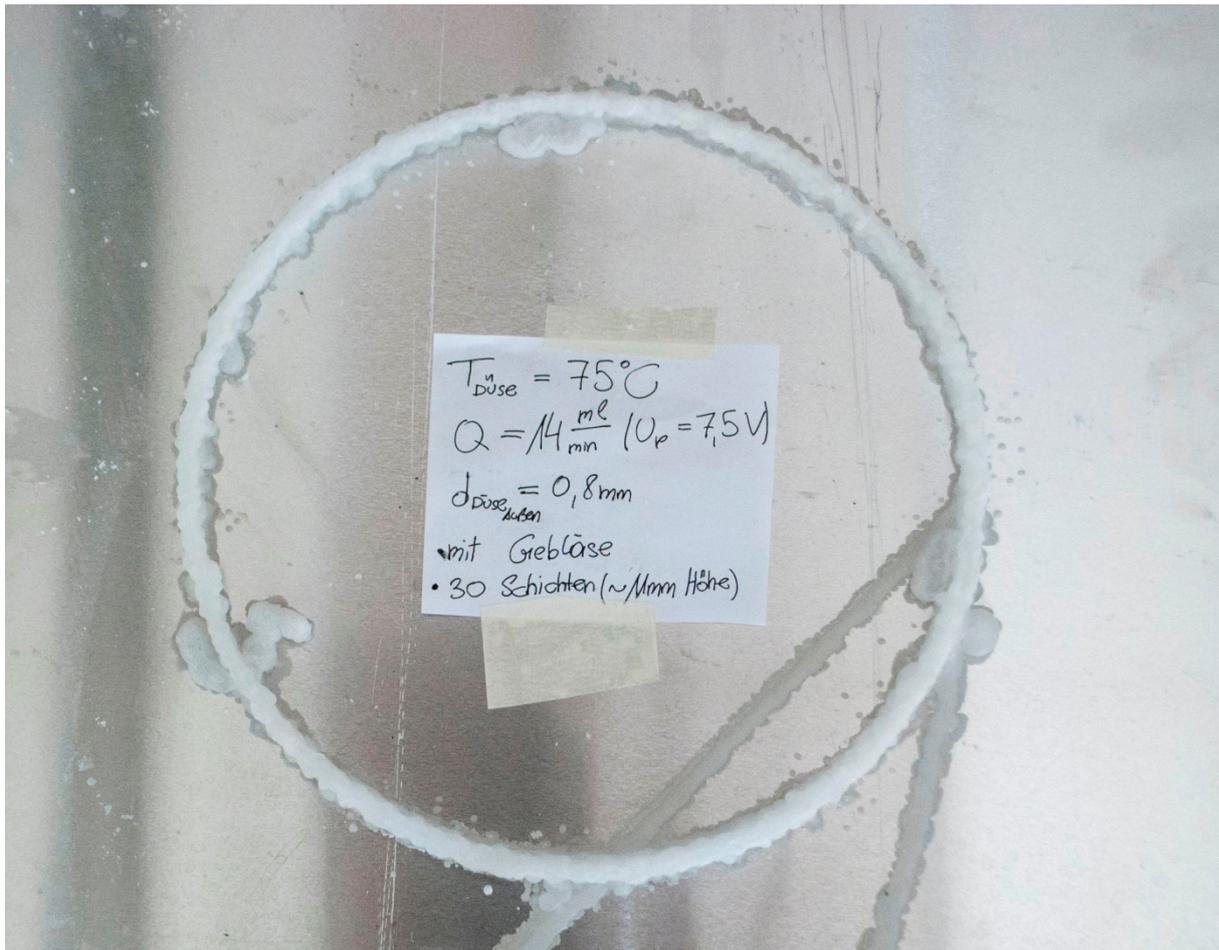


Abbildung 65: 30-schichtiges Versuchsobjekt mit Kühlung, Quelle: Eigene Darstellung.

Der direkt auf die Düse gerichtete gekühlte Druckluftstrahl hat zur Folge, dass der aus der Druckerdüse austretende Fluidstrahl in Strömungsrichtung der Druckluft abgelenkt wird. Es entstehen wesentlich breitere Auftragsschichten als sie ohne Luftstrahl zu erreichen sind.

Der Luftstrom der Ventilatoren führt dazu, dass die bereits aufgebraute Auftragsschicht in Bewegung versetzt wird und somit an den darunter liegenden Schichten seitlich nach unten fließt.

8.4.3. Fazit

Durch diese Arten der Kühlung kann keine wesentliche Beschleunigung in der Auskristallisation der aufgetragenen Salzlösung festgestellt werden. Vielmehr wird durch die eingebrachte Luftströmung die Qualität des erstellten Objektes vermindert.

8.5. Versuch 5: Kühlstudie mittels Flüssigstickstoff

In den vorhergehenden Versuchen stellte sich heraus, dass der Zulaufschlauch zwischen Vorlagebehälter und Prozesspumpe ein kritisches Element des Auftragsprozesses darstellt. Es kam vermehrt zur Auskristallisation der Salzlösung am Eintritt in die Membranpumpe.

8.5.1. Versuchsdurchführung

Zur Verkürzung der Verweilzeit des Arbeitsmediums in der Zuleitung wird der ursprüngliche Schlauchquerschnitt von 4 mm auf 1 mm verkleinert.

Um den Temperaturverlust der Lösung über die Schlauchlänge zu reduzieren wird, wie in Abbildung 66 unteres rechtes Bild sichtbar, die Zuleitung durch einen zusätzlichen Kunststoffschlauch mit einem Innendurchmesser von 6 mm überzogen um damit einen Isoliereffekt zu erreichen.

Des Weiteren wird auf halber Länge des 120 cm langen Zulaufes eine Zwischenheizung installiert. Wie in Abbildung 66 (Bild rechts oben) gezeigt, gelangt die Salzlösung vom Vorlagebehälter in den mittig angeordneten Wärmetauscher und wird dort an der Ober- und Unterseite durch Peltierelemente aufgeheizt. Zur Kühlung der Heizelemente befinden sich an deren Außenseiten weitere Wärmetauscher, welche mit dem Kühlmittelkreislauf verbunden sind.

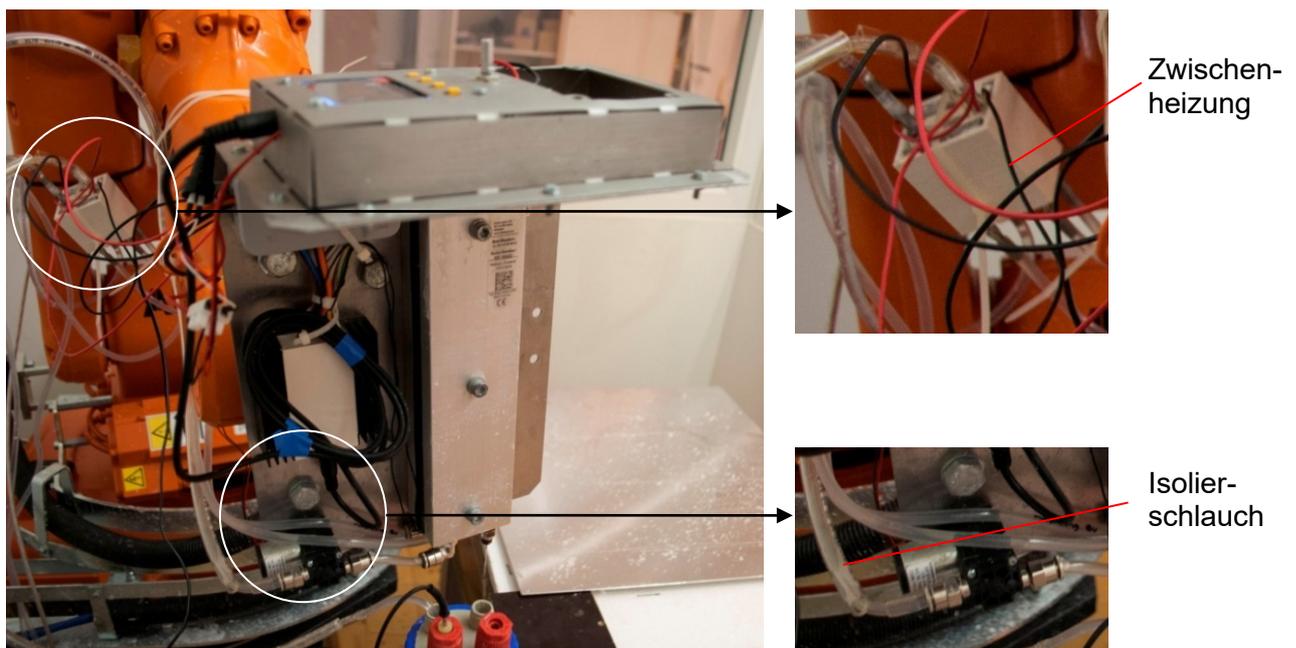


Abbildung 66: Versuchsaufbau - Kühlstudie,
Quelle: Eigene Darstellung.

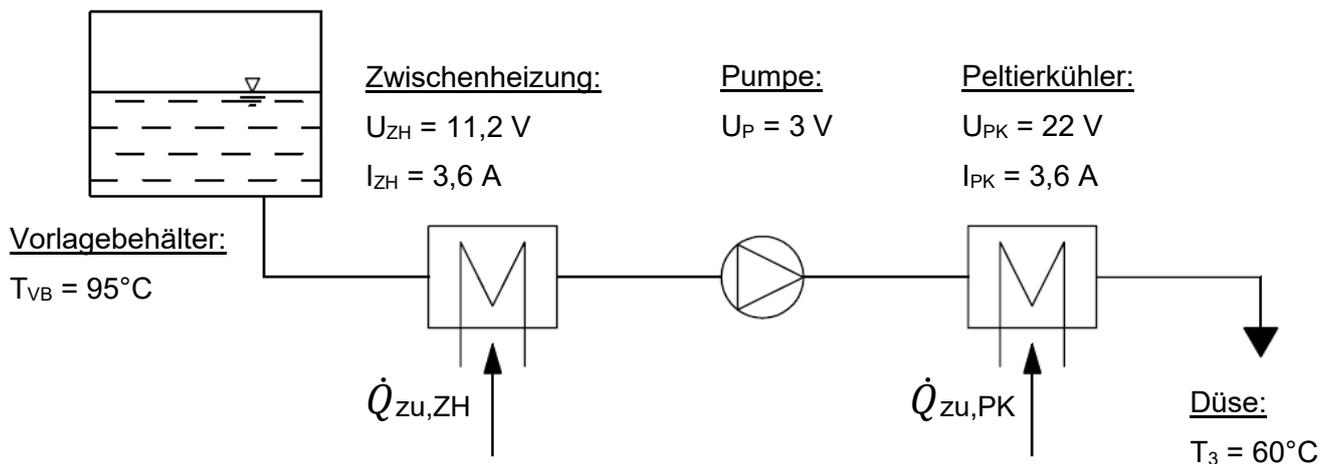


Abbildung 67: Prozessschaubild Wärmezufuhr, Quelle: Eigene Darstellung.

8.5.2. Ergebnisse

Um die Auskristallisation auf der Bauplattform zu beschleunigen wird in einem Versuch die Salzlösung von den ursprünglichen 43 gew% H_2O auf 40 gew% H_2O reduziert. Der höhere Massenanteil von Natriumacetat-Trihydrat verursacht ein vorzeitiges Aushärten der Lösung an der Düse und nicht wie vorgesehen auf der Bauplattform. Daher muss mit einer höheren Austrittstemperatur gegengesteuert werden. Das Versuchsobjekt zeigt keinen merklichen Unterschied zu den Ergebnissen gegenüber der Anwendung einer 43 gew% Lösung.

Einen großen Einfluss auf die Qualität des Druckergebnisses hat jedoch der Abstand der Düse zur Bauplattform bzw. der zuvor aufgetragenen Schichten. Fährt die Düse in einer Höhe von 4 cm über der Bauplattform, so trifft der Tropfen aufgrund seiner vorhandenen potentiellen Energie mit einer hohen Geschwindigkeit auf das Modellobjekt auf und zerschellt (siehe Abbildung 68a). Das Ergebnis sind breite Auftragsschichten mit geringer Schichthöhe. Mit steigender Schichtzahl fließt der aufgetragene Tropfen an den Seiten der ausgehärteten Auftragsschichten nach unten.

Wird der Abstand der Düse zur Bauplattform klein gehalten, so wird das Fluid anstatt zu tropfen, raupenförmig auf die Bauplattform bzw. Auftragsschicht aufgebracht. Ein Verrinnen der aufgetragenen Schicht kann dadurch minimiert werden. Es entstehen somit gleichmäßige Bahnstrukturen (siehe Abbildung 68b).

Bei einem eigenen Versuchsdurchlauf wurde der Düsenabstand bei jedem Umlauf um wenige Millimeterbruchteile näher zur vorher aufgetragenen Schicht gestellt. Nach etwa 50 aufgetragenen Bahnen, fuhr die Düse in die untere Schicht ein (siehe Abbildung 68c). Durch die damit erzeugten Abriebkristalle, welche sich als Kristallisationskeime an der Düse anlegten, war zu erwarten, dass die Salzlösung auskristallisiert und damit die Düse verstopft. Durch den Umstand, dass die Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Salzlösung höher als die Kristallisationsgeschwindigkeit der aufgetragenen Lösung war, verlegte sich die Düse jedoch nicht. Das immer tiefere Eindringen der Düse in die darunter liegenden Schichten hatte aber nach wenigen Umläufen einen Bruch des Modells zur Folge.

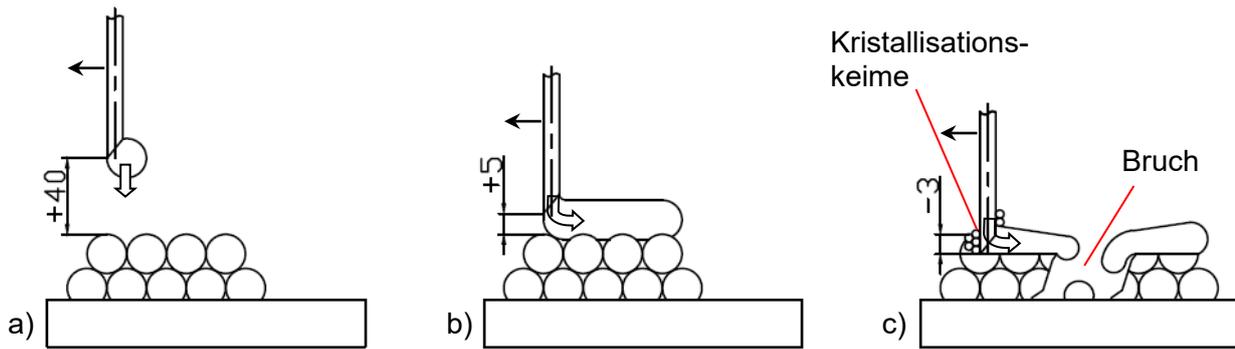


Abbildung 68: Unterschiedliche Düsenabstände zu den Auftragsschichten, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie bereits aus Versuch 2 (Kühlstudie Plattform) bekannt, kristallisiert das Salzgemisch in der ersten und zweiten Auftragsschicht durch die gute Wärmeabfuhr über die metallische Plattform rasch aus. Ab der 3. Auftragsschicht nimmt die Kristallisationsgeschwindigkeit aufgrund der isolierenden Wirkung der beiden darunter liegenden Schichten ab. Um eine rasche Erstarrung der nachfolgenden Auftragsschichten zu erreichen, wurde aus einem isolierten Behälter flüssiger Stickstoffnebel auf das Versuchsobjekt aufgebracht. Dieser Kühlvorgang führt zu einer vollständigen Erstarrung der Druckschicht bis zum Auftragen der nächsten Auftragsschicht. Die einzelnen Auftragslagen werden gleichmäßig aufgebaut und ein Verrinnen der aufgetragenen Lösung kann damit nahezu unterbunden werden.



Abbildung 69: Materialauftrag mit Stickstoffkühlung, Quelle: Eigene Darstellung.

8.5.3. Fazit

Aus den Versuchen konnten folgende Auftrageparameter für den Druckkopf abgeleitet werden:

Temperatur der Lösung im Vorlagebehälter: $T_{VB} = 95^{\circ}\text{C}$
Temperatur der Lösung am Düsenaustritt: $T_{Düse} = 60^{\circ}\text{C}$

Zwischenheizung:

Spannungswert an der Zwischenheizung: $U_{ZH} = 11,2\text{ V}$
Stromstärke an der Zwischenheizung: $I_{ZH} = 3,6\text{ A}$

Pumpe:

Spannungswert an der Pumpe: $U_P = 3\text{ V}$
Stromstärke der Pumpe: $I_P = 30\text{ mA}$

Peltierkühler:

Spannungswert am Peltierkühler: $U_{PK} = 22\text{ V}$
Stromstärke am Peltierkühler: $I_{PK} = 3,6\text{ A}$

Düse Kanüle, $d = 0,8\text{ mm}$

Vorschub des Roboters: $V_{Roboter} = 12\%$

Die Versuche wurden mit den oben angegebenen Parametern mehrmals durchgeführt. Es waren keine Abweichungen bezüglich der Kristallisationsgeschwindigkeit sowie des Objekt-ergebnis erkennbar, wodurch eine vollständige Reproduzierbarkeit der Modelle erreicht werden konnte. Die Stickstoffkühlung führt zu einer raschen Erstarrung der aufgetragenen Lösung, wodurch eine lange Versuchsdauer mit beliebig vielen Auftragsschichten gewährleistet ist.

9. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung sowie die Konstruktion und der Bau eines als Prototyp ausgeführten Druckkopfes. Dieser sollte in der Lage sein, eine metastabile Salzlösung (Natriumacetat-Trihydrat) als 3D-Druck auf eine Bauplattform punktgenau aufzutragen.

Aus dieser Arbeit sind folgende Erkenntnisse hinsichtlich des Druckkopfes ableitbar:

- Zur Sicherstellung, dass die Salzlösung nicht im Druckkopf erstarrt und um einen kontinuierlichen Auftrageprozess zu ermöglichen, muss das Medium beim Austritt aus der Düse eine Temperatur oberhalb der Lösungstemperatur der Salzlösung von 58°C haben.
- Wird die flüssige Salzlösung nicht auf einer wärmeisolierenden Holzpressspanplatte, sondern auf einer kühlbaren metallischen Bauplattform aufgebracht, so ist wegen der besseren Wärmeabfuhr eine raschere Auskristallisation der Salzlösung in den ersten beiden Auftragsschichten erkennbar.
- Lange, spitz ausgeführte Düsen in Form von Aderendhülsen bzw. Infusionsnadeln erzeugen sauber abgetrennte Tropfen sowie ein konstantes Strahlbild der austretenden Salzlösung und erzeugen so einen qualitativ hochwertigen Druck.
- Die Kühlung der Modelle durch einen Luftstrom (gekühlte Druckluft, Propeller) führt zu einer Verminderung der Objektqualität.
- Düsen mit kleinerem Strahlquerschnitt ermöglichen geringere Temperaturen am Düsenaustritt und damit eine schnellere Aushärtung der Salzlösung.
- Der Einbau einer Zwischenheizung sowie die Isolation des Zulaufschlauches, verhindern in der Zuleitung zum Druckkopf ein Erstarren der Salzlösung.
- Ein Düsenabstand von 10 mm zur Bauplattform bzw. den Auftragsschichten ermöglicht den Aufbau konstanter Schichtdicken und ein zufriedenstellendes Druckobjekt.
- Die Verwendung von Stickstoff begünstigt die Wärmeabfuhr am Modell und erlaubt somit die Erzeugung von Objekten mit beliebiger Schichtenzahl.

10. Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurde der Prototyp eines Druckkopfes entwickelt mit dem es möglich ist Natriumacetat-Trihydrat zu 3D-Modellen zu verarbeiten. Um den vorliegenden Druckkopf weiter zu verbessern sollten folgende Verfahrensschritte noch weiter untersucht werden.

In den Versuchen war erkennbar, dass eine minimale Erhöhung des Wasseranteiles über die geforderten 43 gew% H₂O in der Salzlösung eine Senkung der Kristallisationsgeschwindigkeit und damit eine bessere Verarbeitbarkeit der Lösung im Druckkopf ermöglicht. Der erhöhte Wasseranteil hat jedoch zur Folge, dass die Festigkeit der Objekte sinkt.⁴³ Weitere Untersuchungen sollten darauf ausgerichtet werden, ob eine Erhöhung des Wassergehalts und somit leichtere Handhabung, den Umstand der geringeren Objektfestigkeit kompensiert.

Das Peltierkühlgerät im entwickelten Druckkopf war aufgrund des Umstandes, dass es sich um eine Einzelbestellung handelte, nur in einer Aluminiumausführung lieferbar. Achatz wies in ihrer Arbeit darauf hin, dass der Kontakt zwischen Aluminium und der als Base vorliegende Natriumacetat-Trihydrat-Lösung zu einer Änderung in der Zusammensetzung der Salzlösung sowie aufgrund von Wasserstoffbildung zu einer Gefügelockerung im Modell führen kann.⁴⁴ Zu erforschen ist, ob die Auswirkung von Aluminium auf die Salzlösung und deren Zusammensetzung bzw. die Verwendung anderer Materialien, positive Auswirkungen auf die Qualität der Versuchsmodelle hat.

Die wohl größte Auswirkung auf die Qualität der Versuchsmodelle ist durch eine Kühlung der Auftragsschichten und der Plattform erreichbar. Ist es möglich durch gezielte Kühlung die aufgetragenen Lagen vollständig auskristallisieren zu lassen, so ist ein gleichmäßiger und somit sauberer Schichtenaufbau herstellbar.

⁴³ Vgl. Achatz (2017), S. 41.

⁴⁴ Vgl. Achatz (2017), S. 12.

Literaturverzeichnis

Achatz, Anna (2017): *Masterarbeit: Prozessentwicklung zur Verarbeitung von Natriumacetat-Trihydrat für den 3D-Druck*, Graz

AliExpress (2019): *Extruderdüsen*,
<https://de.aliexpress.com/item/3d-Drucker-D-se-E3D-V6-V5-J-Kopf-Messing-D-se-0-2-0-3/32858903529.html> [Stand: 29.10.2019]

Baur, Erwin (Hrsg.); Osswald Tim A. (Hrsg.); Rudolph Natalie (Hrsg.) (2013): *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*, 31. Ausgabe, Carl Hanser Verlag, München, ISBN: 978-3-446-43442-4

DURAN Group GmbH (03.2003): *Produktbroschüre DURAN® GLS 80® WEITHALSGLAS-FLASCHE*, [Stand: 29.10.2019]
http://www.duran-group.com/fileadmin/downloads/laborglas/GLS80_A5_D.pdf

Gebrauchs.info (2012): *Beipackzettel Sterican Standardkanüle*,
<https://api.gebrauchs.info/261110f4780bbf38616a34d997cd0d05i>. [Stand: August 2012]

Grabow, Gerd Heinz (1993): *Das erweiterte Cordier-Diagramm für Fluidenergiemaschinen und Verbrennungsmotoren*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

Grote, Karl-Heinrich (Hrsg.); Bender, Beate (Hrsg.); Göhlich, Dietmar (Hrsg.) (2018): *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*, 25. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, E-Book-ISBN: 978-3-662-54805-9

Gülich, Johann Friedrich (2014): *Kreiselpumpen: Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb*, 4. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, E-Book-ISBN: 978-3-642-40032-2

Hausmann, Kalani Kirk; Horne, Richard (2014): *3D-Druck für Dummies*, 1. Auflage, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, ISBN: 978-3-527-71030-0

Hoffmann, Jörg (Hrsg.) (2015): *Taschenbuch der Messtechnik*, 7. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, E-Book-ISBN: 978-3-446-44511-6

IKA®-Werke GmbH & Co.KG (2017): *Datenblatt: Magnetrührer RCT basic*,
<https://www.ika.com/de/Produkte-Lab-Eq/Magnetruhrer-Heizruhrer-Laborruhrer-Ruehrer-csp-188/RCT-basic-Downloads-cpdl-3810000/> [Stand: 29.10.2019]

IKA®-Werke GmbH & Co.KG (2019): *Datenblatt: PT 1000.60 Temperaturmessfühler*,
<https://www.ika.com/de/Produkte-Lab-Eq/Vakuum-csp-158/PT-100060-Temperaturmessfuehler,-Edelstahl-Downloads-cpdl-3516800/> [Stand: 29.10.2019]

Knap, Wolfgang GmbH. & Co.KG (2016): *Datenblatt: liquid-to-liquid-supercool.doc*, http://www.knap.at/datenblaetter/pel/pel_lrd_ll-wk.pdf [Ausgabedatum: 09.04.2016]

Lachmayer, Roland; Lippert, Rene Bastian; Fahlbusch Thomas (Hrsg.) (2016): *3D-Druck beleuchtet: Additive Manufacturing auf den Weg in die Anwendung*, Springer-Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-662-49055-6

maschinenbau-wissen (2019): *Kunststoff EPDM - Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk*, <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/349-epdm> [Stand: 29.10.2019]

NORRES Schlauchtechnik GmbH. (2019): Datenblatt NORFLEX® PUR 401 FOOD, https://www.norres.com/media/articles/datenblatt/3025279_NORFLEX_PUR_401_FOOD_DE.pdf [Stand: 29.10.2019]

Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH. (2016): *Bedienungsanleitung: Temperaturregler für automatischen Heiz- und Kühlbetrieb*, www.quick-ohm.de [Ausgabedatum: 29.04.2016]

Raschdorf, Heinz (2008): *Schlauchpumpen für anspruchsvolle Anwendungen*, in: Zeitschrift für Chemietechnik, Heft 9/2008, <https://www.chemietechnik.de/schlauchpumpen-fuer-anspruchsvolle-anwendungen/> [Stand 29.10.2019]

Rüegg, Christoph (25.09.1999): *Theorie des Peltier-Effektes*, <http://www.siteware.ch/peltier/theorie.html> [Stand: 29.10.2019]

Schiessle, Edmund (2016): *Industriesensorik: Sensortechnik und Messwertaufnahme*, 2. Auflage, Vogel Business Media, Würzburg, ISBN: 978-3-834-33341-4

Schrüfer, Elmar; Reindl, Leonhard; Zagar, Bernhard (2018): *Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen*, 12. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, E-Book-ISBN: 978-3-446-45698-3

Schwarzer Precision GmbH + Co. KG (Hrsg.) (11.2018): *PDF Datenblatt: Eccentric Diaphragm Pumps for Liquids: 570 EC-LD*, https://www.schwarzer.com/pdf/SP_PUMPS_DataSheet_ClassECL_Series500L_Type570ECLD.pdf [Stand: 29.10.2019]

ViscoTec Pumpen- und Dosiertechnik GmbH (2015): *Produktdatenblatt: Dispenser RD-EC Reihe*, [Stand: 9/2015]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Punktförmige Oberfläche, Quelle: Achatz (2017), S. 45.....	2
Abbildung 2: Raupenförmige Oberfläche, Quelle: Achatz (2017), S. 45.....	2
Abbildung 3: Prozessschaubild für die Additive Fertigung mit Natriumacetat-Trihydrat, Quelle: In Anlehnung an Achatz (2017), S. 54.....	3
Abbildung 4: Pumpenarten, Quelle: Grabow (1993) (leicht modifiziert).....	7
Abbildung 5: Skizze des Druckvorgangs, Quelle: Eigene Darstellung.....	8
Abbildung 6: Schlauchpumpe, Quelle: pumpen-peters (2019).....	9
Abbildung 7: Membranpumpe, Quelle: Schwarzer Precision (2018).....	10
Abbildung 8: Anschluss eines Thermoelementes mit den Materialien A und B, Quelle: Hoffmann (2015), S. 135 (leicht modifiziert).....	11
Abbildung 9: Kennlinien verschiedener Thermoelementpaarungen, Quelle: Hoffmann (2015), S. 135.....	12
Abbildung 10: Mantelthermoelemente, Quelle: Hoffmann (2015), S. 137.	13
Abbildung 11: Kennlinien zweier Metall-Widerstandsthermometer, Quelle: Hoffmann (2015), S. 137.....	14
Abbildung 12: Drahtmesswiderstand, Quelle: Hoffmann (2015), S. 139.	14
Abbildung 13: Schichtwiderstand, Quelle: Hoffmann (2015), S. 139.....	14
Abbildung 14: Widerstandskennlinie eines Thermistors (1) und eines Widerstandsthermometers Pt-1000 (2), Quelle: Hoffmann (2015), S. 141.....	16
Abbildung 15: Widerstandskennlinie eines PTC-Widerstandes, Quelle: Hoffmann (2015), S. 142.....	17
Abbildung 16: Teilstrahlungs-pyrometer, Quelle: Grote/Bender/Göhlich (2018), S. W 23.....	18
Abbildung 17: Aufbau eines Peltierelementes, Quelle: deAcademic (2019) (leicht modifiziert).	19
Abbildung 18: Bauarten von Flüssigkeits-Luft-Kühlgeräten, Quelle: TelemeterElectronic (2019).....	20
Abbildung 19: Bauarten von Flüssigkeit-Flüssigkeit-Kühlgeräten, Quelle: Knap (2016).	20
Abbildung 20: Kanülenarten, Quelle: Gebrauchs.info (2012).	21
Abbildung 21: Schliffarten von Kanülen, Quelle: Gebrauchs.info (2012).....	21
Abbildung 22: Extruderdüsen, Quelle: aliexpress (2019), Onlinequelle [05.09.2019].	22
Abbildung 23: Schnittbild eines Dispensers, Quelle: ViscoTec (2015).	22
Abbildung 24: Punktueller Fluidauftrag, Quelle: ViscoTec (2019).	22
Abbildung 25: Raupenförmiger Fluidauftrag, Quelle: ViscoTec (2019).....	22
Abbildung 26: Vorlagebehältereinheit schematisch, Quelle: Eigene Darstellung.....	23
Abbildung 27: Magnetrührstäbchen, Quelle: bartelt (2019).....	23
Abbildung 28: Vorlagebehältereinheit, Quelle: Eigene Darstellung.	23
Abbildung 29: Transportleitung NORFLEX®, Quelle: NORRES (2019).	24
Abbildung 30: Exzenter-Membranpumpe SP 570 EC-LD, Quelle: Schwarzer Precision (2018).....	25

Abbildung 31: Fördermengen einzelner Membranpumpen, Quelle: Schwarzer Precision (2018).....	25
Abbildung 32: Temperaturmessfühler PT 1000.60, Quelle: IKA (2019).....	26
Abbildung 33: NTC-Thermistor (10 kΩ), Quelle: Eigene Darstellung.	26
Abbildung 34: Direkt-Flüssigkeits-Kühlgerät LL-210, Quelle: Laird Thermal Systems (2019).	27
Abbildung 35: Peltiercontroller QC-PC-CO-CH1, Quelle: Quick-Ohm (2016).....	28
Abbildung 36: Display QC-PC-D-CH1, Quelle: Quick-Ohm (2016).	28
Abbildung 37: Extruderdüsen, Quelle: aliexpress (2019), Onlinequelle [05.09.2019].	28
Abbildung 38: 5-Fräsmaschine, Quelle: Höchsmann (2019).....	29
Abbildung 39: Schema der 5-Achsfräsmaschine, Quelle: Eigene Darstellung.	29
Abbildung 40: Detailbild der Montagebohrungen, Quelle: Eigene Darstellung.	29
Abbildung 41: Horizontale Anordnung des Peltierkühlers, Quelle: Eigene Darstellung.	30
Abbildung 42: Sicherheitsschild der Fräsmaschine, Quelle: Eigene Darstellung.....	30
Abbildung 43: Senkrechte Anordnung des Peltierkühlers, Quelle: Eigene Darstellung.	31
Abbildung 44: Druckkopf in der Vorderansicht, Quelle: Eigene Darstellung.	32
Abbildung 45: Druckkopf in der Draufsicht, Quelle: Eigene Darstellung.....	32
Abbildung 46: Montage des Druckkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.	34
Abbildung 47: Zusammengebaute Druckkopfeinheit, Quelle: Eigene Darstellung.....	34
Abbildung 48: Aufbau des ersten Versuches, Quelle: Eigene Darstellung.	35
Abbildung 49: Zu große Fördermenge, Quelle: Eigene Darstellung.	36
Abbildung 50: Erstarrung im Zulaufschlauch, Quelle: Eigene Darstellung.....	36
Abbildung 51: Kühlung der Bauplattform, Quelle: Eigene Darstellung.	37
Abbildung 52: Erstarrungsverlauf Schicht 1 und 2, Quelle: Eigene Darstellung.	38
Abbildung 53: Verrinnen der 3.Auftragsschicht, Quelle: Eigene Darstellung.	38
Abbildung 54: Senkrechter Druckkopf, Quelle: Eigene Darstellung.	39
Abbildung 55: Korrekter Tropfen, Quelle: Eigene Darstellung.....	39
Abbildung 56: Tropfen seitlich angelegt, Quelle: Eigene Darstellung.	39
Abbildung 57: Düse mit Aderendhülse, Quelle: Eigene Darstellung.....	39
Abbildung 58: Düse mit Infusionsnadel, Quelle: Eigene Darstellung.....	39
Abbildung 59: Aufbau Dauerlaufversuch, Quelle: Eigene Darstellung.....	40
Abbildung 60: Dauerlaufversuch für SAT mit 43 gew% Wasser, Quelle: Eigene Darstellung.	40
Abbildung 61: Dauerlaufversuch für SAT mit 50 gew% Wasser, Quelle: Eigene Darstellung.	41
Abbildung 62: Regler im Kühlmodus, Quelle: Eigene Darstellung.....	41
Abbildung 63: Regler im Heizmodus, Quelle: Eigene Darstellung.....	41
Abbildung 64: Kühlung mit Ventilatoren und Druckluftgebläse, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Abbildung 65: 30-schichtiges Versuchsobjekt mit Kühlung, Quelle: Eigene Darstellung.	43

Abbildung 66: Versuchsaufbau - Kühlstudie, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Abbildung 67: Prozessschaubild Wärmezufuhr, Quelle: Eigene Darstellung.....	45
Abbildung 68: Unterschiedliche Düsenabstände zu den Auftragsschichten, Quelle: Eigene Darstellung.....	46
Abbildung 69: Materialauftrag mit Stickstoffkühlung, Quelle: Eigene Darstellung.....	46

Anhang

Datenblätter:

Datenblätter zur Kreislaufstudie mit 43 gew% Wasser im SAT.....56 ff.

Datenblätter zur Kreislaufstudie mit 50 gew% Wasser im SAT.....58 ff.

Technische Zeichnungen:

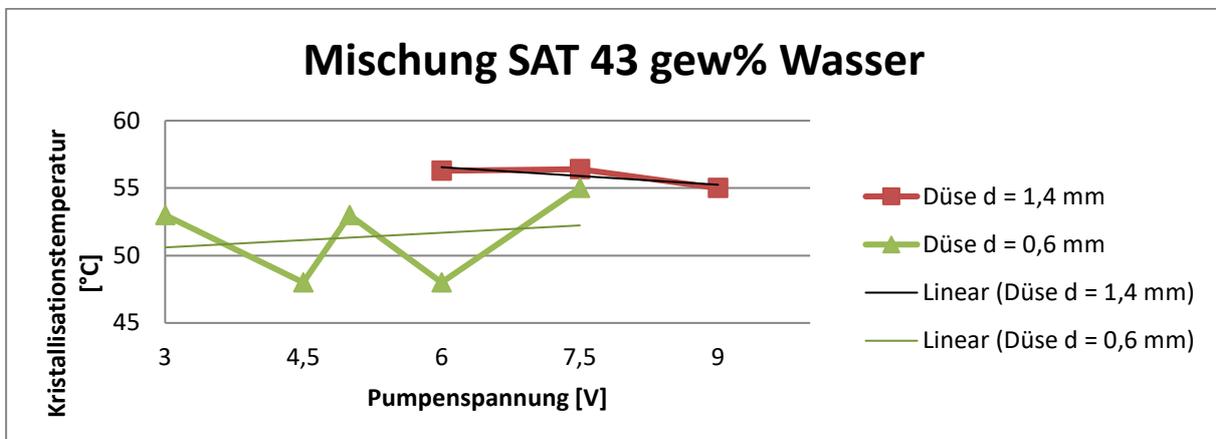
Zeichnungsnummer	Benennung
1	Düsenhalter
2	Rückschlagventil
3	Temperaturregler
4	Grundplatte
5	Deckel
6	Behälterschutz Grundblech
7	Behälterschutz Rohr
8	Distanzhülse
9	Schweißzeichnung Behälterschutz
10	Peltierkühler
11	Sensorbefestigung

Datenblätter zum Diagramm: Dauerlaufversuch mit 43 gew% Wasser im SAT, in Abbildung 60 auf Seite 40

Mischung SAT 43 gew% Wasser	Düse groß gerade (d = 1,4 mm)		
	Pumpenspannung [V]		
	9 V	7,5 V	6 V
Temperatur am Regler [°C]	Zeit [s]		
85	0	0	0
85	120	120	120
80	147	130	164
80	240	240	240
70	305	285	290
70	420	420	420
65	514	455	475
65	630	630	630
60	675	675	692
60	780	780	780
55	860	830	830
55	900	920	
auskristallisiert bei	900 s (55°C)	920 s (56,4°C)	830 s (56,3°C)
	15 min	15 min 20 s	13 min 50 s

Mischung SAT 43 gew% Wasser	Düse schräg klein (d = 0,6 mm)				
	Pumpenspannung [V]				
	7,5 V	6 V	5 V	4,5 V	3 V
Temperatur am Regler [°C]	Zeit [s]				
70	0	0	0	0	0
65	44	37	45	35	49
65	210	210	210	210	210
60	240	251	255	255	246
60	360	360	360	360	360
55	404	398	412	412	416
55	480	540	425	540	423
50		612		589	
50				610	
auskristallisiert bei	480 s (55°C)	612 s (48°C)	425 s [53°C]	610 s (48°C)	423 s (53°C)
	8 min	10 min 12 s	7 min 05 s	10 min 10 s	7 min 03 s

Mischung SAT 43 gew% Wasser		
	Kristallisationstemperatur	Pumpenspannung
Düse groß gerade (d = 1,4 mm)	56,3	6
	56,4	7,5
	55	9
Düse klein schräg (d = 0,6 mm)	53	3
	48	4,5
	53	5
	48	6
	55	7,5



Datenblätter zum Diagramm: Dauerlaufversuch mit 50 gew% Wasser im SAT, in Abbildung 61 auf Seite 41

Mischung SAT 50 gew% Wasser	Düse groß gerade (d = 1,4 mm)		
	Pumpenspannung [V]		
	7,5 V	4,5 V	3 V
Temperatur am Regler [°C]	Zeit [s]		
70	0	0	0
65	32	30	32
65	180	180	180
60	220	209	215
60	360	360	360
55	417	410	370
55	472		
auskristallisiert bei	472 s (54°C)	410 s (55°C)	370 s (58°C)
	7 min 52 s	6 min 50 s	6 min 10 s

Mischung SAT 50 gew% Wasser	Düse schräg klein (d = 0,6 mm)			
	Pumpenspannung [V]			
	7,5 V	6 V	4,5 V	3 V
Temperatur am Regler [°C]	Zeit [s]			
70	0	0	0	0
65	40	32	38	30
65	180	180	180	180
60	213	209	220	208
60	360	360	360	339
55	404	390	395	
55	540	540	410	
50	603	581		
50	720	720		
45	800	805		
45		900		
40		990		
auskristallisiert bei	800 s (48°C)	990 s (42°C)	410 s (52°C)	339 s (60°C)
	13 min 20 s	16 min 30 s	6 min 50 s	5 min 39 s

Mischung SAT 50 gew% Wasser		
	Kristallisationstemperatur	Pumpenspannung
Düse groß gerade (d = 1,4 mm)	58	3
	55	4,5
	54	7,5
Düse klein schräg (d = 0,6 mm)	60	3
	52	4,5
	42	6
	48	7,5

