



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

# **Masterarbeit**

Juliane Jahnke

## **Parameterentwicklung für Hotmelt-Klebmassen im freeform 3D-Druckverfahren**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

Juliane Jahnke

# Parameterentwicklung für Hotmelt-Klebmassen im freeform 3D-Druckverfahren



Masterthesis

im Studiengang Master Maschinenbau/Produktionstechnik und –management  
im Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

In Zusammenarbeit mit:

Tesa SE  
Hugo-Kirchberg-Straße 1  
22848 Norderstedt

Erstprüfer: Prof. Dr. Jens Telgkamp

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Sven Hansen

Datum der Anmeldung 18.06.2020

---

## Zusammenfassung

Juliane Jahnke

### **Thema der Masterthesis**

Parameterentwicklung für Hotmelt-Klebstoffen im freeform 3D-Druckverfahren

### **Stichworte**

Additive Fertigung, 3D-Druck, Druckqualität, Hotmelts, freeformer, Parameterentwicklung, Statistische Versuchsplanung

### **Kurzzusammenfassung**

In dieser Arbeit werden unter Zuhilfenahme von statistischer Versuchsplanung Druckparameter für die Verarbeitung von Hotmelt-Granulat in einem freeformer (3D-Drucker) entwickelt. Die ermittelten Parameter werden anhand verschiedener Prüfungen validiert und mit Ergebnissen aus dem herkömmlichen Produktionsverfahren verglichen. Die Übertragung auf ein Anwendungsbeispiel ist möglich. Der Einsatz von additiver Fertigung mit Hotmelts in einer industriellen Produktionsumgebung ist realistisch.

### **Titel of the Paper**

Parameter development for hotmelt adhesives in freeform 3D printing

### **Keywords**

Additive manufacturing, 3D-printing, quality of print, hotmelts, freeformer, parameter development, design of experiments

### **Abstract**

In this thesis parameters for processing hotmelt granulate in a freeformer 3D printer are developed with the help of design of experiments. The parameters determined are validated using various tests and compared with results from the conventional production process. The transfer to an application example is possible. The use of additive manufacturing with hotmelts in an industrial production environment is realistic.

---

## Vorwort und Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich während der Ausarbeitung dieser Thesis unterstützt haben.

Bei Prof. Telgkamp möchte ich mich für sein offenes Ohr und die Möglichkeit zum regelmäßigen Austausch bedanken. Die Meetings haben wirklich geholfen, zwischendurch alles zusammenzufassen und neu zu betrachten.

Auch wenn es manchmal frustrierend war, wenn nichts geklappt hat, wie es soll, habt ihr das Positive hervorgehoben und mir neue Anregungen gegeben. Vielen Dank für die tolle Betreuung, Frank und Manuel. „Es geht, du musst nur herausfinden, wie!“. Dieser Satz hat mich durch meine Arbeit begleitet und wird so schnell nicht aus meinem Kopf verschwinden.

Abschließend danke ich meiner Familie dafür, dass sie mir geholfen hat, meine Thesis und meinen Sport so gut unter einen Hut zu bekommen. Insbesondere im Endspurt hat das Korrekturlesen mit all den kritischen Fragen und Anmerkungen meine Arbeit wirklich bereichern können. Danke euch!

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....</b>	<b>vi</b>
<b>II.</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>vii</b>
<b>III.</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>viii</b>
<b>IV.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>ix</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Hintergrund.....</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Forschungsziel.....</i>	<i>1</i>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>2</b>
2.1	<i>Extrusion .....</i>	<i>2</i>
2.2	<i>Additive Fertigung.....</i>	<i>5</i>
2.2.1	<i>Verbreitete Verfahren .....</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>freeformer von Arburg .....</i>	<i>6</i>
2.3	<i>Hotmelts.....</i>	<i>9</i>
2.4	<i>Statistische Versuchsplanung.....</i>	<i>9</i>
<b>3</b>	<b>Versuchsvorbereitung .....</b>	<b>11</b>
3.1	<i>Materialherstellung .....</i>	<i>11</i>
3.1.1	<i>Rohstoffauswahl .....</i>	<i>11</i>
3.1.2	<i>Strangextrusion .....</i>	<i>13</i>
3.1.3	<i>Granulaterzeugung .....</i>	<i>14</i>
3.2	<i>Vorversuche .....</i>	<i>15</i>
3.2.1	<i>Versuchsdefinition.....</i>	<i>15</i>
3.2.2	<i>Basis-DoE .....</i>	<i>16</i>
3.2.3	<i>Auswertung Basis-DoE.....</i>	<i>18</i>
<b>4</b>	<b>Analytik.....</b>	<b>21</b>
4.1	<i>Viskosität.....</i>	<i>21</i>
4.2	<i>Materialqualifikation .....</i>	<i>22</i>
4.3	<i>Klebkräfte.....</i>	<i>24</i>
4.4	<i>Alterung .....</i>	<i>26</i>
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung .....</b>	<b>28</b>
5.1	<i>Ansatz des Herstellers .....</i>	<i>29</i>
5.2	<i>Statistische Versuchsplanung.....</i>	<i>30</i>

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

---

5.2.1	Aufbau Screening-Plan .....	30
5.2.2	Datenerfassung.....	31
5.2.3	Optimierung.....	34
5.3	<i>Parameterdefinition</i> .....	40
5.4	<i>Validierung</i> .....	41
5.4.1	A105_50.....	41
5.4.2	Massewechsel auf B105_50 .....	43
5.4.3	Prozessfenster überprüfen .....	48
5.5	<i>Klebtechnische Bewertung der Drucke</i> .....	50
5.5.1	Klebkräfte .....	50
5.5.2	Scherverhalten.....	53
5.6	<i>Optische Untersuchungen</i> .....	56
5.6.1	Optische Vermessung.....	56
5.6.2	Mikro-Computertomografie .....	64
5.7	<i>Anwendungsbezug</i> .....	65
<b>6</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>67</b>
6.1	<i>Zusammenführung der Erkenntnisse</i> .....	67
6.2	<i>Vorgehensempfehlung</i> .....	68
<b>V.</b>	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>70</b>
<b>Anhang</b>	.....	<b>72</b>

## I. Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

<i>Symbol/ Formelzeichen/ Abkürzung</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bezeichnung</i>
$\mu\text{CT}$		Mikro-Computertomografie
A	%	Austragswert
DoE		Design of Experiments (Statistische Versuchsplanung)
DSC		Differential Scanning Calorimetry
DSE		Doppelschneckenextruder
FDM		Fused Deposition Modeling
ff		Formfaktor
g	g	Gramm (Masse)
h	mm; $\mu\text{m}$	Höhe
os	mm	Offset
Pa.s	Pa.s	Pascalsekunde
PO		Pushout
PWE	-	Planetwalzenextruder
s	-	Standardabweichung
S		Schicht
t	min	Zeit
T; $T_{gG}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur; Glasübergangstemperatur
$\Delta T$	K	Temperaturdifferenz Kelvin
$\sigma$		Standardabweichung
$\bar{x}$		Mittelwert

### II. Glossar

Formfaktor	gibt beim freeformer das Verhältnis von der Tropfenbreite zur Höhe an; nimmt zusätzlich Einfluss auf den Abstand der Tropfen zueinander.
Austragswert	ein prozentualer Faktor der die Menge des ausgetragenen Materials an angibt; ist über die Öffnungszeit der Düse geregelt.
Offset	Abstand der Düsen spitze zum Untergrund

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich verschiedener Extruderformen.....	4
Tabelle 2 Verwendete Materialkombinationen .....	12
Tabelle 3 Temperaturen am Masseaustritt während Extrusion.....	14
Tabelle 4 Abschließender Probe-Versuchsplan mit Ergebnissen .....	17
Tabelle 5 Glasübergangstemperaturen der Granulate .....	23
Tabelle 6 Anorganische Restanteile nach Verbrennen.....	23
Tabelle 7 Klebkräfte standardbeschichtete Muster.....	25
Tabelle 8 Farbanteile Lappenmuster Vergleich frisch und gelagert bzw. gedruckt .....	26
Tabelle 9 Daten des Screening-Plans.....	32
Tabelle 10 Beschränkungen der ersten Optimierungsstufe Screening .....	34
Tabelle 11 Exportierte Lösungsvorschläge für angestrebte Zielwerte unter Berücksichtigung der Restriktionen.....	35
Tabelle 12 Daten des ersten erweiterten Plans.....	37
Tabelle 13 Daten des zweiten detaillierteren Plans .....	39
Tabelle 14 Parameter ausgewählter Muster der zweiten, detaillierteren Reihe .....	40
Tabelle 15 Ergebnisse Pushout-Versuche mit A105_50 .....	42
Tabelle 16 Versuchsplan zur Prozessfensterüberprüfung .....	48
Tabelle 17 Klebkräfte bei Prozessfensterüberprüfung von B105_50 .....	49
Tabelle 18 Mittelwerte Pushout Ergebnisse .....	51
Tabelle 19 Mittelwerte Pushout Ergebnisse 3D gedruckter Muster .....	53
Tabelle 20 Mittelwerte der Scherwege bei MSW .....	55
Tabelle 21 Vergleich zwischen Höhenmessung am 3D-Bild und mit Dickentaster .....	57
Tabelle 22 Vergleich von optisch vermessenen nicht-verklebten Pushout-Mustern .....	59

## IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Einordnung vom Strangpressen nach DIN8580 [4] .....	2
Abbildung 2 Schematischer Aufbau eines Einschneckenextruders [5] .....	3
Abbildung 3 Schematische Draufsicht DSE [5] .....	3
Abbildung 4 Aufbau eines PWE [6].....	4
Abbildung 5 Mit FDM-Verfahren gedruckter metallischer Konus [8].....	5
Abbildung 6 Schematischer Aufbau des Funktionsprinzips beim freeformer [9].....	6
Abbildung 7 Schematische Darstellung der Tropfenform beim Düsenaustritt [10].....	7
Abbildung 8 Temperaturzonen in Extrudereinheit des freeformers [11] .....	8
Abbildung 9 Extrusionsanlage [16] .....	13
Abbildung 10 Blackbox Modell zum Druckprozess [16] .....	15
Abbildung 11 Vorläufiger Probe-Versuchsplan .....	17
Abbildung 12 Korrelationsmatrix Vorversuche [11] .....	18
Abbildung 13 Beispieleffektgrafik aus Vorversuch [11] .....	19
Abbildung 14 Komplexe Viskosität verschiedener Mischungen über Temperatur [16].....	21
Abbildung 15 Aufbau einer Pushout-Probe [16] .....	24
Abbildung 16 Pushout Kurve A105_50, standardbeschichtet [20].....	25
Abbildung 17 Ausdrücke mit frischem Granulat im Vergleich zu gealtertem Granulat [16].....	27
Abbildung 18 Bemaßung für das Versuchs-Dreieck [mm] [16].....	28
Abbildung 19 Tropfenkette A105_50 bei steigendem Austrag [16] .....	29
Abbildung 20 Beispiel für ein Druck im ersten Screeningdurchlauf [11] .....	30
Abbildung 21 Würfelmodell der angefahrenen Eckpunkte im Screening-Plan [11].....	31
Abbildung 22 Korrelationsmatrix [11].....	32
Abbildung 23 Effektgrafiken für Screening-Plan [11].....	33
Abbildung 24 Würfelmodell der Eckpunkte im ersten detaillierten Versuchsplan [11].....	36
Abbildung 25 Beispielmessung der Linienbreite anhand von Mikroskopaufnahme [16].....	38
Abbildung 26 CAD-Grafik von ABS-Halterung mit Pushout-Platte und Verklebung [16] .....	41
Abbildung 27 Anordnung ABS-Halterungen für Pushout-Platten [16] .....	42
Abbildung 28 Einschichtiges Druckmuster B105_50 auf ABS; Vergleich 130°C und 145°C [16].....	45
Abbildung 29 Zweischichtiges Druckmuster B105_50 auf Glas mit Endparametern [16].....	46
Abbildung 30 Tropfenkette B105_50 A70 (l. T116; r. T140) [16] .....	46
Abbildung 31 PO-Kurvenverlauf im Vergleich (linke Seite frische Lappenmuster, rechte Seite 3D gedruckt; oben A105_50, unten B105_50) [20].....	50
Abbildung 32 Fibrillenausbildung bei gedrucktem Pushout-Muster [16].....	52
Abbildung 33 Skizze MSW Probenvorbereitung nach Tesa Standard [24] .....	54
Abbildung 34 Beispielkurve MSW mit Relaxation [24] .....	54
Abbildung 35 Verschieden bedruckte MSW Prüfplatten [16] .....	55
Abbildung 36 Beispielbild: Streifenmuster auf einem Objekt (150 x 150 x 90mm <sup>3</sup> ) [25] .....	56
Abbildung 37 3D Aufnahme eines gedruckten Dreiecks [16].....	57
Abbildung 38 Vergleich freistehender Linien bei T140 und T200 gedruckt [16].....	60
Abbildung 39 Ergebnisse aus Prozessfensterüberprüfung nach Musterhöhe sortiert [20] .....	61
Abbildung 40 Muster Prozessfensterüberprüfung A55 und A85 Vergleich [16] .....	62
Abbildung 41 Anonymisierter Pushout-Prüfling [16].....	63

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 42 Benetzungsoberfläche von gedruckten Pushout-Mustern im Vergleich zu standardbeschichtetem [16].....	63
Abbildung 43 3D-Aufnahme aus $\mu$ CT [18].....	64
Abbildung 44 $\mu$ CT-Aufnahme: Position der ersten, dritten und fünften Lage im Vergleich [18] ...	65
Abbildung 45 Optische Vermessung einer gedruckten Handyrahmenverklebung auf Stahl [16]	66
Abbildung 46 Sortierung ausgewählter Muster von über- bis unterfüllt [16] .....	67

## 1 Einleitung

### 1.1 Hintergrund

Nachhaltigkeit sowie die Vermeidung von Abfall ist ein immer größer werdendes Ziel in der Politik vieler Unternehmen. Zum einen können durch die Müllreduktion Kosten für Materialien und der Bedarf wertvoller Ressourcen vermindert werden, zum anderen hat der Nachhaltigkeitsgedanke auch eine positive Wirkung auf Kunden [1].

Auch vor der Klebstoffindustrie macht diese Entwicklung nicht Halt. Laut einer internen Studie bei Tesa, verbleiben bei so genannten Cut-outs in der Herstellung bis zu mehr als 90% des Klebebandes im Müll, abhängig von der ausgestanzten Form. Bei dem Stanzen von Handyrahmenverklebung werden sogar nur 4% der produzierten Klebmasse im Endprodukt verwendet. [2]

Mit über 24.200 angemeldeten Patenten allein im Jahr 2018 [3] ist der 3D-Druck bzw. die additive Fertigung ein stark wachsender Industriezweig mit vielen Möglichkeiten. Die Idee, Klebmassen in der additiven Fertigung zu verwenden, ist nicht neu. Heißklebepistolen beispielweise werden schon seit Jahren vor allem im DIY-Bereich zum Erzeugen von Texturen oder Formen abseits von Klebungen verwendet. Aufschmelzbare und dauerhaft klebrige Massen im 3D-Druck zu verwenden, ist jedoch ein neuer Ansatz, der der Verschwendung von Rohstoffen entgegenwirken könnte. Zunächst bieten additive Produktionsverfahren die Möglichkeit, Kleinserien und Prototypen bei verhältnismäßig geringem Aufwand herzustellen. Das langfristige Ziel kann jedoch die Implementierung dieses Verfahrens in die Massenproduktion sein.

### 1.2 Forschungsziel

In dieser Arbeit soll untersucht werden, unter welchen Bedingungen heißschmelzende Klebmassen (Hotmelts) im 3D-Druck zu verarbeiten sind. Außerdem wird geklärt, ob die Parameter unter verschiedenen Mischungen, unter Berücksichtigung spezifischer Materialeigenschaften wie der Viskosität, übertragbar sind oder ob weitere Anpassungen vorgenommen werden müssen. Das Endziel ist der Druck eines realen Anwendungsbeispiels (Handyrahmenverklebung).

Es geht an dieser Stelle nicht darum, eine Bewertung der Druckergebnisse im Vergleich zu standardmäßig hergestellten Proben durchzuführen. Stattdessen sollen sämtliche Vergleiche wertungsfrei auf die Unterschiede im Prozess und in den Ergebnissen hinweisen und die dadurch entstehenden Möglichkeiten näher betrachtet werden. Da es sich beim 3D-Druck um ein alternatives Beschichtungsverfahren handelt ist abweichendes Verhalten zu standardbeschichteten Proben zu erwarten. Dieses Verhalten kann für spätere Anwendungszwecke sowohl Vor- als auch Nachteile bringen, die in dieser Arbeit untersucht werden sollen.

## 2 Stand der Technik

Im Zuge der Arbeit an dieser Thesis wird vorwiegend das Fertigungsverfahren „Extrudieren“ betrachtet. Dieses findet sowohl in der Materialherstellung als auch im anschließenden Verarbeitungsprozess im 3D-Drucker Anwendung.

Im Folgenden wird zunächst der grundlegende Ablauf einer Extrusionsanlage erläutert und im Anschluss auf die Besonderheit bei dem verwendeten Druckverfahren im Vergleich zu den weiter verbreiteten Methoden der additiven Fertigung eingegangen.

Auch Hotmelts und die Methode der statistischen Versuchsplanung, welche Anwendung in dieser Thesis finden, werden nachfolgend kurz erläutert.

### 2.1 Extrusion

Beim Extrudieren wird eine viskose Masse unter Druck durch eine Düse getrieben und erhält so ihre Form, in der sie schließlich aushärtet. Die Bezeichnung leitet sich von dem Lateinischen *extrudere* (herausstoßen bzw. austreiben) ab. Der dabei entstehende Strang kann theoretisch eine beliebig gewählte Länge haben. Auch die Form kann durch verschiedene Düsen in vielerlei Hinsicht variiert werden.

Das Extrudieren bzw. Strangpressen ist nach DIN 8580 dem Fertigungsverfahren „Urformen aus dem plastischen Zustand“ zuzuordnen. Es handelt sich demnach um das „Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes“ [4].

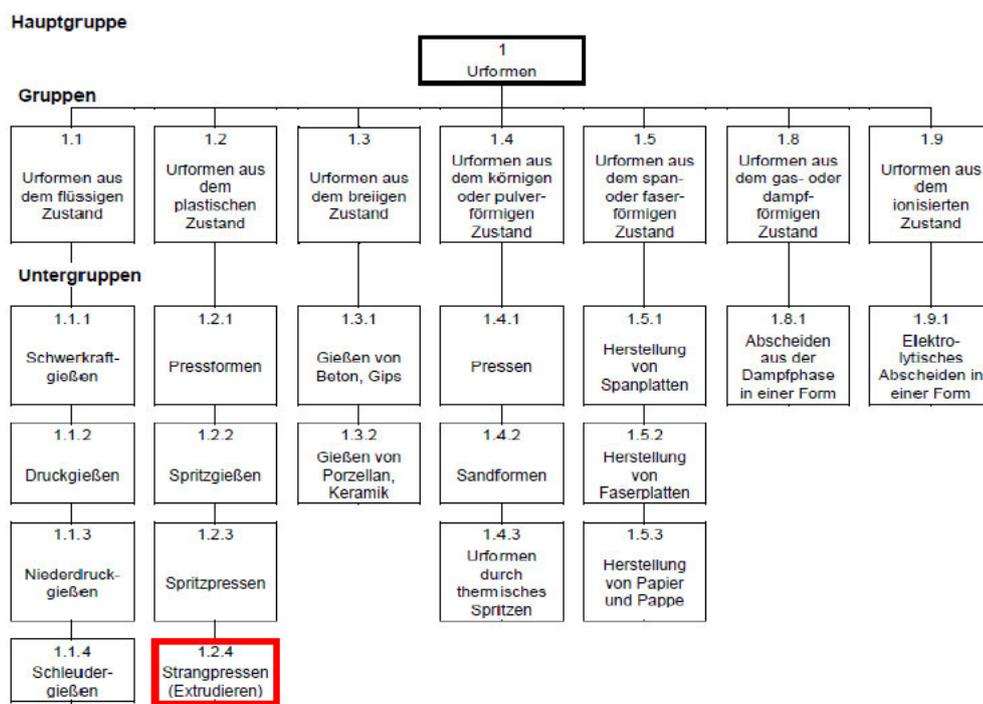


Abbildung 1 Einordnung vom Strangpressen nach DIN8580 [4]

Beim Extrudieren wird zunächst Granulat über einen Trichter einer Schnecke zugeführt. Diese fördert das Granulat in Richtung der Düse. Dabei wird es sowohl durch Temperierung von außen mittels beispielsweise Heizbändern, von innen über die durch Rotation eingebrachte Scherenergie in der Schnecke aufgeschmolzen und plastifiziert. Das kontinuierlich geförderte Material strömt an der Düse als einheitlicher Strang aus (siehe Abbildung 2).

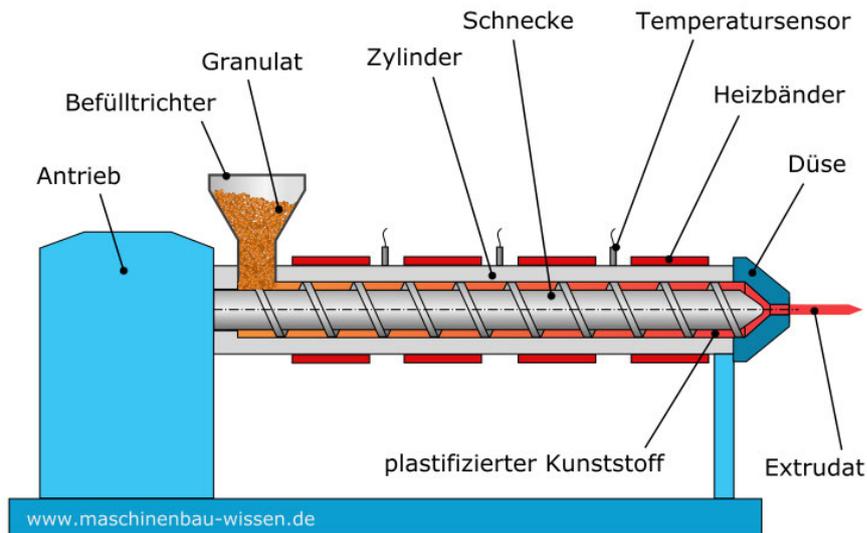


Abbildung 2 Schematischer Aufbau eines Einschneckenextruders [5]

Die Form der Schnecken und der Aufbau im Zylinder können sich je nach Anwendung unterscheiden. Für nahezu jedes Material bzw. jede Materialkombination existiert eine geeignete Extrusions-Konfiguration. An dieser Stelle werden nur der schematische Aufbau sowie die Vor- und Nachteile von Doppel- und Planetwalzenextrudern gegenüber einem Einschneckenextruder erläutert.

Bei einem Doppelschneckenextruder (DSE; Bsp. Abbildung 3) sind im Zylinder zwei Schnecken nebeneinander angeordnet. Sie können sich entweder gleichläufig oder gegenläufig bewegen. Auch hier erfolgt die Temperierung in der Regel von außen.

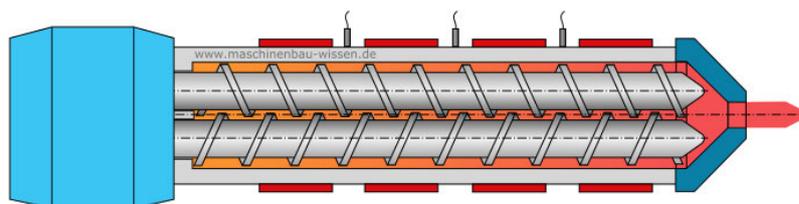


Abbildung 3 Schematische Draufsicht DSE [5]

Bei einem Planetwalzenextruder (PWE; Bsp. Abbildung 4) sind mehrere frei drehende kleinere Spindeln um eine angetriebene Zentralspindel herum angeordnet. Hier ist es oft üblich, zusätzlich zu der Temperierung von außen, auch von innen zu temperieren.

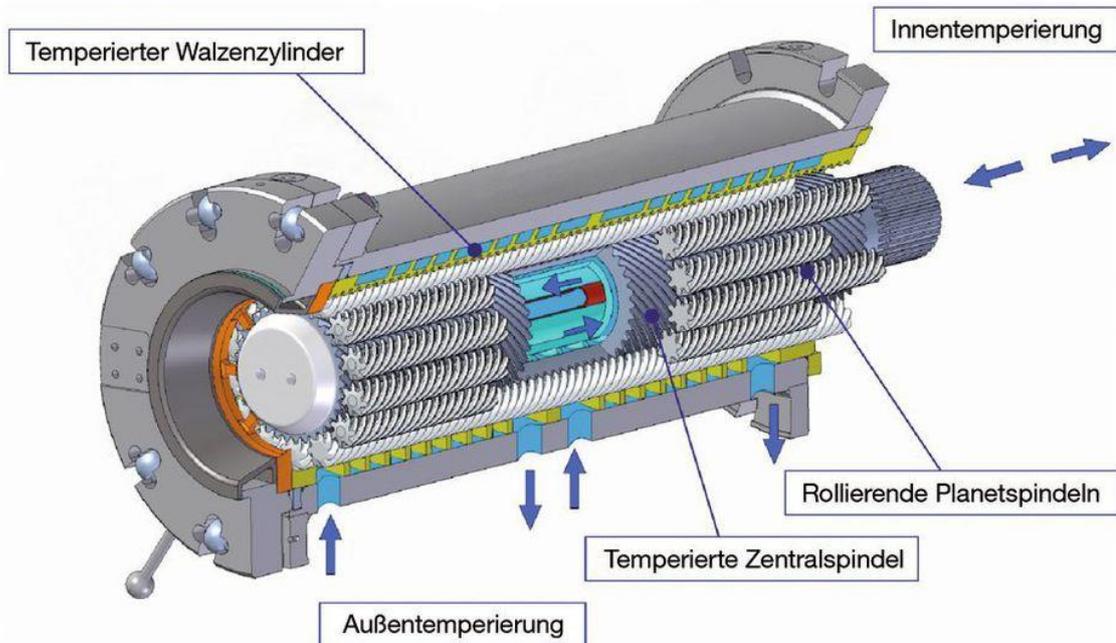


Abbildung 4 Aufbau eines PWE [6]

Jede Extruderform hat Stärken und Schwächen. In der nachfolgenden Tabelle 1 sind einige Vor- und Nachteile der vorgestellten Formen aufgelistet.

Tabelle 1 Vergleich verschiedener Extruderformen

Extruder	Vorteile	Nachteile
Eine Schnecke	Gleichmäßiger Strang Einfacher Aufbau	Wenig Scherung Keine gute Durchmischung
Doppelschnecke	Einfache Entgasung Gleichmäßiger Einzug	Neigt zu pulsartigem Austrag Hohe mechanische Belastung der Schnecken
Planetwalzen	Viel Scherung Sehr gute Durchmischung	Hoher Lufteintrag Komplexer Aufbau

## 2.2 Additive Fertigung

Auch die additive Fertigung wird in der Regel dem Urformen zugeordnet, wenn auch sie noch nicht in der DIN an der entsprechenden Stelle erfasst ist. Generell wird bei der additiven Fertigung schichtweise ein Bauteil aufgebaut, wobei das Ausgangsmaterial für die Schichten unterschiedlicher Natur sein kann. Das Verfahren wird oft auch als 3D-Druck bezeichnet. Für den Druck wird immer ein virtuelles 3D-Modell des Bauteils benötigt, welches mit einem entsprechenden Slicing-Programm in Schichten zerlegt und so von dem Drucker verarbeitet werden kann. Eine Slicing-Software dient der Umsetzung eines 3D-Modells in eine für den Drucker verarbeitbare Date mit allen notwendigen Informationen wie beispielsweise Linienbreite, Abstand, Höhe, Positionierung und Ausrichtung.

### 2.2.1 Verbreitete Verfahren

Nach einer Statisa Umfrage von 2018 ist mit 46% das meistgenutzte 3D-Druck-Verfahren das so genannte Fused Deposition Modeling (FDM) [7]. Dabei wird ein Filament oder ein Draht von einer Rolle abgewickelt und durch eine Düse gefördert. Hier wird es teilweise aufgeschmolzen. Die angeschmolzene Masse wird auf einer Platte in Raupen abgelegt. So wird Schicht für Schicht das Bauteil erstellt (vgl. Abbildung 5). Für überstehende Strukturen wird Stützmaterial benötigt, welches im Nachgang entfernt werden muss.



Abbildung 5 Mit FDM-Verfahren gedruckter metallischer Konus [8]

Die Bauteile sind aufgrund ihrer Struktur in der Regel gut auf Druck belastbar, auf Zug nur parallel zur Schichtorientierung.

Es gibt bereits Systeme, die den Schritt der Filamentherstellung überspringen und direkt Granulat verarbeiten. Dieses wird in einem kleinen Extruder aufgeschmolzen und kontinuierlich durch eine Düse auf die Bauplatte aufgetragen. Im Folgenden wird dieses Verfahren als „Granulat-Extrusions-Druck“ (GED) bezeichnet. Die gedruckten Teile weisen ähnliche Eigenschaften zu denen aus dem FDM-Drucker auf.

Bei dem zweithäufigsten Verfahren (38%), dem Selective Laser Sintering (SLS), wird eine Pulverschicht gleichmäßig auf die Druckplatte aufgetragen und dann stellenweise mit einem Laser aufgeschmolzen. Diese Abfolge wiederholt sich, bis der oder die Körper fertig aufgebaut ist/sind. Das überschüssige Pulver kann erneut verwendet werden und dient im Druck als Stützmaterial, sodass das Bauteil ohne Nachbearbeitung direkt einsatzfähig ist.

Ähnlich funktionieren die Stereolithography (SLA; 33% Anwendungshäufigkeit) und das Direct Metal Laser Sintering (DMLS; 21% Häufigkeit). Bei der SLA wird flüssiges Harz als Modelliermedium verwendet, welches punktuell mittels eines Lasers ausgehärtet wird. Das DMLS arbeitet mit Metallpulver als Medium, ansonsten ist es das gleiche Verfahren wie das SLS. Die Belastbarkeit der Drucke hängt primär von der Dichte der Schmelzpunkte und der Menge der Lufteinschlüsse ab. Sie weisen in alle Richtungen ähnliche Eigenschaften auf.

Alle weiterhin häufig verwendeten Verfahren basieren auf den gleichen Prinzipien wie die vorgestellten.

### 2.2.2 freeformer von Arburg

Einen ähnlichen Ansatz zu dem GED-Verfahren, hat auch der Spritzgussmaschinenhersteller Arburg gewählt. Der von ihm entwickelte „freeformer“ legt jedoch keinen kontinuierlichen Strang auf der Bauplatte ab, sondern reihenweise einzelne Tropfen. Die Tropfen verbinden sich dabei zu allen Seiten hin und formen im Idealfall ein zu allen Seiten hin gleichmäßig belastbares, homogenes Bauteil (siehe Abbildung 6) individuell regulierbarer Dichte. Dieses Verfahren wird in der vorliegenden Thesis für den Druck von heißschmelzenden Klebmassen verwendet.

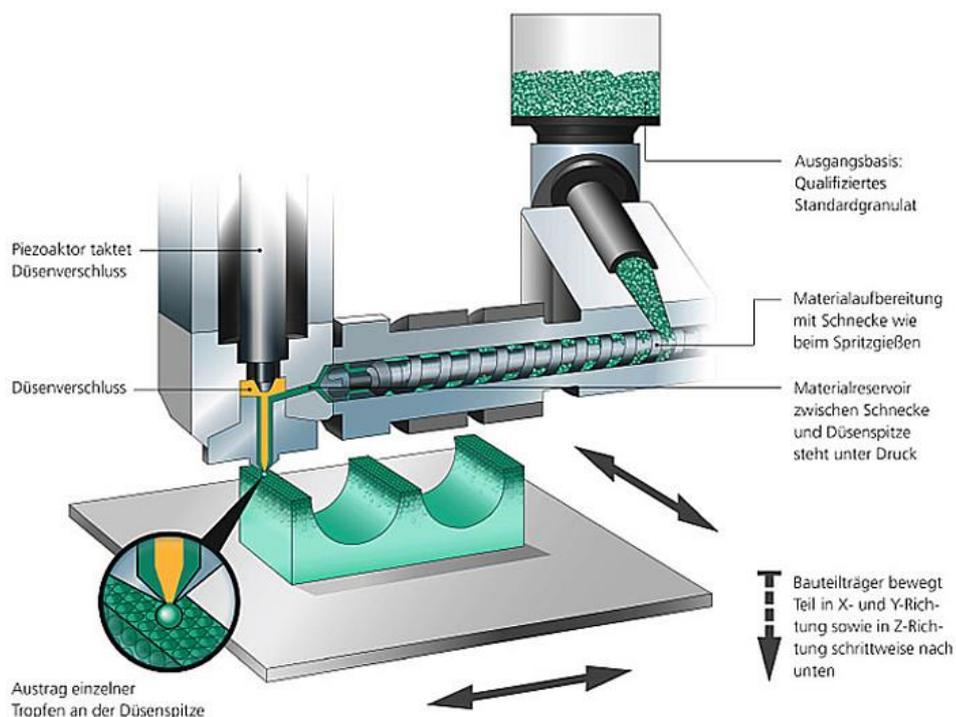


Abbildung 6 Schematischer Aufbau des Funktionsprinzips beim freeformer [9]

Dem Anwender stehen verschiedene Möglichkeiten offen, den Druck zu steuern und so das Endergebnis in der gewünschten Qualität zu produzieren. Die optimalen Parameter sind für jedes Material und gewünschte Ergebnis individuell festzulegen.

Zum einen kann die Tropfenform eingestellt werden. Diese wird durch den Austragswert A, welche die Tropfenhöhe regelt, und den Formfaktor ff bestimmt. Der Formfaktor gibt das Verhältnis von der Tropfenbreite zur Höhe an:

$$ff = \frac{\text{Tropfenbreite}}{\text{Tropfenhöhe}}$$

Die tatsächliche Aufweitung des Tropfens nach dem Austritt aus der Düse (vgl. Abbildung 7) ist materialabhängig, die Verhältnisse sind demnach für jedes Material individuell festzulegen.

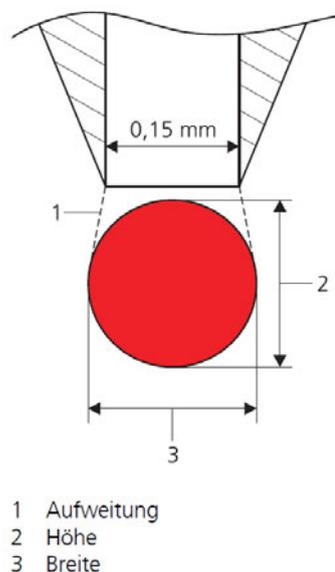


Abbildung 7 Schematische Darstellung der Tropfenform beim Düsenaustritt [10]

Dabei nimmt der Formfaktor zusätzlich Einfluss darauf, wie dicht beieinander die Tropfen gesetzt werden. Er muss daher im Slicer festgelegt werden.

Der Austragswert kann an der Maschine direkt eingestellt werden und ist ein prozentualer Faktor, der über die Öffnungszeit der Düse geregelt ist. Zudem kann die Füllichte reguliert werden, indem die Anzahl der nebeneinander abgelegten Linien verändert wird.

Da bei dem freeformer der Bauraum geschlossen ist, kann er komplett über ein Heizgebläse temperiert werden, sodass nicht nur die unterste Schicht auf der Platte erwärmt ist. Auch die Bauraumtemperatur ist für jedes Material individuell einzustellen. Der Druck findet auf einer einlegbaren, nicht wiederverwendbaren Platte statt, üblicherweise aus ABS. Sie wird über ein Vakuum am beweglichen Bauteilträger festgehalten, sodass sie sich stabil mit diesem bewegt. Nach dem Druck wird die Platte zusammen mit dem Bauteil entnommen.

Zuletzt kann noch die Düse gewechselt werden, um eine andere Druckqualität zu erreichen. Der Austausch ist bei dem in dieser Thesis verwendeten Modell jedoch sehr aufwendig, daher wird konstant eine Düse mit einem Öffnungsdurchmesser von 0,2mm eingesetzt.

Das verwendete freeformer-Modell besitzt zwei Druckeinheiten bzw. Materialaufbereitungen. Eine davon wird üblicherweise für das Hauptmaterial, hier ABS, verwendet, mit der anderen wird die Stützstruktur aus löslichem Material gedruckt. Für die Zwecke von Tesa wurde die zweite Masse stattdessen auf Hotmelts (siehe 0) umgestellt, sodass auch Verbundbauteile aus ABS und Hotmelt gedruckt werden könnten.

Der Gesamtaufbau der Extrudereinheit ist in Abbildung 6 dargestellt. Für diese Thesis relevant sind vorwiegend die verschiedenen Temperaturzonen der Materialaufbereitung bzw. der Austragseinheit. Diese sind individuell ansteuerbar, mit dem Materialeinzug als kältesten und die Austragseinheit als wärmsten Punkt (vgl. Abbildung 8). Das Granulatreservoir verfügt zusätzlich über eine Trocknungseinheit, die einen konstanten Luftstrom durch das Granulat erzeugt und so verhindert, dass dieses Feuchtigkeit zieht. Auch diese kann individuell geregelt werden.

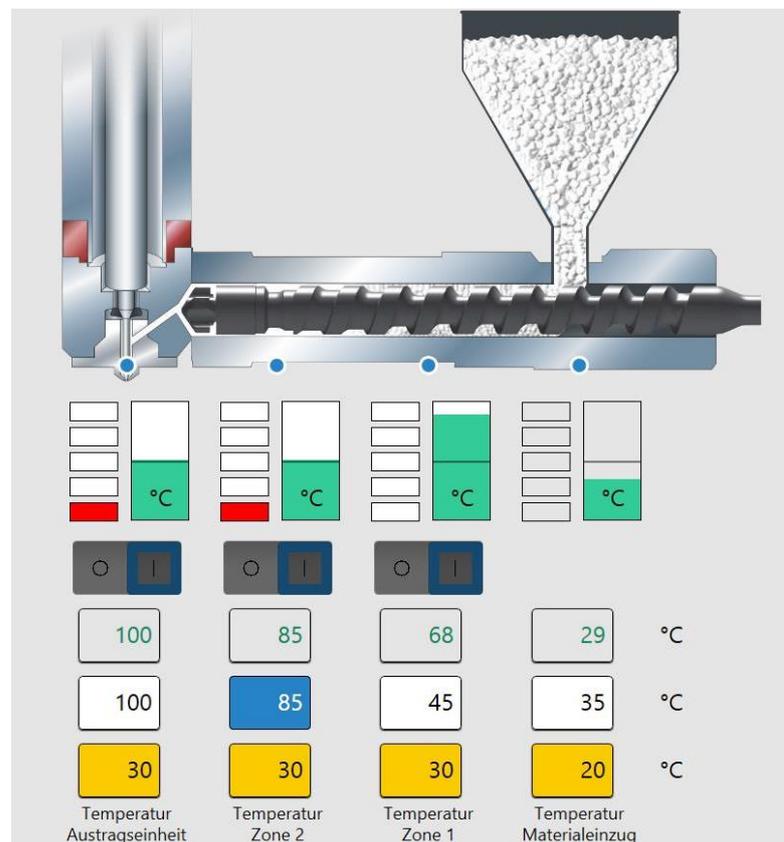


Abbildung 8 Temperaturzonen in Extrudereinheit des freeformers [11]

### 2.3 Hotmelts

Als Hotmelts werden lösemittelfreie Klebmassen bezeichnet, die als Schmelze verarbeitet werden. Das bekannteste Anwendungsbeispiel für diese Technologie sind beheizte Handpistolen (Heißklebepistolen) [12]. Aufgeschmolzen kann mit der Klebmasse ein fester Verbund erzeugt werden, der durch erneutes Erhitzen reversibel ist. Hotmelts werden in der Industrie in der Regel als Beschichtung verwendet, die dünn auf ein Trägermedium aufgetragen und dann mit einem Liner abgedeckt wird. Lösemittelfreie Klebebänder und die Verklebungen bei Babywindeln werden so beispielsweise hergestellt. Diese beschichteten Flächen werden zum Teil auch zerkleinert und als Stanzlinge weiterverarbeitet. Dieser Standardprozess wird insbesondere in der Masseentwicklung verwendet, um das Produkt genau untersuchen zu können.

Hergestellt werden können Hotmelts beispielsweise durch das Extrudieren von Harzen und Kautschuken, bei Bedarf ergänzt durch Additiven wie Alterungsschutzmittel oder Weichmacher. Natürliche Harze sind bei Raumtemperatur zähflüssige bis harte Gemische aus verschiedenen Pflanzenprodukten und können gezielt zum Beispiel durch das Anritzen von Baumrinde abgezapft werden. Synthesharze werden in der Regel aus zwei Komponenten hergestellt. Die bekanntesten Vertreter sind hiervon Epoxide, die vielfältig im DIY-Bereich für diverse Projekte eingesetzt werden. Auch Kautschuke können sowohl natürlich aus der Kautschukpflanze gewonnen oder synthetisch produziert werden. Kautschuk ist ein elastisches Polymer, das beispielsweise auch in der Herstellung von Autoreifen Anwendung findet. Bei Hotmelts sorgt der Kautschukanteil primär für ausreichend elastisches Verhalten, das Harz für die Klebrigkeit. (Persönliches Gespräch mit F. Virus, März 2020)

Wie alle Klebstoffe wird auch bei Hotmelts die Klebrigkeit bzw. Haftung in drei Kategorien unterschieden. Zum einen gibt es die so genannte Anfassklebrigkeit bzw. den Tack. Er trägt nicht zur langfristigen Tragleistung bei, sondern ist nur die Sofort-Klebrigkeit der Masse. Die Haftung zwischen der beklebten Oberfläche(n) und der Klebmasse wird mit dem Prinzip der Adhäsion beschrieben. Sie kann sowohl durch eine chemische Reaktion in der Grenzfläche, mechanisch durch minimales Verklemmen oder aufgrund von Molekularkräften erzeugt werden. Die innere Tragfähigkeit, der Zusammenhalt der Klebmasse in sich, wird als Kohäsion bezeichnet. Sie wird bei Klebstoffen beispielsweise durch ein Verschlaufen der Molekülketten erzeugt. [13]

### 2.4 Statistische Versuchsplanung

In dieser Thesis wird ein strategischer und logisch sinnvoller Lösungsansatz angestrebt. Ein gutes Mittel, um dieses Ziel bei überschaubarem Einsatz von Versuchen zu erreichen, ist die statistische Versuchsplanung bzw. Design of Experiments (DoE). Hauptquelle für die Arbeit mit DoE war das Buch „Statistische Versuchsplanung“ in der 2. Auflage des Springer Verlags [14]. Alle in dieser Thesis durchgeführten Analysen und Bewertungen der DoE basieren auf den Erkenntnissen dieses Werkes.

Bei einem DoE werden gezielt und in willkürlicher Reihenfolge Versuchspunkte mit bestimmten Einstellungskombinationen angefahren. So kann in der anschließenden Verarbeitung der Daten und Auswertung eine Aussage über statistische Relevanz einzelner Einstellungen

getroffen werden und inwieweit eine Kombination das Endergebnis beeinflusst. Dabei ist es nicht notwendig, jede Kombination zu prüfen. Effekte können schon durch das gezielte Ansteuern ausgewählter Kombinationen mit guter Näherung berechnet werden. So wird vorwiegend der Versuchsaufwand gegenüber beispielsweise Einvektoriellen-Versuchsplänen, bei denen immer nur jeweils ein Parameter schrittweise verändert wird, reduziert. Zudem werden auch Werte außerhalb der bekannten bzw. üblichen Betrachtung untersucht und Wechselwirkungen herausgearbeitet.

Die Berechnungen und statistische Bewertung der Ergebnisse können händisch durchgeführt werden, doch es sind auf dem Markt diverse Software verfügbar, die diese Aufgabe schneller, genauer sowie flexibler übernehmen. Unter den gängigsten Programmen ist „Design Expert“ des Entwicklers Stat-Ease Inc., welches für die statistische Versuchsplanung in dieser Thesis verwendet wird.

Je nach Ziel und Anwendungsfeld der Versuche können in der Software verschiedene Versuchspläne mit unterschiedlicher Tiefe bzw. Levels erstellt werden. So ist es möglich beispielsweise auf verschiedene Rezepturen einzugehen, Temperaturen zu überprüfen oder anderes.

Die Level geben dabei die Auflösung an. Bei einem einfachen Screening-Versuchsplan werden beispielsweise nicht alle Punkte angefahren, um Versuche zu sparen. Trotzdem ist durch eine gleichmäßige Verteilung der Versuche sichergestellt, dass Trends erkannt werden. Durch das Ergänzen von Versuchen bis hin zu einem Vollversuchsplan, können Wechselwirkungen höheren Grades genauer bestimmt werden. Dabei ist es jedoch für die Auswertung der Versuchspläne, egal in welcher Auflösung, relevant, wie gut die Messgrößen zur Bewertung der Ergebnisse sind. Schlechte bzw. ungenaue oder nicht näher spezifizierte Ausgangsgrößen führen zu einer unsauberer Analyse mit Ergebnissen ohne hohe Aussagekraft.

Auf die Umsetzung von Versuchsplänen mit Design-Expert wird in späteren Kapiteln näher eingegangen.

## 3 Versuchsvorbereitung

Bevor mit der eigentlichen Versuchsreihe begonnen werden kann, muss zunächst eine Grundlage für diese geschaffen werden. In diesem Kapitel wird daher folgendes geklärt:

1. Wie wird das Granulat erzeugt, welches für den Druckprozess benötigt wird?
2. Wie muss ein statistischer Versuchsprogrammplan aufgebaut sein, damit er als Basis für die Versuchsreihen genutzt werden kann?

### 3.1 Materialherstellung

Die Herstellung des Granulats ist hier ein mehrteiliger Prozess von der Auswahl der Rohstoffe über die Verarbeitung im Extruder hin zum Granulieren, der zum Teil auch händisch erfolgt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass für die nachfolgenden Versuche keine automatisierte Produktion zur Verfügung steht und aus dem Werkzeugbestand passende Mittel zusammengestellt werden müssen.

#### 3.1.1 Rohstoffauswahl

Bei der Auswahl der kombinierten Rohstoffe (Harz und Synthekautschuk) spielen mehrere Faktoren eine Rolle. Zum einen ist die generelle Verarbeitbarkeit des Kautschuks von Bedeutung. Je länger die Ketten bzw. je komplexer die innere Struktur, desto höher ist der Energiebedarf für die Verarbeitung. Beim Harz wird diese maßgeblich von der Schmelztemperatur bestimmt. Harz mit einem niedrigen Schmelzpunkt ist leichter zu verarbeiten als mit einem hohen, da der benötigte Energieeintrag deutlich niedriger ist. Beim Synthekautschuk ist die Struktur ausschlaggebend. Kurzkettige Kautschuke sind einfacher zu verarbeiten, als langkettige. Am schwierigsten sind solche Kautschuke zu verarbeiten, die einen komplexen Aufbau in ihrer Molekülstruktur aufweisen. Je komplexer der Aufbau, desto mehr Scherung wird benötigt, um den Kautschuk komplett aufzuschließen und mit dem Harz homogen zu verbinden.

Da vor Beginn der Versuche nicht absehbar war, wie sich die Massen später im Drucker beim Wiederaufschmelzen verhalten würden, wurden mehrere Kombinationen aus verschiedenen Rohstoffen hergestellt, jeweils mit unterschiedlichen Harz- und Kautschukanteilen. In der Industrie üblich sind Verhältnisse von bis zu 60/40, da es in dieser Arbeit jedoch nicht um das Erreichen besonderer Materialkennwerte, sondern um das Verständnis des Materialverhaltens in der Weiterverarbeitung geht, wurde hier nur die verwendeten Rohstoffe im Bereich von 50/50 bis maximal 45/55 variiert.

Folgende Rohstoffe wurden in verschiedenen Mischungen weiterverarbeitet:

Harz

- F105
- PA115

Synthesekautschuk

- 7318
- 1152
- 711

Sortiert sind sie hier von oben nach unten mit aufsteigend aufwendigerer Verarbeitung. Im Folgenden wird nur der Code als Bezeichnung angegeben.

Während der Verarbeitung hat sich gezeigt, dass das F105 in Kombination mit 7318 und 1152 gut zu verarbeiten ist. Das 711 benötigte aufgrund seiner komplexen Struktur deutlich mehr Scherung. Die Kombination von 711 mit dem höher schmelzenden Harz PA115 wurde verzichtet, da es schon bei der Mischung von 711 und F105 Probleme in der Verarbeitung gab. Der Kautschuk wurde hier nicht komplett aufgeschlossen, die eingetragene Scherung war zu gering. Stattdessen wurden nur A115 und 1152 kombiniert. Diese Kombination war ohne Probleme zu verarbeiten.

Folgende Kombinationen sind erstellt worden (Verhältnis Harz/Kautschuk):

*Tabelle 2 Verwendete Materialkombinationen*

Kautschuk \ Harz	7318 (A)			1152 (B)			711 (C)		
	F105	45/55 *	50/50	55/45	45/55	50/50	55/45	-	50/50
PA115	-			48/52	50/50		-		

Die Bezeichnung der Muster erfolgt nach folgender Systematik:

Materialcode\_Anteil Kautschuk

Der Materialcode setzt sich zusammen aus dem Kürzel des Kautschuks (A, B, C) und der Glasübergangstemperatur des Harzes. Eine Mischung aus beispielsweise 7318 und F105 mit jeweils einem Anteil von 50% ist demnach mit A105\_50 bezeichnet.

Zu allen Mischungen wurde ein kleiner Anteil Alterungsschutzmittel hinzugegeben, um das Material langfristig verwertbar zu halten. Er macht nicht mehr als 1% der Gesamtmasse aus. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass Mischungen ohne Alterungsschutz schnell abbauen und nicht mehr verwertbar sind (vgl. Unterkapitel 4.4).

### 3.1.2 Strangextrusion

Die Verarbeitung der ausgewählten Rohstoffe erfolgt in einer kleinen Produktionsanlage vor Ort. Die genutzten Anlagen sind ein ungekühlter Planetwalzenextruder (PWE) mit einem nachgeschalteten Doppelschneckenextruder (DSE; Abbildung 9). Abgekühlt wird der extrudierte Strang in einem Wasserbad und abschließend mit Talkum gepudert, um ein Verkleben des Strangs zu verhindern (außerhalb der Abbildung).

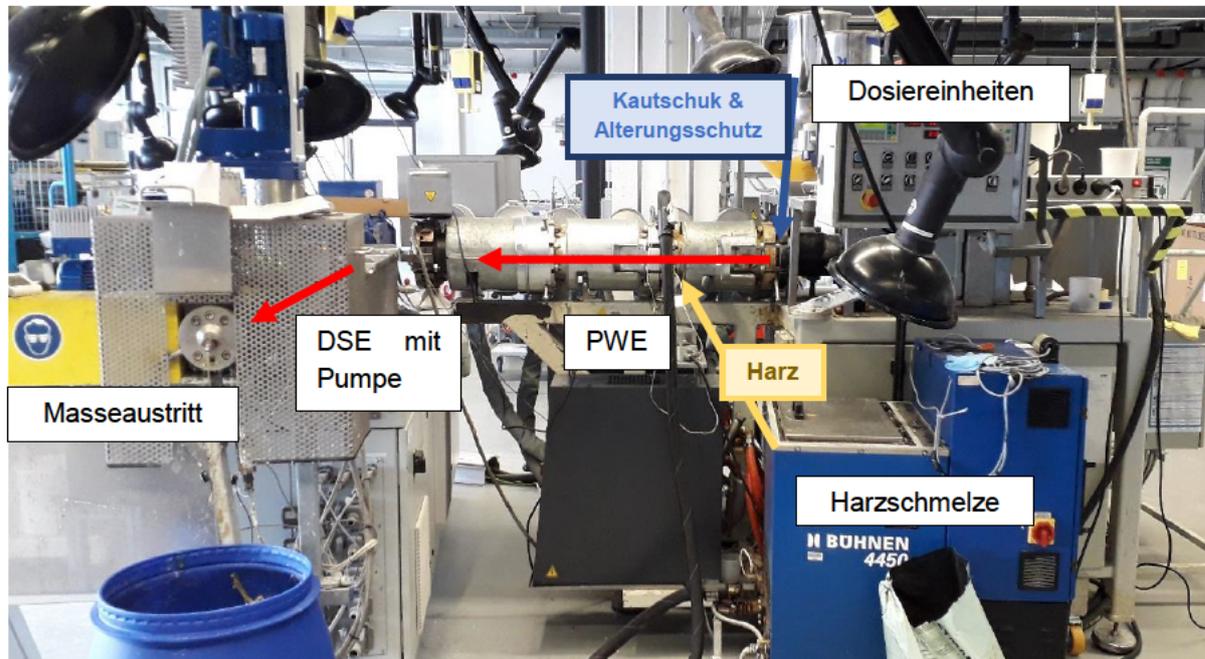


Abbildung 9 Extrusionsanlage [15]

Durch zwei Dosiereinheiten werden dem PWE zunächst das Synthetikgummi-Granulat und das Alterungsschutzmittel zugeführt und im vorderen Teil des Extruders gemischt, bis das aufgeschmolzene Harz hinzugefügt wird. Die Verarbeitung des Harzes benötigt viel Energie, weshalb es bereits erhitzt in den PWE dosiert wird. Im PWE wird der Kautschuk aufgeschlossen und mit den anderen beiden Komponenten zu einer homogenen Masse verarbeitet. Durch die besondere Anordnung der Schnecken im PWE ist es möglich, sehr viel Scherung auf kurzen Raum in die Masse einzubringen, welche für die Verarbeitung von Synthetikgummi und Harz notwendig ist.

Der DSE wird für die anschließende Entgasung und der Formung eines einheitlichen Strangs geputzt, welcher durch eine Schmelzepumpe gleichmäßig ausgetragen wird. Bei Bedarf kann im DSE zusätzlich ein Färbemittel eingegeben werden, worauf hier jedoch verzichtet wurde.

Durch das so genannte Auslitern kann berechnet werden, wie groß die Anteile von Harz und Kautschuk in der Schmelze sind. Dabei wird beispielsweise eine Minute lang Masse am Austritt aufgefangen und anschließend gewogen. Da durch die Dosiereinheiten bekannt ist, wie viel Kautschuk pro Stunde in den Prozess gefördert wird, kann das Verhältnis bestimmt und bei Bedarf angepasst werden.

Im Produktionsprozess stellten sich am Austritt folgende Temperaturen für die Massen ein:

*Tabelle 3 Temperaturen am Masseaustritt während Extrusion*

Kautschuk	Harz	Verhältnis	Temperatur
7318	F105	45/55	124
		50/50	124
		55/45	122
1152	F105	45/55	132
		50/50	130
		55/45	131
1152	PA115	48/52	145
		50/50	142
711	F105	45/55	142

Die steigenden Temperaturen an der Austrageinheit hängen mit der bereits erwähnten zunehmenden Komplexität der verwendeten Rohstoffe zusammen. Ein verzweigter bzw. langkettiger Kautschuk benötigt viel (Scher-)Energie, um vollständig verarbeitet werden zu können, ebenso wie ein Harz mit einem höheren Schmelzpunkt. Die Temperatur am Extruderaustritt gibt einen Hinweis darauf, wie viel Energie in den Prozess eingeflossen ist, da sich durch mehr Scherung die Masse zusätzlich zur möglichen Temperierung von außen auch durch die eingebrachte Energie erhitzt. Relevant ist die Bestimmung der Austrittstemperatur für die spätere Weiterverarbeitung der Massen im Drucker, da sie Aufschluss darüber gibt, wie leicht/schwer das entsprechende Material zu verarbeiten sein kann bzw. auch in welchem Temperaturbereich es gut zu verarbeiten ist.

Im Zuge der Materialeextrusion wurden von jeder Masse zusätzlich standardebschichtete Muster hergestellt. Heiße Masse aus dem Extruder wurde in eine Beschichtungsanlage eingegeben und dort in einem dünnen Film auf einem Liner aufgerollt wurde. Anschließend wurden diese Rollen abgewickelt und auch von der zweiten Seite mit Liner bedeckt, sodass flache Lappenmuster entstanden. Diese Muster dienen für spätere Vergleichsmessungen.

### 3.1.3 Granulaterzeugung

Da die Integration eines Granulators in den Prozess komplex und aufwendig ist, erfolgt dieser Prozess hier der Einfachheit halber händisch. Die zuvor erzeugten Stränge werden einzeln in einen Granulator eingeführt und zerkleinert. Der Austrag wird permanent mit Talkum gepudert, um ein Verkleben des Granulats zu verhindern.

Das überschüssige Talkum muss abschließend entfernt werden. Hierzu wird das Granulat in kleinen Portionen gewaschen und getrocknet. So bleibt nur ein minimaler Anteil an Talkum zurück, der sich an der Oberfläche angelagert hat, aber ausreicht, um ein Verkleben zu verhindern. Auf die Verarbeitung im Drucker sollte sich diese Kleinstmenge nicht offensichtlich negativ auswirken (vgl. siehe Kapitel 4.2. und 4.3).

### 3.2 Vorversuche

Da bisher kein eigener Erfahrungsstand im Umgang mit statistischer Versuchsplanung (Design of experiments; DoE) bestand, wurden zunächst verschiedene Versuchspläne mit der Software Design Expert erstellt. Da das selbsthergestellte Granulat nur begrenzt verfügbar ist, wurde für das Kennenlernen der Software und der Versuchspläne mit ABS-Granulat gedruckt. Später wurde dann auf Klebmassegranulat gewechselt.

#### 3.2.1 Versuchsdefinition

Für jede Art von experimenteller Arbeit ist es relevant, vor Beginn Out- und Input, sowie mögliche Störgrößen für das zu untersuchende System zu definieren. Hier wird das System „Druckprozess“ untersucht. Alle bisher bekannten und relevanten Faktoren zu diesem System sind in Abbildung 10 in Form eines Black-Box Modells dargestellt.

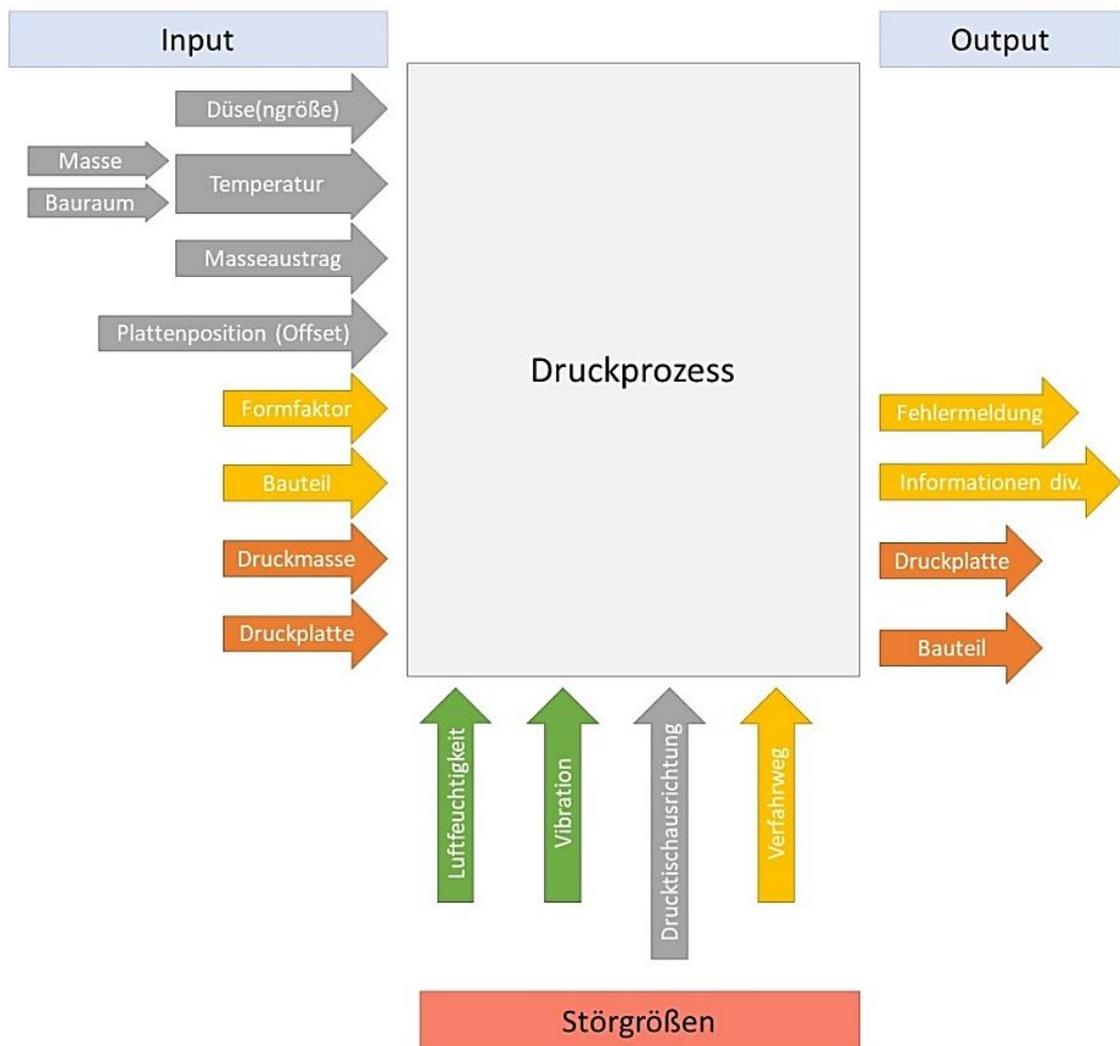


Abbildung 10 Blackbox Modell zum Druckprozess [15]

Die Faktoren sind farblich voneinander abgegrenzt. In grau sind all jene markiert, die den Drucker selbst betreffen, gelb alle Informationen. Orange kennzeichnet alle stofflichen Komponenten und grün mögliche Umwelteinflüsse. Die Störgrößen sind hier nicht zwingend für Störungen verantwortlich, sie entziehen sich jedoch der direkten Kontrolle, weshalb sie unter diesem Begriff zusammengefasst sind.

Nachdem definiert ist, wodurch der Druckprozess beeinflusst wird und was als Output zu erwarten ist, müssen zuletzt die Zielgrößen für den „idealen Druck“ definiert werden:

- ✓ Gleichmäßige/saubere Linien
- ✓ Maßhaltigkeit in der Außenkontur
- ✓ Gleichmäßige Haftung am Substrat
- ✓ Keine Fehlstellen oder Fadenzug
- ✓ Kontrollierbare/bestimmbare und gleichmäßige Druckhöhe von 200µm

Diese Zielgrößen gelten sowohl für die Vorversuche mit ABS, als auch für die eigentlichen Versuche mit den Hotmelt-Massen.

### 3.2.2 Basis-DoE

Das Ziel der ersten Versuchsreihe war die Feststellung, wie stark das Druckergebnis auf die Variation verschiedener Eingangsgrößen reagiert und wie gut diese mit dem DoE-Programm erfasst werden können. Als veränderliche Parameter ausgewählt wurden der Formfaktor, der Austragswert und Füllgrad. Die Reaktion auf den Füllgrad kann mit Sicherheit vorausgesagt werden, da dieser bestimmt, zu wie viel Prozent das Bauteil ausgefüllt werden soll. Geregelt wird die Füllung über den Abstand der Linien zueinander.

Bei dem folgenden DoE-Plan handelt es sich um einen vollen 2-Level-Versuchsplan, das heißt, es werden alle acht möglichen Kombinationen von Maxima und Minima sowie ein Centerpoint angefahren.

Als Antworten wurden die Druckzeit in min, die Oberflächenqualität und die Fehlerhäufigkeit auf einer Skala von 1 (hervorragende Qualität/ kein Fehler) bis 6 (unsaubere Oberfläche/keine Stelle fehlerfrei), sowie die Bewertung der geschlossenen Oberfläche mit ja (geschlossen) oder nein (nicht geschlossen) ausgewählt. Die verschiedenen Bewertungssysteme sollten ein Gefühl für die Auswertung dieser geben und ob sich eines besser für die Beurteilung eignet als ein anderes.

Daraus ergab sich zunächst der in Abbildung 11 aufgezeigte Versuchsplan.

	Durchgang		Faktoren/ Parameter			Ergebnisse		
	Std	Run	Factor 1 A:Austrag %	Factor 2 b:Formfaktor -	Factor 3 c:Füllgrad %	Response 1 R1	Response 2 R2	Response 3 Druckzeit min
	9	1	50	1,325	60			
	10	2	50	1,325	60			
Max/Min	8	3	70	1,4	100			
	3	4	30	1,4	20			
Centerpoints	11	5	50	1,325	60			
	7	6	30	1,4	100			
	2	7	70	1,25	20			
	12	8	50	1,325	60			
	1	9	30	1,25	20			
	4	10	70	1,4	20			
	5	11	30	1,25	100			
	6	12	70	1,25	100			

Abbildung 11 Vorläufiger Probe-Versuchsplan

Als Minima und Maxima sollen die im Extremfall möglichen Punkte angegeben werden. Die Schwierigkeit dabei ist, diese so anzugeben, dass sie immer noch durchführbar sind. Zunächst wurde beispielsweise für den Austrag eine Spannweite von 30 bis 70% angegeben, woraus sich ein Mittelwert von 50% ergeben hat. In Kombination mit den Extremwerten für den Formfaktor und den Füllgrad ist ein Druck bei 30% jedoch nicht möglich. Erst ab 52% lassen sich in der Kombination wieder verwertbare Muster erzeugen. Der Versuchsplan musste dementsprechend wiederholt angepasst werden, bis die komplette Versuchsreihe druckbar war. Der endgültige Versuchsplan mit den entsprechenden Ergebnissen gestaltete sich demnach wie in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Abschließender Probe-Versuchsplan mit Ergebnissen

Std	Run	Factor 1 A:Austrag %	Factor 2 B:Formfaktor -	Factor 3 C:Flächenfüllung %	Response 1 Geschl. Oberfläche ja/nein	Response 2 Oberflächenqualität Note	Response 3 Fehlerhäufigkeit Note	Response 4 Druckzeit min
1	1	52	1,25	20	0	6	4	32
5	2	52	1,25	100	1	1	2	56
7	3	52	1,4	100	1	1	2	51
8	4	80	1,4	100	1	3	4	51
3	5	52	1,4	20	0	4	4	35
9	6	66	1,325	60	1	2	1	45
4	7	80	1,4	20	0	3	2	35
2	8	80	1,25	20	0	2	2	32
6	9	80	1,25	100	1	1,5	1,5	56

Gedruckt wurde eine Abfolge verschieden großer Ringe in ABS, die Bewertung erfolgte durch Sichtprüfung. Da es sich hierbei nur um einen Probelauf handelte, war die exakte Bewertung zweitrangig.

### 3.2.3 Auswertung Basis-DoE

Die Auswertung erfolgt schrittweise für jede Response und wird von Design-Expert durch Hinweise und Erklärungstexte unterstützt. Abschließend kann ein Optimierungsvorschlag unter manuell gewählten Gesichtspunkten erzeugt werden. Im Folgenden wird die durchgeführte Auswertung bezüglich der Druckzeit kurz näher erläutert. Die Systematik ist für alle nachfolgenden statistischen Versuchspläne die gleiche.

Bereits vor der eigentlichen Analyse kann über die so genannte Korrelationsmatrix die Reaktion der Ergebnisse auf Parameter abgeschätzt werden. Als korrelierend werden zwei Werte bezeichnet, wenn ihr Verhalten gleich ist. Wenn also der eine Wert sinkt/steigt, dann sinkt/steigt auch der entsprechend zugeordnete zweite Wert. Bei einer negativen Korrelation verhalten sich beide Werte genau anders herum, wenn der eine zum Beispiel steigt, sinkt der andere. In Abbildung 12 ist beispielsweise zu sehen, dass die Oberfläche geschlossener wird, wenn die Flächenfüllung zunimmt. Bei der Oberflächenqualität verhält es sich augenscheinlich anders herum, sie nimmt ab, wenn die Flächenfüllung zunimmt. Dies liegt unter anderem daran, dass mit zunehmender Flächenfüllung mehr Material aufgetragen wurde und es zu einer Überfüllung kam, die sich negativ auf die Oberflächenqualität ausgewirkt hat.

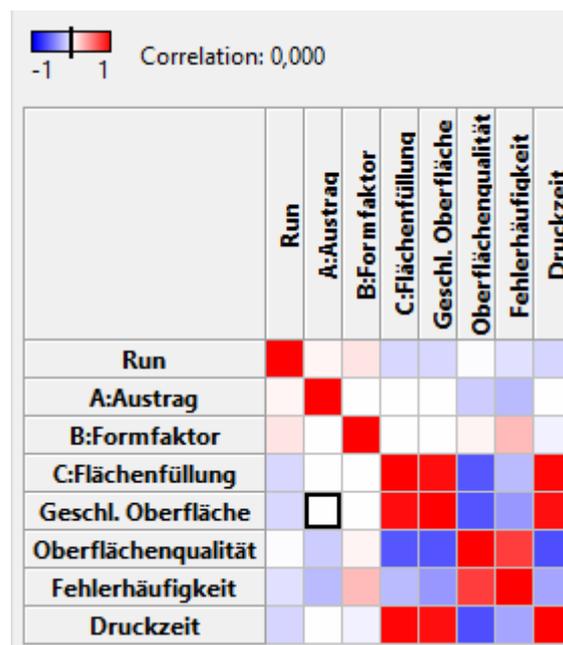


Abbildung 12 Korrelationsmatrix Vorversuche [11]

Im ersten Schritt der Analyse wird nun das Modell soweit reduziert, dass nur noch alle jene Einflussgrößen berücksichtigt werden, die einen signifikanten Einfluss auf das Modell haben. Dies geschieht durch Ausklammern aller nicht signifikanten Faktoren. So wird die Auswertung nicht durch insignifikante Einflüsse verfälscht und die tatsächlichen Effekte deutlicher. Eine Reduktion ist auch dann erforderlich, wenn sehr viele Terme als signifikant eingestuft werden können und zunächst kein eindeutiger Einfluss ermittelt werden kann, in diesem Fall werden zunächst Wechselwirkungen höherer Ordnung aus dem Modell genommen, bis eine

ausreichende Aussagekraft erreicht ist. Die Reduktion kann so weit gehen, dass kein Einfluss als signifikant für das Ergebnis bewertet wird, da der tatsächliche Einflussfaktor noch nicht im Modell berücksichtigt wurde oder die Qualität des Ergebnisses nicht ausreichend für eine entsprechende Aussage ist. Wenn Wechselwirkungen als signifikant eingestuft werden, müssen aufgrund der Hierarchie die entsprechenden Faktoren auch dann im Modell belassen werden, wenn sie nicht signifikant sind.

Die Aussagekraft und Plausibilität des Modells können weiterhin mit Hilfe verschiedener Grafiken überprüft werden. An diesem Punkt können auch systematische Fehler erkannt werden, wenn beispielsweise im Laufe der Versuche die gedruckten Proben eine zunehmend schlechte Oberfläche hätten. Solche bekannten Fehler können im Modell Berücksichtigung finden, ihre Ursache sollte aber untersucht werden.

Ist das Modell als plausibel und aussagekräftig eingestuft, gibt es die Option beispielsweise über Effektgrafiken die Reaktion des Ergebnisses auf Änderungen der Parameter zu betrachten. In Abbildung 13 ist exemplarisch die Interaktion von Flächenfüllung und Austrag und ihr Effekt auf die Oberflächenqualität der gedruckten Muster dargestellt. Die rote Linie beschreibt die Oberflächenqualität über den Austrag bei einer Flächenfüllung von 20%, die schwarze bei 100%. Die Grafik darf jedoch nicht alleinstehend betrachtet werden, da sie nicht alle Wechselwirkungen gleichzeitig abbilden kann. Auch weitere Wechselwirkungen zum Beispiel Austrag und Formfaktor haben einen Einfluss auf die Oberflächenqualität. Der Kontext und das Gesamtbild dürfen bei der Auswertung daher nie außer Acht gelassen werden.

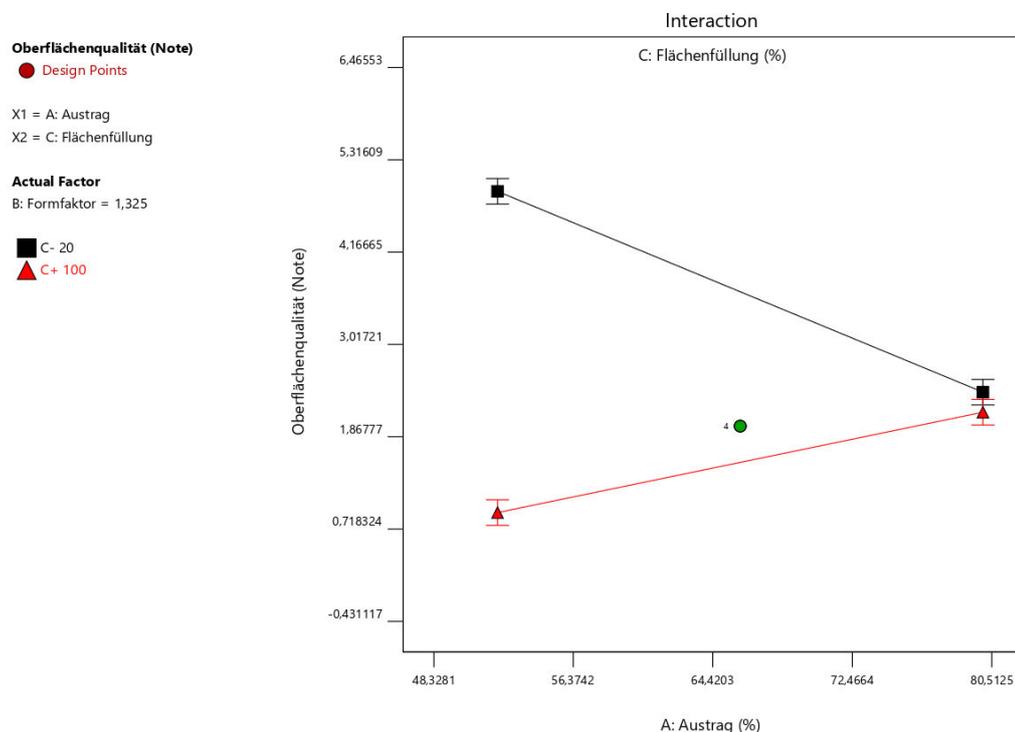


Abbildung 13 Beispielleffektgrafik aus Vorversuch [11]

Die reduzierten Modelle fließen im Anschluss an die Analyse in die Berechnung der Optimierungswerte ein. Aus jedem aussagekräftigen Modell kann basierend auf spezifischen Zielvorgaben (Restriktionen) eine Liste mit möglichen Versuchspunkten abgeleitet werden, die zu entsprechenden Ergebnissen führen sollten. Diese Optimierungsvorschläge können beispielsweise als Basis für einen neuen, verbesserten und genaueren Versuchsplan dienen.

## 4 Analytik

In den Versuchen werden verschiedene Materialkombinationen mit bisher unbekanntem Eigenschaften untersucht. Zum besseren Verständnis dieser Materialien wurden verschiedene analytische Verfahren angewandt. Die Ergebnisse der Messungen, ausgenommen Viskosität, werden für ausgewählte Muster auch mit gealterten bzw. gedruckten Proben verglichen. Dieser Prozess ist iterativ, daher wird in den nachfolgenden Unterkapiteln zum Teil vorgegriffen.

### 4.1 Viskosität

Zunächst wurde mit einem Rheometer die komplexe Viskosität über einen Temperaturverlauf von 40 bis 150°C aufgenommen. Aus den Mittelwerten der Ergebnisse konnte ein Diagramm mit unterschiedlichen Kurvenverläufen für die untersuchten Materialien erstellt werden (siehe Abbildung 14). Das Diagramm liefert Aufschluss darüber, ab welcher Temperatur die Massen eine für den Druck erforderliche Viskosität haben. Für einen gleichmäßigen Auftrag auf das den gewählten Untergrund, ist wichtig ein gutes Fließverhalten zu erzeugen und gleichermaßen schnell abkühlen zu können [16].

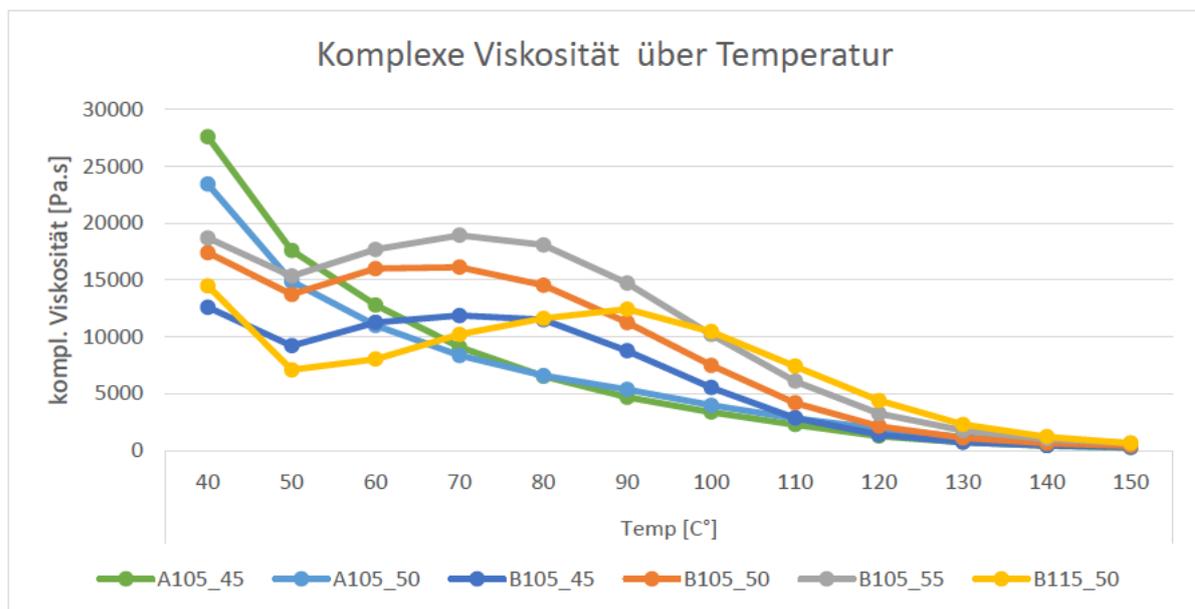


Abbildung 14 Komplexe Viskosität verschiedener Mischungen über Temperatur [15]

Für die Messung wird üblicherweise ein flaches, großflächiges und homogenes Muster mit ca. 2mm Dicke und 3g zwischen zwei PET-Folien in einen Rubber Process Analyzer (RPA) eingelegt. Ein solches Muster war in diesem Fall nicht verfügbar, weshalb mehrere kleine Lappen zusammengelegt wurden. Das hatte Lufteinschlüsse zur Folge. Diese Lufteinschlüsse, mögliches Durchrutschen der Folie am Anfang sowie die ungleichmäßige Verteilung der kalten

Masse, haben insbesondere am Anfang verschiedene Ungenauigkeiten wie beispielsweise den Viskositätsabfall von 40 auf 50°C bei den B-Mischungen zur Folge. Da die Austrittstemperatur beim Extrudieren bei allen Massen bei über 100°C lag und sie in diesem Prozessschritt eine erstrebenswerte Konsistenz hatten, ist für den Drucker erst die Viskosität ab 90°C relevant. Der darunter liegende Bereich sowie seine Fehler kann vernachlässigt werden. Beachtet werden muss jedoch, dass insbesondere bei den AMischungen schon bei einer Temperatur unter 60°C die Viskosität der Masse verändert wird (siehe 4.2).

Ausgehend von einer guten Verarbeitbarkeit bei einer Viskosität von ca. 2800Pa.s und kleiner, die im Druck mit A105\_50 bestätigt wurde, lassen sich für die anderen Materialien folgende Düsentemperaturen als Richtwerte ermitteln:

- A105\_50 110°C
- A105\_45 110°C
- B105\_45 120°C
- B105\_50 120°C
- B105\_55 130°C
- B115\_50 130°C

Die Düsentemperatur wird als Massetemperatur angenommen, da sich immer eine kleine Menge Masse in dem Bereich der Austrageinheit befindet, welche die dort vorgegebene Temperatur schnell annehmen sollte.

Die genannten Temperaturen sind lediglich Ausgangswerte, bei denen die gute Verarbeitbarkeit im Drucker und an der Düse gewährleistet ist. Wie sich später beim Drucken mit B105\_50 (siehe Unterkapitel 5.4.2) gezeigt hat, ist eine gute Verarbeitbarkeit kein Garant für ein sauberes Druckbild. Ein ebenso großer Faktor ist das Ablageverhalten auf dem gewählten Untergrund. Besteht nicht ausreichende Haftung und kann diese nicht durch andere Faktoren wie zum Beispiel das Anpassen des Offsets verbessert werden, muss die Temperatur so lange erhöht werden, bis ein sauberes Druckbild erzeugt wird. Auf die Materialeigenschaften hat eine Erhöhung der Temperatur innerhalb eines bestimmten Intervalls keinen offensichtlich negativen Einfluss (siehe Unterkapitel 5.4.3).

## 4.2 Materialqualifikation

Eine einfache Methode, mehr über ein polymeres Material zu erfahren, ist das Ermitteln verschiedener Kennwerte, wie zum Beispiel der Glasübergangstemperatur oder der Molmasse.

Die Glasübergangstemperatur gibt die Temperatur bzw. den Temperaturbereich an, in der das untersuchte Material weich wird. Sie ist für jede Masse und Massekombination individuell und kann durch verschiedene Methoden ermittelt werden. Für die verwendeten Materialien wurde ein DSC (Differential Scanning Calorimetry) durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird durch kontrolliertes Erhitzen (hier 10K/min in einem Bereich von -140°C bis 150°C) die Wärmekapazität der Masse ermittelt. Diese ist in jeder Phase unterschiedlich, so kann der Bereich der Glasübergangstemperatur  $T_g$  bestimmt werden. Für die untersuchten Materialien konnte keine eindeutige Glasübergangstemperatur ermittelt werden, vielmehr beschreibt der

Glasübergang hier einen sehr weiten Bereich [17]. Die in Tabelle 5 aufgeführten Temperaturen sind daher als Mittelwerte zu verstehen, um die der Übergangsbereich liegt.

Dieser Temperaturbereich sollte während der Lagerung des Granulats und Eingabe in den Drucker möglichst vermieden werden, da das Erweichen zu einem Verklumpen führen kann. Der Masseinzug sollte daher möglichst kalt gehalten werden.

*Tabelle 5 Glasübergangstemperaturen der Granulate*

Probenbezeichnung	T <sub>g</sub> [°C]
A105_45	-50
A105_50	-63
A105_55	-67
B105_45	-59
B105_50	-61
B105_55	-65
B115_48	-50
B115_50	-51
C105_50	-60

Ebenfalls ermittelt wurde der durchschnittliche Talkumanteil im Granulat, indem ein kleiner Anteil Granulat auf über 500°C erhitzt wurde. Bei dieser Temperatur verbrennt der Kunststoffanteil des Granulats und nur anorganische Anteile wie das Talkum bleiben erhalten. Dieser Restanteil wird gewogen und ins Verhältnis zum Gewicht des verbrannten Granulats gesetzt.

Daraus ergaben sich folgende Werte:

*Tabelle 6 Anorganische Restanteile nach Verbrennen*

Masse	Restanteil [%]
A105_50	2,66
B105_50	1,43
C105_50	1,61
Durchschnitt	1,9

Ein durchschnittlicher anorganischer Anteil von knapp 2% des Gesamtgewichts ist ausreichend gering, um ihn als vernachlässigbar für die Leistung der Masse nach dem Druck einzustufen. Die deutlich unterschiedlichen Werte für die verschiedenen Granulate lassen sich auf zwei grundlegende Ursachen zurückführen. Zum einen sind die Körner unterschiedlich groß, zum anderen weisen sie unterschiedliche Oberflächenstrukturen auf. Da die Granulatkörner minimal mit Talkum benetzt sind, haben schon solche kleinen Variationen einen verhältnismäßig hohen Einfluss auf den Talkumanteil.

### 4.3 Klebkräfte

Als anwendungsbezogene Prüfmethode wurden Pushouts (PO) nach Tesa-Standard durchgeführt. Mit dieser Methode wird ermittelt, welche exzentrische Zugbeanspruchung die Klebung ertragen kann [18]. Dabei wird eine rahmenartige Klebung mit einer äußeren Kantenlänge von 33mm und einer Rahmenbreite von 2mm auf ein PC-Fenster aufgeklebt. Anschließend wird ein PC-Rahmen aufgeklebt (vgl. Abbildung 15) und die drei Komponenten für 5s mit einem Anpressdruck von 300bar (das entspricht einer Kraft von 8,7kN) verpresst. Um eine Endfestigkeit zu erreichen, wird die Probe über einen definierten Zeitraum von mindestens 3 Tagen vor dem Messen bei Raumtemperatur gelagert. Bei der Messung wird dann mit einem Stempel das Fenster durch den Rahmen hindurch mit einer Geschwindigkeit von 10mm/min vom selbigen abgedrückt.

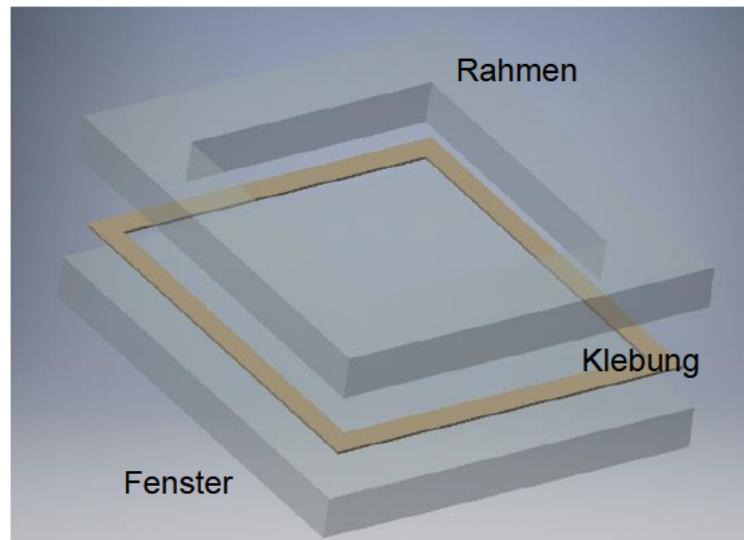


Abbildung 15 Aufbau einer Pushout-Probe [15]

Das Ergebnis einer Pushout-Prüfung ist eine Kurve, die die gemessene Abdrückkraft über den Weg anzeigt, wie beispielsweise in Abbildung 16 zu erkennen. Für die Auswertung relevant sind immer das erste Kraftmaximum und die geleistete Arbeit, welche über die Fläche unter der Kurve ermittelt wird. Die Arbeit interessiert, da sie Aufschluss darüber gibt, wie viel Energie die Klebung bis zum kompletten Versagen aufnehmen kann. Das zweite Kraftmaximum ist nicht von Relevanz, da nach der ersten Kraftspitze die Klebung bereits teilweise versagt hat und für die Anwendung nicht mehr brauchbar ist. Der Vollständigkeit halber wird es in den nachfolgenden Tabellen dennoch erwähnt, da es in die Arbeit mit einfließt. (Persönliches Gespräch mit F. Virus, Mai 2020)

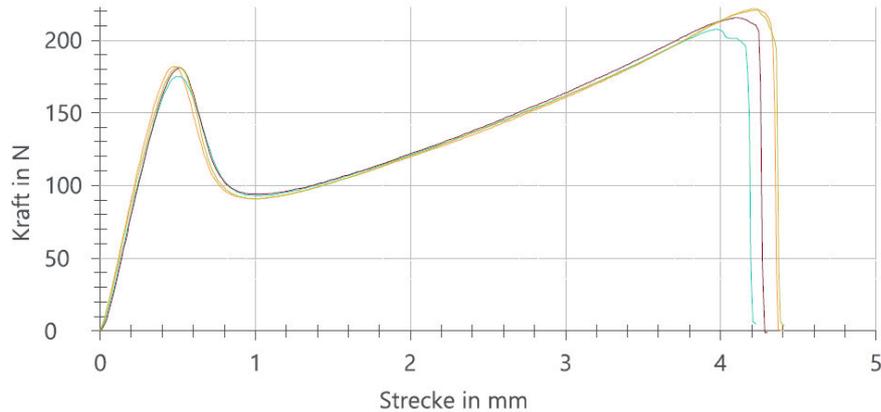


Abbildung 16 Pushout Kurve A105\_50, standardbeschichtet [19]

Idealerweise ist die gemessene Kurve über mehrere Proben mit geringen Abweichungen reproduzierbar. Der Kurvenverlauf kann je nach Material sehr unterschiedlich sein, abhängig von Kennwerten wie Zähigkeit bzw. Elastizität, Kohäsion und Adhäsion, wie auch an Tabelle 7 deutlich wird. Die in der Tabelle aufgelisteten Werte beziehen sich alle auf Vergleichsmessungen mit ausgelaserten Proben aus standardbeschichteten Lappenmustern. Auch gealterte Muster wurden verglichen, die Erläuterung hierzu findet sich im nächsten Unterkapitel. Alle Prüfergebnisse der Klebkraftmessungen befinden sich im Anhang.

Tabelle 7 Klebkräfte standardbeschichtete Muster

Material	Bezeichnung	Arbeit W [mJ]	$F_{\max 1}$ [N]	$F_{\max 2}$ [N]
A105_45	frisch 7d	568	199	226
	1M60 7d	549	132	217
	3M60 7d	584	162	239
A105_50	frisch 7d	605	180	217
A105_55	frisch 7d	686	195	223
B105_45	frisch 7d	683	167	250
B105_50	frisch 7d	531	176	224
B105_55	frisch 7d	378	239	239
C105_45	frisch 7d	697	217	283
B115_48	frisch 7d	693	155	321
B115_50	frisch 7d	677	155	331

Die zwei Kraftmaxima kommen aufgrund des versuchsbedingten ungleichmäßigen Ablöseverhaltens zustande. Zunächst bilden sich dünne Fäden, auch als Fibrillen bezeichnet, von der Klebung ausgehend aus, die sich immer stärker dehnen, bis sie an einer Stelle schließlich versagen. Dieses Versagen ist als Kraftabfall nach dem ersten Kraftmaximum zu erkennen. Die noch haftende Klebung dehnt sich nun immer weiter und löst sich nach und nach vom Untergrund, bis es auch hier aufgrund nicht ausreichender Restverklebung zum Versagen kommt, welches durch den Kraftabfall nach dem zweiten Maximum deutlich wird.

#### 4.4 Alterung

Bei längerer Lagerung von Kunststoffen jeder Art kommt es durch Umwelteinflüsse irgendwann zu einem Abbau der inneren Struktur, genannt Alterung. „Alterungsprozesse können demnach eine Änderung der Werkstoffeigenschaften bewirken, die wiederum durch physikalische und/oder irreversible chemischen Prozesse, z.B. Polymerkettenspaltung, Vernetzung oder dem Aufbrechen und der Neuformation von kovalenten Bindungen (Re-Kombination), verursacht werden.“ [20]. Die Geschwindigkeit, in der dieser Abbau vorstättengeht, ist abhängig von verschiedenen Faktoren wie beispielsweise die zugeführte Menge an Strahlung oder ob das Material chemischen Substanzen o.ä. ausgesetzt war, die es angreifen könnten. Auch der Aufbau und ob dem Material Stabilisatoren (Alterungsschutzmittel) beigefügt wurden, um den Prozess zu verlangsamen, spielen eine Rolle bei der Alterung. Durch das gezielte Nutzen solcher Einflüsse in einem überproportionalen Maße zum Alltag, kann eine künstliche Alterung erfolgen, die innerhalb eines kurzen Zeitraums Monate bis Jahre Beanspruchung simuliert [20].

Vor der Eingabe in den Drucker lagert das Granulat bei Raumtemperatur in abgeschlossenen Behältern, um Alterungsprozesse möglichst gering zu halten. Wenn es in den Drucker eingegeben wird, erfolgt jedoch eine Trocknung bei 40°, bei der Luft durch das Granulat geblasen wird. Dieser ständige Wärmestrom kann Alterung bewirken. Auch UV-Strahlung und Feuchtigkeit können abbauende Effekte auf das Granulat haben. Um zu untersuchen, wie stark sich diese Umwelteinflüsse auf die Masse auswirken bzw. ob die Zugabe von Alterungsschutzmittel zu der Masse ausreichend war, wurden Lappenmuster bei 60°C für einen (bezeichnet mit 1M60) bzw. drei Monate (3M60) in einem Trockenschrank gelagert und so künstlich gealtert. Anschließend erfolgte eine Vergleichsmessung der Klebkräfte und Farbveränderung.

Um zu prüfen, ob die Lagerung überhaupt einen Alterungseffekt hatte, wurde eine optische Messung durchgeführt, bei der die Farbwerte der gelagerten Muster im Vergleich zu dem umgelagerten Muster mit einem Sensor aufgenommen wurden. Hierfür wurde ein kleiner Teil der Lappenmuster auf eine weiße Keramikachel geklebt und der Sensor an mehreren Punkten aufgesetzt. Ausgegeben wird die Färbung in Form von zwei Werten, der b\*-Achse (blau -, gelb +) und der a\*-Achse (grün -, rot +). Mit einer Steigerung des Gelbanteils von über 1,4 und des Grünanteils von fast 0,6 Punkten ist eine deutliche Vergilbung gegeben und die Alterung des Musters bestätigt.

*Tabelle 8 Farbanteile Lappenmuster Vergleich frisch und gelagert bzw. gedruckt*

Muster	a*	b*
A105_45	-1,68	12,80
A105_45 1M60	-2,46	13,41
A105_45 3M60	-2,26	14,23

Wie in Tabelle 18 aufgeführt, ist durch die simulierte Alterung kein Nachlass bei der aufnehmbaren Energie bis zum kompletten Versagen im Pushout-Versuch messbar, jedoch in geringem Maße bei der Höhe der ersten Kraftspitze. Es kann dennoch davon ausgegangen

werden, dass die Menge an Alterungsschutzmittel ausreichend und die Zugabe erfolgreich war, da die Werte nur in geringem Maße von denen des ungelagerten Musters abweichen und auch Messfehler berücksichtigt werden müssen. Es sind keine weiteren Messungen erforderlich, die das beobachtete Alterungsverhalten bestätigen.

Dass der Alterungsschutz für ein dauerhaft gutes Druckergebnis eine erhebliche Rolle spielt, wird vor allem deutlich, wenn Druckproben ohne Alterungsschutz verglichen werden, die in einem Abstand von wenigen Monaten zueinander erzeugt wurden (siehe Abbildung 17). Bei dem hier verwendeten Hotmelt wurde zusätzlich schwarzes Pigment in Form von Kohlenstoff zur Färbung beigegeben, welches die Versprödung unterstützt hat.

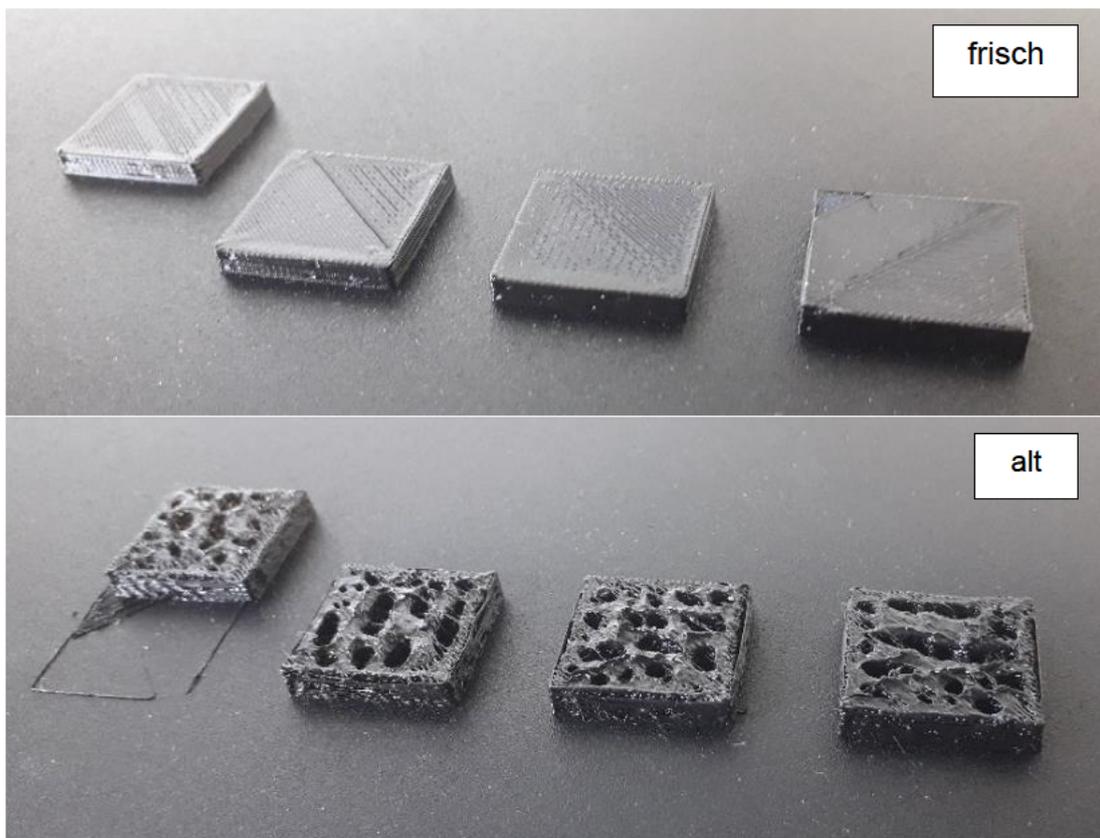


Abbildung 17 Ausdrucke mit frischem Granulat im Vergleich zu gealtertem Granulat [15]

Die Versprödung des Granulats hat die Verarbeitung deutlich erschwert und auch das Druckergebnis ist nicht mehr so sauber wie bei dem Muster, welches mit frischem Granulat erzeugt wurde. Es ist davon auszugehen, dass eine Verklebung mit einem Hotmelt dieser Art nicht ausreichend lange elastisch und haltbar bleibt.

## 5 Versuchsdurchführung

Alle nachfolgenden Druckversuche wurden anhand desselben Bauteils durchgeführt, bevor die ermittelten Parameter auf andere Bauteile übertragen wurden. Für dieses Master-Part wurde ein Dreieck ausgewählt mit variierender Linienbreite und Winkeln, an dem alle Zielgrößen (vgl. 3.2.1) gut untersucht werden können (vgl. Abbildung 18). Da die Schichtzerlegung passend zu der Düsengröße auf 200µm eingestellt ist, wird für eine Schicht die Höhe des Dreiecks auf 200µm definiert, für jede weitere Schicht werden entsprechend 200µm ergänzt. Dies entspricht auch bis auf weiteres der angestrebten Zielhöhe für die Ausdrücke.

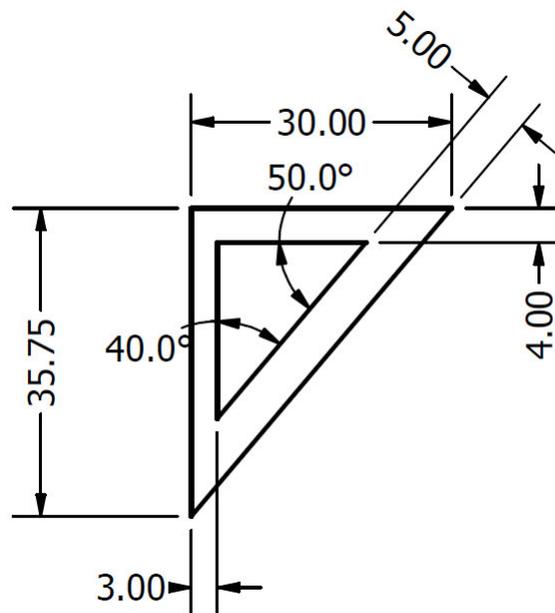


Abbildung 18 Bemaßung für das Versuchs-Dreieck [mm] [15]

Das Dreieck wurde in verschiedenen Positionen auf der Platte positioniert, um ein möglichst breites Feld an Winkelvariationen abzudecken.

Als Beispiel für eine Endanwendung wurde der Druck einer Handyrahmenverklebung angestrebt. Hierfür ist insbesondere die Maßhaltigkeit in der Außenkontur von Bedeutung.

Als erstes Material für die Versuche wurde A105\_50 ausgewählt. Das Material gehörte aufgrund der verwendeten Rohstoffe (niedrigschmelzendes Harz und kurzkettiger Kautschuk) zu den einfacher zu verarbeitenden. Das bedeutet, dass wenig Hitze und Scherung nötig sind, um es zu erweichen, die Erwartung ist demnach eine unproblematische Verarbeitung im Drucker.

## 5.1 Ansatz des Herstellers

Beim Hersteller des Druckers, der Firma Arburg, erfolgt die Materialqualifikation über einen anderen Ansatz. Anstatt verschiedene Parameterkombinationen zu untersuchen, wird zunächst der Austragswert so eingestellt, dass die Tropfenform ein leichtes Oval darstellt. Anschließend wird der Formfaktor so eingestellt, dass im Druck ein gleichmäßiges und nach entsprechenden Maßstäben „schönes“ Druckbild erzeugt wird. Das übergeordnete Ziel ist dabei das Erreichen gleichmäßiger Volumenkörper mit in der Regel mehr als 5 Schichten. Diese Herangehensweise bietet sich jedoch vor allem bei festen, wenig elastischen Materialien an, da hier die Tropfenkette nicht durch die Schwerkraft zusätzlich gestreckt wird. (Schulung durch Arburg am freeformer, April 2020)

Da die in dieser Arbeit verwendeten Materialien, Hotmelts, zwar elastisch, aber im kalten Zustand auch verhältnismäßig formstabil sind, wird dieser Ansatz zusätzlich berücksichtigt und anhand von A105\_50 untersucht.

Für die Untersuchung wurde das Programm „Massedruck einstellen“ des freeformers gewählt, bei welchem der Austrag eingestellt wird. So können ohne Ausdruck Tropfenketten erzeugt und unter dem Mikroskop untersucht werden.

In der nachfolgenden Abbildung 19 ist ein deutlicher Unterschied in der Tropfenform zu erkennen. Bei einem Austrag von 40% sind die Tropfen klein, flach und eng aneinander liegend, bei 60% zeichnet sich eine Ovalität ab, die Tropfen sind deutlich größer. Die Tropfen in der 85%-Kette wirken wie aneinandergesetzte Schuppen, stehen heraus und liegen nicht in einer glatten Reihe nebeneinander. Das ist auch bei 100% noch erkennbar, wenn auch nicht mehr so ausgeprägt, die Tropfen sind hier wieder ovaler. Bei 350% Austrag ist die Kette deutlich dicker als bei den vorherigen, die Struktur ist klar zu erkennen. Die Tropfen liegen gleichmäßig und oval aneinander, jedoch mit deutlichen Wölbungen, sodass die Kette nicht ideal glatt ist.

Idealerweise sollte nach dem Ansatz von Arburg für A105\_50 ein Austrag bei 60% gewählt werden.

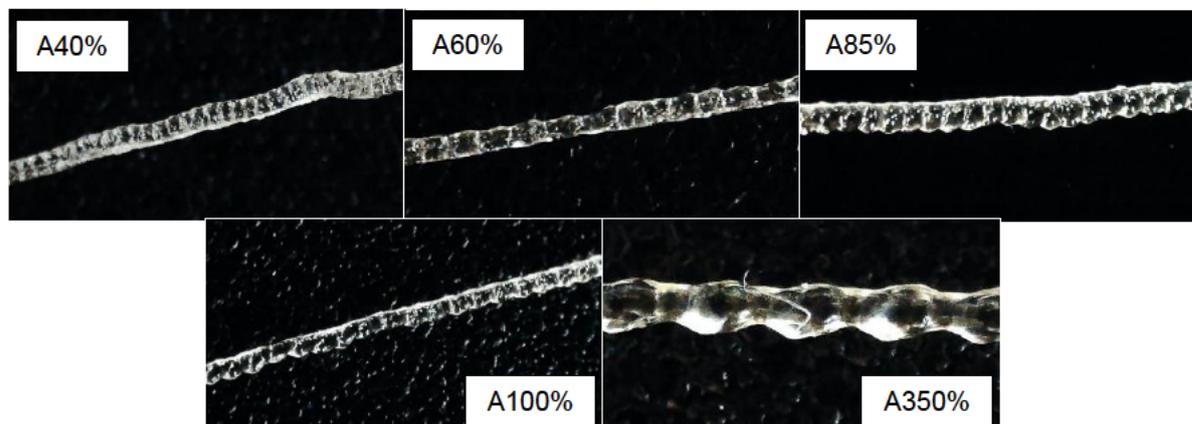


Abbildung 19 Tropfenkette A105\_50 bei steigendem Austrag [15]

Während vorheriger Drucke hat sich gezeigt, dass nicht jede Konfiguration bei Austrag, Formfaktor und Offset möglich ist. Insbesondere in den Extrema neigt die Klebmasse dazu, an der Düse zu verstopfen und so den Fluss zu blockieren oder es wird zu viel Masse ausgetragen, da der Druck durch die Maschine hochgeregelt wird. Beides führt zu einer Fehlermeldung bzgl. des Masseaustrags. Schon eine Offset-Änderung im Bereich von 0,01mm kann so einen erheblichen Unterschied für den Druckprozess machen.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wird zunächst davon abgesehen, den Ansatz über Arburg zu verfolgen. Der Druckprozess ist zu fragil und das Druckbild von zu vielen Variablen abhängig, sodass das Ansteuern der optimalen Parameter aus dieser Richtung zu viele Unsicherheiten birgt und damit einhergehend ein erhöhter Zeitaufwand zu erwarten ist.

Die gewonnene Erkenntnis, dass die Tropfenkette bei 60% Austrag eine gleichmäßige und glatte Struktur aufweist, wird jedoch bei der Umsetzung des Versuchsplanes berücksichtigt.

## 5.2 Statistische Versuchsplanung

Der erste Versuchsplan mit einem Hotmelt sollte möglichst klein gehalten werden. Zum einen, um Masse und Zeit zu sparen, aber auch um möglichst drei Wiederholungen bei jedem Punkt fahren zu können. Zudem sollte der Plan einen Überblick geben, ob sich Hotmelts ähnlich wie ABS verhalten oder auf die Einflussgrößen anders reagieren.

Bei einem Screening-Plan wird nur ein Bruchteil der möglichen Kombinationen angefahren, aber die Haupteinflüsse können dabei schon mit guter Näherung bestimmt werden. Es kommt dabei allerdings zu einer Vermengung von Wechselwirkungen mit den Haupteinflüssen, weshalb diese zunächst eingeschlossen werden müssen. Screening Pläne geben also einen guten Überblick über das Gesamtverhalten, ohne zu sehr in die Tiefe zu gehen.

### 5.2.1 Aufbau Screening-Plan

Beim ersten Plan wurden nur vier Eckpunkte sowie der Centerpoint (siehe Abbildung 21) mit jeweils drei Wiederholungen angefahren, insgesamt wurden 15 Platten bedruckt. Um den Einfluss möglicher Ungleichmäßigkeiten im Druckaufbau zu vermeiden, wurden die Muster mittig positioniert und für eine höhere Genauigkeit immer 4 Dreiecke nebeneinander gedruckt.

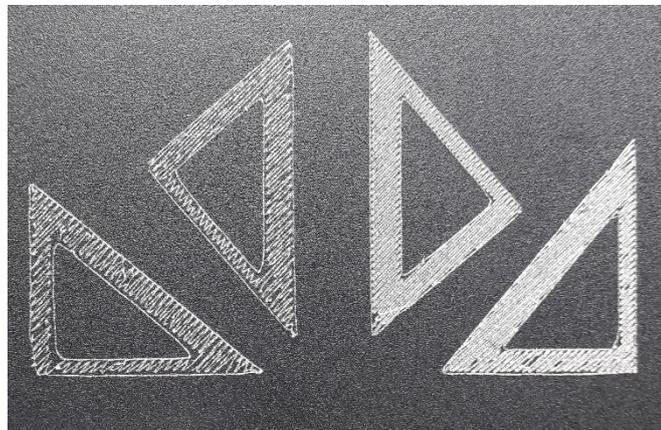


Abbildung 20 Beispiel für ein Druck im ersten Screeningdurchlauf [11]

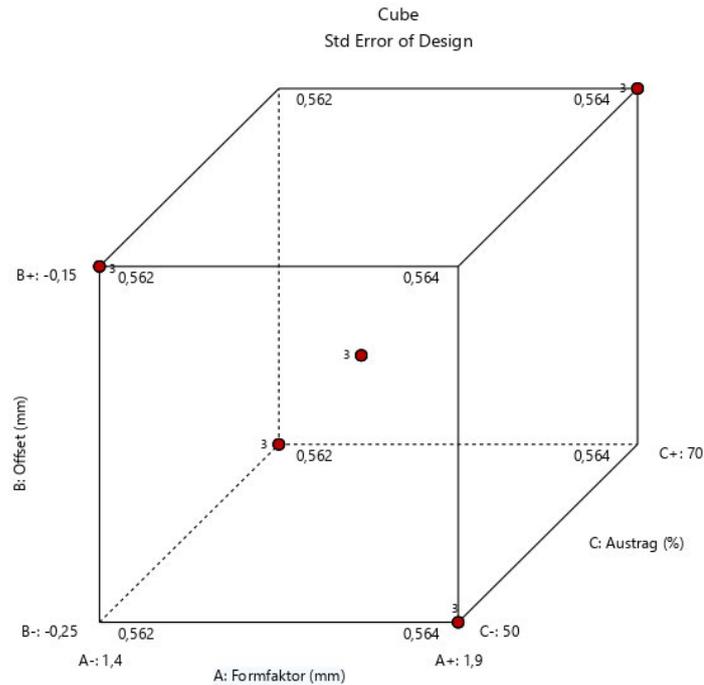


Abbildung 21 Würfelmodell der angefahrenen Eckpunkte im Screening-Plan [11]

Als Eingangsgrößen wurden die Parameter Austrag, Formfaktor und Offset gewählt, da diese im Vorfeld als die einzigen Größen mit direktem, aber nicht vollständig bekanntem Einfluss auf das insgesamt Druckergebnis identifiziert werden konnten. Dabei wurden die Eckpunkte in machbaren Extrempunkte gesetzt, damit die Versuche durchführbar blieben.

Die Eckpunkte (Maximum, Centerpoint; Minimum) waren:

- Formfaktor (1,90; 1,64; 1,40)
- Offset (-0,15; -0,20; -0,25)
- Austrag (70; 60; 50)

Die Auswertung fand anhand der Kennwerte Füllgrad (Unter- 0 / - 1 / Überfüllt 2), Musterhöhe (gemessen in  $\mu\text{m}$ ) sowie sichtbarer Abstand zwischen den Linien (ja 0 /nein 1) statt.

Die Düsentemperatur wurde auf 108°C (im Folgenden mit T108 abgekürzt) eingestellt. Vorhergegangene Untersuchungen hatten gezeigt, dass sich A105\_50 bei dieser Temperatur kontinuierlich verarbeiten lässt.

### 5.2.2 Datenerfassung

Die Muster wurden grob optisch bewertet und anschließend mit einem Höhentaster ausgemessen. Die Werte wurden entsprechend Tabelle 9 in Design Expert erfasst und anschließend auf ihre Aussagekraft hin bewertet. Die Muster waren optisch sehr unterschiedlich, die Extrema sehr auffällig mit einer deutlichen Über- oder Unterfüllung.

Tabelle 9 Daten des Screening-Plans

Std	Run	Factor 1 A:Formfaktor mm	Factor 2 B:Offset mm	Factor 3 C:Austrag %	Response 1 Unter-/ - / Über... 0-1-2	Response 2 Musterhöhe my	Response 3 Sichtbarer Abst... ja/nein
6	1	1,90	-0,25	50	0	113	0
7	2	1,40	-0,15	50	1	190	1
13	3	1,64	-0,20	60	1	156	1
10	4	1,90	-0,15	70	0	135	0
2	5	1,40	-0,25	70	2	204	1
9	6	1,40	-0,15	50	1	172	1
14	7	1,64	-0,20	60	1	143	1
5	8	1,90	-0,25	50	0	95	0
15	9	1,64	-0,20	60	1	151	1
3	10	1,40	-0,25	70	2	211	1
8	11	1,40	-0,15	50	1	169	1
4	12	1,90	-0,25	50	0	106	0
11	13	1,90	-0,15	70	0	149	0
1	14	1,40	-0,25	70	2	212	1
12	15	1,90	-0,15	70	0	152	0

Bereits in der Korrelationsmatrix (Abbildung 22) zeichnet sich in blau ein sehr starker Einfluss des Formfaktors auf alle Bewertungskriterien in Form einer negativen Korrelation ab. Offset und Austrag scheinen einen deutlich geringeren bzw. einen eher positiv korrelierenden Einfluss zu üben, doch aufgrund der noch nicht feststellbaren Wechselwirkungen, ist diese Aussage nicht absolut sicher.

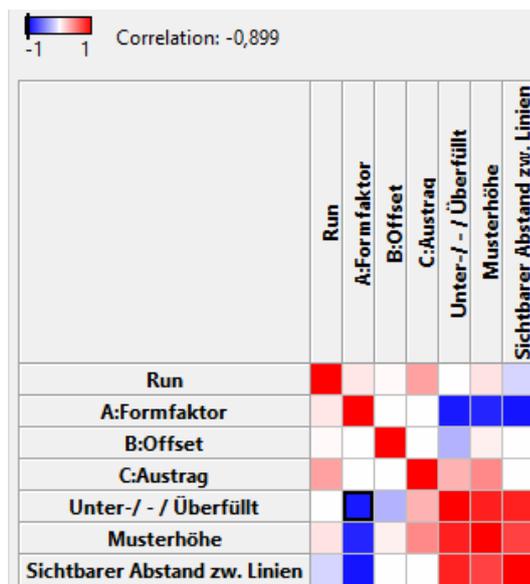


Abbildung 22 Korrelationsmatrix [11]

Welche Faktoren genau auf welche Response Einfluss üben, wird jedoch erst im nächsten Schritt, in der Analyse definiert. Hier werden alle Größen ohne signifikanten Einfluss herausgefiltert, sodass die Effekte deutlicher werden. Welchen Effekt die Einflussgrößen auf die einzelnen Responses haben, lässt sich am besten mit den Effektgrafiken (Abbildung 23) darstellen.

In der Abbildung wird nochmal deutlich, dass der Formfaktor einen starken Einfluss auf die Füllung der Muster zu haben scheint. Da der Füllgrad mit dem Abstand zwischen den Linien vermengt ist, ist hier der Einfluss sehr ähnlich. Offset und Austrag wirken sich offenbar vor allem auf die Musterhöhe aus. Die Aussagekraft ist, wie bereits erwähnt, bedingt durch die Vermengung von Haupteffekten und Wechselwirkungen, wie sie bei der Musterhöhe zu sehen sind, geschwächt. Doch bei sehr starken Effekten kann von einem realen Einfluss ausgegangen werden, was im Umkehrschluss bedeutet, dass die Einflussgrößen gut gewählt wurden. Dieser wird mit nachfolgenden Versuchsplänen jedoch genauer untersucht.

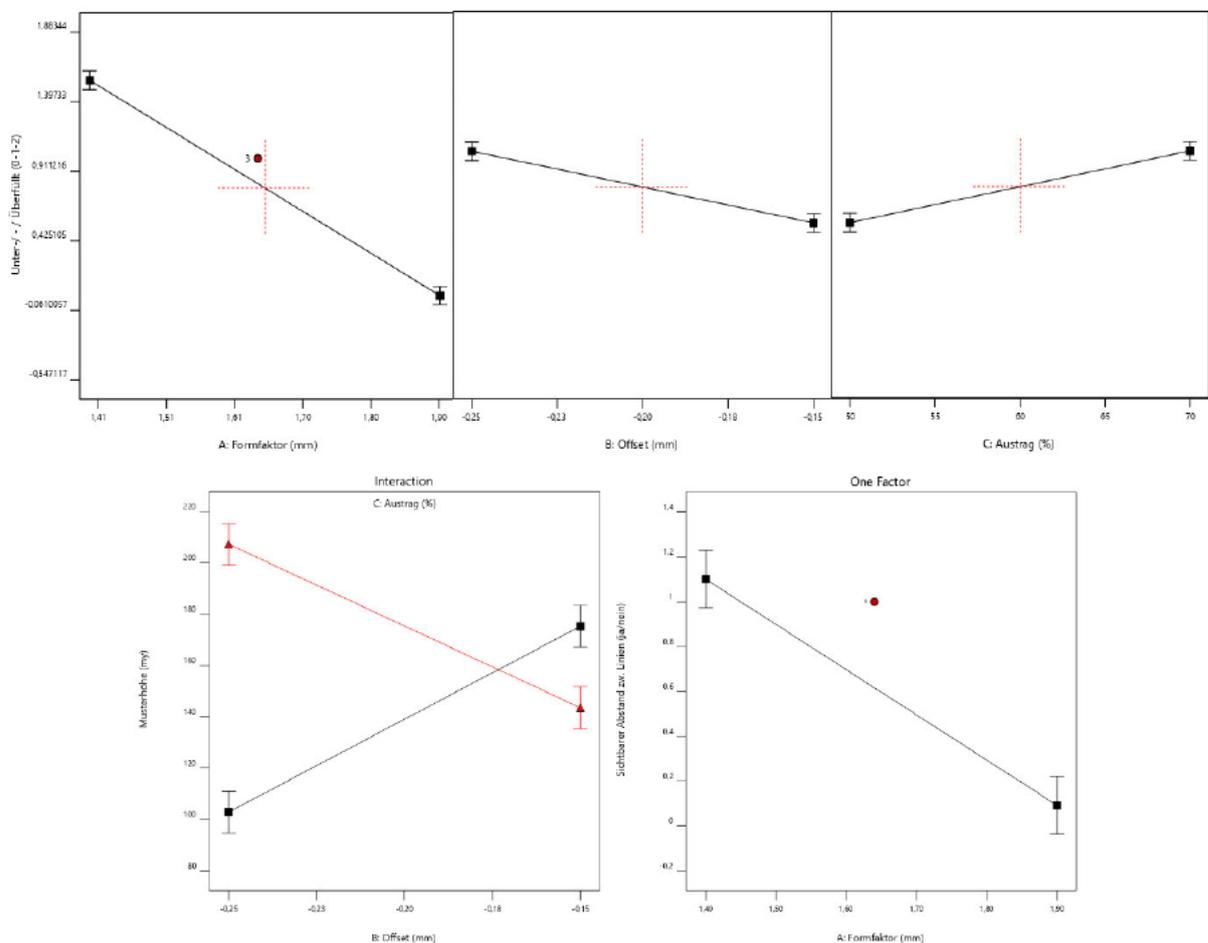


Abbildung 23 Effektgrafiken für Screening-Plan [11]

### 5.2.3 Optimierung

Nachdem die Einflussfaktoren geklärt sind, wird die Optimierung angestrebt, mit dem Ziel, einen genaueren Versuchsplan dichter am Optimum zu erreichen. Dabei wird vor allem Wert auf die Musterhöhe (200my) und die Füllung (mittlerer Bereich) gelegt. Der Abstand zwischen den Linien kann vernachlässigt werden, da er mit dem Füllgrad verknüpft ist. Diese Gewichtung wird auch bei der Eingabe der Optimierungswerte berücksichtigt, woraus sich die in Tabelle 10 gelisteten Beschränkungen ergeben.

Tabelle 10 Beschränkungen der ersten Optimierungsstufe Screening

	Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
	A:Formfaktor	is in range	1,4	1,9	1	1	3
	B:Offset	is in range	-0,25	-0,15	1	1	3
	C:Austrag	is in range	50	70	1	1	3
	Unter- / - / Überfüllt	is target = 1	0	2	1	1	4
	Musterhöhe	is target = 200	95	205	1	1	5
	Sichtbarer Abstand zw. Linien	none	0	1	1	1	3

Ausgegeben wurde von dem Programm eine Liste mit 37 möglichen Kombinationen sowie den entsprechenden Erwartungswerten für die resultierenden Ergebnisse (Auszug in Tabelle 11; komplette Tabelle im Anhang). Hiervon erfüllten nur die ersten 19 die Restriktionen voll.

Im ersten Schritt wurden die in der Tabelle angegebenen Lösungsvorschläge mehr als Richtlinie betrachtet, denn als Anweisung. Der neue Versuchsplan wurde grob von den Daten in dem Bereich der ersten 19 Zeilen abgeleitet, da immer noch ein möglichst breites Feld abgedeckt werden sollte. Die Eingangswerte für den nächsten Plan ergaben sich demnach wie folgt:

- Formfaktor (1,74; 1,72; 1,70)
- Offset (-0,22; -0,23; -0,25)
- Austrag (70; 65; 60)

Tabelle 11 Exportierte Lösungsvorschläge für angestrebte Zielwerte unter Berücksichtigung der Restriktionen

No	ff	Offset	Austrag	Unter- / - / Überfüllt	Musterhöhe	Sichtbarer Abstand zw. Linien
1	1,736	-0,250	68,630	1,000	200,000	0,422
2	1,729	-0,239	69,908	1,000	200,000	0,436
3	1,731	-0,242	69,501	1,000	200,000	0,433
4	1,735	-0,248	68,838	1,000	200,000	0,425
5	1,732	-0,244	69,252	1,000	200,000	0,430
6	1,733	-0,246	69,070	1,000	200,000	0,428
7	1,729	-0,239	69,984	1,000	200,000	0,437
8	1,731	-0,243	69,437	1,000	200,000	0,432
9	1,732	-0,243	69,380	1,000	200,000	0,432
10	1,734	-0,247	68,991	1,000	200,000	0,427
11	1,730	-0,241	69,714	1,000	200,000	0,435
12	1,729	-0,240	69,854	1,000	200,000	0,436
13	1,731	-0,242	69,569	1,000	200,000	0,433
14	1,730	-0,240	69,792	1,000	200,000	0,435
15	1,736	-0,249	68,679	1,000	200,000	0,423
16	1,733	-0,245	69,139	1,000	200,000	0,429
17	1,735	-0,249	68,751	1,000	200,000	0,424
18	1,730	-0,241	69,643	1,000	200,000	0,434
19	1,734	-0,247	68,942	1,000	200,000	0,427
20	1,739	-0,250	68,620	0,991	200,000	0,416
21	1,726	-0,237	70,000	1,000	198,851	0,443
22	1,734	-0,239	70,000	0,986	200,000	0,427
23	1,739	-0,239	69,922	0,972	200,000	0,418
24	1,715	-0,239	70,000	1,042	200,000	0,465
25	1,728	-0,250	67,588	1,000	194,619	0,439
26	1,702	-0,222	70,000	1,000	189,613	0,492
27	1,415	-0,150	50,000	1,000	175,200	1,069
28	1,416	-0,151	50,000	1,000	174,704	1,067
29	1,418	-0,150	50,011	0,991	175,183	1,063
30	1,420	-0,150	50,628	1,000	174,205	1,059

Da die nächsten Versuchspläne genaueren Aufschluss über den Einfluss der Eingangsgrößen geben sollten, wurden volle Versuchspläne gewählt, bei denen alle möglichen Kombinationen der Eckpunkte mindestens einmal angefahren wurden. Da jeder Eckpunkt für sich betrachtet trotzdem mehrfach ausgeführt wurde, waren an dieser Stelle nur zweimalige Wiederholungen für eine höhere Genauigkeit notwendig (zwei Punkte wurden dreimal angesteuert). Der Centerpoint wurde dreimal angefahren. Daraus ergaben sich 19 einzelne Durchgänge.

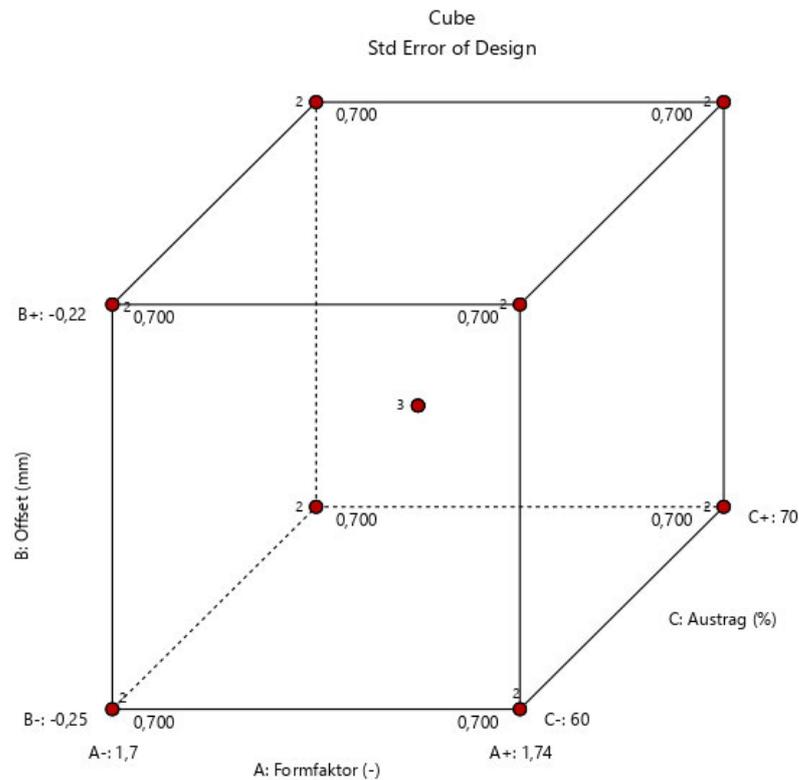


Abbildung 24 Würfelmodell der Eckpunkte im ersten detaillierten Versuchsplan [11]

Die Auswertung fand nur noch anhand von zwei Werten, der durchschnittlichen gemessenen Musterhöhe mittels Dickentaster, sowie der durchschnittlichen Breite der einzelnen Linien gemessen unter dem Mikroskop statt. Eine Reduktion auf diese zwei Werte bzw. Erhöhung des Detaillierungsgrades war möglich, da keine deutliche Unter- bzw. Überfüllung mehr feststellbar war.

Tabelle 12 Daten des ersten erweiterten Plans

Std	Run	Factor 1 A:Formfaktor -	Factor 2 B:Offset mm	Factor 3 C:Austrag %	Response 1 Musterhöhe my	Response 2 Linienbreite my
16	1	1,74	-0,22	70	140	367
1	2	1,7	-0,25	60	116	327
19	3	1,72	-0,23	65	130	301
10	4	1,7	-0,25	70	139	332
7	5	1,74	-0,22	60	131	299
14	6	1,7	-0,22	70	136	328
17	7	1,72	-0,23	65	132	306
15	8	1,74	-0,22	70	132	342
4	9	1,74	-0,25	60	112	329
18	10	1,72	-0,23	65	130	293
9	11	1,7	-0,25	70	128	347
3	12	1,74	-0,25	60	113	310
12	13	1,74	-0,25	70	128	319
2	14	1,7	-0,25	60	116	336
8	15	1,74	-0,22	60	131	309
5	16	1,7	-0,22	60	124	319
13	17	1,7	-0,22	70	142	349
6	18	1,7	-0,22	60	133	300
11	19	1,74	-0,25	70	129	351
20	20	1,74	-0,22	70	131	305
21	21	1,74	-0,25	70	122	330

Wie aus der Tabelle hervor geht, wurde die angestrebte Musterhöhe von 200µm nicht erreicht, das Maximum lag bei 142 µm. Die Muster waren jedoch schon deutlich gleichmäßiger und mit weniger auffälligen Fehlstellen, als bei dem ersten Versuchsplan. Trotzdem waren die Ergebnisse bezüglich der Höhe nicht zufriedenstellend, weshalb ein weiterer Versuchsplan gestartet wurde, ebenfalls von Tabelle 11 abgeleitet. An dieser Stelle wurde jedoch auf eine genauere Einhaltung der vorgeschlagenen Grenzwerte geachtet, wodurch sich ein Plan mit dicht beieinander liegenden Eckpunkten ergab.

In Abbildung 25 ist zu erkennen, dass die Messung der einzelnen Linien nicht immer eindeutig möglich war, insbesondere bei den stärker gefüllten Mustern. Dies hat sich auch in der Analyse widerspiegelt, lediglich der Austrag schien einen Effekt auf die Breite zu haben. Da die Breite mit der Tropfenform zusammenhängt, welche durch den Austrag mit beeinflusst wird (siehe Unterkapitel 2.2.2), ist dieser Zusammenhang plausibel. Für zukünftige Versuchspläne wurde allerdings aufgrund der schlechten Messbarkeit von dieser Bewertung abgesehen und nur noch anhand der ertasteten Höhe bewertet.

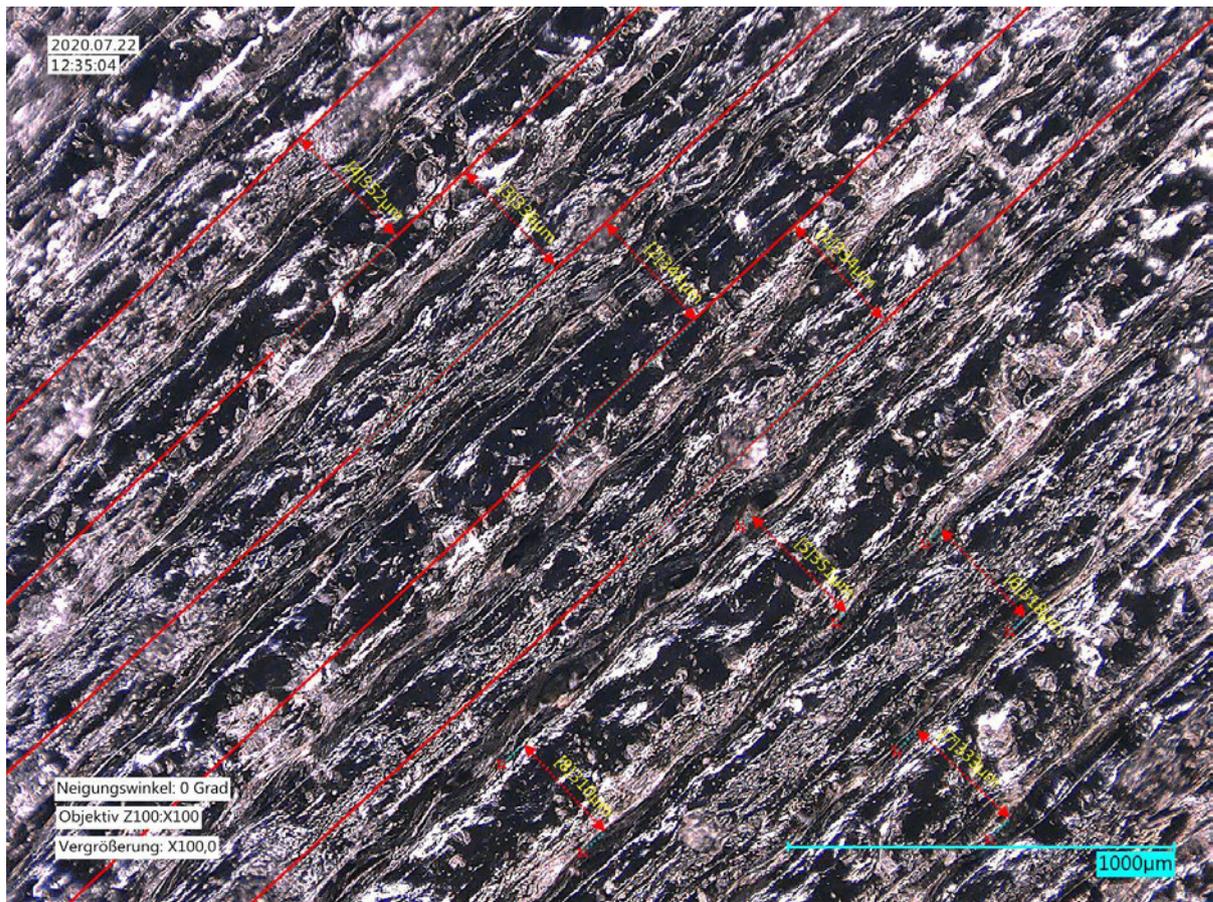


Abbildung 25 Beispielmessung der Linienbreite anhand von Mikroskopaufnahme [15]

Die Eingangswerte für diesen detaillierteren Plan, waren folgende:

- Formfaktor (1,75; 1,74; 1,73)
- Offset (-0,24; -0,24; -0,25)
- Austrag (70; 67,5; 65)

Wie bereits erwähnt, wurde mit diesem Plan nur noch die Höhe mittels Messtaster erfasst, wodurch zusätzlich die Auswertung beschleunigt werden konnte.

Tabelle 13 Daten des zweiten detaillierteren Plans

	Std	Run	Factor 1 A:Formfaktor -	Factor 2 B:Offset mm	Factor 3 C:Austrag %	Response 1 Musterhöhe my
	11	1	1,75	-0,25	70	110
	2	2	1,73	-0,25	65	98
	19	3	1,74	-0,24	67,5	109
	9	4	1,73	-0,25	70	100
	5	5	1,73	-0,24	65	107
	18	6	1,74	-0,24	67,5	100
	15	7	1,75	-0,24	70	98
	16	8	1,75	-0,24	70	101
	10	9	1,73	-0,25	70	137
	3	10	1,75	-0,25	65	99
	6	11	1,73	-0,24	65	124
	8	12	1,75	-0,24	65	98
	1	13	1,73	-0,25	65	100
	4	14	1,75	-0,25	65	95
	12	15	1,75	-0,25	70	102
	13	16	1,73	-0,24	70	110
	7	17	1,75	-0,24	65	100
	17	18	1,74	-0,24	67,5	108
	14	19	1,73	-0,24	70	108

Auch bei diesem Plan konnte, trotz genauer Einhaltung der theoretisch erforderlichen Grenzwerte, nicht die gewünschte Höhe von 200µm erreicht werden. Stattdessen waren die Muster jedoch sehr gleichmäßig mit nur minimalen Unterschieden und auch die ermittelte Höhe bewegte sich in einer Spanne von maximal 40µm Differenz.

Die Tatsache, dass alle Muster der beiden optimierten Versuchspläne keine deutlichen Unterschiede im Füllgrad aufwiesen und gleichzeitig die gewünschte Höhe nicht erreichten, kann der Hinweis auf einen bisher nicht berücksichtigten Zusammenhang zwischen Überfüllung und Zielhöhe sein. Es ist logisch, dass Muster mit mehr Material höher sind, als jene mit wenig Material.

Ein ebenmäßiges Druckbild mit vorhersehbarer Dicke wurde als zielführender betrachtet, als die gewünschte Dicke zu erreichen und dabei das Druckbild zu vernachlässigen. Die Begründung für die angestrebte Höhe lag vorwiegend in der Erfahrung begründet, dass dünnere Muster schwieriger herzustellen sind, als dicke. Ein Unterschreiten des Zielwertes konnte demnach als Erfolg gewertet werden. Ein neuer Richtwert wurde nicht festgelegt.

Die Optimierung wurde an dieser Stelle abgebrochen und die mit dem zweiten detaillierten Versuchsplan erstellten Muster für die Parameterentwicklung freigegeben.

### 5.3 Parameterdefinition

Aus den Versuchen des DoE konnten nun Standardparameter abgeleitet werden, die im Druck dauerhaft verwendet werden. Hierzu wurden von den letzten beiden Versuchsreihen optisch gute Muster mit einem sauberen Druckbild und ohne Fehlstellen anonymisiert von zwei Kollegen ausgewählt. Die Parameter der anonymen Muster dienten dann als Ausgangspunkt für abschließende Anpassungen.

Ausgewählt wurden vier Muster aus der zweiten, detaillierteren Reihe, die Muster 3, 14, 15 und 18, wobei 3 und 18 mit den gleichen Einstellungen produziert wurden. Alle Parameter liegen sehr dicht beieinander.

*Tabelle 14 Parameter ausgewählter Muster der zweiten, detaillierteren Reihe*

Muster	ff	os	Austrag
3; 18	1,74	-0,24	67,5
14	1,75	-0,25	65
15	1,75	-0,25	70

Bedruckt wurden Glasplatten mit PET-Beschichtung, als Muster wurde eine Variation der bisher verwendeten Dreiecke mit einem zusätzlichen Streifen auf 20% Füllung gewählt. Weil die Parameter so dicht beieinander lagen, wurde der Austrag auf 67,5 festgesetzt, die Variation des Offsets und des Formfaktors wurde beibehalten.

Die Glasplatten sind deutlich dicker, als die zuvor verwendeten ABS-Platten, der Offset musste demnach neu bestimmt werden. Der Offset beim Glas wurde zunächst auf  $os_{\text{Glas}}=1,75$  kalkuliert.

Da an dieser Stelle das erste Mal auf Glasplatten gedruckt wurde, gab es zunächst verschiedenen Probleme. Der Druck wurde insbesondere am Anfang immer wieder durch die Fehlermeldung „Austrag Istwert ...[außerhalb der] Toleranz“ unterbrochen, erst nach einigen Dreiecken schien sich der Prozess zu stabilisieren. Auch der Offset ließ sich nicht wie geplant einstellen. Das brachte die Idee auf, die Platten vor dem Druck bei Raumtemperatur für mindestens 2min aufwärmen zu lassen, da die Plattentemperatur Einfluss auf die Haftung zu haben scheint. Bei einer zu kalten Platte erstarrt die Masse zu früh und es ist nicht ausreichend Adhäsion für eine saubere Ablage vorhanden. Das Aufwärmen erhöht die Klebrigkeit und die Masse kann sauber abgelegt werden.

Mit der erwärmten Platte konnte der Druck vollständig und ohne Fehlermeldungen durchgeführt werden. Auch das Einstellen des korrekten Offsets war möglich, er konnte sogar weiter auf  $os_{\text{Glas}}=1,64$  reduziert werden. Auf eine weitere Variation wurde an dieser Stelle verzichtet, sodass schließlich nur zwei verschiedene Muster mit einer Variation im ff um 0,01 gedruckt wurden.

Die Muster wiesen optisch keinen Unterschied auf, die Höhenmessung mit dem Taster ergab jedoch eine leichte Differenz in der Dicke der Druckschichten, mit einem Mittelwert von ca.  $h=130\mu\text{m}$ . Der Formfaktor wurde auf  $ff_{\text{standard}}=1,74$  festgelegt, da dies die letzte Einstellung war.

Mit folgenden Einstellungen wurde in die Validierung übergegangen:

- A67,5
- Ff1,74
- $os_{ABS}=0,24$ ;  $os_{Glas}=1,64$

## 5.4 Validierung

Die entwickelten Standardparameter für A105\_50 geben optisch ein gutes Druckbild ohne Fadenzug, große Lücken oder andere Fehlstellen. Nun muss geprüft werden, ob das Druckbild bzw. die gewählten Parameter einen generellen Einfluss auf die Leistung des gedruckten Musters haben bzw. ob das Prozessfenster erweitert werden kann. Auch muss geprüft werden, ob sich die Parameter unter ähnlichen Materialien übertragen lassen oder ob sie nur auf eine spezifische Mischung anwendbar sind.

### 5.4.1 A105\_50

Als Mittel zur Überprüfung der Leistung basierend auf Variation des Druckbildes bzw. der Parametereinstellungen, wurden Klebkräfte über Pushouts nach Tesa-Standard aufgenommen (Vgl. Kapitel 4.3). Hierfür wurde wie in Abbildung 26 dargestellt ABS-Halterungen für die PO-Platten auf Glas aufgedruckt, wodurch eine akkurate Platzierung der Platten im Drucker möglich war (siehe Abbildung 27). In diese Halterungen konnten dann die Platten eingelegt und anschließend mit angepasstem Offset  $os_{PO}=6,04$  bedruckt werden. Nach dem Druck wurden die entsprechenden Rahmen verklebt und angepresst. Die Messung erfolgte wie in Unterkapitel 4.3 bereits beschrieben.

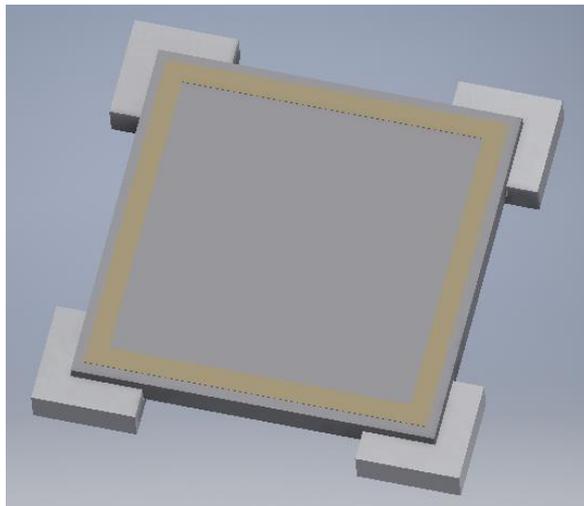


Abbildung 26 CAD-Grafik von ABS-Halterung mit Pushout-Platte und Verklebung [15]

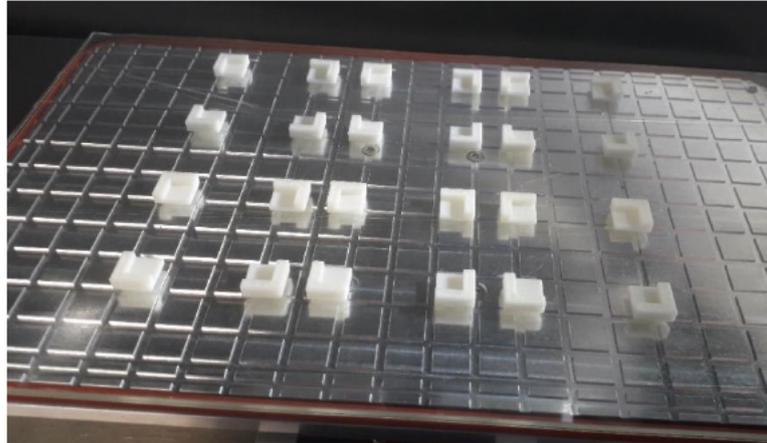


Abbildung 27 Anordnung ABS-Halterungen für Pushout-Platten [15]

Wie in 5.6.1 beschrieben, wurden die ersten Muster mit den festgelegten Standardparametern gedruckt. Hierbei konnte jedoch nicht die geforderte Schichtstärke von ca. 400 $\mu$ m erreicht werden, weshalb der Austrag auf 70% erhöht wurde. Die Standarddruckparameter für die Pushout-Versuche ergaben sich demnach mit:

- A70
- ff1,74
- $\sigma_{PO}$ -6,04
- T108

Zunächst wurden nur Muster bei diesen Standardparametern gedruckt und direkt warm aus dem Drucker verklebt. Da die Ergebnisse sehr gleichmäßig und sehr gut reproduzierbar waren, wurden verschiedene Variationen ausprobiert (siehe Tabelle 15). Dabei werden die nicht-gedruckten, frischen, standardbeschichteten Muster als Ausgangswert mit 100% Leistung angenommen. Die gedruckten Muster werden sowohl zu den frischen Mustern, als auch untereinander verglichen.

Tabelle 15 Ergebnisse Pushout-Versuche mit A105\_50

Mat.I	Bezeichnung	Arbeit W [mJ]		$F_{max1}$ [N]		$F_{max2}$ [N]	
		$\bar{x}_A$	Leistung [%]	$\bar{x}_{F1}$	Leistung [%]	$\bar{x}_{F2}$	Leistung [%]
A105_50	frisch 7d	605	100	180	100	217	100
	3D Standard 7d	467	80	170	90	219	100
	3D T120 7d	402	70	185	100	200	90
	3D Standard 5d	449	70	169	90	193	90
	3D kalt verklebt 5d	467	80	174	100	207	100
	3D Infill Variation 5d	502	80	184	100	214	100

Im Vergleich untereinander schneiden alle gedruckten PO-Versuche ähnlich gut ab, die Kraftspitzen liegen in der gleichen Größenordnung, wie die des frischen Musters. Der niedrigste Mittelwert  $\bar{x}_A$  wird von den Mustern erreicht, die mit erhöhter Düsen Temperatur von  $T_4=120^\circ\text{C}$  gedruckt wurden. Auffällig ist, dass der Moment der Verklebung offensichtlich nicht relevant für die Leistung der Verklebung ist. Da die Muster jedoch nur warm bzw. kalt verklebt und alle ausgekühlt verpresst wurden, kann diese Beobachtung nur auf einen möglichen Trend hinweisen, der weiter untersucht werden sollte. Es ist nicht auszuschließen, dass bei einer warmen Verpressung die Adhäsion zwischen Masse und Untergrund erhöht und somit die insgesamt Leistung gesteigert werden kann.

Die hier verwendeten PO-Muster wurden vor ihrer Messung zudem fotografisch erfasst und auf ihre Benetzungsoberfläche hin untersucht (Vgl. Unterkapitel 5.6.1).

In Kapitel 4.4 wurde die Alterung von Lappenmustern untersucht. Da es im Druck sowie zuvor bei der Lagerung ebenfalls zu Alterungsprozessen im Granulat kommen kann, wurden diese ebenfalls auf eine Farbänderung hin geprüft. Für die Messung der 3D-gedruckten Muster wurde mit A105\_50 eine quadratische Fläche mit drei Schichten auf die Kachel gedruckt und ebenfalls an mehreren Punkten vermessen. Auch hier zeigte sich eine deutliche Verfärbung hin zu gelb (Steigerung um 2,45 Punkte) und grün (Steigerung um 1,38). Basierend auf dieser Farbänderung ist das Material definitiv gealtert, in welchem Maße genau kann anhand der Daten jedoch nicht sicher gesagt werden. Unter der Berücksichtigung, dass es bei den künstlich gealterten Lappenmustern zu keinem Leistungsverlust kam, kann bestätigt werden, dass der Leistung-Verlust im Vgl zu den frischen Mustern nicht in der Alterung zu begründen ist, sondern lediglich im Herstellungsprozess der Muster.

#### 5.4.2 Massewechsel auf B105\_50

In den Versuchen mit A105\_50 konnten passende Parameter entwickelt werden, die zu reproduzierbaren Ergebnissen im Pushout und Ausdrucken von optisch guter Qualität geführt haben. Damit ist dieses Material vorerst als ausreichend untersucht eingestuft worden. Im nächsten Schritt mussten die Parameter anhand eines zweiten, komplexeren Materials validiert werden, daher fand ein Massewechsel statt. Der Massewechsel sollte zeigen, wie sich eine Variation des Materials auf den Druckprozess auswirkt bzw. ob die Parameter Austrag und Formfaktor generelle Gültigkeit haben. B105\_50 wurde als zweites Material ausgewählt, da das Harz-Kautschuk-Verhältnis sowie das Harz das gleiche sind, doch der verwendete Kautschuk sich unterscheidet. Der B-Kautschuk ist langkettiger als der A-Kautschuk, wodurch im Herstellungsprozess mehr Energie für eine vollständige Verbindung mit dem Harz benötigt wurde.

Die alte Masse wurde bestmöglich aus dem System gefördert, indem die Schneckentemperatur und der Ausspritzdruck deutlich erhöht wurden. Dann wurde sämtliche Masse ausgespritzt, bis sich kein Massepolster mehr gebildet hat. Erst dann wurde das neue Granulat eingegeben und das System nochmal für 30min mit der neuen Masse durchgespült, bis wirklich sicher war, dass sich von der alten Masse nur noch insignifikante Restmengen im Drucker befinden. Bereits hierbei konnten optische Unterschiede zum vorherigen Material festgestellt werden. Die Ketten waren deutlich dicker und von einer anderen Färbung. Auch

der Geruch unterscheidet sich deutlich, was als weiterer Indikator für den erfolgreichen Massewechsel genutzt wurde.

A105\_50 hatte am DS eine gemessene Masseaustrittstemperatur von ca. 124°C. Im Druck verarbeitet werden konnte das entsprechende Granulat mit einer Düsentemperatur von 108°C, woraus sich eine Differenz von -16K ergibt. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde die Düsentemperatur am freeformer für B105\_50 auf 116°C eingestellt, da die Masse B105\_50 bei der Herstellung eine Masseaustrittstemperatur von 132°C hatte. Der Offset und der Austrag sowie der ff wurden von A105\_50 übernommen.

Die Parameter für den ersten Druck mit B105\_50 auf ABS waren demnach folgende:

- A70
- Ff 1,74
- Offset -0,24
- T116

Bei dieser Einstellung wurde kein sauberes Druckbild erzeugt, ein kontinuierliches Ablegen der Masse auf der Platte war nicht möglich. Es kam wiederholt zu der Fehlermeldung „Austrag Istwert ... [außerhalb der] Toleranz“, was auf einen Massestau bzw. einen Druckverlust durch das plötzliche Lösen eines solchen Staus hindeutet. Das Material ließ sich allerdings gut ausspülen, war gleichmäßig im Fluss bei der Einstellung des Massedrucks und nicht auffällig in der Prozessierung außerhalb des eigentlichen Drucks. Ein deutlicher Unterschied zu A105\_50 war jedoch das Ablöseverhalten der Masse von den eingelegten ABS-Platten. Die unstrukturiert aufgetragenen Massehaufen waren spürbar einfacher zu entfernen und hinterließen keine Rückstände.

Eine Änderung des Offsets, Austrags oder geringfügige Erhöhung der Temperatur auf 120°C hatte nicht den erhofften Effekt der verbesserten Ablage im Druck. Dieses Verhalten erinnerte an die ersten Drucke auf Glas. Hier war die Temperatur des Substrates zu gering, sodass die Masse zu schnell abkühlte und nicht ausreichend Adhäsion vorhanden war. Ein Aufwärmen der Platte löste das Problem. Eine zu kalte Platte war bei der vorliegenden Haftungsproblematik nicht die Ursache, daher musste das Problem woanders liegen.

Eine schrittweise Erhöhung der Temperatur ab 130°C um jeweils 5K unter Beibehaltung von A70 und  $os_{ABS} = -0,24$  bei dem Formfaktor 1,74 führte schließlich zu einer Verbesserung des Druckbildes und zu einer kontinuierlichen Ablage ab einer Temperatur von 135°C an der Düse, jedoch noch immer mit unsaubereren Kanten und Fadenzug. Erst bei 140°C war das Druckbild sauber und ohne auffällige Fehlstellen. Da keine Verbesserung zwischen 140°C und 145°C festgestellt werden konnte, wurde die Versuchsreihe an dieser Stelle abgebrochen und die Temperatur auf T140 eingestellt.

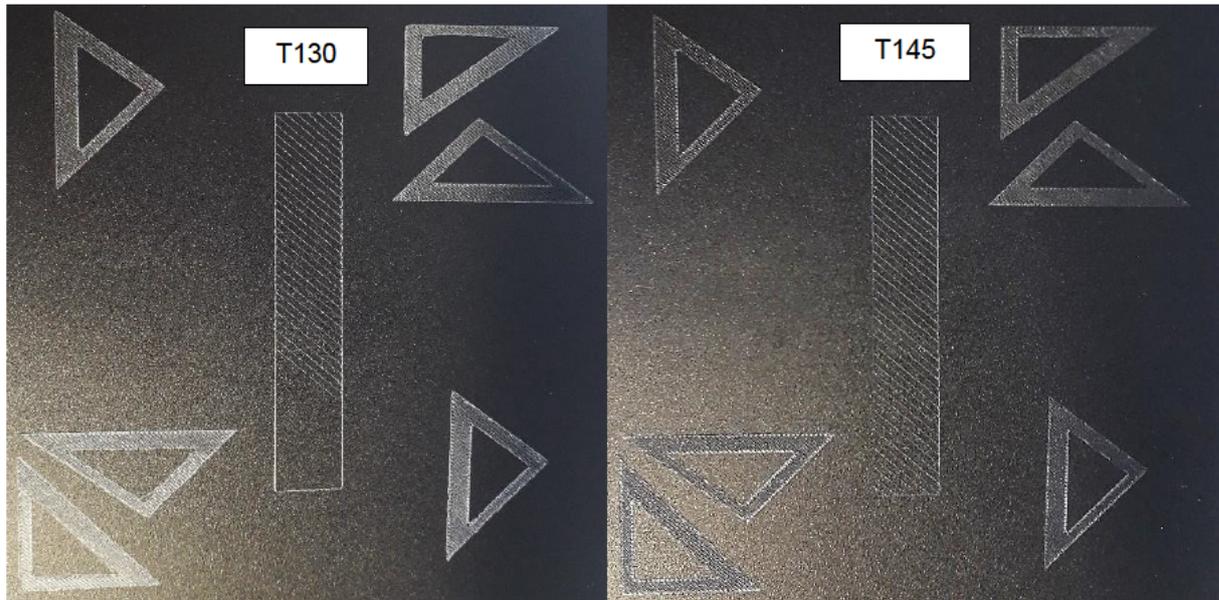


Abbildung 28 Einschichtiges Druckmuster B105\_50 auf ABS; Vergleich 130°C und 145°C [15]

Um das Druckbild und die Ablage des Hotmelts auf dem ABS weiter zu verbessern, wurde nun der Offset reduziert. Bis  $-0,33$  war dies störungsfrei möglich, dann kam es wieder zu verstärkten Masseansammlungen an der Düse. Die Qualität des Druckbildes war bei  $os_{ABS} = -0,26$  die beste, sehr gleichmäßig und nicht durch die Düse zusammengedrückt. Auf Glas hat sich ein Offset von  $os_{Glas} = 1,67$  als optimal herausgestellt.

Die abschließend gewählten Standardparameter für B105\_50 auf ABS ergaben sich demnach wie folgt:

- A70
- Ff 1,74
- $os_{ABS} = -0,26$ ;  $os_{Glas} = 1,67$
- T140

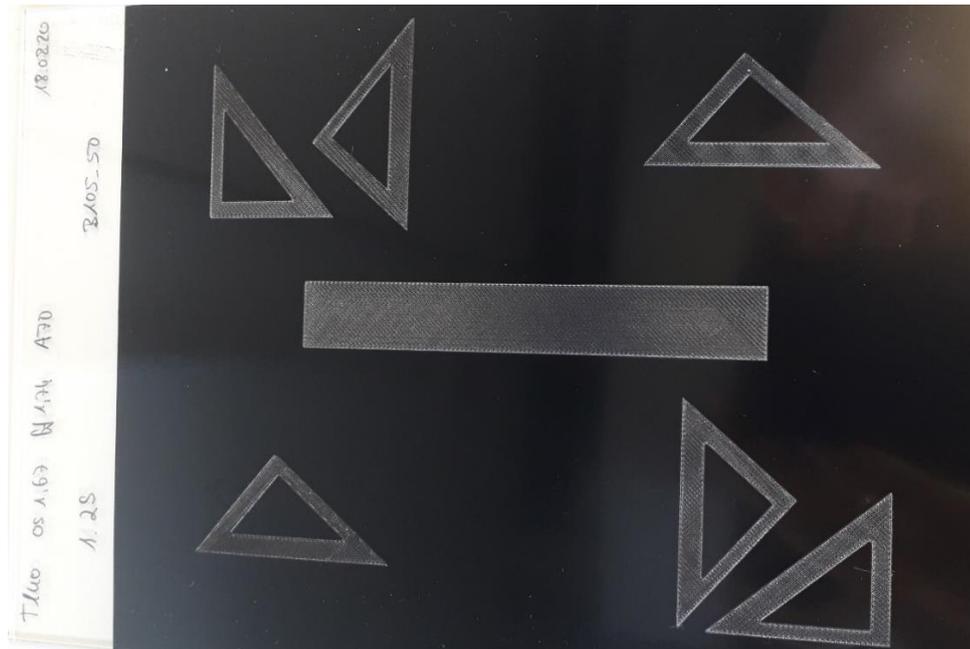


Abbildung 29 Zweisichtiges Druckmuster B105\_50 auf Glas mit Endparametern [15]

Da die reine Verarbeitbarkeit ohne Druckvorgang bei 120°C schon gegeben war, kam die Frage auf, ob bei einer höheren Temperatur die Tropfenkette eine andere Form haben könnte. Durch die Erhöhte Fluidität war zu erwarten, dass die Tropfen bei der höheren Temperatur länglicher und schmäler sind.

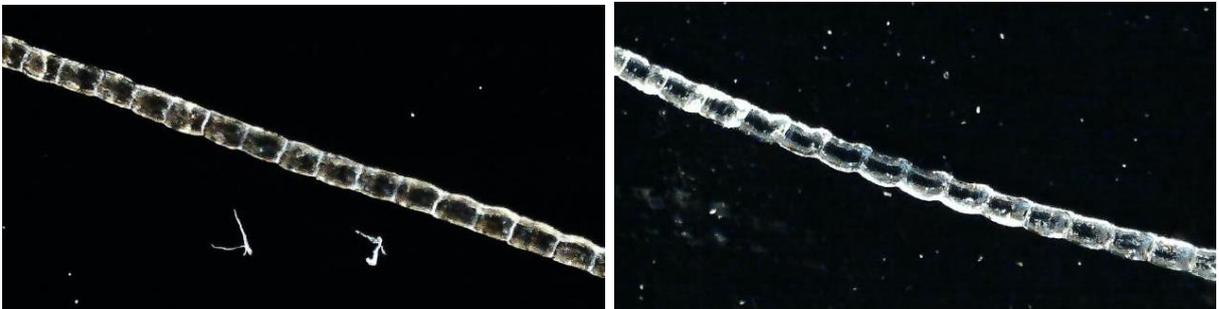


Abbildung 30 Tropfenkette B105\_50 A70 (l. T116; r. T140) [15]

Diese Erwartung hat sich nur bedingt bestätigt. Die Tropfenlänge ist etwa konstant geblieben, die Tropfenform jedoch eine andere. Die Tropfen liegen in der Kette nicht glatt aneinander sondern sind gewölbt, ungleichmäßiger in der Gesamtstruktur. Dass die Länge und Dicke der Tropfen vergleichbar sind, liegt an der Steuerung des freeformers. Sie regelt durchflussgesteuert, wie viel Material durch die Düse ausgetragen wird und dass diese Menge für den jeweiligen Austragswert konstant ist, sowohl für unterschiedliche Materialien als auch für unterschiedliche Temperaturprofile.

An dieser Stelle muss anschließend noch diskutiert werden, aus welchen Gründen die ermittelte Temperatur zur Verarbeitung nicht im Druck einsetzbar war, aber in den druckunabhängigen Prozessen zu keinem Fehler geführt hat. Dabei muss zunächst geklärt werden, was den Druckprozess vom simplen Masseaustrag unterscheidet.

Zum einen ist der Abstand zwischen Düse und Platte ein anderer. Der Offset bewegt sich beim Druck in einem Bereich von wenigen Millimetern, beim Spülen und anderen Vorgängen ist die Platte über 200mm von der Düse entfernt, die Masse kann also ungehindert austreten. Des Weiteren wird im Druck ein zuvor durch das Slicing-Programm definiertes Muster abgefahren, mit berechneten Achsenbewegungen, Stopps und Wendepunkten. An dieser Stelle kommt auch der Formfaktor hinzu, der die Form des Tropfens bei der Ablage beeinflusst.

Der erste Gedanke war, dass der Offset zu gering war, weshalb es zu einem Massestau an der Düse kam. Das war nicht der Fall, eine Veränderung des Offsets sowohl nach oben, als auch nach unten, brachte keine Verbesserung. Das Druckbild wurde mit zunehmendem Offset hingegen unsauberer, Fadenzug nahm zu. Die Schnüre wurden nicht auf der Platte abgelegt, hatten keine Haftung.

Wenn die Tropfenkette also nicht kontinuierlich auf der Platte abgelegt werden kann, musste es an etwas anderem liegen. Der Formfaktor beeinflusst nur die Tropfenform, er kann als Einflussfaktor für das Ablageverhalten auch ausgeschlossen werden. Als einziger zu klärender Punkt bleibt demnach das Fahrmuster, welches ebenfalls kein Kriterium sein kann, da es so berechnet wird, dass die Masse optimal auf der Platte abgelegt wird. Zudem wurde das gleiche Programm auch schon beim letzten Material verwendet und dort kam es zu keinem Ablageproblem. Die einzige Änderung fand im Material bzw. in der Materialkombination Platte-Masse statt. Das B105\_50 scheint bei moderater Erwärmung auf 116°C nicht ausreichend an der ABS-Platte zu haften, wodurch es sich zum Beispiel als Masseklumpen deutlich einfacher von der Platte lösen lässt, als das A105\_50. Die Änderung der Kautschukkomponente ist demnach verantwortlich für die Haftung auf verschiedenen Untergründen. Die mit höherer Temperatur ausgespülten Masseklumpen ließen sich nicht mehr so leicht von den ABS-Platten lösen.

Die erwärmte Klebmasse wird idealerweise vollkommen ohne Druck auf dem Untergrund platziert, sie muss aus sich selbst heraus auf diesem liegen bleiben. Durch die Temperaturerhöhung wird die Masse fluidier, die Adhäsion wurde durch die reduzierte Oberflächenspannung erhöht [21]. Die Tropfen haften besser an der Platte und werden nicht mit der Düse mitgezogen, wodurch ein Aufstau entsteht, der zu der Fehlermeldung „Austrag ...[außerhalb der] Toleranz“ führt.

Bei der Verarbeitung von Hotmelts im 3D-Druck muss demnach immer auch das Zusammenspiel der Masse mit dem Untergrund, auf dem gedruckt werden soll, berücksichtigt werden. Die Erhöhung der Temperatur ist demzufolge ein Mittel zum Ausgleich, wenn es an dieser Schnittstelle zu Problemen kommt.

Die Übertragung der optimalen Prozessparameter von A105\_50 auf A105\_45 hat zu keinen Schwierigkeiten geführt und war ohne Anpassungen bezüglich der Temperatur möglich. A105\_45 ließ sich genauso drucken, wie A105\_50.

### 5.4.3 Prozessfenster überprüfen

Die A105\_50 Klebkraftmessungen ergaben im 3D-Druck unter definierten und immer ähnlichen Bedingungen sehr stabile und reproduzierbare Ergebnisse (siehe Tabelle 19). Die Reproduzierbarkeit muss jedoch auch später in der Anwendung gegeben sein. In einer Produktionslinie kann nicht von immer optimalen Bedingungen ausgegangen werden, weshalb es wichtig ist, das Prozessfenster zu kennen, in dem interagiert und auf Schwankungen der Umgebung und auch innerhalb der Linie reagiert werden kann. Für die Überprüfung des Fensters wurden daher, wie in Kapitel 4.3 bereits erläutert, verschiedene Grenzbereiche angefahren und ihr Einfluss auf die Klebkräfte und das Druckbild ermittelt. Das Druckbild wird in Kapitel 5.6.1 näher untersucht.

Variiert wurden der Austrag (Untergrenze 55%; Obergrenze 80%), der Formfaktor (Untergrenze 1,68; Obergrenze 1,80) und die Temperatur an der Düse bzw. damit zusammenhängend auch in der Temperaturzone 2 (druckbare Untergrenze ist mit T140 erreicht; Obergrenze 200°C), nach folgendem Versuchsplan:

Tabelle 16 Versuchsplan zur Prozessfensterüberprüfung

Versuch PF_	Zusatzuntersuchung	Austrag	Temperatur
1	μCT; PO	55	140
2		60	140
3		65	140
4		75	140
Standard		70	140
5		80	140
6	μCT; PO	85	140
7		70	150
8	PO	70	160
9		70	170
10	PO	70	180
11	μCT; PO	70	200

Alle Muster wurden auf glatten ABS Platten gedruckt, sodass immer alle Variationen vom Formfaktor auf einmal abgefahren werden konnten, mit einem Vergleichsstreifen mit ff1,74 daneben. Für den PO wurden bei den markierten Punkten nur jeweils der größte und der kleinste Formfaktor bzw. bei der erhöhten Temperatur nur mit ff1,74 gedruckt.

Untersucht wurden bei den PO zum einen die Leistung der Variationen im Vergleich zum gedruckten Muster mit Standardeinstellungen also Basis mit 100% (A70; ff1,74; T140) und zum anderen die Standardabweichung  $s$  basierend auf den gemessenen Stichproben sowie der prozentuale Anteil von  $s$  zum Mittelwert  $\bar{x}_A$  (siehe Tabelle 17). Ziel war es zu ermitteln, ob die Variationen eine Veränderung der Leistung, als auch in der Streuung dieser bewirkt.

Tabelle 17 Klebkräfte bei Prozessfensterüberprüfung von B105\_50

Mat.	Bezeichnung	Arbeit W [mJ]				F <sub>max1</sub> [N]		
		$\bar{x}_A$	Leistung [%]	s <sub>A</sub>	s <sub>A</sub> [% von $\bar{x}_A$ ]	$\bar{x}_{F1}$	Leistung [%]	s <sub>F</sub>
B105_50	3D 2S	236	100	48	20	244	100	27
	3D T180	301	130	41	13	259	110	25
	3D T200	290	120	32	11	258	110	29
	3D A55 ff1,68	223	90	60	27	240	100	41
	3D A55 ff1,80	228	100	32	14	253	100	16
	3D A85 ff1,68	353	150	51	14	237	100	17
	3D A85 ff1,80	266	110	63	24	236	100	57
	3D T160 A85 ff1,68	316	130	21	7	261	110	15
	3D T160 A85 ff1,80	268	110	28	11	229	90	28

Zunächst wird die Variation des Austrags betrachtet. Durch den Austrag wird geregelt, wie viel Masse durch die Düse auf die Platte aufgetragen wird. Die Erwartung ist an dieser Stelle, dass weniger Masse (durch weniger Austrag) auch weniger Leistung (Arbeit und Kraft) bedeutet und im Gegenzug mehr Masse mehr Leistung entspricht. In Bezug auf die Arbeit wurde diese Erwartung bestätigt, hier zeigt sich eine entsprechende deutliche Abhängigkeit mit einem generellen Leistungsabfall ( $W_{A55} < W_{A70} < W_{A85}$ ).

Der Formfaktor führt ebenfalls zu einem Leistungsgefälle. Betrachtet man nun die beiden Muster mit A85 und T160, wird deutlich, dass mit einem Formfaktor von 1,66 mehr Arbeit bis zum vollständigen Versagen der Verklebung aufgenommen werden kann, als bei einem Formfaktor von 1,80. Mit einer Steigerung der Arbeit um 40 bzw. 20% bei ff1,68 gegenüber dem Vergleichsmuster mit ff1,80 ist der Einfluss als signifikant einzuschätzen. Die A55 Muster werden aufgrund des nur geringfügig voneinander abweichenden Mittelwertes  $\bar{x}_A$  und der verhältnismäßig hohen Standardabweichung an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Die Standardabweichung der Ergebnisse ist sowohl bei der Arbeit als auch bei der Kraftspitze F<sub>max1</sub> nicht durch die Variationen in einer signifikanten Größenordnung gestiegen oder gesunken, dass eine qualitative Aussage getroffen werden kann. Es scheint jedoch eine Tendenz dahingehend zu geben, dass die Standardabweichung der Arbeit mit steigender Temperatur sinkt, wenn nur die Muster mit Temperaturvariation betrachtet werden. Das standardgedruckte Muster (T140) weist eine geschätzte Standardabweichung von s<sub>A,2S</sub>=48 (20%) auf, während s<sub>A,T180</sub>=41(13%) und s<sub>A,T200</sub> =32 (11%). Der Prozess liefert offenbar stabilere Ergebnisse mit steigender Drucktemperatur. Dies könnte mit der verbesserten Benetzung beider Kontaktflächen aufgrund der herabgesetzten Oberflächenspannung zusammenhängen. Dieser Trend muss jedoch durch mehr und genauere Messungen überprüft werden. Auch die Grenze, ab der die Leistung aufgrund von Materialschädigung oder anderen temperaturbedingten Fehlern wieder abnimmt, muss genauer definiert werden.

Die bisher standardmäßig im Druck verwendeten Parametereinstellungen sind rein bezüglich der Leistung nicht ausgereizt, durch die Temperatur und die Änderung des Formfaktors kann die Arbeit vergrößert werden. Die Kraftspitze  $F_{\max 1}$  ist deutlich schwieriger zu beeinflussen, sie scheint nicht von kleinen Prozessänderungen abzuhängen, was darauf hindeutet, dass es sich hierbei um eine Materialeigenschaft handelt.

## 5.5 Klebtechnische Bewertung der Drucke

Dieses Kapitel dient einer übergreifenden und umfassenderen Betrachtung des Verhaltens der gedruckten Muster im Vergleich zu den standardmäßig hergestellten unter Belastung. Es werden sowohl die Klebkräfte genauer untersucht als auch das Verhalten im Scherversuch.

### 5.5.1 Klebkräfte

Der Verlauf der Kurven ist für die geprüften Mischungen A105\_50 und B105\_50 zueinander grafisch unterschiedlich. Die 3D-gedruckten Muster unterscheiden sich zu dem standardbeschichtetem jedoch vor allem in der Dehnungslänge und Kraftmaxima. Bei A105\_50 sind im generellen Verlauf Ähnlichkeiten erkennbar, bei B105\_50 ist er gänzlich anders. (siehe Abbildung 31).

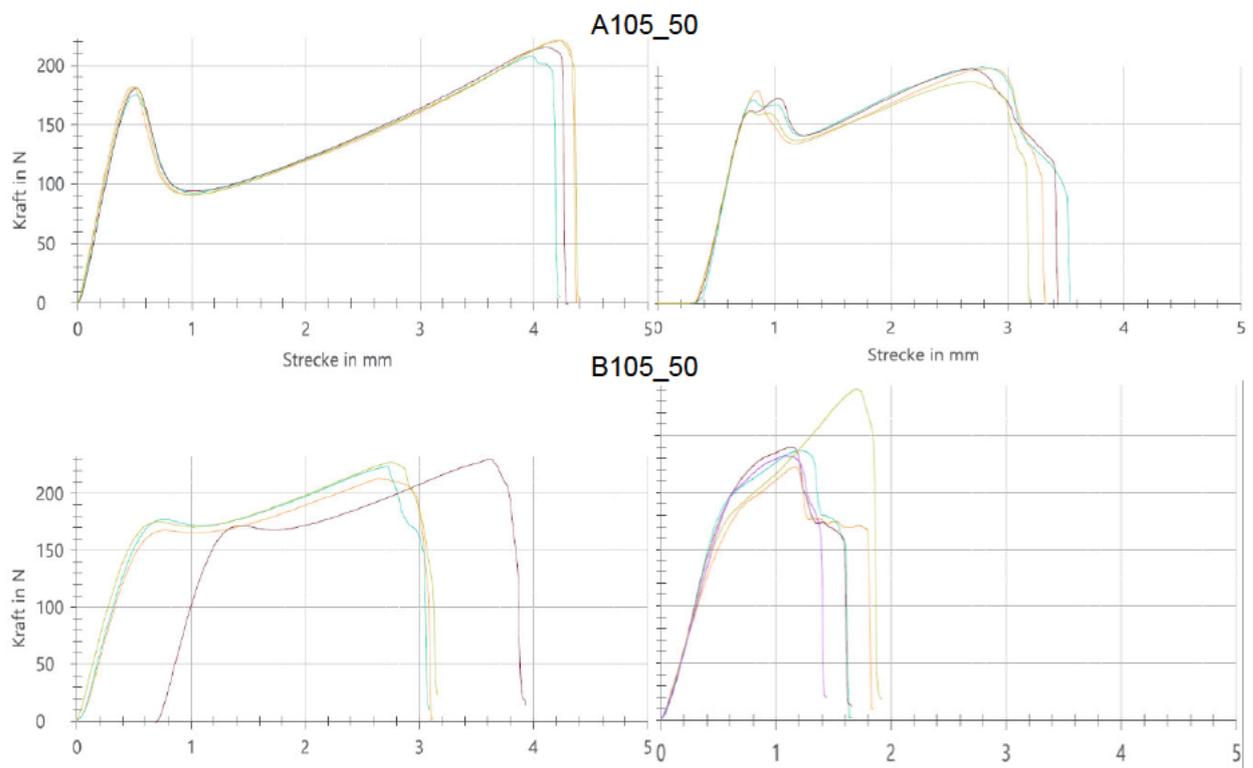


Abbildung 31 PO-Kurvenverlauf im Vergleich (linke Seite frische Lappenmuster, rechte Seite 3D gedruckt; oben A105\_50, unten B105\_50) [19]

In Tabelle 18 werden die Mittelwerte vom ersten sowie zweiten Kraftmaximum und der aufgenommenen Arbeit aller vermessenen Proben aufgeführt. Angegeben ist ebenfalls die

Leistung in Prozent und auf die nächste Zehnerstelle gerundet, dabei wird das standardbeschichtete Muster mit 100% als Vergleichswert eingesetzt. Die farbliche Markierung gibt Übersichtlichkeit. Gekennzeichnet sind mit dunkelgrün die höchsten Prozentsätze und mit rot die niedrigsten. Der Vergleichswert 100% ist mit gelb gekennzeichnet.

Die Bezeichnung der Muster ergibt sich zum einen aus der Unterscheidung zwischen den *frischen* Lappenmustern und den 3D-gedruckten. Bei den 3D-gedruckten Mustern erfolgt eine Differenzierung nach den Druckparametern: nach jeweiligen *Standardbedingungen* gedruckte Muster, veränderte Druckeinstellungen (Austrag *A*, Formfaktor *ff*, *Infill* ö.ä.) Schichtzahl (eine Schicht *1S* oder zwei *2S*), oder dem Schneckentemperaturprofil *T*. Die Lagerung bei Raumtemperatur ist immer am Ende der Bezeichnung mit 5 oder 7d angegeben.

Auffällig ist auf den ersten Blick, dass das Kraftmaximum  $F_{\max 1}$  für die mit B105\_50 gedruckten Muster deutlich über dem des Lappenmusters liegt, die Arbeit jedoch geringer ist. Die Kurve ist demnach deutlich kürzer (vgl. Abbildung 31). Es gibt hier zudem kein zweites Kraftmaximum. Bei den 3D\_A105\_50 Mustern ist es ähnlich, auch hier sind die Kraftmaxima vergleichbar mit denen des Standardmusters und die Arbeit fällt geringer aus.

Tabelle 18 Mittelwerte Pushout Ergebnisse

Mat.	Bezeichnung	Arbeit W [mJ]		$F_{\max 1}$ [N]		$F_{\max 2}$ [N]	
		$\bar{x}_A$	Leistung [%]	$\bar{x}_{F1}$	Leistung [%]	$\bar{x}_{F2}$	Leistung [%]
A105_50	frisch 7d	605	100	180	100	217	100
	3D Standard 7d	467	80	170	90	219	100
	3D T4 7d	402	70	185	100	200	90
	3D Standard 5d	449	70	169	90	193	90
	3D kalt verklebt 5d	467	80	174	100	207	100
	3D Infill Variation 5d	502	80	184	100	214	100
B105_50	frisch 7d	531	100	176	100	224	100
	3D 1S 6d	110	20	171	100		
	3D 2S 6d	236	40	244	140		
	3D T180 6d	301	60	259	150		
	3D T200 6d	290	50	258	150		
	3D A55 ff1,68 6d	223	40	240	140		
	3D A55 ff1,80 6d	228	40	253	140		
	3D A85 ff1,68 6d	353	70	237	130		
	3D A85 ff1,80 6d	266	50	236	130		
	3D T160 A85 ff1,68 6d	316	60	261	150		
	3D T160 A85 ff1,80 6d	268	50	229	130		

Dass die gedruckten Muster so viel mehr Kraft aufnehmen können, als die klassischen Lappenmuster, liegt vermutlich an dem Zusammenwirken der Tropfenketten. Während der

Prüfung bilden sich die einzelnen Drucklinien und Schichten als deutliche Fibrillen zwischen dem Fenster und dem Rahmen aus, auf die die Kraft gleichmäßig aufgeteilt ist (siehe Abbildung 32). Auch bei einem Standardmuster kommt es zu dieser Fibrillenausbildung, doch ist sie hier deutlich feinteiliger. Da die Fibrillen sich hier zudem aus einer geschlossenen Fläche lösen, wirken sie direkt zusammen. Bei den gedruckten Mustern sind die Fibrillen strukturell durch die aufeinanderliegenden und vernetzten Tropfenketten vorgegeben. Sie können sich stark dehnen, ohne adhäsiv zu versagen, diese Dehnung jedoch nicht lange aufrecht erhalten.

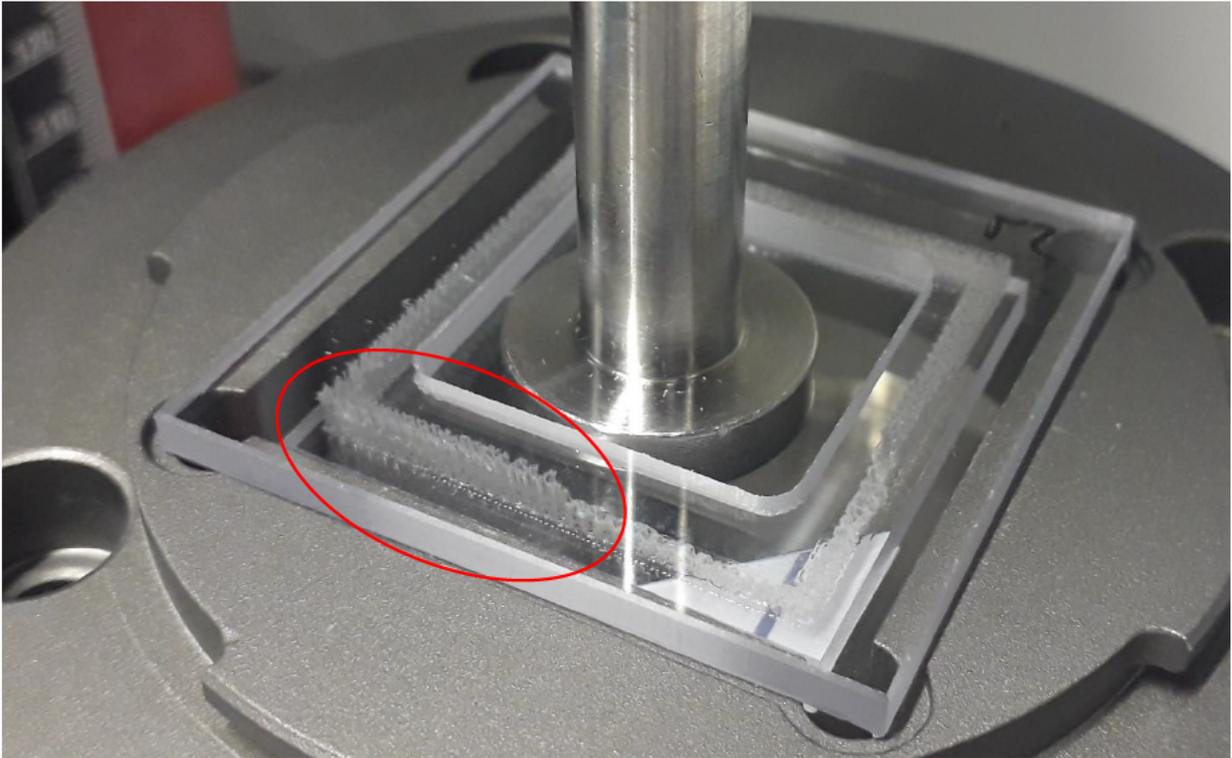


Abbildung 32 Fibrillenausbildung bei gedrucktem Pushout-Muster [15]

Die gealterten Muster unterscheiden sich vor allem in der Höhe der ersten Kraftspitze, sie fällt deutlich geringer aus, als bei den frischen Mustern. Die Arbeit ist auf einem ähnlichen Niveau und auch das zweite Kraftmaximum liegt in dem Bereich des ungealterten.

Tabelle 19 Mittelwerte Pushout Ergebnisse 3D gedruckter Muster

Mat.	Bezeichnung	Arbeit W [mJ]		F <sub>max1</sub> [N]		F <sub>max2</sub> [N]	
		Mittelwert	Leistung [%]	Mittelwert	Leistung [%]	Mittelwert	Leistung [%]
A105_50	3D Standard 7d	467	100	170	100	219	100
	3D T4 7d	402	90	185	110	200	90
	3D Standard 5d	449	100	169	100	193	90
	3D kalt verklebt 5d	467	100	174	100	207	90
	3D Infill Variation 5d	502	110	184	110	214	100
B105_50	3D 1S	110	50	171	70		
	3D 2S	236	100	244	100		
	3D T180	301	130	259	110		
	3D T200	290	120	258	110		
	3D A55 ff1,68	223	90	240	100		
	3D A55 ff1,80	228	100	253	100		
	3D A85 ff1,68	353	150	237	100		
	3D A85 ff1,80	266	110	236	100		
	3D T160 A85 ff1,68	316	130	261	110		
	3D T160 A85 ff1,80	268	110	229	90		

Deutlich ist hier zu sehen, dass die einzelne Schicht nur etwa die Hälfte der Energie gegenüber dem standardmäßig gedruckten zweischichtigen Muster aufnehmen kann. In weiteren Versuchen sollte geklärt werden, ob die Arbeit im Pushout durch eine dritte Schicht bzw. einen deutlich erhöhten Austrag gesteigert werden kann und ob auch die dritte Schicht eine lineare Steigerung der Arbeit mit sich bringt.

Ein anderes Verhalten in der Prüfung war im Vergleich von der Standardbeschichtung zum 3D-Druck zu erwarten, da es sich um einen anderen Prozess handelt. Die gezeigte Leistung bezüglich des ersten Kraftmaximums entspricht dennoch dem vergleichbaren Standardmuster. In der Anwendung kann von ähnlichem Verhalten ausgegangen werden.

### 5.5.2 Scherverhalten

Die Ermittlung des Scherverhaltens über den Mikroscherweg (MSW) ist eine anwendungsunabhängige Prüfung. Es gibt verschiedene Methoden, den Mikroscherweg aufzunehmen, für die in dieser Thesis untersuchten Materialien wurde der Mikroscherweg mit Relaxation für doppelseitige Klebmassen gewählt. Bei diesem Verfahren wird ein 10mm breiter Streifen Klebmasse auf der einen Seite mit Aluminiumfolie verklebt, die offene Seite wird anschließend auf eine Prüfplatte aufgetragen, sodass sie leicht übersteht (siehe Abbildung 33) und mit einer Walze angepresst. Bei Bedarf, wenn die Probe nicht steif genug ist, kann ein

Streifen Verstärkung mittig aufgeklebt werden. An der Probe wird eine Klammer befestigt, in die im Prüfgerät ein Gewicht eingehängt wird. Für jedes Muster werden immer zwei Proben hergestellt und gleichzeitig geprüft.

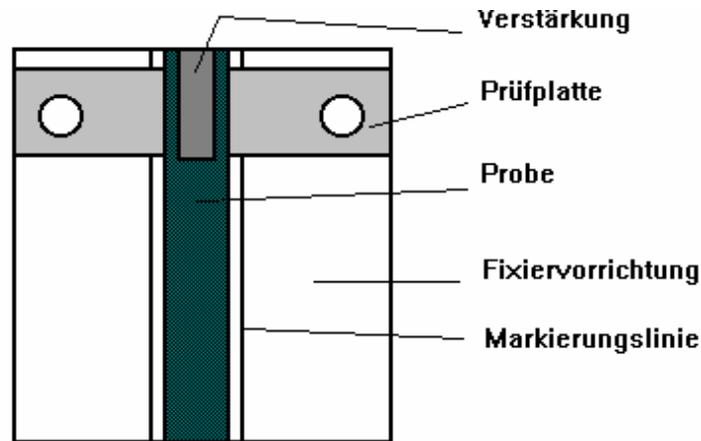


Abbildung 33 Skizze MSW Probenvorbereitung nach Tesa Standard [22]

Für die Prüfung wird die Prüfplatte auf  $40^\circ$  erhitzt und die Probe für  $t=15\text{min}$  mit hier 100g belastet, dann wird die Probe für weitere 15min entlastet (relaxiert). Während der  $2t=30\text{min}$  Prüfdauer nimmt ein Wegmesser den vertikalen Schwerweg der Probe in  $\mu\text{m}$  auf und überträgt ihn in ein Diagramm (Beispiel siehe Abbildung 34).

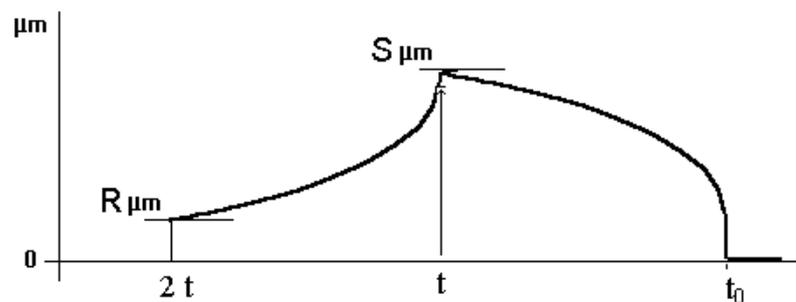


Abbildung 34 Beispielkurve MSW mit Relaxation [22]

Aus der Differenz der Schermaximums  $S$  und dem relaxierten Minimums  $R$  kann der Anteil der elastischen Verformung ermittelt werden. Die Differenz von  $R$  zu dem Nullpunkt ist der verbleibende plastische Anteil.

Im 3D-Druck können im Gegensatz zu standardbeschichteten Proben verschiedene Beschichtungsmuster gewählt werden, welche in der Anwendung Vorteile haben können. Um dies zu überprüfen, wurden zwei unterschiedlich gedruckte Proben mit zwei Standardproben B105\_50, insgesamt demnach acht einzelne Proben, verglichen.

Die zwei gedruckten Proben unterscheiden sich in der Anordnung der Linien. Eine Probe wurde mit einer horizontalen und einer vertikalen Schicht gedruckt (Probe #), bei der anderen liegen die Schichten um 45° verdreht auf der Prüfplatte (Probe x bzw. 45°; siehe Abbildung 35).

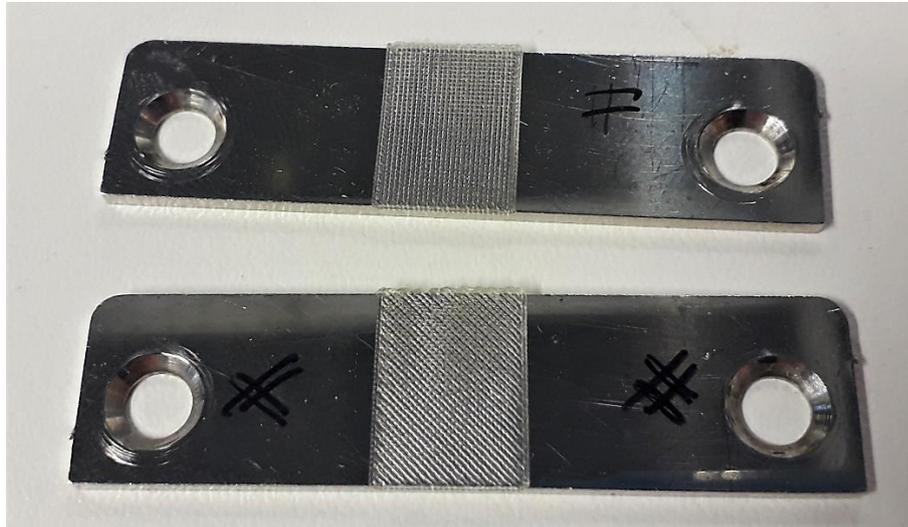


Abbildung 35 Verschieden bedruckte MSW Prüfplatten [15]

Die arithmetischen Mittel der Ergebnisse wurden in eine Tabelle eingetragen und der durchschnittliche elastische Anteil beider Proben berechnet (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20 Mittelwerte der Scherwege bei MSW

Muster	S [ $\mu\text{m}$ ]	R [ $\mu\text{m}$ ]	Elastischer Anteil [ $\mu\text{m}$ ]
B105_50	26,0	7,7	18,3
3D_B105_50_45°	21,0	4,9	16,1
3D_B105_50_#	19,2	2,0	17,2

Da die Auslenkung der Proben gering war, können die Werte nur als Trend betrachtet werden, weshalb auch nur der elastische Anteil verglichen wird. Für eine genaue Analyse bedarf es weiterer Prüfungen.

Die beiden gedruckten Muster unterscheiden sich im elastischen Anteil kaum voneinander, es scheint demnach zumindest bei geringer Belastung keinen Einfluss durch die Anordnung des Drucks zu geben. Auch ist der elastische Anteil der Druckproben ähnlich hoch, wie bei dem Standardmuster (vgl. Tabelle 20, Zeile 1).

## 5.6 Optische Untersuchungen

Parameteränderungen haben nicht nur Einfluss auf mechanische Kennwerte, sondern auch auf optische bzw. strukturelle. Ob es einen Zusammenhang zwischen diesen beiden gibt, sollten detaillierte Untersuchungen zeigen.

### 5.6.1 Optische Vermessung

Die zuvor verwendete Messung zur Höhe der Druckmuster mittels Dickentaster, birgt verschiedene Ungenauigkeiten. Zum einen ist die Oberfläche der Drucke aufgrund verschiedener Einflussfaktoren wie beispielsweise der Tropfenform, Schichtung einzelner Linien und Oberflächenrauheit nicht gleichmäßig. Eine Stichprobenmessung kann daher nur eine Tendenz angeben. Zum anderen birgt die Messung mittels Aufsetzens des Tasters die Gefahr, dass das gemessene Muster zusammengedrückt wird und die Messung somit verfälscht.

Für die Untersuchung der Muster mit Parametervariationen im kleinen Rahmen, wo eine hohe Genauigkeit über die gesamte Fläche gefordert ist, wurde daher auf ein optisches Messverfahren gewechselt. Zur Verfügung stand hierfür ein Gerät der Firma Keyence, welches mit dem System der Streifenprojektion arbeitet. Bei dieser Messmethode werden aus verschiedenen Richtungen Lichtstreifen auf das zu untersuchende Objekt gestrahlt wie in Abbildung 36 sichtbar. Gleichzeitig werden Bilder erfasst und zusammengerechnet. Aus der Verformung der Streifen kann abschließend ein 3D-Bild erzeugt werden, welches im Nachgang bearbeitet werden kann (vgl. Abbildung 37).



Abbildung 36 Beispielbild: Streifenmuster auf einem Objekt (150 x 150 x 90mm<sup>3</sup>) [23]

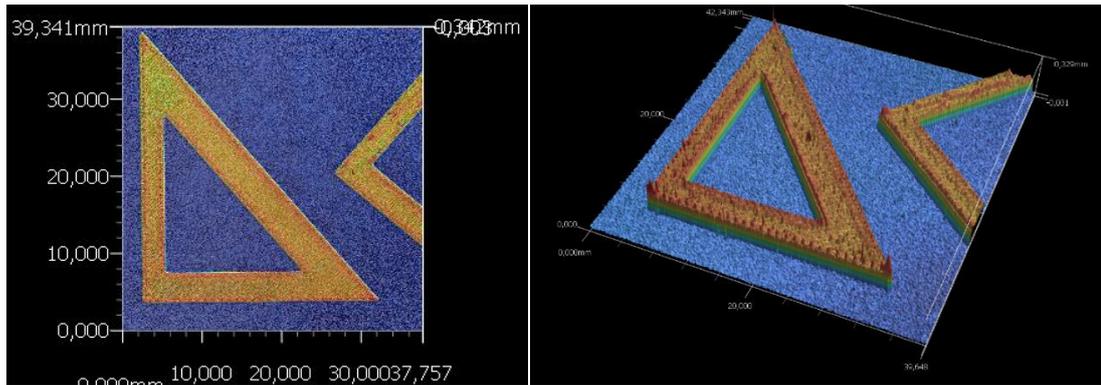


Abbildung 37 3D Aufnahme eines gedruckten Dreiecks [15]

Da die untersuchten Muster aus gedrucktem Hotmelt transparent bzw. die Untergründe ebenfalls transparent oder spiegelnd waren, mussten sie mit einem speziellen weißen Mattierungsspray benetzt werden, um korrekt erfasst zu werden.

Gemessen werden können mit dieser Methode beispielsweise die Druckhöhe, Oberflächenrauigkeit und Abweichung zur vorgegebenen Geometrie (CAD-Daten). Außerdem kann die Anordnung der Linien sehr gut betrachtet werden. Indirekt konnte auch das Volumen erfasst werden, welches sich hier aber nicht auf die tatsächlich ausgetragene Masse bezieht, sondern nur ein weiterer Indikator für die generelle Füllung der gedruckten Muster ist.

Aufgrund der hohen Anzahl an gemessenen Mustern wird hier nur ein Überblick über Auffälligkeiten und Trends gegeben.

Zunächst der Vergleich zwischen der Dickenmessung mit dem Taster und mit der optischen Vermessung. Verglichen wurden an dieser Stelle nur ausgewählte Muster, die für die Parameterdefinition angefertigt wurden (siehe Tabelle 21). Das Ergebnis sprach eindeutig gegen eine Fortführung der Messungen mit dem Taster, da die Höhenunterschiede im Muster als zu groß empfunden wurden, um mit der Stichprobenmessung ein gutes Ergebnis zu erzielen. Dies wird durch die Differenz zwischen der durchschnittlichen berechneten Höhe des 3D-Bildes und der gemessenen Höhe mit dem Taster bestätigt. Auf weitere Messungen mit dem Taster wurde daher verzichtet.

Tabelle 21 Vergleich zwischen Höhenmessung am 3D-Bild und mit Dickentaster

ff (bei 1S; Glas; A67,5)	Optische Messung			Tastmessung	
	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Ø Höhe [µm]	Max. Höhe [µm]	Höhe [µm]	Standardabweichung σ [µm]
1,74	40,755	102	227	126	11
1,75	42,91	112	336	132	11
1,75	38,008	94	676	132	11

Nicht alle der nachfolgend aufgeführten PO-Muster wurden auch im entsprechenden Versuch gemessen. Die optische Vermessung sollte an dieser Stelle die korrekte Einstellung der Höhe von ca. 400µm unterstützen und zusätzlich Aufschluss darüber geben, ob die Positionierung der Muster nach der Festlegung der „Druckseite“ noch einen deutlichen Einfluss auf das

Druckergebnis hatte (Vgl. 5.4.1). Auch bei erhöhter Temperatur gedruckte Muster wurden erfasst.

Tabelle 22 Vergleich von optisch vermessenen nicht-verklebten Pushout-Mustern

Druckparameter (mit ff1,74)	Volumen [mm <sup>2</sup> ]	Ø Höhe [µm]	Max. Höhe [µm]
S1; A67,5; I1	29	112	263
S1; A67,5; I1	31	118	302
S2; A67,5; I3	74	307	672
2S; A67,5	76	309	638
3S; A67,5	124	522	889
3S; A67,5	121	525	960
S1; A70; I2	34	135	519
2S; A70	84	356	628
2S; A70	84	360	950
2S; T120; A70; I4	68	250	666
2S; T120; A67,5; I5	73	281	630

Die Muster in der Tabelle sind chronologisch gelistet. Begonnen wurde mit einem Austrag von A67,5, da dies zunächst als Standardparameter festgelegt war. Die Höhe der Muster stieg von einer zu zwei Schichten um einen Faktor von ca. 2,6, lag jedoch noch immer deutlich unter dem Zielwert von 400 µm, weshalb eine dritte Schicht ergänzt wurde. Mit einem Multiplikator von über 4,5 von der Dicke einer Schicht zu drei Schichten, entsprach das Ergebnis nicht der Erwartungshaltung. Der Anstieg der Dicke in Bezug auf die Schichtstärke verhält sich nicht wie bei dem Druck mit anderen Materialien wie ABS linear. Mit einer insgesamt Dicke von über 500µm wurde der Zielwert überschritten, die Veränderung in der Anzahl der Schichten hatte nicht den erhofften Effekt. Als Alternative wurde der Austritt minimal erhöht, um somit die Dicke der einzelnen Linien hochzusetzen. Das einschichtige Muster war mit 135 µm bereits deutlich dicker als die zuvor gedruckten 1S-Muster. Bei der Zugabe einer Schicht wurde der zuvor ermittelte Faktor von 2,6 als Höhenmultiplikator von einer zur zweiten Schicht bestätigt. Die Schichtstärke von nun über 350µm wurde als ausreichend betrachtet, um damit in die PO-Versuche überzugehen. Die Ermittelten Faktoren zum Anstieg der Höhe finden sich auch in der Vervielfältigung des vermessenen Volumens wieder.

Die Erhöhung der Temperatur im Druck führte zu einer Reduktion der durchschnittlichen Höhe sowie des gemessenen Volumens, was in der erhöhten Fließfähigkeit des Materials begründet sein kann. Da, wie bereits erwähnt, die Oberflächenspannung bei höherer Temperatur herabgesetzt wird, kommt es zu einem breiteren Auffließen der Tropfen auf dem Untergrund. Da die Menge Material die gleiche bleibt, nimmt die Höhe entsprechend ab.

Wie in Abbildung 38 zu erkennen, kommt es bei einer höheren Temperatur auch zu einem stärkeren Ineinanderfließen der einzelnen Tropfen, während sie bei 140 noch deutlich zu differenzieren sind. Dies kann sich ebenfalls auf die Gesamthöhe auswirken, da keine Lücken zwischen den Tropfen bleiben und das Höhenprofil glatter wird.

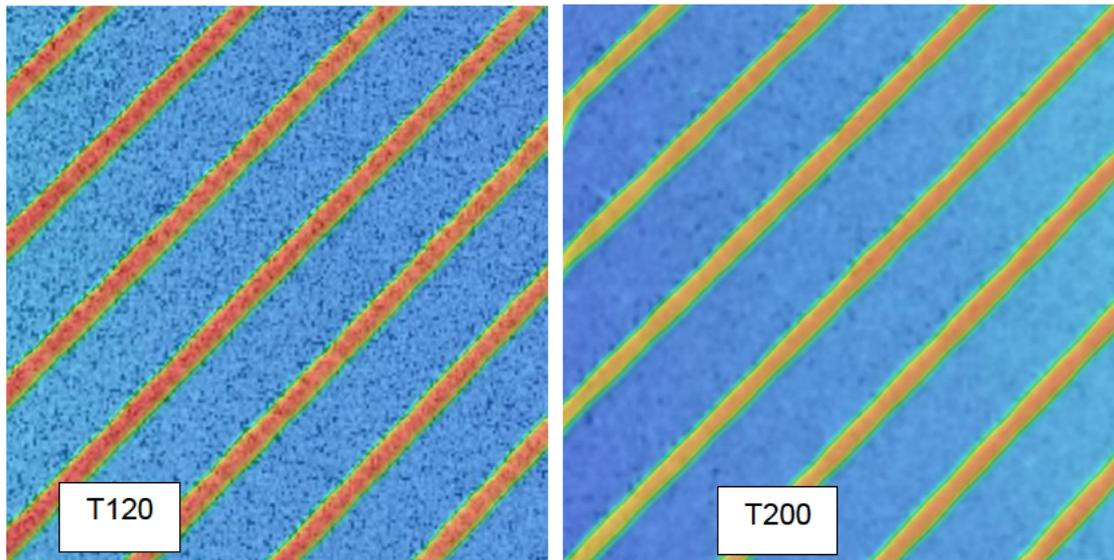


Abbildung 38 Vergleich freistehender Linien bei T140 und T200 gedruckt [15]

Die Veränderung der Oberflächenstruktur bei Parameteränderungen lässt sich sehr gut an den Drucken zur Prozessfensterüberprüfung festmachen. Hier wurden neben den ausgewählten PO-Mustern auch Rahmen mit variierender Linienbreite sowie Einzellinien auf ABS gedruckt, immer mit einem Referenzstreifen bei Standardparametern daneben. In einer Tabelle wurden Volumen und durchschnittliche Bauteilhöhe erfasst. Höhe und Volumen korrelieren, daher wurde das Volumen in der nachfolgenden Betrachtung nicht weiter berücksichtigt.

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse mit den entsprechenden Parametern nach durchschnittlicher Höhe sortiert aufgeführt. Dabei wurden die Parameter farbig markiert, dunkel für einen hohen Wert, hell für einen niedrigen. So sollen Trends deutlicher sichtbar gemacht werden.

Hier wird nochmal deutlich, dass ein geringerer Austrag zu einer geringeren Durchschnittshöhe führt, die Liste ist bei diesem Parameter oben deutlich heller als unten. Der Formfaktor ist mit dem Austrag verbunden, doch es scheint, dass ein niedrigerer Formfaktor in Verbindung mit einem Austrag von 70 und mehr zu einer gesteigerten Druckhöhe führt.

A	ff	T	d Höhe [m]
55	1,76	140	96
65	1,76	140	106
70	1,76	150	106
70	1,78	160	107
60	1,8	140	110
70	1,76	160	110
60	1,76	140	113
70	1,8	160	113
60	1,68	140	114
75	1,8	140	115
65	1,78	140	116
70	1,78	150	116
70	1,68	160	116
55	1,68	140	118
60	1,7	140	118
70	1,76	140	118
75	1,78	140	118
70	1,72	160	118
70	1,8	200	118
55	1,8	140	119
65	1,8	140	119
80	1,78	140	119
70	1,72	150	120
65	1,72	140	121
70	1,78	200	121
70	1,78	140	122
75	1,76	140	122
80	1,8	140	122
70	1,68	200	122
65	1,68	140	123
70	1,8	150	123
60	1,72	140	124
70	1,8	140	124
55	1,72	140	125
55	1,7	140	126
60	1,78	140	127
70	1,7	200	127
75	1,72	140	128
75	1,7	140	128
80	1,76	140	128
85	1,8	140	128
70	1,8	180	128
70	1,72	140	129
85	1,78	140	129
70	1,7	150	129
65	1,7	140	130
70	1,8	170	130
70	1,68	170	130
70	1,7	140	131
75	1,68	140	132
70	1,72	200	132
70	1,68	150	133
70	1,7	160	133
70	1,68	140	134
80	1,72	140	135
70	1,78	180	135
70	1,78	170	136
70	1,76	200	136
55	1,78	140	137
80	1,7	140	137
85	1,76	140	139
80	1,68	140	140
85	1,68	140	140
70	1,76	170	140
70	1,76	180	141
70	1,7	180	143
70	1,68	180	143
85	1,72	140	145
85	1,7	140	146
70	1,72	180	148
70	1,7	170	149
70	1,72	170	151

Abbildung 39 Ergebnisse aus Prozessfensterüberprüfung nach Musterhöhe sortiert [19]

Auch bei Betrachtung der Muster mit kleinstem Austrag und mit größtem Austrag wird der Unterschied deutlich (Abbildung 40). Gleichzeitig ist hier auch die Erklärung zu finden, warum die Muster mit A75 bis A85 nicht komplett im oberen Höhenbereich liegen. Bei den Mustern mit A55 sind deutlich die einzelnen Strukturen zu erkennen, sie liegen nicht exakt nebeneinander, sondern immer mit ein bisschen Abstand, sodass die Fläche trotzdem noch geschlossen wirkt. Diese Abstände gibt es bei den mit A85 gedruckten Muster nicht. Dafür sind deutliche Marken dort zu erkennen, wo die Düse aufgrund der leichten Überfüllung durch das Muster gefahren ist und somit die Struktur gestört hat. Diese Kerben führen zu einer Verfälschung der berechneten Durchschnittshöhe.

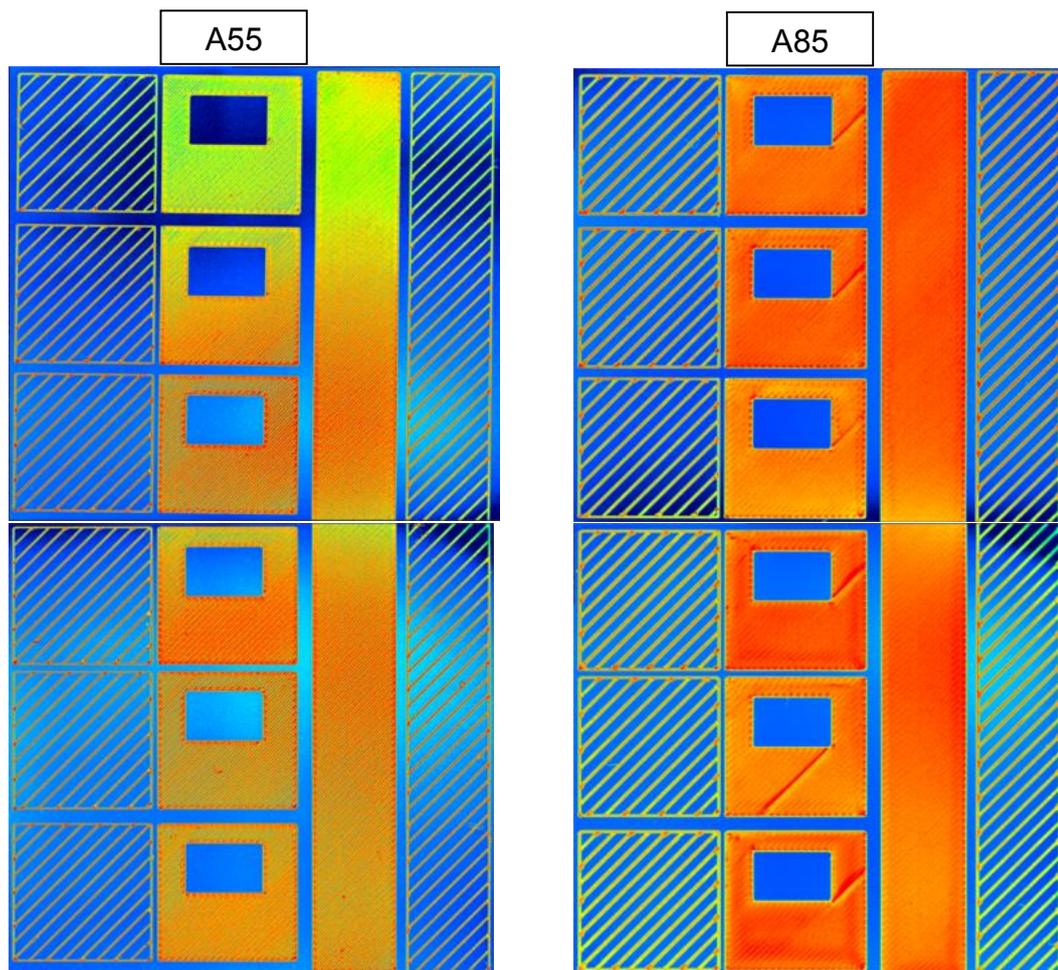


Abbildung 40 Muster Prozessfensterüberprüfung A55 und A85 Vergleich [15]

Neben den Aufnahmen unter dem Mikroskop wurden noch Bilder für eine Benetzungsuntersuchung gemacht. Für diese wurden die Fotos von acht verpressten und mindestens drei Tage gelagerten Pushout-Muster (Vgl. Unterkapitel 5.4.1) anonymisiert und mit einer speziellen Software untersucht. Diese wandelt die Fotos so um, dass sie nur noch zweifarbig sind. Da sich die nicht benetzte Oberfläche der Muster weiß aus den Bildern abhebt (siehe Abbildung 41), kann durch die Software der Wert für den Weiß- oder Grauanteil im Bild in Prozent ausgegeben werden, wobei das Bild zuvor so bearbeitet wird, dass nur noch die

verklebte Fläche untersucht wird. So wird der Anteil des benetzten, hellgrauen Bereichs ermittelt.

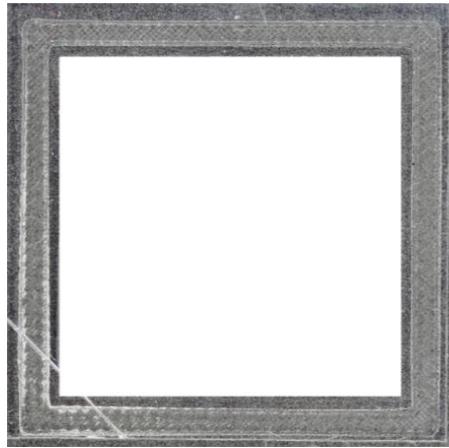


Abbildung 41 Anonymisierter Pushout-Prüfling [15]

Die Anonymisierung hatte zum Ziel, eine Interpretation der Ergebnisse aufgrund von Vorkenntnissen zu verhindern. So konnten sie völlig urteilsfrei aufgenommen und verglichen werden. In Abbildung 42 sind die Ergebnisse in Form eines Balkendiagramms mit denen eines idealen Standardmusters mit 100% Benetzung zum Vergleich dargestellt. Die standardbeschichteten Muster haben eine sehr glatte Oberfläche und bei genauer Applikation von gut produzierten Klebungen, kann ein sehr hoher Benetzungsanteil erreicht werden. Mit einem Durchschnitt von 96,5% Benetzung liegen die gedruckten und verpressten Muster sehr nah an den im Standardverfahren hergestellten.

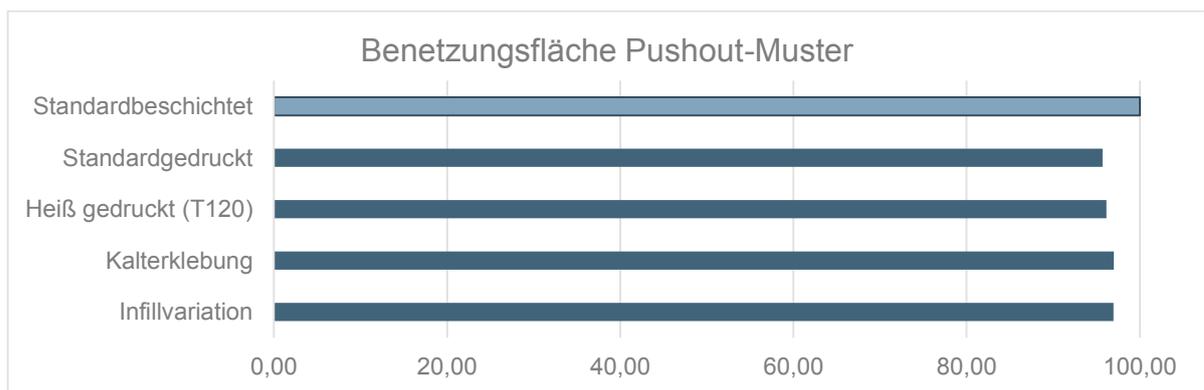


Abbildung 42 Benetzungsoberfläche von gedruckten Pushout-Mustern im Vergleich zu standardbeschichtetem [15]

### 5.6.2 Mikro-Computertomografie

Neben der optischen Untersuchung wurde auch eine Mikro-Computertomografische ( $\mu$ CT) durchgeführt, um einen tieferen Einblick in den Aufbau der Schichten zu erhalten. Für die erste Untersuchung wurden mit A105\_50 ein bis sechs-schichtige Quader auf ABS und mit A67,5, ff1,74 sowie dem Offset  $os_{ABS}=0,24$  gedruckt.

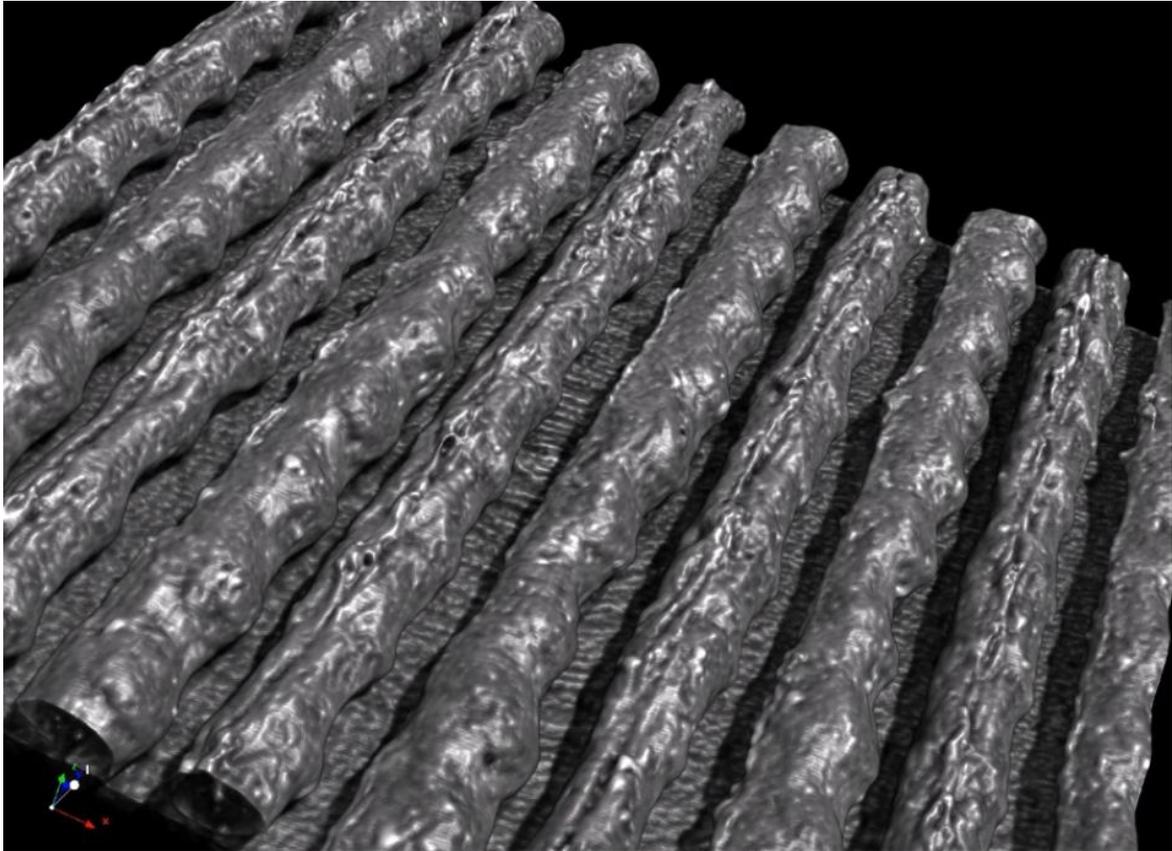


Abbildung 43 3D-Aufnahme aus  $\mu$ CT [17]

Die 3D-Aufnahme zeigt deutlich, dass die gedruckten Linien nicht gleich dick sind, die rechte erscheint minimal dünner als die linke. Auch der Abstand der Linien ist in der Betrachtung von oben nicht gleichmäßig. Diese Auffälligkeit konnte auch bei ABS-Drucken festgestellt werden. Es ist also davon auszugehen, dass es sich hierbei um eine Ungleichmäßigkeit aus dem Verfahren bedingt handelt. Für voluminösere Bauteile als die von uns produzierten ist es scheinbar nicht relevant, wie gleichmäßig die Linien nebeneinander liegen bzw. ob alle Linien gleichmäßig aufgebaut sind. Eine Methode, die Linien dichter zusammen zu bringen, ist der Einsatz von mehr Material. Wenn die Linien dicker werden, verringert sich auch der Abstand zwischen ihnen. Ein weiterer Weg könnte die Erhöhung der Temperatur sein. Durch die großflächigere Benetzung eines jeden Tropfens auf dem Untergrund wird möglicherweise ebenfalls der Abstand reduziert.

In Abbildung 44 zeigt sich eine weitere Ungleichmäßigkeit, die tatsächlich programmtechnisch gewollt ist. Die einzelnen Schichten liegen nicht absolut fluchtend zueinander. Der leicht versetzte Aufbau sorgt für mehr Stabilität des Druckkörpers da die Lückenfüllung verbessert wird. Bei dem elastischen und bei hoher Temperatur gut fließfähigem Material kann es dazu kommen, dass die oben aufgetragenen Schichten sich tiefer in die Lücken der darunter liegenden Schicht einlegen. Dadurch kann es zu einem Verlust an Höhe kommen.

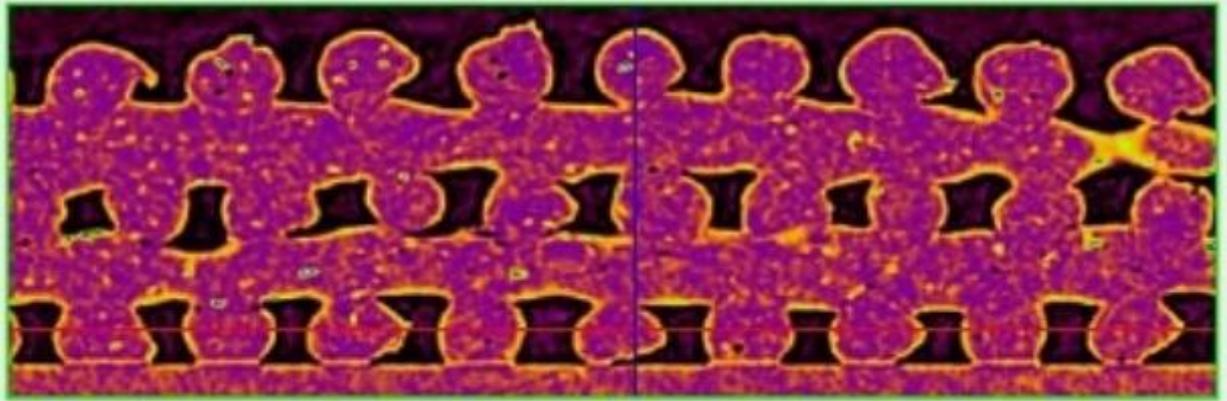


Abbildung 44  $\mu$ CT-Aufnahme: Position der ersten, dritten und fünften Lage im Vergleich [17]

## 5.7 Anwendungsbezug

Mit einem störungsfrei funktionierenden Prozess, und optisch guten Druckbildern und vorhersehbarer bzw. steuerbarer Druckhöhe, musste abschließend noch ein Anwendungsbezug hergestellt werden. Der vor Beginn der Versuche definierte mögliche Anwendungsfall ist eine Handyrahmenverklebung.

Eine Handrahmenverklebung zeichnet sich zum einen durch eine niedrige Schichtdicke von wenigen hundert  $\mu\text{m}$  aus, zum anderen durch eine sehr dünne Kontur mit hoher Maßhaltigkeit und vielen Konturänderungen aus (Vgl. Abbildung 45). Für die Simulation der zukünftigen Herstellung solcher Verklebungen, wurde ein originaler Stahluntergrund zur Verfügung gestellt. Der Druck auf diesem war nach Anpassung des Offsets problemlos möglich. Aufgrund der schmalen Kontur und der damit verbundenen häufigen Richtungswechsel, musste der Offset zusätzlich erhöht werden. So lagen die Linien teilweise weiter auseinander, an anderen Stellen etwas dichter. Dass dieser Abstand jedoch nach dem Verpressen keinen Einfluss mehr auf die Klebkräfte hat, ist in den PO-Versuchen bewiesen worden.

In 5.4.1 wurde gezeigt, dass die Klebkraft nicht abnimmt, wenn die Verklebung voll ausgekühlt verklebt wird. Dies ist insbesondere in einer Produktionsumgebung von Vorteil. Gleichzeitig nimmt die Leistung der Verklebung mit steigender Temperatur zu. Auch dies kann in der Anwendung genutzt werden.

Insgesamt ist durch das Einstellen verschiedener Parametervariationen eine sehr flexible Einstellung der Kennwerte möglich. Dieselbe Masse könnte in der realen Anwendung demnach für verschiedene Zwecke genutzt werden, variierend in der Schichtdicke und -anzahl, Verklebungstemperatur oder Formfaktor und Austrag.

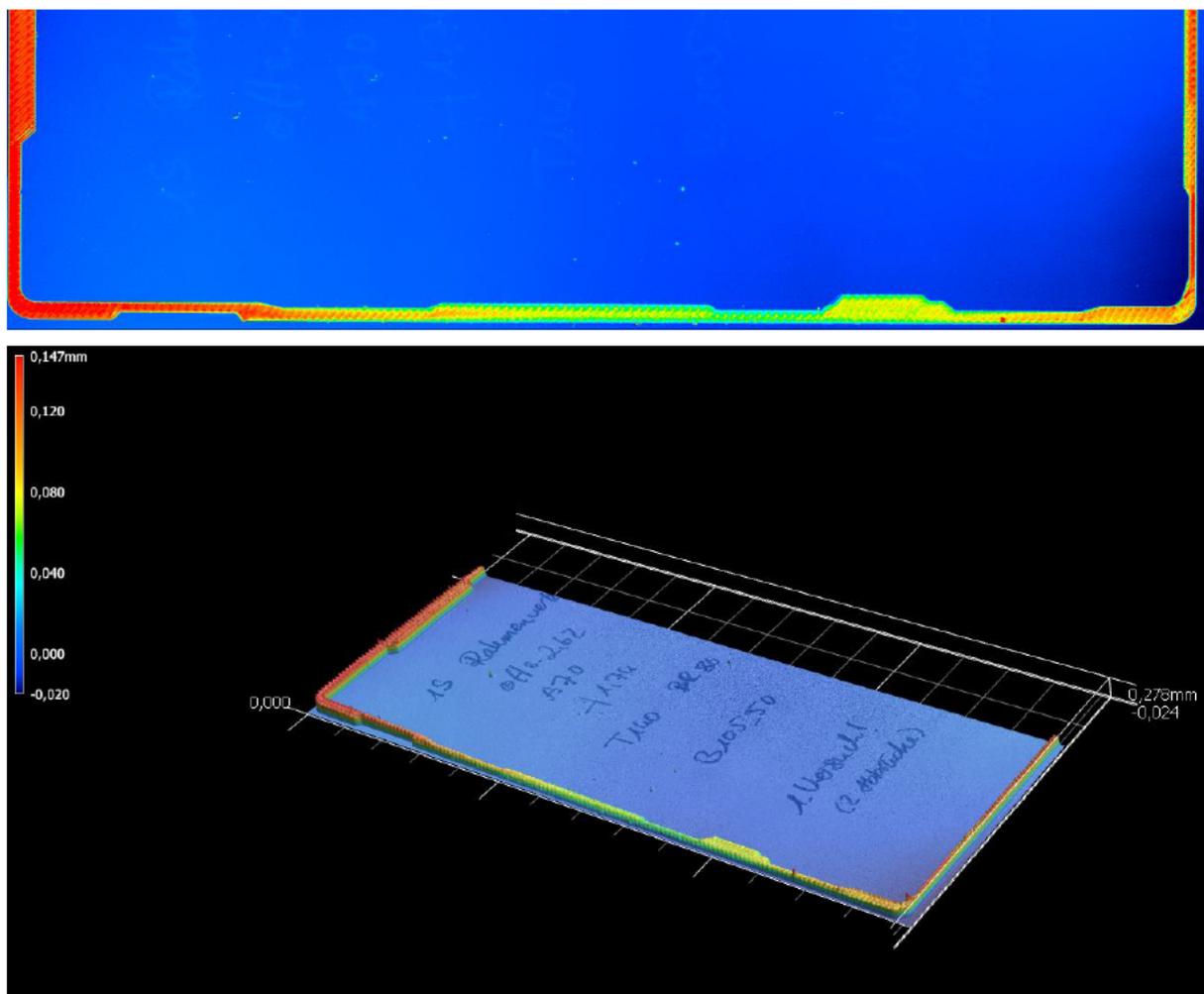


Abbildung 45 Optische Vermessung einer gedruckten Handyrahmenverklebung auf Stahl [15]

## 6 Diskussion

Die Validierung hat gezeigt, dass ein Übertragen der ermittelten Druckparameter Hotmelt-übergreifend möglich ist. Die Ergebnisse der Versuche zeigen aber auch, dass für ein optimales Ergebnis mehrere Faktoren zusammenkommen, die zusätzlich zu der reinen Verarbeitung beachtet werden müssen. Es sind noch weitere Untersuchungen notwendig, bevor der Einsatz bei konkreten Anwendungsprototypen möglich ist.

### 6.1 Zusammenführung der Erkenntnisse

Die Nutzung der statistischer Versuchsplanung hat das Erreichen guter Druckparameter deutlich beschleunigt. Durch das gezielte Anfahren von Grenzwerten konnte mit verhältnismäßig wenigen Versuchen eine so gute Druckqualität erreicht werden, dass optisch kaum noch Unterschiede zu erkennen waren. Über- oder Unterfüllung wurde frühzeitig eliminiert. Die zu Beginn gedruckten Extrema sind vor allem in der Gegenüberstellung zu dem Idealergebnis sehr auffällig, wie in Abbildung 46 zu erkennen. Der grüne Bereich umfasst die Ergebnisse der Ausdrücke mit gut funktionierenden Parametern.

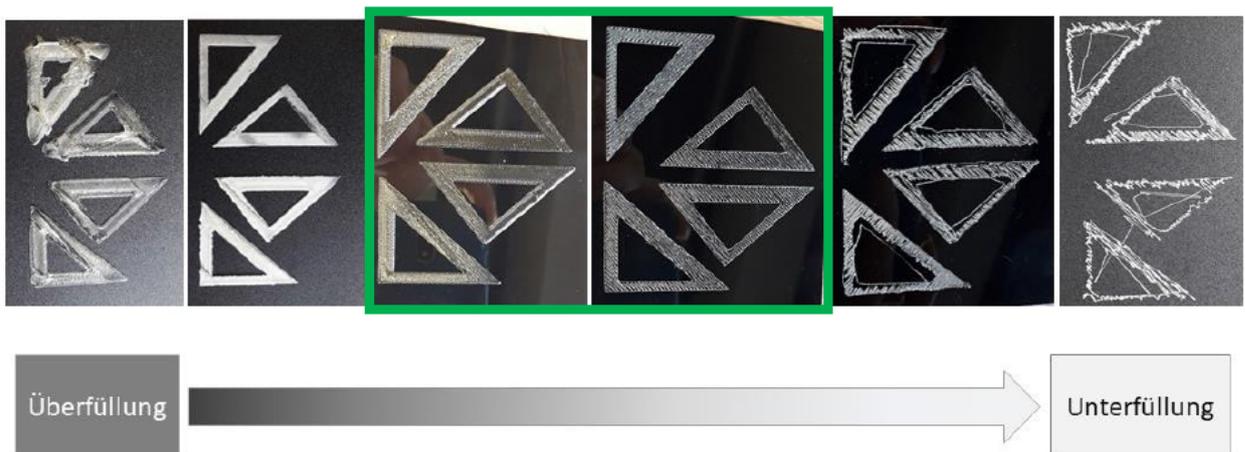


Abbildung 46 Sortierung ausgewählter Muster von über- bis unterfüllt [15]

Die Optimierung der Drucke hat allerdings nicht wie geplant funktioniert, da die berechneten Werte nicht dem tatsächlichen Ergebnis entsprachen. Dies ist jedoch den zu ungenauen und teilweise vermengten Bewertungskriterien geschuldet. Die Klassifizierung mit Schulnoten oder nach dem ja/nein-Prinzip ist nur im geringen Maße aussagekräftig. Auch die Höhenmessung war nicht ausreichend genau. Mit den im späteren Verlauf angewandten Prüfmethoden (PO und Optische Vermessung) sind sicherlich bessere Vorhersagen möglich.

Ein sauberer Druck mit Hotmelts ist in einem verhältnismäßig breiten Prozessfenster möglich, was für eine hohe Prozessstabilität spricht. Für die Anwendung sind kleine Strukturänderungen offenbar nicht von Bedeutung, sofern die zu verklebenden Flächen ausreichend verpresst sind. Wichtig dabei ist zu beachten, dass über den Austrag und den

Formfaktor gezielt Leistungswerte angesteuert werden können. Ein höherer Austrag bringt bis zu einem gewissen Grad mehr Leistung, da mehr Masse in der Verklebung ist, die Kraft aufnehmen kann. Der Formfaktor von 1,68 ist dem zuträglich gewesen und hat die Leistung weiter gesteigert. Auch die Temperatur spielt bei der Leistung eine wichtige Rolle. Eine höhere Massetemperatur sorgt für eine geringere Oberflächenspannung, wodurch die Hotmelts besser auf dem Untergrund auffließen und es zu einer gesteigerten Benetzung kommt, was insbesondere auch bei der Paarung mit einem für das Hotmelt weniger günstigen Untergrund relevant ist. Bei der Temperatursteigerung sind durch das Hotmelt jedoch Grenzen gesetzt, die weiter analysiert werden müssen. Bei B105\_50 hat die Temperaturerhöhung um 40K eine deutliche Steigerung gegenüber dem Standard-Druckprofil bewirkt, bei A105\_50 führte eine Steigerung der Düsentemperatur um 12K zu Leistungseinbußen. Die aus Extrusionsprozess und Viskositätsprüfung ermittelte erforderliche Verarbeitungstemperatur führte jedoch unabhängig von den Druckergebnissen zu einer gut verarbeitbaren Masse, die sich losgelöst von einem Druckprozess sauber austragen ließ.

Zuletzt lässt sich feststellen, dass die Zugabe von Alterungsschutz sehr erfolgreich war. Es konnten durch Lagerung und Weiterverarbeitung keine Alterungserscheinungen abgesehen von farblicher festgestellt werden. Die Abweichungen in der Leistung vom gedruckten Muster zum Lappenmuster sind demnach rein Prozessabhängig.

## 6.2 Vorgehensempfehlung

Die Ergebnisse bieten eine gute Basis für erweiterte Untersuchungen in die Richtung hin zum Einsatz in einer realen Produktion.

Zunächst müssen weitere Untersuchungen bezüglich der optimalen Drucktemperatur und der damit verbundenen Leistungssteigerung erfolgen. Im ersten Schritt sollten weitere Pushout-Muster von B105\_50 bei noch weiter erhöhter Temperatur gedruckt werden, um die tatsächliche Grenze auszuloten. Auch wäre eine engere Staffelung der Temperatursprünge interessant, in 5K Schritten von 140°C aufwärts bis beispielsweise 220°C, um eine Leistungskurve bezüglich der Arbeit und der ersten Kraftspritze aufstellen zu können. Diese könnte im nächsten Schritt anhand anderer Materialien validiert werden und dabei helfen, in der späteren Anwendung gezielt ein bestimmtes Leistungsprofil einzustellen. Auch der Formfaktor und der Austrag spielen hier mit ein. Das in Kapitel 5.4.3 beschriebene Leistungsgefälle könnte gezielt genutzt werden, um ein Material auf verschiedene kundenspezifische Anforderungen flexibel einzustellen.

Die bisher im freeformer verwendeten Materialien waren in ihrem Aufbau sehr simpel und dienten nur der reinen Prozessentwicklung. Die gesammelten Erkenntnisse müssen noch auf die Granulate übertragen werden, die mehr Energieeintrag zum Druck benötigen, wie beispielsweise C105\_50 oder B115\_50. Aus der gewonnenen Erfahrung heraus lässt sich jedoch vorhersagen, dass bei einem korrekt hergeleiteten Temperaturprofil ein Druck ohne Probleme möglich sein sollte.

Sofern über spätere Anwendungen diskutiert wird, muss auch eine entsprechende Masseentwicklung erfolgen. Dabei sollte ermittelt werden, inwieweit bestimmte Materialkombinationen besser oder schlechter für den Druck geeignet sind oder ob die

erweiterte Prozessierung im Drucker bestimmte Materialeigenschaften unterstützt. Im Zuge der späteren Masseentwicklung sollte auch eine genauere Betrachtung der Adhäsionsarbeit für diverse Feststoffoberflächen nicht unberücksichtigt bleiben. Wie am Beispiel von B105\_50 ist es für einen guten Druck erforderlich, eine ausreichend große Bindung zwischen dem Hotmelt und der zu bedruckenden Oberfläche zu erzeugen. Untersuchungen in diesem Bereich können helfen, den optimalen Temperaturbereich für jede Hotmelt/Oberflächen-Kombination ohne diverse Drucke und Kraftmessungen zu ermitteln, was in der Entwicklung verschiedener Anwendungsfälle Zeit und Kosten sparen kann.

Die Verarbeitung von Hotmelts im Drucker bietet in der industriellen Anwendung Möglichkeiten, die mit Standardbeschichtungsprozessen nicht ausgeschöpft werden können. Zum einen bietet die Verarbeitung von Granulat die Möglichkeit einer schnellen Prototypenfertigung, für die der 3D-Druck auch in anderen Bereichen häufig eingesetzt wird. Bei entsprechend genauer Positionierung im Druckraum wäre aber beispielsweise auch der Masseauftrag auf verschiedene Höhenprofile bzw. das Füllen von Fugen, auch Gap-filling genannt, möglich. Auch eine hoch genaue Positionierung schmaler Klebmasse-Linien kann mit wenig Aufwand in kurzer Zeit erfolgen. Es sollte außerdem angestrebt werden, die Vorteile der additiven Fertigung voll auszuschöpfen und mit zwei Materialien gleichzeitig zu drucken. Die Verklebung könnte direkt auf die, ebenfalls im Drucker entstandenen, Bauteile aufgetragen werden, wodurch die Positionierung noch genauer würde.

Das Granulat ist zudem einfach in Säcken oder Eimern lagerbar. Stand heute werden Klebebänder gewickelt gelagert und transportiert, wobei zum Beispiel die so genannte Seitenklebrigkeit insbesondere bei dickeren Klebebändern ein Problem darstellt. Die Masse ist nach dem Schnitt an den Seiten klebrig und muss daher immer mit Liner abgedeckt werden. Während längerer Lagerperioden kann es außerdem dazu kommen, dass die Rollen sich durch die innere Spannung spiralförmig verziehen. Bei der Verwendung von Granulat als Zwischenprodukt entfallen diese Problematiken.

Zuletzt ist festzustellen, dass sich bei einem kontinuierlich durchlaufenden Druck sehr viel Material gegenüber dem bisherigen Prozess, wie er in der Einleitung erwähnt wird, einsparen lässt, auch weil es nicht zwingend einer 100%igen Flächenfüllung für die erwünschte Leistung bedarf. Bei einer Automatisierung des Druckprozesses, beispielsweise durch den Einsatz von Robotik, könnte zudem der Verarbeitungsschritt des Stanzens entfallen. Neue Designs wären schnell durch eine Änderung des Druckauftrags zu implementieren und erfordern nicht die Herstellung neuer Werkzeuge.

Da die Druckparameter stabil zu übertragen sind und somit auch gut in einer realen Produktionsumgebung funktionieren können, ist es realistisch in naher Zukunft das Verfahren in die Massenproduktion zu implementieren.

## V. Quellenverzeichnis

- [1] C. Herrmann, *Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2009.
- [2] Tesa SE, „Task Force Adhesive Forming“, 2019.
- [3] Statista, „Anzahl der 3D-Druck Patente weltweit bis 2019“, 2019.
- [4] Normausschuss Technische Grundlagen, *DIN 8580 Fertigungsverfahren*. Deutschland: Deutsches Institut für Normung e.V., 2003, S. 1–13.
- [5] Maschinenbau Wissen, „Extrusion - Verfahren und Funktionsweise“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/392-extrusion>.
- [6] D. J. Kempf, „Neue Wege in der Polymerproduktion: Planetwalzenextruder ersetzt Reaktionskessel“, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.process.vogel.de/neue-wege-in-der-polymerproduktion-planetwalzenextruder-ersetzt-reaktionskessel-a-309401/>. [Zugegriffen: 23-Aug-2020].
- [7] Statista, „Umfrage zu den meistgenutzten 3D-Druck Technologien 2018“, 2018.
- [8] M. Petch, „3D printing metal on an desktop FDM printer“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-metal-desktop-fdm-printer-exclusive-interview-virtual-foundry-founder-103672/>. [Zugegriffen: 24-Aug-2020].
- [9] ARBURG GmbH + Co KG, „System freeformer - Mit kleinsten Tropfen zum funktionsfähigen Bauteil“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.arburg.com/de/leistungsspektrum/additive-fertigung/system-freeformer/>. [Zugegriffen: 14-Mai-2020].
- [10] ARBURG GmbH + Co KG, „freeformer Manual“, 2015.
- [11] J. Jahnke, „Bildschirmkopie“. 2020.
- [12] G. Habenicht, *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei*, 5. Aufl. Vieweg+Teubner Research, 2008.
- [13] Tesa SE, „Tack, Kohäsion, Adhäsion Wie viel Honig braucht man, um ein Bild aufzuhängen“. Tesa SE, 2016.
- [14] K. Siebertz, D. van Bebber, und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung*, 2. Aufl., Bd. 518. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [15] J. Jahnke, „Eigene Darstellung“. 2020.
- [16] A. J. Franck, „Hot melt adhesives“.
- [17] Analytik, „Prüfbericht“, 2020.
- [18] G. Habenicht, *Kleben*, 5. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2005.
- [19] J. Jahnke, „Versuchsergebnisse“, 2020.
- [20] K. Oßwald, K. Reincke, S. Döhler, U. Heuert, B. Langer, und W. Grellmann, „Aspekte der Alterung elastomerer Werkstoffe“, *Polym.* 2016, S. 498–506, 2016.
- [21] Krüss GmbH, „Benetzung und Haftung von Hotmelts – Optimierung durch Messung der Oberflächenspannung bei hohen Temperaturen“, S. 1–4, 2001.

- 
- [22] Tesa SE, „Anweisung zur Durchführung von Prüfungen“, 2018.
- [23] QZ-Online, „Streifenprojektion“, 2003. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.qz-online.de/qualitaets-management/qm-basics/messen\\_pruefen/optische\\_3-d-messtechnik/artikel/streifenprojektion-154033.html](https://www.qz-online.de/qualitaets-management/qm-basics/messen_pruefen/optische_3-d-messtechnik/artikel/streifenprojektion-154033.html). [Zugegriffen: 25-Aug-2020].

## Anhang

Komplette Tabelle: Exportierte Lösungsvorschläge für angestrebte Zielwerte unter Berücksichtigung der Restriktionen aus dem Screening-Versuchsplan

No	ff	Offset	Austrag	Unter- / - / Überfüllt	Musterhöhe	Sichtbarer Abstand zw. Linien
1	1,736	-0,250	68,630	1,000	200,000	0,422
2	1,729	-0,239	69,908	1,000	200,000	0,436
3	1,731	-0,242	69,501	1,000	200,000	0,433
4	1,735	-0,248	68,838	1,000	200,000	0,425
5	1,732	-0,244	69,252	1,000	200,000	0,430
6	1,733	-0,246	69,070	1,000	200,000	0,428
7	1,729	-0,239	69,984	1,000	200,000	0,437
8	1,731	-0,243	69,437	1,000	200,000	0,432
9	1,732	-0,243	69,380	1,000	200,000	0,432
10	1,734	-0,247	68,991	1,000	200,000	0,427
11	1,730	-0,241	69,714	1,000	200,000	0,435
12	1,729	-0,240	69,854	1,000	200,000	0,436
13	1,731	-0,242	69,569	1,000	200,000	0,433
14	1,730	-0,240	69,792	1,000	200,000	0,435
15	1,736	-0,249	68,679	1,000	200,000	0,423
16	1,733	-0,245	69,139	1,000	200,000	0,429
17	1,735	-0,249	68,751	1,000	200,000	0,424
18	1,730	-0,241	69,643	1,000	200,000	0,434
19	1,734	-0,247	68,942	1,000	200,000	0,427
20	1,739	-0,250	68,620	0,991	200,000	0,416
21	1,726	-0,237	70,000	1,000	198,851	0,443
22	1,734	-0,239	70,000	0,986	200,000	0,427
23	1,739	-0,239	69,922	0,972	200,000	0,418
24	1,715	-0,239	70,000	1,042	200,000	0,465
25	1,728	-0,250	67,588	1,000	194,619	0,439
26	1,702	-0,222	70,000	1,000	189,613	0,492
27	1,415	-0,150	50,000	1,000	175,200	1,069
28	1,416	-0,151	50,000	1,000	174,704	1,067

29	1,418	-0,150	50,011	0,991	175,183	1,063
30	1,420	-0,150	50,628	1,000	174,205	1,059
31	1,404	-0,150	50,000	1,035	175,200	1,093
32	1,427	-0,150	50,000	0,963	175,200	1,044
33	1,430	-0,150	50,000	0,957	175,200	1,040
34	1,442	-0,150	53,170	1,000	170,180	1,016
35	1,443	-0,150	50,000	0,918	175,199	1,014
36	1,400	-0,150	51,764	1,090	172,407	1,100
37	1,539	-0,172	60,506	1,000	158,368	0,819

		Arbeit W [mJ]												$\bar{x}$	$\sigma$	$\sigma$ autom. geschätzt
Material	Bezeichnung															
A105_45	frisch 7T	573,73	564	552,72	583,37							<b>568,46</b>	<b>11,38</b>	<b>13,14</b>		
	1M60 7T	543,39	551,66	551,06	551,26							<b>549,34</b>	<b>3,44</b>	<b>3,98</b>		
	3M60 7T	574,17	580,54	594,92	585,47	587,33							<b>584,49</b>	<b>6,93</b>	<b>7,74</b>	
A105_50	frisch 7T	616,44	579,86	602,98	621,37							<b>605,16</b>	<b>16,08</b>	<b>18,57</b>		
	3D Standard 7T	501,94	495,58	448,61	476,53	473,95	487,57	388,84	410,35	488,29	513,7	442,2	478,73	<b>467,19</b>	<b>36,10</b>	<b>37,71</b>
	3D T4 7T	403,43	446,57	361,97	408,2	390,55							<b>402,14</b>	<b>27,42</b>	<b>30,66</b>	
	3D Standard 5T	450,7	483,12	471,03	421,03	421,35							<b>449,45</b>	<b>25,29</b>	<b>28,28</b>	
	3D kalt verklebt 5T	472,45	454,27	499,78	475,96	433,74							<b>467,24</b>	<b>22,15</b>	<b>24,76</b>	
	3D Infill Variation 5T	486,43	484,43	526,79	520,55	489,47							<b>501,53</b>	<b>18,25</b>	<b>20,41</b>	
A105_55	frisch 7T	679,54	691,01	675,95	697,34							<b>685,96</b>	<b>8,61</b>	<b>9,94</b>		
B105_45	frisch 7T	656,43	640,26	723,47	712,8							<b>683,24</b>	<b>35,56</b>	<b>41,06</b>		
B105_50	frisch 7T	509	518,79	551,08	545,88							<b>531,19</b>	<b>17,73</b>	<b>20,47</b>		
	3D 1S	109,41	106,27	118,41	117,88	96,66							<b>109,73</b>	<b>8,06</b>	<b>9,01</b>	
	3D 2S	283,54	274,44	268,69	361,76	230,66							<b>283,82</b>	<b>42,94</b>	<b>48,00</b>	
	3D T180	324,02	295	307,83	342,28	235,7							<b>300,97</b>	<b>36,28</b>	<b>40,56</b>	
	3D T200	279,92	347,32	280,26	270,34	271,87							<b>289,94</b>	<b>28,97</b>	<b>32,39</b>	
	3D A55 ff1,68	250,31	264,63	154,96							<b>223,30</b>	<b>48,68</b>	<b>59,62</b>			
	3D A55 ff1,80	192,67	235,92	255,45							<b>228,01</b>	<b>26,23</b>	<b>32,13</b>			
	3D A80 ff1,68	373,87	294,54	389,44							<b>352,62</b>	<b>41,56</b>	<b>50,89</b>			
	3D A80 ff1,80	337,22	241,8	217,85							<b>265,62</b>	<b>51,56</b>	<b>63,15</b>			
3D T160 A80 ff1,68	340,27	301,43	305,12							<b>315,61</b>	<b>17,50</b>	<b>21,44</b>				
3D T160 A80 ff1,80	246,07	257,99	299,77							<b>267,94</b>	<b>23,02</b>	<b>28,20</b>				
B105_55	frisch 7T	410,44	310,04	387,07	403,71							<b>377,82</b>	<b>40,04</b>	<b>46,24</b>		
C105_45	frisch 7T	691,79	702,03	716,01	679,12							<b>697,24</b>	<b>13,54</b>	<b>15,63</b>		
B115_48	frisch 7T	661,93	770,18	609,79	728,92							<b>692,71</b>	<b>61,51</b>	<b>71,03</b>		
B115_50	frisch 7T	679,83	661,2	679,82	688,16							<b>677,25</b>	<b>9,87</b>	<b>11,40</b>		

Material	Bezeichnung	F <sub>max1</sub>												$\bar{x}$	s
A105_45	frisch 7T	202,55	190,36	199,01	202,87									<b>198,70</b>	<b>5,83</b>
	1M60 7T	132,25	134	114,51	146,49									<b>131,81</b>	<b>13,16</b>
	3M60 7T	148,69	160,72	162,68	170,65	166,94								<b>161,94</b>	<b>8,34</b>
A105_50	frisch 7T	182,02	175,22	181,1	181,61									<b>179,99</b>	<b>3,20</b>
	3D Standard 7T	173,94	166,03	165,56	166,33	181,71	174,31	144,9	158,7	175,63	179,18	165,58	184,27	<b>169,68</b>	<b>10,94</b>
	3D T4 7T	175,77	198,33	182,53	177,14	193,26								<b>185,41</b>	<b>9,98</b>
	3D Standard 5T	177,23	169,37	170,93	160,35									<b>169,47</b>	<b>6,96</b>
	3D kalt verklebt 5T	185,11	176,84	163,97	187,17	155,54								<b>173,73</b>	<b>13,66</b>
	3D Infill Variation 5T	194,57	189,61	173,44	178,83	182,84								<b>183,86</b>	<b>8,41</b>
A105_55	frisch 7T	195,69	193,99	197,74	193,05									<b>195,12</b>	<b>2,06</b>
B105_45	frisch 7T	167,18	164,14	167,32	170,46									<b>167,28</b>	<b>2,58</b>
B105_50	frisch 7T		177,11		175,2									<b>176,16</b>	<b>1,35</b>
	3D 1S	154	151	205	193	150								<b>170,60</b>	<b>26,31</b>
	3D 2S	222	237	240	291	232								<b>244,40</b>	<b>26,93</b>
	3D T180	267	280	258	274	217								<b>259,20</b>	<b>24,97</b>
	3D T200	265	303	242	228	251								<b>257,80</b>	<b>28,63</b>
	3D A55 ff1,68	257	269	193										<b>239,67</b>	<b>40,86</b>
	3D A55 ff1,80	247	242	271										<b>253,33</b>	<b>15,50</b>
	3D A80 ff1,68	254	220	237										<b>237,00</b>	<b>17,00</b>
	3D A80 ff1,80	300	216	192										<b>236,00</b>	<b>56,71</b>
	3D T160 A80 ff1,68	277	259	248										<b>261,33</b>	<b>14,64</b>
3D T160 A80 ff1,80	210	217	261										<b>229,33</b>	<b>27,65</b>	
B105_55	frisch 7T	232,68		241,92	242,01									<b>238,87</b>	<b>5,36</b>
C105_45	frisch 7T	216,59	211,97	223,91	215,41									<b>216,97</b>	<b>5,02</b>
B115_48	frisch 7T	156,29	155,12	156,03	151,3									<b>154,69</b>	<b>2,31</b>
B115_50	frisch 7T	157,88		152,87	153,93									<b>154,89</b>	<b>2,64</b>

		Fmax2												$\bar{X}$	$\sigma$		
Material	Bezeichnung																
A105_45	frisch 7T	226	224	221	231											<b>225,50</b>	<b>4,20</b>
	1M60 7T	218	218	212	219											<b>216,75</b>	<b>3,20</b>
	3M60 7T	232	228	251	245	241										<b>239,40</b>	<b>9,40</b>
A105_50	frisch 7T	221	208	216	222											<b>216,75</b>	<b>6,40</b>
	3D Standard 7T	229	222	222	227	221	222	183	192	222	232	220	239			<b>219,25</b>	<b>15,95</b>
	3D T4 7T	182	219	188	208	201										<b>199,60</b>	<b>14,94</b>
	3D Standard 5T	196	197	195	185											<b>193,25</b>	<b>5,56</b>
	3D kalt verklebt 5T	205	208	210	209	202										<b>206,80</b>	<b>3,27</b>
	3D Infill Variation 5T	211	213	221	216	207										<b>213,60</b>	<b>5,27</b>
A105_55	frisch 7T	218	227	219	227											<b>222,75</b>	<b>4,92</b>
B105_45	frisch 7T	244	232	269	255											<b>250,00</b>	<b>15,77</b>
	frisch 7T	213	224	230	228											<b>223,75</b>	<b>7,59</b>
	3D 1S																
	3D 2S																
	3D T180																
	3D T200																
	3D A55 ff1,68																
	3D A55 ff1,80																
	3D A80 ff1,68																
	3D A80 ff1,80																
	3D T160 A80 ff1,68																
3D T160 A80 ff1,80																	
B105_55	frisch 7T	243	225	243	244											<b>238,75</b>	<b>9,18</b>
C105_45	frisch 7T	285	282	307	259											<b>283,25</b>	<b>19,64</b>
B115_48	frisch 7T	307	365	263	350											<b>321,25</b>	<b>45,96</b>
B115_50	frisch 7T	340	311	332	342											<b>331,25</b>	<b>14,17</b>



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

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

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

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Jahnke

Vorname: Juliane

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

Parameterentwicklung für Hotmelt-Klebmassen im freeform 3D-Druckverfahren

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

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

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

\_\_\_\_\_  
Ort

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift im Original