



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

## **Bachelorarbeit**

Mirco Pascal Dahlhaus

# **Verarbeitung von Acrylatklebmassen mittels additiver Fertigung**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

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

Mirco Pascal Dahlhaus

## **Verarbeitung von Acrylatklebmassen mittels additiver Fertigung**



Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/ Energie- und Anlagensysteme  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Tesa SE  
Forschung und Entwicklung  
Hugo-Kirchberg-Straße 1  
22848 Norderstedt

Erstprüfer: Prof. Dr. Jens Telgkamp  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Frank Virus

Datum der Anmeldung: 31.08.2021

## Zusammenfassung

---

**Autor:** Mirco Pascal Dahlhaus

**Thema der Bachelorthesis:** Verarbeitung von Acrylatklebmassen mittels additiver Fertigung

**Stichworte:** Additive Fertigung, 3D-Druck, Acrylatklebmasse, Kleben, Tape, MEX

**Kurzzusammenfassung:** In dieser Arbeit werden Acrylatklebmassen auf ihre Verarbeitbarkeit mittels des MEX-Verfahrens untersucht, und ihre Klebperformance mit der von konventionell hergestellten Klebebändern verglichen.

**Author:** Mirco Pascal Dahlhaus

**Name of Bachelorthesis:** Processing of acrylate adhesives using additive manufacturing

**Keywords:** Additive manufacturing, 3D-printing, acrylic adhesive, bonding, tape, MEX

**Abstract:** In this work, acrylate adhesives are examined for their processability using the MEX process and their adhesive performance is compared with that of conventionally produced adhesive tapes.

## Aufgabenstellung

---

Acrylatklebmassen sind eine weitverbreitete Klebmassenklasse, die von Klebebändern im Privatsektor bis zu Hochleistungsklebeanwendungen in der Industrie angewendet werden. Die Industrie setzt diese doppelseitig klebenden Produkte mithilfe eines Liners als Klebeband ein. Bei vielen Anwendungen werden Klebebänder in eine gewünschte Form vorgestanzt und anschließend verklebt. Dabei fallen der Liner als auch alle Stanzreste als Abfall an. Um diesen Abfall in Zukunft vermeiden zu können, soll im Laufe dieser Arbeit die Verarbeitung von Acrylatklebmassen mittels additiver Fertigung, konkret, dem Materialextrusionsverfahren, untersucht werden. Das Ziel besteht darin, verschiedene Acrylatklebmassenrezepturen auf Verdruckbarkeit und Einfluss des Druckprozesses auf klebtechnische Eigenschaften zu testen. Dazu wird additiv auf Probe gedruckt, um eine Bewertung mittels Mikroscherweg-Prüfung und Push-Out-Prüfung durchzuführen.

Folgende Arbeitsschritte werden in dieser Bachelorarbeit behandelt:

- Übertragen von vorangegangenen Erkenntnissen auf die neu ausgewählten Acrylatklebmassenrezepturen
- Erarbeitung und Durchführung von Versuchsplänen für verschiedene Acrylatklebmassenrezepturen
- Modifikation und Einrichtung des vorhandenen MEX-Druckers in Hinblick auf die zu verdruckenden Materialien
- Überprüfen der Acrylatklebmassenrezepturen auf Eignung für das MEX-Verfahren auf der Basis definierter Kriterien
- Bestimmung der Reaktionskinetik und Vermischungsgüte des Zweikomponentensystems
- Vergleich der Klebperformance von additiv verarbeiteten und standardbeschichteten Klebmassen der tesa SE
- Diskussion der Ergebnisse und Empfehlung für den weiteren Einsatz der Technologie in der Forschung und der Industrie

# Inhaltsverzeichnis

---

Zusammenfassung .....	I
Aufgabenstellung .....	II
Inhaltsverzeichnis .....	III
Symbolverzeichnis .....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VI
1 Einleitung .....	1
2 Stand der Technik .....	3
2.1 Acrylatklebmassen .....	3
2.2 Additive Fertigung .....	6
2.3 German RepRap X400 .....	7
3 Versuchsvorbereitung .....	8
3.1 Klebmassenherstellung .....	8
3.1.1 Entgasung .....	9
3.1.2 Abfüllung .....	9
3.2 Modifikation German RepRap X400 .....	10
3.2.1 Druckkopf .....	10
3.2.2 Druckbettnivellierung .....	12
3.2.3 Druckereinrichtung .....	13
3.3 Druckparameterbestimmung .....	15
3.4 Probenbezeichnung .....	16
4 Prüfverfahren .....	17
4.1 Mikroscherweg-Prüfung .....	18
4.1.1 Herstellung der Proben .....	19
4.1.2 Prüfmethode .....	22
4.1.3 Auswertung .....	23
4.2 Push-Out-Prüfung .....	25
4.2.1 Herstellung der Proben .....	26
4.2.2 Prüfmethode .....	28
4.2.3 Auswertung .....	29
4.3 Dickenmessung .....	30
4.3.1 3D-Mikroskopie .....	30

4.3.2	Messtaster.....	30
5	Versuchsdurchführung.....	31
5.1	Versuchsplanung.....	32
5.2	Darstellung der Ergebnisse Mikroscherweg-Prüfung.....	35
5.3	Darstellung der Ergebnisse Push-Out-Prüfung.....	41
6	Diskussion und Vorgehensempfehlung.....	44
7	Literaturverzeichnis.....	47
A.	Anhang.....	48
A.1.	Mikroscherweg-Prüfmethode.....	48
A.2.	Push-Out-Prüfmethode.....	49

## Symbolverzeichnis

---

$y_{max. \text{ Auslenkung, RT}}$	Maximale Auslenkung bei Raumtemperatur	$\mu\text{m}$
$y_{max. \text{ Auslenkung, } 70^{\circ}\text{C}}$	Maximale Auslenkung bei $70^{\circ}\text{C}$	$\mu\text{m}$
$y_{\text{Elastizität, } 70^{\circ}\text{C}}$	Elastizität bei $70^{\circ}\text{C}$	%
$y_{\text{Elastizität, RT}}$	Elastizität bei Raumtemperatur	%
$t$	Zeit	Tage

## Abkürzungsverzeichnis

---

AHT68	Acrylat-Hotmelt Nr.68
CAD	Computer Aided Design
DMAE	Dimethylethanolamin
GLYEO	3-Glycidyoxy-Propyl-Triethoxysilan
MDEA	Methyldiethanolamin
MEX	Materialextrusion
PC	Polycarbonat
STL	Standard Transformation Language
UV	Ultraviolett

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1 Materialkombinationen von AHT68 mit GLYEO als Vernetzer und MDEA oder DMAE als Beschleuniger in Massenanteilen angegeben .....	32
--	----

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1 Aktivierung des Beschleunigers [6].....	3
Abbildung 2 Zusammentreffen von Beschleuniger und Vernetzer [6] .....	4
Abbildung 3 Ringöffnung in der Epoxidgruppe [6] .....	4
Abbildung 4 Freigabe des Beschleunigers [6] .....	5
Abbildung 5 Quervernetzung [6] .....	5
Abbildung 6 Prozesskette der additiven Fertigung .....	6
Abbildung 7 German RepRap X400 [9].....	7
Abbildung 8 AHT68 – Strang in Verpackung.....	8
Abbildung 9 Ablauf der Klebmassenherstellung .....	9
Abbildung 10 Druckkopf.....	11
Abbildung 11 Rändelmutter.....	12
Abbildung 12 Eingerichtetes Druckbett mit Druckkopf.....	14
Abbildung 13 Probenbezeichnung der Mikroscherweg-Prüfung .....	16
Abbildung 14 Scherbelastung [5] .....	18
Abbildung 15 Mikroscherweg-Druckbetteinrichtung .....	19
Abbildung 16 Vorbereitete Mikroscherweg-Probe .....	20
Abbildung 17 Ablauf der Mikroscherweg-Probenfertigung.....	21
Abbildung 18 Mikroscherweg-Prüfstation .....	22
Abbildung 19 Beispielhafter Weg-Zeit-Verlauf eines Mikroscherweg-Versuchs.....	24
Abbildung 20 Push-Out-Probe .....	27
Abbildung 21 Push-Out-Prüfung der Druckplatte .....	27
Abbildung 22 Aufbau des Push-Out-Prüfstands .....	28
Abbildung 23 Kraft-Weg-Diagramm .....	29
Abbildung 24 Maximale Auslenkung von AHT68 mit GLYEO 0,4% + DMAE 0,4% über die Zeit .....	35
Abbildung 25 Elastizität von AHT68 mit GLYEO 0,4% + DMAE 0,4% über die Zeit .....	37
Abbildung 26 Elastizität nach 42 und 56 Tagen .....	39
Abbildung 27 Vergleich der Auslenkungsdistanz von Druck und Klebeband .....	40
Abbildung 28 Mittelwert aus der Push-Out-Prüfung mit PC-Platten.....	41
Abbildung 29 Push-Out-Prüfung von G04D04 mit Stahl-Proben .....	43
Abbildung 30 Push-Out-Prüfung G02D02 Klebeband .....	43



# 1 Einleitung

---

**Hintergrund** Die globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts zwingen Unternehmen zunehmend nachhaltig wirtschaftliche Entscheidungen zu treffen. Der Relevanz von nachhaltiger Entwicklung und der gesellschaftlichen Verantwortung von Unternehmen wird durch die Ziele der Vereinten Nationen in der Agenda 2030 besonderen Nachdruck verliehen.[1] Der steigende Anspruch an Nachhaltigkeit und eine wirtschaftliche Produktion zwingt die Industrie Ressourcen effizienter zu nutzen. Als Zulieferer für die Industrie ist tesa SE besonders in der Pflicht, seinen Kunden zukunftsweisende Lösungen anzubieten. Ein großes Potential für die nachhaltige Produktion hat die in den 1980er-Jahren entwickelte additive Fertigung. Die Technologie erlebte in den letzten 20 Jahren, seit der breiten Verfügbarkeit von leistungsfähigen Computersystemen, CAD-Software und dem Auslaufen von Patenten, einen steilen Aufstieg. Dies spiegelt sich auch in der Zahl neuer Patentanmeldungen beim europäischen Patentamt wieder. So wurden zwischen 2010 und 2018 knapp 17000 Patente zur additiven Fertigung angemeldet.[2]

Die additive Fertigung bietet verschiedene Vorteile für die Produktion. So lassen sich im Bereich der Verklebungsindustrie bis zu 95% des anfallenden Abfalls vermeiden.[3] Die hohe Abfallmenge ist der Tatsache geschuldet, dass zum Beispiel für das Verkleben eines Handydisplays lediglich ein schmaler Rahmen benötigt wird. Dieser wird traditionell aus einem Klebestreifen mit der Breite und Höhe des Kleberahmens ausgestanzt, und der Rest wird als nicht recyclingfähiger Gewerbemüll verbrannt.[3] Der additive Verarbeitungsansatz erlaubt das Weglassen des Klebestreifens und das direkte Aufbringen der Klebmasse auf die Geometrie. Zudem entfällt der gesamte Fertigungsschritt des Beschichtens eines Trägermaterials, des sogenannten Liners. Dadurch lassen sich nicht nur Material, sondern auch die gesamte Beschichtungsanlage in der Klebebandproduktion und somit Produktionskosten sparen. Beim Kunden werden durch die Technologie keine Stanzmaschinen und Stanzwerkzeuge zur Geometrieanpassung des Klebebandes mehr benötigt. Zudem können dank der werkzeuglosen Verarbeitung schnell Geometrien und Klebmassen gewechselt werden. Auch die bisher nicht mögliche Verklebung von formstabilen, dreidimensionalen Geometrien und der In-Line-Ausgleich von Toleranzen werden nun möglich.

**Forschungsziel** Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von Acrylatklebmassen auf ihre Eignung für die additive Fertigung. Konkret soll bestimmt werden, ob die ausgewählten Acrylatklebmassen verdruckt werden können und wie schnell die Proben nach der Fertigung einsatzbereit sind. Die Ergebnisse sollen mit herkömmlich hergestellten Proben verglichen werden. Es wird eine Empfehlung zum Einsatz der Technologie und dem weiteren Vorgehen gegeben.

## 2 Stand der Technik

---

In diesem Kapitel wird der momentane Stand der verwendeten Acrylatklebmassen, des MEX-Verfahrens und der Aufbau und die Modifikation des verwendeten MEX-Druckers erläutert.

### 2.1 Acrylatklebmassen

Nach DIN EN 923 ist ein Klebstoff ein „nichtmetallischer Stoff, der Füge­teile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann“. [4]

Eine Kernkompetenz der tesa SE ist die Entwicklung von Acrylatklebmassen.

Bei den Acrylatklebmassen handelt es sich um bei Raumtemperatur abbindende Klebstoffsysteme, welche in der Lage sind, eine Vielzahl an Werkstoffen und Oberflächen durch alterungsbeständige Klebschichten zu verbinden. [5]

Diese härten durch eine im Folgenden erläuterten Vernetzungsreaktion aus. Bestandteil der Vernetzungsreaktion sind das namensgebende Polyacrylat, ein Vernetzer und ein Beschleuniger. Der Beschleuniger dient als Katalysator und startet die Vernetzungsreaktion.

In den nachfolgenden Strukturformeln ist der Weg von der Aktivierung des Beschleunigers, über die Anbindung des Vernetzers, bis zur eigentlichen Vernetzung dargestellt.

Der Beschleuniger „B“ wird, wie in Abbildung 1 gezeigt, durch eine Reaktion mit einer im Polyacrylat enthaltenen Carbonsäuregruppe aktiviert. Dabei löst sich das Wasserstoffatom von der OH-Gruppe und bildet ein Carboxylat.

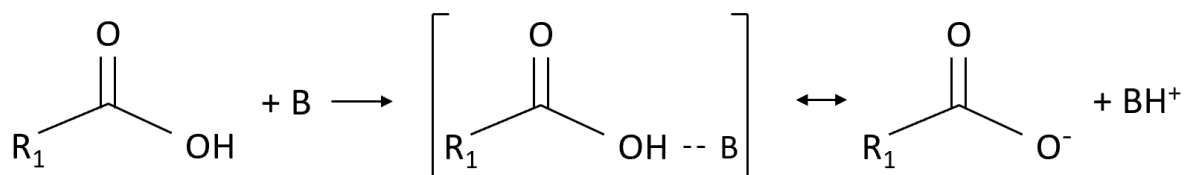


Abbildung 1 Aktivierung des Beschleunigers [6]

Der aktivierte Beschleuniger steht als Protonendonator für den zweiten Teil der Reaktion zur Verfügung.

Zunächst trifft dieser in einer in Abbildung 2 gezeigten Reaktion auf den Vernetzer und verlagert das Elektronengleichgewicht in Richtung des Sauerstoffatoms.

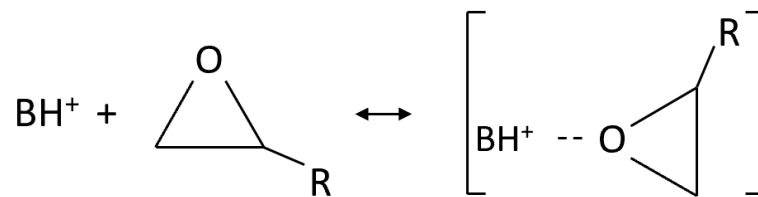


Abbildung 2 Zusammentreffen von Beschleuniger und Vernetzer [6]

Das dabei entstandene instabile Zwischenprodukt verbindet sich in Abbildung 3 mittels polarer Bindung mit dem Carboxylat und destabilisiert den Epoxidring. Dadurch kommt es zu einer Ringöffnung in der Epoxidgruppe.

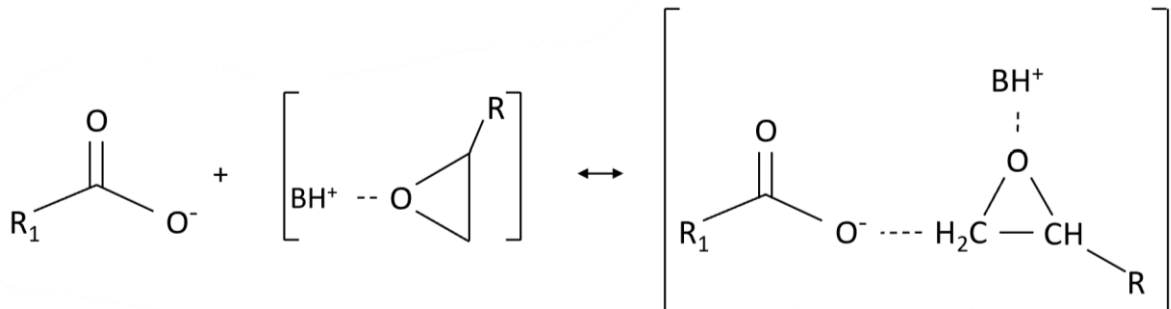


Abbildung 3 Ringöffnung in der Epoxidgruppe [6]

Nach der Ringöffnung gibt das negativ geladene Sauerstoffatom sein Elektron an die BH<sup>+</sup>-Gruppe weiter, ermöglicht die Bildung einer OH-Gruppe und die Freisetzung des Beschleunigers (siehe Abbildung 4). Dieser steht nun für die Wiederholung des Reaktionsprozesses zur Verfügung.

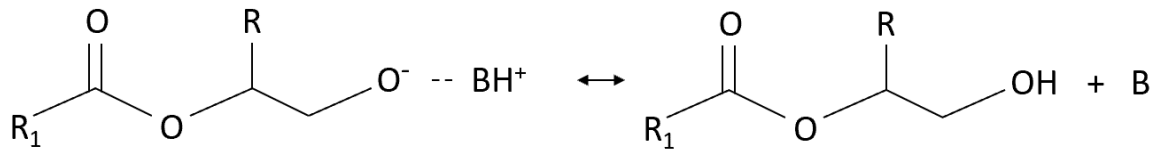


Abbildung 4 Freigabe des Beschleunigers [6]

Zum Schluss findet die Vernetzung der Moleküle untereinander statt. Diese docken, wie in Abbildung 5, gezeigt an den vielen Vernetzungsstellen „R“ an. Der Ablauf dieser Reaktion ist ein Firmengeheimnis der tesa SE und wird nicht weiter erläutert. Die Anzahl der angebotenen Besetzungsstellen kann durch die Polymerisation des Polyacrylats und die Anzahl der besetzten Stellen durch die zugegebene Menge des Vernetzers bestimmt werden. Dadurch ist die Klebkraft der Acrylatklebmassen einstellbar.

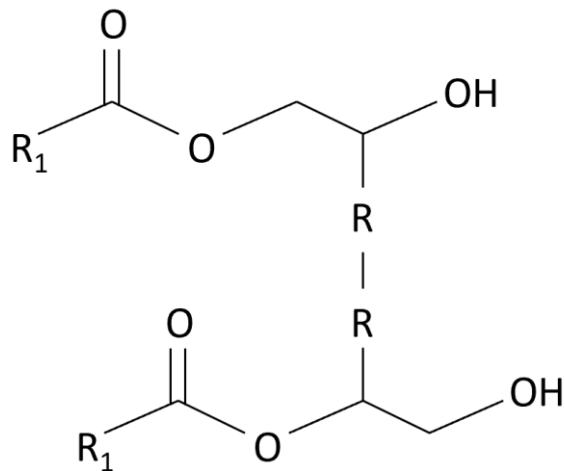


Abbildung 5 Quervernetzung [6]

Diese Klebmassen finden breite Anwendung in der Industrie wie auch im Haushalt. So werden sie, neben der Verklebung von Displays und KFZ-Außenspiegeln, für Kreppband und den bekannten Tesafilm verwendet.

## 2.2 Additive Fertigung

Dieses Kapitel widmet sich dem Grundprinzip und dem Arbeitsablauf der additiven Fertigung mit besonderem Augenmerk auf das Materialextrusionsverfahren (MEX).

Die additive Fertigung ordnet sich in die Hauptgruppe des Urformens ein. Das Urformen vereint nach DIN 8580 alle Fertigungsverfahren, die aus einem formlosen Stoff, ein festes, geometrisch definiertes Bauteil aufbauen. Dies ermöglicht gegenüber herkömmlichen Fertigungsverfahren eine unerreichte Designfreiheit und Materialeinsparung. Besonders geeignet ist die additive Fertigung neben dem Prototypenbau für kleine und mittelgroße Bauteilserien. [7]

Additive Fertigungsverfahren bauen das Bauteil schichtweise auf. Das in dieser Arbeit angewendete MEX-Verfahren schmilzt das Material in einem Extruder auf und extrudiert dieses durch eine Düse auf die Bauplatzform.

Jedes Bauteil durchläuft vom Design bis zum fertigen Bauteil vier Prozessschritte (siehe Abbildung 6). Zunächst wird in einem 3D-CAD-Programm das Bauteil entworfen und als STL-Datei exportiert. Danach wird es während des Preprocessings mithilfe eines „Slicers“ für den Druck vorbereitet. Der Slicer unterteilt das Bauteil in einzelne Schichten, generiert nötige Stützstrukturen, um Überhänge während des Druckens abzustützen und fügt der Ausgangsdatei, dem sogenannten G-Code, Informationen wie die Drucktemperatur und Geschwindigkeit hinzu. Dieser G-Code kann nun in den 3D-Drucker geladen werden. Nach dem Druck muss das erzeugte Bauteil im letzten Schritt, dem Postprocessing, nachbearbeitet werden. Beim MEX-Druckverfahren bedeutet dies Stützstrukturen und unerwünschte Artefakte zu entfernen. [8] Dieser Schritt entfällt jedoch in dieser Arbeit, da die verwendeten Materialien aufgrund ihrer viskosen und klebenden Eigenschaften nicht nachbearbeitet werden können.

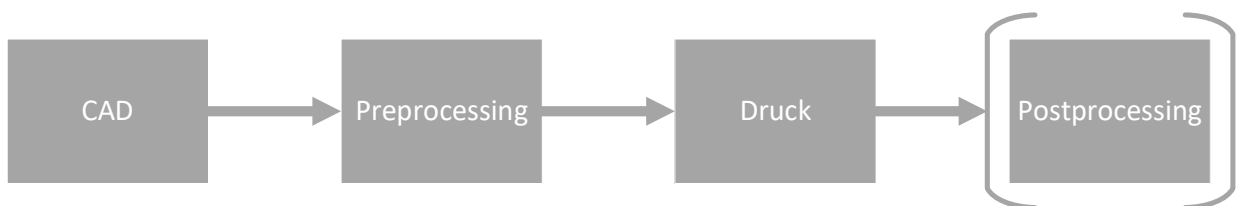


Abbildung 6 Prozesskette der additiven Fertigung

## 2.3 German RepRap X400

Der in Abbildung 7 gezeigte German RepRap X400 der Firma German RepRap ist ein MEX-Drucker mit einer Bauraumgröße von 400mm x 400mm x 350mm. Dieser eignet sich, aufgrund seiner auf Open-Source basierenden Software und leicht zugänglichen Hardware, gut für die Anpassung an eigene Bedürfnisse. Er besitzt von Werk aus eine Einkapselung des Bauraumes und zwei Direct-Extrusion-Hotends. Die Hotends sorgen dafür, dass das zu verdruckende Material gefördert, aufgeschmolzen und aus der Düse auf die Druckplatte extrudiert wird.

Die Kinematik basiert auf einem kartesischen Verfahrenssystem mit einem in X- und Y-Richtung beweglichem Druckkopf und einer in Z-Richtung fahrbaren Druckplatte. Der Drucker eignet sich für den Einsatz in der Industrie als auch für Privatpersonen.

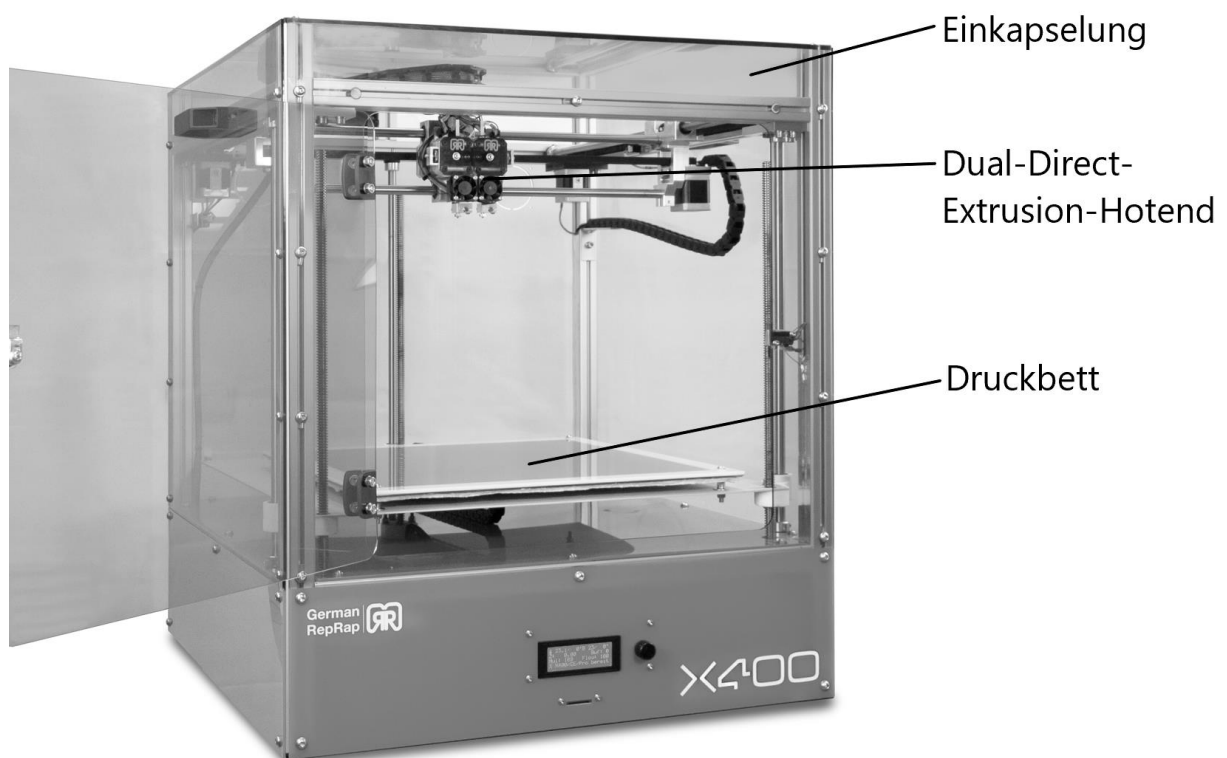


Abbildung 7 German RepRap X400 [9]

## 3 Versuchsvorbereitung

---

In diesem Kapitel geht es um die Herstellung der Acrylatklebmassen, die Vorbereitung und Modifizierung des Druckers und die Probenbezeichnungen.

### 3.1 Klebmassenherstellung

Das Polymer AHT68 wird im Tesa eigenen Werk hergestellt und bildet das Ausgangsmaterial für viele Klebstoffe. Dieses wird für Versuchszwecke in Strangform (siehe Abbildung 8) geliefert und kann zur weiteren Verarbeitung in einen Extruder gegeben werden.

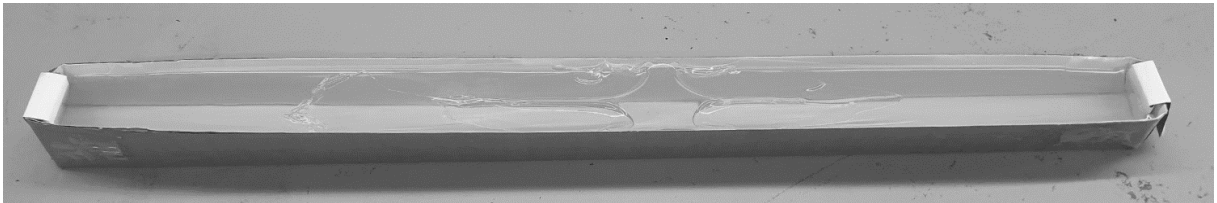


Abbildung 8 AHT68 – Strang in Verpackung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Einschneckenextruder genutzt, um den Acrylatstrang aufzuschmelzen, und ein Zweischnckenextruder, um Zusatzstoffe hinzuzugeben. Nach dem Aufschmelzen tritt das Acrylat als Schmelze aus dem Einschneckenextruder aus, und wird über einen beheizten Schlauch zu einem Zweischnckenextruder geführt. Der Zweischnckenextruder verfügt über eine höhere Mischwirkung als der Einschneckenextruder und ist deshalb besser für die Untermischung von Zusatzstoffen geeignet. Die Additive werden mithilfe von Dosiereinheiten hinzugegeben.



### 3.1.1 Entgasung

Bevor das Material in Kartuschen abgefüllt werden kann, muss Luft, welche durch die Schnecken des Extruders in das Material gemischt wurde, mittels einer Vakuumpumpe entfernt werden. Wenn dies nicht geschieht, bleibt die Luft im Material und bildet Blasen, die beim späteren Verdrucken den Materialfluss stören und den Druckprozess instabil werden lassen.

### 3.1.2 Abfüllung

Am Ende des Extrusionsprozesses kommt das Material als Schmelze aus der Maschine und kann in Kartuschen abgefüllt werden. Die Abfüllung der Kartuschen dient der Lagerung und der Zurverfügungstellung des Materials für den 3D-Drucker. Dies ist im Labormaßstab ein manueller Prozess, wird in der industriellen Anwendung jedoch durch automatische Abfüllanlagen und den Einsatz von Großbehältern ersetzt. Der Prozess kann momentan nicht als „Inline-Prozess“ gestaltet werden, da die Größenordnung der Extruder größer als die des 3D-Druckers ist und sich das Material aufstauen würde. Dies kann sich in Zukunft durch den parallelen Betrieb von mehreren 3D-Druckern ändern, und die Abfüllung durch eine direkte Verarbeitung des Materials in der Fertigungslinie ersetzt werden.

Der Ablauf der Klebmassenherstellung ist zusammenfassend in Abbildung 9 dargestellt.

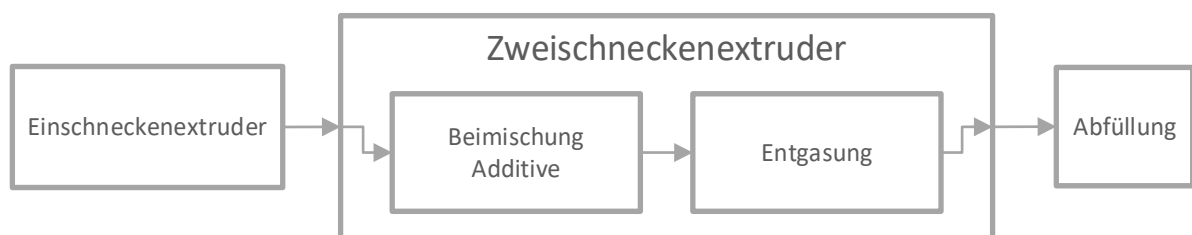


Abbildung 9 Ablauf der Klebmassenherstellung

## 3.2 Modifikation German RepRap X400

In diesem Kapitel werden die am German RepRap X400 vorgenommenen Modifikationen erläutert.

### 3.2.1 Druckkopf

Der in Abbildung 10 verwendete Druckkopf ist eine Spezialanfertigung für Tesa. Dieser ist speziell für den Einsatz von hoch- bis niedrigviskosen Stoffen im MEX-Bereich ausgelegt. Das Material wird über Kartuschen zugeführt und über sechs Heizzonen erwärmt. Mit einer Extruderschnecke, ähnlich einem Einschneckenextruder, wird das Material im Druckkopf gefördert. Zur Materialförderunterstützung wird in der Kartusche ein Überdruck mit Druckluft aufgebaut. Der verwendete Druckkopf ist für ein Zweikomponentensystem ausgelegt, weshalb alle Komponenten zweimal vorhanden sind. Jede Komponente hat seinen eigenen Kartuschenhalter, Schrittmotor und seine eigene Extruderschnecke. Die Materialien werden kurz vor der Düse in einem Y-Endstück zusammengeführt und durch einen statischen Mischer vermengt. Aus der Düse kommt ein vermengtes Gemisch, dessen Homogenität im Vorfeld ermittelt wurde. Dieses vernetzt sich durch das Zusammenführen des Vernetzers mit dem Beschleuniger.

Ein Gemisch wird als homogen bezeichnet, wenn die Zusammensetzung des Gemisches an jedem Punkt des Systems gleich ist.[10] In einem inhomogenen Gemisch schreitet die Vernetzungsreaktion unterschiedlich schnell voran. Dies kann zu Schwachstellen und einem frühzeitigen Versagen der Verklebung führen. Aus diesem Grund wird die Mischgüte eines Mixers vor der Benutzung mittels eines Farbmischversuches ermittelt. Hierfür wird einer der Kartuschen schwarzes Pigment beigefügt. Auf diese Weise kann nach der Extrusion die Verteilung der Pigmente und damit die Mischgüte bzw. Homogenität der kombinierten Massen visuell ermittelt werden.

### 3 Versuchsvorbereitung

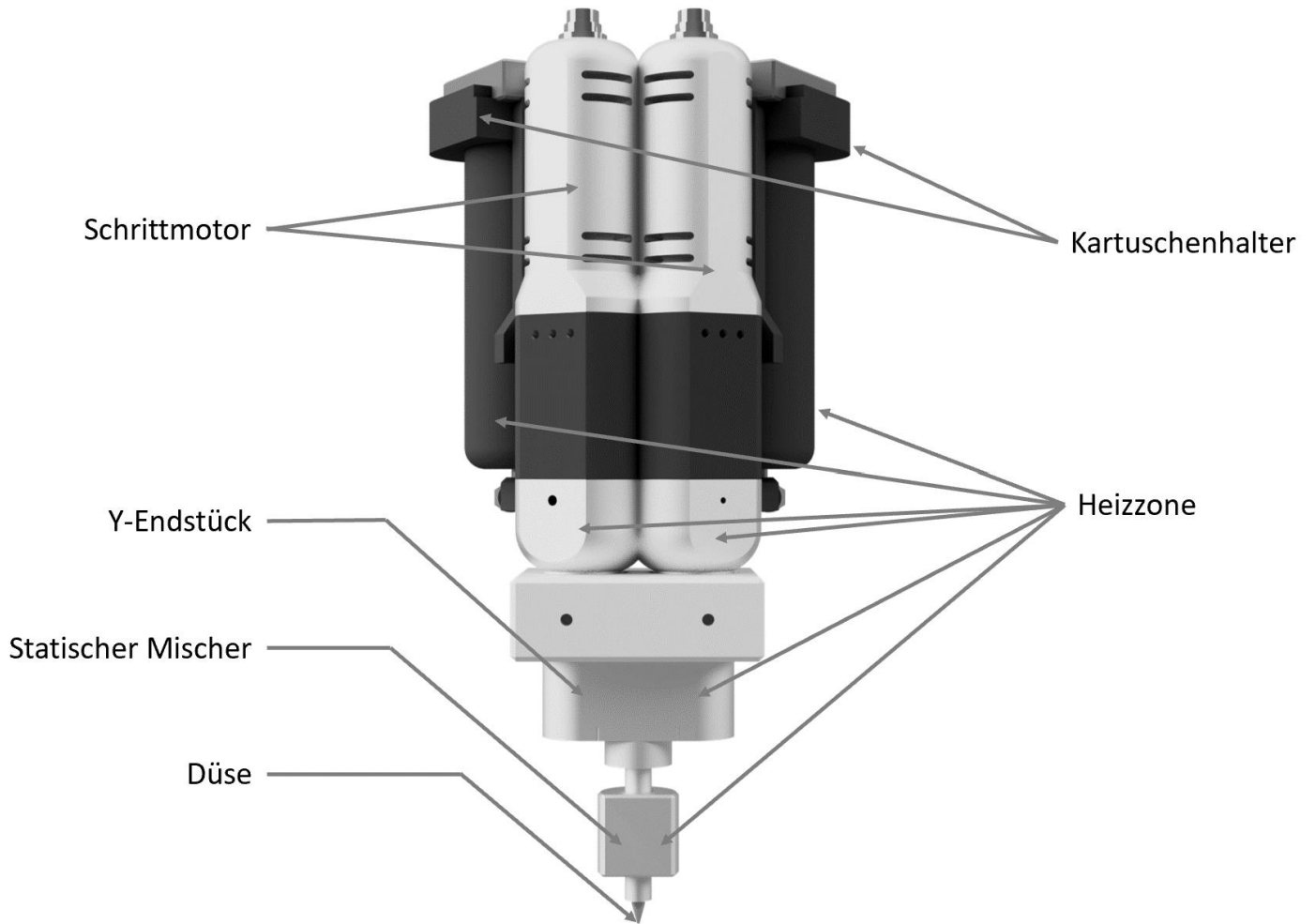


Abbildung 10 Druckkopf

#### 3.2.2 Druckbettnivellierung

Die Druckbettnivellierung stellt einen der kritischen Bereiche im MEX-Druck dar. Wenn das Druckbett nicht gleichmäßig ausgerichtet ist, werden sich die extrudierten Linienhöhen innerhalb des Bauteils unterscheiden. Dies kann dazu führen, dass sich das Bauteil von der Druckplatte löst, die Düse ins Druckbett fährt oder der 3D-Drucker in die Luft druckt. Im Fall des verwendeten Druckkopfes ist die akkurate Ausrichtung besonders wichtig, da mit einem Düsendurchmesser von 0,2mm und einer einzelnen Bauteilschicht gearbeitet wird. Hier sind Abweichungen im Mikrometerbereich bereits deutlich sichtbar und beeinflussen die Druckqualität.

Der German RepRap X400 besitzt zur Druckbettnivellierung vier Sicherungsmuttern, welche mit zwei Schraubenschlüsseln, einem zum Drehen der Mutter und einem zum Gegenkontern der Druckbetthalteschraube, eingestellt werden können. Die Sicherungsmuttern wurden mit dem Hintergedanken verbaut, dass sich diese mit der Zeit nicht lösen und das Bett in Position bleibt. Leider ist dies eine Fehlannahme seitens des Herstellers, denn die Druckbettposition unterliegt einer ständigen Veränderung. Das Justiersystem mit zwei Schraubenschlüsseln hat sich als unpräzise erwiesen, weshalb alle Sicherungsmuttern mit Rändelmutter (Abbildung 11) ersetzt wurden. Diese lassen sich auch während des Druckvorgangs mit einer Hand justieren. Dadurch können fehlerhafte Druckergebnisse unmittelbar behoben werden.

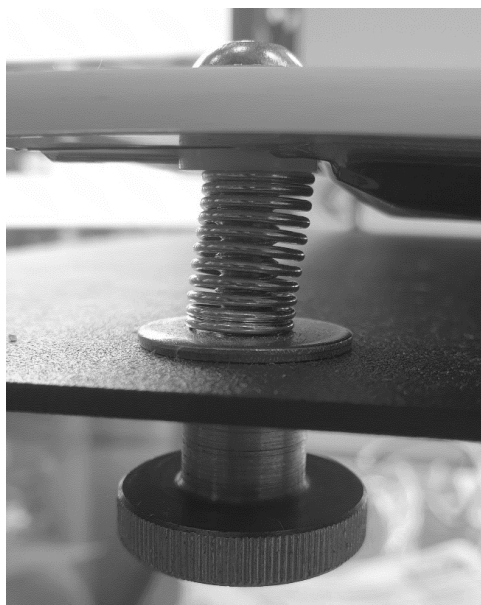


Abbildung 11 Rändelmutter

#### 3.2.3 Druckereinrichtung

Das Druckbett muss für den modularen Austausch von Probenhaltern modifiziert werden. Dazu werden Fixiervorrichtungen auf eine Glasplatte geklebt, welche durch Fixierstücke auf dem Druckbett des German RepRap X400 befestigt wird. Die Fixierstücke sind aus ABS 3D-gedruckt und werden mit doppelseitigem Klebeband auf dem Druckbett befestigt. Die genaue Befestigung der Probenhalter wird in Abschnitt 4.1 und Abschnitt 4.2 ausführlich beschrieben. Diese Fixierung auf dem Druckbett sorgt für eine genügend genaue Positionierung der Probenhalter auf der Glasplatte. Eine Veranschaulichung des Aufbaus ist in Abbildung 12 zu sehen.

Damit sich das Material nicht im Druckkopf zwischen Druckpausen vernetzt, wird es kontinuierlich extrudiert. Dies sorgt für eine möglichst geringe Verweilzeit im beheizten Druckkopf. Wenn der Drucker nicht mehr verwendet wird, werden der statische Mischer und die Düse aus dem Druckkopf entfernt und bis zur nächsten Benutzung in Butanon eingelegt. Das Material ist in Butanon löslich. Dadurch kann sich das im Mischer und in der Düse befindliche Material nicht vernetzen und beides wiederverwendet werden. In Zukunft ist es denkbar, im Laborbetrieb den statischen Mischer nicht mehr wiederzuverwenden und auf Einmalmischer zu wechseln. Diese sind in der Chemieindustrie bereits im Einsatz und werden nach einem Materialwechsel oder längerer Stillstandzeit entsorgt. Dies spart Reinigungsaufwand und stellt sicher, dass keine Verschmutzungen in das extrudierte Material gelangen. Während des Einsatzes in der Produktion beim Kunden ist der Wechsel eines Mixers nicht mehr nötig, da dort die Anlagen nicht abgeschaltet werden und somit ein frühzeitiges Vernetzen in der Düse nicht vorkommt.

### 3 Versuchsvorbereitung

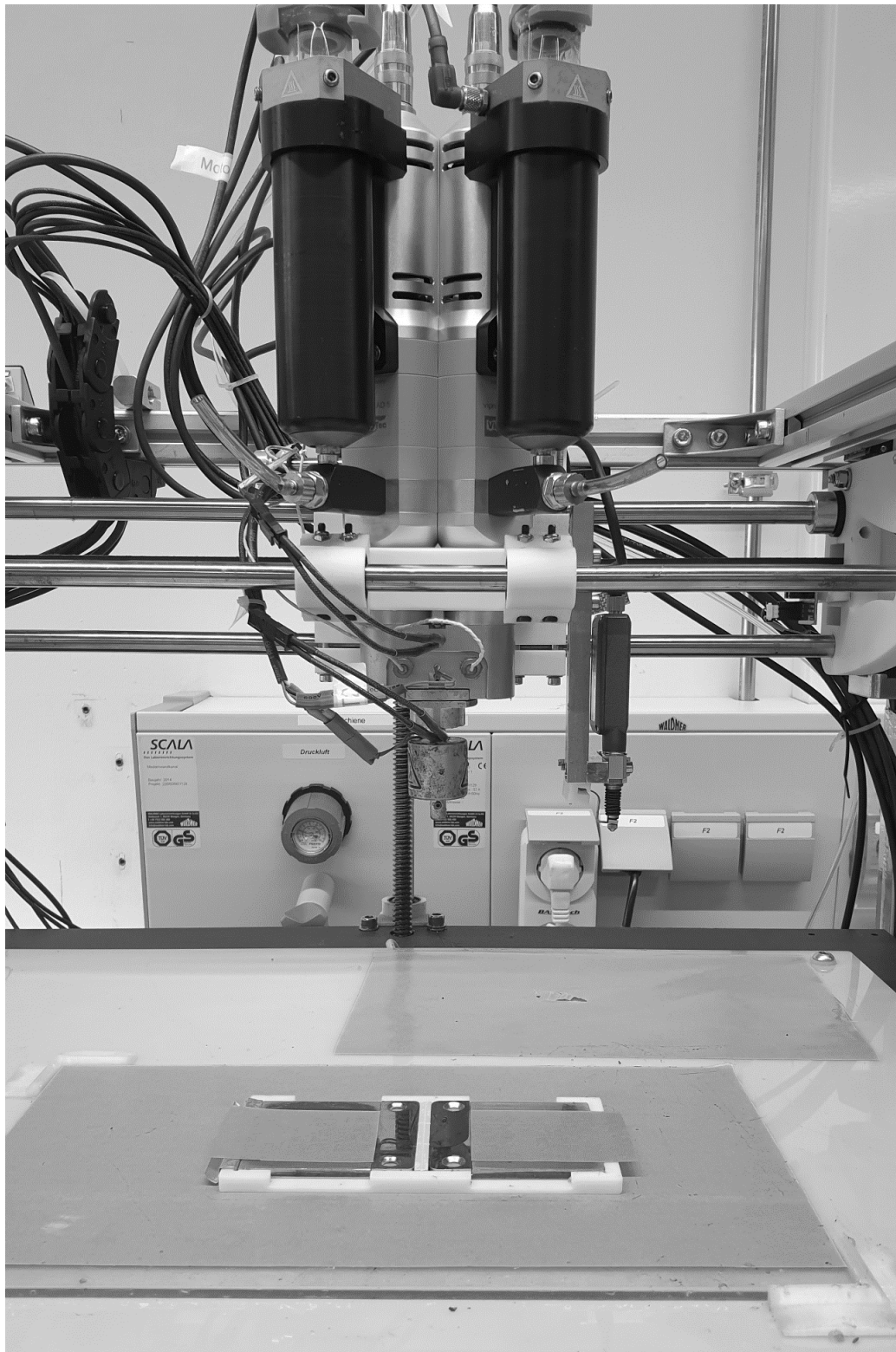


Abbildung 12 Eingerichtetes Druckbett mit Druckkopf

### 3.3 Druckparameterbestimmung

Das Herausarbeiten der richtigen Druckparameter für die verwendeten Materialkombinationen und Druckbettaufbauten ist essentiell für die erfolgreiche Versuchsdurchführung. Dies ist ein iterativer Prozess mit vielen Stufen.

Zu den wichtigsten Druckparametern gehören die Druckgeschwindigkeit, Drucktemperatur, der Materialvorschub, das Offset zwischen Düse und Probenkörper, die Drucklinienbreite und die Bauteilposition. Alle Parameter, bis auf die Bauteilposition, lassen sich nur experimentell ermitteln. Als Basiswerte dienen in Vorversuchen gesammelte Erkenntnisse.

Die Druckparameter beeinflussen sich gegenseitig. So haben das Offset der Düse zum Druckbett und der Materialvorschub einen direkten Einfluss auf die Linienbreite und die Linienhöhe. Die Druckgeschwindigkeit wird von der Düsensentemperatur und dem möglichen Materialvorschub begrenzt. Dabei wird die maximale Verarbeitungstemperatur von der Temperaturbeständigkeit des zu verarbeitenden Materials bestimmt. Ebenfalls wichtig ist die Abhängigkeit des Materialvorschubs von der Viskosität der zu verarbeitenden Masse und des maximalen Drehmoments des Extruders. Den größten Einfluss auf die Druckqualität hat jedoch das Düsenoffset. Das Offset ist der Versatz zwischen Düsenende und Druckbett und muss, anders als die anderen Druckparameter, regelmäßig neu eingestellt werden.

Für die experimentelle Druckparameterfindung wird reines AHT68, welches als Ausgangsmaterial für viele Acrylatklebmassen genommen wird, ohne Zusätze verwendet. Dadurch findet während des Extrusionsvorganges keine Vernetzung statt, und es kann sich auf die reine Druckparameterfindung konzentriert werden. Das Extrusionsverhalten der mit Additiven vermengten Massen unterscheidet sich, solange keine vorzeitige Vernetzungsreaktion stattfindet, nicht von der Grundmasse AHT68.

### 3.4 Probenbezeichnung

Für die Wiedererkennung der Proben wird nach dem in Abbildung 13 gezeigten Schema verfahren. Dabei sind in der Probenbezeichnung die Materialkombination, das Herstellungsdatum ohne Jahr, die Lagertemperatur als auch das Prüfgewicht vermerkt. Das Prüfgewicht ist in der Abbildung gepunktet umrandet und fällt bei den in Kapitel 4.2 beschriebenen Push-Out-Proben weg. Die Materialkombination steht in dem durchgängig umrandeten Fenster und besteht aus einem in erster Position stehenden Vernetzer und einem in zweiter Position stehenden Beschleuniger. Die Konzentrationen sind in Massenprozent angegeben, wobei für die vereinfachte Markierung, das Komma in der Zahl weggelassen wird. Nach dem untenstehenden Beispiel bedeutet G02 eine Massenkonzentration des GLYEO von 0,2%.

Die Probenamen enthalten keinen Abschnitt, der die Dauer der Einlagerung bis zur Durchführung der Prüfung festhält. Dies hat den Grund, dass die Auswertungsergebnisse der Proben am Tag der Prüfung in einen Ordner mit dem Prüfungsdatum als Namen gespeichert werden. Auf diese Weise lässt sich die Einlagerungsdauer zuordnen. Zusätzlich sind die Proben mit Herstellungsdatum, Testdatum und Einlagerungszeit in Tagen in der Versuchsdaten-Excel-Tabelle hinterlegt.

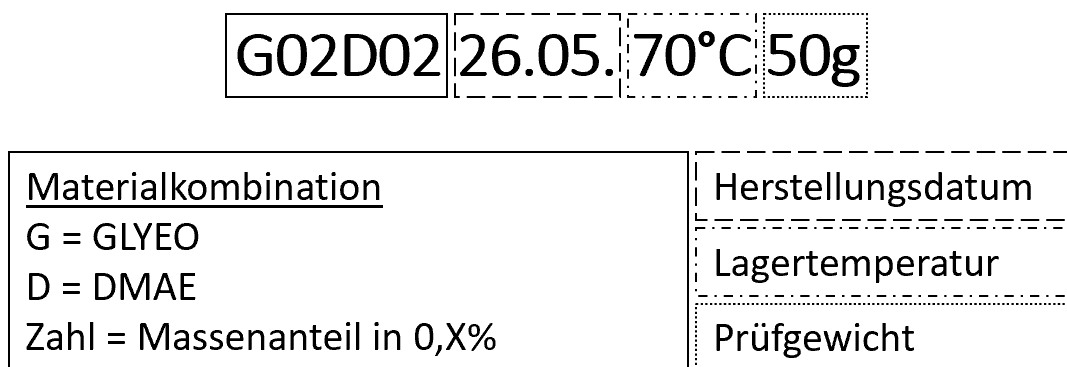


Abbildung 13 Probenbezeichnung der Mikroscherweg-Prüfung



## 4 Prüfverfahren

---

Im Folgenden geht es um die verwendeten Prüfmethode, den Aufbau der Prüfinstrumente, die Herstellung der Probe sowie die Auswertungsmethodik.

Die angewendeten Prüfmethode werden den zerstörenden Prüfmethode im Bereich der statischen Prüfung zugeordnet. Bei der zerstörenden Prüfung wird das Bauteil, in dieser Arbeit die Klebverbindung, auf seine chemischen und physikalischen Eigenschaften geprüft und dabei beschädigt.[11] Die geprüfte chemische Eigenschaft ist der Vernetzungsfortschritt und die physikalische die Widerstandskraft gegen Verformung. Dazu wird die Klebverbindung mit einer definierten Kraft belastet und das Verformungsverhalten ermittelt. Die Kraftauftragungsgeschwindigkeit ist gering, dadurch quasi-statisch, und hat keinen Einfluss auf das Prüfergebnis.

## 4.1 Mikroscherweg-Prüfung

Die Mikroscherweg-Prüfmethode dient zur Bestimmung der Scherfestigkeit von Klebebändern und der Elastizität der auf den Klebebändern verwendeten Klebmassen bei gleichbleibender Temperatur. Die Prüfmethode unterliegt der in Anhang A.1 hinterlegten Prüfvorschrift, die an die Besonderheiten der additiven Fertigung angepasst wird.

Die reine Scherbelastung tritt auf, wenn aufgetragene Kräfte parallel zu der Klebfläche wirken und die gefügten Bauteile sich unter der angreifenden Kraft nicht längen. Die Klebmasse verformt sich, wie in Abbildung 14 zu sehen, elastisch in Krafrichtung. Dabei bleibt sie mit den gefügten Bauteilen fest verbunden. Dies bewirkt eine gleichmäßige, ideale Spannungsverteilung. In der Realität sind die gefügten Bauteile nicht starr und verformen sich. Diese zusätzliche Dehnung induziert Spannungsspitzen an den Rändern der Klebverbindung und mindert deren maximal aufnehmbare Belastung.

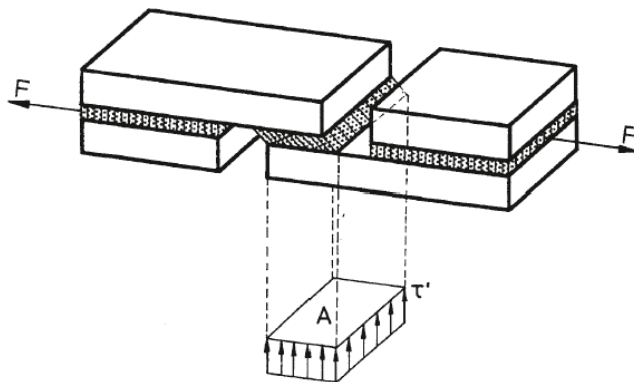


Abbildung 14 Scherbelastung [5]

#### 4.1.1 Herstellung der Proben

Die Probe besteht aus einer stählernen Prüfplatte, einem Verstärkungspapier, der Klebfläche und einem Aluminiumstreifen. Anstelle des vorgesehenen Klebebandes wird die Klebmasse direkt auf die stählerne Prüfplatte und das Verstärkungspapier gedruckt.

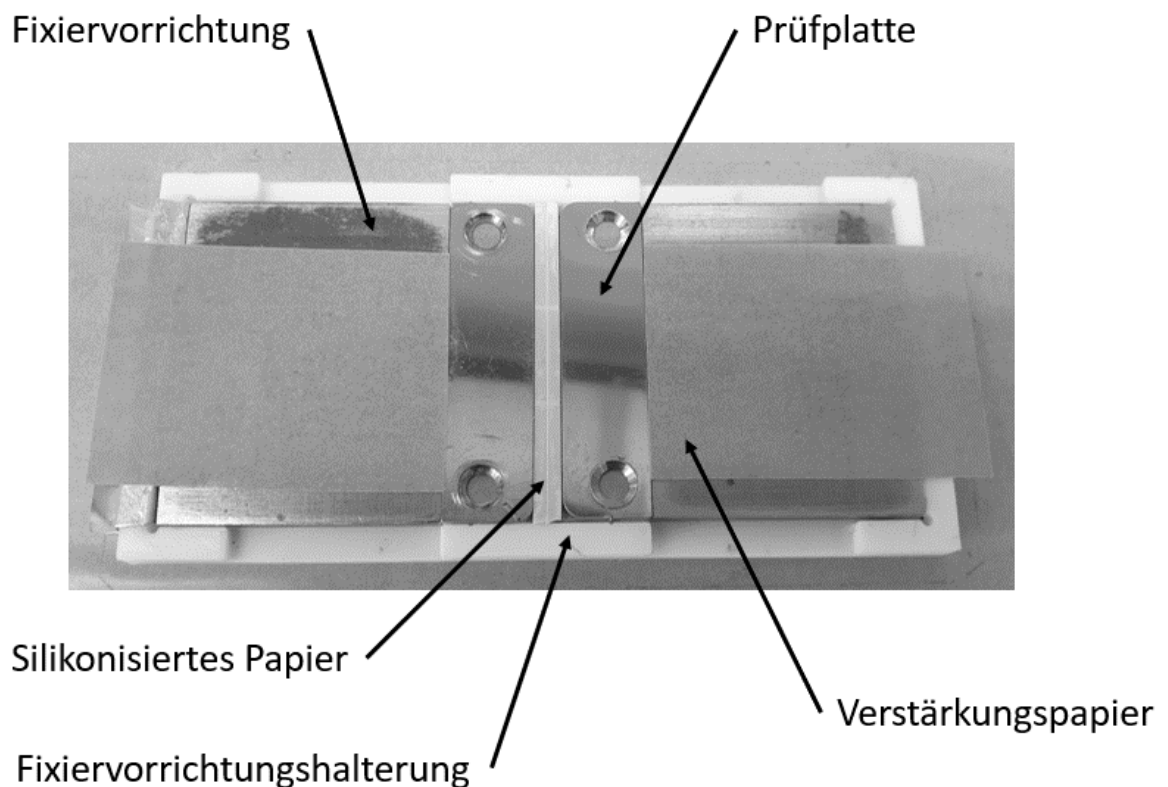


Abbildung 15 Mikroscherweg-Druckbetteinrichtung

Das Verstärkungspapier wird mit doppelseitigem Klebeband auf der Prüfplatte befestigt. Vor der Verwendung der Prüfplatte wird diese mit Aceton gereinigt und unter einem Abzug abgedampft. Um für einen ebenen Übergang zwischen Verstärkungspapier und Prüfplatte zu sorgen, wird unter die Prüfplatte ein Klebeband in derselben Stärke wie die des Verstärkungspapiers geklebt. Des Weiteren ist zu verhindern, dass der gedruckte Klebestreifen an der Oberseite der Fixierhalterung kleben bleibt. Dazu wird jeweils ein silikonisiertes Stück Papier auf die Fixierhalterung geklebt (siehe Abbildung 15). Die verdruckte Acrylatklebmasse bleibt auf diesem nicht haften und kann zerstörungsfrei entfernt werden. Der gesamte Fertigungsprozess ist in Abbildung 17 schrittweise dargestellt.

Zum Aufbringen der Klebfläche werden, wie in Abbildung 15 gezeigt, zwei Prüfplatten in ihren Fixiervorrichtungen in den auf dem Druckbett befestigten Fixiervorrichtungshalter gelegt. Der Klebestreifen wird über beide Prüfplatten in einem Stück gedruckt. Nach dem Druck wird der Aluminiumstreifen auf die Klebfläche gelegt und sanft angedrückt.

Die gedruckte Klebfläche wird dabei nicht beschädigt. Das Andrücken ist notwendig, damit die Klebverbindung mit dem Aluminiumstreifen für das weitere Vorgehen belastbar genug ist. Ein zu starkes Andrücken kann zu der Beschädigung der Klebstruktur führen und die Probe unbrauchbar machen. Danach werden die Prüfplatten mit einem Schnitt zwischen den beiden Fixiervorrichtungen und durch den Aluminiumstreifen voneinander getrennt. Der in der Prüfvorschrift genannte Verstärkungsstreifen kann aufgrund des gewählten, steiferen Aluminiumbandes weggelassen werden.

Nach der Fertigung wird die Mikroscherweg-Probe zur Vernetzung eingelagert. Am Tag der Prüfung wird diese der Lagerstätte entnommen und, wie in Abbildung 16 zu sehen, mit einer Hosenträgerklammer präpariert.

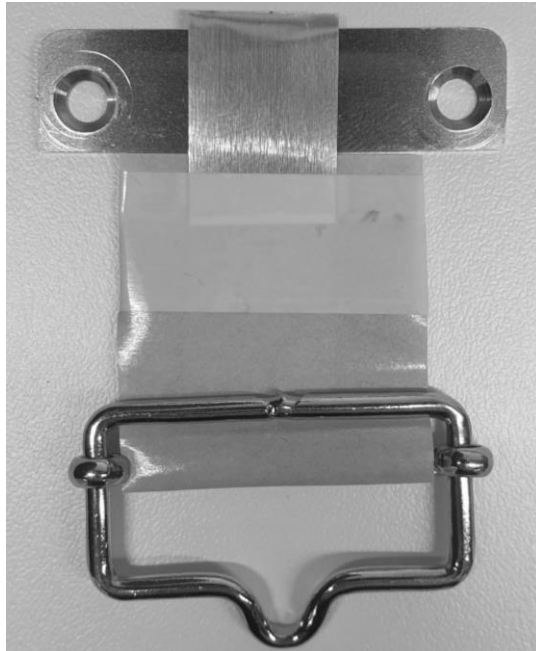


Abbildung 16 Vorbereitete Mikroscherweg-Probe

#### 4 Prüfverfahren

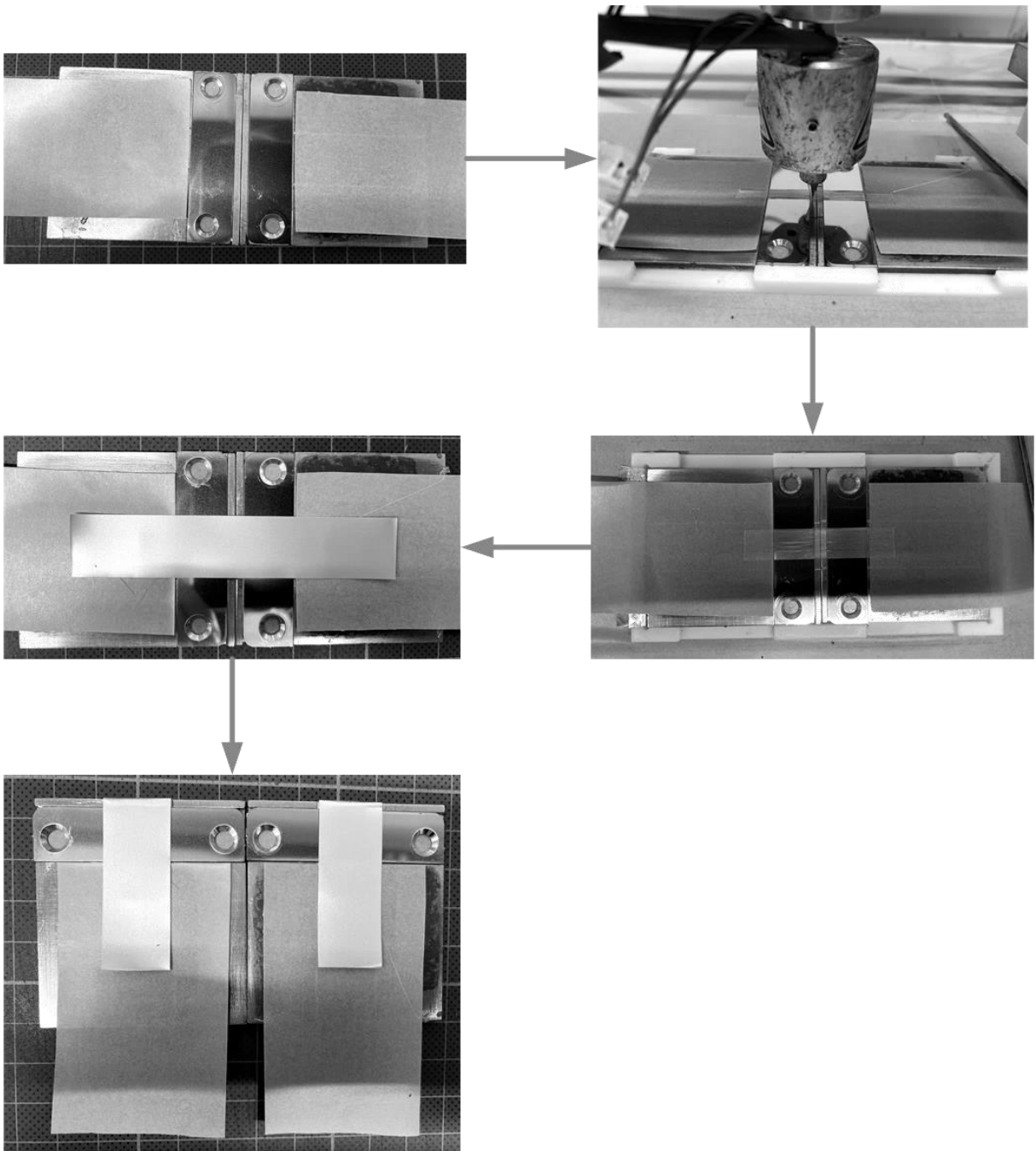


Abbildung 17 Ablauf der Mikroschwerweg-Probenfertigung

## 4.1.2 Prüfmethode

Das Mikroscherweg-Prüfgerät fährt ein vorprogrammiertes Testprogramm ab. Bei der Prüfung handelt es sich immer um eine zweifache Bestimmung.

Das angehängte Prüfgewicht wurde am Anfang der Versuchsreihe experimentell ermittelt und auf 50g festgelegt. Größere Gewichte sorgen für ein frühzeitiges Versagen der Proben, welche diese für die Auswertung unbrauchbar machen. Die Gewichte belasten beim Absenken des hydraulischen Tisches die mit Rändelmuttern befestigten Proben für 15 Minuten und ziehen die Aluminiumstreifen nach unten. Die Festigkeit der Klebverbindung steht dabei in direkter Relation zur Verzugsstrecke. Nach 15 Minuten werden die Proben für weitere 15 Minuten entlastet. Die Verzugsstrecke wird mit Messtastern über die Zeit aufgenommen. In Abbildung 18 ist der Prüfaufbau dargestellt. Aus der Differenz zwischen der Position nach 15 Minuten und nach 30 Minuten kann die Elastizität der Klebmasse ermittelt werden. Das Prüfprogramm zeichnet den zurückgelegten Weg der Messtaster über die Zeit auf. Dabei entsteht ein wie in Abbildung 19 gezeigter Weg-Zeit-Verlauf. Jede Probe bekommt ihren eigenen Graphen.

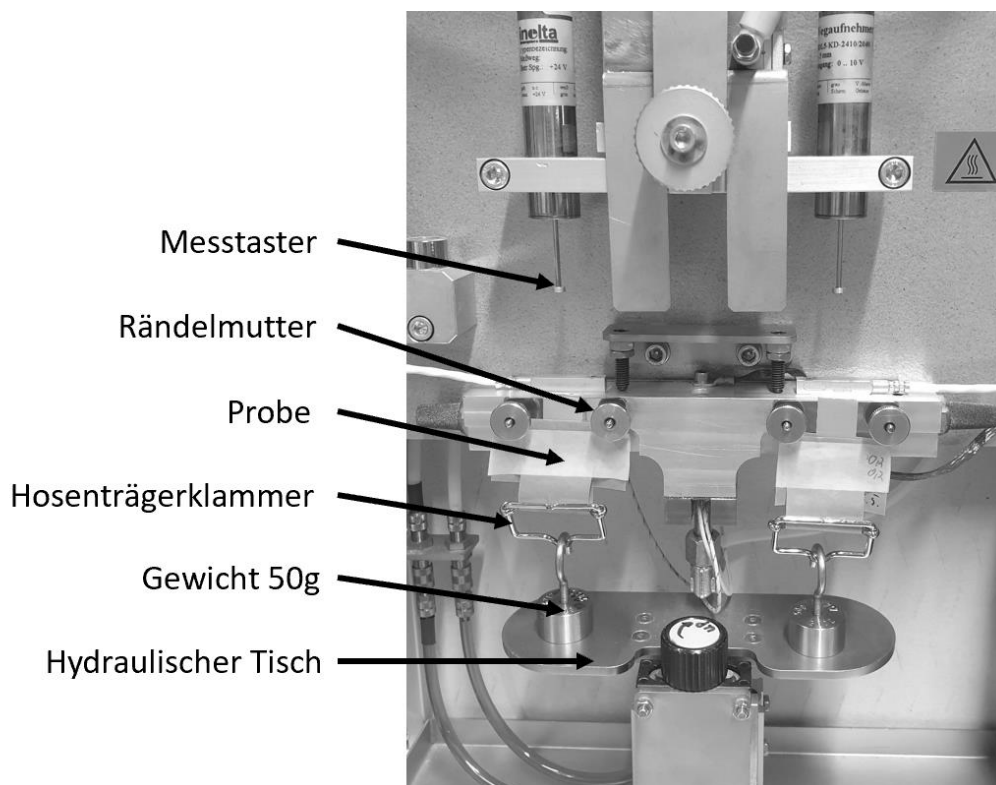


Abbildung 18 Mikroscherweg-Prüfstation

### 4.1.3 Auswertung

Für die Auswertung der Mikroscherweg-Prüfresultate bilden Graphen, wie in Abbildung 19 gezeigt, die Grundlage. Aus diesen lassen sich die maximalen und die minimalen Scherwege ablesen. Für jede Materialprobe, bestehend aus zwei Proben, wird der Mittelwert der maximalen und der minimalen Scherwege gebildet. Diese Mittelwerte werden für die Elastizitätsberechnung und die weitere Auswertung verwendet.

Die Elastizität des Klebstoffs lässt sich nach Formel (1) berechnen. Um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit der Klebverbindung und den Vernetzungsfortschritt treffen zu können, ist es wichtig, die maximale Auslenkung wie auch die Elastizität zu betrachten. Die erlaubte Auslenkung einer Klebverbindung hängt vom kundendefinierten Anwendungsfall ab. Beispielsweise sollen Bilder, die an der Wand hängen und durch ihr Eigengewicht eine Belastung auf eine Klebverbindung zwischen Wand und Bild aufbringen, nicht herunterrutschen. Die Klebverbindung soll folglich nicht elastisch sein, sondern das Eigengewicht des Bildes ohne ein Auslenken tragen.

Anders verhält es sich bei der Verbindung einer Windschutzscheibe mit der Karosserie eines Autos. Die Klebverbindung erfüllt dabei zwei Funktionen. Zum einen wird die Windschutzscheibe fest mit der Karosserie verbunden, sodass sie beim Fahren nicht herausfällt. Zum anderen ist die Klebverbindung ausreichend elastisch, um während des Fahrbetriebs auftretende Belastungen und Verschiebungen zu kompensieren und den Scheibenbruch zu verhindern.[12]

$$\text{Elastizität} = \frac{\text{Maximum} - \text{Minimum}}{\text{Maximum}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

#### 4 Prüfverfahren

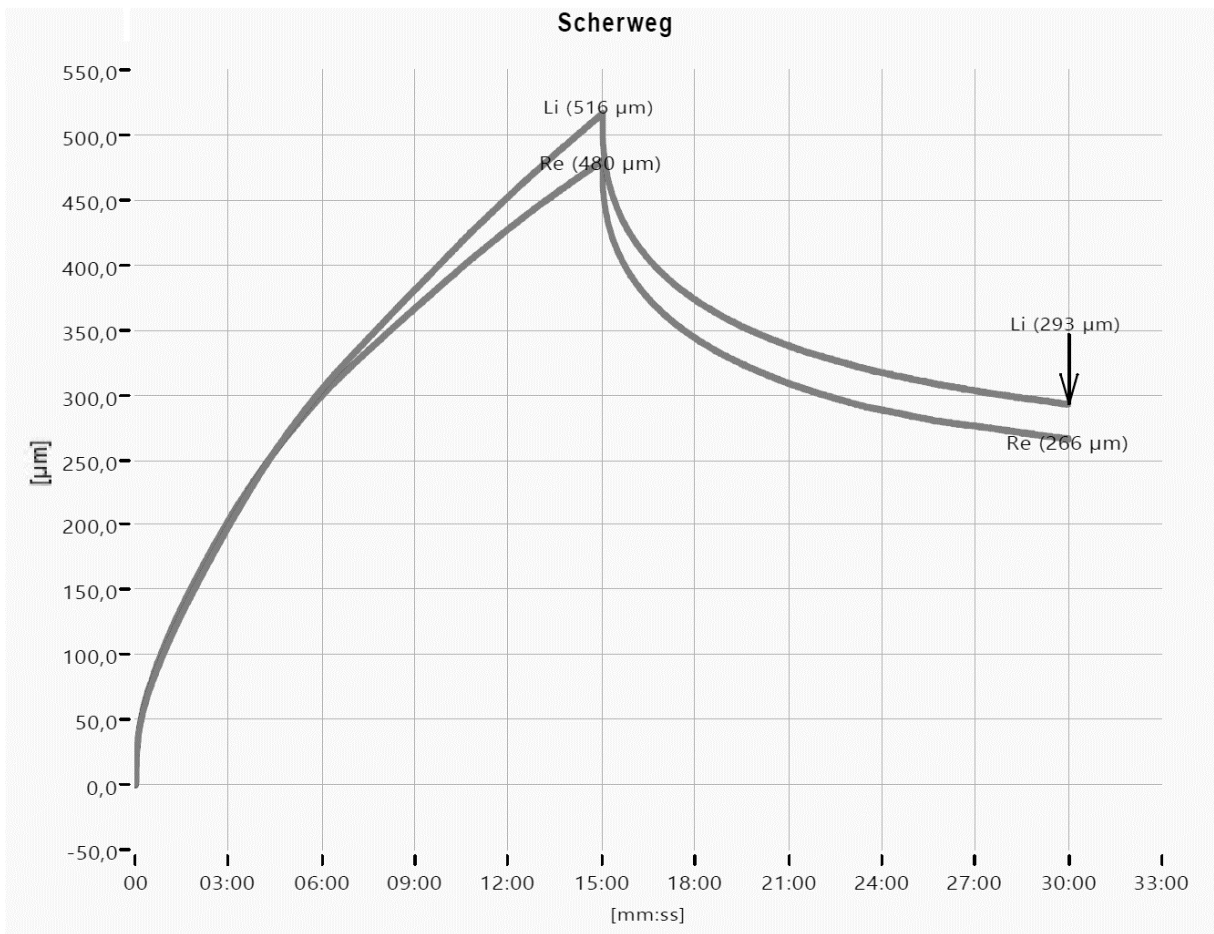


Abbildung 19 Beispielhafter Weg-Zeit-Verlauf eines Mikroscherweg-Versuchs



## 4.2 Push-Out-Prüfung

Die Push-Out-Prüfung wurde entwickelt, um die Eignung von doppelseitigen Klebebändern für die Displayverklebung zu testen. Simuliert wird hierbei eine Teilbelastung, wie sie beim Herunterfallen oder Biegen eines Mobiltelefons auftreten kann. Für die Übertragung auf das Fertigungsverfahren der additiven Fertigung wird die im Anhang A.1 hinterlegte Prüfnorm modifiziert angewendet.

Die in dieser Arbeit verwendeten Rezepturen werden nicht in der Industrie verwendet. Deshalb dienen die Messungen nur als Ergänzung zur Mikroscherweg-Prüfung und sollen keine Produktperformance bestimmen.

Im Folgenden werden die Herstellung der Probe, die Prüfmethode und die Auswertung der Messergebnisse ausgeführt.

### 4.2.1 Herstellung der Proben

Die Probe besteht laut der Standardprüfvorschrift aus einem Polycarbonat(PC)-Rahmen, einem PC-Fenster und einer rahmenförmigen Verklebung (siehe Abbildung 20). Die Abmaße des Rahmens betragen, wie in Anhang A.1 beschrieben, außen 45x45mm und innen 25x25mm. Das Fenster hat eine Größe von 35x35mm. Wenn ein Kunde die Klebmasse für die Verklebung von anderen Materialien verwenden möchte, ist es durchaus möglich, das Rahmen- und Fenstermaterial an individuelle Bedürfnisse anzupassen.

Der aufgetragene Klebrahmen wird nicht, wie in der Prüfnorm gefordert, gelasert oder gestanzt, sondern direkt auf den Rahmen gedruckt. Um einen über alle Muster vergleichbaren Anpressdruck zu gewährleisten, wird das Fenster direkt nach dem Druck mit einer Kraft von 4,9N für 30 Sekunden bei Raumtemperatur belastet. Die Klebeverbindung der Vergleichsprobe wird aus einem mit der gleichen Klebmasse hergestellten Klebeband gelasert und die Verklebung, wie in der Prüfnorm im Anhang A.1 beschrieben, durchgeführt. Um eine vollständige Benetzung der Klebflächen zu gewährleisten, muss die Probe mit einer definierten Last von 300N für 5 Sekunden zusammengedrückt werden. Um die maximale Wirksamkeit der Klebeverbindung sicherzustellen, muss die Probe nun bei 23°C und 50% Luftfeuchtigkeit für mindestens 24 Stunden gelagert werden. Danach ist sie bereit für den Test. Die Verklebungskraft der konventionellen Vergleichsprobe ist höher, weil der Klebstoff bis zur Verklebung Zeit hat sich zu vernetzen. Die 3D-gedruckte Probe wird mit dem noch unvernetzten Klebstoff direkt mit dem Fenster verpresst. Dabei würde bei einer höheren Kraft die Klebestruktur beschädigt werden. Um ein gewisses Vernetzungsniveau zu garantieren, liegen diese bis zur Prüfung mindestens 40 Tage bei 70°C im Wärmeschrank.

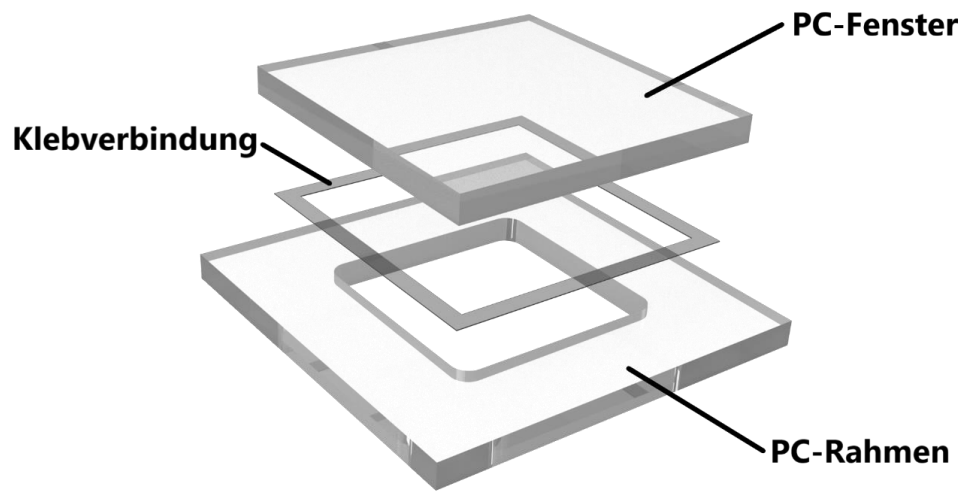


Abbildung 20 Push-Out-Probe

Zur Fixierung des zu bedruckenden PC-Fensters auf der Druckplatte werden mit doppelseitigem Klebeband Befestigungsecken auf das Druckbett geklebt (siehe Abbildung 21). Der PC-Rahmen kann zwischen die Ecken gelegt und in der Ebene fixiert werden.

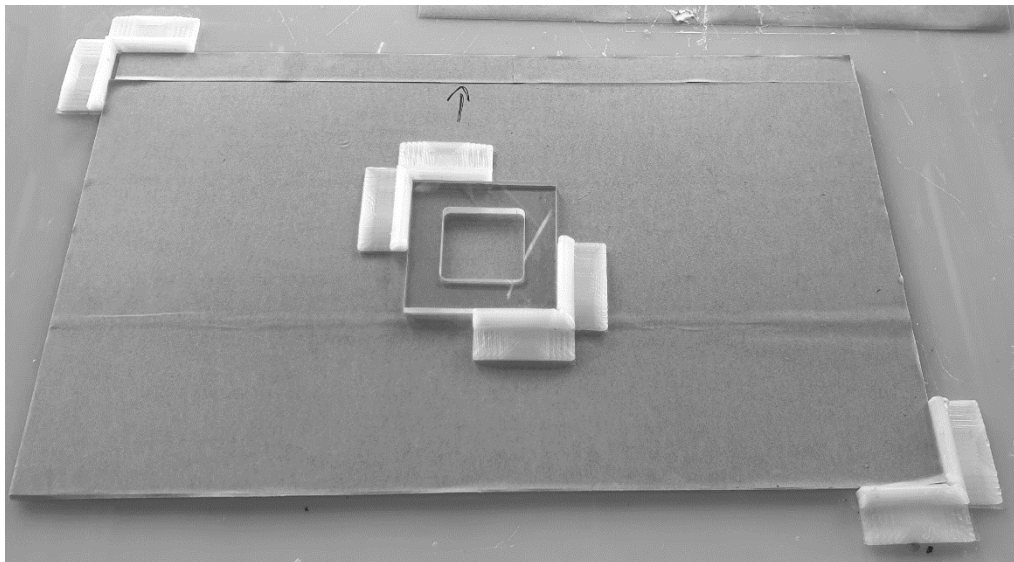


Abbildung 21 Push-Out-Prüfung der Druckplatte

## 4.2.2 Prüfmethode

Die Prüfapparatur besteht, wie in Abbildung 22 dargestellt, aus einem Stempel mit Kraftaufnehmer, der Probe und einem Probenhalter. Die Probe wird mit dem Fenster nach unten gerichtet in den Probenhalter gelegt. Der Rahmen wird dabei durch den Probenhalter in der Z-Richtung blockiert. Bei der Prüfung drückt der Stempel das Fenster der Probe mit einer definierten Geschwindigkeit von 10 mm/min nach unten. Die auf diese Weise aufgebrachte Belastung wird als zentrische Zugbelastung bezeichnet.[5] Die Zugbelastung ist zentrisch, wenn der Kraftangriffspunkt im Schwerpunkt der Klebfläche ist. Gemessen wird die Kraft in Abhängigkeit des Weges. Die Prüfung wird beendet, sobald der gemessene Kraftwert 20% unter dem zuvor gemessenen maximalen Kraftwert sinkt. Der Kraftaufnehmer nimmt dabei die gesamte zum Erhalt der vorgeschriebenen Geschwindigkeit wirkende Kraft auf.

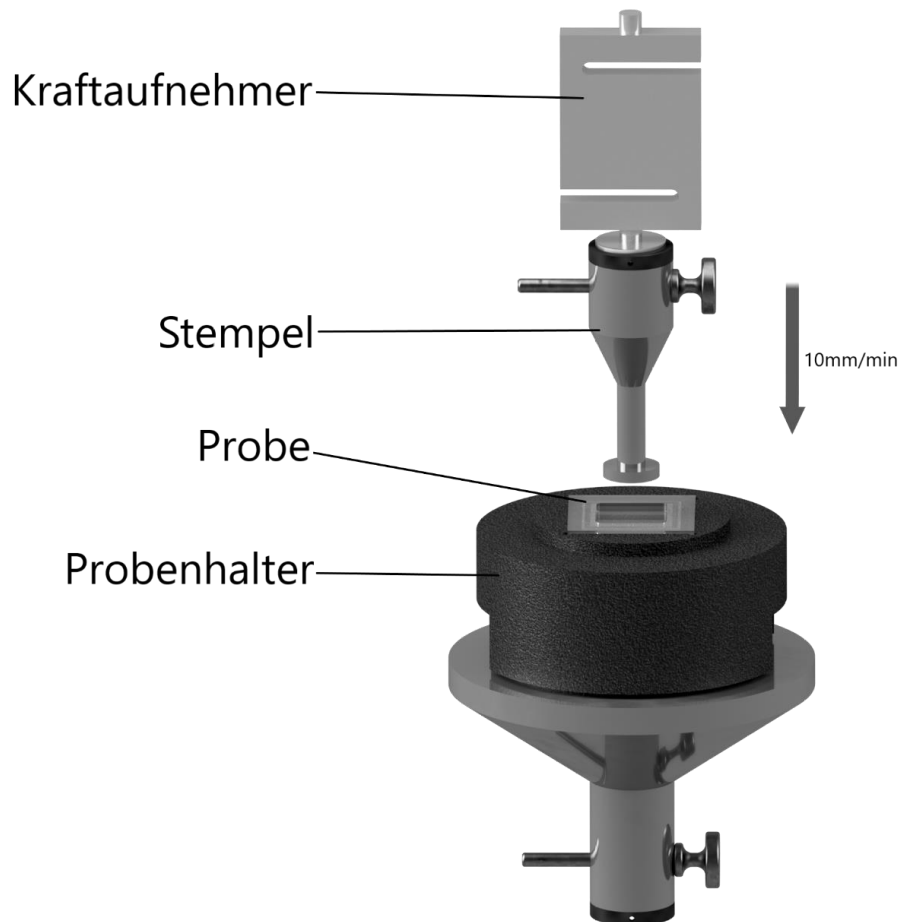


Abbildung 22 Aufbau des Push-Out-Prüfstands

### 4.2.3 Auswertung

Die Auswertung basiert auf dem aufgenommenen Kraft-Weg-Diagramm. Ein typischer Verlauf ist in Abbildung 23 exemplarisch dargestellt. Die Prüfvorschrift fordert das Aufnehmen der maximal ermittelten Kraft und der Energie, die von der Verklebung aufgenommen wird. Jedoch versagt eine Klebverbindung bereits nach Auftreten des ersten Kraftmaximums, weshalb in dieser Arbeit nur die erste Spitze betrachtet und die Energie vernachlässigt wird.

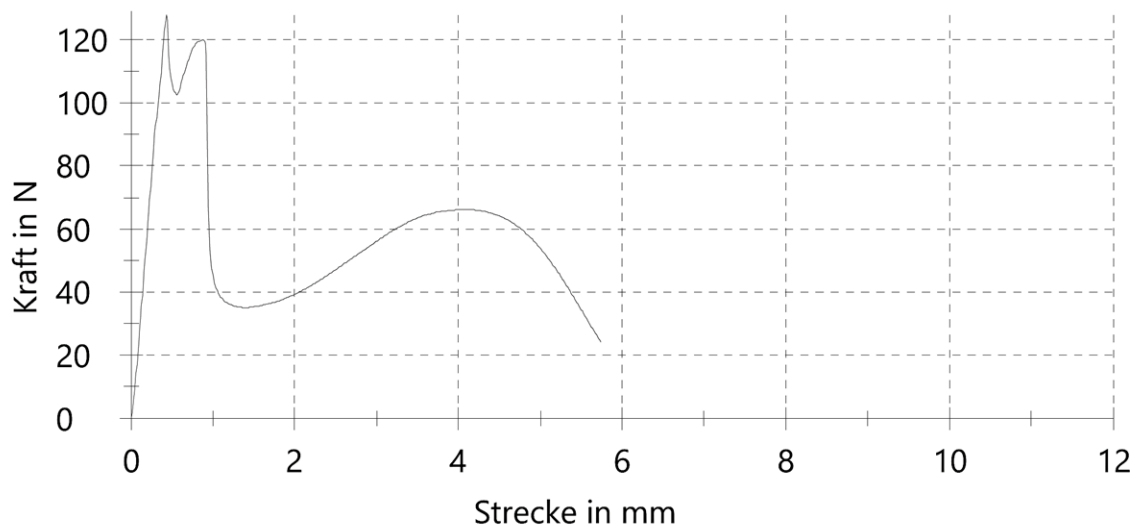


Abbildung 23 Kraft-Weg-Diagramm

## 4.3 Dickenmessung

### 4.3.1 3D-Mikroskopie

Das 3D-Profilometer VR-2000 der Firma Keyence wird für die Überprüfung der Druckqualität und Erstellung eines Höhenprofils anhand von Opferproben verwendet.

Von besonderem Interesse ist die Homogenität der Klebstofflinien, deren Breite, Höhe und Abstand zueinander.

Die Messtechnik funktioniert mit dem Lichtschnittverfahren, welches durch reflektierende Lichtstreifen Höhenunterschiede mithilfe von Triangulation ermittelt. [13]

Das System funktioniert nicht zuverlässig bei durchsichtigen Proben, weshalb diese mit Kreidespray vorbereitet werden müssen. Das Besprühen mit Kreidespray macht die Proben für weitere Belastungstest unbrauchbar. Aus diesem Grund wird das 3D-Profilometer nur für die Versuchsvorbereitung und die Bestimmung der Druckqualität während des Einstellens des Druckers verwendet.

### 4.3.2 Messtaster

Der Messtaster ist das wichtigste Werkzeug für die Schichtdickenüberwachung. Es erlaubt stichprobenartig eine gemittelte Schichtdicke der Ausdrücke zu ermitteln. Ein Nachteil dieses Messgerätes ist, dass es mit einem Stempel auf die gedruckte Schicht drückt und eine erste Kraft auf die Klebeschicht ausübt. Dies kann bei weichen Klebmassen zu einer Verformung der Klebfläche führen und das spätere Prüfergebnis verfälschen.

## 5 Versuchsdurchführung

---

In diesem Kapitel wird die Reaktionskinetik der untersuchten Klebmassen ermittelt.

Die Klebkraft der Acrylatklebmassen wird mit der Vernetzer- und Beschleunigerkonzentration eingestellt. Diese reagieren, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, untereinander und mit der Grundmasse, dem AHT68, und vernetzen diese. Der Beschleuniger ist für die Vernetzungsgeschwindigkeit verantwortlich und der Vernetzer für den maximalen Vernetzungsgrad. Es ist darauf zu achten, dass die Konzentrationen der hinzugefügten Additive weder zu hoch noch zu gering sein dürfen. Bei einer zu geringen Konzentration entwickeln die Klebmassen eine nicht ausreichende Klebkraft. Bei einer zu hohen Konzentration verlacken die Klebmassen und verlieren ihre Klebkraft.

## 5.1 Versuchsplanung

Für die Versuche in dieser Arbeit wird Acrylatklebmasse mit 18 verschiedenen Zusatzstoffkombinationen benötigt. Diese sind in der Klebstoffherstellung bekannte Materialien und werden gemäß üblichen Konzentrationen, die der Tabelle 1 als Massenanteile zu entnehmen sind, vermengt. Ausschlaggebend bei der Materialauswahl ist die Vernetzungszeit nach dem Zusammenführen von Vernetzer und Beschleuniger und ob eine Vorvernetzung in den Kartuschen vorkommt. Um Letzteres auszuschließen, wurden vor der Klebmassenproduktion Knetversuche mit verschiedenen Massensystemen vorgenommen. Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass im Rahmen dieser Arbeit entweder die Beschleuniger Methyldiethanolamin (MDEA) oder Dimethylethanolamin (DMAE) in Kombination mit dem Vernetzer 3-Glycidylpropyltriethoxysilan (GLYEO) verwendet werden soll.

	<b>MDEA oder DMAE</b>
<b>AHT68 + 0,2% GLYEO</b>	0,2%
	0,4%
	0,6%
<b>AHT68 + 0,4% GLYEO</b>	0,2%
	0,4%
	0,6%
<b>AHT68 + 0,6% GLYEO</b>	0,2%
	0,4%
	0,6%

Tabelle 1 Materialkombinationen von AHT68 mit GLYEO als Vernetzer und MDEA oder DMAE als Beschleuniger in Massenanteilen angegeben



Die ausgewählten Materialien wurden bisher noch nicht für den 3D-Druck eingesetzt, weshalb die Möglichkeit gegeben ist, dass einige Materialkombinationen nicht mit dem gegebenen Versuchsaufbau verarbeitbar sind. Aus diesem Grund wird bei den Versuchen zuerst die Materialkombination mit der geringsten Vernetzer- und Beschleunigerkonzentration untersucht. Dies ist die Kombination von GLYEO mit einem Massenanteil von 0,2% und DMAE mit einem Massenanteil von ebenfalls 0,2 % (abgekürzte Schreibweise: GLYEO 0,2% + DMAE 0,2%). In der Theorie weist diese Zusammensetzung die geringste Vernetzungsgeschwindigkeit auf. Eine langsame Vernetzung könnte vorteilhaft für den Druckprozess sein. Anschließend werden schrittweise zuerst die Beschleunigerkonzentrationen und danach die Vernetzerkonzentrationen erhöht. Demnach folgt die Mischung GLYEO 0,2% + DMAE 0,4% und GLYEO 0,2% + DMAE 0,6%. Die Reihe setzt sich, wie oben beschrieben, mit höher werdenden GLYEO-Konzentrationen fort.

Die Vernetzungsreaktion mit MDEA als Beschleuniger findet schon innerhalb des Druckkopfes statt, weshalb Materialkombinationen mit MDEA den Druckkopf verstopfen und mit dem verwendeten Versuchsaufbau nicht verdruckt werden können. Damit ist die Herstellung von Probenkörper mit diesem Material nicht möglich und es entfällt aus der Versuchsreihe.

Das Hauptaugenmerk liegt auf Proben mit einem möglichst hohen Vernetzer- und Beschleunigeranteil. Außerdem soll eine gute Verdruckbarkeit gegeben sein. Deshalb wird sich auf die Kombination mit dem Vernetzer GLYEO 0,4% mit dem Beschleuniger DMAE 0,4% konzentriert. Materialkombinationen die höhere Additivkonzentrationen beinhalten, vernetzen bereits im Druckkopf und weisen einen unregelmäßigen Materialfluss auf, sind folglich ungeeignet für den verwendeten Versuchsaufbau. Denkbar wird der Einsatz solcher Massen mit einem schnelleren Druckprozess, wo durch die höhere Druckgeschwindigkeit die Verweilzeiten im Mischer minimiert werden. Kombinationen, die niedrigere Additivkonzentrationen beinhalten, lassen sich gut verdrucken, besitzen aber eine niedrigere Klebperformance. Die nicht priorisierten Kombinationen werden stichprobenartig nach 42 Tagen Reifezeit bei 70°C Lagertemperatur untersucht und der Vernetzungsfortschritt mit den übrigen Proben verglichen. Die priorisierte Materialkombination wird in engen Zeitabschnitten überwacht.

Für die Versuchsplanung und Messergebniskatalogisierung wird eine Excel-Tabelle genutzt, die die Materialkombination, das Herstellungsdatum, die geplante Lagerzeit, die Lagertemperatur und das Prüfdatum beinhaltet. Für die Bestimmung der Reaktionskinetik und der Vermischungsgüte werden die in Kapitel 4.1 beschriebene Mikroscherweg-Prüfung sowie die in Kapitel 4.2 beschriebene Push-Out-Prüfung verwendet. Beide Verfahren sind bei Tesa etabliert und lassen sich an die additive Fertigung anpassen.

Die Verarbeitungstemperatur der verwendeten Grundmasse, dem AHT68, liegt bei 120°C. Ein Kriterium für die gute Verdruckbarkeit des Materials ist ein gutes Extrusionsverhalten bei dieser Temperatur. Angestrebt ist ein gleichmäßiger und sauberer Materialfluss. Das Material soll nicht bei dem Austritt an der Düse haften bleiben, sondern gleichmäßig und ohne Blasenbildung austreten.

Die Vernetzungsgeschwindigkeit der Massen nähert sich bei der herkömmlichen Verarbeitung asymptotisch an das Endniveau an. Dies kann bis zu 56 Tage dauern. Da die Vernetzungsgeschwindigkeit bei einer Verarbeitung im verwendeten Druckkopf unbekannt ist, werden Proben über einen Zeitraum von 56 Tagen periodisch untersucht. Die Vernetzungsreaktion kann durch eine Lagertemperaturerhöhung beschleunigt werden. Typische Lagertemperaturen in der Chemieindustrie sind 35°C und 70°C. Der realistische Anwendungsfall jedoch ist die Lagerung bei Raumtemperatur. Deshalb werden die in dieser Arbeit hergestellten Proben bei Raumtemperatur und bei 70°C eingelagert.

## 5.2 Darstellung der Ergebnisse Mikroscherweg-Prüfung

Zur Bestimmung der Reaktionskinetik von GLYEO 0,4% + DMAE 0,4% werden über einen Zeitraum von 14 Tagen täglich, und nach 42 und 56 Tagen Mikroscherweg-Proben vermessen. Aus der Vorerfahrung heraus ist bekannt, dass sich die Masse innerhalb von wenigen Wochen vernetzt. Da dieser Vorgang zunächst sehr schnell stattfindet, wurde für die ersten 14 Tage täglich eine Probe vermessen. Danach lässt die Reaktionsgeschwindigkeit nach und es kann nach einer längeren Zeitspanne der Vernetzungsgrad und Endzustand der Vernetzung überprüft werden.

In Abbildung 24 und Abbildung 25 sind die Vernetzungskurven von der oben genannten Mischung bei Einlagerungstemperaturen von 70°C und bei Raumtemperatur zu sehen. Dargestellt sind die maximale Auslenkungsdistanz und die Elastizität über die Zeit.

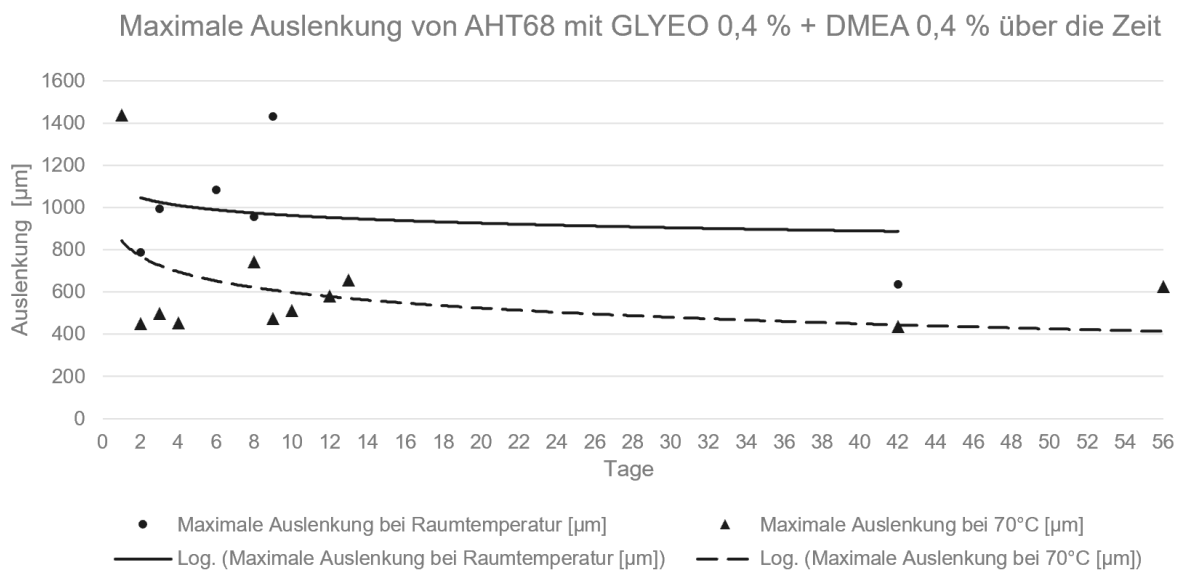


Abbildung 24 Maximale Auslenkung von AHT68 mit GLYEO 0,4% + DMAE 0,4% über die Zeit

Für die Interpolation der Punktwolken in Abbildung 24 und Abbildung 25 können logarithmische Funktionen vom folgenden Typen verwendet werden.

$$y = a \cdot \ln(t) + b \quad (2)$$

Dabei ergibt sich für die in Abbildung 24 bei Raumtemperatur gelagerten Proben die Funktion

$$y_{\text{max. Auslenkung,RT}} = -52,4 \cdot \ln(t) + 1083 \quad (3)$$

und für die bei 70°C gelagerten Proben die Funktion

$$y_{\text{max. Auslenkung,70°C}} = -106,9 \cdot \ln(t) + 844,21 \quad (4)$$

Bei der Betrachtung beider Funktionen fällt auf, dass die Steigung, und damit die Vernetzungsgeschwindigkeit für die bei 70°C gelagerten Proben, doppelt so hoch ist wie für die bei Raumtemperatur gelagerten Proben.

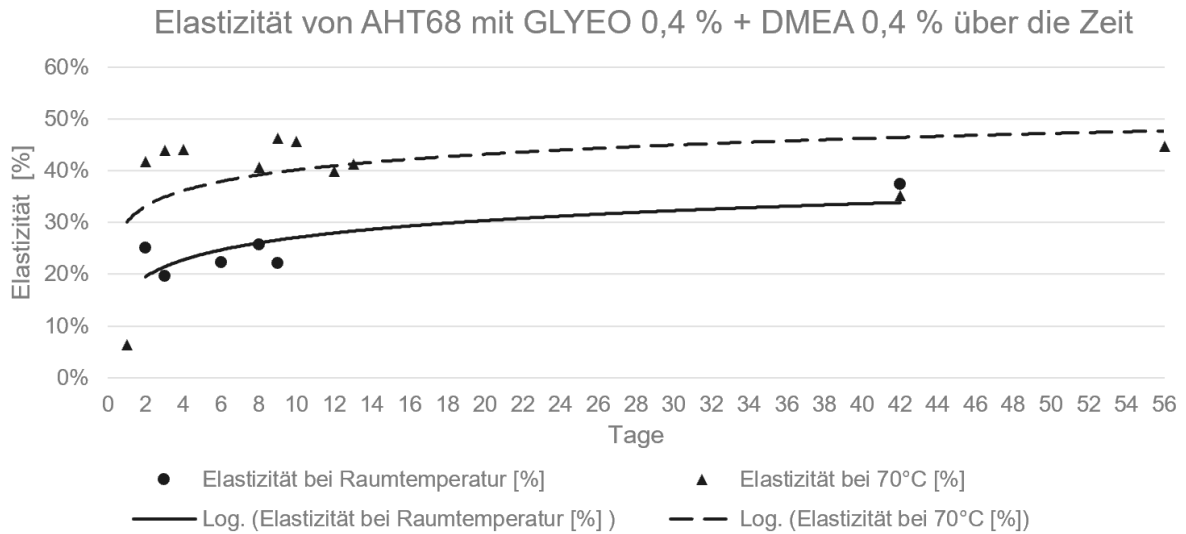


Abbildung 25 Elastizität von AHT68 mit GLYEO 0,4% + DMAE 0,4% über die Zeit

Die in Abbildung 25 gezeigte Elastizität nimmt in den ersten drei Tagen deutlich zu und nähert sich einem Maximum, erreicht es jedoch nicht. Proben, die bei 70°C gelagert werden, weisen eine höhere Elastizität auf als die, die bei Raumtemperatur gelagerten werden. Hier wird ebenfalls ersichtlich, dass die höhere Temperatur für eine Reaktionsbeschleunigung sorgt. Zudem bietet die Elastizitätskurve für 70°C einen Ausblick auf die erreichbare Elastizität bei 20°C. Anhand der Elastizitätskurven ist ebenfalls zu sehen, dass nach 42 Tagen der Vernetzungsfortschritt der bei Raumtemperatur gelagerten Proben immer noch nicht das Niveau der bei 70°C gelagerten Proben erreicht. Die Betrachtung der dazugehörigen logarithmischen Funktionen in Gleichung (5) und (6) verdeutlicht das fast zweifach höhere Elastizitätsniveau bei 70°C im Vergleich zu den Ergebnissen bei Raumtemperatur. Die Funktion (5) beschreibt die Elastizitätsentwicklung bei einer Einlagerungstemperatur von 70°C und die Funktion (6) bei einer Einlagerung bei Raumtemperatur.

$$y_{\text{Elastizität},70^{\circ}\text{C}} = 0,0437 \cdot \ln(t) + 0,3009 \quad (5)$$

$$y_{\text{Elastizität},RT} = 0,047 \cdot \ln(t) + 0,1627 \quad (6)$$

Der Vergleich der beiden Vorfaktoren in Gleichung (5) und (6) zeigt, dass der zeitliche Verlauf der Elastizität bei beiden Lagertemperaturen nahezu identisch ist. Nur am Anfang gibt es bei der 70°C - Lagerung einen größeren Sprung in der Elastizitätsentwicklung als bei der Lagerung bei 20°C, welcher in dem betrachteten Zeitraum nicht mehr aufgeholt wird.

Zusammenfassend kann innerhalb der ersten drei Tage eine schnelle Vernetzung festgestellt werden. Dies liegt an den vielen offenen Vernetzungsstellen im Material. Danach reduziert sich die Vernetzungsgeschwindigkeit merklich. Nach den als Grenze festgelegten 56 Tagen werden aufgrund der langsamen Vernetzungsgeschwindigkeit keine weiteren Proben vermessen. Aus diesen Beobachtungen kann eine erste Belastungsempfehlung nach 3 Tagen Vernetzungszeit ausgesprochen werden.

Die Abbildung 26 zeigt die Elastizität von allen geprüften Proben nach 42 und 56 Tagen. Die gepunktet dargestellten Proben wurden bei Raumtemperatur und die mit Linien dargestellten bei 70°C gelagert. Die Trendlinien zeigen eindeutig, dass die Elastizität, und damit der Vernetzungsgrad, mit erhöhter Beschleuniger- und Vernetzerkonzentration zunimmt. Die Lücken im Diagramm entstehen durch aus der Versuchsreihe herausgenommene oder nicht durchgeführte Messungen. Diese sind für die Trenderkennung nicht essenziell und verfälschen aus diesem Grund nicht das Ergebnis.

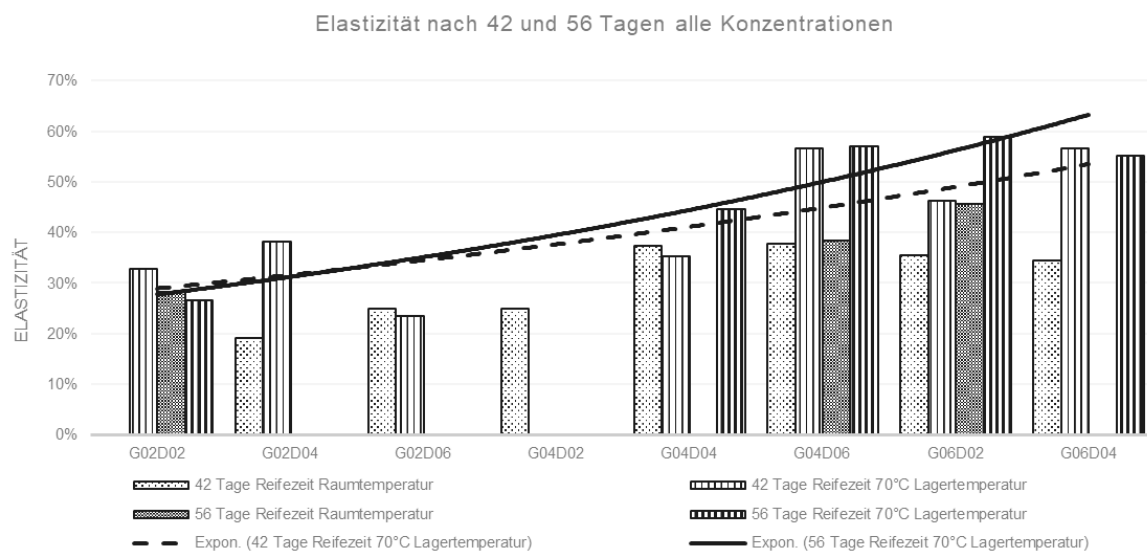


Abbildung 26 Elastizität nach 42 und 56 Tagen

In Abbildung 27 sind die Ergebnisse der Mikroscherweg-Prüfung für die Materialkombination G02D02 zu sehen. Die bedruckten Proben, hier in der Mitte und rechts dargestellt, lagerten 42 und 56 Tage bei der im Diagramm angegebenen Temperatur. Links ist das Testergebnis der konventionell gefertigten Vergleichsprobe zu sehen. Gut zu erkennen ist, dass die Auslenkungsdistanz der konventionell gefertigten Proben höher als die der gedruckten Proben ist. Damit sind die bei Raumtemperatur als auch die bei 70°C gelagerten gedruckten Proben widerstandsfähiger gegen Scherung als die konventionell gefertigte Probe.

Diese Erkenntnis bestätigt die Untersuchungsergebnisse von vorangegangenen Arbeiten.

Die geringere Auslenkungsdistanz der gedruckten Proben kann darauf zurückgeführt werden, dass diese mit noch warmer Klebmasse gefügt werden und es deshalb zu einer besseren Oberflächenbenetzung kommt.

Der Auslenkungsunterschied zwischen den gedruckten Proben ist durch die unterschiedlichen Lagertemperaturen zu erklären. Die höhere Temperatur beschleunigt die Vernetzungsreaktion und verringert so die Scherweite der Probe.

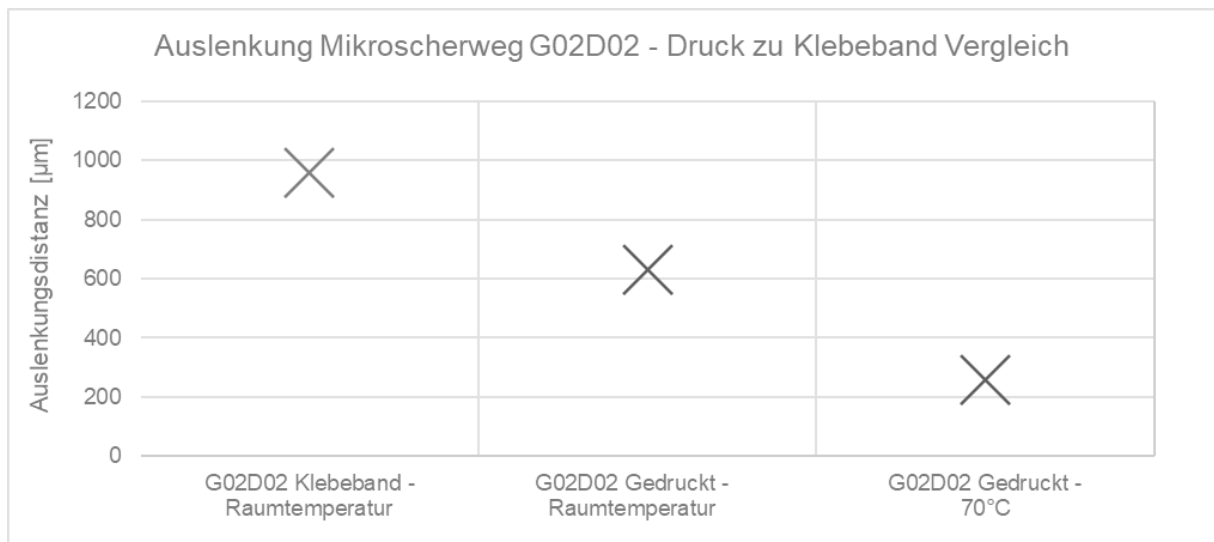


Abbildung 27 Vergleich der Auslenkungsdistanz von Druck und Klebeband

Similäre Vergleiche mit Massen mit höheren Beschleuniger- und Vernetzeranteilen sind nicht möglich, da sich diese nicht beschichten lassen. Das heißt, dass die Herstellung eines klassischen Klebebandes mit diesen Materialkombinationen nicht umsetzbar ist. Daraus erschließt sich ein weiterer Anwendungsfall für die Verarbeitung der Klebmasse mittels additiver Fertigung. Nun können Klebmassen verarbeitet werden, welche vorher durch technologische Grenzen bei der Beschichtung nicht verarbeitbar waren. Möglich wird dies durch die kurze Verweilzeit zwischen der Vermengung der Klebmasse mit den Additiven und dem Auftragen auf der Geometrie. Bei der klassischen Beschichtung werden die Additive vorher vermengt und danach aufgetragen. Für die Auftragung auf dem Massenträger, dem Liner, wird die vermengte Masse bei der konventionellen Beschichtung zwischen zwei Walzen gelegt und langsam von den Walzen auf den Liner gefördert. Während der Lagerzeit auf den Walzen, bis zum Klebmassenauftrag auf den Träger, vernetzt sich die Klebmasse bereits. Aus diesem Grund ist die Verweilzeit für Materialkombinationen mit höheren Additivkonzentrationen zu hoch und die Verarbeitung mit herkömmlichen Mitteln nicht möglich.



### 5.3 Darstellung der Ergebnisse Push-Out-Prüfung

In Abbildung 28 sind die gemittelten Ergebnisse der Push-Out-Prüfungen aller geprüften Massenkombinationen abgebildet. Die Push-Out-Prüfung ermittelt eine Kraft in Newton. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die Formstabilität der Klebmasse nach dem Druck nicht ausreichend ist, um dem Eigengewicht des Fensters der Push-Out-Probe bei einer Lagertemperatur von 70°C standzuhalten. Die Masse zerfließt unter dem Gewicht des Fensters und erhöht dadurch die Kontaktfläche zwischen Klebmasse, Fenster und Rahmen. Die durch diesen Effekt verursachten größeren Kontaktflächen sorgen dafür, dass die aufgebrachte Kraft nicht mehr einer vorgegebenen Klebefläche entgegensteht und die Probe deshalb mehr Kraft aufnehmen kann. Aus diesem Grund wird von jeder gemessenen Probe die Benetzungsfläche ermittelt und die aufgebrachte Kraft als Kraft pro Fläche angegeben.

Auffällig ist der starke Abfall der nötigen Kraft pro Fläche ab der Massenkombination G04D04. Da es sich dabei um Massen mit höheren Vernetzer- und Beschleunigerkonzentrationen handelt, sollte der Druck ansteigen und nicht abfallen.

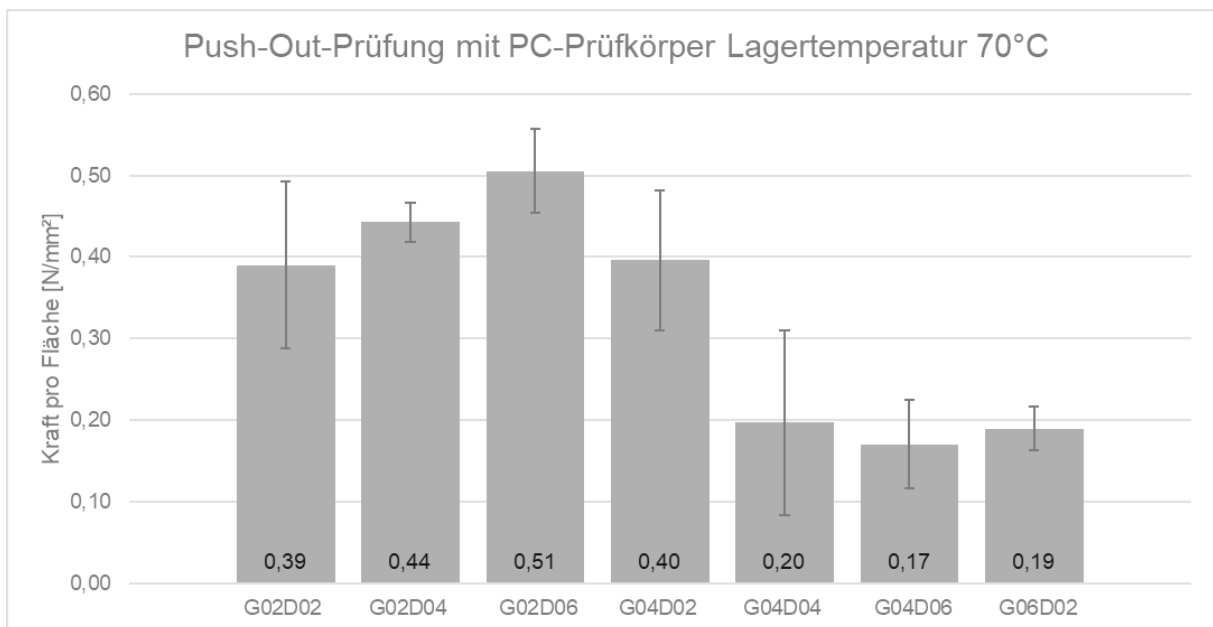


Abbildung 28 Mittelwert aus der Push-Out-Prüfung mit PC-Platten

Um auszuschließen, dass chemischen Komponenten mit den PC-Platten reagieren, wird die Push-Out-Prüfung für G04D04 mit Stahlplatten wiederholt. Die Stahlplatten sind kleiner als die PC-Platten, sodass die aufgedruckten Klebflächen sehr präzise mit den Fenstern verklebt werden müssen. Obwohl festgestellt wurde, dass die Klebmasse bei einer Lagertemperatur von 70°C verläuft, werden bei der Wiederholung mit Stahlkörpern die Proben wieder bei 70°C eingelagert. Dies dient der Vergleichbarkeit und soll die Anzahl der geänderten Variablen begrenzen. Um Proben vermessen zu können, deren Klebmasse nicht verläuft, werden einige zusätzlich bei 35°C gelagert. Diese vernetzen zwar langsamer, behalten aber ihre Form bei und sind deshalb anwendungsbezogener. Die eingelagerten Proben werden nach einer Lagerzeit von 42 Tagen vermessen.

In Abbildung 29 ist das Ergebnis dieser wiederholten Prüfung zu sehen. Auffällig ist, dass alle auf Stahlplatten gedruckten Proben, einen deutlich höheren Druck aufnehmen als die rechts dargestellten PC-Proben. Zudem versagt die Klebverbindung adhäsiv. Ein adhäsives Versagensbild resultiert aus einer fortgeschrittenen Vernetzung der Klebmasse und ist an einer rückstandslosen Trennung der Klebschicht von dem Füge teil zu erkennen. Die auf PC-Platten gedruckten Probenkörper weisen ein kohäsives Versagensbild auf. Dabei dehnt sich die Klebeschicht sichtbar stark, und der Bruch ereignet sich innerhalb der Klebeschicht und nicht auf der Kontaktfläche zwischen Klebeschicht und Füge teil. Somit bleiben Klebreste auf beiden Füge teilen zurück. [5]

Diese Dehnung tritt insbesondere bei nicht vollständig vernetzten Massen auf und kann nur durch den Mangel von GLYEO oder DMAE erklärt werden. Da alle G04D04-Proben mit derselben Masse gefertigt sind, ist ein Fehlen der benötigten Komponente in der Ausgangsmasse auszuschließen. Dies legt die Vermutung nahe, dass bei den PC-Platten eine Klebmassenkomponente mit dem Polycarbonat reagiert. Damit sind die in Abbildung 28 dargestellten Ergebnisse nicht für die Beschreibung der absoluten Klebkraft geeignet. Allerdings unterliegen alle Proben demselben Effekt und können für einen Vergleich untereinander genutzt werden. Die Erklärung dieses Effektes ist für ein vollständiges Verständnis noch nicht weit genug untersucht und bedarf weiterer Forschung.

## 5 Versuchsdurchführung

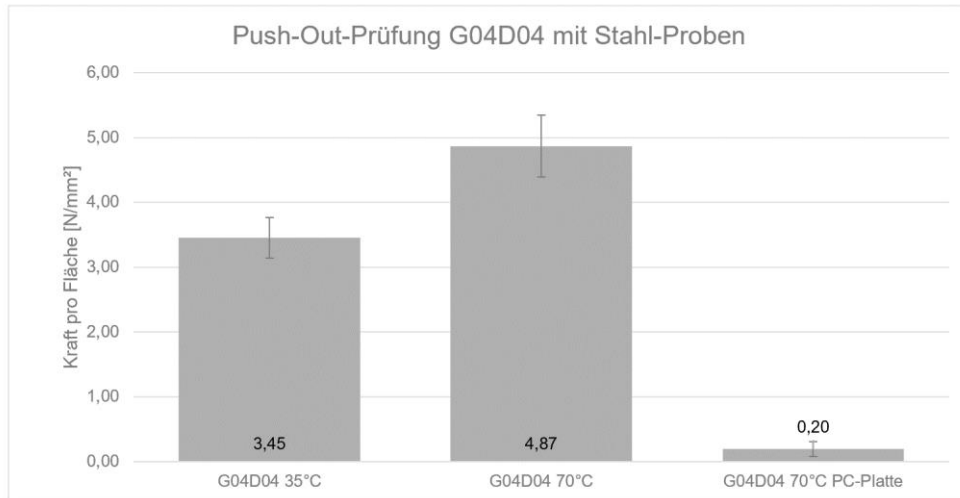


Abbildung 29 Push-Out-Prüfung von G04D04 mit Stahl-Proben

In Abbildung 30 wird die bedruckte Probe mit der konventionell als Klebeband gefertigten Probe verglichen. Auffällig ist, dass die konventionell gefertigte Probe ebenfalls einen sehr niedrigen Wert aufweist und kohäsiv versagt. Dies deutet darauf hin, dass die Rezeptur nicht für die Verwendung mit Polycarbonat geeignet ist. Der Vergleich zeigt, dass es kein Problem der additiven Fertigung, sondern der Körper- und Klebmassenmaterialkombination ist.

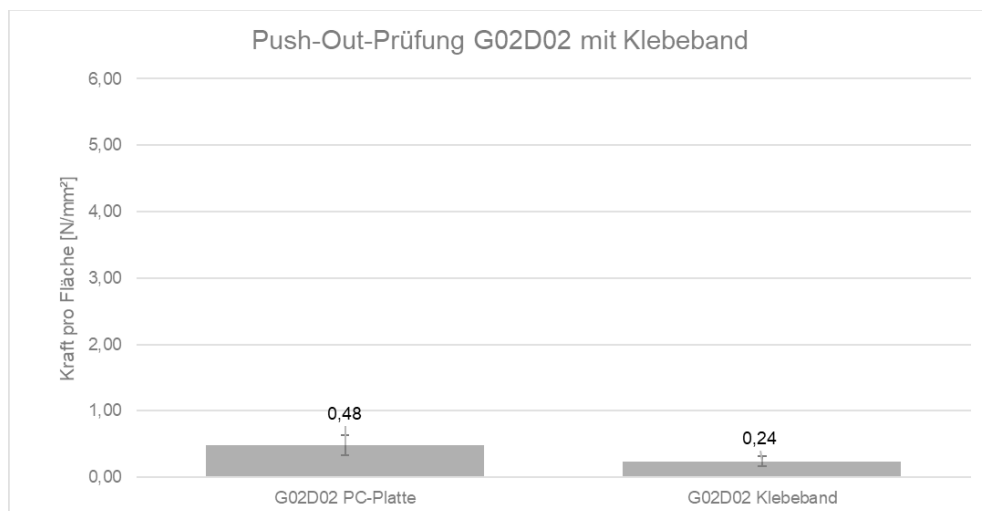


Abbildung 30 Push-Out-Prüfung G02D02 Klebeband

## 6 Diskussion und Vorgehensempfehlung

---

In dieser Arbeit wurde die Verdruckbarkeit, die Reaktionskinetik sowie die Vermischungsgüte von zwei Komponentensystemen untersucht. Dabei ist herausgekommen, dass nicht alle Klebmassensysteme für die additive Fertigung geeignet sind, es aber signifikante Vorteile gegenüber der klassischen Verarbeitung gibt. So ist zum Beispiel eine traditionelle Klebebandherstellung bei der Materialkombination DMAE und GLYEO mit einem Massenanteil von über 0,2% aufgrund einer zu schnellen Vernetzungsreaktion nicht möglich. Die Verarbeitung mittels des MEX-Verfahrens jedoch funktioniert. Dies ist durch die geringe Verweilzeit der vermischten Klebmasse vor dem Aufbringen auf die Geometrie gegeben. Für die klassische Klebebandproduktion wird die vermischte Masse zwischen zwei Walzen geführt, von wo aus die Masse erst langsam auf den Liner übertragen wird. Während dieses Verarbeitungsschrittes wird der Klebmasse Zeit gegeben sich zu vernetzen. Bei einer zu langen Verweilzeit schreitet die Vernetzung so weit fort, dass ein Auftragen auf den Liner nicht mehr möglich ist. Dieser Übertragungsprozess kann aufgrund von physikalischen Grenzen nur bis zu einem bestimmten Punkt beschleunigt werden. Bei der additiven Fertigung entfällt dieser Schritt, was die Verarbeitung solcher Massen ermöglicht. Daraus können sich potentiell neue Anwendungsfälle und Produktideen ergeben.

Durch das Aufteilen der Klebmassenkomponenten in zwei Kartuschen und dem späteren Zusammenführen im statischen Mischer ist eine höhere Vermischungsgüte zu erreichen. Dies erschließt sich in Hinblick auf die gesamte Prozesskette. So werden bei der konventionellen Fertigung von Acrylatklebmassen in der Regel der Vernetzer und der Beschleuniger zeitgleich dem Basismaterial hinzugegeben und vermischt. Dies hat den Effekt, dass beide Additive noch vor Erreichen einer optimalen Verteilung in der Grundmasse miteinander reagieren. Dadurch kann es zu Inhomogenitäten und einer vorzeitigen Vernetzung kommen. Dies ist bei einer zunächst getrennten Vermengung der Additive mit dem Grundmaterial auszuschließen. Dadurch können sich die Additive im Grundmaterial gleichmäßig und ohne zu vernetzen verteilen. Erst im statischen Mischer treffen diese anschließend aufeinander und werden dort vermischt. Deshalb ist der Vermischungsaufwand geringer und die Gesamtstrecke, die die Klebmasse im Mischer verweilt, größer. Durch diese Maßnahme ist eine homogenere Verteilung in der Gesamtmasse zu erreichen. Bestätigt wird dies durch den festgestellten Trend der stärkeren Vernetzung bei steigender Additivkonzentration. Dieser wäre nicht zu beobachten, wenn die Vermischungshomogenität nicht ausreicht. Durch Inhomogenitäten in der Masse würde es stärkere Abweichungen in den Proben untereinander geben und eine klare Aussage in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Additivkonzentration und Vernetzungsgrad nicht möglich sein.

Die additive Verarbeitung von Klebmassen hat neben der Performancesteigerung auch noch den Nebeneffekt, dass der Liner des Klebebandes entfällt und Abfall beim vorher nötigen Ausstanzen des Klebebandes nicht mehr anfällt. Dadurch fallen in der Industrie teure Stanzanlagen weg. Zudem hat die werkzeuglose Verarbeitung von Klebmassen den Vorteil, dass zügig innerhalb einer Fertigungsanlage das zu fügende Bauteil gewechselt werden kann, ohne dass ein neues Werkzeug gekauft werden muss. Dies reduziert Anlagenstillstandzeiten und spart der Firma Kosten. Ein weiterer Verarbeitungsvorteil kann das automatisierte Auftragen von Klebmasse auf einer 3D-Geometrie sein. Dadurch sind komplett neue Baugruppengestaltungen und, in Kombination mit einem 3D-Scanner, der Inline-Ausgleich von Toleranzen denkbar.

Ein Nachteil der additiven Verarbeitung von Klebmasse ist die Verarbeitungszeit. Das Drucken einer Klebverbindung dauert länger als das Kleben mittels eines klassischen Klebebandes. Bei diesem findet die Beschichtung und die Einlagerung für die Vernetzung bereits beim Hersteller statt. Viele Anwendungsbereiche, vor allem diejenigen, bei der hohe Stückzahlen in einer sehr kurzen Zeit hergestellt werden müssen, sind für die Anwendung der 3D-Drucktechnologie noch nicht geeignet. Interessant ist die Technologie für die Herstellung von Prototypen und kleinen bis mittelgroßen Bauteilserien, wie sie in der Luxusgüterindustrie oder der Luft- und Raumfahrt vorkommen.

Zukünftig ist die Produktion von hohen Stückzahlen durch schnellere Druckverfahren und den Einsatz von multiplen, parallel laufenden Druckern denkbar. Dafür bedarf es weitere Forschung im Bereich der Klebmassenentwicklung und der Verarbeitungssysteme.

Vorstellbar ist auch, anstelle eines klassischen 3D-Druckers einen Roboterarm als Führungssystem für den Druckkopf zu verwenden. Dieser hätte den Vorteil, dass er im Raum frei platzierbar ist und beispielsweise Autotüren bedrucken kann. Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von Einkomponenten-Massensystemen, deren Vernetzungsreaktion durch UV-Strahlung oder Luftfeuchtigkeit initiiert wird. Diese hätten den Vorteil, dass keine Vernetzung innerhalb des Druckkopfes stattfinden kann und die Vernetzungszeiten potenziell verkürzt werden.

## 7 Literaturverzeichnis

---

- [1] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, *Agenda 2030*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmz.de/de/agenda-2030> (Zugriff am: 8. September 2021).
- [2] *EPO - Additive Fertigung*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.epo.org/news-events/in-focus/future-of-manufacturing\\_de.html](https://www.epo.org/news-events/in-focus/future-of-manufacturing_de.html) (Zugriff am: 8. September 2021).
- [3] Frank Virus, Persönliche Mitteilung vom 20.10.2021.
- [4] *DIN EN 923 Klebstoffe - Benennung und Definition*.
- [5] G. Habenicht, *Kleben*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [6] Dr. Bastian Wedel, „Short Overview ACX Cross Linking“, 13. Okt. 2021.
- [7] A. H. Fritz, *Fertigungstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [8] J. Ilg, *Systematische Eignungsanalyse Zum Einsatz Additiver Fertigungsverfahren: Anwendung Am Beispiel der Medizintechnik*. Wiesbaden: Gabler, 2019. [Online]. Verfügbar unter:  
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5622541>
- [9] 3Ddimensionals, *Neu bei uns: German RepRap X400 PRO V3 Dual-Extruder 3D-Drucker - Einführungsangebot*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3dimensionals.de/news-blog/neu-bei-uns-german-reprap-x400-pro-v3-dual-extruder-3d-drucker-einfuehrungsangebot> (Zugriff am: 28. August 2021).
- [10] *Stoffgemische in Chemie | Schülerlexikon | Lernhelfer*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie/artikel/stoffgemische> (Zugriff am: 4. September 2021).
- [11] K. Schiebold, *Zerstörende Werkstoffprüfung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [12] Industrieverband Klebstoffe e.V., *Geklebt hält besser - Kleben fürs Leben - Das Online Magazin*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klebstoffe.com/geklebt-haelt-besser/> (Zugriff am: 5. September 2021).
- [13] Milo Alexander Korf, „Qualifizierung von Synthesekautschukklebmassen für die Additive Fertigung: Entwicklung und Definition eines stabilen Prozessbereiches“. Bachelorarbeit.

## A. Anhang

---

### A.1. Mikroscherweg-Prüfmethode



## A.2. Push-Out-Prüfmethode