

Universität Stuttgart



SE Kunststoffverarbeitung GmbH & Co. KG | SE-K  
Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart | IKT  
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen,  
Universität Stuttgart | ISW

# „UpFiL“ - Upcycling-Filamente aus Thermoformproduktionsabfällen

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 35597/01-21/2 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Thorsten Eymael (SE-K)  
Timo Reindl (IKT)  
Martin Wolf (ISW)

Langenargen & Stuttgart - April 2024



# Inhalt

<b>Bildverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Vorhabensdurchführung und Ergebnisse</b> .....	<b>9</b>
2.1 3D-Druckversuche auf ebene Geometrien mit Recyclingfilament .....	9
2.1.1 Upcycling von Thermoform-Produktionsabfällen .....	9
2.1.2 Druckversuche .....	14
2.2 Entwicklung der Versuchsgeometrie für den Hinterdruckprozess und Übertragbarkeit auf andere Werkstoffe .....	16
2.2.1 Werkzeugbau und Thermoformung .....	16
2.2.2 Werkstoffbetrachtung .....	17
2.3 Abstandssensorik und Druckkopftechnologie .....	21
2.3.1 Druckkopf und Extruder .....	21
2.3.2 Abstandssensorik .....	22
2.3.3 Extrudervorsteuerung .....	24
2.3.4 Lokale Temperierung .....	25
2.3.5 Funktionsintegration Druckkopf .....	28
2.4 Aufbau einer Produktionszelle und Skalierung auf ein seriennahes Demonstratorbauteil .....	29
2.4.1 Aufbau mit einem KR360 und einem KR20 .....	30
2.4.2 Steuerungsarchitektur der Produktionszelle .....	32
2.4.3 Funktionselemente und Bahnplanung für das Hinterdrucken .....	34
2.4.4 Skalierung auf seriennahes Demonstratorbauteil .....	36
<b>3 Fazit und Ausblick</b> .....	<b>37</b>
<b>4 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>39</b>

## Bildverzeichnis

Bild 1:	Upcycling-Filamente aus den Randzuschnitten des Thermoformprozesses, die dort als Produktionsabfall anfallen .....	8
Bild 2:	ABS-Schüttgüter: Mahlgut, zerkleinertes Mahlgut und Neuware.....	10
Bild 3:	Größenverteilung der ABS-Schüttgüter .....	11
Bild 4:	Mikroskopieaufnahmen der Neuware und des Mahlguts je 5x vergrößert.....	12
Bild 5:	Viskositätskurven in Abhängigkeit von der Tropfengröße und vom Kautschukgehalt.....	12
Bild 6:	Schematische Darstellung der zur Filamentherstellung eingesetzten Anlagentechnik.....	13
Bild 7:	Zwei Schneckenvarianten: Drei-Zonen-Schnecke und Schnecke mit Misch- und Wendelscherteil .....	14
Bild 8:	Demonstratorbauteil mit unterschiedlichen Funktionselementen sowie Prüfstrukturen.....	14
Bild 9:	Konventionelle Produktionsweise eines technischen Thermoformbauteils und Gewichtseinsparung durch 3D-Inline-Hinterdrucken von Funktionselementen mit Upcyclingfilament.....	16
Bild 10:	Entwickelte dünnwandige Versuchsgeometrie mit Rippenstruktur und Funktionselementen .....	17
Bild 11:	Rheologische Untersuchung unterschiedlicher ABS-Proben bei 240 °C und 5 % Dehnung .....	18
Bild 12:	Ovale Versuchsgeometrie zur mechanischen Analyse mit schematischen Zugprüfkörpern zur Bestimmung der interlaminaeren Festigkeit und intralaminaeren Festigkeit .....	18
Bild 13:	Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Extrusionskräfte mithilfe einer Wägezelle .....	19
Bild 14:	Axialkräfte bei der Extrusion von ABS Filament mit unterschiedlichem Rezyklatanteil.....	20
Bild 15:	Prototyp eines schmalen Druckkopfes für das Bedrucken von Thermoformbauteilen .....	21
Bild 16:	Finales Druckkopfdesign mit optimierten Komponenten .....	22
Bild 17:	Prototyp zur Erprobung verschiedener Sensorstellungen (Höhe und Winkel anpassbar) .....	22
Bild 18:	Invertiertes Bernoulli-Modell für die Extrudervorsteuerung .....	24
Bild 19:	Einzelspuren mit Vorschubgeschwindigkeit zwischen 800 mm/min – 6.000 mm/min ; Herkömmlicher, direkt gesteuerter Prozess und vorgesteuerter Prozess.....	25
Bild 20:	Kritische erste Grenzschicht zwischen Thermoformbauteil und additiv gefertigter Struktur.....	26

Bild 21:	Additive Fertigung ohne thermische Aktivierung, mit lokaler thermischer Aktivierung und mit beheiztem Bauraum bzw. nachgelagerter Warmlagerung.....	26
Bild 22:	FEM-Analyse der Prüfgeometrie zur Charakterisierung der Haftfestigkeit von additiv gefertigten Strukturen auf Thermoformbauteilen .....	27
Bild 23:	Haftfestigkeit von additiv gefertigten Prüfgeometrien auf Thermoforms substraten .....	27
Bild 24:	Gesamtaufbau des entwickelten Endeffektors .....	28
Bild 25:	Arbeitsraumanalyse der Roboterzelle .....	29
Bild 26:	Singuläre Stellungen des eingesetzten Kuka KR20 für die Achsen 2 und 3 (Ellenbogen- und Schulter singularität).....	29
Bild 27:	Rendering des Anlagenkonzepts zum 3D-Inline-Hinterdrucken .....	30
Bild 28:	Schaltkasten mit Steuerungshardware für die Druckkopfansteuerung .....	31
Bild 29:	Prototypischer Aufbau mit einem KR360 .....	31
Bild 30:	Finaler Aufbau der Produktionszelle mit einem KR20 während der Fertigung einer Testgeometrie aus biobasiertem PLA .....	32
Bild 31:	Kommunikation der Steuerungskomponenten .....	33
Bild 32:	Umgesetzte Steuerungsarchitektur der Produktionszelle.....	34
Bild 33:	Funktionselemente wie Rippenstrukturen und Schraubdome während des Drucks mit optimierten Druckstrategien .....	35
Bild 34:	Bahnplanung auf gekrümmten Bauteiloberflächen mit Siemens NX .....	35
Bild 35:	Produktionszelle bei der Fertigung einer Rippenstruktur aus ABS-Upcyclingfilament auf ein gekrümmtes ABS-Thermoformbauteil .....	36

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:Optimiertes Temperaturprofil des Extruders bei der Filamentherstellung von ABS.....	13
---	----

## Symbolverzeichnis

### Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$T_g$	°C	Glasübergangstemperatur
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte

### Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
CNC	Computerized Numerical Control
FFF	Fused Filament Fabrication
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point
PC	Polycarbonat
PC-ABS	Blend aus Polycarbonat und Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PLA	Polylactid

## Zusammenfassung

Das UpFilt-Projekt (Az: 35597/01-21/2) hat die Rückführung von Verschnittresten aus dem Thermoform-Prozess in die Fertigung höherwertiger Produkte zum Gegenstand – das sogenannte Upcycling. Das Gesamtprojektziel sieht den Einsatz von Produktionsabfällen am selben Bauteil vor. Dies wird durch zwei wesentliche Projektbestandteile erreicht: Erstens die qualitativ hochwertige und reproduzierbare Wiederaufbereitung von Thermoformverschnitt beim verarbeitenden Unternehmen. Zweitens, die Entwicklung des 3D-Inline-Hinterdruckverfahrens mit Schwerpunkt auf die Prozessgüte.

Angestrebt wird mit dem Verfahren vorrangig eine Reduktion des Abfalls, eine Reduktion des Gesamtenergiebedarfs und die Erhöhung der möglichen Formgebungsvielfalt und Bauteilkomplexität, bei gleichzeitiger Homogenisierung des eingesetzten Materials. Insbesondere der letztgenannte Punkt hat langfristig positive Auswirkung durch die wesentliche Verbesserung der Rezyklierbarkeit am Ende des Produktlebenszyklus. Durch die höhere Formgebungsfreiheit wird das Thermoformen bei kleinen Losgrößen darüber hinaus zu einer Alternative für das Spritzgießverfahren.

Diese Ziele werden durch zwei wesentliche Entwicklungen erreicht. Zuerst wird ein zuverlässiges Verfahren zum Upcycling von Kunststoffabfällen zu Kunststofffilament entwickelt, das sich für die Verwendung im Fused-Filament-Fabrication (FFF)-Verfahren eignet. Die Entwicklung des Materials umfasst dabei nicht nur die Methodik zur reproduzierbaren Wiederaufbereitung des Verschnittmaterials, sondern auch eine umfangreiche, rheologische und mechanische Charakterisierung der damit hergestellten Filamente.

Den zweiten wesentlichen Baustein bildet das innovative 3D-Druckverfahren, welches es ermöglicht, Funktionselemente, wie Versteifungsrippen oder Schnappverbindungen direkt an die Rückseite des Bauteils anzudrucken, also das Bauteil zu hinterdrucken. Für dieses Ziel wird das Verfahren des mehrachsigen FFF-3D-Drucks erweitert, so dass es möglich wird, die weitgehend freiförmig gekrümmte Rückseite des Thermoformbauteils in hoher struktureller Qualität zu bedrucken. Dies ist nach aktuellem Stand der Technik oftmals nur durch aufwändige, manuelle Klebprozesse möglich, die zudem die Materialvielfalt im Bauteil erhöhen und damit die Rezyklierbarkeit beeinträchtigen. Zur Verbesserung der Prozessgüte und -zuverlässigkeit werden hier neue Verfahren zur Regelung des Düsenabstands zum Bauteil und des Druckkopfverhaltens sowie ein Oberflächenaktivierungsverfahren entwickelt und in eine prototypische Demonstrationsanlage integriert.

Der vorliegende Abschlussbericht gibt einen Überblick über die durchgeführten Untersuchungen und Entwicklungen sowie die erzielten Ergebnisse. Auf deren Basis werden zudem Empfehlungen und ein Ausblick für Weiterentwicklungen und zukünftige Vorhaben gegeben.

# 1 Einleitung

Durch Bevölkerungswachstum und steigende Lebensstandards nimmt die weltweite Nutzung von fossilen Rohstoffen zur Herstellung von Kunststoffen immer weiter zu. Für viele technische Anwendungen sind Kunststoffe, unter anderem aufgrund ihrer sehr guten gewichts-spezifischen Materialeigenschaften, jetzt und auch in Zukunft unabdingbar. Hier können Kunststoffe ressourcenintensivere Werkstoffe ersetzen und bei einer gesamtheitlichen Ökobilanzierung zu einer Reduzierung des Ressourceneinsatzes beitragen. Um den Einsatz möglichst nachhaltig und ressourceneffizient zu gestalten, ist eine umfangreiche Kreislaufwirtschaft der Materialströme notwendig.

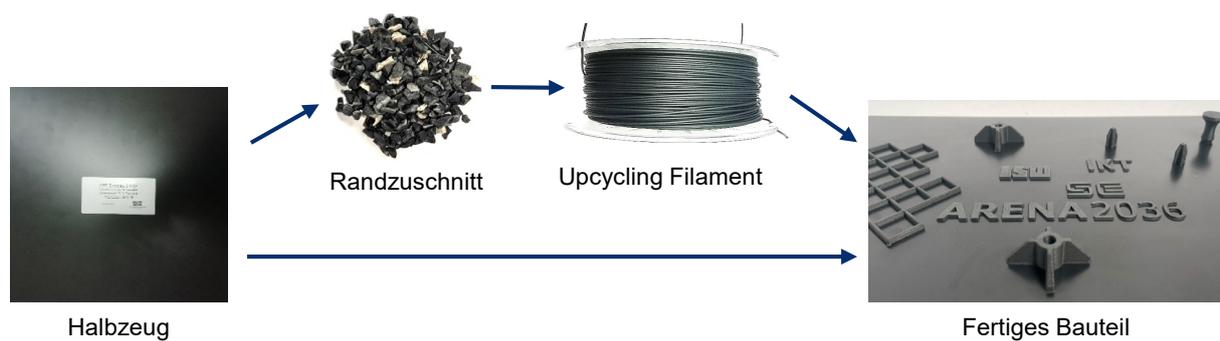


Bild 1: Upcycling-Filamente aus den Randzuschnitten des Thermoformprozesses, die dort als Produktionsabfall anfallen

Die Kunststoffindustrie verfolgt dementsprechend mehrere Ziele. Ein Fokus liegt auf der Realisierung geschlossener Werkstoffkreisläufe und eines hocheffizienten Werkstoffeinsatzes in den Verarbeitungsprozessen. Gleichzeitig steht auch die Funktionsintegration und Erweiterung der möglichen Formgebungsvielfalt im Vordergrund. So kann eine innovative Weiterentwicklung bestehender Verarbeitungs- und Fertigungsprozesse durch Funktionsintegration neben einer Verringerung des Ressourceneinsatzes auch das Anwendungsfeld der Bauteile erweitern. Dabei wird dem Hersteller eine Effizienzsteigerung ermöglicht, die es erlaubt, Kosten zu senken und Produkte zu wettbewerbsfähigeren Preisen anbieten zu können.

Das vorliegende Vorhaben hat daher die Untersuchung und Weiterentwicklung von Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozessen zum Gegenstand. Es werden geschlossene Werkstoffkreisläufe geschaffen. Gleichzeitig wird ein Mehrwert in der Formgebungsvielfalt und Anwendbarkeit der entstehenden Bauteile erreicht.

## **2 Vorhabensdurchführung und Ergebnisse**

### **2.1 3D-Druckversuche auf ebene Geometrien mit Recycling-filament**

Das Thermoformen zählt innerhalb der Kunststofftechnik zu einem der wichtigsten Verarbeitungsverfahren zur Produktion von großflächigen und schalenförmigen Bauteilen [Illig2016]. Durch die im Vergleich mit anderen Verfahren geringen Werkzeugkosten ist es auch für geringe Stückzahlen wirtschaftlich einsetzbar. Die Formgebung ist allerdings verfahrensbedingt, insbesondere bei Funktionselementen mit komplexen Formen und funktionsbedingten Hinterschneidungen, sehr eingeschränkt.

Daneben bietet die additive Fertigung eine werkzeuglose und in der Regel nachbearbeitungsfreie Möglichkeit zur Herstellung von Bauteilen in einem Schichtaufbau [Gibson2021]. In der Kunststoffverarbeitung gehört dabei die Technologie Fused-Filament-Fabrication (FFF) zu den weitverbreitetsten additiven Fertigungsverfahren.

Eine Verfahrenskombination aus Thermoformen und additiver Fertigung vereint für die Fertigung großflächiger und schalenartiger Bauteile eine kostengünstige Formgebung bei gleichzeitigem Zugewinn an Formgebungsvielfalt. Insbesondere bei kleinen Serien kann sie so eine wirtschaftliche Alternative zum Spritzgussprozess mit seinen hohen Werkzeugkosten darstellen.

Der Einsatz von Randzuschnitten aus dem Thermoformprozess zur Herstellung von Filamenten für das Bedrucken hat dabei mehrere Vorteile:

- Nutzung von prozessbedingt anfallenden Produktionsabfällen,
- wirtschaftliche Aufwertung des Materials zu einem hochwertigen Halbzeug,
- Vermeidung zusätzlicher Fügeprozesse wie bspw. Kleben,
- Homogenisierung der Materialzusammensetzung im Gesamtbauteil,
- verbesserte werkstoffliche Recycling-Fähigkeit am Ende des Produktlebens.

Durch die Aufbereitung der als Randzuschnitt anfallenden Produktionsabfälle entsteht ein geschlossener Wertstromprozess, in dem die Werkstoffe mittelbar wieder in den selben Prozess zurückgeführt werden, aus dem sie entstammen. Insbesondere die Homogenisierung des eingesetzten Materials hat langfristig positive Auswirkungen auf die Recyclingfähigkeit am Ende des Produktlebenszyklus.

#### **2.1.1 Upcycling von Thermoform-Produktionsabfällen**

Um die gesammelten Thermoform-Produktionsabfälle zu einem hochwertigen Upcycling-Filament zu verarbeiten, sind mehrere Aufbereitungsschritte notwendig. Im Folgenden wird auf einige wichtige Aspekte der Aufbereitung und Charakterisierung am Beispiel des in

technischen Thermoformbauteilen weit verbreiteten Werkstoffs Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) eingegangen.

### Partikelgrößenverteilung und Schüttdichte

Bild 2 zeigt qualitativ die Größenverhältnisse der unterschiedlichen ABS-Schüttgüter. Bei dem vorliegenden, unzerkleinerten Mahlgut handelt es sich um prozessbedingte Produktionsabfälle des Thermoformprozesses. Das ABS liegt hier als grob zerkleinerte Schüttung mit vielen unterschiedlichen, heterogenen Formen vor. Es ist klar ersichtlich, dass es zum zerkleinerten und homogenisierten Mahlgut einen großen Unterschied aufweist. Außerdem ist zu erkennen, dass das zerkleinerte Mahlgut subjektiv betrachtet ähnlich fein vorliegt wie die Neuware. Des Weiteren ist die unregelmäßige Form der Mahlgüter im Vergleich zur regelmäßigen zylindrischen Form der Neuware zu erkennen.



Bild 2: ABS-Schüttgüter: Mahlgut, zerkleinertes Mahlgut und Neuware

Wird die Partikelgrößenverteilung quantitativ dargestellt, sind die beschriebenen Unterschiede bzw. Analogien deutlich zu erkennen (vgl. Bild 3). Die Größenverteilung des Mahlguts unterscheidet sich wesentlich von den anderen beiden Varianten. So sind das zerkleinerte Mahlgut und die Neuware stark um die Siebgröße 2 mm verteilt, wobei die Neuware eine gleichmäßigere Form aufweist und dadurch dichter um diese Siebgröße verteilt ist. Außerdem ist zu erkennen, dass das Mahlgut keine Normalverteilung aufweist. Das zerkleinerte Mahlgut und die Neuware weisen dagegen eine Normalverteilungskurve auf.

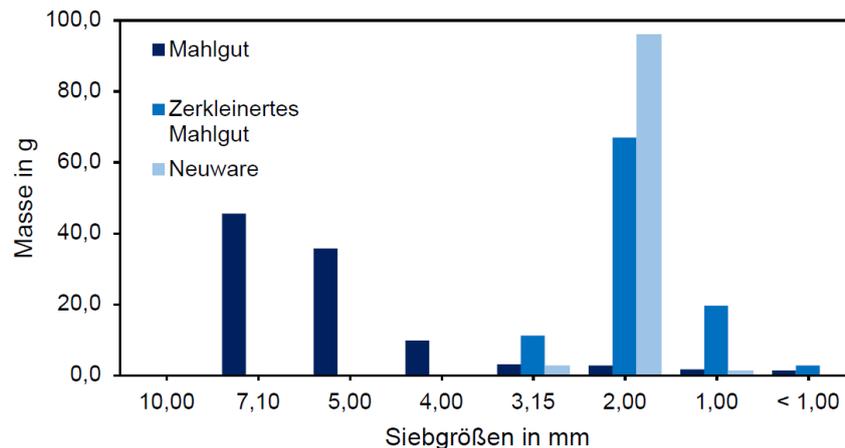


Bild 3: Größenverteilung der ABS-Schüttgüter

Wird die Partikelgrößenverteilung mit den Ergebnissen der Schüttdichte verglichen, wird der zunächst geringe Unterschied zwischen zerkleinertem Mahlglas und Neuware deutlich größer. So zeigt sich, dass die gleichmäßige Form der Neuware eine erhebliche Steigerung der Schüttdichte bewirkt. Außerdem ist der große Unterschied zwischen den Mahlgütern nicht mehr vorhanden. Der vorliegende, geringe Unterschied der Schüttdichte ist allerdings ausreichend, um einen stabilen Extrusionsprozess zu erreichen. Die Zerkleinerung und Homogenisierung der Mahlgüter stellt für die Zuführung und Verarbeitung im Extrusionsprozess einen essentiellen Schritt dar. Dennoch wirkt sich der Schüttdichtenunterschied zwischen Neuware zu Recyclingware von etwa  $0,25 \text{ g/cm}^3$  reduzierend auf den Durchsatz und damit auch reduzierend auf die Effizienz des Extrusionsprozesses aus.

### **Einfluss der Butadien-Tropfengrößen**

ABS-Kunststoffe zeichnen sich durch ein Zweiphasensystem aus. Dieses besteht aus einer Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN)-Matrix, in der Butadien-Acrylnitril-Kautschuk tropfenförmig eingelagert ist. Einer der wichtigsten Parameter für schlagzähe Kunststoffe ist die Tropfengröße dieser Weichphase. So gilt für ABS-Kunststoffe in der Literatur einen optimal anzustrebenden Kautschuk-Tropfendurchmesser zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $1,0 \mu\text{m}$  [Kämpf1972, Stabenow1973, Moore1973, Dillon1982]. Tropfendurchmesser von  $0,05 \mu\text{m}$  weisen beim Kerbschlagbiegeversuch nur eine geringe Energieaufnahme auf, wobei sie im Vergleich zu Tropfen mit einer mittleren Größe von  $0,5 \mu\text{m}$  im Zugversuch bei langsamer Belastung eine ähnlich gute Energieabsorption zeigen. Somit zeigt sich ein wesentlicher Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit in Bezug auf die Kautschuk-Tropfengröße. Darüber hinaus ist eine möglichst enge Tropfengrößenverteilung notwendig, um Spannungsspitzen zu vermeiden, was zu einem spröden Versagen führen kann [Michler1992].

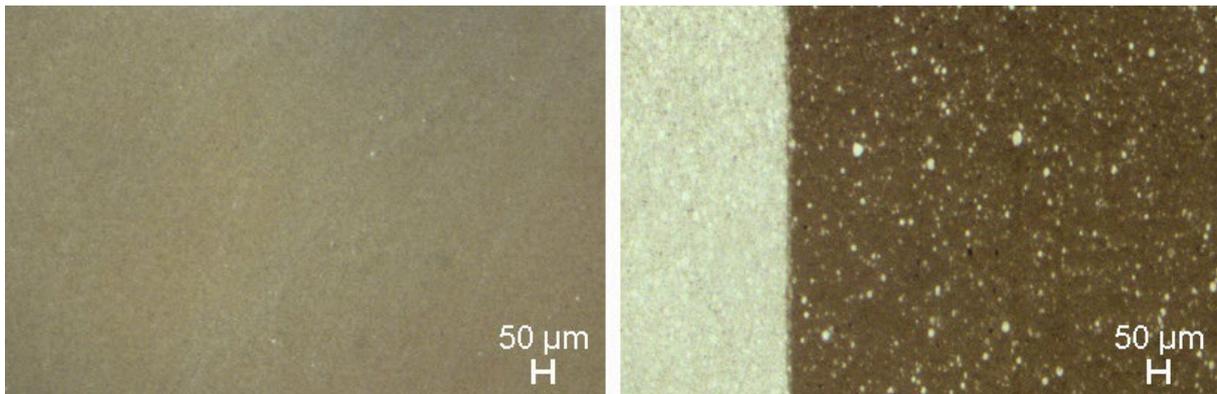


Bild 4: Mikroskopieaufnahmen der Neuware und des Mahlguts je 5x vergrößert

Die morphologische Entwicklung hat ebenso einen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften. Die Fließeigenschaften von ABS werden unter anderem durch den Agglomerationszustand, die Tropfengröße und den Kautschukgehalt beeinflusst. In Bild 5 sind der Einfluss der Tropfengröße und des Kautschukgehalts auf die Viskosität dargestellt. Diese hat einen wichtigen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Kunststoffes und wird durch die Rezyklierung des ABS besonders bei niedrigen Scherraten beeinflusst.

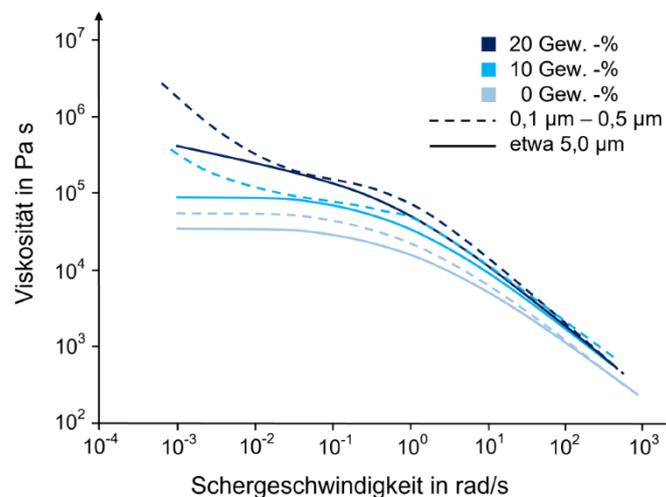


Bild 5: Viskositätskurven in Abhängigkeit von der Tropfengröße und vom Kautschukgehalt

Für einen Kautschukmassenanteil von 0 % zeigt sich das typische Verhalten homogener Kunststoffschmelzen: Bei kleinen Schergeschwindigkeiten ist die Viskosität konstant und bei hohen Schergeschwindigkeit nimmt die Viskosität ab. Durch Beimischung von Kautschuktröpfen verändert sich im Bereich hoher Schergeschwindigkeiten wenig, wobei bei niedrigen Schergeschwindigkeiten die Viskosität weiter ansteigt und kein Plateau erreicht. Dieser Effekt wird durch eine Reduzierung der Tropfengröße unterstützt. Außerdem neigen agglomerierte Systeme zu einer konstanten Viskosität bei niedrigen Schergeschwindigkeiten, wohingegen die Viskosität bei fein dispergierten Morphologien weiter steigt. [Aoki1987, Münstedt1981, Zosel1972]

## Filamentherstellung

Die Extrusionsversuche werden auf einem Einschneckenextruder der Firma COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH, Maitenbeth, vom Typ 30 X 25 D durchgeführt. Die verwendete Extrusionslinie ist dabei analog zu Bild 6 aufgebaut. Für die Filamentextrusion wird der Extruder mit einer 1,8 mm Runddüse konfiguriert. Auf die Düse folgt ein Wasserbad, eine optische Messeinheit der Firma Zumbach Electronic AG, Orpund, Schweiz, vom Typ ODAC 15XY, ein Walzenabzug und eine Wickeleinheit. Die zwei zuletzt genannten Geräte sind dabei Eigenkonstruktionen. Neben der Zerkleinerung und Homogenisierung werden die Mahlgüter vor dem Extrusionsprozess bei 80 °C für vier Stunden getrocknet.

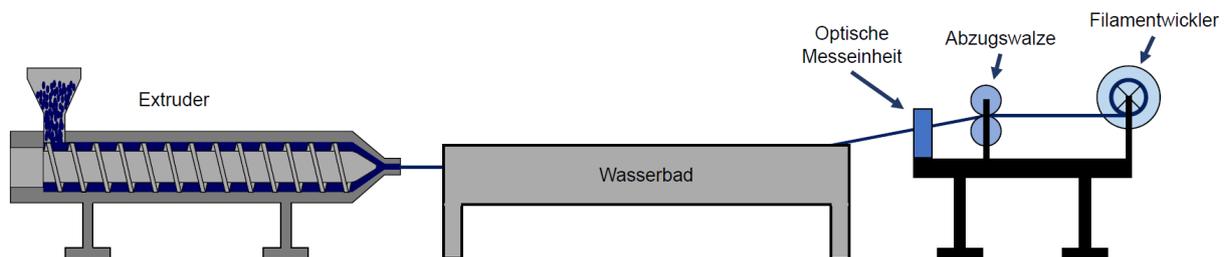


Bild 6: Schematische Darstellung der zur Filamentherstellung eingesetzten Anlagentechnik

Die maßgeblich untersuchten Parameter sind die Extrusionstemperatur, die Drehzahl des Extruders und das eingesetzte Schneckenkonzept. Der Temperaturbereich des Extrusionsprozesses für ABS liegt zwischen 220 °C und 260 °C. Die maximal umsetzbare Drehzahl des Extruders ist aufgrund der maximalen Geschwindigkeit der Wickeleinheit auf 30 1/min limitiert. Das optimierte Temperaturprofil der Filamentherstellung von ABS ist nachfolgend in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Optimiertes Temperaturprofil des Extruders bei der Filamentherstellung von ABS

Heizzone	1	2	3	4	5
Temperatur	180 °C	245 °C	250 °C	250 °C	250 °C

Um den Mischvorgang und die morphologische Entwicklung untersuchen und steuern zu können, werden unterschiedliche Schneckenkonzepte verwendet und verglichen. Bild 7 zeigt exemplarisch zwei Varianten. Dabei handelt es sich zum einen um eine Drei-Zonen-Schnecke und einer Schnecke mit zwei Misch- und einem Wendelscherteil. Letztere fördert durch hohe Dehn- und Scherraten der Schmelze eine gezielte Dispersion der im Rezyklat agglomerierten Butadien-Weichphase.



Bild 7: Zwei Schneckenvarianten: Drei-Zonen-Schnecke und Schnecke mit Misch- und Wendelscherteil

Insbesondere unzerkleinerte, heterogene Mahlgüter zeigen in der Extrusion starke Prozessschwankungen und Einzugsschwierigkeiten in der Materialzuführung. In der Zerkleinerung und Homogenisierung zeigen sich Siebgrößen von 4 mm als notwendig, sodass der Extrusionsprozess des Mahlguts mit der MS-Schnecke stabil und ohne größere Druckschwankungen ( $\pm 2 - 3$  bar) durchführbar ist.

### 2.1.2 Druckversuche

Zur Umsetzung des FFF-Prozesses werden zunächst die Bauteildaten für den Druck vorbereitet. Hierfür müssen die Geometrie sowie gegebenenfalls Stützstrukturen in einer CAD-Software erzeugt werden. Um das Bauteil für die Druckersoftware zugänglich zu machen, wird dieses in der Regel in ein STL-Format konvertiert. Das STL-Format beschreibt die externe geschlossene Oberfläche als ein Facettenmodell durch eine Triangulierung und bildet die Grundlage für die Erzeugung der Schichtdaten. In einem weiteren Schritt werden die Bauteile im Bauraum angeordnet und die Bahnplanungsdaten für das verwendete Kinematiksystem als G-Code erzeugt, was auch als "slicing" bezeichnet wird. Dieser G-Code beschreibt die Kontur der Bauteilform in der x-y-Richtung schichtweise als eine Kombination einfacher G-Befehle mit einer konstanten Schichtdicke in z-Richtung.



Bild 8: Demonstratorbauteil mit unterschiedlichen Funktionselementen sowie Prüfstrukturen

Im eigentlichen FFF-Prozess wird das Bauteil gemäß der G-Codes durch das lokale Extrudieren des aufgeschmolzenen thermoplastischen Filaments in einem Schichtaufbau

hergestellt. Hierdurch entsteht je nach Wahl der Prozessparameter auch ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Treppenstufeneffekt, der durch die schichtweise Annäherung der Bauteilform sowie deren Ausrichtung im Bauraum bedingt ist. Zur Erprobung und zum Benchmarking von Verfahrensabläufen und Prozessparametern eignen sich verschiedene Referenzgeometrien, die in der Literatur weit verbreitet sind. Daneben wird der Druckprozess auch an einem projekteigenen Demonstratorbauteil erprobt, welches in Bild 8 dargestellt ist.

Die Druckversuche an Referenzgeometrien sowie dem Demonstratorbauteil zeigen die grundsätzliche Eignung des Verfahrensablaufes und der Prozessparameter bei der additiven Fertigung auf Thermoforms substrate mit Upcyclingfilament. Auf weitere Untersuchungen wird in den Abschnitten 2.2.2 und 2.3.4 anhand exemplarischer Untersuchungsergebnisse eingegangen.

## 2.2 Entwicklung der Versuchsgeometrie für den Hinterdruckprozess und Übertragbarkeit auf andere Werkstoffe

### 2.2.1 Werkzeugbau und Thermoformung

Der Prozess des Thermoformens beginnt stets mit dem Halbzeug. Nach der Umformung entsteht der Formrohling. Um die gewünschten Formkonturen zu erhalten, muss dieser beschnitten werden. Etwa 30 % der Materialien gehen dabei aufgrund der Einspannung des Halbzeugs und der erforderlichen Beschnitte verloren. Bisher werden diese Abfallstücke teilweise recycelt und in neue Thermoformhalbzeuge oder Kunststoffprodukte umgewandelt, während der Rest thermisch verwertet wird.

Die recycelten Beschnitte werden in einem Co-Extrudat als Füllschicht verwendet, um ein Sekundärprodukt zu erzeugen. Dies ermöglicht es, Neumaterial im Halbzeug zu sparen, jedoch können sich die Eigenschaften, wie beispielsweise die mechanischen Eigenschaften, verändern, was zu Prozessschwankungen bei der Weiterverarbeitung führen kann. Nach dem Beschnitt entsteht ein Montageteil, das in der Regel durch einen Klebprozess um Funktionselemente erweitert wird. Dies ist erforderlich, da bestimmte Funktionselemente im Gegensatz zum Spritzgießen nicht direkt durch den Thermoformprozess hergestellt werden können.

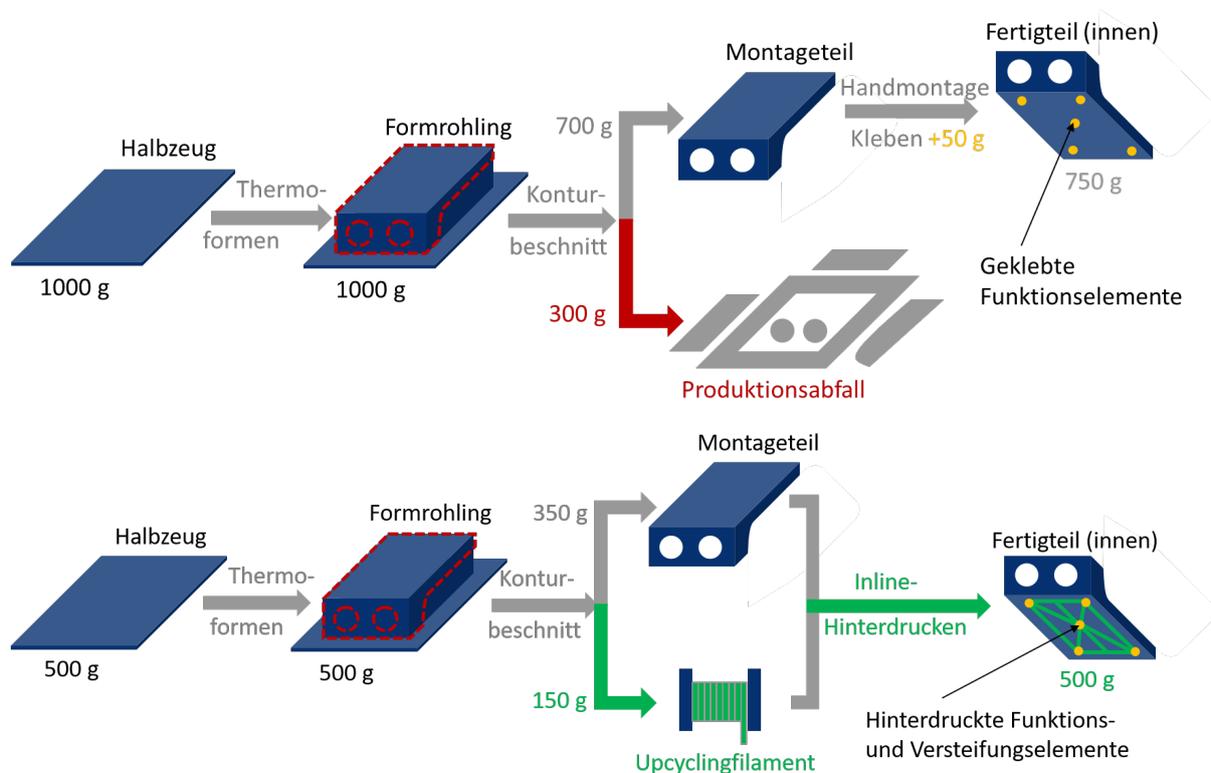


Bild 9: Konventionelle Produktionsweise eines technischen Thermoformbauteils und Gewichtsersparnis durch 3D-Inline-Hinterdrucken von Funktionselementen mit Upcyclingfilament

Bei nicht technischen Thermoformbauteilen wie Verpackungen kann oft auf eine nachträgliche Weiterverarbeitung oder Montage verzichtet werden. Dennoch entsteht bei allen Thermoformprodukten etwa 30 % Produktionsabfall aufgrund der Einspannung und der daraus resultierenden Klemmfläche des Halbzeugs sowie der Konturbeschnitte.

Die entwickelten Versuchsgeometrien sehen, je nach betrachtetem Einsatzbereich, eine Gewichtersparnis von bis zu 50 % vor. Die für die technische Anwendung nötigen mechanischen Eigenschaften werden in den Entwürfen durch eine gezielte Versteifung mit aufgedruckten Rippenstrukturen erreicht. Insbesondere die Biege- und Torsionssteifigkeit der Bauteile lässt sich so signifikant steigern. Bild 10 zeigt nachfolgend eine dünnwandige Versuchsgeometrie mit einer aufgetragenen Rippenstruktur sowie verschiedenen Funktionselementen.



Bild 10: Entwickelte dünnwandige Versuchsgeometrie mit Rippenstruktur und Funktionselementen

## 2.2.2 Werkstoffbetrachtung

Prinzipiell lassen sich viele relevante Kunststoffe des Thermoformens auch für eine 3D-Druckanwendung einsetzen. Neben dem technischen Thermoformwerkstoff ABS werden im Projektvorhaben auch insbesondere Blends aus Polycarbonat (PC) und ABS (PC-ABS) sowie das biobasierte und unter industriellen Bedingungen bioabbaubare Polylactid (PLA) betrachtet, wobei sich eine gute Übertragbarkeit der Aufbereitungsschritte zeigt. Zur Charakterisierung und Bewertung der Werkstoffe werden unter anderem rheologische Untersuchungen, mechanische Prüfungen sowie Untersuchungen zur Druckbarkeit an einem Prüfstand zur Axialkraftbestimmung in der Extrusionsdüse herangezogen. Nachfolgend wird anhand ausgewählter Ergebnisse von ABS ein Überblick über die Untersuchungen gegeben.

Zur rheologischen Charakterisierung werden Untersuchungen an einem Platte-Platte-Rheometer durchgeführt. In Bild 11 ist die Schergeschwindigkeit über der Viskosität verschiedener Proben dargestellt. Die ermittelten Daten wurden bei einer Dehnung von 5 % untersucht. Es ist zu erkennen, dass die Rezyklat-Varianten nahezu den gleichen Viskositätsverlauf aufzeigen. Dieser ist dadurch charakterisiert, dass sich bei niedrigen

Schergeschwindigkeiten eine annähernd konstante Viskosität einstellt und der Verlauf bei höheren Schergeschwindigkeiten abfällt. Dahingegen bildet die Neuware einen konstanten Viskositätsbereich aus, wobei die Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit weiter abfällt. Die Viskositätskurven bestätigen die Gleichheit der rezyklierten Varianten mit Hinblick auf die Tropfengröße und dessen Tropfenverteilung (vgl. Abschnitt 2.1.1).

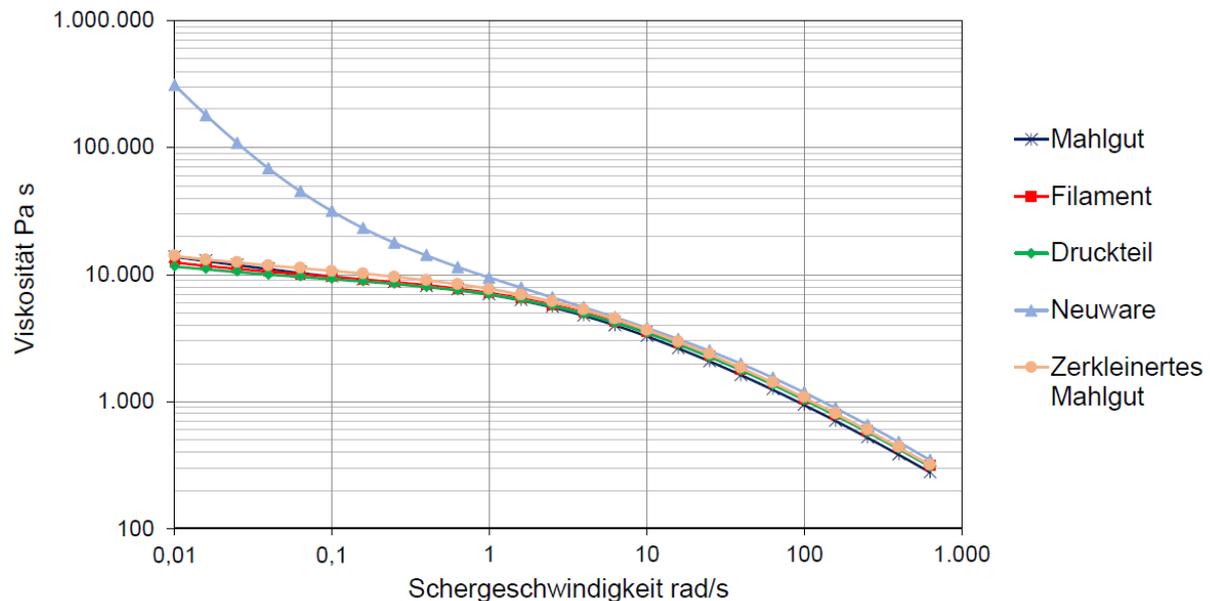


Bild 11: Rheologische Untersuchung unterschiedlicher ABS-Proben bei 240 °C und 5 % Dehnung

Gewöhnliche Zugprüfkörper (z. B. des Typs 1A nach DIN EN ISO 527-2) sind für die mechanische Charakterisierung im FFF-Prozess nur bedingt geeignet, da sie die interlaminaeren und intralaminaeren Festigkeiten des schichtweisen Lagenaufbaus selbst mit optimierten Druckstrategien nur bedingt abbilden können. Aus diesem Grund wird eine Methodik in Anlehnung an Han et al. [Han2020] genutzt. Dieses ermöglicht eine einfache und reproduzierbare Untersuchung der richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften der additiv gefertigten Strukturen. Zur Herstellung der Zugprüfkörper wird eine ovale Versuchsgeometrie gefertigt und Zugprüfkörper in zwei unterschiedlichen Orientierungen ausgefräst. Für die Analyse der interlaminaeren Festigkeit dienen Prüfkörper, die entlang der Baurichtung orientiert sind (Bild 12, 1), während die Prüfkörper für die Analyse der intralaminaeren Festigkeit orthogonal dazu orientiert sind (Bild 12, 2).

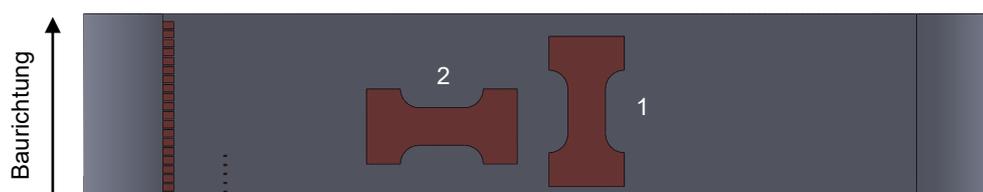


Bild 12: Ovale Versuchsgeometrie zur mechanischen Analyse mit schematischen Zugprüfkörpern zur Bestimmung der interlaminaeren Festigkeit und intralaminaeren Festigkeit

Bei der Analyse verschiedener ABS-Typen und Zusammensetzungen zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Zugprüfkörpern unterschiedlicher Orientierung. Die interlaminare Festigkeit (1) liegt in den Versuchen stets unter der intralaminaren Festigkeit (2), bei ABS-Mahlgütern um bis 75 %. Dies zeigt eine signifikante Anisotropie der mechanischen Eigenschaften der Prüfkörper auf. Diese Anisotropie kann, insbesondere durch die Steigerung der interlaminaren Festigkeit, mithilfe der in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen lokalen Aktivierung deutlich reduziert werden.

Die maximal bestimmte Abweichung vom Mittelwert für alle untersuchten Chargen liegt bei 0,9 %. Dieser Wert zeigt, dass das Vorgehen für die Herstellung der Zugprüfkörper sowie die Messmethode selbst für die Bestimmung der inter- und intralaminaren Festigkeiten geeignet ist und eine hohe Messgenauigkeit sowie einen hohen Grad der Reproduzierbarkeit besitzt.

Zur Bestimmung der Druckbarkeit verschiedener Filamente werden Untersuchungen an einem Prüfstand mit einer Wägezelle durchgeführt (siehe Bild 13). Ziel der Versuche mit der Wägezelle ist es, die Axialkraft zu bestimmen, welche sich durch die Filamentextrusion einstellt. Gemessen wird die Kraft, die das Filament beim Austritt aus der Düse an der Wägezelle verursacht. So lässt sich die Verarbeitbarkeit der Werkstoffe analysieren und bewerten. Variieren lassen sich typische Verarbeitungsparameter wie die Verarbeitungstemperatur sowie die Extrusionsrate. Zudem lassen sich verschiedene Druckköpfe und Extruder erproben und bewerten.

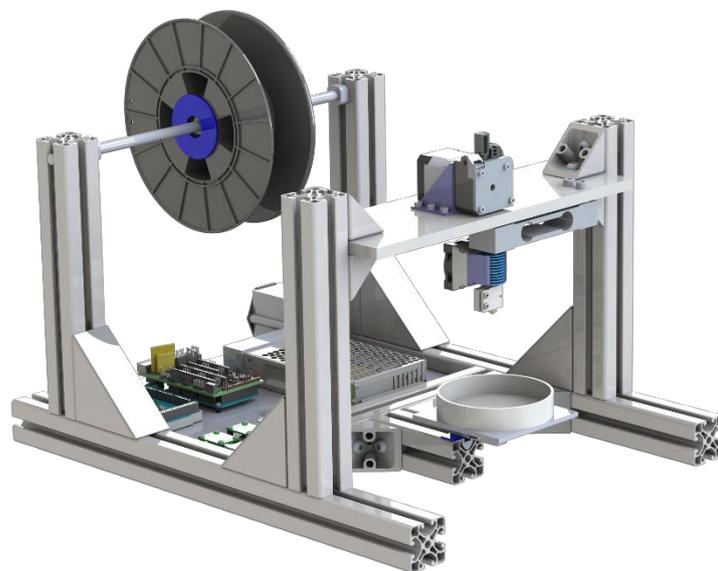


Bild 13: Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Extrusionskräfte mithilfe einer Wägezelle

Ergebnisse anhand von ABS-Filamenten mit unterschiedlichem Rezyklatanteil sind in Bild 14 dargestellt. Die Temperatur wird in einem für ABS typischen Verarbeitungsbereich variiert, wobei es sich bei 280 °C um einen für ABS hohen Wert handelt. Die Messungen zeigen eine Reduktion der Extrusionskräfte mit steigender Temperatur, was maßgeblich auf eine sinkende

Viskosität zurückzuführen ist. Zudem zeigt sich ein Anstieg der Kraft mit steigendem Rezyklatanteil. Im direkten Vergleich zwischen Neuware und 100 % Rezyklat liegt die Extrusionskraft des Rezyklates bei allen Temperaturen bei mehr als dem Doppelten.

Bei den betrachteten Düsendurchmessern von 0,4–1,2 mm können dafür unter anderem die in der Düse auftretenden Kapillarkräfte eine Rolle spielen. Ein entsprechender Zusammenhang wird auch von Javierre et al. [Javierre2006] beschrieben, wenngleich die verwendeten Düsen größer sind. Bei Versuchen mit Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) zeigt sich hier, dass die Viskosität, gemessen mit einem Kapillarrheometer, bei steigendem Rezyklatanteil zunimmt. Für die Druckbarkeit der Filamente bedeutet dieser Zusammenhang, dass im Prozess bei einer gegebenen Düsengeometrie und Peripherie mit steigendem Rezyklatanteil höhere Verarbeitungstemperatur notwendig sind. Das ist vor dem Hintergrund des Einsatzes von Rezyklat als kritisch anzusehen, da dieses durch zurückliegende Verarbeitungsprozesse oftmals ohnehin bereits eine gewisse thermische Schädigung und die damit verbundenen Abbau- und Entmischungsprozesse erfahren hat.

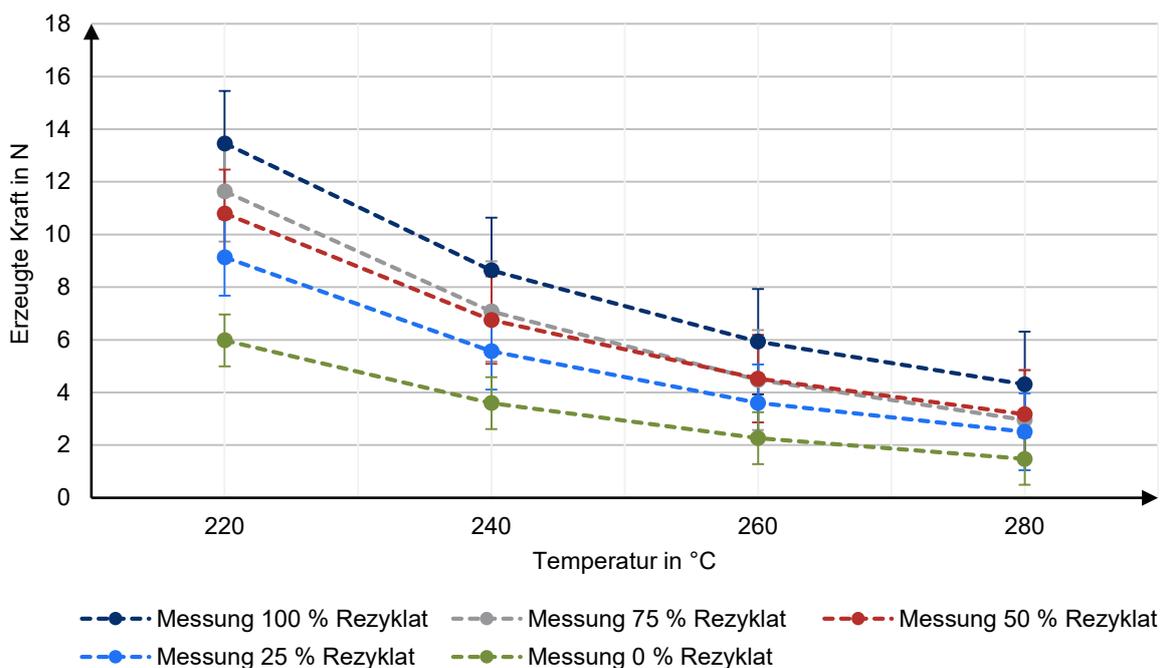


Bild 14: Axialkräfte bei der Extrusion von ABS Filament mit unterschiedlichem Rezyklatanteil

## 2.3 Abstandssensorik und Druckkopftechnologie

Im Rahmen des Vorhabens wird ein Endeffektor für den Druckprozess entwickelt. Die Entwicklung besteht aus drei wesentlichen Teilpaketen, die im Folgenden vorgestellt werden.

### 2.3.1 Druckkopf und Extruder

Verfahrensseitig werden mehrere Anforderungen an das Design des Extruders und des Druckkopfes gestellt, die von kommerziell verfügbaren Druckköpfen in Kombination nicht erfüllt werden: Eine lange, schmale Geometrie bei hohem Materialdurchsatz, die Integration von Abstandssensorik in der Nähe des Tool Center Points (TCP) und eine Oberflächenaktivierung des zu bedruckenden Substrates.

Die Herausforderung des Designs liegt dabei im Wesentlichen in der schmalen Geometrie. Da im Extruder ein möglichst kurzer Übergang zwischen dem festen und dem geschmolzenen Filament bestehen soll, wird zwischen dem kalten Ende (Cold-End) und dem warmen Ende (Hot-End) des Extruders eine sogenannte Heatbreak vorgesehen. Zudem muss das Cold-End des Extruders, in dem das Filament im festen Zustand vorliegen soll, gekühlt werden. Die dabei üblicherweise eingesetzten Kühlkörper mit Lüfter nehmen jedoch sehr viel Platz ein.

Die im Projekt entwickelten Extruder setzen daher auf einen mittels Druckluft zugeführten Luftstrom, der das schmale Design ermöglicht. Der in Bild 15 dargestellte Prototyp hat dazu die Möglichkeit, den Luftstrom auch für die Bauteilkühlung zu nutzen und somit eine schnelle Erstarrung des ausgetragenen Materials zu erzielen. Die Heizung erfolgt durch einen Widerstandsdraht an der kupfernen Extruderdüse.

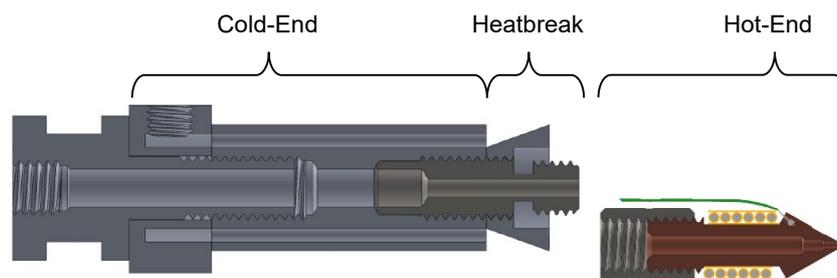


Bild 15: Prototyp eines schmalen Druckkopfes für das Bedrucken von Thermoformbauteilen

Da dieser Prototyp in der Erprobung jedoch sowohl eine zu geringe Kühlleistung, als auch eine zu geringe Heizleistung aufwies, wird das finale Konzept durch den in Bild 16 gezeigten Aufbau ersetzt, der eine Kombination des Kühlprinzips des Prototypen mit einem kommerziellen Hot-End des Typs Ultra High-Flow der Firma Phaetus darstellt. Dieses bringt mit seinem vergossenen Heizelement eine wesentlich höhere Heizleistung auf. Anstelle des werkseitigen Isolators am Heizelement wird die Düse der Oberflächenaktivierung platziert.

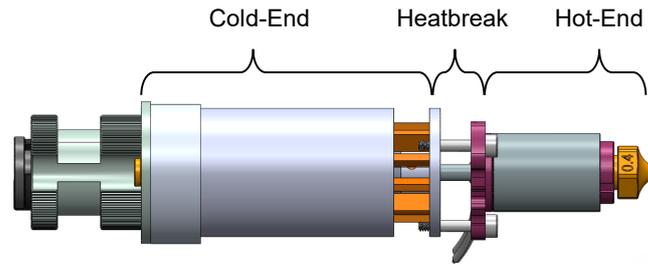


Bild 16: Finales Druckkopfdesign mit optimierten Komponenten

### 2.3.2 Abstandssensorik

Weiterhin wird eine Abstandserfassung integriert, die es erlaubt, den Abstand des TCP während des Prozesses nachzuregeln. Im Fokus stand hier mit Hinsicht auf einen späteren Serieneinsatz vorrangig eine kostengünstige und kompakte Lösung. Als Sensoren werden daher vier Lasertriangulationssensoren vom Typ micro-epsilon optoNCDT 1220-50 gewählt, die – wie in Bild 11 dargestellt – in einem Kreis um den TCP angeordnet sind und an jeweils einem Punkt den Abstand messen.

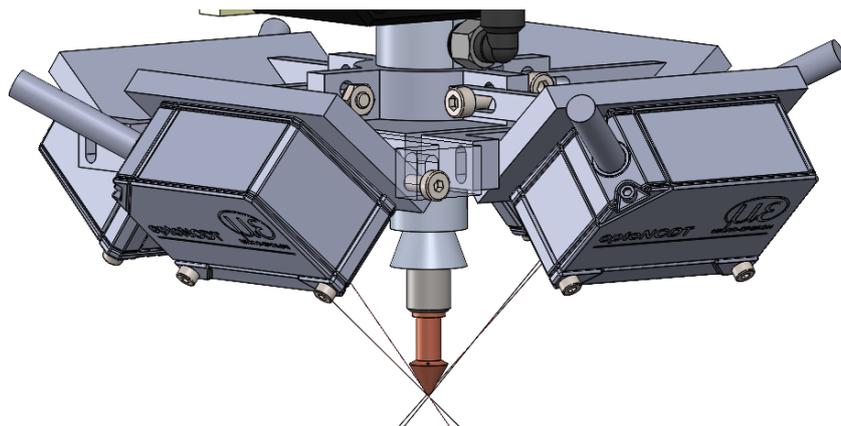


Bild 17: Prototyp zur Erprobung verschiedener Sensorstellungen (Höhe und Winkel anpassbar)

Die Anordnung ermöglicht eine genaue Messung des TCP-Abstands, da auf jeder Seite des TCP eine Messung erfolgt und somit eine teilweise Korrektur der durch die vom TCP versetzte Messung durchgeführt werden kann. Dies ist insbesondere daher wichtig, weil die Bauteilkrümmung zu signifikanten Abstandsabweichungen zwischen einem einzelnen Sensor und dem TCP führen kann.

Die vier Sensoren sind in die SPS integriert und können dadurch in Echtzeit während des Prozesses Messwerte erfassen. In der SPS wird dazu eine Funktion implementiert, die die exakte Position der Messpunkte in absoluten Maschinenkoordinaten berechnet. Dazu wird die Orientierung und Position des TCP aus der CNC ausgelesen und der Messwert des Sensors entsprechend seiner Position in der Sensoranordnung und dem Anstellwinkel addiert. Es ist allerdings anzumerken, dass die berechneten Messpunkte Prinzip bedingt bestenfalls dieselbe Genauigkeit erreichen, die auch der positioniergenaue Roboter erreichen kann. Im Falle eines

KR20 gibt Kuka für die Positionsabsolutgenauigkeit nach ISO 9283 [ISO9283] einen Wert von  $\pm 0,5$  mm an. Damit liegt der Wert, wie für Roboter typisch, deutlich über der Positionswiederholgenauigkeit nach ISO 9283 von  $\pm 0,04$  mm [Kuka2022].

Eine Abstandsregelung, basierend auf den Sensorsignalen, wird als PI-Regler in der SPS implementiert und arbeitet auf dem Mittelwert derjenigen Sensoren, die einen gültigen Messwert liefern. Sie ist durch den Benutzer im G-Code nach Bedarf zu- und abschaltbar. Die aufgrund von Kinematikungenauigkeiten, Platzierungsfehlern oder Bauteilschwankungen entstehenden Abstandsabweichungen können damit zu einem wesentlichen Teil ausgeregelt werden. Dies ist wichtig für die Verbindungsfestigkeit zwischen Andruckteil und Thermoformbauteil, wie auch für die Kollisionsvermeidung.

Da die Abstandssensoren Punkte exzentrisch vom TCP messen, können sie den Abstand des TCP jedoch Prinzip bedingt nicht zuverlässig erfassen, da nicht sichergestellt werden kann, dass sich mindestens einer der Messpunkte auf der Bauteiloberfläche befindet (vor allem bei Infill-strukturen ist dies sehr unwahrscheinlich). Eine Regelung auf die Messwerte ist daher nur auf der Oberfläche des Thermoformbauteils möglich.

Eine Korrektur der Position während aller Druckschichten erfolgt dann durch eine Korrekturtabelle (Lookup-table), die die Abstandsfehler zwischen TCP und Thermoformbauteiloberfläche über die Position kartiert. Zum Erstellen der Karte werden in einem separaten Messprogramm in regelmäßigen Abständen Messpunkte gespeichert und mittels bilinearer Interpolation in ein regelmäßiges Raster diskretisiert und an die Steuerung übertragen.

Mit Hilfe der Karte kann die Steuerung anhand der aktuellen Position der X- und Y-Achsen sehr effizient in jedem Zyklus einen Korrekturwert auf Grundlage einer Linearinterpolation der umliegenden Stützpunkte der Korrekturmatrix berechnen und der CNC als Positionsabweichung in den drei Hauptkoordinatenachsen zuführen.

Eine Einschränkung stellt hierbei jedoch dar, dass die Orientierung des Werkzeugs und die Bauteilkrümmung in der Karte nicht beachtet werden. Dies kann bei stark gekrümmten Bauteilen oder hohen Druckfeatures (d. h. starke Winkeländerung im Vergleich zur Messung) zu kleinen Fehlern führen. Die Korrekturwerte an Stellen mit starker Anstellung zur X-Y-Ebene haben dann eine gröbere Auflösung (in der Senkrechten wird er auf die Fläche projiziert unendlich), außerdem ändern sich die Kinematikfehler mit dem Winkel. Aufgrund der relativ geringen Krümmungen und Aufbauhöhen der Testbauteile ist diese Beschränkung aber in der Praxis des Inline-Hinterdrucks nicht einschränkend geworden. Eine Möglichkeit, die Einschränkung zu umgehen, wäre mit der Speicherung eines 3D-Netzes und der Implementierung von Raytracing in der Steuerung möglich. Durch die Echtzeitanforderungen der Steuerung ist dies aber mit erheblichem Aufwand verbunden, welcher aufgrund der fehlenden Praxisrelevanz nicht investiert wird.

### 2.3.3 Extrudervorsteuerung

Für den mehrachsigen Druckprozess ist eine Extrudervorsteuerung von großer Bedeutung für die Druckqualität, da die Bahngeschwindigkeit im Prozess nicht annähernd so konstant ist, wie beim herkömmlichen FFF-Verfahren, sondern auch während des Drucks starken Schwankungen unterliegt. Insbesondere bei starken Orientierungsänderungen des Druckkopfes über eine kurze Strecke muss die Bahngeschwindigkeit während des Drucks stark reduziert werden, da kurze Bahnabstände sehr großen Achsbewegungen zur Orientierungsänderung gegenüberstehen. Die Achsgeschwindigkeiten werden dann durch die Dynamikbegrenzung der CNC reduziert, um die zulässigen Geschwindigkeiten der einzelnen Roboterachsen nicht zu überschreiten. Das Ausmaß der Änderungen kann daher nicht im Voraus in der Bahnplanung berücksichtigt werden, wie es heute im FFF-Verfahren noch überwiegend üblich ist, sondern muss in Echtzeit an die tatsächliche Bahngeschwindigkeit angepasst werden.

Eine zu diesem Zweck bereits entwickelte Extrudervorsteuerung [Wulle2019] wird für den vorliegenden Prozess adaptiert und für die Anlagensteuerung re-implementiert. Diese basiert auf der Invertierung eines Flussmodells basierend auf der Bernoulli-Gleichung (Bild 12) und ist in der Lage, aus einer vorgegebenen Materialflussgeschwindigkeit eine Extrudergeschwindigkeit zu berechnen.

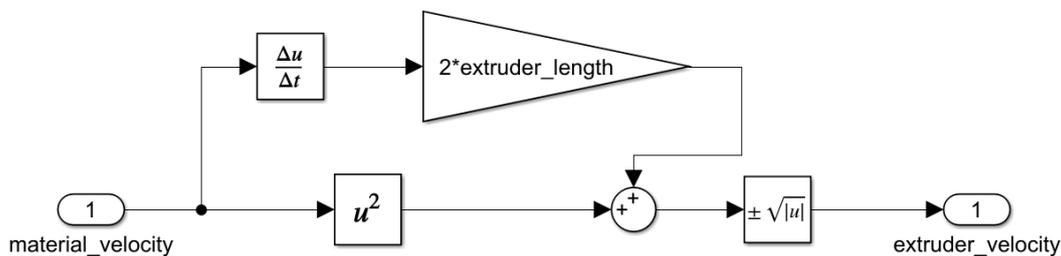


Bild 18: Invertiertes Bernoulli-Modell für die Extrudervorsteuerung

Die dazu bisher nur prototypische Umsetzung wird für den vorliegenden Prozess in der Steuerung robust implementiert und durch eine empirische Parameterstudie auf das Recyclingfilament eingestellt. Eine Anpassung des Flussmodells war entgegen der ursprünglichen Annahme nicht erforderlich, da schon mit dem Modell von Wulle [Wulle2019] eine erhebliche Prozessverbesserung erzielt werden kann. Der Unterschied zwischen dem vorgesteuerten und dem nicht vorgesteuerten Prozess ist in Bild 19 dargestellt. Start und Endpunkt der Extrusion liegen dort 100 mm auseinander und sind jeweils 20 mm eingerückt von den Endpunkten der Verfahrensbewegung. Die Bahngeschwindigkeiten variieren dabei zwischen 800 mm/min (unten) und 6.000 mm/min (oben) in 260 mm/min Inkrementen.

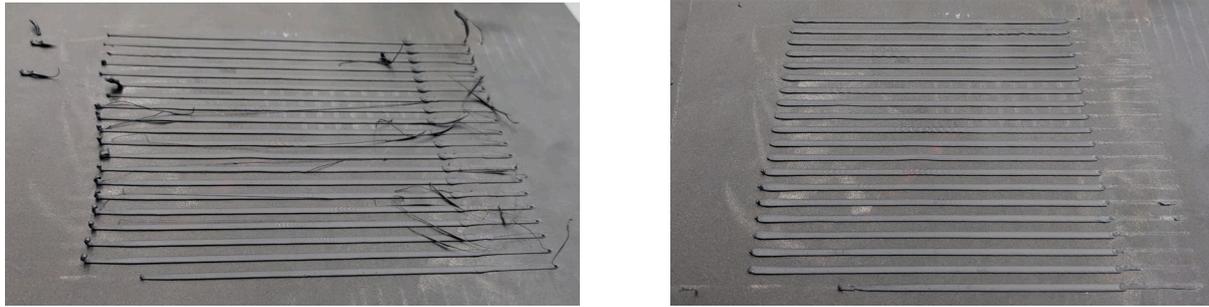


Bild 19: Einzelspuren mit Vorschubgeschwindigkeit zwischen 800 mm/min – 6.000 mm/min ;  
Herkömmlicher, direkt gesteuerter Prozess und vorgesteuerter Prozess

Beim direkt gesteuerten Prozess (d. h. ohne Vorsteuerung) ist dabei kein klarer Startpunkt der Extrusion zu erkennen und das Material „schmiert“ bei jeder Spur bis zum Ende der Bahn. Die Bahnen mit Vorsteuerung lassen dagegen klar die programmierten Start- und Endpunkte erkennen und weisen zudem eine deutlich homogenere Bahngeometrie auf. Zudem werden die beim direkt gesteuerten Prozess auftretenden Ablösungen durch die Vorsteuerung komplett eliminiert. Die in beiden Darstellungen erkennbaren Wellen sind nicht das Resultat der Extruderansteuerung, sondern entstehen durch den Bahnfehler des Roboters.

Ergänzt wird die Vorsteuerung durch ein neuentwickeltes Strangvolumenberechnungsverfahren, welches als Post-Prozessor für den in der Bahnplanung erzeugten G-Code umgesetzt ist. Das Verfahren erstellt ein Voxelmodell des Bauteils mittels der im G-Code definierten Druckbahnen und teilt das im Bauteil verfügbare Volumen gleichmäßig auf die einzelnen Bahnen auf. Die Bahngeometrie wird so in der Höhe und der Breite variiert, um Lücken oder Überextrusion zu reduzieren. Vorteile hat dies vor allem bei gekrümmten Bauteilschichten, wenn die Schichtdicke nicht konstant ist, sowie bei unregelmäßigen Bahnabständen, wie sie z. B. bei Spitzkehren auftreten können.

Ein Scan der Thermoform-Bauteiloberfläche, wie er beim Einmessvorgang für die Höhenkorrektur durchgeführt wird, könnte mit dem Verfahren auch dazu benutzt werden, um Unebenheiten des Bauteils über mehrere Schichten auszugleichen und damit eine bessere Geometrietreue zu erzielen. Dieser Anwendungsfall wird im Projekt aufgrund der beschränkten Sensorik jedoch nicht validiert. Details des Verfahrens sind in [Wolf2023] veröffentlicht.

### 2.3.4 Lokale Temperierung

Bei der direkten Fertigung eines additiven Lagenaufbaus auf einem Kunststoffsubstrat ist die interlaminaire Haftfestigkeit des Lagenaufbaus, insbesondere an der Grenzfläche zwischen dem thermogeformten Grundbauteil und dem Lagenaufbau von kritischer Bedeutung (siehe Bild 20). Der typischerweise sehr große Temperaturgradient an dieser Grenzfläche bedingt in der Praxis allerdings eine besonders geringe interlaminaire Haftfestigkeit. Folglich kann keine Kraftübertragung zwischen den Bauteilbereichen stattfinden und die Bauteile können in vielen

technischen Einsatzbereichen nicht eingesetzt werden. Bei der Analyse und der Optimierung der interlaminaren Haftfestigkeit dieser Schicht besteht demnach akuter Handlungsbedarf.

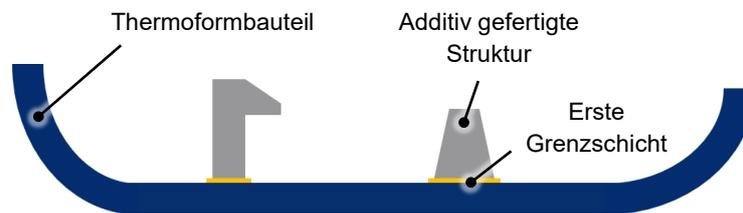


Bild 20: Kritische erste Grenzschicht zwischen Thermoformbauteil und additiv gefertigter Struktur

Die interlaminare Haftfestigkeit zwischen den unterschiedlichen Schichten wird maßgeblich infolge der Interaktion von Polymerketten erreicht, sobald eine Schicht im geschmolzenen Zustand auf eine bereits erstarrte Schicht aufgetragen wird und diese benetzt. Diese Interaktion ist auf die Effekte der Reptation und Relaxation zurückzuführen, welche maßgeblich von der Temperatur abhängig sind.

Um die Haftfestigkeit an der ersten Grenzschicht zwischen Thermoformbauteil und der additiv gefertigten Struktur, aber auch innerhalb des Lagenaufbaus zu steigern, bieten sich unterschiedliche Maßnahmen an. Im vorliegenden Vorhaben wird aus Effizienzgründen eine lokale thermische Aktivierung unter Einsatz von Warmgas eingesetzt. Diese schafft um die Extrusionsdüse herum eine bedarfsgerechte, thermisch aktivierte Mikroumgebung. Durch eine Vorwärmung des unmittelbar zu beschichtenden Substrates sowie eine Nachwärmung des abgelegten Stranges kann die Polymerkettenbewegung durch Effekte der Reptation und Relaxation begünstigt werden. In der Folge lässt sich die Haftfestigkeit deutlich steigern.

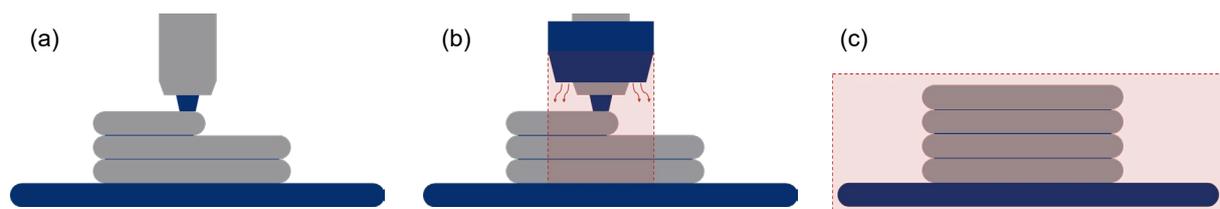


Bild 21: Additive Fertigung ohne thermische Aktivierung, mit lokaler thermischer Aktivierung und mit beheiztem Bauraum bzw. nachgelagerter Warmlagerung

Für die Charakterisierung der Haftfestigkeit der additiv gefertigten Strukturen stehen keine Normen zur Verfügung. Daher wird für die Untersuchungen ein geeignetes Vorgehen geschaffen. Als Vorlage wird die ASTM D 4541 [ASTM4541] genutzt, welche ein Vorgehen zur Charakterisierung der Adhäsion von Beschichtungen beschreibt. Nach dieser Norm wird eine Aufnahmevorrichtung auf eine Oberfläche geklebt und orthogonal zur Oberfläche bis zum Versagen der Beschichtung belastet. Weiterhin dient ein von Schneider et al. [Schneider2021] beschriebenes Verfahren als Vorlage, bei welchem die Haftfestigkeit von organischen Haftvermittlern durch additiv gefertigte Prüfkörper untersucht wird.

Die im Vorhaben entwickelte Prüfgeometrie ist in Bild 22 dargestellt. Sie wird im Rahmen der Untersuchung direkt auf das betreffende Substrat bzw. Thermoformbauteil gedruckt. Zur mechanischen Charakterisierung wird die Geometrie in einer entsprechenden Vorrichtung mithilfe einer Universalprüfmaschine bis zum Versagen auf Zug belastet. Neben der erreichten Haftfestigkeit lässt sich die Prüfgeometrie auch auf adhäsives oder kohäsives Versagen hin untersuchen.

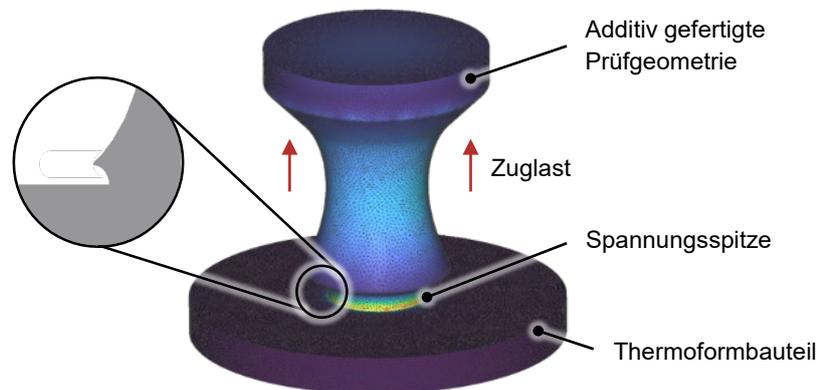


Bild 22: FEM-Analyse der Prüfgeometrie zur Charakterisierung der Haftfestigkeit von additiv gefertigten Strukturen auf Thermoformbauteilen

Im Rahmen der Untersuchungen zeigt sich mit steigender Temperatur eine starke Zunahme der Haftfestigkeit der Prüfgeometrien auf den Thermoforms substraten (vgl. Bild 23). Hierdurch ist der Einfluss der Substrattemperatur auf die Haftfestigkeit erkennbar. Auffallend ist im Verlauf eine starke Verbesserung der Haftfestigkeit im Bereich der jeweiligen materialspezifischen Glasübergangstemperatur  $T_g$ . Diese Messergebnisse lassen sich durch eine Zunahme der Polymerkettenbewegung über die Grenzflächen und deren Relaxation erklären. Weitere Details der Analyse sind in [Reindl2023] veröffentlicht.

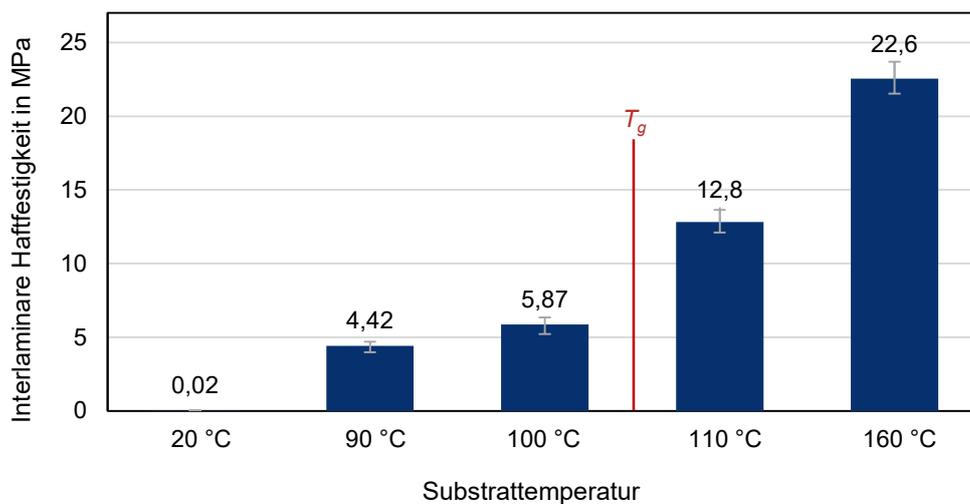


Bild 23: Haftfestigkeit von additiv gefertigten Prüfgeometrien auf Thermoforms substraten

### 2.3.5 Funktionsintegration Druckkopf

Die separat entwickelten Schlüsseltechnologien wird anschließend in dem in Bild 24 dargestellten Druckkopf integriert. Die Abstandssensorik wird hier mit festen Referenzflächen implementiert, sodass eine Justage des Messwinkels nicht mehr notwendig ist. Die Düse und Gaszuführung für die Oberflächenaktivierung wird weiterhin so modifiziert, dass sie den Messbereich der Messsensorik nicht schneiden. Zudem wird das neue Cold-End mit einer entsprechenden Leitungsführung am Druckkopf eingesetzt, welches durch eine optimierte Architektur eine höhere Kühlleistung erzielen kann, als das prototypische System.

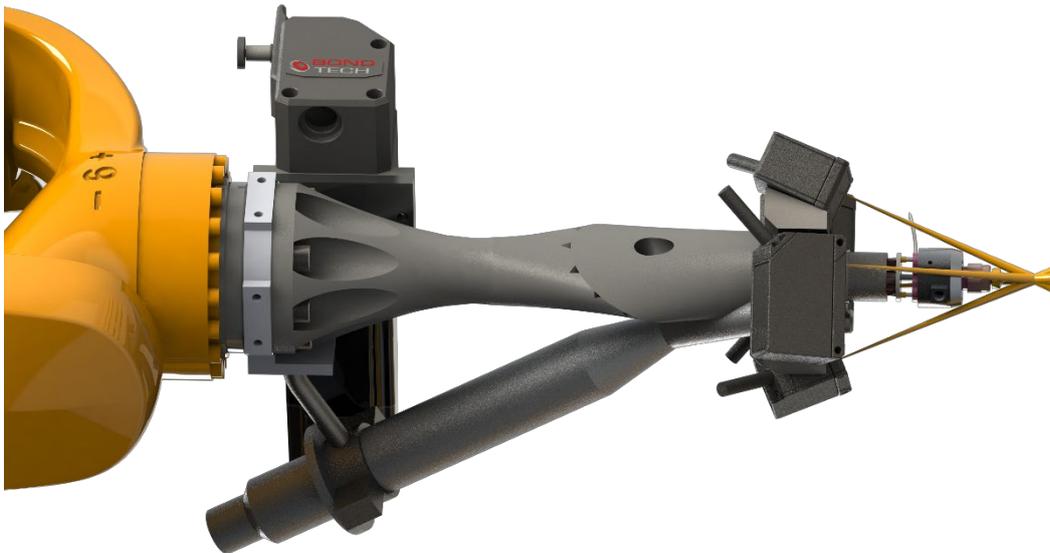


Bild 24: Gesamtaufbau des entwickelten Endeffektors

Weiterhin ist die Verbindung zum Roboter in zwei Teilen aufgebaut und mit einer positions- und orientierungsgenauen Magnetkupplung versehen, die bei Kollisionen des Druckkopfes zerstörungsfrei öffnet. Ein integrierter Unterbrecherschalter ist mit der Steuerung verbunden und sorgt dann für die Abschaltung des Druckers, sodass fatale Kollisionen in den meisten Fällen vermieden werden können.

## 2.4 Aufbau einer Produktionszelle und Skalierung auf ein seriennahes Demonstratorbauteil

Eine Anforderung des Inline-Hinterdrucks, die im Projekt gestellt wird, ist die Arbeitsraumgröße. Für eine gute Übertragbarkeit auf den Serienprozess wird diese auf mindestens die Maße einer Europalette festgelegt. Hierzu wird verschiedene Zellkonfigurationen und Roboterkinematiken hinsichtlich ihrer Eignung für den Prozess untersucht. Dazu wird der Arbeitsraum (Bild 25), die im Arbeitsraum auftretenden Singularitäten (Bild 26), die notwendigen Traglasten, die Genauigkeit, der Implementierungsaufwand sowie die Kosten betrachtet. Auf Basis dieser Kriterien wird für die Produktionszelle ein Kuka KR20 R1810 gewählt. Dieser besitzt bei einem Eigengewicht von ca. 250 kg eine Reichweite von 1,8 m und eine Nenntraglast von 20 kg [Kuka2022].

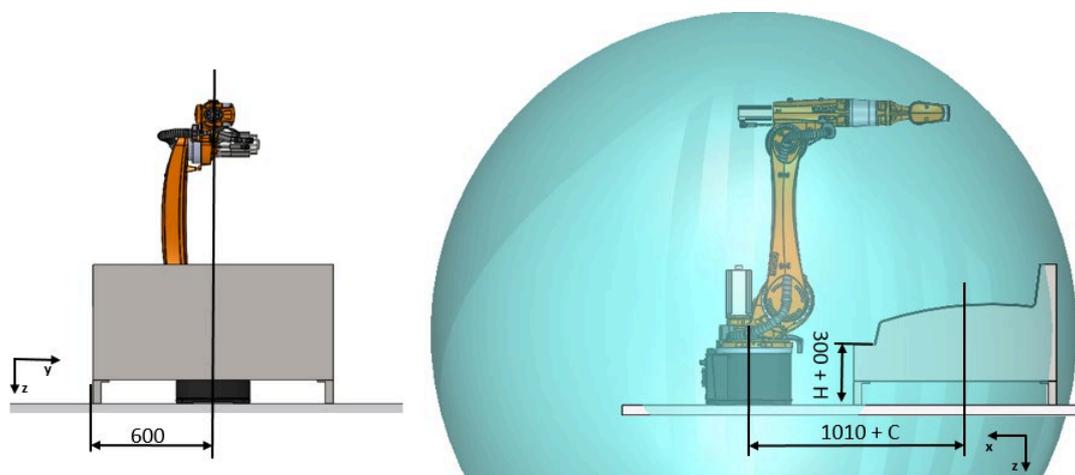


Bild 25: Arbeitsraumanalyse der Roboterzelle

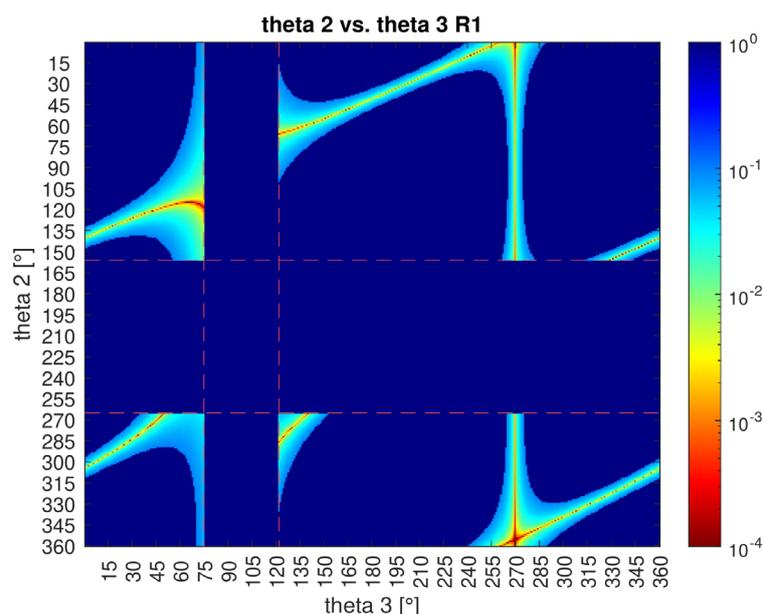


Bild 26: Singuläre Stellungen des eingesetzten Kuka KR20 für die Achsen 2 und 3 (Ellenbogen- und Schulteringularität)

Als besonders vorteilhaft haben sich bei der Auslegung der Produktionszelle Konstruktionen erwiesen, bei denen der Roboter kopfüber hängt. Diese Orientierung erlaubt bei einer gegebenen Reichweite des Roboterarms die größtmögliche Bauteilgröße. Aufgrund der höheren Flexibilität und wesentlich einfacheren Umsetzung wird für das Projekt jedoch die Bodenmontage auf einer portablen Plattform bevorzugt. Diese erlaubt bei Bedarf eine flexible Umorientierung der Anlage, um wechselnden Anforderungen gerecht werden zu können. Ein Rendering des Anlagenkonzeptes ist in Bild 27 dargestellt. Der Aufbau hat zudem den Vorzug der einfachen Übertragbarkeit auf den übergangsweise von Kuka als Leihgabe bereitgestellten Kuka KR360 Roboter in der Arena2036-Versuchsfläche der Universität Stuttgart, sodass die daran Steuerungs- und Technologieentwicklung trotz langer Lieferzeiten des geplanten Projektroboters (Kuka KR20) bereits frühzeitig erfolgen kann.

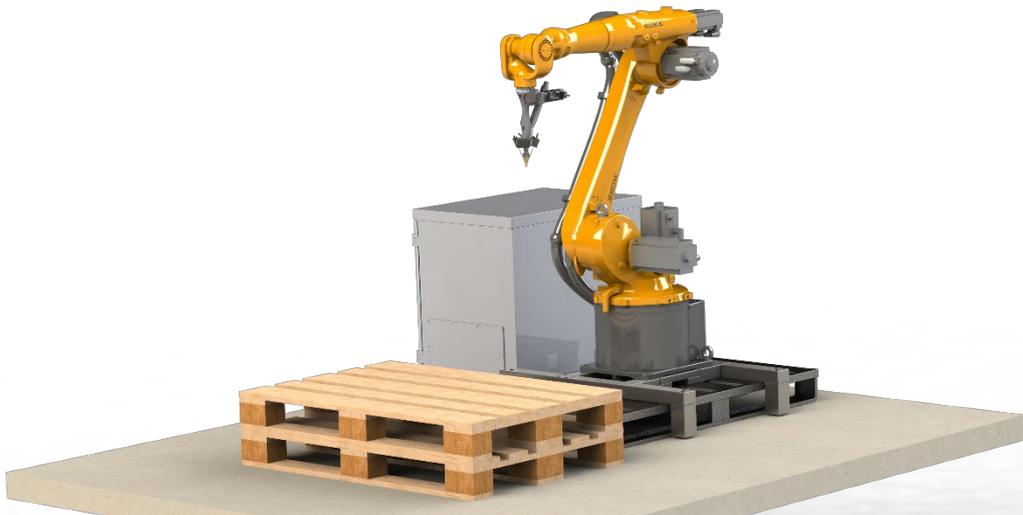


Bild 27: Rendering des Anlagenkonzeptes zum 3D-Inline-Hinterdrucken

#### **2.4.1 Aufbau mit einem KR360 und einem KR20**

Aufgrund hoher Lieferzeiten des KR20 wird der Prozess zunächst prototypisch an einem KR360 in Betrieb genommen. Um den Aufbau von mehreren Schaltschränken zu vermeiden, wird die Steuerung in einem kompakten Schaltkasten (Bild 28) realisiert. Dieser enthält alle erforderlichen Klemmen und Relais und kann beim KR360 zunächst am Arm befestigt werden (Bild 29). Im späteren Aufbau mit dem KR20 kann er unverändert am Sockel des Roboters angebracht werden.

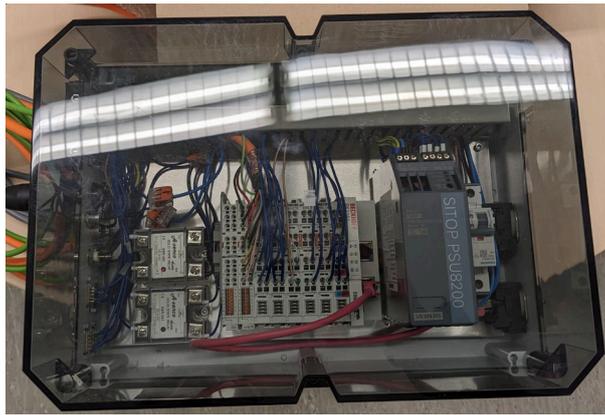


Bild 28: Schaltkasten mit Steuerungshardware für die Druckkopfansteuerung

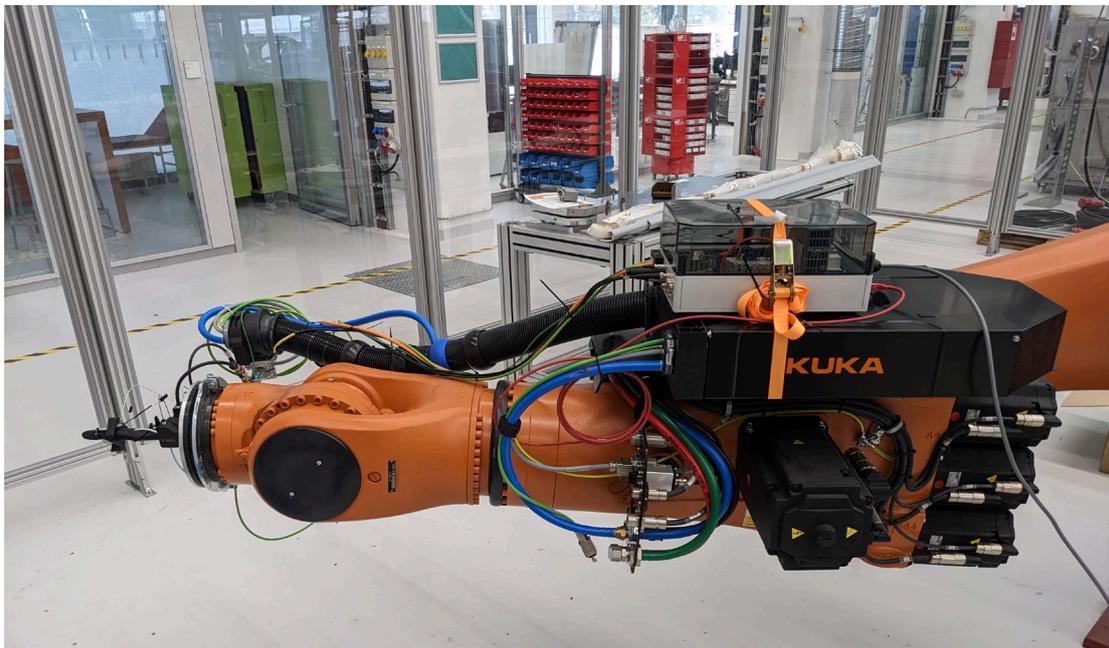


Bild 29: Prototypischer Aufbau mit einem KR360

Der prototypische Aufbau mit dem KR360 erlaubt bereits die Inbetriebnahme und Erprobung aller Einzelkomponenten sowie der verschiedenen Regelsysteme. Der finale Aufbau mit dem KR20 ist in Bild 30 dargestellt. Bei diesem werden alle Mess-, Steuer- und Medienleitungen durch eine flexible Energiekette bis zum Endeffektor geführt.

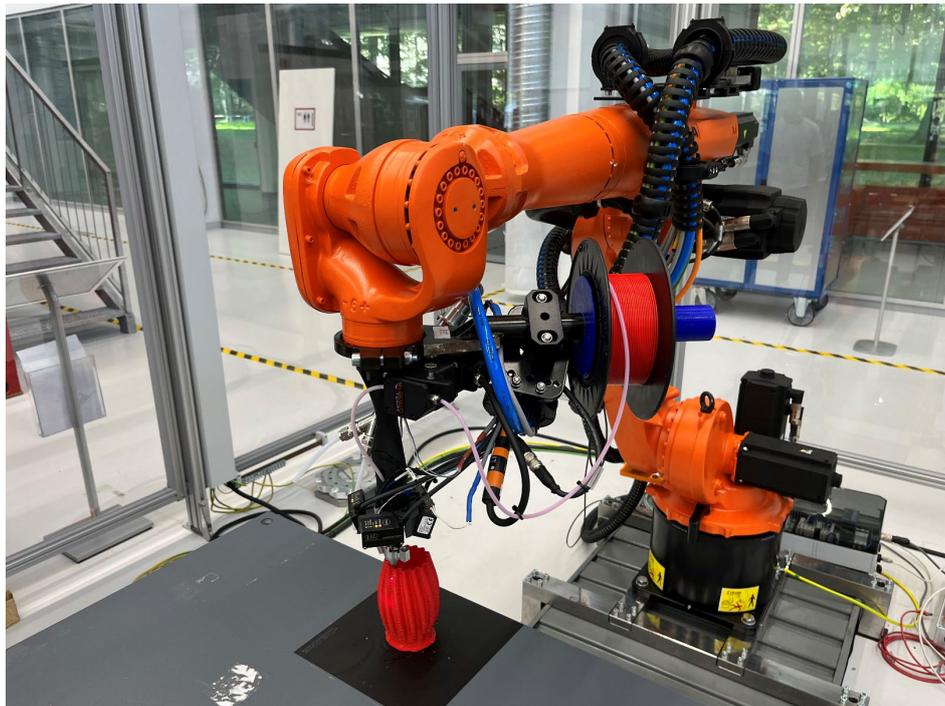


Bild 30: Finaler Aufbau der Produktionszelle mit einem KR20 während der Fertigung einer Testgeometrie aus biobasiertem PLA

## 2.4.2 Steuerungsarchitektur der Produktionszelle

Für die Realisierung der Produktionszelle spielt neben dem verwendeten Roboter insbesondere die Steuerungsarchitektur eine wichtige Rolle. Zur Umsetzung des Druckprozesses ist es dabei notwendig, die Druckperipherie, wie die Heizungen, die Abstandssensorik und den Extrudermotor, synchron zur Roboterkinematik von der CNC anzusteuern.

Für die Realisierung wird hierzu eine Beckhoff-Steuerung an die Kuka-Steuerung angeschlossen (entsprechend Bild 31), die per RSI (Robot Sensor Interface) mit dem Roboter kommuniziert. Eine vollständige Implementierung der Funktionen auf der in die Kuka Steuerung (KRC) integrierten SPS war aufgrund von Beschränkungen der dort verfügbaren Feldbusimplementierung nicht möglich, weshalb die zusätzliche Beckhoff-Steuerung notwendig wird. Bei dieser Architektur führt die externe Ansteuerung der einzelnen kinematischen Achsen des Roboters allerdings dazu, dass das Robotermerkmal der Absolutvermessung (d. h. Positionsfehlerkorrektur durch Kompensationen in der KRC) nicht nutzbar ist und der so angesteuerte Roboter eine wesentlich schlechtere Positioniergenauigkeit gegenüber der werksseitigen Steuerung aufweist.



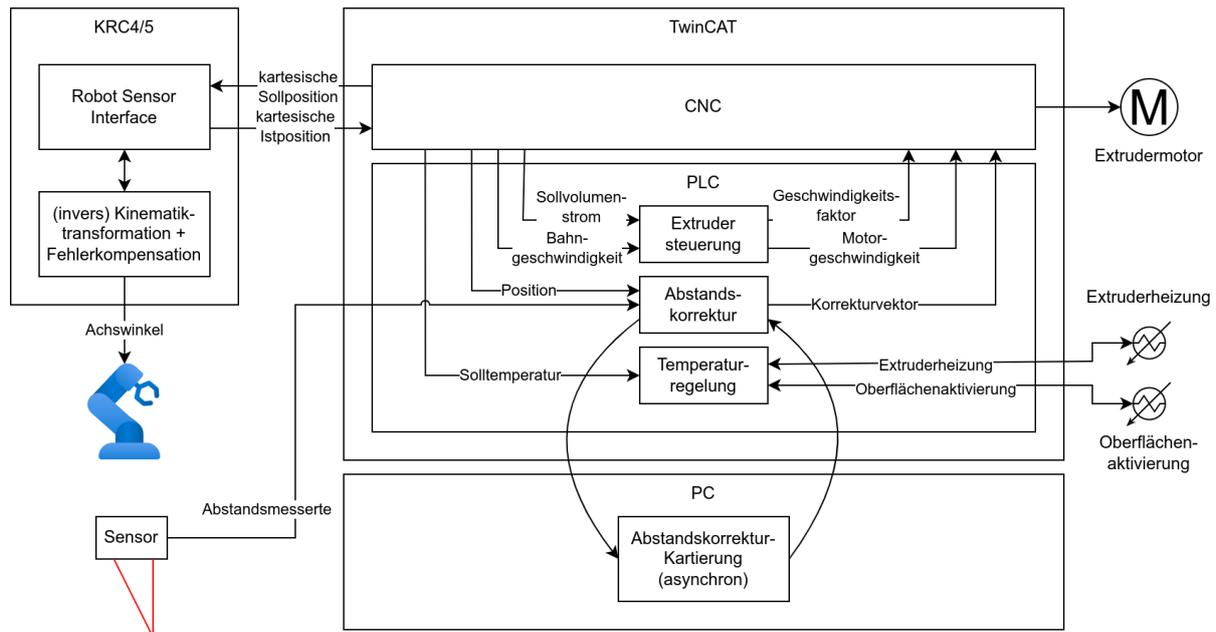


Bild 32: Umgesetzte Steuerungsarchitektur der Produktionszelle

Die Funktion der Extrudervorsteuerung wird als Funktionsbaustein in die Steuerung integriert. Sie erhält die Vorschubwerte über eine simulierte Achse in der CNC, welche synchron mit der Verfahrbewegung des TCP interpoliert wird und damit den idealen Volumenstrom in jedem Zeitschritt zur Verfügung stellt. Der tatsächliche Extruder ist dagegen als echte Achse eingebunden, die jedoch nicht mit der Bahn synchron interpoliert wird, sondern der durch die Vorsteuerung vorgegebenen Geschwindigkeit folgt. Weiterhin wird Oberflächenaktivierung und die Extruderheizung mit jeweils einer PID-Regelung integriert und parametrierbar. Eine umfangreiche Funktion stellt zudem die Höhenabstandsregelung und Korrektur dar. Dazu ist ein von der Echtzeitsteuerung gelöstes Kartierungsservice entwickelt worden, der die Messdaten der Sensoren verarbeitet und wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben aufbereitet. Die Steuerung ist zudem so programmiert, dass alle Druckfunktionen im G-Code steuerbar und parametrierbar sind. Dies entsprechenden Funktionen werden daher automatisch in den Postprozessoren für die verwendeten Slicer und Siemens NX benutzt.

### 2.4.3 Funktionselemente und Bahnplanung für das Hinterdrucken

Für die technische Anwendung ist die Fertigung von Funktionselementen wie Rippenstrukturen, Schraubdomen und Schnapphaken-Aufnahmen auf die Thermoformbauteile besonders interessant. Diese haben den Zweck, die Bauteile zu versteifen oder stellen einen Anbindungspunkt für angrenzende Komponenten dar.

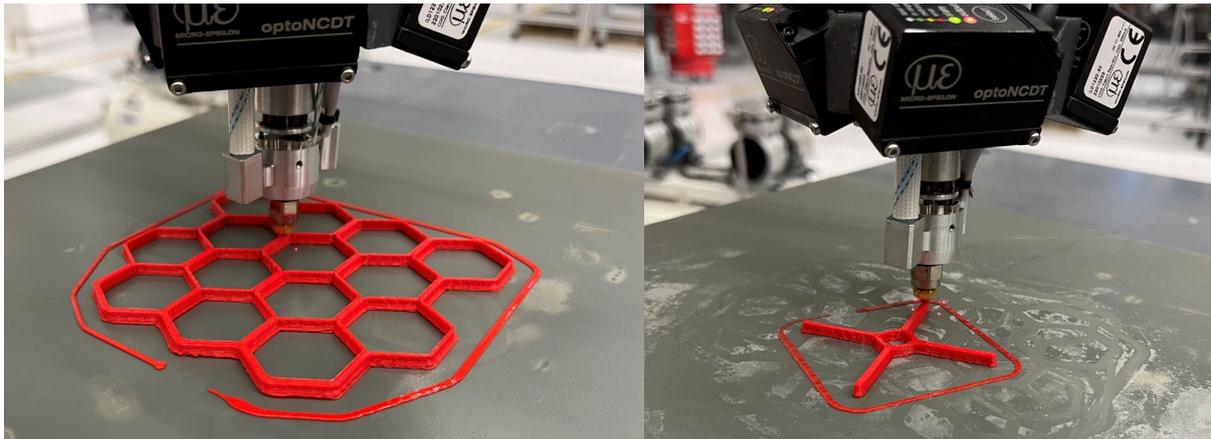


Bild 33: Funktionselemente wie Rippenstrukturen und Schraubdomen während des Drucks mit optimierten Druckstrategien

Die Bahnplanung ist mitentscheidend für die Effizienz und die Qualität des FFF-Prozesses. Obwohl mit dem entwickelten Endeffektor im Gegensatz zu vielen granulatbasierten Systemen ein Ab- und Ansetzen während des Fertigungsprozesses grundsätzlich möglich ist, zeigt sich im Vorhaben eine kontinuierliche, ununterbrochene Fertigung als vorteilhaft. Der Druckkopf wird so effizient wie möglich über das Bauteil geführt und Leerwege werden reduziert. Neben einer Effizienzsteigerung zeigt sich in den Untersuchungen hierdurch auch eine Verbesserung der Bauteilqualität. In den kommerziell verfügbaren Programmen zur Bahnplanung sind die Funktionen zur Steuerung der Fertigungsreihenfolge jedoch oftmals sehr eingeschränkt.

Zur optimalen Fertigung bedarf es daher bereits einer optimierten, verfahrensgerechten Konstruktion der Funktionselemente. Durch angepasste Geometrien ist so auch die effiziente Fertigung von Funktionselementen wie Rippenstrukturen und Schraubdomen in einem kontinuierlichen, geschlossenen Pfad möglich. Beispiele hierfür sind in Bild 33 gezeigt. Bei Geometrien wie diesen ist oftmals die Ablage von benachbarten Strängen notwendig. Dabei ist eine ausreichende Überlappung und Schweißung der Einzelstränge für die mechanischen Eigenschaften der Funktionselemente von besonderer Bedeutung

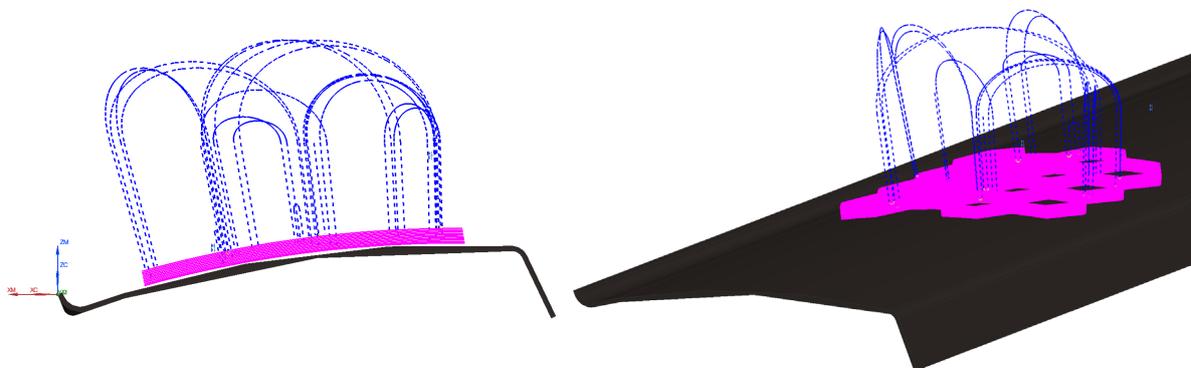


Bild 34: Bahnplanung auf gekrümmten Bauteiloberflächen mit Siemens NX

Für die mehrachsige Bahnplanung wird Siemens NX eingesetzt und durch einen eigens dafür entwickelten Postprozessor ergänzt (siehe Bild 34). Dieser konvertiert die von NX im CLS Format ausgegebenen Bahnen in anlagenspezifischen G-Code für die 5-Achs Druckbewegung und ergänzt Anweisungen zur Extruderansteuerung. Analog zur 2,5-D Bahnplanung mit Programmen wie Cura oder PrusaSlicer können dabei durch gezielte Modifikation der Druckgeometrie und gezielte Teilung des Bauteils weitgehend kontinuierliche Bahnen erzeugt werden, um die Umsetzvorgänge während einzelner Schichten zu reduzieren und damit die Effizienz und Qualität des Druckprozesses zu erhöhen. Zum Einmessen des Bauteils werden die Bahnen der ersten Schicht dabei zunächst ohne Extrusion abgefahren, um die Genauigkeit der Korrekturtabelle an dieser Stelle sicherzustellen. Der Druck erfolgt danach durchgehend mit zugeschalteter Höhenkorrektur.

#### 2.4.4 Skalierung auf seriennahes Demonstratorbauteil

Zur Erprobung und Validierung des Gesamtsystems werden Fertigungsversuche an verschiedenen Geometrien durchgeführt. Bild 35 zeigt die Produktionszelle bei der Fertigung einer Rippenstruktur aus ABS-Upcyclingfilament auf ein gekrümmtes ABS-Thermoformbauteil.

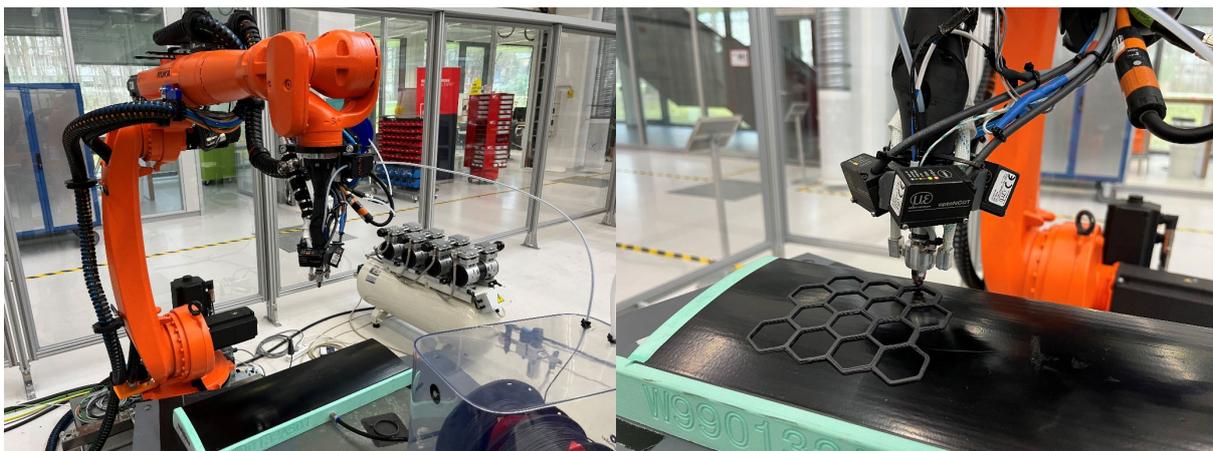


Bild 35: Produktionszelle bei der Fertigung einer Rippenstruktur aus ABS-Upcyclingfilament auf ein gekrümmtes ABS-Thermoformbauteil

Der Prozess wird an verschiedenen dünnwandigen Bauteilen und Geometrien erprobt. Dabei zeigen sich insbesondere der Vorgänge der Bahnplanung und des Einmessens als wichtige und gleichzeitig zeitintensive Arbeitsschritte. Bei der Fertigung des additiven Lagenaufbaus können bereits geringe Abweichungen im Einmessvorgang, in der Robotergenauigkeit, in der Bauteilform, der thermisch induzierten lokalen Bauteilverformung, aber z. B. auch der thermisch induzierten Ausdehnung des Druckkopfes zu lokalen Abweichungen in der Dicke der einzelnen Schichten führen. Besonders während der Fertigung der für die Anbindung wichtigen ersten Schicht kann dies zu Schwankungen in der erreichten Haftfestigkeit führen.

### 3 Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen die Eignung eines Hinterdruckverfahrens bestehend aus einer Kombination von Thermoformen und additiver Fertigung als Alternative zum Spritzgießen, insbesondere für große Bauteile und Kleinserien. Das Upcycling von Randzuschnitten aus dem Thermoformprozess ermöglicht zudem einen geschlossenen Materialkreislauf, wodurch Abfall reduziert und die verwendeten Materialien homogenisiert werden. Bei schlagzähen Kunststoffen wie ABS erweist sich die Tropfengröße der Elastomerphase als wichtiges Qualitätsmerkmal im Upcycling-Prozess.

Zur Bestimmung der Verdruckbarkeit der Filamente, der inter- und intralaminaren Festigkeiten innerhalb von additiv gefertigten Strukturen sowie der Haftfestigkeit von additiv gefertigten Strukturen auf den thermogeformten Substraten wurden im Vorhaben geeignete Verfahren beschrieben und getestet. Weiterhin wurden im Vorhaben Technologien im Bereich der Oberflächenaktivierung, der Abstandsregelung und des Kollisionsschutzes entwickelt, integriert und erprobt. Die entwickelte Methode zum Ausgleich von Höhenschwankungen kann während des Druckprozesses auch erhebliche Positionierfehler ausgleichen.

Die Untersuchungen zeigen die Notwendigkeit einer lokalen thermischen Aktivierung und einer aktiven Abstandsregelung für die Verfahrenskombination aus Thermoformen und additiver Fertigung auf. Um diese Technologien für die Serienfertigung technischer Bauteile zu befähigen, sollten die Methoden der lokalen thermischen Aktivierung und der aktiven Abstandsregelung in zukünftigen Arbeiten weiter untersucht und optimiert werden.

Die Erprobung an der geschaffenen Produktionszelle zeigt noch Einschränkungen bei der seriennahen Einsetzbarkeit des Prozesses. So ist die Streuung der erreichten Haftfestigkeit an der Roboteranlage insbesondere bei gekrümmten Bahnen hoch. Das resultiert teilweise aus einer hohen Druckgeschwindigkeit, beziehungsweise einer zu geringen Oberflächen-erwärmung. Den größten Einfluss hat aber wahrscheinlich die Positionsabsolutgenauigkeit des Roboters, welche sich für die erforderliche Prozessstabilität als nicht ausreichend zeigt. Weitere Gründe für die Probleme bei der Positionierung können auch in der großen Totzeit durch die externe Ansteuerung über Kuka RSI von ca. 50 ms liegen, welche die Reglerdynamik stark bremst. Auch die minimal mögliche Zykluszeit von 4 ms bei der Ansteuerung über RSI ist relativ groß.

In einem zukünftigen Projekt sollte aus diesen Gründen der Einsatz einer 5-Achs Portalkinematik für die Verfahrenskombination geprüft werden. Durch die steifere Kinematik verspricht diese Bauart nicht nur eine höhere Genauigkeit, als sie mit Industrierobotern (aller Hersteller) heute erreichbar ist, sondern auch eine bei gegebener Genauigkeit wesentlich höhere erreichbare Druckgeschwindigkeit. Hierzu könnte der im Vorhaben entwickelte Endeffektor mit Druck- und Extrudertechnik fast unverändert weiterverwendet werden. Alternativ ist auch ein wesentlich größerer Düsendurchmesser denkbar, da so die

Anforderungen an die Genauigkeit sinken und die Druckgeschwindigkeit gesteigert werden kann. Hierzu ist allerdings voraussichtlich eine größere Anpassung des entwickelten Prozesses nötig, da der hier entwickelte Druckkopf einen maximalen Düsendurchmesser von 1,2 mm aufweist und durch die verfügbare Heizleistung limitiert ist. Weiterhin ist der verwendete Düsendurchmesser stets mit der erreichbaren Geometrieauflösung abzuwägen. Während die Anforderungen an die kinematische Genauigkeit beim Einsatz einer 3 – 4 mm Düse deutlich sinken, verringert sich das Auflösungsvermögen und die Maßhaltigkeit der gefertigten Funktionselemente massiv. So wäre eine einfache Umsetzung von großflächigen Rippenstrukturen denkbar, während sich die Fertigung von Schraubdomen und Schnapphaken-Aufnahmen schwieriger gestalten würde.

## 4 Literaturverzeichnis

- [Aoki1987] AOKI Y. Dynamic viscoelastic properties of ABS polymers in the molten state. 5. Effect of grafting degree. In: *Macromolecules*, 1987. **20**(9), S. 2208–2213.
- [ASTM4541] ASTM INTERNATIONAL. D4541 - 17, *Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*. West Conshohocken, PA, USA, 2022. DOI: 10.1520/D4541-17
- [Bunoza2022] BUNOZA I. *Entwicklung und Umsetzung eines kompakten Druckkopfes für die mehrachsige Additive Fertigung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, ISW, Universität Stuttgart, 2022.
- [Dillon1982] DILLON M. und M. BEVIS. The microstructure and deformation of model ABS compounds. In: *Journal of Materials Science*, 1982. **17**(7), S. 1903–1914.
- [Gerlach2022] GERLACH J. *Entwicklung einer Steuerung mit Höhenregelung für das roboterbasierte FFF 3D-Druck-Verfahren*. Unveröffentlichte Studienarbeit, ISW, Universität Stuttgart, 2022.
- [Gibson2021] GIBSON I., D. ROSEN, B. STUCKER und M. KHORASANI. *Additive Manufacturing Technologies*. 3. Auflage. Cham: Springer, 2021. ISBN 978-1-4939-2113-3
- [Han2020] HAN P., A. TOFANGCHI, S. ZHANG, A. DESPHANDE und K. HSU. Effect of in-process laser interface heating on strength isotropy of extrusion-based additively manufactured PEEK. *Procedia Manufacturing*, 2020. **48**, S. 737–742. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.107
- [Illig2016] ILLIG (Hg.) und P. SCHWARZMANN. *Thermoformen in der Praxis*. 3. Auflage. München: Hanser, 2016. ISBN 978-3-446-44403-4
- [ISO9283] ISO 9283:1998-04. *Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods*. Beuth, Berlin, 1998.
- [Javierre2006] JAVIERRE C., I. CLAVERÍA, L. PONZ, J. AÍSA und A. FERNÁNDEZ. Influence of the recycled material percentage on the rheological behaviour of HDPE for injection moulding process. In: *Waste Management*, 2006. **27**, S. 56–663. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.03.005

- [Kämpf1972] KÄMPF G. und H. SCHUSTER. Struktur und Eigenschaften von ABS-Polymeren. IX. Quantitative Untersuchungen zur Morphologie von ABS-Polymerisaten. In: *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1972. **27**(1), S. 81–98.
- [Kuka2022] Kuka AG. *Produkt-Information KR20 R1810-2*. 2018. Verfügbar unter: [https://xpert.kuka.com/service-express/portal/project1\\_p/document/kuka-project1\\_p-basic\\_AR32608\\_de](https://xpert.kuka.com/service-express/portal/project1_p/document/kuka-project1_p-basic_AR32608_de)
- [Malzoni2022] MALZONI A. *Entwicklung eines Verfahrens zur Online-Höhenmessung im FFF-Prozess*. Unveröffentlichte Studienarbeit. ISW, Universität Stuttgart, 2022.
- [Michler1992] MICHLER G. H. *Kunststoff-Mikromechanik: Morphologie, Deformations- und Bruchmechanismen*. 1. Aufl. München: Hanser, 1992. ISBN 3–446–17068–5
- [Moore1973] MOORE J. D. Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) - a review. In: *Composites*, 1973. **4**(3), S. 118–130.
- [Münstedt1981] MÜNSTEDT H. Rheology of rubber-modified polymer melts. In: *Polymer Engineering & Science*, 1981. **21**(5), S. 259–270.
- [Reindl2023] REINDL T., F. GUTBROD und C. BONTEN. Kombiniertes Thermoform- und 3D-Druckprozess. In: *28. Stuttgarter Kunststoffkolloquium*, Stuttgart, 2023. S. 243–250. ISBN 978–3–9818681–3–5
- [Schaffert2021] SCHAFFERT J. *Entwicklung und Bewertung von Maschinenkonzepten für das 5-achsige direkte Bedrucken von thermogeformten Bauteilen*. Unveröffentlichte Studienarbeit, ISW, Universität Stuttgart, 2021.
- [Schneider2021] SCHNEIDER H., A. BOLLIN, K. DILGER und S. HARTWIG. Bestimmung der Haftfestigkeit organischer Haftvermittlerschichten mit Hilfe additiv gefertigter Prüfkörper. In: *4. Niedersächsisches Symposium Materialtechnik*, 2021. DOI: 10.21268/20210519-5
- [Stabenow1973] STABENOW J. und F. HAAF. Morphologie von ABS-Pfropfkautschuken. In: *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1973. **29**(1), S. 1–23.
- [Wolf2023] WOLF M., V. MAIER, A. VERL. Method for the Calculation of Local Bead Volume in Multi-Axis Additive Manufacturing. In: *Procedia CIRP*, 2023. **120**, S. 1244–1249. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.156

- [Wulle2019] WULLE F., W. BUBECK, A. ELSER, M. WOLF und A. VERL.  
Trajektorienplanung mittels modellprädiktiver Vorsteuerung eines FDM-  
Druckkopfes. In: 26. *Stuttgarter Kunststoffkolloquium*, Stuttgart, 2019.  
S. 83–88. ISBN 978–3–9818681–1–1
- [Zosel1972] ZOSEL, A. Viskoelastisches Verhalten von ABS-Polymeren in der  
Schmelze. In: *Rheologica Acta*, 1972. **11**(2), S. 229–237.