

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	35662/01	Referat	31	Fördersumme	293.035,00 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	---------------------

Antragstitel	Materialextrusion von biobasierten Kunststoffgranulaten mit der multi-axialen additiven Fertigung zur ressourcenschonenden Produktion von Anwendungen aus der Automobilindustrie
---------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Stichworte	Produkte/Materialien, Verfahrenstechnik/Prozesse Produktionssystem, 3D-Druck
-------------------	---------------------------------------------------------------------------------

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
29 Monate	01.02.2021	30.06.2023	

Zwischenberichte	1
------------------	---

Bewilligungsempfänger	RWTH Aachen Werkzeugmaschinenlabor (WZL) Lehrstuhl für Produktionssystematik Abteilung Fahrzeugproduktion Campus-Boulevard 30 52074 Aachen	Tel +49 151 43166992 Fax +49 241 80 22293
		Projektleitung Jan Schenk
		Bearbeiter 2

Kooperationspartner	Peiseler GmbH & Co. KG, Remscheid Olaf Schaupp 3BOTS 3D Engineering GmbH, Berlin Andreas Jankowsky
----------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Der Einsatz von Additive Manufacturing (AM) bringt zahlreiche Vorteile mit sich, wie verkürzte Time-to-Market Zyklen, hohe Produktinnovation und Individualisierung. Es wird erwartet, dass diese Technologie zukünftig zu einer ökologischen nachhaltigeren Produktion beiträgt, um Verbesserungen durch Materialeinsparungen, Abfallvermeidung und neue Recyclingtechniken zu ermöglichen.

Ziel des Projektes war es daher...

- a) ...einen Granulatextruder zur Verarbeitung von biobasierten Kunststoffen zu entwickeln
- b) ...einen 5-Achsigem 3D-Drucker zur stützstrukturfreien Herstellung von Bauteilen zu entwickeln und aufzubauen
- c) ...Anwendungen aus dem automobilen Betriebsmittelbau additiv herzustellen

Das Extrusionskonzept wurde auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum erarbeitet, um neben der Extrusion von Kunststoffgranulaten, eine Bahnplanungsstrategie zu entwerfen, die einen stützstrukturfreien Druck von Bauteilen anhand eines formelement-orientierten Fertigungsansatzes ermöglicht. Das Konsortium bestehend aus Anlagenentwickler, Systemhersteller und Forschungseinrichtung sah vor, einen Demonstrator der Anlage aufzubauen, um insbesondere das Extrusionskonzept und das Bahnplanungsmodell physisch zu untersuchen und in das Unternehmensportfolio der KMUs aufzunehmen. So wurde das Potential einer nachhaltigen Produktion im Umgang mit Kunststoffen am Beispiel des automobilen Betriebsmittelbaus dargestellt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Der Arbeitsplan war in vier wesentliche Arbeitspakete gegliedert.

AP1: Extrusionskonzept und Maschinenstruktur

Das Arbeitspaket 1 A war unterteilt in Vorarbeiten im Bereich der Anforderungsanalyse und die eigentliche Entwicklung des Extruders. Im Kontext des Projektes BioME wurden Anforderungen aus verschiedenen Perspektiven an das Extrusionskonzept gestellt. Diese betrafen die Eingangsmaterialien, den Prozess und den Anwendungsfall. Der zweite Schwerpunkt des ersten Arbeitspaketes lag in der Anlagenplanung und Maschinenkonzeption. Ausgehend von ausgewählten Betriebsmitteln wurden die Anlagenmodule dimensioniert und die notwendigen Bewegungsfreiheitsgrade ausgelegt.

AP2: Aufbau eines Demonstrators (3D-Drucker)

Das zweite Arbeitspaket beinhaltete den Aufbau eines Anlagendemonstrators. Im Gegensatz zu einem hohen Simulationsaufwand zur Analyse des Fließverhaltens von Kunststoffschmelze bei der Extrusion bestand das Alleinstellungsmerkmal dieses Projekts in einer physischen Validierung des Extrusionskonzepts in einer frühen Projektphase. Das Ergebnis des zweiten Arbeitspakets war der Aufbau einschließlich der Inbetriebnahme der Extrusionsanlage, sodass die Extrusion und die Bahnplanung physisch getestet werden können.

AP3: Bahnplanung zur Reduzierung von Stützstruktur

Zur Verbesserung der Ressourceneffizienz wurden im nächsten Arbeitspaket der Prozess zur Herstellung von supportfreien Betriebsmitteln mittels des Extruders zur Verarbeitung von Kunststoffgranulaten und hochvolumigen Extrusionsraten untersucht. Dazu wurde in einer Zusammenarbeit mit der Firma ModuleWorks eine sich in Entwicklung befindliche Bahnplanungssoftware auf die Anlage angepasst. Zudem wurde die Anlagentechnik auf Grundlage von Versuchsergebnissen weiter optimiert und die Leistungsfähigkeit des Systems überprüft.

AP4: Demonstration ressourceneffizienter 3D Druck für den Betriebsmittelbau

Abschließend erfolgten anhand der entwickelten Anforderungen Testdrucke der Betriebsmittel und anschließende Evaluierung der Druckqualität in Form von Testberichten. Dazu wurden verschiedene Polymere aus den Bereichen Referenz, Biobasiert und Rezykliert identifiziert und getestet. Abschließend wurden aus den Materialien gedruckte Bauteile hinsichtlich des Grads der Lebensdauer auf der Grundlage von Bauteildefekten bewertet.

Ergebnisse und Diskussion

Im Zuge des Forschungsprojekts ist eine Extrudereinheit modelliert und physisch aufgebaut worden. Drucktests gaben Aufschluss über das Plastifizierungs- und Austragsverhaltens. Zudem konnte die Extrudereinheit in eine selbst entwickelte multiaxiale Anlagentechnik erfolgreich integriert werden. Für die Extrusionsanlage wurde ebenfalls die Bettanhaftung von Druckbauteilen untersucht, da diese für den multiaxialen Druck von besonderer Wichtigkeit ist. Im Rahmen des dritten Arbeitspakets wurde die Anlagentechnik optimiert und eingefahren. Zudem erfolgte im Zuge dieses Arbeitspaketes die Auslegung der Bahnplanung. Im Zuge dessen wurde eine anwendungsfreundliche Bahnplanung als essenziell identifiziert, dem wurde mithilfe einer Mittelumwidmung zum Erhalt weiterer Kompetenzen des externen Partners ModuleWorks Rechnung getragen. Außerdem wurden Änderungen am Extruder vorgenommen, um diesen besser auf den Anwendungsfall abzustimmen. Im Zuge dessen wurde auch die Steuerung in die Anlagentechnik integriert. Die Hardware wurde im Rahmen des dritten Arbeitspakets ebenfalls optimiert, indem die Schneckenengeometrie angepasst und das Dichtungskonzept verbessert wurde. Bei der Erstellung von Softwarelösungen zur Erstellung von Maschinencode, stellte die Abstimmung zwischen Software und Steuerung eine Herausforderung dar. Insgesamt haben die Arbeiten im dritten Arbeitspaket die Anlage befähigt, Bauteile herzustellen. Im Zuge des vierten Arbeitspakets wurden ausgewählte Bauteile und Betriebsmittel für die Fahrzeugproduktion demonstriert. Anhand einer Anforderungsanalyse wurden ein Dreifachverteiler, ein Grundkörper eines 3D-Shim-Knotens und ein Schraubendom für den Druck ausgewählt. Mit PLA, PE-Wood Compound und PETG Rezyklat wurden drei verschiedenen Granulate als Versuchsmaterialien ausgewählt. Die, aus den ausgewählten Materialien, gedruckten Bauteile wurden auf charakteristische Defekte und ihre Lebensdauer untersucht. Diese Ergebnisse machten einen direkten Vergleich der Lebensdauer und der Fertigbarkeit der Materialien möglich. Beispielsweise konnte festgestellt werden, dass eine niedrigere Drucktemperatur die Lebensdauer des PE-Wood Compounds verbesserte. Außerdem konnten verschiedene Ursachen für Bauteildefekte identifiziert werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Der Beitrag „Nachhaltiger 3-D-Druck durch multiaxiale Maschinensysteme und neue Stoffkreisläufe“ erschien am 15. Oktober 2021 in Ausgabe 5 der Zeitschrift maschinenbau. Weiterhin erfolgte zu Beginn des Projekts eine Pressemitteilung (<https://www.wzl.rwth-aachen.de/cms/WZL/Das-WZL/Presse-und-Medien/Aktuelle-Meldungen/~oazih/Nachhaltiger-3D-Druck-durch-multiaxiale/>). Auf der Formnext 2021 wurde der erste Demonstrator (Ender 3) präsentiert und erhielt großes Interesse. Weiterhin wurden in den Folgejahren auf der Formnext 2022 und 2023 Jahren 5-achsig gedruckte Bauteile von beiden Anlagen präsentiert sowie das Forschungsprojekt BioME vorgestellt. Auf der TCT 3SIXTY in Birmingham, UK wurde am 19. April 2022 der Vortrag „Material extrusion of bio-based plastic pellets with multi-axial additive manufacturing for resource-saving production of applications from the automotive industry“ über das Forschungsprojekt BioME gehalten. Auf dem Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium (AWK) mit dem Titel „Empower Green Production“ wurde am 11. und 12. Mai 2023 die BioME-Anlage und das Forschungsprojekt vor-Ort und in einem digitalen Rundgang als Demonstrator vorgestellt.

Fazit

Innerhalb des Forschungsprojektes BioME wurden während des Aufbaus des Gesamtsystems von Bahnplanung bis fertigem Bauteil einige Herausforderungen aufgedeckt und bewältigt. Dabei wurde eine funktionale Anlagentechnik erstellt, mit der Kunststoffgranulate verarbeitet werden können. Mit der Fülle der adressierten Themen war es möglich, ein Gesamtbild zum Forschungsthema aufzuzeigen, es konnte jedoch nicht jedes Thema mit großer Tiefe erforscht und mit gleich großem Erfolg umgesetzt werden.

Neben Corona und damit verbundenen Lieferengpässen stellten auch die Beschaffung von geeignetem Granulatmaterial, die komplizierte Programmierung der Siemenssteuerung und Personalwechsel während des Projekts Herausforderungen dar.

Aus den Ergebnissen des Forschungsprojekts BioME ergeben sich praktische Themenstellungen und weitere Forschungsfelder. Die Anlagentechnik kann weiter optimiert werden, insbesondere im Hinblick auf eine Kostenoptimierung von Komponenten, z.B. der Steuerung oder der Dreh- und Schwenkeinheit. Auch das Extruderkonzept besitzt weiteres Potential, das beispielsweise in einen noch leistungsfähigeren Extruder umgesetzt werden kann. Die Software zur Bahnplanung besitzt ebenfalls weiteres Potential, das erschlossen werden kann.

Aus der Betrachtung der gesamten Prozesskette eines Recyclings ergeben sich die weiteren Forschungsfelder. Während BioME sich auf die Fertigung und Nutzung von biobasierten Material konzentrierte, wurden die Forschungsfelder des Recyclings und Rohmaterials nur am Rande betrachtet. Hier bieten sich weitere potentielle Forschungsfelder an, sowohl in der tieferen Betrachtung einzelner Bereiche als auch in der gesamtheitlichen Betrachtung des Materialzyklus.

1 Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	1
1 Inhaltsverzeichnis	4
2 Abbildungsverzeichnis	5
3 Tabellenverzeichnis	6
4 Zusammenfassung	7
5 Einführung/Motivation	7
6 Methodik: Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden	9
7 Projektergebnisse	10
7.1 AP 1: Extrusionskonzept und Maschinenstruktur	10
7.1.1 AP1A: Extrusionskonzept	11
7.1.2 AP1B: Maschinenstruktur	16
7.2 AP2: Aufbau eines Demonstrators (3D-Drucker)	18
7.3 AP3: Bahnplanung zur Reduzierung von Stützstruktur	21
7.4 AP4: Demonstration ressourceneffizienter 3D Druck für den Betriebsmittelbau	25
7.4.1 Betriebsmittel	25
7.4.2 Ausgewählte Biopolymere und Rezyklate	27
7.4.3 Druck der Betriebsmittel & Untersuchung der Lebensdauer	28
8 Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge	31
9 Fazit/Ausblick	31
10 Literaturangaben	33
11 Anlagen/Anhang	33

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-1: Montagehilfsmittel am Beispiel der Fahrzeugmontage der Ford-Werke GmbH in Köln	8
Abbildung 6-1: Lösungsbausteine des Forschungsvorhabens BioME	10
Abbildung 7-1: Anforderungsanalyse an das Extrusionskonzept aus Projektperspektive	11
Abbildung 7-2: Schmelztemperatur und E-Modul für verschiedene Biobasierte Kunststoffe .	13
Abbildung 7-3: Schnittdarstellung des Extrusionssystems mit zwei in Reihe geschalteten Schnecken	14
Abbildung 7-4: Darstellung des gesamten Extruderaufbaus mit Antriebssystem.....	16
Abbildung 7-5: Definition der Arbeitshöhe und des Arbeitsraumes	17
Abbildung 7-6: Bewegungsmodell der Extrusionsanlage mit Dreh- und Schwenkeinheit	17
Abbildung 7-7: Probesteile (links), Aufbau eines 5-Achs Druckers (rechts)	19
Abbildung 7-8: Umsetzungsmöglichkeiten eines Heizbettes	20
Abbildung 7-9: Versuche mit 3D-gedruckter Schneckenengeometrie und Silikonöl	21
Abbildung 7-10: CAD-Darstellung des finalen Extruders.....	22
Abbildung 7-11: Ergebnisse der statischen Extrusion von PLA.....	23
Abbildung 7-12: Links: statische Extrusion; Mitte und rechts: Abgelegter Strang einer dynamischen Extrusion	23
Abbildung 7-13: Links: Bauteil im CAD-Programm; rechts: Anzeige des Machinencodes und der automatisch erzeugten Segmentierung (rot).....	24
Abbildung 7-14: Druck einer im Programm von ModuleWorks geslicten Basisgeometrie.....	25
Abbildung 7-15 Dreifachverteiler zur Aufteilung von Gasvolumenströmen.....	26
Abbildung 7-16 Grundkörper eines 3D-Shim-Knotens	26
Abbildung 7-17 Ausschnitt des Schraubendoms.....	27
Abbildung 7-18: Kritische Bauteildefekte sortiert nach Kunststoffen im Verhältnis zu ihrem Grad der Lebensdauer	29
Abbildung 7-19: Beispielhaftes Betriebsmittel aus PLA.....	29
Abbildung 7-20 Beispielhaftes Betriebsmittel aus PE-Wood Compound.....	30
Abbildung 7-21 Beispielhaftes Betriebsmittel aus PETG Rezyklat	30
Abbildung 7-22: Kumulierter Grad der Lebensdauer von PLA, PE-Wood Compound und PETG Rezyklat	30
Abbildung 9-1: Ausschnitt der adressierte Themen in BioME	32

Abbildung 9-2: Einordnung des Forschungsprojekt BioME	32
Abbildung 11-1: AP 2.2 Darstellung des entwickelten Zwei-Achsen-Systems der Firma peiseler	33
Abbildung 11-2: AP 2.2 Darstellung einer Bauraumbetrachtung bei Schwenkung der 4. Achse	33
Abbildung 11-3: AP 3.1 Statische Extrusionsversuche bei konstanter Drehzahl der oberen Schnecke	34
Abbildung 11-4: AP 3.2 Vergleich der CAD-Modelle des ursprünglichen (links) und des optimierten Extruders (rechts)	34
Abbildung 11-5: AP 3.2 Darstellung der möglichen Dichtungskonzepte am Übergang zwischen den Schnecken.....	34
Abbildung 11-6: AP 3.2 Einzelkomponenten und Teilzusammenbau des optimierten Extruders	35
Abbildung 11-7: AP 3.2 Druck der ersten Schichten eines 5-Achs Testbauteils.....	35
Abbildung 11-8: AP 3.2 5-Achsiger Bauteildruck des Bauteils „Schweißvorrichtung“	35
Abbildung 11-9: AP 4.1 Anforderungsanalyse der Eigenschaften von Betriebsmitteln I	36
Abbildung 11-10: AP 4.1 Anforderungsanalyse der Eigenschaften von Betriebsmitteln I	36
Abbildung 11-11: AP 4.3 Anforderungen für die Bahnplanungsoptimierungen I.....	36
Abbildung 11-12: AP4.3 Anforderungen für die Bahnplanungsoptimierungen II.....	37
Abbildung 11-13: AP 4.3 5-Achsiger Bauteildruck des Bauteils „Schweißvorrichtung“ in Originalgröße	37
Abbildung 11-14: AP 4.3 Untersuchung der Produkteigenschaften bei Bauteilversagen I.....	38
Abbildung 11-15: AP 4.3 Untersuchung der Produkteigenschaften bei Bauteilversagen II....	38
Abbildung 11-16: AP4.4 Optimierung der Gesamtanlage zur verbesserten Fertigung von Betriebsmitteln.....	38

3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung von Biobasierten Kunststoffen	12
Tabelle 2: Empfohlene Betttemperatur und Bettbeschichtung bei verschiedenen Druckmaterialien	20
Tabelle 3: Eigenschaften von PLA (NatureWorks LLC)	28
Tabelle 4: Eigenschaften von PE-Wood Compound (FKuR Kunststoff GmbH).....	28
Tabelle 5: Eigenschaften von PETG (Nobufil GmbH)	28

4 Zusammenfassung

Innerhalb des Forschungsprojekts BioME wurde die multi-axiale Fertigung von biobasierten Kunststoffgranulaten für Anwendungen aus dem Automobilbau untersucht. Dazu wurde zunächst ein Anlagensystem samt Extruder auf Grundlage der Anforderungen von biobasierten Kunststoffen konzeptioniert. Für einen ersten Erfahrungsgewinn im Bereich der multi-axialen Fertigung wurde eine Low-Cost Demonstrator-Anlage entworfen, die Erkenntnisse hieraus wurden auf die große Anlagentechnik übertragen. Neben der Inbetriebnahme und Ableitung von Parameter-Sets für verschiedene Kunststoffe wurde auch die Bahnplanung zur Generierung von geeignetem Maschinencode betrachtet, hierzu entstand während des Projektes eine Kooperation mit ModuleWorks im Rahmen eines Unterauftrags. Die Fertigstellung der Anlagentechnik verzögerte sich im Projekt leider aufgrund von Lieferengpässen, insbesondere bei benötigter Komponenten für den Umbau der Steuerung der Anlage. Schlussendlich konnte jedoch eine vollintegrierte Anlage aufgebaut und Inbetrieb genommen werden, mit der Bauteile aus dem Automobilbereich gedruckt werden konnten. Anhand dieser Bauteile konnten unterschiedliche Untersuchungen der Lebensdauer von biobasierten Betriebsmitteln durchgeführt werden. So wurde die Lebensdauer anhand der Bauteilqualität und anhand von Zugfestigkeiten untersucht und die verschiedenen Materialien klassifiziert werden.

Der im Projekt entwickelte Extruder ist besonders kompakt und bietet damit in den Achsen deutlich mehr Stabilität, als auf dem Markt erhältliche Systeme, die häufig aus einem langen Einschneckenextruder bestehen. Weiterhin besteht das Anlagensystem die Erhöhten Anforderungen an Präzision in den Achsen, die aus der Multi-Achsialität folgt. Die in Kooperation mit ModuleWorks verwendete Softwarelösung zur Generierung von Maschinencode kommt der anwenderfreundlichen Softwarelösungen aus dem 3-achsigen 3D-Druck bereits sehr nahe und ist in der Lage sinnvollen Maschinencode für Multi-Achs-Systeme zu erzeugen. Die Verwendung eines Granulatextruders mit hoher Austragsrate bietet zudem gegenüber dem etablierten filamentbasierten Verfahren mögliche Vorteile in der Schichtanhaftung. Zusätzlich ermöglicht es qualitativ hochwertige Bauteile aus konventionellen granulatbasierten Biopolymeren ohne Stützstrukturen in kurzen Produktionszeiten zu fertigen.

5 Einführung/Motivation

Auf dem ersten Blick bieten Kunststoffe sehr viele Möglichkeiten, technische Lösungen zu liefern, die beispielsweise im Automobilbau aufgrund des enormen Leichtbaupotentials zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und damit zu weniger CO₂ Ausstoß führen. Andererseits gelangt immer mehr Kunststoff in die Umwelt, was für die Tierwelt, aber auch für den Menschen zu einem größeren Problem wird. Da Kunststoffe normalerweise auf Basis von fossilen Brennstoffen hergestellt werden, sind die Preise stark von den schwankenden Rohstoffpreisen abhängig. Schwierig gestaltet sich auch die durchzuführende Entsorgung, die mit hohen Kosten und Aufwand verbunden ist. Eine unsachgerechte Beseitigung in der Natur kann durch hohe Beständigkeit der Kunststoffprodukte zu Umweltschäden führen.

In der Produktionstechnik finden Basis- bis hin zu Hochleistungskunststoffe immer größere Anwendung, um schnelle und kostengünstige Lösungen herzustellen. Insbesondere bietet die additive Fertigung (engl. Additive Manufacturing, kurz AM) ein enormes Potential unterschiedliche Kunststoffe zu verarbeiten und Schicht für Schicht zu einem Bauteil herzustellen. Durch

die additive Fertigung, die einen minimalen Materialeinsatz ermöglicht, besteht prinzipiell das Potenzial, den Herstellprozess ressourcenschonend zu gestalten.¹ Große Stärken besitzt die kunststoffbasierte additive Fertigung im Druck von sogenannten Betriebsmitteln im Automobilbau. Führende Fahrzeughersteller, wie z.B. Ford zeigen, dass investitionsgünstige 3D-Drucker zur Herstellung u.a. von Montagevorrichtungen eingesetzt werden können (s. Abbildung 5-1)². Der Karosseriebau nutzt die additive Fertigung für Elemente von Positionierlehren in Schweißprozessen von Karosseriebauteilen. Der Einsatz führt zu hohen Kosten- und Zeiteinsparungen in Entwicklungs- und Anlaufphasen, da geometrisch komplexe und leichtere Bauteile zur Auflage genutzt werden können³. Individuelle und schnelle Lösungen können durch den Einsatz der additiven Fertigung ermöglicht werden und wirtschaftliche Einsparungen gegenüber kostenintensivem Outsourcing oder konventionell hergestellten Bauteilen für produzierende Unternehmen generieren.



Abbildung 5-1: Montagehilfsmittel am Beispiel der Fahrzeugmontage der Ford-Werke GmbH in Köln

Der Markt für 3D-gedruckte Betriebsmittel verwendet größtenteils technische, nicht abbaubare Kunststoffe⁴. Der heutige Fokus der Materialentwicklung für den 3D-Druck liegt in der Eigenschaftsoptimierung von technischen Kunststoffen. Hier geht es um die Optimierung der Eigenschaftsperformance von Kunststoffen, die überwiegend aus nicht nachwachsenden Rohstoffen hergestellt und nicht recycelbar sind. Der Begriff Biopolymer umfasst die Gruppe der biologisch abbaubaren Kunststoffe, welche aus nachwachsenden Rohstoffen gestellt sind. Erste Materialentwicklungen hin zu einem nachhaltigeren Umgang mit der Natur zeigt das Beispiel Polylactide, kurz PLA. Dieser Kunststoff basiert auf Polymilchsäuren und zählt zu synthetischen Polymeren, die der Gruppe der Polyester angehören. Sie werden aus nachwachsenden Ressourcen hergestellt, sind jedoch nicht natürlich abbaubar bzw. kompostierbar. Die Bandbreite von recycelbaren Materialien für die additive Fertigung ist gering. Der Druckprozess mittels filament-basierendem Fused Layer Modeling (FLM), PolyJetting etc. besitzt ein eingeschränktes Entwicklungspotential hinsichtlich der Extrusion von Polymeren, da zwar erste Bi-

¹ Coupek (2018) - Reduction of Support Structures and Building Time by Optimized Path Planning Algorithms in Multi-axis Additive Manufacturing

² Ultimaker (2019) - Ford: Reinventing efficient manufacturing using 3D printing

³ 3Dnatives (2019) - Audi verwendet mehr Kunststoff-3D-Druck in Produktion

⁴ Stratasy (2022) - Volvo Trucks' Slashes Time and Cost of Tool Production with Additive Manufacturing

opolymere verarbeitet werden können, aber beschränkte Austragsraten zu langen Prozesszeiten führen. Die additive Fertigung erfordert neue Herangehensweisen, um durch andere Extrusionsverfahren materialflexibler zu werden und kürzere Prozesszeiten zu erzielen.

Ein weiteres Entwicklungspotential besitzt die kunststoffbasierte additive Fertigung hinsichtlich des Materialausnutzungsgrades⁵. Die additive Herstelltechnik vermittelt den Eindruck einer 100 %-igen Ressourceneffizienz, da gegenüber zerspanenden Fertigungsverfahren ausschließlich Material hinzugefügt wird. Jedoch lässt sich bei genauerer Betrachtung erkennen, dass bei einem klassischen 3-achsigen Kinematikaufbau von 3D-Druckern Stützstrukturen erzeugt werden müssen, um Bauteilüberhänge zu fertigen. Aus ökonomischer Sicht fallen nach heutigem Kenntnisstand 77 % der Kosten in der additiven Fertigung bei der Nacharbeit an, um z.B. Stützstrukturen zu entfernen⁶. Entfernte Stützstrukturen sind Abfälle, die keine Wiederverwendung ermöglichen. Der heutige 3D-Druck soll dementsprechend weiterentwickelt werden, um anwendbare Lösungen für die Reduktion von Stützstrukturen bereitzustellen.

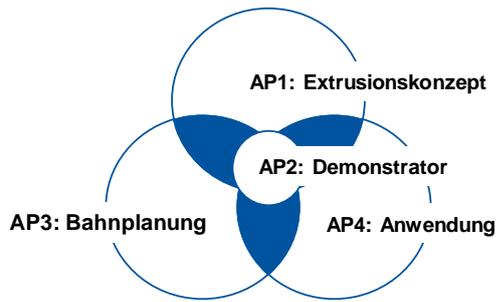
6 Methodik: Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im anspruchsvollen Wettbewerbsumfeld der Industrie sind Themen wie Ressourcenschonung und Kosteneffizienz von großer Bedeutung, insbesondere im Kontext fortschrittlicher Betriebsmittelherstellung, die im Fokus dieses Forschungsvorhabens steht. Der Forschungsansatz zielt darauf ab, ein fortschrittliches Extrusions- und Anlagenkonzept auf Granulatbasis zu entwickeln, um Spritzgussgranulate, insbesondere Biopolymere, additiv zu verarbeiten. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der stützstrukturfreien additiven Fertigung von Betriebsmitteln mithilfe einer 5-Achs Kinematik. Die Verwendung von Kunststoffgranulaten steht im Zentrum dieses Projekts, um eine größere Vielfalt an Materialien zu ermöglichen und zusätzliche Produktionsschritte im Vergleich zur Verwendung von Pulver oder Filament zu vermeiden. Dies erlaubt die direkte Umsetzung neuester Entwicklungen im Materialbereich. Die Entwicklung eines Granulatextruders erfordert eine aufwendigere Anlagentechnik im Vergleich zu Filamentextrudern, wie beispielsweise einen größeren Druckkopf.

Die Verwendung eines zweiten Extruders für den Druck von Stützstrukturen ist aufgrund des groß dimensionierten Druckerkopfes für hohe Extrusionsraten sehr aufwendig. Daher ist eine intelligente Bahnplanung für den Druck von Bauteilen ohne die Verwendung von Stützstrukturen mit dem Single-Extruder-Prinzip in diesem Projekt unerlässlich und nimmt einen modellhaften Charakter an. Die Innovation durch die Extrusionstechnologie ist somit untrennbar mit der Entwicklung einer intelligenten Bahnplanung verbunden, was die Vermeidung von Stützstrukturen und eine effizientere Materialnutzung ermöglicht. Die Lösungsfindung gliedert sich in drei Lösungsbausteine, welche in vier Arbeitspakete (AP) bearbeitet worden sind:

⁵ Jones et al. (2011) - The replicating rapid prototype. Robotica

⁶ Tuck (2018) - Additive Manufacturing - Moving Towards Zero Waste Manufacturing



AP: Arbeitspaket

- AP1: Extrusionskonzept
- AP2: Aufbau eines Demonstrators (3D-Drucker)
- AP3: Bahnplanung zur Reduktion von Stützstrukturen
- AP4: Demonstration Ressourceneffizienter Betriebsmittelbau mit AM

Abbildung 6-1: Lösungsbausteine des Forschungsvorhabens BioME

Das erste Arbeitspaket umfasst die Untersuchung des Extrusionskonzepts von Kunststoffgranulaten für die Auslegung des Extruderkopfs und der Maschinenstruktur. Die Anforderungsanalyse konzentriert sich auf die Materialanalyse von Standardgranulaten, insbesondere biobasierten Polymeren. Erfahrungen des WZLs im Bereich kunststoffbasierter additiver Fertigung ermöglichen die Auslegung technischer Kunststoffe, einschließlich Biopolymeren in Granulatform, für den Druckprozess. Der zweite Schwerpunkt im ersten Arbeitspaket liegt in der Anlagenplanung und Maschinenkonzeption. Ausgehend von Betriebsmitteln werden die Anlagenmodule dimensioniert und Bewegungsfreiheitsgrade festgelegt. Die Grundstruktur der Maschine besteht aus dem 3-achsigen System von 3BOTS Engineering, ergänzt durch eine Dreh- und Schwenkeinheit von Peiseler. Ein Zwischenergebnis ist ein 3D-Modell der Maschine mit vollständiger Stückliste. Zuletzt erfolgt der Aufbau und die Inbetriebnahme der Maschinensteuerung, um die fünf Verfahrsachsen, Extruderwelle und Sensorwerte anzusteuern.

Das zweite Arbeitspaket fokussiert sich auf den Aufbau eines Demonstrators. Im Unterschied zu einem umfangreichen Simulationsaufwand zur Analyse des Fließverhaltens von Kunststoffschmelze bei der Extrusion liegt das Alleinstellungsmerkmal dieses Projekts in der physischen Validierung des Extrusionskonzepts bereits in einer frühen Projektphase. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist der finale Aufbau der Fertigungsanlage inklusive Inbetriebnahme, um die Extrusion und Bahnplanung in der Praxis zu testen.

Zur Verbesserung der Ressourceneffizienz wird im dritten Arbeitspaket der Prozess zur Herstellung von supportfreien Betriebsmitteln mittels des Extruders zur Verarbeitung von Kunststoffgranulaten unter hohen Extrusionsraten untersucht. Aufgrund der hohen Komplexität der 5-achsigen Bahnplanung wird in diesem Arbeitspaket auf die Expertise von ModuleWorks zurückgegriffen. Mit ihrer intelligenten Bahnplanung lassen sich Bauteile so in einzelne Segmente unterteilen, wodurch ein stützstrukturfreies Drucken ermöglicht wird. Das Vorhaben umfasst abschließend in Arbeitspaket 4 eine anwendungsorientierte Nutzungsbeschreibung des 3D-Druckers, um unterschiedliche Geometrien mittels zu entwickelnder Bahnplanungsstrategien zu realisieren.

7 Projektergebnisse

7.1 AP 1: Extrusionskonzept und Maschinenstruktur

Das AP1 teilte sich in zwei Teilbereiche, um eine parallele Entwicklung zu ermöglichen. Teil A setzte dabei den Fokus auf das Extrusionskonzept und den Extruder, während der Teil B sich mit der Maschinenstruktur rund um die 5-Achsigkeit auseinandersetzte.

7.1.1 AP1A: Extrusionskonzept

Das Arbeitspaket 1A wurde unterteilt in Vorarbeiten im Bereich der Anforderungsanalyse und die eigentliche Entwicklung des Extruders. Im Kontext des Projektes BioME wurden Anforderungen aus verschiedenen Perspektiven an das Extrusionskonzept gestellt. Diese sind in Abbildung 3 dargestellt und betreffen die Eingangsmaterialien, den Prozess und den Anwendungsfall. Im Rahmen von BioME umfassten die Inputmaterialien die thermoplastischen und biobasierten Kunststoffe. Anforderungen aus dem Prozess bestanden in der Fähigkeit, segmentierte Bauteile aufbauen zu können. Der letzte Anforderungsbereich umfasste den Anwendungsfall, der im Rahmen von BioME auf die Betriebsmittel in der Automobilproduktion definiert wurde. Die Anforderungsanalyse wird innerhalb dieser Kategorien im Folgenden detailliert vorgestellt. Das daraus abgeleitete Konzept der Extrusionseinheit wird im Anschluss beschrieben.

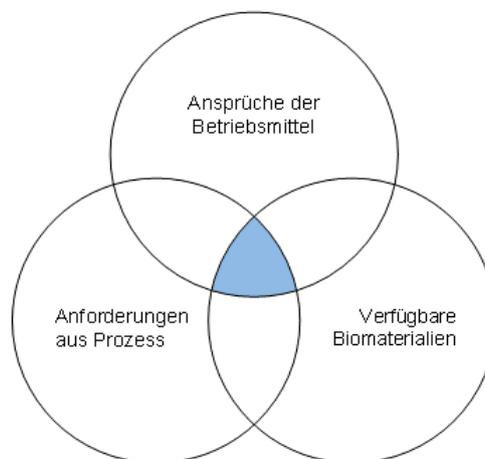


Abbildung 7-1: Anforderungsanalyse an das Extrusionskonzept aus Projektperspektive

Anforderungsanalyse

Wie oben beschrieben, hat sich das Anforderungsprofil für das Extrusionskonzept aus den Perspektiven Materialien, Prozess, und Anwendungsfall zusammengesetzt. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Verfügbare Biomaterialien und deren Eigenschaften

Biokunststoffe werden in drei Kategorien unterteilt: (1) ganz oder teilweise auf Biomasse basierend nach EN 16757, (2) biologisch abbaubar, oder (3) ganz oder teilweise auf Biomasse basierend und biologisch abbaubar.

Für biobasierte Kunststoffe aus den Kategorien (1) und (2) gibt es noch keine Vorgaben bezüglich der Auszeichnung des biobasierten Anteils. Methoden, wie beispielsweise die Radiokarbonmethode wurden aber bereits zur Bestimmung des biologischen Anteils zertifiziert. Biologisch abbaubare Kunststoffe der Kategorien (2) und (3) basieren darauf, dass Mikroorganismen das Material unter bestimmten Bedingungen vollständig zu Kohlenstoffdioxid und Wasser abbauen können. Beim Abbau spielen die Rahmenbedingungen wie beispielsweise der Zeithorizont eine entscheidende Rolle. Da diese zum Zeitpunkt des Projektes nicht definiert waren, haben Deklarationen der biologischen Abbaubarkeit oft geringe Aussagekraft. Zudem

wird die Abbaufähigkeit häufig unter idealen Bedingungen im Labor durchgeführt. Eine relevante Klassifizierung der biologischen Abbaubarkeit kann in folgende Kategorien aufgeteilt werden: (1) Industrielle Kompostierbarkeit, (2) Heim- und Gartenkompostierbarkeit, (3) Abbaubarkeit im Boden, (4) Abbaubarkeit im Süßwasser, und (5) Abbaubarkeit im Salzwasser.

Die Verwendung von biologisch abbaubaren Kunststoffen verbessert die Ökobilanz von Produktionssystemen dementsprechend nicht zwangsläufig. Zum Zeitpunkt der Projektdurchführung haben Entsorgungsunternehmen keine uneingeschränkten Möglichkeiten für die Kompostierung von biologisch abbaubaren Materialien. Im Rahmen dieses Projektes wurde deswegen der Fokus auf biobasierte Materialien gelegt. Im Bereich der biobasierten Kunststoffe werden verschiedene Materialgruppen unterschieden. Die Gruppe der „Old Economy“ umfasst biobasierte Kunststoffe, die bereits vor der Entwicklung von petrochemischen Kunststoffen eingesetzt wurden. Hierzu gehört beispielsweise Gummi, bzw. Kautschuk. Der „New Economy“ werden Kunststoffe zugeordnet, die innerhalb der letzten 20–30 Jahre entwickelt wurden. Diese Gruppe wird wiederum unterteilt in „Novel“ und „Drop-In“ Kunststoffe. Während die neuentwickelten Kunststoffe der „Novel“-Kategorie neuartige biobasierte Werkstoffe mit charakteristischen Eigenschaften beschreiben, sind „Drop-In“ Kunststoffe biobasiert und gleichzeitig strukturgleich zu ihren konventionellen Pendanten und besitzen die gleichen chemischen und mechanischen Eigenschaften.

Tabelle 1: Einteilung von Biobasierten Kunststoffen

Biokunststoffe		
Old Economy	New Economy	
	Novel	Drop-Ins
<ul style="list-style-type: none"> - Gummi - Celluloseregenerat - Linoleum - ... 	<ul style="list-style-type: none"> - PLA - PHA - PEF - ... 	<ul style="list-style-type: none"> - Bio-PA - Bio-PE - Bio-PET - ...

Eine Betrachtung zweier wesentlicher Eigenschaften der New Economy Kunststoffe ist in Abbildung 4 dargestellt. Für die Auslegung des Extrusionskonzept ist die Schmelztemperatur relevant. Diese bestimmt den Bereich der Verarbeitungstemperaturen. Erkennbar ist, dass die verschiedenen biobasierten Polymere trotz stark unterschiedlicher mechanischer Kennwerte, die in der Abbildung am Beispiel des Elastizitätsmoduls aufgeführt sind, eine ähnliche Schmelztemperatur um die 200 °C aufweisen. Diese wurde zur Auslegung des Systems verwendet. Weitere für die Verarbeitung relevante Daten wie die Viskosität werden von den Materialherstellern nicht angegeben.

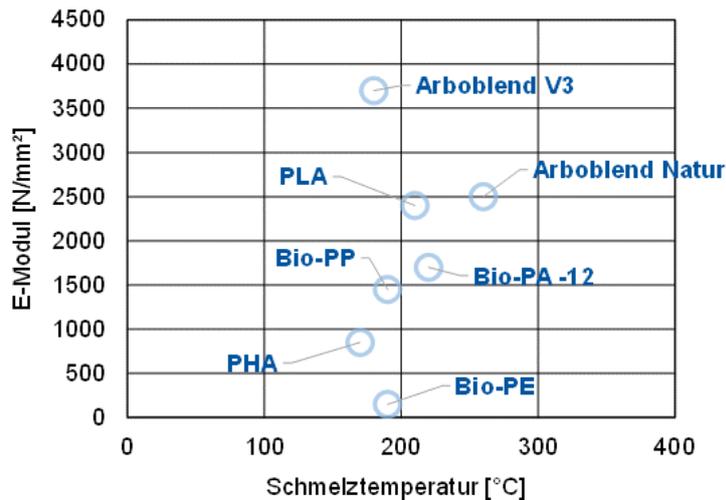


Abbildung 7-2: Schmelztemperatur und E-Modul für verschiedene Biobasierte Kunststoffe

Für die Anwendung relevante Eigenschaften betreffen mechanische Werte wie den E-Modul sowie thermische Werte wie die Erweichungstemperatur. Diese liegt bspw. bei PLA um die 60 °C und schränkt damit den Anwendungsbereich ein.

Ansprüche der Betriebsmittel

Die Nutzbarkeit von biobasierten Materialien in der Automobilindustrie wurde bereits anhand von verschiedenen Bauteilen validiert. Ein Beispiel umfasst eine Kraftstoffleitung der Firma Hutchinson, die aus teilbiobasiertem Polyamid hergestellt wird. Die Kraftstoffeinleitung hat eine hohe Temperaturbeständigkeit und weist darüber hinaus eine gute Langzeitbeständigkeit bei chemisch aggressivem Biodiesel auf. Der biobasierte Anteil im Polyamid beläuft sich auf 60 %. Ein anderes Beispiel stellt eine Motorabdeckung aus 70 % biobasiertem Polyamid auf Rizinusbasis dar. Diese wird bei Mercedes eingesetzt und gilt als hitzestabil und rüttelfest.

Die Nutzung von additiv gefertigten Betriebsmitteln als Montagehilfsmittel ist in einem portugiesischen Werk bei VW demonstriert worden. Die Nutzung von filamentbasierten Extrusionsverfahren zur on-demand Fertigung von Montagehilfsmitteln konnte Kosteneinsparungen in der Entwicklung von 150.000 € im ersten Jahr erzielen, was ca. 91 % der Entwicklungskosten entspricht. Die Kapazitäten wurden in der Folge ausgebaut und demonstrieren die Attraktivität von additiven Extrusionsverfahren für die Fertigung von Betriebshilfsmitteln.

Je nach Anwendungsfall eines Betriebsmittel werden unterschiedliche Anforderungen an das Material und die Bauteilgeometrie gestellt. Betriebsmittel im Allgemeinen werden unterteilt in die die Gruppen (1) Fügen, (2) Handhaben, (3) Prüfen, (4) Justieren, und (5) Hilfsoperationen. Die unterschiedlichen Betriebsmittel bedürfen unterschiedlichen Eigenschaften. Während eine Temperaturbeständigkeit bei Schweißvorrichtungen oder Spritzgießwerkzeugen relevant ist, ist eine hohe Formgenauigkeit bei Prüfvorrichtungen verlangt und die Steifigkeit der Komponente sollte bspw. im Rahmen von Greifsystem adaptierbar sein. Steifigkeit und Temperaturbeständigkeit sind in erster Linie von den Materialeigenschaften der verfügbaren Biopolymere abhängig und nachgeordnet vom Design. Anhand der vorigen Beispiele und der Eigenschaften erschien hier insbesondere biobasiertes Polyamid als vielversprechend und wurde daher auch getestet. Anforderungen an den Extruder aus Sicht der Betriebsmittel lagen somit in der Maßgenauigkeit und geometrischen Toleranzen, sowie einem homogenen Bauteilaufbau mit guter

Schichtanhaftung. Im Vergleich zum Basisaufbau, der mit Düsendurchmessern von mehr als 2 mm arbeitete, um großvolumige Bauteile mit reduziertem Zeitaufwand drucken zu können, war an dieser Stelle eine kleinere Düse notwendig, sodass auch die Fertigung von kleinen Details möglich wurde. Der Durchmesserbereich für die Düse wurde auf den Bereich von 0,8-2 mm festgelegt. Da der benötigte Druckaufbau im Extruder in vierter Potenz vom Düsendurchmesser abhängt, wurden am Beispiel des PLAs Berechnungen der benötigten Schneckenantriebsmomente durchgeführt, die einen zur sicheren Seite abgeschätzten Antriebsmoment von 10 Nm ergaben.

Anforderungen des Prozesses

Die Anforderungen aus dem Prozess haben insbesondere das verhinderte Nachtropfen der Kunststoffschmelze, sowie geringe Dimensionen des Extrusionsaufbaus, umfasst. Durch den Einsatz eines Dreh- und Schwenktisches wurde der Bauraum der ursprünglichen Anlage reduziert. Um die maximale Höhe des Antriebssystems ausnutzen zu können, bestand demnach die Anforderung, den Extrusionsaufbau so niedrig wie möglich auszulegen. Weiterhin sollte das untere Ende des Extrusionsaufbaus schmal gehalten werden, sodass der Schwenktisch auch um große Winkel gekippt werden konnte, ohne mit der Extrusionseinheit zu kollidieren.

Extruderdesign

Während das Aufschmelzverhalten der radialen Extruderschnecke im vorangegangenen Aufbau die Anforderungen erfüllt, ist die Prozesssteuerung, sowie insbesondere das Retract-Verhalten der radialen Extruderschnecke für einen stabilen Prozess zu träge. Daher wurde das bestehende System für den Aufbau des 5-Achs-Systems um eine axiale Extruderschnecke zur Prozesssteuerung erweitert. Dazu ist koaxial eine axiale Extruderschnecke unter der radialen Extruderschnecke angeordnet. Das Kunststoffgranulat wird im Topf aufgeschmolzen und von der radialen Extruderschnecke gefördert. Anschließend wird die Kunststoffschmelze in einem Tubus auf der Verarbeitungstemperatur gehalten und von einer kleineren axialen Förder-schnecke dosiert. Eine präzisere Prozesssteuerung und ein besseres Retract-Verhalten der axialen Extruderschnecke gegenüber der radialen Extruderschnecke konnte bestätigt werden.

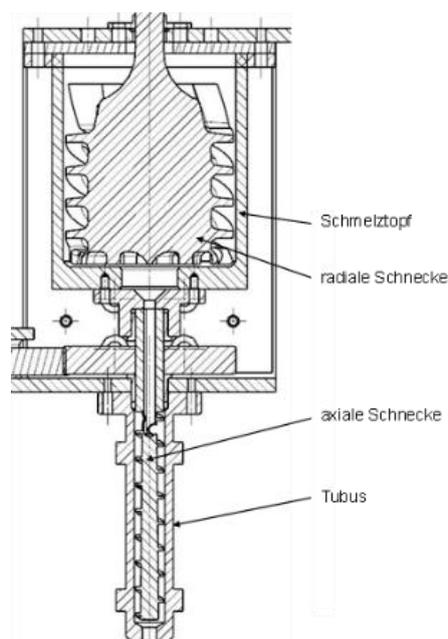


Abbildung 7-3: Schnittdarstellung des Extrusionssystems mit zwei in Reihe geschalteten Schnecken

Die koaxiale Lage beider Extruderschnecken erforderte eine indirekte Kraftübertragung vom Motor auf die Wellenabsätze der Extruderschnecken. Die Übertragung der Kraft wurde über Riemen ausgelegt. Die radiale Extruderschnecke wurde im ersten Ansatz einseitig radial im Topfdeckel gelagert. Der Wellenabsatz der radialen Extruderschnecke wurde länger gewählt, sodass eine weitere Lagerung über den Riemen in einer späteren Iteration hinzugefügt werden konnte. Die axiale Schnecke wurde vor und nach der Riemenaufnahme radial gelagert. Eine axiale Lagerung beider Extruderschnecken wurde nicht vorgenommen. Die Motoren wurden im Vergleich zum vorangegangenen Aufbau kleiner ausgelegt, um Platz und Gewicht einzusparen. Es wurde im vorangegangenen Aufbau nur ein geringer Teil des vom Motor zur Verfügung stehenden Drehmoments real benötigt. Die massebehaftete unbeheizte Extrusionsdüse wurde durch eine kleinere Standarddüse aus dem FFF-Verfahren ersetzt.

Durch die Kraftübertragung über die Außenfläche der Extruderschnecke konnte die Kunststoffschmelze nicht um die Extruderschnecke herum gefördert werden. Es wurde daher der Wellenabsatz der axialen Extruderschnecke aufgebohrt und die Kunststoffschmelze durch die Extruderschnecke gefördert. Die Schmelze trat seitlich am Beginn des Schmelzgangs aus. Die Schmelze wurde von der axialen Extruderschnecke gefördert und durch eine handelsübliche zugekaufte Extrusionsdüse extrudiert.

Eine Recherche in der Beschaffungsphase ergab eine maximale zugelassene Betriebstemperatur von Kunststoffantriebsriemen von kleiner als 100 °C (Spezialanfertigungen bis 120 °C). Die beengte Lage der Antriebsriemen zwischen Schmelztopf und Tubus, sowie der Kraftübertragung vom Riemen, auf die von Schmelze durchströmte, Extruderschnecke, führten zu einer erwarteten Betriebstemperatur über der zugelassenen Betriebstemperatur. Daher wurde die Kraftübertragung stattdessen über ein Zahnradgetriebe ausgelegt. Das Übersetzungsverhältnis des Riemenantriebs der radialen Extruderschnecke betrug $i_{\text{Riemen}}=1,18$, während die Übersetzung des Zahnradgetriebes der axialen Extruderschnecke $i_{\text{Zahnrad}}=1,2$ betrug. Bei der zu erwarteten Drehzahl im Betrieb war noch kein Drehmomentverlust am NEMA 23 zu erwarten, sodass das Drehmoment über ein Getriebe erhöht werden konnte. Das mittlere Zahnrad war in der Position fixiert, während das Antriebs- und Abtriebszahnrad über das Spiel der Durchgangsbohrungen der Schraubbefestigungen ausgerichtet werden konnten. Das abtreibende Zahnrad wurde mittels einer Schweißverbindung mit der axialen Extruderschnecke verbunden. In einer späteren Iteration wurde die axiale Extruderschnecke für den Anwendungsfall speziell gefertigt und ein Formschluss als Verbindungsmöglichkeit gewählt. Im hier vorliegenden Aufbau wurde als axiale Extruderschnecke ein Zukaufteil verwendet. Die Verbindung der Antriebsachse mit dem Antriebszahnrad wurde mittels Formschluss gewählt.

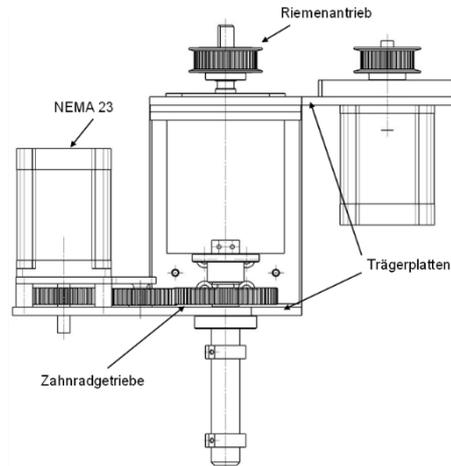


Abbildung 7-4: Darstellung des gesamten Extruderaufbaus mit Antriebssystem

Die Lagerung der axialen Extruderschnecke über Schmelztopf und Tubus erforderte eine zusätzliche Ausrichtung der Bauteile zueinander, dazu wurden die Trägerplatten über die Rückwand mit Zylinderstiften zueinander positioniert. Die Trägerplatten wurden soweit möglich thermisch zu den beheizten Komponenten isoliert. An den Trägerplatten wurden über zusätzliche Verbindungselemente die Antriebsmotoren befestigt. Zur Isolation wurden Silcasal Platten verwendet. Die Keramikfaserplatten hatte eine maximale Betriebstemperatur von 850 °C und einen Wärmeübergangskoeffizienten von 0,1 W/mK bei 400 °C. Der Schmelztopf wurde mittels einer Heizmanschette erhitzt und der Tubus mittels einer selbst gewickelten Widerstandsheizung. Drei einschraubbare Temperatursensoren wurden verwendet, sodass die Temperatur des Schmelztopfs und des oberen und unteren Tubusabschnittes ausgelesen werden konnten.

Bei der Montage des Riemenantriebs wurde eine starke einseitige radiale Belastung des Wellenabschnitts der radialen Extruderschnecke festgestellt. Um eine Beschädigung der radialen Extruderschnecke und des Schmelztopfs vorzubeugen wurde der obere Wellenabschnitt um einen weiteren Lagerpunkt erweitert. Es wurde ein Blechteil über dem Wellenabschnitt positioniert und eine weitere radiale Lagerung am Wellenabschnitt angebracht. Das Blechteil war außerdem ein axialer Anschlagpunkt, der ein axiales Wandern der radialen Extruderschnecke und damit ein Abspringen des Riemenantriebs verhinderte.

7.1.2 AP1B: Maschinenstruktur

Der zweite Schwerpunkt des ersten Arbeitspaketes lag in der Anlagenplanung und Maschinenkonzeption. Ausgehend von ausgewählten Betriebsmitteln wurden die Anlagenmodule dimensioniert und die notwendigen Bewegungsfreiheitsgrade ausgelegt. Die Grundstruktur der Maschine bildete das 3-achsige System von 3BOTS Engineering, das mit einer Dreh- und Schwenkeinheit der Firma Peiseler komplementiert wurde. Die neue Maschinenstruktur sollte durch die zusätzlichen Achsen einen reduzierten Einsatz von Stützmaterialien ermöglichen. Anschließend erfolgte der Aufbau und die Inbetriebnahme der Maschinensteuerung, um die fünf Verfahrsachsen und die Extruderwelle sowie die Sensorwerte (Temperatur im Inneren und an der Außenseite des Extruders) anzusteuern.

Maschinenkonzept

Auf Basis der maximalen Dimensionen der Komponenten der Dreh- und Schwenkeinheit wurde der notwendige Bauraum der Anlage definiert. Dazu wurde auf dem CAD-Modell des

bestehenden 3-achsigen Systems die Baugruppen der Dreh- und Schwenkeinheit eingefügt und bei variierendem Tischdurchmesser der resultierende Bauraum untersucht. Dabei konnte bei der Auslegung der Arbeitsgröße eine Abhängigkeit zwischen dem Tischdurchmesser und der Arbeitshöhe festgestellt werden. Um bei einem Schwenkwinkel von 90° bzw. -90° eine Kollision des Tisches mit dem Maschinentisch zu vermeiden, musste ab einem bestimmten Tischdurchmesser der Schwenkmittelpunkt erhöht werden, wodurch die Arbeitshöhe sinkt. Bei einem mit den Projektpartnern festgelegten Tischdurchmesser von $d = 420 \text{ mm}$ ergab sich somit eine berechnete maximale Arbeitshöhe von $z_{\text{hub}} = 355 \text{ mm}$.

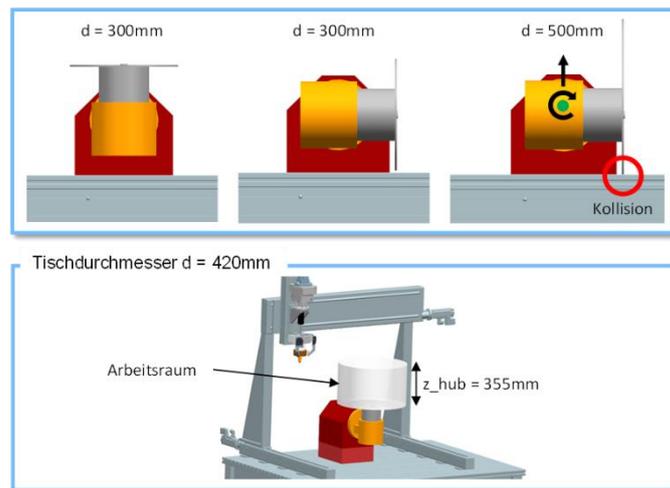


Abbildung 7-5: Definition der Arbeitshöhe und des Arbeitsraumes

Ausgehend von den festgelegten Dimensionen hatte die Firma Peiseler eine auf die Anlage spezifizierte Dreh- und Schwenkeinheit entwickelt, welche die Anforderungen an den 3D-Druckprozess erfüllte. Bevor die Fertigung der einzelnen Komponenten der Dreh- und Schwenkeinheit in Auftrag gegeben werden konnte, wurde zunächst eine erste Bewegungsmodellierung und eine Machbarkeitsanalyse durchgeführt. Dadurch wurde die Bewegungsfähigkeit des Drehtisches unter Rücksichtnahme der unterschiedlichen Anschlüsse überprüft. Das Bewegungsmodell diente zudem als Grundlage für die Simulation des Druckprozesses und der Generierung des G-Codes mit Hilfe eines Postprozessors. Mit der CAM-Modellierung in NX wurden bereits Machbarkeitsanalysen durchgeführt und die Fertigungsoperationen überprüft.

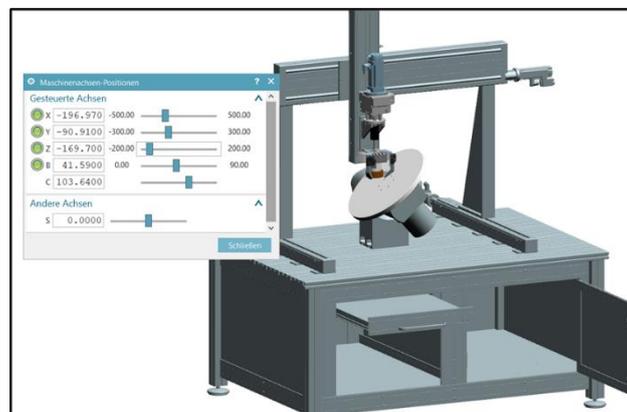


Abbildung 7-6: Bewegungsmodell der Extrusionsanlage mit Dreh- und Schwenkeinheit

Im Anschluss an die Entwicklung des Maschinenkonzeptes erfolgte die Implementierung der Maschinensteuerung. Auf Basis des Maschinenkonzeptes und den Anforderungen zur Bewegungsfreiheit wurden die Fähigkeiten der Maschinensteuerung definiert. Dabei wurde zwischen der Ansteuerung der Dreh- und Schwenkeinheit und der Ansteuerung des Extruders unterschieden. Die erste Herausforderung lag somit vor allem in der Auslegung der Eingangs- und Ausgangsmodule für die Dreh- und Schwenkeinheit. Dazu mussten Umrichter eingesetzt werden, die die Signale für die Dreh- und Schwenkeinheit verarbeiten konnten.

Die zweite Problematik entstand bei der Ansteuerung der Extruderschnecken. Das Extruderdesign wurde aus zwei Schneckenkomponenten zusammengesetzt, welche jeweils durch einen separaten Schrittmotor angetrieben wurden. Während die Plastifizierungsschnecke dem Aufschmelzen des Druckmaterials diente, wurde durch die Extruderschnecke das Druckmaterial im Anschluss zur Düse gefördert. Durch den zweiseitigen Aufbau musste auch bei der Ansteuerung der Schneckenkomponenten eine Differenzierung vorgenommen werden.

7.2 AP2: Aufbau eines Demonstrators (3D-Drucker)

Das zweite Arbeitspaket beinhaltete den Aufbau eines Demonstrators. Im Gegensatz zu einem hohen Simulationsaufwand zur Analyse des Fließverhaltens von Kunststoffschmelze bei der Extrusion bestand das Alleinstellungsmerkmal dieses Projekts, in einer physischen Validierung des Extrusionskonzeptes in einer frühen Projektphase. Das Ergebnis des zweiten Arbeitspakets war der finale Aufbau einschließlich der Inbetriebnahme der Extrusionsanlage, sodass die Extrusion und die Bahnplanung anschließend physisch getestet werden konnte.

Vorstudie Ender 3

Bevor der finale Aufbau der Extrusionsanlage erfolgte, wurde als Vorstudie ein herkömmlicher 3D-Drucker des Modells Ender 3 der Firma Creality umgebaut, indem dieser analog zur Extrusionsanlage um eine Dreh- und Schwenkeinheit erweitert wurde. Dadurch sollte die Bewegungsfähigkeit der zusätzlichen Achsen besser nachvollzogen werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse konnten im Anschluss auf die Extrusionsanlage übertragen werden.

Im Zuge einer Abschlussarbeit wurde eine konstruktive Lösung zur Erweiterung des 3D-Druckers ermittelt und anhand des Ender 3 umgesetzt. Das Druckbett wurde entfernt und durch eine Dreh- und Schwenkeinheit ersetzt. Die neue Einheit ließ eine Schwenkung des Tisches um 90° zu. In Kombination mit der Drehung des Tisches ließen sich so alle Druckpositionen eines 5-Achs Systems erreichen. Die Schwenkung und die Drehung des Tisches erfolgten jeweils durch einen Schrittmotor. Dazu musste ein neues Board SKR Pro V1.2 von BigTree implementiert werden, welches im Gegensatz zum Standardboard die Ansteuerung von zwei zusätzlichen Schrittmotoren unterstützte.

Da es auf dem Markt und innerhalb des Projektes zu diesem Zeitpunkt keine Slicer-Lösung für 5-Achs Bauteile gab, mussten die einzelnen Segmente des Bauteils mit einer Slicer-Software (Cura- oder Prusa-Slicer) geschnitten und anschließend die generierten G-Codes inklusive der Befehle zur Ansteuerung der zusätzlichen Achsen manuell zusammengefügt werden. Hier konnte bereits festgestellt werden, dass eine anwendungsfreundliche Bahnplanung für ein 5-Achs System essenziell ist und zurzeit eine große Herausforderung darstellt. Der Druck eines Bauteils mit einer hohen Anzahl an Segmenten war mit dieser manuellen Methode der Bahnplanung nicht empfehlenswert. In der Theorie lässt sich mit der aufwändigen G-Code Gene-

rierung dennoch jede Geometrie in einen ausführbaren Maschinencode übersetzen. Probe-
drucke mit einfachen Bauteilen mit wenigen Segmenten oder symmetrischen Segmenten ga-
ben zudem bereits einen sehr guten Aufschluss über Funktionsweise und Problematiken eines
5-Achs Druckers. Hier konnte festgestellt werden, dass für den 5-achsigen Druck die notwen-
dige Präzision der Achsen deutlich höher liegt, als bei Drucken mit 3 Achsen. Der Grund liegt
darin, dass in einem kartesischen Koordinatensystem alle drei Achsen linear unabhängig von-
einander sind. Somit haben Ungenauigkeiten in den Achsen keinen Einfluss auf andere Ach-
sen und führen lediglich zu einer Verschiebung des Bauteils. In einem Achssystem mit 5 Ach-
sen sind diese jedoch nicht mehr linear unabhängig voneinander, sodass Ungenauigkeiten
einer Achse sich je nach Position der anderen Achsen in einer anderen Orientierung auf das
Bauteil auswirken und dieses damit geometrisch verzerren. Dieser Effekt tritt besonders stark
auf, wenn Bauteile in Segmente aufgeteilt werden und zwei Segmente in sehr unterschiedli-
cher Orientierung gedruckt werden. Im schlimmsten Fall kann dies dazu führen, dass der
Druckkopf mit dem bereits erzeugten Bauteil kollidiert. Da Peiseler jedoch hochpräzise Dreh-
und Schwenkeinheiten produziert und auch das industrielle Anlagensystem hohe Präzision in
den Achsen aufweist, stellte diese Erkenntnis kein Hindernis für die Erstellung der Extrusi-
onsanlage dar.

Nach der manuellen Methode wurden zwei Probebauteile entworfen und mit dem umgebauten
Ender 3 zur Überprüfung der Kollisionen gefertigt. Dabei konnte als Hauptproblematik ein Kol-
lisionskonflikt zwischen dem Extruderkopf und dem Drehtisch festgestellt werden. Bei höheren
Schwenkwinkeln konnte sich beim Druck der folgenden Segmente der Extruderkopf in Z-Rich-
tung unterhalb der höchsten Position des Tisches befinden und mit diesem kollidieren. Um
dies zu vermeiden, mussten Probebauteile mit größerem erstem Segment konstruiert werden.
Dies führte unabdinglich zu einer längeren Druckzeit und folglich zu einem höheren Material-
verbrauch. Diese Problematik war der anderen Struktur der vierten und fünften Achse der
Testmaschine (Ender 3) und des breiten Aufbaus des Extruders geschuldet. Das industriali-
sierte System mit der Dreh- und Schwenkeinheit der Firma Peiseler hatte einen anderen Auf-
bau und wurde ausgelegt und überprüft, sodass keine Kollision erfolgte. Zudem wurde der
Extruder mit der Prämisse gebaut, ohne Kollision mit der Düse einen bis zu 45° geschwenkten
Tisch zu erreichen.

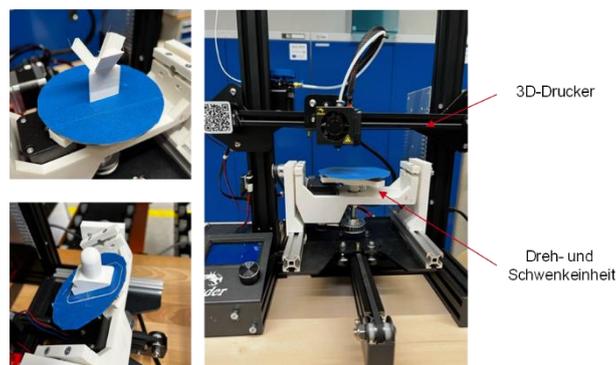


Abbildung 7-7: Probebauteile (links), Aufbau eines 5-Achs Druckers (rechts)

Heizbett und Bettanhaftung Extrusionsanlage

Für die Extrusionsanlage wurde ebenfalls die Bettanhaftung von Druckbauteilen untersucht.
Eine gute Anhaftung des Bauteils reduziert das Auftreten und Warping und stellt somit einen
wichtigen Faktor für die Qualität des Bauteils dar. Die Anhaftung hängt hauptsächlich von der

Bettbeschichtung und Heizbetttemperatur ab, welche sich je nach Druckmaterial unterscheiden. Die erarbeiteten empfohlenen Betttemperaturen und Bettbeschichtung können der Tabelle entnommen werden. Während PLA als Material mit niedrigen Erweichungstemperaturen bereits bei geringen Betttemperaturen und einfachem Blue Tape eine sehr gute Anhaftung erreicht, sind bei PA12 höhere Betttemperaturen und stärkeren Beschichtungsmittel erforderlich. Beim Drucken mit PTFE (Teflon) bekannt, muss auf Beschichtungen aus PP (bspw. Paketband) zurückgegriffen werden, da PP am besten am gleichen Material haftet.

Tabelle 2: Empfohlene Betttemperatur und Bettbeschichtung bei verschiedenen Druckmaterialien

Material	Empf. Betttemp [°C]	Empf. Bettbeschichtung
PLA / PHA	50 – 60	 Kreppband BlueTape tesa® 50600
PLA	55 – 80	 BlueTape tesa® 50600
Arboblend	55 – 60	To be tested Kaum input
HDPE	95 – 110	 Kapton Tape + 3DLac
PA12	90 – 110	 Magigoo PA PVA Glue
PA-CF20	25 – 50	 Magigoo PA PVA Glue
PP	85 – 100	 Paketband
PP-GF30	Ca. 85	 Paketband

Die Heizung des Bettes kann durch mehrere verschiedenen Varianten realisiert werden. Durch eine gründliche Recherche wurden drei verschiedene Optionen ausgearbeitet, welche unsere Anforderungen an Dicke, Temperaturbereich, Wärmeleitfähigkeit etc. erfüllen (Abbildung 4). Da die Firma 3BOTS mit Silicone Heating Mats bereits Erfahrungen sammeln konnte und diese bevorzugt, war diese Variante maßgeblich für das weitere Vorgehen genutzt worden.

	Etched PCB / Foil	Silicone Heating Mat	Polyimide Film Heater
			
Thickness	0,8 – 1,5 [mm]	1,1 – 3,0 [mm]	0,2 – 0,3 [mm]
Temp. Ranges	-30 – 180 [°C]	-30 – 180 [°C]	-30 – 180 [°C]
→ Non-adhesive	-60 – 200 [°C]	-60 – 250 [°C]	-269 – 200 [°C]
Thermal Conductivity	0,22 [W/(m*K)]	0,22 [W/(m*K)]	0,12[W/(m*K)]
max Dimenksions	595 x 2500 [mm x mm]	940 x 3000 [mm x mm]	285 x 550 [mm x mm]
Price	Ca. 50 €	Ca. 200 € → 50 \$	Ca. 87 €

Abbildung 7-8: Umsetzungsmöglichkeiten eines Heizbettes

Im Rahmen des Aufbaus der 5-Achs-Anlage stellten sich jedoch beschaffungsseitig Probleme dar, da benötigte Steuerungstechnik, wie bspw. ein Doppelachsumrichter, aufgrund von allgemeinen Lieferengpässen nunmehr Lieferzeiten von über einem Jahr aufwiesen. Ein agiler und

gleichzeitig vollständiger Aufbau der Anlage war somit lange Zeit nicht möglich. Mittels Steuerungsboard von 3BOTS konnte der entworfene Extruder jedoch schon vorab stationär betrieben werden, um die Funktionsfähigkeit zu testen.

7.3 AP3: Bahnplanung zur Reduzierung von Stützstruktur

Der Inhalt des dritten Arbeitspaketes umfasst sowohl das Einfahren sowie Optimieren der Anlagentechnik als auch die Auslegung der Bahnplanung. Da eine anwendungsfreundliche Bahnplanung für ein 5-Achs System zuvor als essenziell identifiziert wurde, wurde dieser Bedeutung mit einer Mittelumwidmung Rechnung getragen, um über einen Unterauftrag Zugriff auf die Kompetenzen der Firma ModuleWorks zu erhalten, die, ursprünglich aus dem Bereich 5-Achs-Fräsen kommend, bereits an einer Softwarelösung für 5-achsigen 3D-Druck arbeiteten. Ergebnis des Arbeitspakets war die Befähigung des Gesamtsystems, sodass im anschließenden AP4 beispielhafte Bauteile gefertigt werden konnten.

Während der Parameter-Set-Erfassung wurden einige Änderungen am Extruder vorgenommen, um diesen besser auf den Anwendungsfall abzustimmen. Wichtiger Punkt hierzu war die vollständige Integration der gesamten Steuerung in die Anlagentechnik, während zuvor zur schnelleren Versuchsdurchführung teilweise externe Steuerungen verwendet wurden. Die Integration in die Steuerung von Siemens stellte sich dabei an einigen Stellen als komplex heraus, da diese nicht ohne erfahrenes Fachpersonal geschehen konnte. Hier zeigte sich eine klare Differenz zur Vorstudie mit dem Ender 3, bei dem die notwendige Programmierung und Einstellung aufgrund der öffentlichen Zugänglichkeit des Codes und der einfachen Anpassbarkeit keine Hürde darstellten. Die steuerungstechnische Integration umfasste dabei sowohl die Achsansteuerung beider Extruderachsen, als auch die Steuerung aller Heizzonen und die Vorbereitung für eine automatische Granulatzuführung.

Auch hardwareseitig wurde der Extruder wie vorgesehen optimiert. Dabei wurde die Schneckengeometrie der oberen Schnecke nochmals angepasst, um auch zähflüssigere Schmelzen besser fördern zu können. Da radiale Schnecken in der Literatur noch wenig behandelt sind, wurde für die Evaluierung der Geometrie auf praktische Versuche mit Ersatzfluiden zurückgegriffen. Da der Radiale Anteil der Schnecke stets mit aufgeschmolzenem Kunststoff umgeben ist, wurde ersatzweise Silikonöl mit einer Viskosität im Bereich von Polymerschmelze verwendet, um aus PLA gedruckte Schneckengeometrien agil testen und ändern zu können und die Ergebnisse in die finale Geometrie mit einfließen zu lassen.

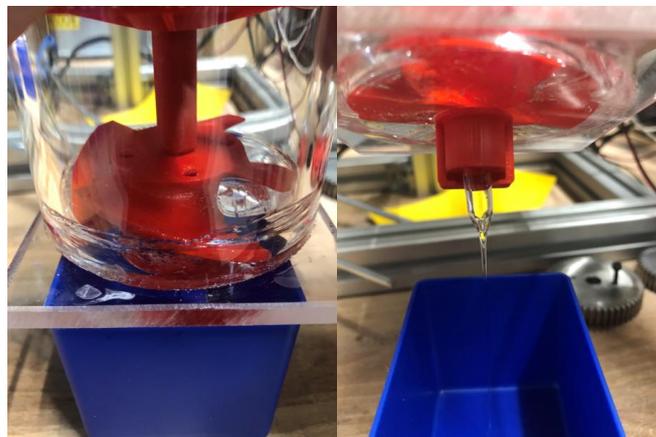


Abbildung 7-9: Versuche mit 3D-gedruckter Schneckengeometrie und Silikonöl

Gleichzeitig wurde das Dichtungskonzept verbessert, um an den Lagerungen austretendes Material zu verhindern. In ersten Versuchen zeigte sich, dass der Übergang von der ersten Schnecke in die zweite Schnecke eine Schwachstelle im System darstellte, da dieser Bereich auf einer langen Strecke unbeheizt war und über verschiedene Elemente, wie z.B. über die Zahnräder, Wärme gut weggeleitet werden konnte. Dies führte einerseits zu langwierigen Aufheizvorgängen, bis beim Anfahren der Anlage Material in der betreffenden Stelle aufgeschmolzen war, andererseits wurde das Parameter-Set hinsichtlich Temperaturen und notwendigem Durchfluss eingeschränkt, da eine fast kontinuierliche Beheizung über Schmelzefluss vonnöten war. In der Optimierung dieser Stelle wurde auch die Bewertung aus AP1A bezüglich der Möglichkeit eines Riemens zum Antrieb der unteren Schnecke erneut geprüft. Um dem Effekt der Wärmeleitung über die Zahnräder maßgeblich zu reduzieren, wurde der isolierende und hochtemperaturbeständige Kunststoff PEEK verwendet, der auf Anlagentechnik am WZL additiv verarbeitet werden konnte. Die Isolierung ermöglichte zudem die Verwendung von Zahnriemen an der unteren Extruderachse, da diese nun nicht mehr so hohen Temperaturen ausgesetzt waren. Da die Geometrie der Zahnriemenräder ebenfalls gedruckt werden konnte, wurde durch die Verwendung eines Riemens die Möglichkeit geschaffen, längere Übertragungswege, die zuvor durch ein drittes Zahnrad realisiert werden mussten, nun direkt zu überbrücken. Zudem konnte die Übersetzung leichter durch die Verwendung von Riemenrädern unterschiedlicher Zähnezahlen geändert werden, während diese aufgrund des vorgegebenen Achsabstands bei den Zahnrädern zuvor festgelegt war.

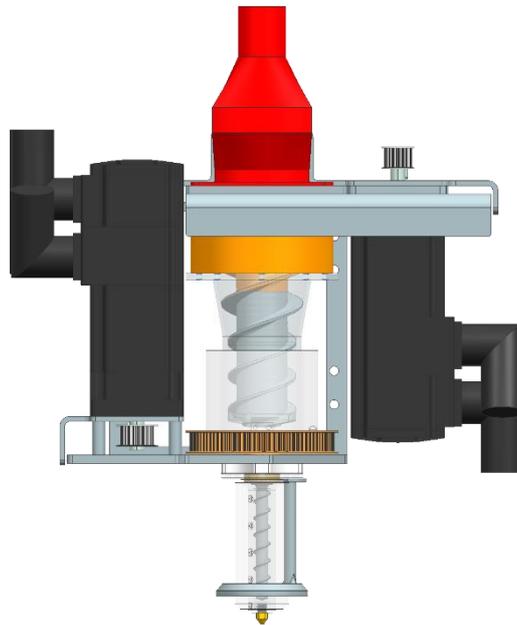


Abbildung 7-10: CAD-Darstellung des finalen Extruders

In an die Optimierung anschließenden Tests wurden statische und dynamische Extrusionen durchgeführt. In den statischen Extrusionen wurden die Austragsraten bei unterschiedlichen Drehzahlen der Extruderschnecken und unterschiedlichen Temperaturen erfasst, um die fürs Material optimalen Parametereinstellungen zu erfassen. Dabei konnten Austragsraten über 500 g/h gemessen werden. Während bei konventionellen Einschneckenextrudern die Austragsrate mit der Drehzahl nur degressiv zunimmt, konnte bei den Versuchen ein nahezu linearer Zusammenhang festgestellt werden.

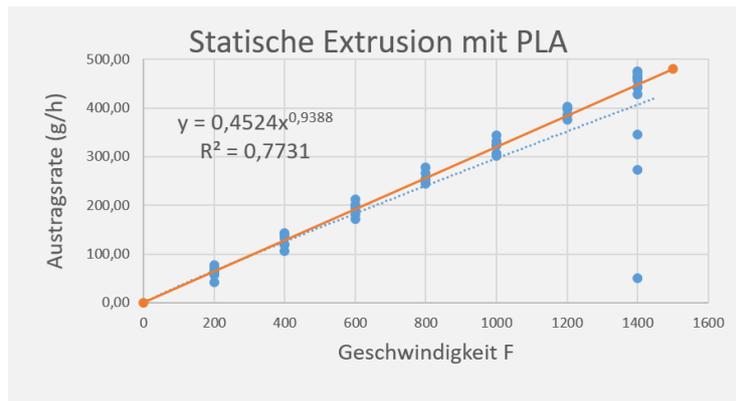


Abbildung 7-11: Ergebnisse der statischen Extrusion von PLA

Weiterhin zeigte sich jedoch, dass der Aufbau eine präzise Einstellung der Temperatur benötigte, um langfristig extrudieren zu können. Bei zu hohen Temperaturen im Aufschmelzbereich wanderte die Zone, in der das Granulat aufschmolz, zu sehr nach oben und verringerte damit die durch den Einzugsbereich der Schnecke aufgebrachte Förderkraft so stark, dass sich im Aufschmelzbereich eine Schicht bilden konnte, die nicht mehr weitergefördert werden konnte. Zu hohe Temperaturen sorgten jedoch bei langsamen Extrusionsraten oder Stillständen für ein Einsetzen der Degradation des Materials. Im Bereich der unteren Schnecke führten zu hohe Temperaturen dazu, dass Material allein durch den geringen Druck der oberen Schnecke extrudiert wurde. Um dieses Verhalten zu unterbinden, lag auch hier die Temperatur meist näher an der minimalen Verarbeitungstemperatur als an der Maximalen.



Abbildung 7-12: Links: statische Extrusion; Mitte und rechts: Abgelegter Strang einer dynamischen Extrusion

Um den Extruder und die Anlage entsprechend auch für Bauteildrucke nutzen zu können, wurde eine Softwarelösung zur Erstellung von Maschinencode benötigt. Wie in AP2 beschrieben war hier eine anwendungsfreundliche Software essentiell. Im Gegensatz zur Bahnplanung bei subtraktiven Fertigungsverfahren, bei denen es industrieller Standard ist, dass Fachkräfte mehrere Stunden die Bahnplanung für einzelne Bauteile in einer CAM-Umgebung programmieren, sind Anwender in der additiven Fertigung, speziell im Bereich der Materialeextrusion, an Softwarelösungen gewöhnt, die nach erstmaligem Konfigurieren von Drucker, Material und Druckereinstellungen nur noch eines Klicks bedürfen, um den Maschinencode für ein Bauteil zu generieren. Während im Bereich der 2,5-Dimensionalen Bauteilgenerierung jedoch für die Ansteuerung einzelner Punkte nur eine einzige Möglichkeit besteht und die Berechnung damit

weitestgehend determiniert ist, ermöglichen die zwei zusätzlichen Achsen eines 5-Achs-Systems mathematisch gesehen eine unendliche Anzahl an verschiedenen Möglichkeiten, einen Punkt im Bauteil anzufahren. Dies ermöglicht zum einen die stützstrukturfreie Fertigung, stellt die jedoch in der Bahnplanung die Herausforderung auf, diese zusätzliche Komplexität zu bewältigen. Insbesondere ist es für eine Akzeptanz im Markt notwendig, diese Komplexität softwareseitig zu lösen, damit der Bediener weiterhin mit Aufwand in der Größenordnung von ein paar Klicks Maschinencode für ein Bauteil generieren kann.

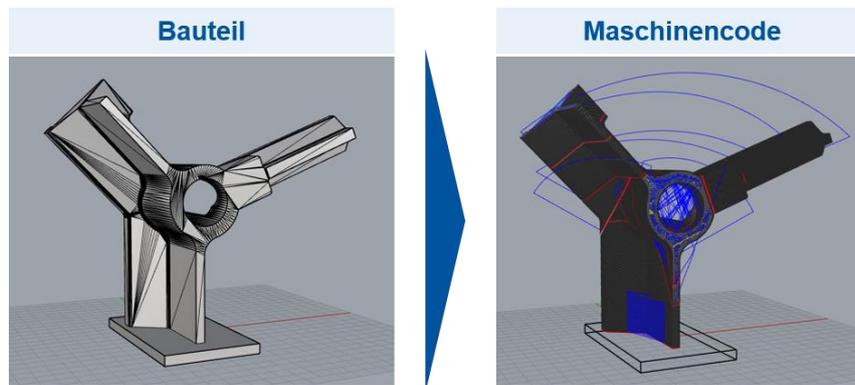


Abbildung 7-13: Links: Bauteil im CAD-Programm; rechts: Anzeige des Maschinencodes und der automatisch erzeugten Segmentierung (rot)

In diesem Zusammenhang bot die Zusammenarbeit mit ModuleWorks den Zugriff auf eine Softwarelösung, die diese Anforderungen bereits zum großen Teil erfüllen konnte. Prinzipiell war die Software in der Lage, für ein Bauteil mit einem Klick Maschinencode zu erzeugen, der ohne Stützstrukturen auskommt. Häufig sind diese Lösungen jedoch noch nicht ganz optimal, was durch die Vorgabe von Ebenen, in denen das Bauteil segmentiert werden soll, mit wenig Aufwand geändert werden kann. Zusätzlich beinhaltete die Software auch eine Kollisionserkennung bzw. Kollisionsvermeidung, sodass im Druck keine Gefahr bestand, die Anlage durch Kollision, bspw. von Extruder und Bauplattform, zu beschädigen. Dazu wurde ein digitales Bewegungsmodell ähnlich zu Abbildung 8 erzeugt und in die Software von ModuleWorks integriert.

Neben kleineren Fehlern in der Software, die von ModuleWorks schnell behoben wurden, war die größere Herausforderung im Forschungsprojekt nicht die Erzeugung der Bahnen, sondern die Abstimmung zwischen Software und Steuerung. Da es sich bei der Steuerung um eine konventionelle industrielle Steuerung handelte, waren verschiedene Einstellungen, die im Bereich von 3D-Druckern Standard sind, nicht vorhanden. So war es beispielsweise nicht möglich, die untere Extruderachse als NC-Achse anzulegen, um eine genaue Regelung zu erzeugen, aber diese getrennt von den anderen Achsen mit relativen Koordinaten anzusteuern. Lösungsmöglichkeiten, die die Steuerung hierzu vorgesehen hatte, konnten wiederum von der Software nicht ohne Weiteres umgesetzt werden. Somit blieben am Ende einige wenige Workarounds bestehen, die nicht aufgelöst werden konnten, z. B. dass die Position der unteren Extruderachse vor jedem Druck manuell auf 0 gesetzt werden musste.



Abbildung 7-14: Druck einer im Programm von ModuleWorks geslicten Basisgeometrie

Mit Beendigung des AP3 war es damit insgesamt möglich, Bauteilgeometrien unter geringem Aufwand in einen geeigneten Maschinencode für die Anlage zu übersetzen, der von der Anlage entsprechend interpretiert und abgearbeitet werden konnte, um Bauteilgeometrien zu erzeugen.

7.4 AP4: Demonstration ressourceneffizienter 3D Druck für den Betriebsmittelbau

Im letzten Arbeitspaket erfolgte die Demonstration von ausgewählten Bauteilen bzw. Betriebsmitteln für die Fahrzeugproduktion. Zunächst wurden dafür aus 20 Bauteilen 3 Bauteile identifiziert. Im Folgenden werden zunächst einmal die drei ausgewählten Bauteile und die verwendeten Biopolymere vorgestellt. Alle 3 ausgewählten Bauteile wurden mit Hilfe einer Anforderungsanalyse (Abbildung 11-9 und Abbildung 11-10) für den 5-Achsigen 3D-Druck ermittelt. Anhand der Komplexität der Bauteile, den Winkeln und Flächen wurden die Bauteile vorher bewertet. Zusätzlich wurden auch die Anforderungen an Maßhaltigkeit, Reproduzierbarkeit usw. in ihrem eigentlichen Einsatzgebiet mit betrachtet. Im letzten Schritt des Arbeitspakets wurden die auf der Extrusionsanlage gefertigten Bauteile analysiert und evaluiert.

7.4.1 Betriebsmittel

Der Dreifachverteiler wird zur Aufteilung von Gasvolumenströmen in der Rauchgasreinigung eingesetzt. Er besteht zum einen, wie in Abbildung 7-15 zu sehen, aus einem Flansch mit vier rotationssymmetrischen Anschlussbohrungen und zum anderen aus mit drei ebenfalls rotationssymmetrisch angeordneten, mit dem Flansch verbundenen Rohren. Diese werden mit Hilfe von Muffen an Schläuchen befestigt, um den Gasstrom aufzuteilen. Bei idealer Ausrichtung für das konventionelle FFF-Verfahren ist der Flansch, wie in Abbildung 7-15 zu sehen, eben zur Bauplattform orientiert. Die zu erwartenden Belastungen sind zum einen mechanischen Ursprungs, wie zum Beispiel ein Biegemoment durch den Anschluss des Flansches und der Rohre, thermischen Ursprungs durch die mit dem Rauchgas transportierte Wärme und chemischen Ursprungs durch die Eigenschaften der im Rauchgas enthaltenen Stoffe.



Abbildung 7-15 Dreifachverteiler zur Aufteilung von Gasvolumenströmen

Grundkörper

Im Karosseriebau von Fahrzeugproduktionen werden Bleche und Blechkomponenten unter anderem durch Schweißen gefügt. Um hierbei stetig homogene Ergebnisse zu erzielen, finden Betriebsmittel wie beispielsweise Schweißvorrichtungen Anwendung. Auf diesen Vorrichtungen werden die Komponenten ausgerichtet eingespannt, um anschließend verbunden zu werden. Formabweichungen im Rahmen der Toleranz oder wechselnde Baugruppen machen hierbei ein Einstellen dieser Spannvorrichtungen erforderlich. Bei dem in Abbildung 7-16 zu sehenden Grundkörper handelt es sich um das starre Element eines 3D-Shim-Knotens.

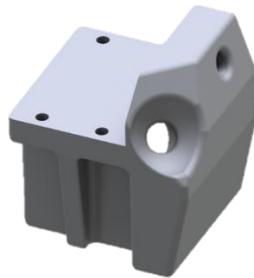


Abbildung 7-16 Grundkörper eines 3D-Shim-Knotens

Ein solcher Knoten stellt ein mehrdimensionales Einstellelement dar. Er ermöglicht bei sehr kompakten Abmessungen die Einstellung in drei Dimensionen unter Zuhilfenahme von einer einzigen Schraubverbindung und einer Variation von Abstandsplättchen. Abstrakt betrachtet besteht das Bauteil aus drei Wandungen, einem stützenden Steg und sechs Bohrungen. Fünf der Bohrungen dienen der Montage des Grundkörpers an einem Konstruktionsprofil und eine der Arretierung der Einstellvorrichtung. Letztere besitzt auf der außenliegenden Seite eine stark konkave Verrundung und weitet sich zur Innenseite konisch auf. Die Bauteilorientierung auf einem konventionellen 3D-Drucker wird so gewählt, dass die planare Fläche, auf Abbildung 7-16 unten rechts zu sehen, auf der Bauplattform aufliegt. Die zu erwartenden Belastungen sind in erster Linie mechanischen Ursprungs, welche durch Biegemomente oder Schraubverbindungen in das Bauteil eingebracht werden. Da es sich bei der Geometrie Grundkörper um eine Komponente einer Schweißvorrichtung handelt, sind thermische Belastungen durch beispielsweise umherfliegende Schweißperlen oder abgeleitete Wärme ebenfalls möglich.

Schraubendom

Bei dem in Abbildung 7-17 zu sehenden Ausschnitt handelt es sich um einen Teil einer Baugruppe eines Personenkraftwagens (Pkw). Dieser hat den Zweck, beide Hälften einer zweigeteilten Baugruppe durch eine Schraubverbindung zu verbinden. Hierbei wird eine Schraube zunächst durch eine Bohrung der einen Komponente geführt und schneidet sich in den konisch zulaufenden Schaft, auch Schraubendom genannt, auf der anderen Komponente ein. Hierdurch wird eine reversible Verbindung der Komponenten geschaffen.

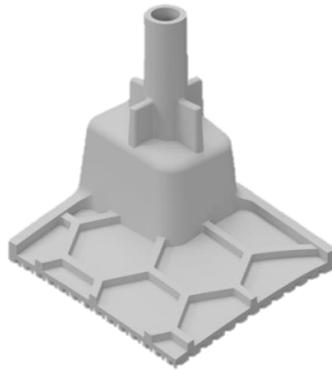


Abbildung 7-17 Ausschnitt des Schraubendoms

Der Boden des Ausschnitts besteht aus einer Freiformfläche. Diese besitzt von unten eine feine Rautenstruktur. Von oben ist eine gröbere Wabenstruktur aufgebracht. Bei der Baugruppe handelt es sich um ein dauerhaft im Pkw verbautes Betriebsmittel. Die hierdurch zu erwartenden Belastungen sind beispielsweise Vibrationen, welche durch den Betrieb des Motors oder durch den Fahrvorgang hervorgerufen werden, thermische Belastungen, die durch vom Motor abgegebene Wärme oder Umgebungstemperaturen verursacht werden, und Spannungen infolge verschiedener Einflüsse. Des Weiteren treten Spannungen infolge der Schraubverbindung direkt im Schaft und in angrenzenden Bereichen auf.

7.4.2 Ausgewählte Biopolymere und Rezyklate

Es wurden drei verschiedene Granulate in Hinblick auf die Fertigbarkeit und die mechanische Belastbarkeit ausgewählt und anschließend untersucht. Verglichen wurde ein konventionelles PLA mit einem Compound aus biobasiertem und holzfasergefülltem PE mit dem Handelsnamen Terralene® WF 3516 und einem rezyklierten Polyethylenterephthalat-Glycol (PETG). Das Granulat Terralene® WF 3516 wird nachfolgend kurz PE-Wood Compound genannt. Die Auswahl der Versuchsmaterialien repräsentieren die verschiedenen untersuchten Kunststoffe somit wie folgt:

- **Referenzkunststoff:** PLA
- **Biobasierter Kunststoff:** PE-Wood Compound
- **Rezyklierter Kunststoff:** PETG

Eine Übersicht der wichtigen Eigenschaften des PLA-Granulats ist in Tabelle 3 zu sehen.

Tabelle 3: Eigenschaften von PLA (NatureWorks LLC)

	Eigenschaften	Wert	Einheit	Norm
mechanisch	E-Modul	2315	MPa	ASTM D638
	Zugfestigkeit	50	MPa	ASTM D638
	Bruchdehnung	2,8 ⁹³	%	ISO 527
physikalisch	Schmelzfließrate	7-9 (220°C/2,16 kg)	g/ 10 min	ISO 1133
	Glasübergangstemperatur	55-60	°C	
	Schmelztemperatur	165	°C	
	Dichte	1,24	g/cm ³	ISO 1183
	Farbe	weiß		

Das PE-Wood Compound wurde vom Hersteller FKUR Kunststoff GmbH, Willich beschaffen. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften sind in Tabelle 4 dargestellt

Tabelle 4: Eigenschaften von PE-Wood Compound (FKUR Kunststoff GmbH)

	Eigenschaften	Wert	Einheit	Norm
mechanisch	E-Modul	1310	MPa	ISO 527
	Zugfestigkeit	23	MPa	ISO 527
	Bruchdehnung	10	%	ISO 527
physikalisch	Schmelzfließrate	13 (190 °C/2,16 kg)	g/ 10 min	ISO 1133
	Schmelztemperatur	130 – 145	°C	
	Dichte	1,014	g/cm ³	ISO 1183
	Farbe	braun		

Der Hersteller des rezyklierten PETGs ist die Nobufil GmbH, Krems an der Donau. In Tabelle 5 sind die grundlegenden Eigenschaften des Granulats gelistet.

Tabelle 5: Eigenschaften von PETG (Nobufil GmbH)

	Eigenschaften	Wert	Einheit	Norm
mechanisch	E-Modul	1480 ⁹⁵	MPa	ASTM D790
	Zugfestigkeit	48	MPa	ISO 527
	Bruchdehnung	4,5	%	ISO 527
physikalisch	Schmelzfließrate	4 ⁹⁵ (220°C/2,16 kg)	g/ 10 min	ISO 1133
	Glasübergangstemperatur	81 ⁹⁵	°C	
	Schmelztemperatur	230 ⁹⁵	°C	
	Dichte	1,27	g/cm ³	ISO 1183
	Farbe	transparent		

7.4.3 Druck der Betriebsmittel & Untersuchung der Lebensdauer

Zur Bewertung der Lebensdauer der Kunststoffe ist es auch erforderlich, ein besseres Verständnis über die jeweiligen charakteristischen Bauteildefekte zu schaffen. Dabei beeinflusst sowohl das Auftreten oder Nichtauftreten als auch die Art und Ausprägung des Bauteildefekts die Lebensdauer. Hierbei wird untersucht, ob es Bauteildefekte gibt, die speziell bei bestimmten Kunststoffen ausgeprägt sind. Daraus kann die Kritikalität der Lebensdauer bestimmt werden. Die Werte werden gemäß Gleichung 7 ermittelt:

$$y_{d,m} = \sum_{t=1}^3 \sum_{v=1}^3 x_{d,m,t,v} \quad \forall d \in D, \forall m \in M \text{ mit } t \in T, v \in V \quad (7)$$

$y_{d,m}$ Grad der Lebensdauer in Abhängigkeit der Bauteildefekte d

Die einzelnen Versuchsergebnisse wurden dabei über die Prozessparameter summiert. Ein Wert von +9 bedeutet somit in der Tendenz einen hohen Grad der Fertigbarkeit. Der Bauteildefekt trat hierbei kein einziges Mal auf. Umgekehrt impliziert ein Wert von -9, dass dieser Bauteildefekt bei allen Bauteilen des jeweiligen Kunststoffes mit einer starken Ausprägung aufgetreten ist. Dies deutet auf eine kritische Lebensdauer hin. Die resultierende Gesamtausprägung der Bauteildefekte der verschiedenen Kunststoffe ist in Abbildung 7-18 dargestellt.

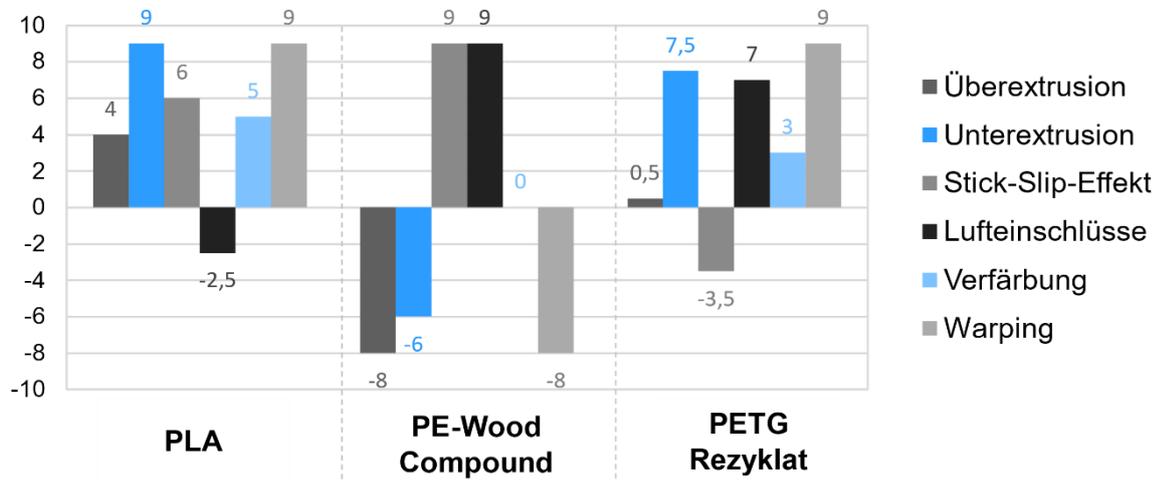


Abbildung 7-18: Kritische Bauteildefekte sortiert nach Kunststoffen im Verhältnis zu ihrem Grad der Lebensdauer

Der Referenzkunststoff **PLA** wies einen charakteristischen Bauteildefekt. Es handelt sich dabei um die Existenz von Lufteinschlüssen. Mit -2,5 ist die Ausprägung dieses Bauteildefekts jedoch gering im Vergleich zu den kritischen Bauteildefekten der anderen Kunststoffe. Die Bauteildefekte der anderen Kategorien befanden im positiven Wertebereich. Dies bedeutet, dass diese Bauteildefekte selten oder gar nicht bzw. vereinzelt in geringer Ausprägung auftreten. Die Lebensdauer des PLA sollte durch diese nicht kritisch beeinflusst. Abbildung 7-19 zeigt ein beispielhaftes Betriebsmittel aus PLA.

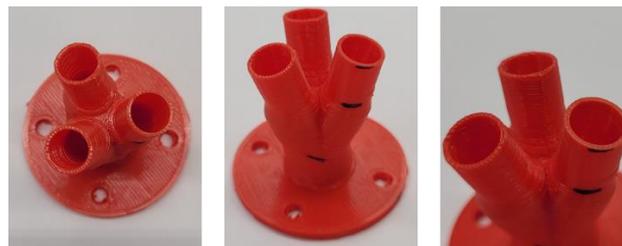


Abbildung 7-19: Beispielhaftes Betriebsmittel aus PLA

PE- Wood Compound zeichnete mehrere charakteristische Bauteildefekte aus, die die Lebensdauer beeinträchtigen. Am ausgeprägtesten war hierbei die Überextrusion und das Warping gefolgt von der Unterextrusion. Im Vergleich zum PLA sind diese charakteristischen Bauteildefekte schwerwiegender zu bewerten. Im Gegensatz zu Lufteinschlüssen verändern Über- und Unterextrusion sowie Warping die Geometrie und die Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils. Lufteinschlüsse und Erscheinungsbilder des Stick-Slip-Effekts sind beim PE-Wood Compound nicht erkennbar aufgetreten. Abbildung 7-20 zeigt ein beispielhaftes Betriebsmittel aus PE-Wood Compound.



Abbildung 7-20 Beispielhaftes Betriebsmittel aus PE-Wood Compound

Genauso wie das PLA zeigte auch das **PETG Rezyklat** nur einen charakteristischen Bauteildefekt im kritisch für die Lebensdauer auf. Es handelt sich dabei um den Stick-Slip-Effekt. Der Grad der Fertigbarkeit beträgt hierbei -3,5. Dieser lässt sich von der Kritikalität ähnlich wie der charakteristische Bauteildefekt des PLAs einordnen. Auch beim Stick-Slip-Effekt handelt es sich nur um einen optischen Defekt. Die Oberflächenbeschaffenheit und die Endkonturnähe werden dadurch nicht verändert. Abbildung 7-21 zeigt ein beispielhaftes Betriebsmittel aus PETG Rezyklat.



Abbildung 7-21 Beispielhaftes Betriebsmittel aus PETG Rezyklat

Abschließend wurde ein direkter Vergleich der holistischen Lebensdauer der biobasierten und rezyklierten Kunststoffe gezogen. Hierzu wurden die Versuchsergebnisse über die Prozessparameter und Kategorien hinweg summiert. Dies wird in Gleichung 8 verdeutlicht.

$$y_m = \sum_{d=1}^6 \sum_{t=1}^3 \sum_{v=1}^3 x_{d,m,t,v} \quad \forall m \in M \text{ mit } d \in D, t \in T, v \in V \quad (8)$$

y_m kumulierter Grad der Fertigbarkeit von Kunststoff m

Die Auswertung der Fertigbarkeit der Kunststoffe ist in Abbildung 7-22 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass sowohl PLA als auch das PETG Rezyklat eine hohe Lebensdauer aufweisen. Dies bedeutet, dass diese Kunststoffe ein großes Prozessfenster haben, in dem Bauteile mit keinen oder wenigen schwach ausgeprägten Bauteildefekten gefertigt werden können. Das PE-Wood Compound dagegen weist eine niedrige Lebensdauer auf. Eine Mehrheit dieser Bauteile sind verzogen, weisen eine ungleichmäßige Oberflächenbeschaffenheit und eine geringe Maßhaltigkeit auf.

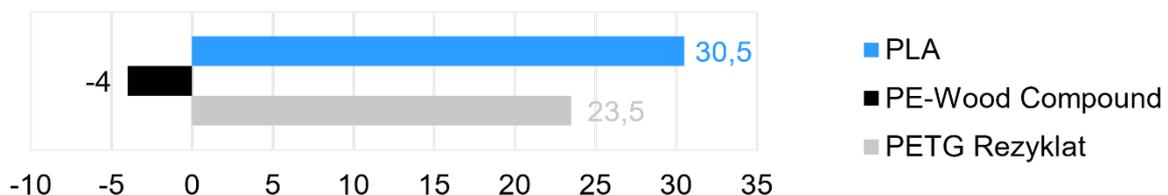


Abbildung 7-22: Kumulierter Grad der Lebensdauer von PLA, PE-Wood Compound und PETG Rezyklat

Es wurde jedoch festgestellt, dass die Einstellung einer niedrigen Drucktemperatur die Lebensdauer des PE-Wood geringfügig verbessert. Als Ursache für die resultierten Bauteildefekte bei der Fertigung von Bauteilen aus dem PE-Wood Compound wurde der Erklärungsansatz herangezogen, dass die enthaltenen Holzfasern die Bindungskräfte des Kunststoffes reduziert. Dies kann ein Abreißen des Materialstrangs begünstigen. Darüber hinaus kann die ungleichmäßige Abkühlung des Extrudats Eigenspannungen im Bauteil induzieren. Dadurch tritt Warping ausgeprägt bei Bauteilen aus dem PE-Wood Compound auf. Im Anhang des Berichts befinden sich weitere Ergebnisse aus AP 4.1, 4.3 und 4.4.

8 Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge

Der Beitrag „Nachhaltiger 3-D-Druck durch multiaxiale Maschinensysteme und neue Stoffkreisläufe“ erschien am 15. Oktober 2021 in Ausgabe 5 der **Zeitschrift maschinenbau**. Weiterhin erfolgte zu Beginn des Projekts eine **Pressemitteilung** (<https://www.wzl.rwth-aachen.de/cms/WZL/Das-WZL/Presse-und-Medien/Aktuelle-Meldungen/~oazih/Nachhaltiger-3D-Druck-durch-multiaxiale/>). Auf der **Formnext 2021** wurde der erste Demonstrator (Ender 3) präsentiert und erhielt großes Interesse. Weiterhin wurden in den Folgejahren auf der **Formnext 2022 und 2023** Jahren 5-achsig gedruckte Bauteile von beiden Anlagen präsentiert sowie das Forschungsprojekt BioME vorgestellt. Auf der **TCT 3SIXTY** in Birmingham, UK wurde am 19. April 2022 der Vortrag „Material extrusion of bio-based plastic pellets with multi-axial additive manufacturing for resource-saving production of applications from the automotive industry“ über das Forschungsprojekt BioME gehalten. Auf dem **Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium (AWK)** mit dem Titel „Empower Green Production“ wurde am 11. und 12. Mai 2023 die BioME-Anlage und das Forschungsprojekt vor-Ort und in einem digitalen Rundgang als Demonstrator vorgestellt.

9 Fazit/Ausblick

Innerhalb des Forschungsprojektes BioME wurden während des Aufbaus des Gesamtsystems von Bahnplanung bis fertigem Bauteil einige Herausforderungen aufgedeckt und bewältigt. Dabei wurde eine funktionale Anlagentechnik erstellt, mit der Kunststoffgranulate verarbeitet werden können. Mit der Fülle der adressierten Themen war es möglich, ein Gesamtbild zum Forschungsthema aufzuzeigen, es konnte jedoch nicht jedes Thema mit großer Tiefe erforscht und mit gleich großem Erfolg umgesetzt werden.



Abbildung 9-1: Ausschnitt der adressierte Themen in BioME

Neben Corona und damit verbundenen Lieferengpässen stellten auch die Beschaffung von geeignetem Granulatmaterial, die komplizierte Programmierung der Siemenssteuerung und Personalwechsel während des Projekts Herausforderungen dar.

Aus den Ergebnissen des Forschungsprojekts BioME ergeben sich praktische Themenstellungen und weitere Forschungsfelder. Die Anlagentechnik kann weiter optimiert werden, insbesondere im Hinblick auf eine Kostenoptimierung von Komponenten, z.B. der Steuerung oder der Dreh- und Schwenkeinheit. Auch das Extruderkonzept besitzt weiteres Potential, das beispielsweise in einen noch leistungsfähigeren Extruder umgesetzt werden kann. Die Software zur Bahnplanung besitzt ebenfalls weiteres Potential, das erschlossen werden kann.



Abbildung 9-2: Einordnung des Forschungsprojekt BioME

Aus der Betrachtung der gesamten Prozesskette eines Recyclings ergeben sich die weiteren Forschungsfelder. Während BioME sich auf die Fertigung und Nutzung konzentrierte, wurden die Forschungsfelder des Recyclings und Rohmaterials nur am Rande betrachtet. Hier bieten sich weitere potentielle Forschungsfelder, sowohl in der tieferen Betrachtung einzelner Bereiche als auch in der Gesamtheitlichen Betrachtung des gesamten Materialzyklus.

10 Literaturangaben

Coupek - Reduction of Support Structures and Building Time by Optimized Path Planning Algorithms in Multi-axis Additive Manufacturing – In: Procedia CIRP, Volume 67, 2018, S. 221-226

Ultimaker - Ford: Reinventing efficient manufacturing using 3D printing - Whitepaper, 2019, <https://ultimaker.com/learn/ford-reinventing-efficient-manufacturing-using-3d-printing/>

3Dnatives - Audi verwendet mehr Kunststoff-3D-Druck in Produktion - Artikel, 2019, <https://www.3dnatives.com/de/audi-hilfswerkzeuge-3d-druck-100420191/>

Stratasys - Volvo Trucks' Slashes Time and Cost of Tool Production with Additive Manufacturing – Whitepaper, 2022, <https://www.stratasys.com/de/resources/case-studies/volvo/>

Jones et al. - The replicating rapid prototype - In: Robotica, Volume 29, 2011, S. 177-191

11 Anlagen/Anhang

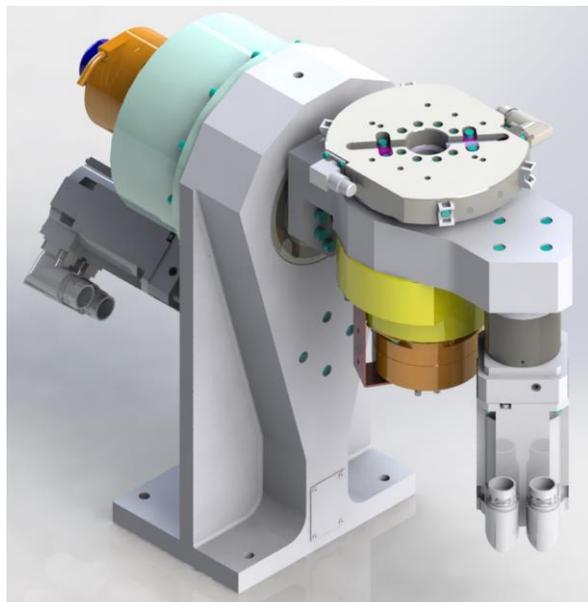


Abbildung 11-1: AP 2.2 Darstellung des entwickelten Zwei-Achsen-Systems der Firma peiseler

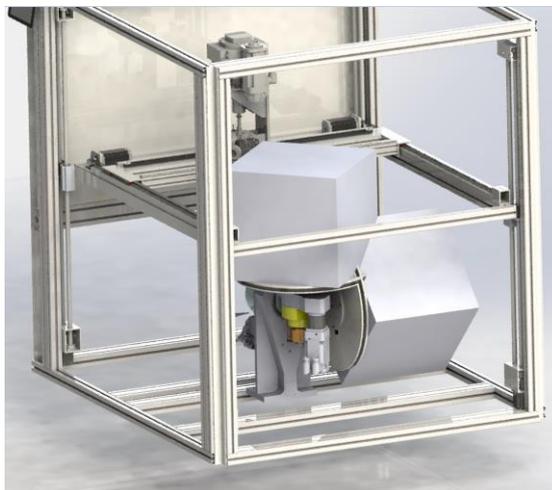


Abbildung 11-2: AP 2.2 Darstellung einer Bauraumbetrachtung bei Schwenkung der 4. Achse

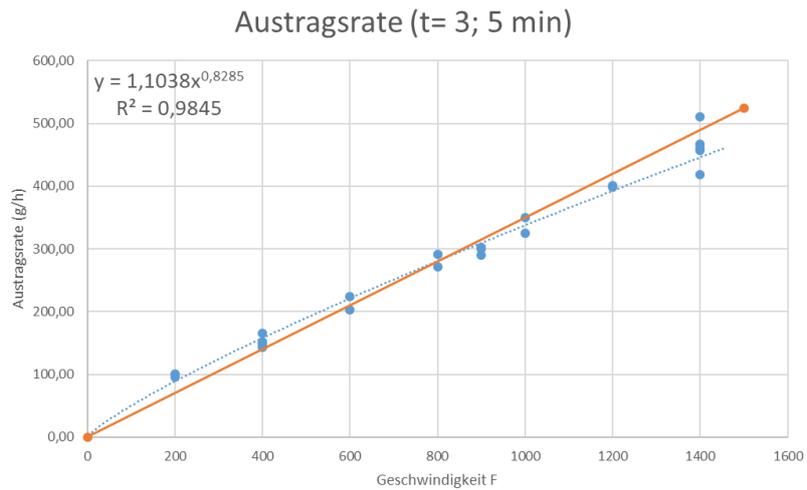


Abbildung 11-3: AP 3.1 Statische Extrusionsversuche bei konstanter Drehzahl der oberen Schnecke

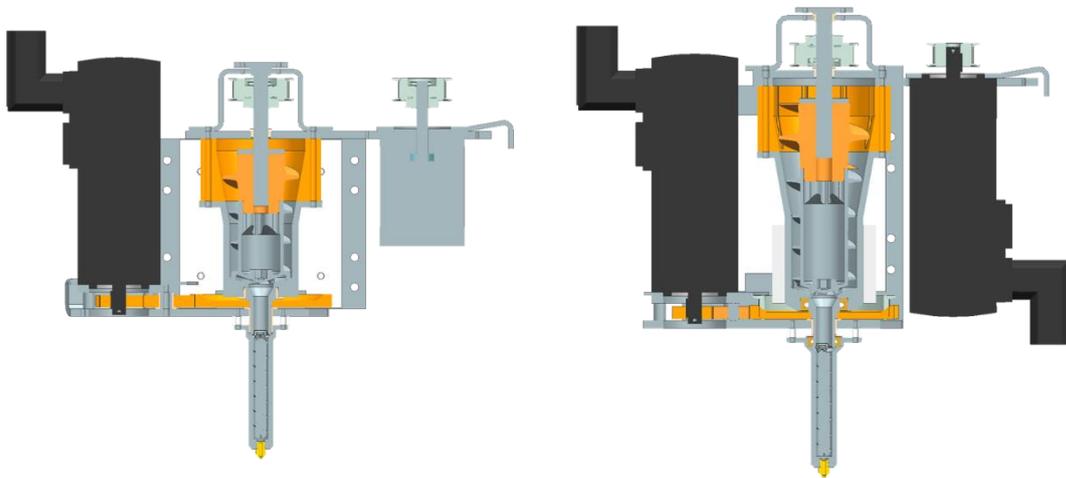


Abbildung 11-4: AP 3.2 Vergleich der CAD-Modelle des ursprünglichen (links) und des optimierten Extruders (rechts)

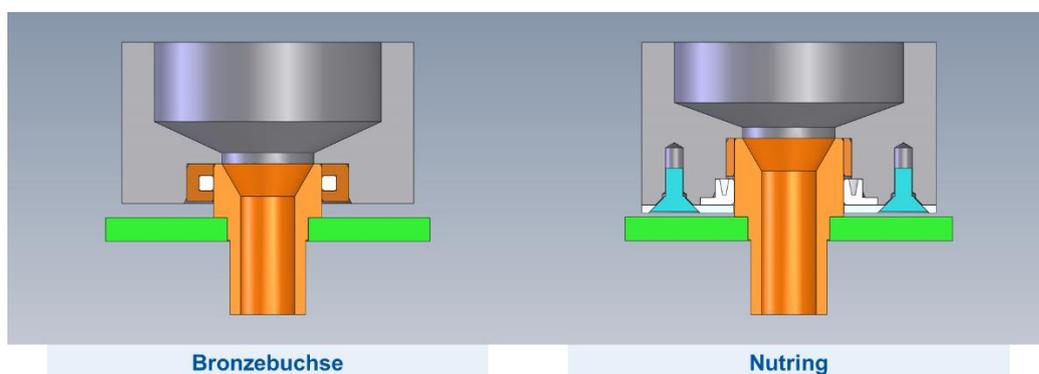


Abbildung 11-5: AP 3.2 Darstellung der möglichen Dichtungskonzepte am Übergang zwischen den Schnecken

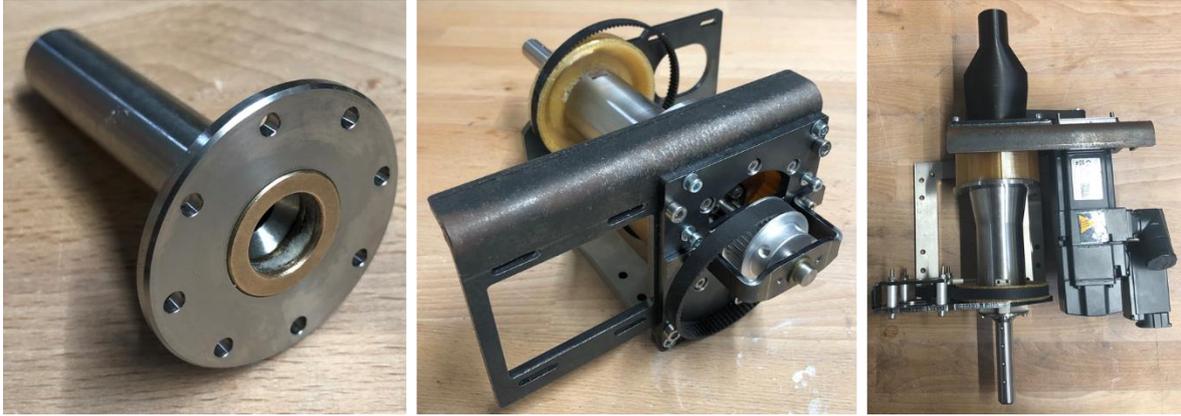


Abbildung 11-6: AP 3.2 Einzelkomponenten und Teilzusammenbau des optimierten Extruders

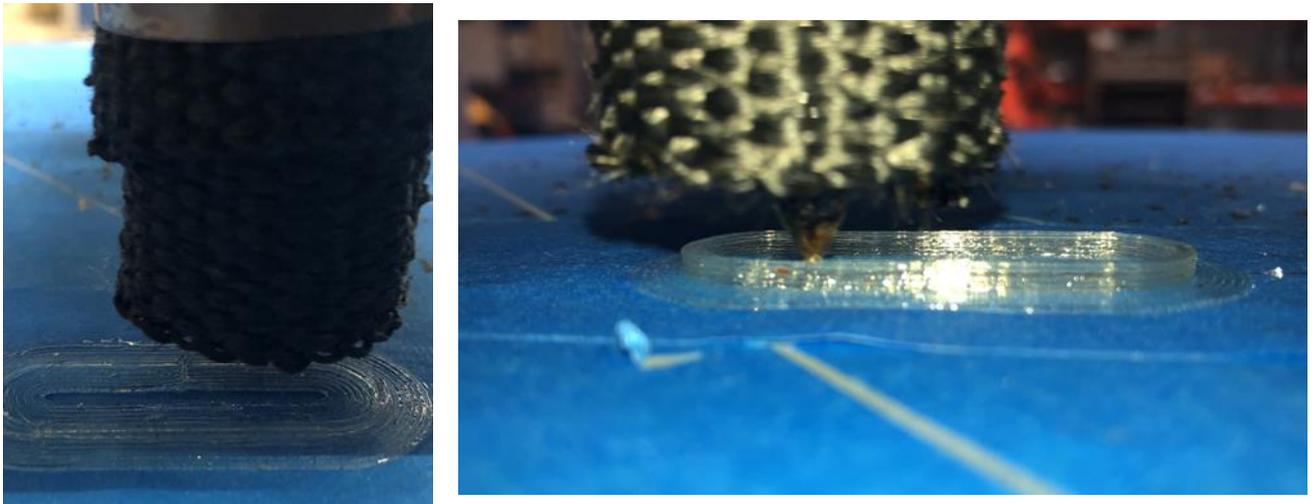


Abbildung 11-7: AP 3.2 Druck der ersten Schichten eines 5-Achs Testbauteils

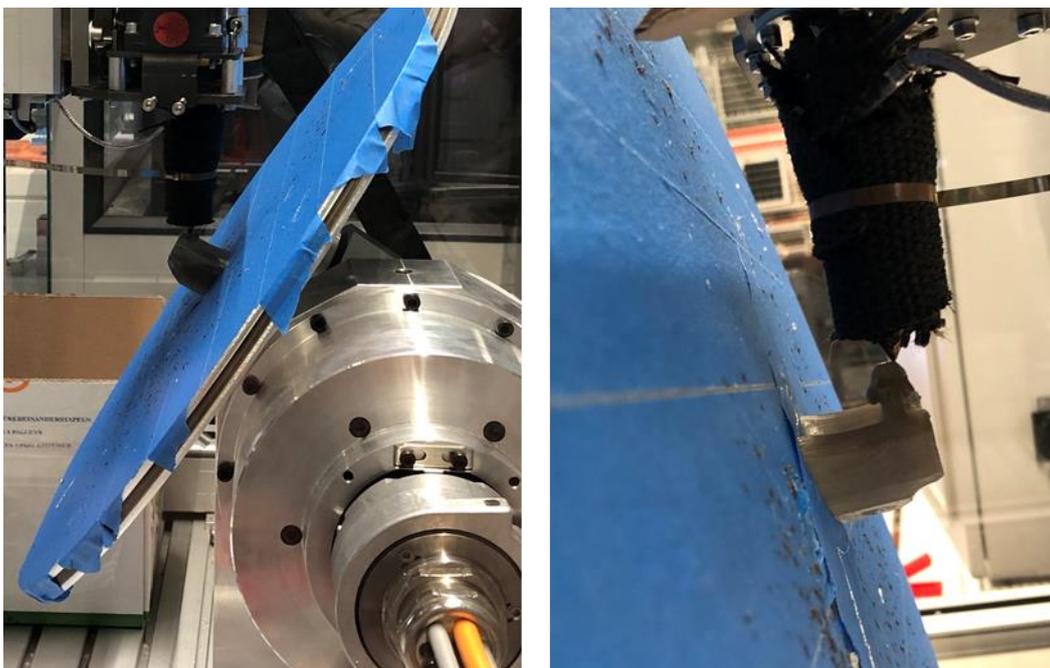


Abbildung 11-8: AP 3.2 5-Achsiger Bauteildruck des Bauteils „Schweißvorrichtung“

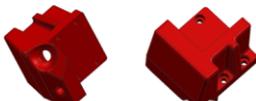
Bezeichnung Betriebsmittel		Funktion: Anzahl Segmente, Anzahl Schnitte, Komplexität	Anforderungen: Lastenverteilung, Kraftfluss, chem. Beanspruchung, Genauigkeit
Grundkörper Schweißvorrichtung		<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Segmente: 5 • Anzahl Schnitte: 3 • Überhänge über 45°: ja • Komplexität: mittel • Anzahl Überhänge: 6 	<ul style="list-style-type: none"> • Lastenverteilung: • Chem. Beanspruchung: / • Genauigkeit: hohe Genauigkeit für die Bohrungen
Topologie optimierte Schweißvorrichtung		<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Segmente: 6 • Anzahl Schnitte: 3 • Überhänge über 45°: ja • Komplexität: hoch • Anzahl Überhänge: 6 	<ul style="list-style-type: none"> • Lastenverteilung: vertikal • Chem. Beanspruchung: / • Genauigkeit: hohe Genauigkeit für die Bohrung

Abbildung 11-9: AP 4.1 Anforderungsanalyse der Eigenschaften von Betriebsmitteln I

Bezeichnung Betriebsmittel		Funktion: Anzahl Segmente, Anzahl Schnitte, Komplexität	Anforderungen: Lastenverteilung, Kraftfluss, chem. Beanspruchung, Genauigkeit
Endusebauteil		<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Segmente: 4 • Anzahl Schnitte: 4 • Überhänge über 45°: nein • Komplexität: mittel • Anzahl Überhänge: 3 	<ul style="list-style-type: none"> • Lastenverteilung: / • Chem. Beanspruchung: / • Genauigkeit: hohe Genauigkeit für die Bohrungen
Kabeldorn		<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Segmente: 5 • Anzahl Schnitte: 3 • Überhänge über 45°: ja • Komplexität: hoch • Anzahl Überhänge: 2 	<ul style="list-style-type: none"> • Lastenverteilung: / • Chem. Beanspruchung: / • Genauigkeit: hohe Genauigkeit für den Dorn

Abbildung 11-10: AP 4.1 Anforderungsanalyse der Eigenschaften von Betriebsmitteln I

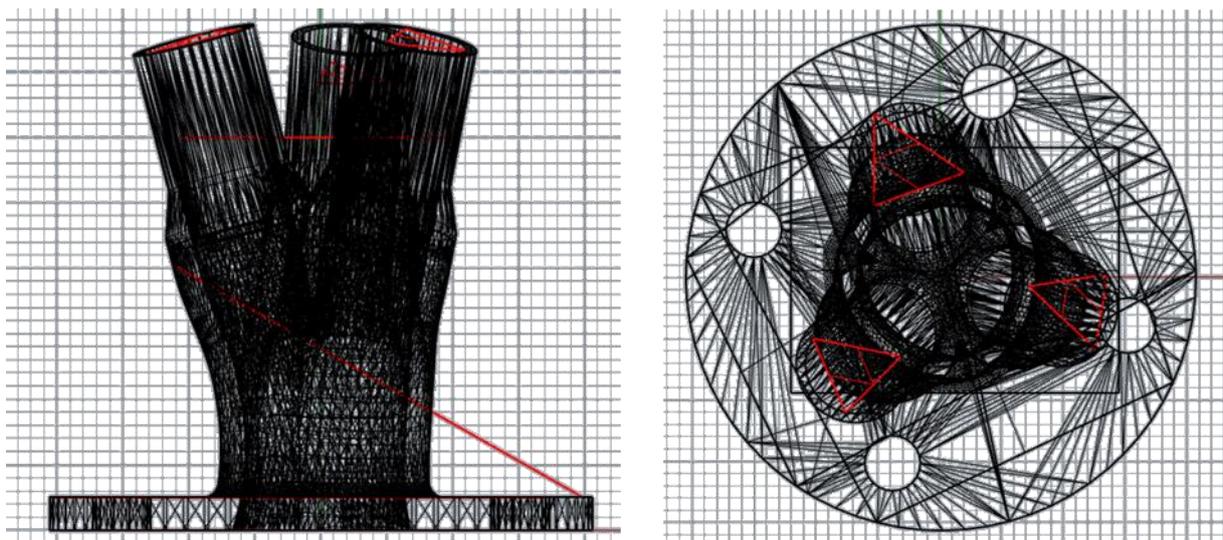


Abbildung 11-11: AP 4.3 Anforderungen für die Bahnplanungsoptimierungen I

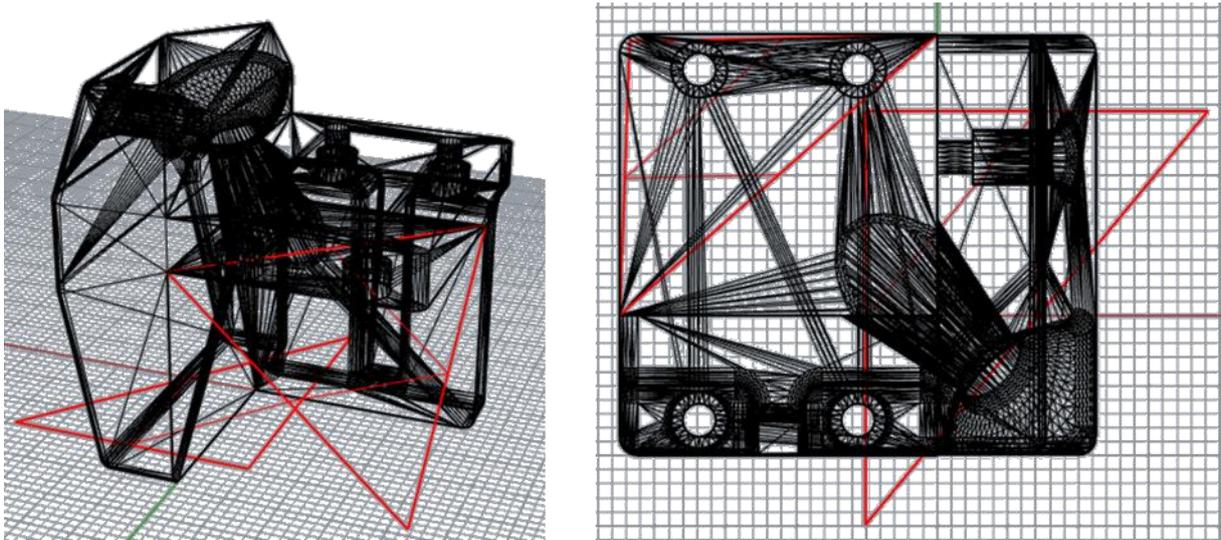


Abbildung 11-12: AP4.3 Anforderungen für die Bahnplanungsoptimierungen II



Abbildung 11-13: AP 4.3 5-Achsiger Bauteildruck des Bauteils „Schweißvorrichtung“ in Originalgröße

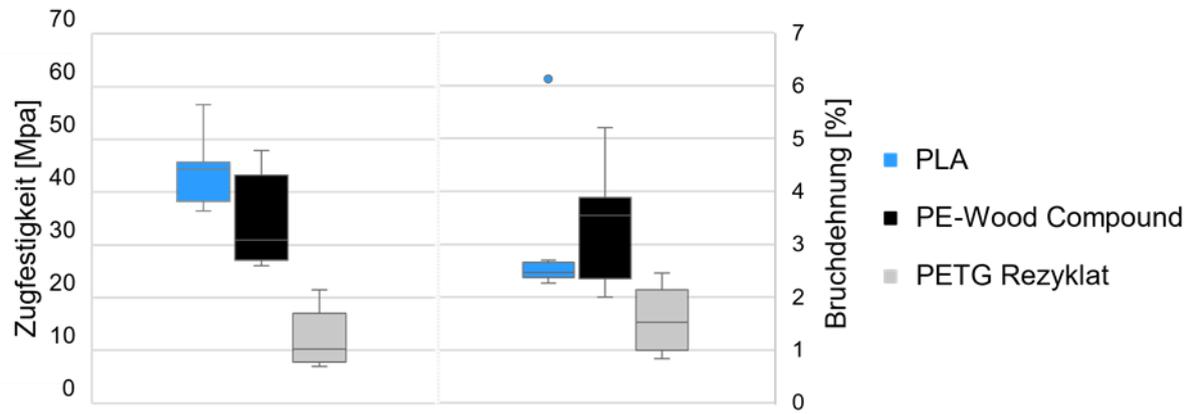


Abbildung 11-14: AP 4.3 Untersuchung der Produkteigenschaften bei Bauteilversagen I

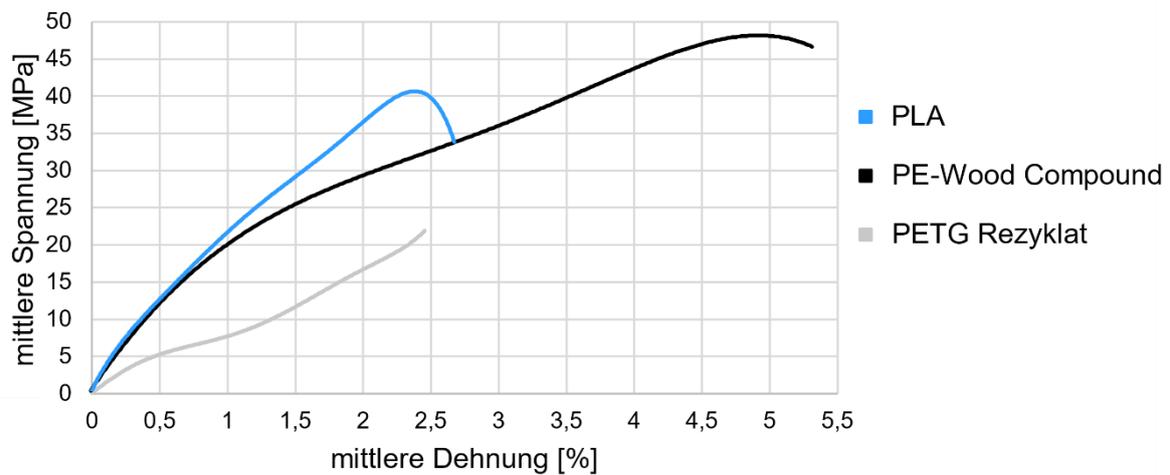


Abbildung 11-15: AP 4.3 Untersuchung der Produkteigenschaften bei Bauteilversagen II

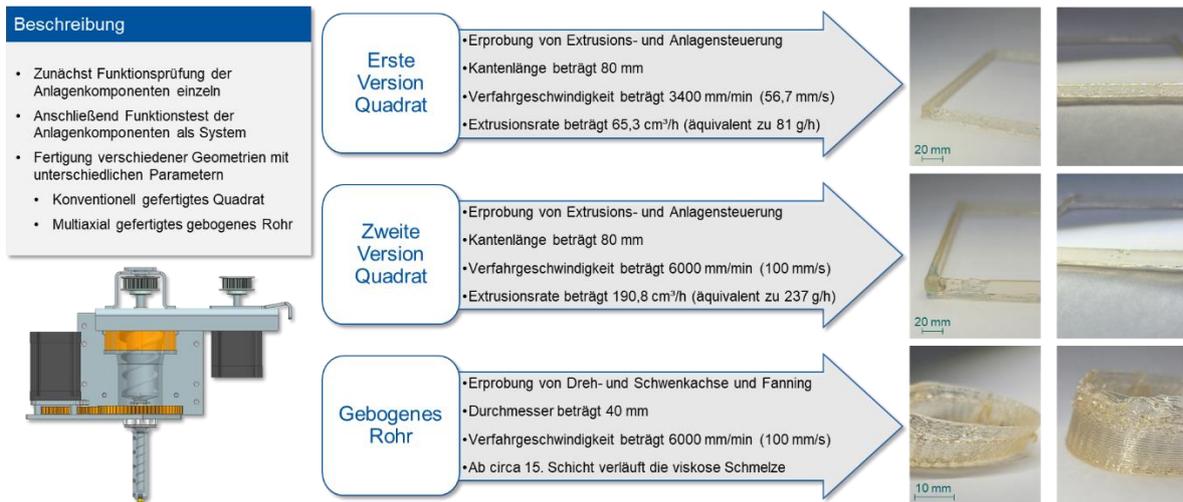


Abbildung 11-16: AP4.4 Optimierung der Gesamtanlage zur verbesserten Fertigung von Betriebsmitteln