

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

Lösungsbasierter endlosfaserverstärkter 3D-Druck auf Basis von Cellulose für in Deutschland hergestellte Gebrauchsgüter

Vorhaben-Nr. BMBF 02P20E150 | 01.07.2021 - 31.10.2022

DITF FORSCHUNGSBERICHTE

Gefördert vom



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Betreut vom



PTKA
Projektträger Karlsruhe
im Karlsruher Institut für Technologie

FORSCHUNGSSTELLE

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf

in Zusammenarbeit mit der Industriepate

Arburg GmbH + Co KG, Loßburg



Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Rahmenprogramme „Vom Material zur Innovation“ und „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ zum Thema „Biologisierung der Technik“ (Förderkennzeichen 02P20E150) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Die Verantwortung für den Inhalte dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

AUTOREN

Dr. -Ing. Sathis Kumar Selvarayan

Dipl. -Ing. Carsten Linti

Prof. Dr. -Ing. Markus Milwich

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf

INHALTSVERZEICHNIS

1	KURZDARSTELLUNG	1
2	RAHMENBEDINGUNG FÜR DAS PROJEKT	3
2.1	Voraussetzungen	3
2.2	Stand der Technik	3
2.2.1	Prozessablauf bei additiven Fertigungsverfahren.....	4
2.2.2	Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren.....	5
2.2.3	Additive Fertigung von Cellulosen	8
2.2.4	Additive Fertigung von endlofaserverstärkten Verbundwerkstoffen	8
2.2.5	Problemlage	11
2.3	Zielstellung	11
2.4	Projektplanung	12
3	PROJEKTERGEBNISSE	15
3.1	3D-Drucken von Celluloseverbundwerkstoffen.....	15
3.1.1	Eigenschaften der Cellulosefasern	15
3.1.2	Lösungsmittel für die Druckumgebung	16
3.1.3	Druckkopf Aufbau.....	16
3.2	Entwicklung der Polymerlösung	17
3.2.1	Untersuchung der Löslichkeit von CAB	17
3.2.2	Analyse der Verarbeitbarkeit der Polymerlösung	18
3.3	Herstellung von Endoscellulosefaser-verstärkten Druckfilamenten.....	25
3.3.1	Filamentherstellung.....	27
3.3.2	Untersuchung der Filamenteigenschaften	30
3.4	Druckkopf Entwicklung.....	43
3.5	Entwicklung von 3D-Druckprozessen	48
3.5.1	Druckprozess	48
3.5.2	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des gedruckten Bauteils.....	51
3.5.3	Optische Untersuchung des gedruckten Bauteils.....	53

3.6	Technologieerprobung auf dem Freeformer.....	54
3.7	Zusammenfassung	57
3.7.1	Ausblick	59
4	VERWERTUNGSPLAN	61
4.1	Wirtschaftliche Verwertungsperspektive	61
4.2	Wissenschaftlich technologische Verwertungsperspektive	63
5	ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	65
6	BEKANNTGEWORDENER FORTSCHRITT AN ANDEREN STELLEN	65
7	AUßENDARSTELLUNG	66
8	QUELLEN	67
9	ANHANG.....	VII
A.1	Ergebnisse der Viskositätsmessung der Polymerlösungen mit 40 % CAB (w/v).....	VII
A.2	Ergebnisse der Filament-Biegesteifigkeit	XI

1 KURZDARSTELLUNG

Die Natur arbeitet fast ausschließlich mit Faserverbundwerkstoffen, Beispiele dafür sind unserer Haut und unseren Knochen, aber auch tierische Chitinpanzer und Holz. Gleich ist bei allen, dass in eine formgebende Matrix belastungsgerecht verlaufende, verstärkende Fasern eingebettet sind. Dieses Bauprinzip mit minimalem Energie- und Materialaufwand ermöglicht das Überleben der Spezies bei bestmöglicher Funktionserfüllung. Ein weiteres Energiespar-Prinzip der Natur ist die sogenannte lösungsbasierte Herstellung der Verbunde bei Umgebungstemperatur, wie beispielsweise bei der Wundheilung. Im Tierreich sind hier Muschelschalen oder Spinnenseide zu nennen. Biobasierte Faserverbundwerkstoffe (FVW) sind derzeit stark nachgefragt und bestehen aus Naturfasern oder aus Holz hergestellten Cellulosefasern, welche in eine biobasierte Matrix eingebettet sind. Sie sind wesentlich ökologischer mit vergleichbaren gewichtsbezogenen Eigenschaften bei Glasfaserverbunden. Natur- bzw. Cellulosefasern können aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften bislang nicht im klassischen 3D-Druck verarbeitet werden.

Ähnlich mit natürlichen Prozessen ermöglichen neue 3D-Druckverfahren mit Endlosfaserverstärkung ebenfalls die belastungsgerechte Ablage des Faserstrangs an den richtigen Ort (Topologie-Optimierung) und in die geeignete Richtung. Zentrales Ziel des Forschungsprojekts CellLoes-3D-Druck war die Entwicklung eines energie- und materialsparenden 3D-Druckverfahrens für leichte biobasierte Faserverbundwerkstoffe. Die Herstellung der Cellulose-Matrix und deren Verbindung mit endlosen Cellulosefasern erfolgt bei Umgebungstemperatur lösungsbasiert direkt im 3D-Druckkopf. Wie in der Natur wird in einem Arbeitsgang Material und Bauteil hergestellt. Die chemische Ähnlichkeit von Cellulose-Fasern und -Matrix erzielt sehr hohe mechanische Eigenschaften und ein gutmütiges Bruchverhalten.

Für das Erreichen der Projektziele wurden die Arbeitsinhalte in zwei Bereiche Materialentwicklung und Anlage- sowie Prozessentwicklung aufgeteilt. Die jeweiligen Ergebnisse und Methoden wurden nach dem ganzheitlichen Ansatz bewertet. Der im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte „Proof of Concept“ demonstriert die neue bioinspirierte Methodik zur Herstellung von Gebrauchsgütern aus nachhaltigen Materialien.

2 RAHMENBEDINGUNG FÜR DAS PROJEKT

2.1 Voraussetzungen

Der hohe Markt- und Kundennutzen der additiven Fertigung (3D-Druckverfahren) mit Faserverstärkung liegt in der material- und ressourcenschonenden sowie energieeffizienten Leichtbauweise und dem äußerst geringen Gewicht bei relevanter Steifigkeit und Festigkeit. Leichtbau mündet in weniger bewegten Massen und damit reduziertem Energieaufwand und weniger Treibhaus-Emission. Angesichts der allgegenwärtigen Themen Treibhausgasreduktion und Nachhaltigkeit ist die Nutzung nachwachsender Rohstoffe zur Herstellung von Gebrauchsgütern unverzichtbar.

Naturfasern finden aufgrund ihrer ökologischen Vorteile zunehmend industrielles Interesse. In diesem Sinne werden die im 3D-Druck verwendeten Materialien zunehmend mit Verstärkungsmaterialien aus Naturfasern ausgerüstet, obwohl ihre mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu reinem Polymer lediglich mäßig sind. Andererseits besitzen z.B. aus Buchenholz-Cellulose hergestellte Chemiefasern (Viskose, Rayon) sehr gute, definierte, gleichmäßige mechanische Eigenschaften bei vergleichbaren ökologischen Vorteilen und könnten so neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnen [1][2].

An den DITF wird der Einsatz der Bio-Fasern mit neuen leistungsfähigen Biomatrices kombiniert, u.a. auch aus komplett rezyklierbarer Cellulose. Entwickelt wurden reine biobasierte vollständig aus Cellulose bestehende Faser-Verbundwerkstoffe, deren mechanische Eigenschaften sehr nahe an Glasfaserverbunden liegen. Firma Arburg im Rahmen ihres neuen Firmenprogramms „arburg GREEN world“ aufgegriffen die ökologischen Vorteile von Cellulosematerialien, um die Anwendung ihres 3D-Drucker-Freeformers auf den Druck von biobasierten Materialien, insbesondere Cellulosefasern und biobasierten Matrices auszuweiten. Damit werden die Ziele der Reduzierung von Treibhausgasemissionen, des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit kontinuierlich verfolgt und die Qualität und Eigenschaften von Gebrauchsgütern stetig verbessert.

2.2 Stand der Technik

Additive Fertigung ist ein Oberbegriff für Technologien, bei denen Bauteile durch Hinzufügen von Material hergestellt werden. Diese Verfahren sind das Gegenteil von subtraktiven Verfahren wie Fräsen, Drehen oder Bohren, bei denen Material entfernt wird. Seit dem letzten Jahrzehnt hat sich die additive Fertigung sehr schnell entwickelt und wird im gesamten

Produktionsbereich immer beliebter. Der Umsatz mit Produkten und Dienstleistungen der additiven Fertigung wuchs weltweit um 19,5 % auf mehr als \$15,2 Milliarden [3].

2.2.1 Prozessablauf bei additiven Fertigungsverfahren

Beginnend mit dem Computer Aided Designing (CAD) des Wunschbauteils lässt sich der Prozessablauf bei additiven Fertigungsverfahren generell in den Pre-Process, der Produktionsphase und den Post-Process unterteilen (Abb. 1). Die Pre-Process-Phase umfasst hauptsächlich die Datenaufbereitung sowie die Materialauswahl und die Designoptimierung für die Fertigung beinhaltet. Dabei werden alle herzustellenden Bauteile als Designmodell (meist als flächenbasiertes Standard Tessellation Language (STL)-Modell) virtuell im verfügbaren Raum positioniert. Falls Stützstrukturen erforderlich sind, werden diese hinzugefügt, und anschließend werden die Bauteile auf dem Druckbett gesliced. Unter Slicing versteht man die Unterteilung der Bauteile in einzelne ebene Schichten, die in der Regel parallel zueinander mit bevorzugten Abständen in Z-Richtung angeordnet sind. In jeder Schicht werden die Befehle zur Erzeugung der Bauteilstruktur über maschinenlesbare Fahrbefehle in X/Y/Z-Koordinaten (Druckkopfbahn) dargestellt und in einem maschinenlesbaren Programm – „G-Code“ gespeichert.

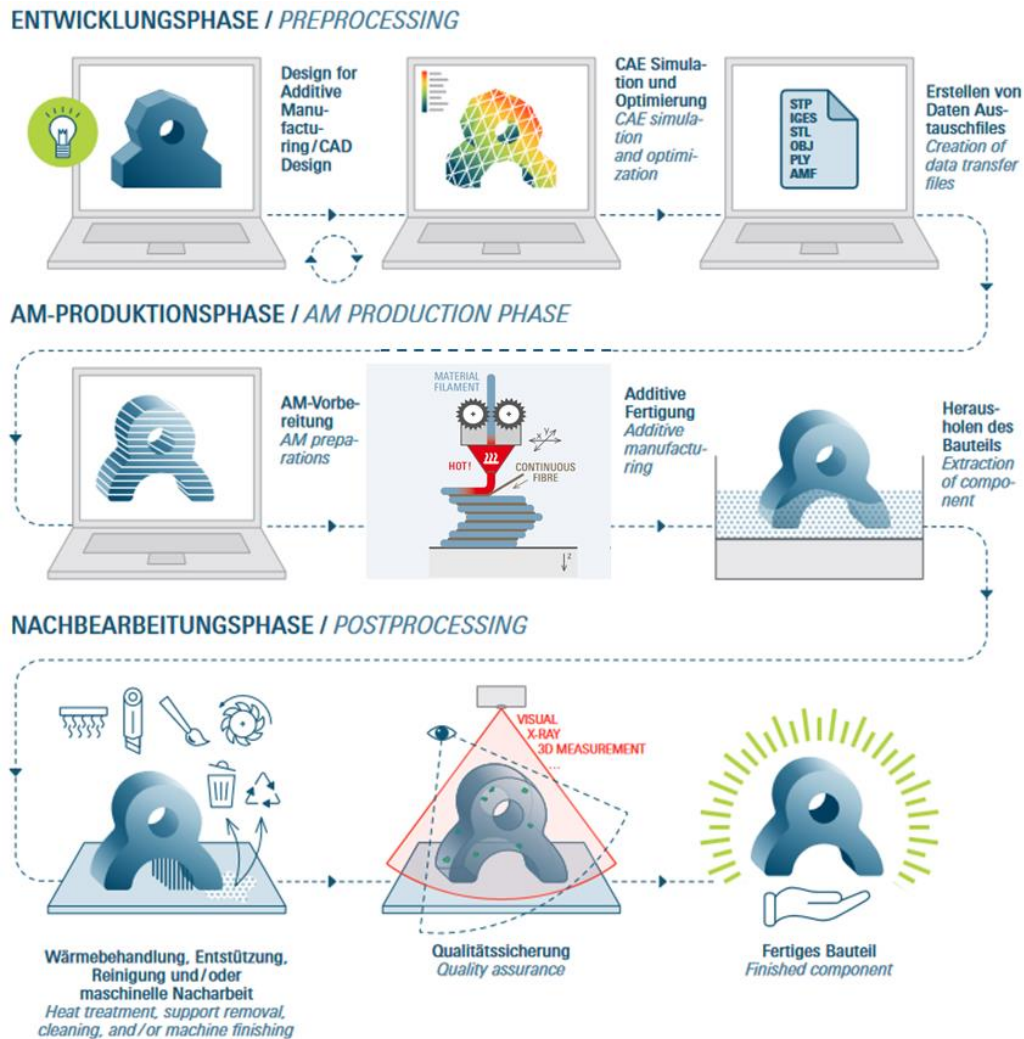


Abb. 1 Exemplarische Darstellung des Prozessablaufs bei additiven Fertigungsverfahren [4].

Der G-Code wird dann in den Speicher des 3D-Druckers geladen und die Produktionsphase folgt. Während der Produktionsphase führt die Maschine die im G-Code beschriebenen Befehle aus und die einzelnen Bauteile werden Schicht für Schicht gefertigt.

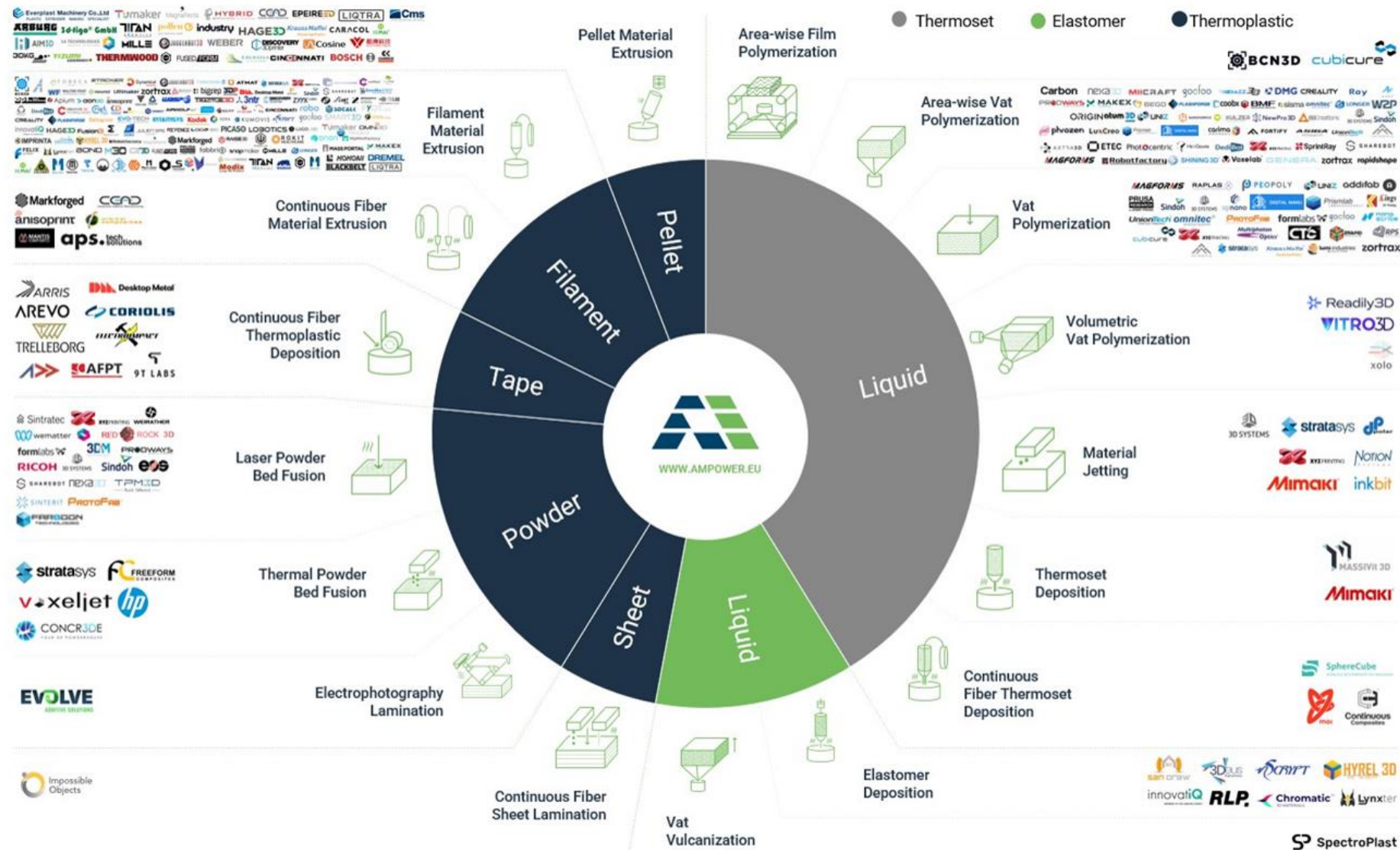
Nach der Entnahme der Bauteile aus dem Druckbett beginnt der Postprozess. Dazu gehören insbesondere die Reinigung und die Entfernung der Unterkonstruktion. Der Begriff Nachbearbeitung kann auch weitere Bearbeitungsschritte wie das Nachhärten (z.B. bei additiven Verfahren mit Duroplasten) oder allgemeine Nachbearbeitungen zur Erzielung der gewünschten Bauteileigenschaften (z.B. Zerspanungsprozesse, Lackieren) und Qualitätskontrolle umfassen.

2.2.2 Klassifizierung der additiven Fertigungsverfahren

Additive Fertigung ist in der Literatur unter vielen verschiedenen Bezeichnungen bekannt, z. B. generative Fertigung, „Rapid Manufacturing“, „Solid Freeform Fabrication“, „Direct Digital Manufacturing“, „Layered Manufacturing“ oder 3D-Druck [5]. Je nach Zustand der gedruckten

Materialien, d.h. flüssig, fest oder pulverförmig, kann additive Fertigung in verschiedene Technologien unterteilt werden, z. B. „Fused Deposition Modeling“ (FDM) oder „Fused Filament Fabrication“ (FFF) bezeichnet, selektives Lasersintern (SLS), Stereolithografie (SLA), Elektronenstrahlschmelzen (EBM) und „Binder Jetting“ [6]. Je nach Technologie gibt es verschiedene Arten von Materialien, die für additive Fertigung verwendet werden können, darunter Kunststoffe, Metalle, Keramiken und Verbundwerkstoffe. Die Verfügbarkeit von Materialien, die für die Herstellung von additiven gefertigten Teilen geeignet sind, ist jedoch noch begrenzt [7]. Da in vielen Fällen bestimmte besondere Eigenschaften wie mechanische Festigkeit, elektrische Leitfähigkeit, thermische Beständigkeit, Haltbarkeit und Multifunktionalität erforderlich sind, versuchen die Entwickler, neuartige Werkstoffe und Werkstoffe einzuführen, die so aufbereitet sind, dass sie die oben genannten Eigenschaften aufweisen, um diese Lücke zu schließen.

Aufgrund der niedrigen Kosten, der einfachen Herstellung, der Vielseitigkeit und der Prozessvielfalt dominiert die additive Fertigung von Kunststoffen den Marktanteil im Vergleich zu anderen Materialien wie Metallen und Keramiken. Abb. 2 veranschaulicht die Technologielandschaft der additiven Fertigung von Kunststoffen. In der Regel werden für die additive Fertigung von Kunststoffen abhängig vom Ausgangsmaterial - Thermoplaste, Duroplaste oder Elastomere - 17 verschiedene etablierte Fertigungsverfahren eingesetzt. Davon werden vier ausschließlich für die Herstellung von endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoffen entwickelt. Bei den Thermoplasten werden die Ausgangsstoffe geschmolzen und auf die Druckoberfläche gelegt oder direkt auf der Druckoberfläche geschmolzen (Pulverbett Verfahren), im Anschluss daran abgekühlt, um die Strukturen zu bilden. Bei Duroplasten oder Elastomeren hingegen werden die Monomere oder Oligomere auf die Druckoberfläche aufgetragen und anschließend entweder mit Lasern, IR-Lampen oder UV-Bestrahlung ausgehärtet.



~ Abb. 2 TechnologiELandschaft der additiven Fertigung von Kunststoffen [8].

2.2.3 Additive Fertigung von Cellulosen

Im Bereich des Cellulose-3D-Drucks entwickelte das Massachusetts Institute of Technology ein Verfahren – „Solvent-based extrusion“, indem in Aceton gelöstes Celluloseacetat bei Raumtemperatur gedruckt wird, wobei das Aceton sehr schnell verdampft. In einem nachträglichen Verfahren können die Acetatgruppen noch ersetzt werden um die 3D-gedruckten Teile noch stärker als beispielsweise ABS oder PLA zu machen [9].

Wang et al. haben weiteren Veröffentlichungen zum 3D-Druck von Cellulose / Cellulose-basierten Materialien zusammengestellt [10]. Forscher in Singapur arbeiten mit wässrigen Cellulose/Chitosan/Chitin-Mischungen. Diese Mischung ergibt einen biegsamen Verbundstoff, der stabile dreidimensionale Strukturen bilden kann und ist vollständig biologisch abbaubar. Ein weiterer Vorteil ist, dass es ohne spezielle Einrichtungen produziert werden kann. Um die Leistungsfähigkeit des Systems zu demonstrieren, haben die Forscher ein 1,2 m langes Windturbinenblatt in 3D gedruckt. Die Kosten des sogenannten „FLAM“-Materials liegen im Bereich der Standardkunststoffe und sind 10-mal niedriger als die Kosten gängiger Filamente für den 3D-Druck wie Polymilchsäure oder Acrylnitril-Butadien-Styrol [11].

Die Fa. DuPont Nutrition & Biosciences in Bomlitz entwickelten einen Kunststoff als Stützmaterial, der auf thermoplastischer Hydroxypropylmethylcellulose (HPMC) basiert und sich nach dem 3D-Druck mit Drucktemperaturen zwischen 180°C und 250°C und dem (mehrmaligen) Recycling erneut zu Stützmaterial verarbeiten lässt. Anschließend löst einfaches, kaltes Leitungswasser das HPMC-basierte Material wieder vom fertigen Objekt. Die HPMC flockt beim Erhitzen des Waschwassers aus und kann erneut zu Filamenten extrudiert werden. Im Vergleich zu bisherigen Stützmaterialien löst sich der neuentwickelte Stoff 25- bis 60-mal schneller in Wasser [12].

Freiburger Forscher entwickelten ein 3D-Druck fähiges Biopolymer für das Direct-Ink-Writing welches aus Hydroxypropylcellulose, Lignin, Essigsäure, Ethanol und Wasser besteht [13].

2.2.4 Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoffen

In den letzten Jahren wurden mehrere Verfahren für den Endlosfaser 3D-Druck entwickelt und von entsprechenden Firmen vermarktet. Anhand der Vorgehensweise, wie die Fasern und die Matrix in die Düse eingebracht und auf die Druckoberfläche aufgebracht werden, können die Verfahren in fünf verschiedene Kategorien eingeordnet werden. Abb. 3 stellt die Konzepte für die direkte Faserintegration bei der additiven Fertigung dar.

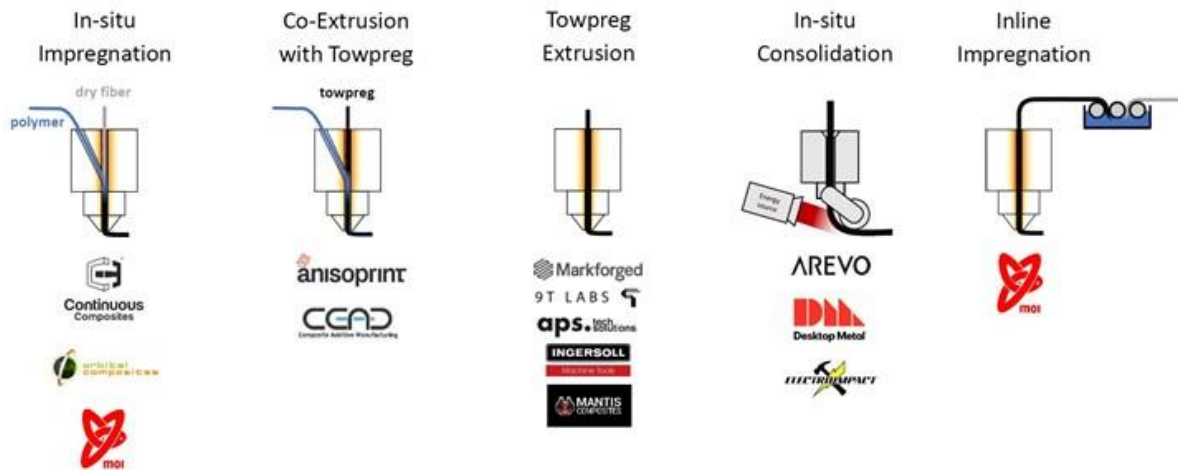


Abb. 3 Konzepte für die direkte Faserintegration bei der additiven Fertigung [14].

Eines der ersten Unternehmen war die Fa. Markforged zur Verarbeitung von Endlos-Carbonfasern. Endlos-Glasfasern werden beispielsweise von der Fa. MOI composites srl zu großen Bauteilen wie z.B. Rennboote verarbeitet. Die Fa. Anisoprint entwickelte die patentierte „Composite Fiber Co-extrusion (CFC)“, bei der die Fasern mit einem duroplastischen Harzsystem vorkonsolidiert sind, so dass die so versteiften Fasern im Druckkopf sicher gefördert werden und zusammen mit einer Co-extrudierten thermoplastischen Matrix auf der Bauplattform abgelegt werden [15].

Weitere Entwicklungen im Bereich Endlosfaserverstärkter 3D-Druck finden/fanden statt an der Universität Dresden am Institut für Leichtbaukonstruktionen [16], an der Technische Universität Braunschweig am Institut für Konstruktionstechnik [17], am Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe der Technischen Universität Kaiserslautern [18] und am Institut für Hochleistungsimpuls und Mikrowellentechnik Institut des Karlsruher Instituts für Technologie [19].

Arburg Kunststoff Freiformen

Die Fa. Arburg hat ein effizientes Additives Fertigungsverfahren - Arburg Kunststoff Freiformen (AKF) Verfahren - zur Herstellung von Bauteilen aus thermoplastischen Materialien entwickelt. Beim AKF-Verfahren werden die Polymergranulate mit einem Einschnecken-Extruder extrudiert, die dann mit Hilfe eines Piezoaktuators mit sehr hoher Frequenz als Tropfen auf eine Bauplattform gelegt werden. Das Prinzip des AKF-Verfahrens ist in Abb. 6 dargestellt [20].

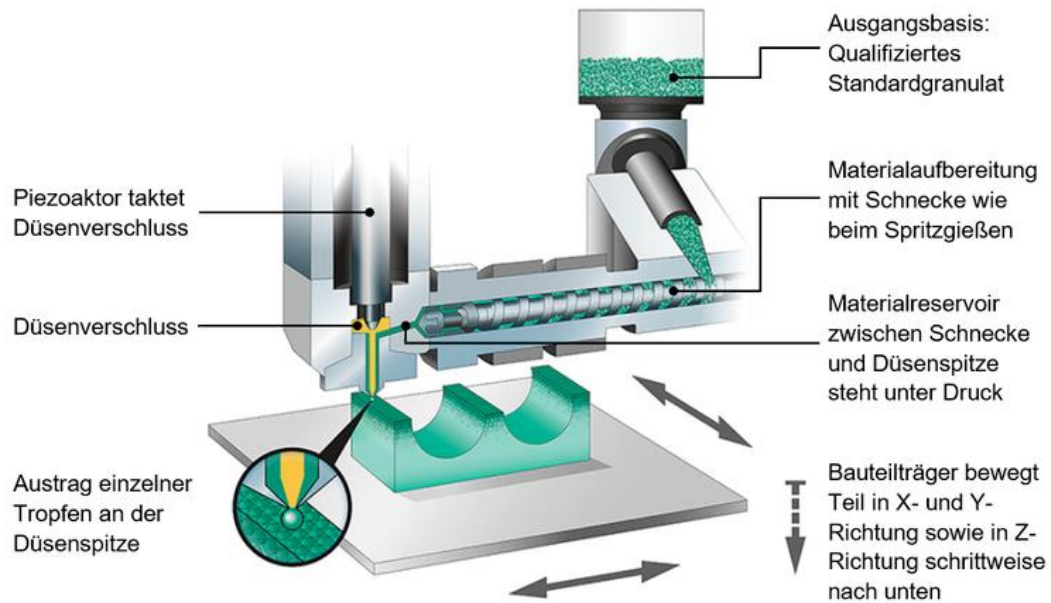


Abb. 4 Darstellung des AKF-Verfahrens im Arburg freeformer [20].

Gegenüber dem Standard-FFF-Verfahren bietet das AKF-Verfahren Vorteile wie mehr Freiheit im Prozess und eine bessere Rissbeständigkeit der gedruckten Komponenten. In Erweiterung der Anwendung des AKF-Verfahrens wurde ein zusätzliches Faserzuführungsmodul (Abb. 5) entwickelt, um die Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Verbundbauteilen zu ermöglichen [21], [22]. Bisher kann das Faserzuführungsmodul nur die steifen Fasern wie z.B. Kohle- und Glasfasern verarbeiten.

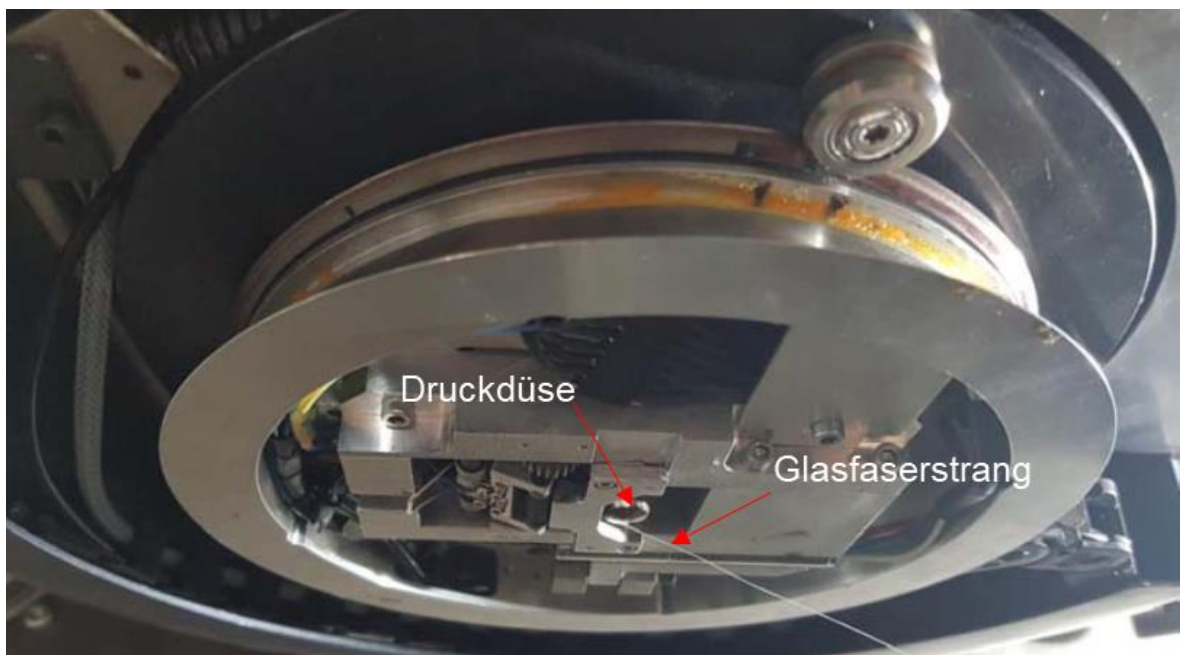


Abb. 5 Faserzuführungsmodul des Arburg freeformers [22].

2.2.5 Problemlage

Additive Fertigung ermöglicht die Herstellung von Topologie-optimierten maßgeschneiderten Bauteilen. Im Gegensatz zu konventionellen Fertigungstechnologien wie der subtraktiven Fertigung ist die additive Fertigung ein ressourceneffizientes Verfahren, da nur die zum Aufbau eines Bauteils erforderliche Materialmenge verwendet wird. Bei allen oben genannten additiven Fertigungsverfahren muss jedoch Energie in Form von Wärme oder Licht zugeführt werden, um das Bauteil fertigzustellen. Die zugeführte Energie wird entweder zum Schmelzen oder zum Aushärten des Materials verwendet. In den meisten Fällen, insbesondere beim Druck mit Endlosfasern mit thermoplastischer Matrix, liegt die zum Schmelzen der Polymermatrix zugeführte Wärmeenergie über 200 °C. Andererseits wird durch die Verwendung von Cellulosefasern als Verstärkung die Verarbeitungstemperatur auf unter 200 °C begrenzt, da die Cellulosefasern bei Temperaturen über 200 °C zu zerfallen beginnen. Dies schränkt die Verwendung von Thermoplasten (Polyamid PA, Polyethylenterephthalat PET) als Matrix ein. Zum anderen erfordert die Verwendung von Cellulose als Matrixmaterial ein lösungsmittelbasiertes Verfahren anstelle der Schmelzverarbeitung, da die Cellulose und viele ihrer Derivate nicht in der Schmelze verarbeitbar sind.

Neben der Herausforderung des 3D-Drucks mit biobasierten Cellulosefasern aufgrund der vergleichsweise geringen Temperaturbeständigkeit der Fasern sind Cellulosefasern im Vergleich zu Glas- oder Carbonfasern biegeschlaffer und für den 3D-Druck von Hochleistungsbauteilen nicht geeignet, da sie aufgrund ihrer geringen Biegesteifigkeit nicht zum (AKF-) Druckkopf befördert/geführt werden können.

2.3 Zielstellung

Die Natur dient als Ideengeber und Vorbild bei der effizienten Nutzung von Materialien und Herstellprozessen. Die meisten Lebewesen begegnen umweltbedingten Belastungen durch gezielte Faserverstärkungen in den Kraftflusslinien. Die Materialien der Natur werden in energieeffizienten Niedertemperatur- bzw. Lösungsverfahren hergestellt [23]. Bei der Rekonfiguration der Moleküle in der Zellbiologie werden die nötigen Energiemengen langsam, ohne signifikanten Temperaturwechsel prozessiert. Die Prozesse laufen meist enzymatisch ab und beinhalten kein Schmelzen oder Rekristallisation.

Ziel des Projekts war es, die Faserherstellungstechnik der Spinnen so auf den FFF-3D-Druck zu adaptieren, dass damit energetisch effiziente endlosfaserverstärkte biobasierte Bauteile auf Basis Cellulose mittels lösungsbasierten Verfahrens gedruckt werden können. Für den 3D-Druck cellulosischer Faserverbunde wurden folgende Einzelziele festgelegt:

- Ähnlich dem Endlosfaser 3D-Druck mit Carbon- oder Glasfasern (z.B. Fa. Markforged, Fa. Anisoprint, Fa. Arburg) müssen die biegeschlaffen Cellulose-Fasern so weit versteift werden, so dass sie in den Druckkopf eingeführt werden können. Diese Beschichtung dient also zunächst zur Versteifung der Filamente, soll aber im/am Druckkopf angelöst werden und ein Teil der Matrix werden, welche zusätzlich in den Druckkopf zugeführt wird. Dazu muss eine einer Beschichtungstechnik zur Vorkonsolidierung/Versteifung der Cellulosefasern zur Erhöhung der Biegesteifigkeit und Sicherstellung des Transports des Faserstrangs im Druckkopf entwickelt werden.
- Bisherige Endlosfaser 3D-Druck-Verfahren arbeiten überwiegend mit thermoplastischen Matrices. Der Druckkopf der CELLLös-Technik muss speziell für eine gelöste Matrix entwickelt werden.
- Während bei bisherigen Techniken die Fasern separat geführt werden, und nur zusätzliche Matrix im Druckkopf gefördert wird, sollen erste Ansätze zur Verbindung von Faserführung und Druckkopf entwickelt werden. In einem weiteren Schritt könnte evtl. sogar die Versteifung der Fasern direkt im Druckkopf in Form einer Mini-Extrusion integriert werden.

Inspiziert von den Vorbildern aus der Natur wurden folgende Arbeitshypothesen angenommen:

- Der 3D-Druck von Endlos-Cellulosefasern in einer Cellulose Matrix ergibt maßgeschneiderte Bauteile mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften (ähnlich GFK) durch optimale Anbindung der Fasern an die Matrix sowie durch die mögliche Ablage der Fasern genau in den Kraftflusslinien.
- Durch die Substitution des thermoplastischen Druckmaterials durch Polymerlösungen der Cellulose-Derivative, ist ein Aufschmelzen nicht notwendig. Die Verfestigung des Materials erfolgt durch Abdampfen des. Dadurch kann der Temperaturabbau der Cellulosefasern verhindert werden.
- Durch Variation der chemischen Zusammensetzung und Steuerung des Mischungsverhältnisses die Lösungsmittel in den Bindern lassen sich verschiedene Funktionalitäten des zu bedruckenden Bauteils realisieren.

2.4 Projektplanung

Auf der Grundlage der Zielsetzung wurde ein Lösungsansatz verfolgt, bei dem die Materialentwicklung unter Berücksichtigung der Druckfähigkeit bei Raumtemperatur durchgeführt wurde. Weiterhin wurden in Abstimmung mit dem Industriepaten Fa. Arburg zunächst die Anforderungskriterien für die Entwicklung des 3D-Druckverfahrens zum Drucken von Cellulosefasern und biobasierten Matrices festgestellt. Nach Fertigstellung des Lastenheftes wurde die

Materialauswahl für die Entwicklungsprozesse in enger Abstimmung mit Fa. Arburg getroffen. Unterstützt wurde die Ausarbeitung des Lastenheftes durch ein Praktikum eines wissenschaftlichen Mitarbeiters bei der Fa. Arburg. Dies vermittelte ein tieferes Verständnis der industriellen Fertigung auf der Grundlage wissenschaftlicher Forschung mit dem Freeformer 3D-Drucker.

Zunächst wurde zum Vergleich des neuen lösungsmittelbasierten Verfahrens mit dem bestehenden thermoplastischen Verfahren ein Matrixmaterial ausgewählt, das in beiden Verfahren verarbeitet werden kann. Um das 3D-Drucken von Endloszellulosefasern mit cellulosebasierter Matrix zu ermöglichen, wurden Polymerlösungen mit dem Matrixmaterial hergestellt. Die Polymerlösung wurde sowohl zur Herstellung der korkonsolidierten Cellulosefilamente als auch als Bindemittel im lösungsmittelbasierten 3D-Druck verwendet. Ein neuer 3D-Druckkopf wurde dabei entwickelt, der das korkonsolidierte Cellulosefilament in die kontrolliert dosierte Polymerlösung einführt und auf die Druckoberfläche legt. Zur Demonstration der 3D-Druckbarkeit mit dem neuen Material und Verfahren wurde eine Kieselalgenstruktur mit Ecken und Rücklaufbahnen ausgewählt.

Die beschriebene Vorgehensweise beinhaltet die folgenden wissenschaftlichen Forschungsschwerpunkte:

Materialentwicklung

- Recherche und Analyse geeigneter Materialien für die Herstellung von korkonsolidierten Filamenten und Bindemitteln.
- Herstellung von Polymerlösungen mit unterschiedlichen Konzentrationen.
- Analyse des rheologischen Verhaltens der Polymerlösungen zur Ermittlung der Druckfähigkeit.
- Analyse der Oberflächenspannungseigenschaften zur Bestimmung der Benetzbarkeit von Cellulosefasern und der Polymerlösung sowie der Schicht-zu-Schicht-Haftung des Bindemittels.
- Entwicklung eines lösungsmittelbasierten Pultrusionsverfahrens zur Herstellung von korkonsolidierten Filamenten.
- Analyse der Morphologie und Biegesteifigkeit der korkonsolidierten Filamente.

Druckkopfentwicklung

- Entwicklung und Integration einer Exzentrerschneckenpumpe zur kontrollierten Dosierung einer Polymerlösung
- Entwicklung eines Steuerelements zur Ansteuerung der Exzentrerschneckenpumpe

- Integration der Filamentführung in den Druckkopf
- Untersuchung verschiedener Benetzungslängen zwischen Filament und Bindemittel
- Untersuchung der möglichen Integration einer Schneideeinheit

Druckverfahren

- Modellierung eines Demonstratorteils
- Anpassen der Einstellungen des Slicers
- Parameter Studie: Druckgeschwindigkeit, Polymerlösung
- Ermittlung der Bauteileigenschaften

3 PROJEKTERGEBNISSE

3.1 3D-Drucken von Celluloseverbundwerkstoffen

Eine der stärksten Regenerat-Cellulosefasern wird als Reifenkord verwendet und weist eine Zugfestigkeit von ca. 50 cN/tex auf [24]. Die stärkste natürliche cellulose Faser Hanf besitzt eine Zugfestigkeit von etwa 70 cN/tex [25]. Bei den Naturfasern handelt es sich jedoch zumeist um Stapelfasern, die für die in diesem Projekt angestrebte Anwendung technische Herausforderungen, insbesondere Verarbeitbarkeit, mit sich bringen. Weiterhin hat sich in früheren Studien an den DITF herausgestellt, dass Stapelfasern die Düsen des 3D-Druckers verstopfen können und dadurch die Prozesssicherheit gefährden [26]. Aufgrund der mechanischen Eigenschaften und als Endlosfaser für die Herstellung von cellulosebasierten Gebrauchsgegenständen mittels additiver Fertigungstechnologie wurde im Rahmen dieses Projekts Endlosviskose-Reifenkord als Verstärkungsmaterial ausgewählt.

3.1.1 Eigenschaften der Cellulosefasern

Die Viskosegarne (Reifenkord), die mit dem gängigen 3D-Druckverfahren (AKF) des Industriepaten Fa. Arburg gedruckt werden sollen, müssen bestimmte mechanische und thermische Eigenschaften aufweisen. Bei der AKF-Technologie werden geschmolzene Thermoplaste in Tropfenform auf das Druckbett gedruckt. Die Integration des Viskose-Reifenkords in das AKF-Verfahren erfordert dadurch eine mechanische und thermische Stabilität der Fasern, um den Druckprozess zu überstehen. Die auf dem Markt befindliche Viskose-Reifenkord besitzt eine spezifische Biegesteifigkeit von ca. $0,19 \text{ mN mm}^2 / \text{tex}^2$. Nach Angaben der Fa. Arburg ist jedoch die erforderliche Mindestbiegesteifigkeit für die Zuführung der Fasern während des 3D-Druckverfahrens etwa um den Faktor 40 höher als die Steifigkeit des Viskose-Reifenkords. Ein Ansatz zur Erhöhung der Biegesteifigkeit des Viskose-Reifenkords ist die Vorkonsolidierung des Filamentbündels mit einer geeigneten Matrix (siehe Kapitel 3.3). Da es sich bei AKF um ein thermoplastisches Verfahren handelt, könnte die Verwendung von thermoplastischen Cellulosederivaten als Matrix von Vorteil sein.

Darüber hinaus können beim AKF-Verfahren die geschmolzenen Thermoplasttröpfchen, die gedruckt werden, je nach Kunststoff, eine Verarbeitungs-Temperatur von $\geq 230 \text{ °C}$ aufweisen. Andererseits, liegt die Zersetzungstemperatur des Viskose-Reifenkords bei etwa 190 °C . Sollten die geschmolzenen Thermoplasttröpfchen mit dem Viskose-Reifenkord in Berührung kommen, können die Filamente folglich lokal zersetzen werden. Die Zersetzungsrate hängt jedoch von der Kontakt- und Konvektionszeit sowie dem Faser-Matrix-Verhältnis ab.

Die Cellulosederivate, z.B. Celluloseacetat (CA) oder Celluloseacetat-butyrat (CAB), bieten den Vorteil, dass sie sowohl als Thermoplast in einer Hochtemperaturverfahren und als Polymerlösung in einer Niedertemperaturverfahren verarbeitet werden können. Da das Ziel dieses Projekts darin besteht, ein lösungsmittelbasiertes Niedertemperaturverfahren für das 3D-Drucken von Cellulosen zu entwickeln, wird die Methode der Polymerlösung im Rahmen des Projekts in den Mittelpunkt gestellt.

3.1.2 Lösungsmittel für die Druckumgebung

CAB ist besonders gut in Aceton löslich und wird in vielen Anwendungen als Bindemittel eingesetzt. Darüber hinaus hat der Viskose-Reifenkord eine gute chemische Beständigkeit gegen Aceton. Weiterhin ist Aceton bei Raumtemperatur leicht flüchtig. Dies ermöglicht eine schnellere Regenerierung des CABs während des 3D-Druckens. Angesichts all dieser Vorteile wurde Aceton als bevorzugtes Lösungsmittel für die Entwicklung einer Celluloseacetat-butyrat/Aceton-Lösung (CAB/Act) festgelegt. Die CAB/Act-Lösung wird als Matrixmaterial sowohl für die Vorkonsolidierung von Filamentbündeln als auch als Kunststoffanteil im 3D-Druck verwendet, um das Anhaften zwischen gedruckten Filamenten und/oder filamentlosen Schichten zu gewährleisten.

Im Hinblick auf die Geschwindigkeit des Regenerationsprozesses (d.h. Fällung des gelösten Polymers wieder aus der Lösung) von CAB aus der Polymerlösung wurde eine Mischung verschiedener Lösungsmittel in Betracht gezogen, um den Regenerationsprozess zu beschleunigen. Zum Beispiel würde eine Mischung aus Aceton und Isopropanol (15:85) die Fällung, den Übergang der gelösten Cellulose in gelförmige oder feste Cellulose durch Ausnutzung einer Mischungslücke beim Abdampfen des Lösungsmittels, beschleunigen. Ergebnisse der Untersuchung geeigneter Mischungsverhältnisse der Lösungsmittel und der Konzentration von CAB sind in Kapitel 3.2 dargestellt.

3.1.3 Druckkopf Aufbau

Es wurde in Abstimmung mit der Fa. Arburg festgestellt, dass der Freeformer-Drucker nicht für das Niedertemperatur-Lösungsmittel-basierte 3D-Druckverfahren geeignet ist. Dies liegt daran, dass die Extrusionsvorrichtungen bzw. Plastifizierungseinheit und die Druckköpfe des Freeformers ausschließlich für die Verarbeitung von thermoplastischen Materialien ausgelegt sind.

Um die Niedertemperatur lösungsbasierten Endlosfaser 3D-Druck zu realisieren, wurde in diesem Projekt das Druckkopfkonzept in ähnlicher Form wie bei den 3D-Druckern der LiQ-Serie der Arburg-Tochter innovatiQ GmbH für den 3D-Druck von Flüssigsilikon umgesetzt. Die Ergebnisse der Druckkopfentwicklung und -implementierung sind in Kapitel 3.4 erläutert.

3.2 Entwicklung der Polymerlösung

3.2.1 Untersuchung der Löslichkeit von CAB

Polymerlösungen von CAB wurden durch Auflösen von Cellidor 500 – 10 B Granulat von MOCOM Compounds GmbH & Co. KG in Aceton. Beim Screening wurden die aus dem CAB-Granulat gesponnenen Fasern für die Auflösungsprüfung verwendet. In Tabelle 1 sind die Konzentrationen der Polymerlösungen und die Menge des in Aceton gelösten CAB aufgeführt.

Tabelle 1: Auflistung der Polymerlösungen die durch Variation der Konzentration von CAB in Aceton hergestellt wurden.

Probe	Konzentrationsreihe CAB:Act % (w/v)	Konzentrationsreihe CAB:Act % (w/w)
1	1	1,25
2	2	2,47
3	5	5,95
4	10	11,24
5	20	20,20
6	25	24,04
7	30	27,52
8	35	30,73

Abb. 1 veranschaulichten die vorbereiteten Polymerlösungen mit der jeweiligen in Tabelle 1 aufgeführten Proben.

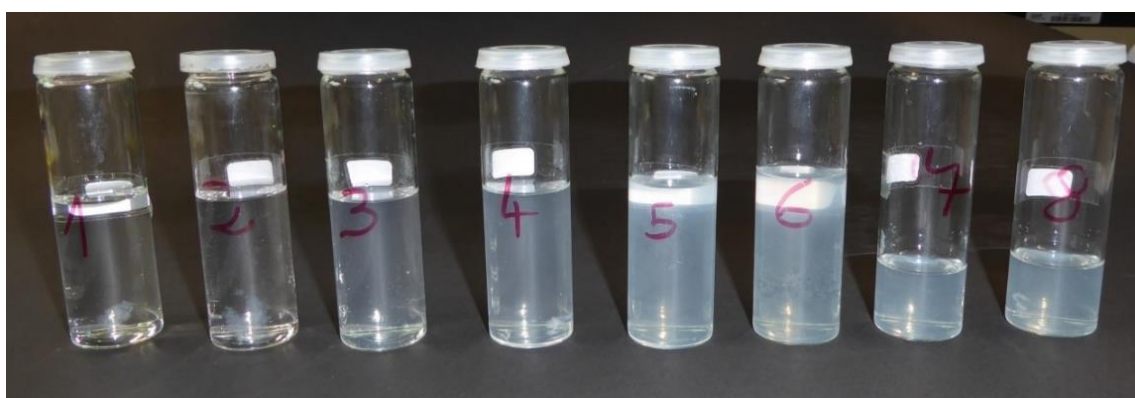


Abb. 6: Polymerlösungsproben hergestellt durch Variation der Konzentration von CAB in Aceton.

Zur Herstellung der Polymerlösung wurde eine bestimmte Menge CAB in einem bestimmten Volumen Aceton in einem Laborglas aufgelöst. Die Mischung wurde 24 Stunden lang auf einem Rollenmischer rotiert. Aus der Abb. 6 ist zu erkennen, dass sich die Trübung der

Polymerlösung mit der Konzentration von CAB in Aceton ändert. Außerdem wurde subjektiv festgestellt, dass die Viskosität der Polymerlösung mit zunehmender CAB-Konzentration steigt.

Um die Regenerationsgeschwindigkeit unter Verwendung von Lösungsmittelgemischen zu testen, wurden weitere Polymerlösungen hergestellt, indem 0,5 g CAB (2,5 %ige (w/v) CAB Konzentration) in dem Lösungsmittelgemisch aus Isopropanol (Iso) und Aceton entsprechend den in Tabelle 2 aufgeführten Mischungsverhältnissen gelöst wurden.

Tabelle 2: Auflistung der 2.5 % CAB Lösungen hergestellt mit Aceton/Isopropanol Gemisch.

Probe	CAB [g]	Mischungsverhältnis Act:Iso	Isopropanol [ml]	Aceton [ml]
A	0,50	50:50	10	10
B	0,50	30:70	14	6
C	0,50	20:80	16	4
D	0,50	10:90	18	2
E	0,50	5:95	19	1

Aus der Abb. 7 ist zu erkennen, dass das Lösungsmittelgemisch mit 10:90 % v/v Aceton:Isopropanol die CAB nur aufquellen konnte, während 20:80 % v/v die CAB auflöste.



Abb. 7: 2.5 % CAB in Acetone/Isopropanol Gemisch

3.2.2 Analyse der Verarbeitbarkeit der Polymerlösung

Scherviskosität, Filmbildung und Regenerationsgeschwindigkeit gelten als die wichtigsten Faktoren, die die Verarbeitbarkeit der Polymerlösung beeinflussen können. Die hergestellten Polymerlösungen wurden auf ihre Verarbeitbarkeit in den weiteren Prozessen, d.h. für die Vorkonsolidierung des Cellulose-Reifenkords und das 3D-Drucken mittels Filmziehverfahrens und Rheometer geprüft.

Untersuchung der Filmbildungsfähigkeit von Polymerlösungen

Anhand des Filmziehverfahrens lässt sich die Verarbeitbarkeit in Bezug auf Viskosität, Regenerationsgeschwindigkeit und Filmbildungsfähigkeit der hergestellten Polymerlösung qualitativ bewerten. In Tabelle 3 sind die angesetzten Polymerlösungen für das Rakelverfahren und die qualitative Bewertung der hergestellten Filme bei unterschiedlichen Rakelgeschwindigkeiten zusammengefasst. Für das Filmziehverfahren wurde ein ZUA Universalapplikator 2000/220 und ZAA 2300 Automatischer Filmapplikator (Rakeltisch) Zehntner GmbH Testing Instruments mit einer Breite von 220 mm verwendet. Filme mit einem Dicken von 200 µm wurden mit 30 mL der vorbereiteten CAB-Lösungen hergestellt.

Tabelle 3 Bewertung der Streichfähigkeit und der Qualität der mit verschiedenen CAB Polymerlösungen bei unterschiedlichen Rakelgeschwindigkeiten hergestellten Folien

CAB Anteil % (w/v)	Lösungsmittel Act:Iso	Rakelgeschwindigkeit [mm/s]	Bewertung	Legende:
40	100:0	2	++	++ = Gut rakelbar, Folie nicht spröde
40	100:0	10	+	
40	100:0	25	-	
40	100:0	50	--	
50	100:0	2	-	+ = Gut rakelbar, Folie hat Risse, Folie nicht spröde
50	100:0	10	--	
50	100:0	25	--	
50	100:0	50	--	
20	75:25	2	++	0 = Gut rakelbar, Folie hat Risse, Folie leicht spröde
30	75:25	2	++	
40	75:25	2	0	
50	75:25	2	--	
60	75:25	2	--	- = Schwer zu Rakeln, Folie hat Risse, Folie leicht spröde
40	75:25	10	0	
40	75:25	25	-	
40	75:25	50	-	
50	55:45	2	--	-- = Schwer zu Rakeln, Folie lässt sich schwer von Platte lösen, Folie spröde
50	65:35	2	--	
50	85:15	2	--	
50	95:5	2	-	

Die CAB-Lösung mit 40 Gew.-% CAB in Aceton wiesen bei einer Rakelgeschwindigkeit von 2 mm/s eine gute Filmbildbarkeit auf. Eine Erhöhung der Rakelgeschwindigkeit verursachte eine schlechte Filmbildung aufgrund der kürzeren Fällungszeit für das Polymer aus der Lösung. Eine Erhöhung der CAB-Konzentration auf 50 Gew.-% führt jedoch zu einer höheren Lösungsdichte. Infolgedessen waren die gebildeten Filme spröde und hatten eine höhere Widerstandskraft gegen das Auftragen. Abb. 8 stellt Beispiele der Folien, die mittels Filmziehverfahrens hergestellt sind.

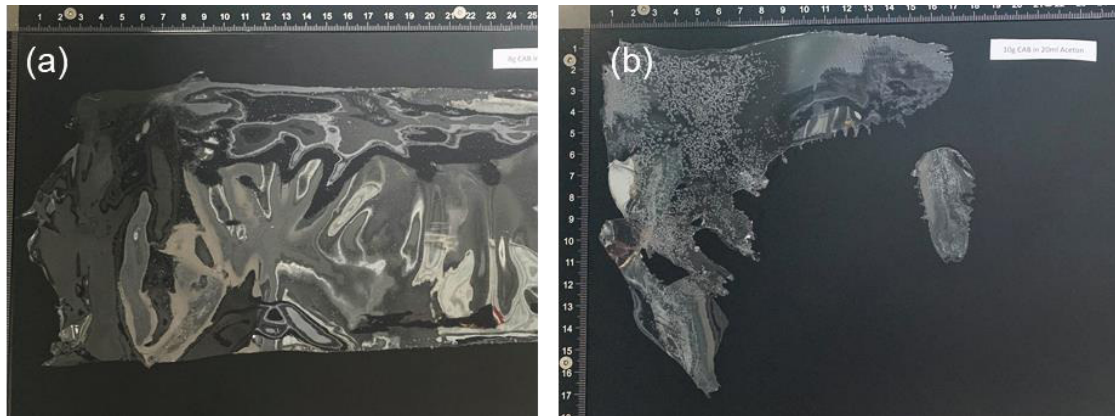


Abb. 8 Exemplarische Darstellung der hergestellten Folien aus (a) 40 % (w/v) CAB Lösung und (b) 50 % (w/v) CAB Lösung mit 2 mm/s Rackelgeschwindigkeit.

Die Verwendung einer Aceton/Isopropanol-Mischung im Verhältnis 75:25 (Act:Iso) zur Lösung von 20 Gew.-% CAB resultierte hingegen in einer dünneren Lösung. Eine Erhöhung der CAB-Konzentration in der Lösungsmittelmischung erhöhte auch die betrachtete Viskosität der Lösung. Die Polymerlösung mit 20 und 30 Gew.-% CAB in einer 75:25 (Act:Iso)-Lösung ergab eine gleichmäßige Folie ohne Risse bei einer Rakelgeschwindigkeit von 2 mm/s (Abb. 9). Eine höhere Konzentration von CAB und eine höhere Isopronal-Konzentration im Lösungsmittelgemisch führten zu einer schlechten Filmbildung.

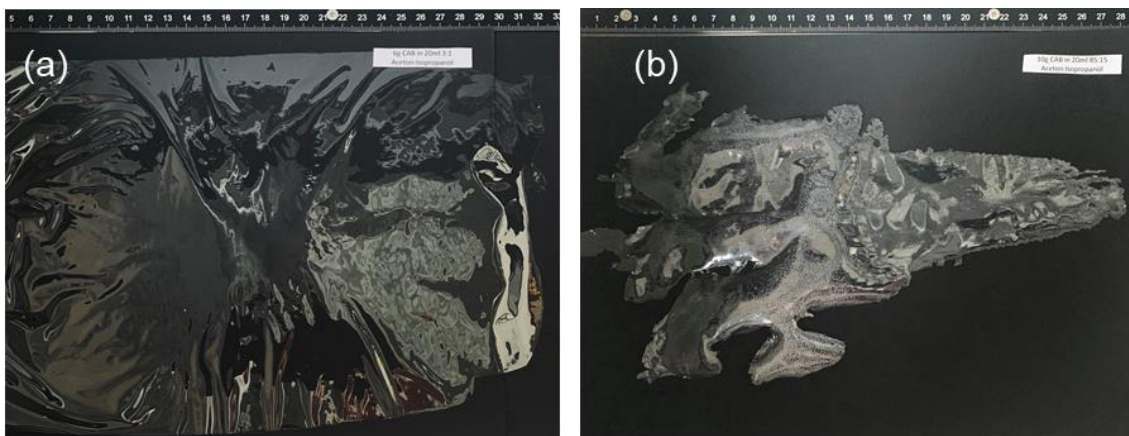


Abb. 9 Beispiele der erzeugten Folien aus (a) 30 % (w/v) CAB-Lösung in 75:25 (Act:Iso) und (b) 50 % (w/v) CAB-Lösung in 85:15 (Act:Iso) bei 2 mm/s Rackelgeschwindigkeit.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass das 40 %ige CAB in Acetonlösung aufgrund seiner besseren Benetzbarkeit für die Herstellung von vorkonsolidierten Filamenten und das 40 %ige CAB in 75:25 Act:Iso-Lösung aufgrund seines schnellen Regenerationsverhaltens für das 3D-Drucken verwendet werden kann.

Rheologische Untersuchung

Zur Bestimmung der zeitabhängigen Viskosität wurde das Rheometer Physica MCR 301 der Anton Paar GmbH (Abb. 10) mittels des Platte-Platte- (PP) Messsystems herangezogen.

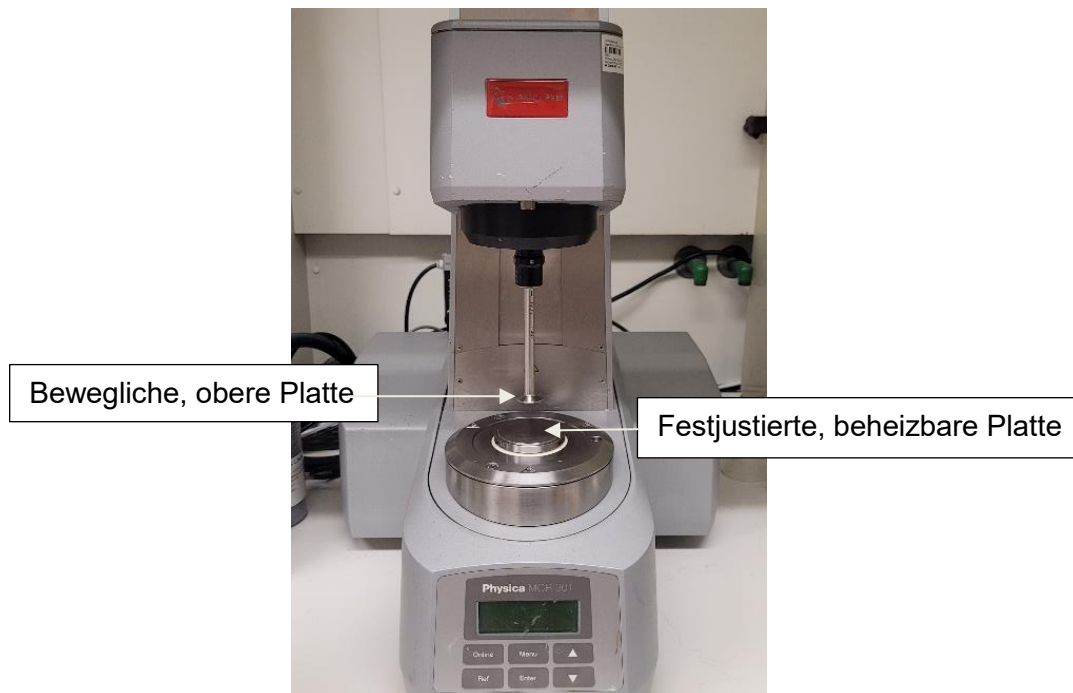


Abb. 10 MCR 301 Rheometer der Anton Paar GmbH

Die ISO 3219 und DIN 53019 beschreiben Messsystem-Geometrien zur Viskositätsbestimmung. Dabei ist insbesondere für hochviskose Lösungen das PP-Messsystem wirksam. Die Probe wird hierbei zwischen einer festen, untenliegenden und beheizbaren Platte sowie einer beweglichen, oberen Platte, die im Durchmesser variieren kann, geschert. Bei der Versuchsdurchführung wurde ein Plattendurchmesser von 25,0 mm verwendet. Des Weiteren sind Spaltweiten zwischen oberer- und unterer Platte von ca. 1,0 mm empfehlenswert. Nachteil des PP-Systems sind inhomogene Scherbedingungen über den Durchmesser im Messspalt. Das heißt, dass am Plattenrand höhere Scherkräfte wirken als im Zentrum der Platten. Außerdem findet die Wärmezufuhr nur einseitig von der untenliegenden Platte statt, demnach liegt eine inhomogene Probertemperatur vor.

Die zeitabhängige Viskosität verändert sich in Abhängigkeit des Acetongehalts aufgrund der Lösemitteldiffusion wobei die Diffusionskoeffizient temperaturabhängig ist. Demnach wurden

die Versuche bei unterschiedlichen isothermen Bedingungen (20 °C, 30 °C, 80 °C) durchgeführt. Um statistisch valide Ergebnisse zu erhalten, werden je Temperatursauswahl fünf Messungen verrichtet.

Die Flüchtigkeit des Aceton in der Polymerlösung stellt eine Herausforderung für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse dar, deshalb sollte der Versuchsstart nach der Probenpositionierung zeitnah ausgeführt werden.

Der Versuch wurde mittels einer Oszillationsbewegung als Drehschwingung durchgeführt. Dabei wird während dem Schervorgang zwischen den Platten die Auslenkung der oberen Platte mit Hilfe eines Sensors aufgenommen und das resultierende Signal wird als Deformation ausgewertet. Mittels der Auswertung des Versuchs kann der zeitabhängige Verlauf der Viskosität im Hinblick auf die Fällungstemperatur untersucht werden. Des Weiteren kann auf Grundlage der regenerierten Prüfkörper eine Aussage hinsichtlich der werkstofftechnischen Eigenschaften getroffen werden.

Im Anhang A.1 sind die Entwicklung der Viskosität der 40%igen CAB-Lösung bei 20 °C, 30 °C und 80 °C dargestellt. Die Startviskosität zeigt keine Temperaturabhängigkeit auf und liegt durchschnittlich bei ca. 9300 Pa·s, dagegen ist bei der Maximalviskosität eine signifikante Abhängigkeit hinsichtlich der Temperatur zu erkennen. Die Fällungstemperatur korreliert zusätzlich mit der Geschwindigkeit der erreichten Maximalviskosität. Dieses Verhältnis ist in der Abb. 11 dargestellt.

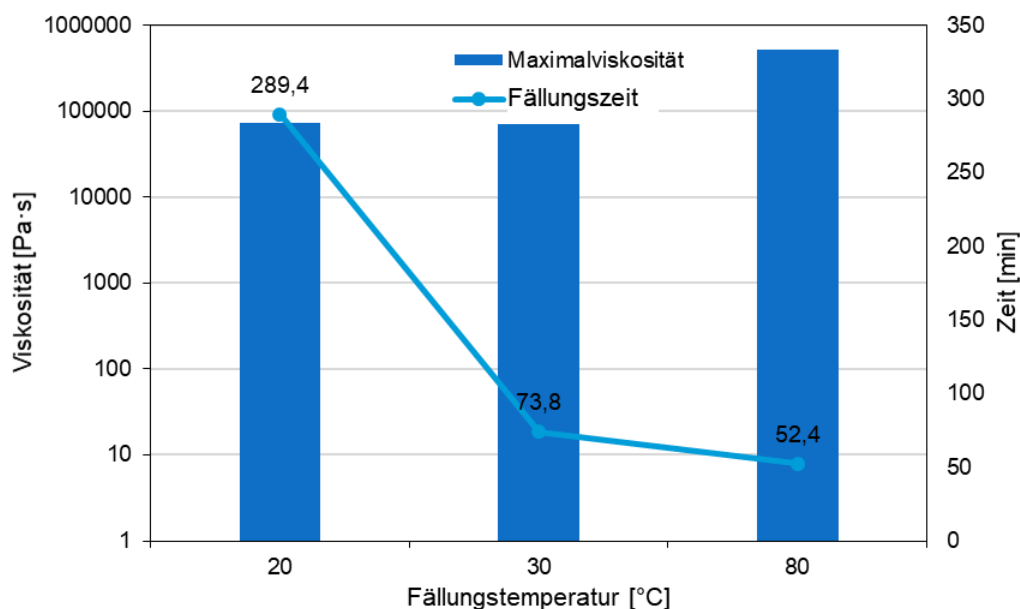


Abb. 11 Abhängigkeiten der Fällungstemperatur hinsichtlich der Maximalviskosität und dessen Zeitpunkt.

Abb. 11 legt dar, dass mit zunehmender Temperatur der Fällungszeit, an dem die Maximalviskosität erreicht wird, signifikant abnimmt. Von 20 °C zu 30 °C zeigt sich eine Abnahme von 22

74,4 % sowie von 30 °C auf 80 °C ein prozentualer Rückgang der benötigten Zeit von 29,0 %. Dabei ist erst eine signifikante Zunahme der Maximalviskosität in Abhängigkeit der Zeit von 30 °C auf 80 °C ersichtlich. Die Tabelle 4 veranschaulicht den prozentualen Zuwachs der Startviskosität im Vergleich zur Maximalviskosität bei den zuvor definierten und zu evaluierenden Fällungstemperaturen.

Tabelle 4 Prozentualer Zuwachs der Startviskosität zur Maximalviskosität bei verschiedenen Fällungstemperaturen

Fällungstemperatur [°C]	Zuwachs [%]
20	595,8
30	1230,0
80	4938,0

In Tabelle 4 ist ersichtlich, dass mit erhöhter Fällungstemperatur auch die Maximalviskosität zunimmt. Grundsätzlich ist in den Kurvenverläufen bei allen Temperaturen ein direkter Anstieg der komplexen Viskosität festzustellen. Des Weiteren zeigen die Kurvenverläufe bei 20 °C und 30 °C einen zu Beginn starken Anstieg der komplexen Viskosität, welcher daraufhin an Steigung verliert, bis das Maximum der Viskosität erreicht ist. Im Vergleich dazu charakterisiert die Kurvenverläufe bei 80 °C einen sofortigen und steilen Anstieg der komplexen Viskosität, womit dann mit gegebener Zeit das Maximum ohne Verringerung der Steigung erreicht wird.

In den Kurvenverläufen ist ebenfalls das Speicher- und Verlustmodul abgebildet. Hierbei beschreibt das Speichermodul den elastischen Anteil, wogegen das Verlustmodul den viskosen Anteil bezüglich des viskoelastischen Verhaltens repräsentiert. Der Schnittpunkt der beiden Module stellt den Sol-/Gel-Übergang dar: Jedoch zeigen nahezu alle Kurvenverläufe bei jeglichen Temperaturen mehrere Schnittpunkte des Speicher- und Verlustmoduls auf. Prinzipiell sollen die verfestigten Proben einen gleichbleibenden Finalviskositätswert aufzeigen. Die Kurvenverläufe bei 20 °C und 30 °C zeigen vorwiegend bis auf ein paar Ausnahmen nach dem Erreichen der Maximalviskosität eine Abnahme der komplexen Viskosität auf. Bei den meisten Proben ist demnach nur eine minimale Tendenz für einen konstanten Viskositätswert ersichtlich, woraufhin die Messungen von einem Ausreißer in negativer y-Richtung beendet werden (siehe Anhang A.1).

Bei 80 °C hingegen weisen die Kurvenverläufe der komplexen Viskosität daraufhin, dass unmittelbar nach dem Erreichen der Maximalviskosität ein Ausreißer sichtbar ist, womit die Maximalviskosität nahezu die Finalviskosität darstellt. Die Finalviskosität und Maximalviskosität bei den Fällungstemperaturen 20 °C und 30 °C unterscheiden sich stark voneinander, vor allem hinsichtlich der Differenz der Viskositätswerte sowie des zeitlichen Abstands. Nachfolgend werden deshalb zwei im Kurvenverlauf signifikante Punkte in zeitlicher Abhängigkeit

gegenübergestellt. Hierbei handelt es sich um die Zeitpunkte des Erreichens der Maximalviskosität sowie des Ausreißers (unmittelbar nach der Finalviskosität), siehe Abb. 12. Diese werden im weiteren Verlauf der Arbeit zur Diskussion gestellt und bezüglich der Ausfällungszeit des Binders miteinander verglichen.

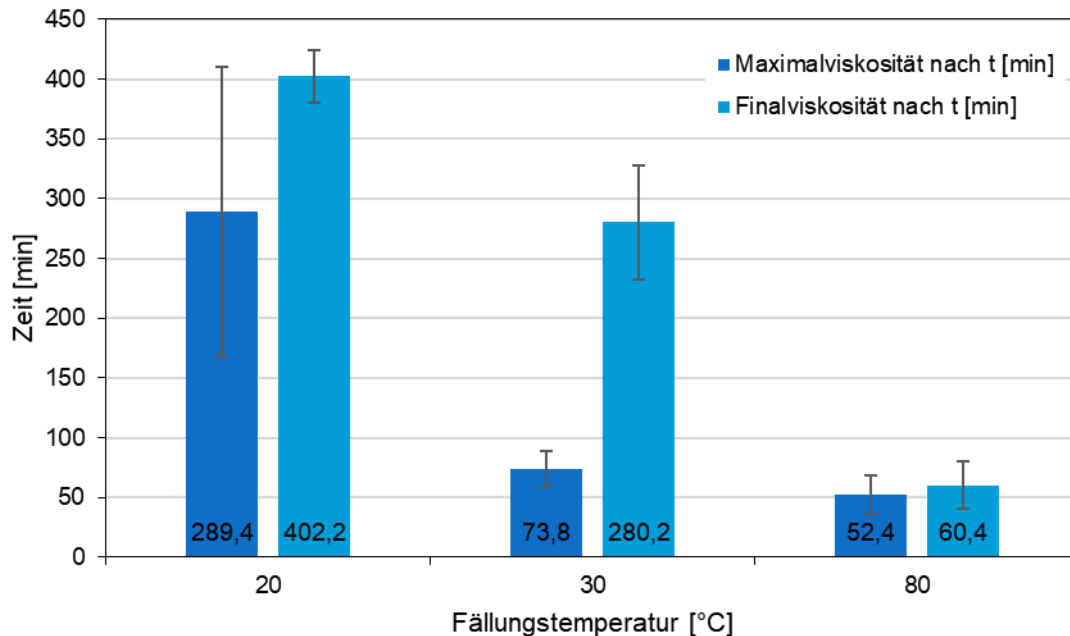


Abb. 12 Vergleich der Zeitpunkte beim Erreichen der Maximal-/Finalviskosität bei unterschiedlichen Fällungstemperaturen

Abb. 12 zeigt, dass analog zum Erreichen des Zeitpunkts der Maximalviskosität auch der Zeitpunkt der Finalviskosität mit steigender Fällungstemperatur schneller angetroffen wird. Wie bereits erläutert, ist bei einer Fällungstemperatur von 80 °C eine minimale Differenz von 15,3 % in den Zeitpunkten zu erkennen. Die Differenzen der Zeitpunkte bei 30 °C (279,7 %) im Vergleich zu 20 °C (39,0 %) nehmen dagegen nicht, wie im Versuch bei 80 °C, analog ab.

Die Bilder der resultierenden ausgefällten Prüfkörper aus Viskositätsmessung sind in Anhang A.1 zu finden. Zu Veranschaulichung sind in Abb. 13 nachfolgend drei optische Aufnahmen dargestellt, die exemplarisch für die jeweilige Fällungstemperatur stehen.

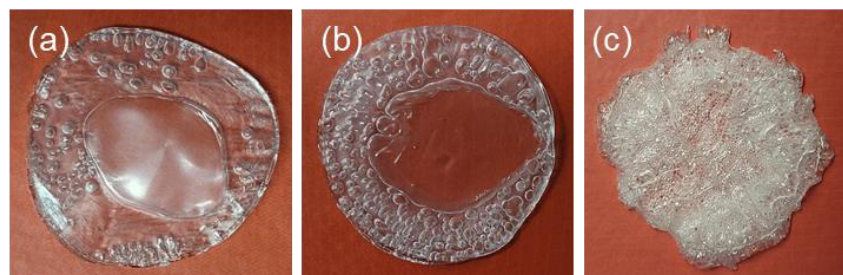


Abb. 13 Porosität der verfestigten Prüfkörper aus der Viskositätsprüfung bei unterschiedlichen Fällungstemperaturen (a) 20 °C, (b) 30 °C, und (c) 80 °C.

Von links nach rechts erhöht sich die Fällungstemperatur ($20\text{ °C} \rightarrow 30\text{ °C} \rightarrow 80\text{ °C}$), wodurch sich die Porosität der Prüfkörper signifikant verändert. Anzumerken ist, dass durch die Oszillationsbewegung eine Materialverdrängung im Mittelpunkt der Probe stattfindet, weswegen der Fokus der Auswertung im äußeren Ring liegt. Optisch kann festgestellt werden, dass mit ansteigender Temperatur der Porengehalt zu- sowie die Größe der Poren abnimmt.

Zusammenfassend ist fest zu stellen, dass die Verfestigung des Binders ab 80 °C eine signifikant schnellere Ausfällung sowie höher erreichbare Maximalviskositäten zeigt. Dieses Erkenntnis ist vorteilhaft für die Prozessierbarkeit zur Vorkonsolidierung des Reifenkords mit dem Binder. Ebenfalls ist die Beurteilung der Bindereigenschaften hinsichtlich der Porosität der verfestigten Matrix-Prüfkörper von großer Wichtigkeit. Wie aus Abb. 13 hervorgeht, steuert die Fällungstemperatur die Porosität der Prüfkörper. Dabei ist festzustellen, dass mit zunehmender Temperatur sich der Porengehalt erhöht sowie die Größe der Poren abnimmt. Durch das schnellere Ausgasen des Acetons werden kleinere Luftblasen gebildet, die schneller platzen. Die Porosität hat grundsätzlich Einfluss auf die späteren mechanischen Eigenschaften des Verbundbauteils sowie die Prozessierbarkeit im 3D-Druckprozess, denn das Filament soll während des Druckprozesses erneut mit der Polymerlösung benetzt, angelöst und optimalerweise infiltriert werden. Demnach ist ein Vorhandensein von Poren im Filamentinnern nicht nachteilig und kann vorteilhaft genutzt werden, damit eine optimale Filament-Matrix-Haftung im Faserverbundbauteil zum Tragen kommt. Zusätzlich können bei einer Fällungstemperatur von 80 °C geringere Porendurchmesser erzeugt werden, damit steigt die Kapillarwirkung und das kapillare Eindringen eines flüssigviskosen Stoffes wird verstärkt, wie beispielsweise das des Binders beim 3D-Druck, verbessert. Im Gegensatz dazu muss beim 3D-Drucken eine so hohe Verdunstungsrate (d.h. bei der hohen Temperatur) des Lösungsmittels vermieden werden, um Teile mit weniger Poren zu fertigen.

3.3 Herstellung von Endloscellulosefaser-verstärkten Druckfilamenten

Das Herstellverfahren der versteiften Endlosfasern hat maßgeblichen Einfluss auf die finale Qualität des 3D-gedruckten Bauteils. Deshalb ist es wichtig, die einzelnen Verfahrensschritte optimal aufeinander abzustimmen. Der Prozess für den Erhalt einer versteiften Endlosfaser kann in folgende vier Schritte unterteilt werden:

- Textile Aufbereitung
- Imprägnierung
- Konsolidierung
- Verfestigung

Der textile Aufbereitungsschritt bezieht sich generell auf das verzugsfreie Abziehen des Verstärkungstextils und in diesem Fall das Abwickeln der Endlosfaser von einer Spule. Im zweiten

Schritt des Imprägnierens werden die Einzelfaserfilamente mittels einer Matrix benetzt. Zusätzlich soll das Tränken der Fasern dazu führen, dass die Filamentzwischenräume vollständig mit der Matrix ausgefüllt werden. Die Homogenität der Imprägnierung hat großen Einfluss auf die späteren mechanischen Eigenschaften. Eine inhomogene Benetzung der Fasern führt nämlich zu Spannungsspitzen im Verbund, wodurch Delaminationen begünstigt werden. Hinsichtlich der Anlagentechnik ist zwischen dem Imprägnierbad mittels Walzen und der geschlossenen Imprägnierung in einer Kammer zu unterscheiden. Das Imprägnierbadverfahren wird aufgrund der Einfachheit des Prozesses überwiegend herangezogen.

Die nachfolgende Konsolidierung verdrängt die eingeschlossene Luft im Faser-Matrix-Verbund, wodurch der finale Faservolumengehalt bestimmt werden kann. Des Weiteren inkludiert dieser Schritt auch den Formgebungsvorgang des Profilquerschnitts. Die Konsolidierung kann mittels einem Pultrusionsverfahren [27] (d.h. Strangziehverfahren) durchgeführt werden. Abb. 14 stellt schematisch der Pultrusionslinie zur Konsolidierung von Viskose-Reifencord mit einer Polymerlösung dar.

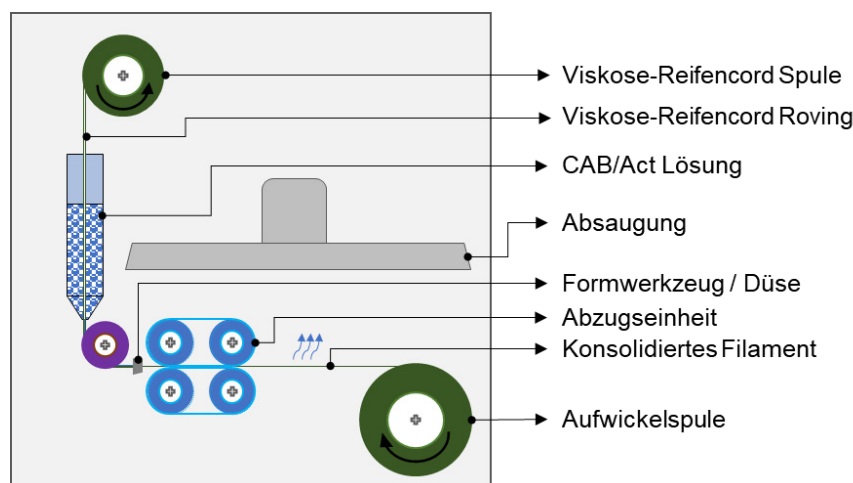


Abb. 14: Schematische Darstellung des Pultrusionsverfahrens zur Konsolidierung von Viskose-Reifencord mit einer Polymerlösung.

Im Rahmen dieses Projektes sollen cellulosebasierte Materialien optimal mittels eines Löseprozesses in einen flüssigviskosen Zustand überführt werden, um nachfolgend extrudiert werden zu können. Durch den Cellulosegehalt wird die Viskosität bestimmt. Die Viskosität hat großen Einfluss auf das Fließverhalten in der Pultrusionsanlage. Problematisch bei der Verwendung von Lösemittel im Prozess ist der hohe Restlösemittelgehalt, der erst im finalen Prozessschritt ausgetrieben wird.

Um eine möglichst hohe Auflösung beim 3D-Druck zu generieren, muss das Filament schlussfolgernd einen geringen Durchmesser besitzen. Des Weiteren ist der Rovingdurchmesser ebenso ausschlaggebend für den finalen Filamentdurchmesser. Die konventionellen

Pultrusionsverfahren stellen lediglich Profile mit einem Durchmesser von etwa 2 bis einige 100 mm her. Für eine Skalierung der pultrudierten Profile auf kleinere Durchmesser, wie beispielsweise 0,5 mm, werden neue Herausforderungen hinsichtlich des Prozesses, der Anlagentechnik und Materialien resultieren. Der lasttragende Faserquerschnitt nimmt mit kleiner werdendem Durchmesser quadratisch ab, wogegen die durch Reibung belastete Oberfläche aufgrund des Kontakts mit dem Pultrusionswerkzeug nur linear abnimmt. Falls die Reibungskräfte die Festigkeitswerte übersteigen, führt dies zum Reißen des faserverstärkten Profils. Deshalb ist es von großer Wichtigkeit die Reibungskräfte durch entsprechende Prozessparametereinstellungen, zu minimieren. Im finalen Schritt erfolgt die Verfestigung, indem die noch flüssigviskose Matrix erstarrt. Die Erstarrung kann durch Fällung des Polymers hervorgerufen werden.

Vorteil der Faserhalbzeuge ist, dass die matrixverstärkten Fasern eine höhere Biegesteifigkeit aufweisen, welches vor allem bei eher biegeschlafferen Fasern von Vorteil ist. Parameter, wie der Druck, die Temperatur und Abzugsgeschwindigkeit, beeinflussen den ganzheitlichen Versteifungsprozess der Endlosfaser im Hinblick auf einen Pultrusionsprozess.

3.3.1 Filamentherstellung

Aufbau der Pultrusionslinie

Die Herstellung des Filament wurde, wie bereits beschrieben, mittels Pultrusionsverfahren realisiert. Die Pultrusionslinie, die zur Herstellung der in Abb. 15 dargestellten vorkonsolidierten Endlosfilament entwickelt wurde. Die Elemente der Pultrusionslinie sind:

1. Roving-Abwickler
2. Imprägnierungsbad
3. Konsolidierungswerkzeug
4. Regenerationsbereich des Filaments
5. Filament-Aufwickler

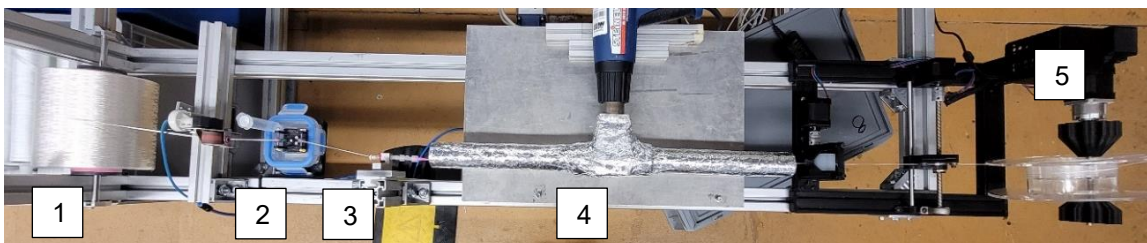


Abb. 15 Pultrusionsanlage zur Filamentherstellung.

Die Filamentherstellung startet mit der Abwicklung des Rovings, dabei wird das Roving über eine pneumatische Fadenführung Richtung Tränkbad gelenkt. Grundsätzlich benötigt der Imprägnierprozess durch die hohe Flüchtigkeit des Lösemittels ein geschlossenes Infiltrationssystem, um die Viskosität des Binders konstant zu halten. Ferner könnte durch eine

Veränderung der Viskosität des Binders die Benetzung des Rovings durch den Binder nicht mehr gegeben ist. Eine Gestaltung zur hundertprozentigen Dichtheit ist schwierig umzusetzen, da Ein- und Ausgänge für das Roving beziehungsweise getränkte Roving vonnöten sind. Deshalb fiel die Wahl auf ein semigeschlossenes Tränkbad (Abb. 16), welches eine Abwandlung des offenen Wannenverfahrens darstellt. Die Tränkbadeinheit wurde nahezu gasdicht designt und besteht aus außenliegenden Keramikrollen mit Kugellagern, die das Roving umlenken und in das Bad des Binders durch eine Düse hineinführen. Um die Faser homogen mit dem Binder infiltrieren zu können, wird das Roving im Bad durch das Entlangführen an Edelstahlstäben geöffnet. Danach wird das getränkte Roving umgelenkt und mittels einer zweiten Düsenöffnung aus dem Bad herausgeführt. Eine zweite Keramikrolle dient dann zur Umlenkung in Richtung der Konsolidierungseinheit. Die Einheit besteht aus einer Keramikführungsöse, worauf anschließend die konische Konsolidierungsdüse aus Polypropylen (PP) folgt.



Abb. 16 Imprägnierungsbad für das Pultrusion von vorkonsolidiertem Filament.

Im Anschluss kann die Regeneration (Fällung) durch die Lösemittelverdampfung initiiert werden. Hierbei wurde die Fällungsstrecke auf ein Maximum verlängert und der Diffusionsprozess bei unterschiedlichen Temperaturen, beginnend bei RT bis maximal 150 °C, durchgeführt. Für den definierten Wärmeintrag wurde ein Heißluftgebläse verwendet, welches an ein T-Stück angesteckt wurde. Somit erfährt das getränkte Roving eine gradierte Temperaturbehandlung. Mit Hilfe einer gummierten Walzeneinheit, welche das Filament nach der Fällung durchläuft, entsteht der benötigte Zug für die Pultrusion. Im Anschluss wird das regenerierte, finale Filament über die Führungsrollen auf die Filamentspule aufgewickelt.

Grundsätzlich muss zum Herstellprozess angemerkt werden, dass CAB zwar thermoplastisch verarbeitet werden kann, jedoch das Roving bei den hohen benötigten Verarbeitungstemperaturen für die Infiltration destruiert werden würde. Aufgrund dessen muss der Prozess im Niedertemperaturbereich durchgeführt werden. Des Weiteren ist die Prozessgeschwindigkeit während der Fällung durch den Lösemittelgehalt des Binders steuerbar. Tabelle 5 zeigt die Parameter, die den Prozess sowie die finalen Filamenteigenschaften beeinflussen.

Tabelle 5 Prozessparameter der Pultrusionslinie

Parameter	Größe	
	Variierbar	Nicht variierbar
Abzugsgeschwindigkeit	0,5 m/min (Minimum)	
Raumklima		Abweichend, da nicht konditioniertes Raumklima
Fällungstemperatur	Von RT bis 150 °C	
Fällungsstrecke	310-780 mm	
Konsolidierungsdüsendurchmesser (Innendurchmesser) → resultierend Faservolumengehalt bestimmbar	0,58 mm → FVG: 45,0 % 0,84 mm → FVG: 21,5 %	
Tränkstrecke	55 mm; maximierbar je nach Tränkbadvolumen	

Zur optimalen Evaluierung der Prozessparameter werden die einzelnen Proben einer Nummer zugeordnet und in der Tabelle 6 hinsichtlich ihrer variierenden Herstellparameter erörtert.

Tabelle 6 Variierende Herstellparameter und deren zugehörige Probenbezeichnung

Probenbezeichnung	Tränkstrecke [mm]	Konsolidierungsdurchmesser [mm]	Fällungsstrecke (zweigeteilt) [mm]	Fällungstemperatur [°C]
2-1	55	0,58	480 (270/210)	RT
2-2	55	0,58	395 (185/210)	RT
2-3	55	0,58	310 (100/210)	RT
2-4	55	0,58	Ohne Abwickler	RT
P-RT	55	0,58	780 (100/680)	RT
G-RT	55	0,84	780 (100/680)	RT
P-80	55	0,58	780 (100/680)	80
G-80	55	0,84	780 (100/680)	80
P-100	55	0,58	780 (100/680)	100
G-100	55	0,84	780 (100/680)	100
P-150	55	0,58	780 (100/680)	150
G-150	55	0,84	780 (100/680)	150

3.3.2 Untersuchung der Filamenteigenschaften

Querschnitt des Filaments

Um die Querschnitte der pultrudierten Filamente qualitativ zu unterscheiden, müssen diese zunächst einer Probenvorbereitung mit den Teilschritten Trennen, Einbetten, Schleifen und Polieren unterzogen werden. Im ersten Schritt werden die Filamente auf etwa 30 mm zugeschnitten und auf eine Papiervorrichtung mit konventionellem Schnellkleber möglichst parallel zueinander und orthogonal zur Vorrichtung aufgeklebt. Nach dem Aushärten des Klebers erfolgt das Kalt-Einbetten der Proben in Epoxidharz. Daraufhin werden die eingebetteten Proben geschliffen (Schleifpapierkörnung: 800) und im letzten Schritt mittels Polierpasten mit Partikelgrößen von 9, 3 und 0,1 μm poliert, bis eine beurteilbare Oberfläche entsteht. Anschließend können die Proben unter den digitalen Auflichtmikroskopen OLYMPUS BX51 und Keyence VHX-7000 betrachtet werden. Hierbei sollen die Formgebung und Gleichmäßigkeit des Querschnitts sowie die Porosität im Filamentinnern untersucht werden.

Bei der Untersuchung der Filamentquerschnitte mittels mikroskopischer Aufnahmen wurden diese hinsichtlich der gegebenen Fällungstemperatur und -strecke sowie des Konsolidierungsdurchmessers verglichen. Anhand der lichtmikroskopischen Aufnahmen soll grundsätzlich festgestellt werden, ob eine homogene Verteilung der Faserfilamente in der Matrix vorliegt. Des Weiteren sollen die Formgebung nach Fällung beziehungsweise die Profiltreue sowie entstandene Lufteinschlüsse im Inneren des Filaments evaluiert werden. Es muss angemerkt werden, dass bei der Probenherstellung das Poliermittel die Lufteinschlüsse besetzte und aufgrund dessen starke Reflexionen in diesen Bereichen sichtbar sind. Damit können bei der Betrachtung der mikroskopischen Aufnahmen die weißleuchtenden Stellen als Lufteinschlüsse oder Poren interpretiert werden. Abb. 17 zeigt die mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe 2-1.

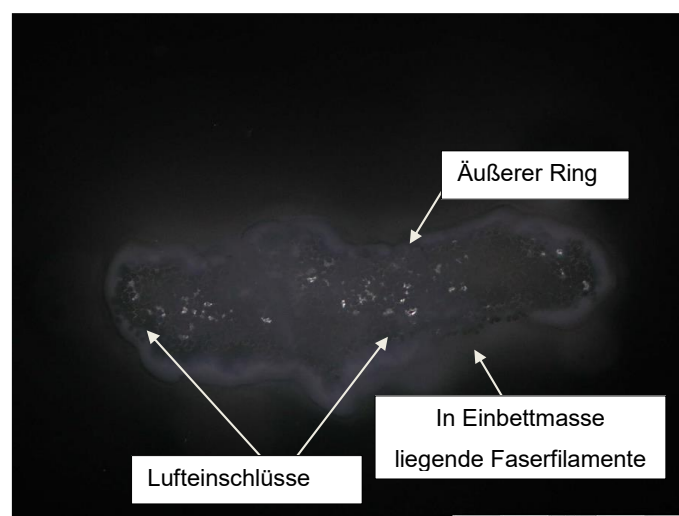


Abb. 17 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe 2-1.

In Abb. 17 ist ersichtlich, dass die Fasern homogen in der Matrix verteilt liegen, wobei das Roving nicht ganzheitlich mit Matrix umschlossen wurde, denn der äußere, weiße Ring zeigt in der rechten, untenliegenden Sequenz eine Öffnung. Dadurch sind einige Fasern von der Einbettmasse umschlossen. Hinsichtlich der Querschnittsform ist eine unregelmäßige, wolkenförmige, flache Form wahrzunehmen. Im Filamentinnern sind einige Lufteinschlüsse zu erkennen. Auch die weiteren Aufnahmen zu Probe 2-1 zeigen eine ähnliche Beschaffenheit.

Abb. 18 legt den mikroskopisch aufgenommenen Filamentquerschnitt der Probe 2-2 dar. Abb. 18 zeigt auf, dass die Fasern unregelmäßig in der Matrix verteilt vorliegen. In dieser Aufnahme ist der weiße, äußere Ring nur partiell aufgetreten. Einige Fasern sind von der Einbettmasse der Probenvorbereitung umschlossen. Der Querschnitt hat eine wolkenförmige, stark in die Länge gezogene, gebogen flache Aufmachung. Lufteinschlüsse im Filamentinnern sind kaum ersichtlich. Weitere Aufnahmen der Probe 2-2 zeigen ein ähnliches Auftreten.

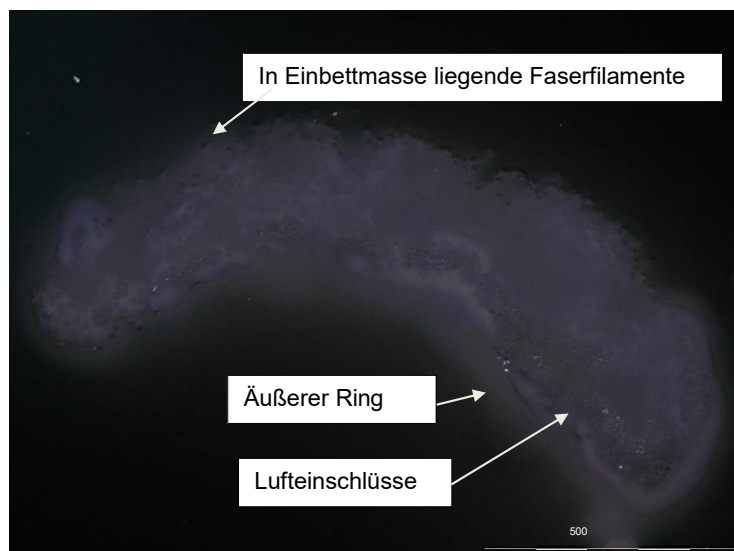


Abb. 18 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe 2-2.

Abb. 19 veranschaulicht die mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Probe 2-3. Abb. 19 stellt dar, dass die Fasern regelmäßig in der Matrix verteilt vorliegen. Die Aufnahme zeigt einen weißen, äußeren Ring um das Roving, welcher partiell an der obenliegenden Seite ausbleibt, aufgrund dessen sind auch diverse Fasern von der Einbettmasse der Probenvorbereitung umschlossen. Hinsichtlich der Querschnittsform ist eine unregelmäßige, in die Länge gezogene, flache, wolkenförmige Formgebung wahrzunehmen. Im Filamentinnern sind einige Lufteinschlüsse ersichtlich. Auch die weiteren Aufnahmen zu Probe 2-3 zeigen die gleichen Eigenschaften auf.

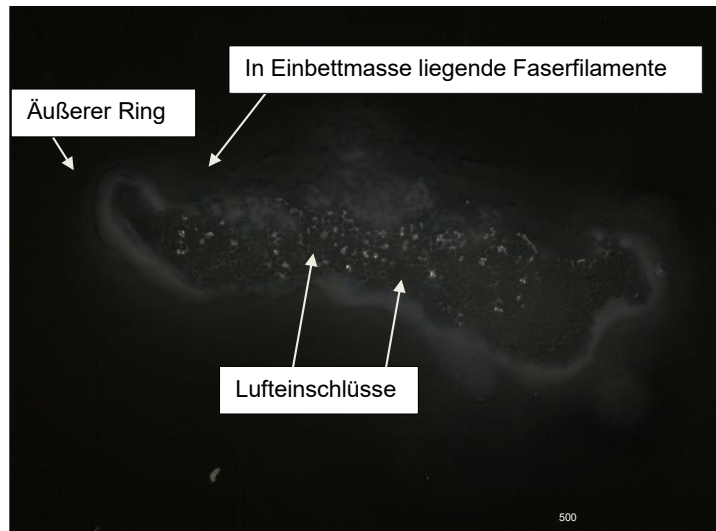


Abb. 19 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe 2-3.

Abb. 20 zeigt die mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe 2-4. In Abb. 20 ist ersichtlich, dass die Fasern sehr homogen in der Matrix vorliegen. Das Roving wurde ganzheitlich mit Matrix umschlossen, denn der äußere, weiße Ring ist geschlossen. In weiteren Aufnahmen der Filamentprobe 2-4, ist das Roving jedoch nicht komplett in die Matrix eingebettet und Fasern liegen frei in der Einbettmasse. Hinsichtlich der Betrachtung der Querschnittsform ist eine unregelmäßige, wolkenförmige Form wahrzunehmen, die jedoch eine kompaktere, ovalere Form angenommen hat als im Vergleich zu den Proben 2-1 bis 2-3. Im Filamentinnern sind weniger Luftporen als im Vergleich zu den Proben 2-1 bis 2-3 zu erkennen. Auch die weiteren Aufnahmen zu Probe 2-4 zeigen eine ähnliche Beschaffenheit.

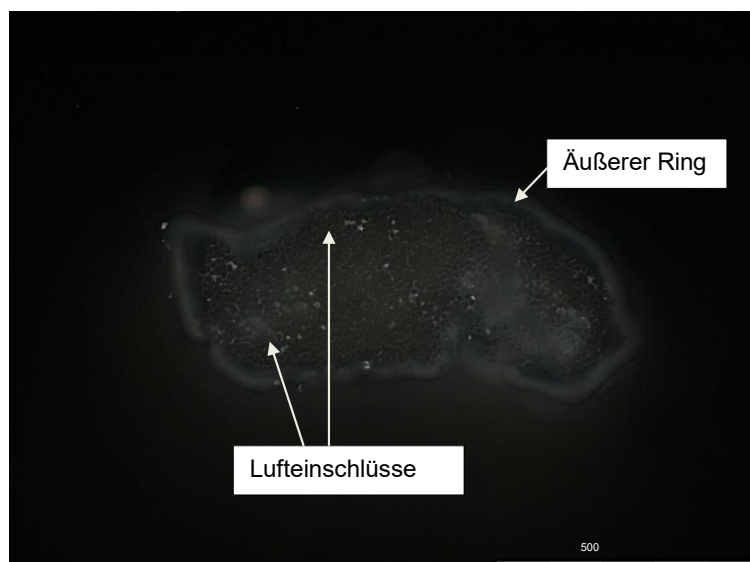


Abb. 20 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe 2-4.

Die nachfolgende Abb. 21 legt den mikroskopisch aufgenommenen Filamentquerschnitt der Probe P-RT dar. In Abb. 21 ist festzustellen, dass die Fasern homogen in der Matrix vorliegen. Das Roving ist komplett mit Matrix umschlossen, denn der äußere, weiße Ring umgibt das Roving ganzheitlich. Die Betrachtung der Querschnittsform zeigt auf, dass eine wolkenförmige, flach ovale Form wahrzunehmen ist, die regelmäßigeren Züge annimmt. Im Filamentinnern sind einige Lufteinschlüsse zu erkennen. Des Weiteren muss bei der Aufnahme angemerkt werden, dass eine Luftblase außerhalb des Filaments ersichtlich ist.

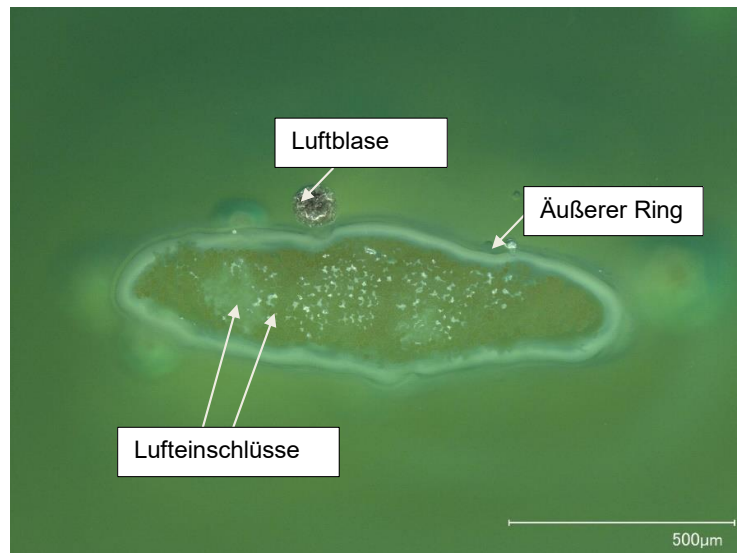


Abb. 21 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe P-RT.

Die Abb. 22 veranschaulicht die mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe P-80.



Abb. 22 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe P-80.

In Abb. 22 ist ersichtlich, dass die Fasern verhältnismäßig homogen in der Matrix vorliegen, aber dass im Vergleich zu Probe P-RT die Fasern an Regelmäßigkeit hinsichtlich der Anordnung abgenommen haben. Dafür sind im Innern des Filaments vermehrt Lufteinschlüsse wahrzunehmen, die auch größere Dimensionen einnehmen.

Das Roving ist nicht ganzheitlich mit Matrix umschlossen, denn der äußere, weiße Ring zeigt eine kleine Öffnung im unteren Bereich. Die Betrachtung der Querschnittsform zeigt auf, dass eine regelmäßige, nicht mehr wolkenförmige Formgebung ersichtlich ist, aber der gewünschte runde Querschnitt eher ovale Züge annimmt.

Abb. 23 zeigt die mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe P-100. In Abb. 23 ist sichtbar, dass die Fasern unregelmäßig in der Matrix vorliegen. Dagegen sind einige Flächen ohne eingebettete Faserfilamente in größeren Dimensionen ersichtlich, die entweder mit Matrix oder Einbettmittel gefüllt sind. Der äußere, weiße Ring zeigt eine kleine Öffnung auf. Im Innern des Filaments sind nur einige Lufteinschlüsse wahrzunehmen. Hinsichtlich der Betrachtung der Querschnittsform ist erkenntlich, dass ein nahezu runder Querschnitt erreicht wurde. Des Weiteren ist eine Luftblase außerhalb des Filaments ersichtlich.

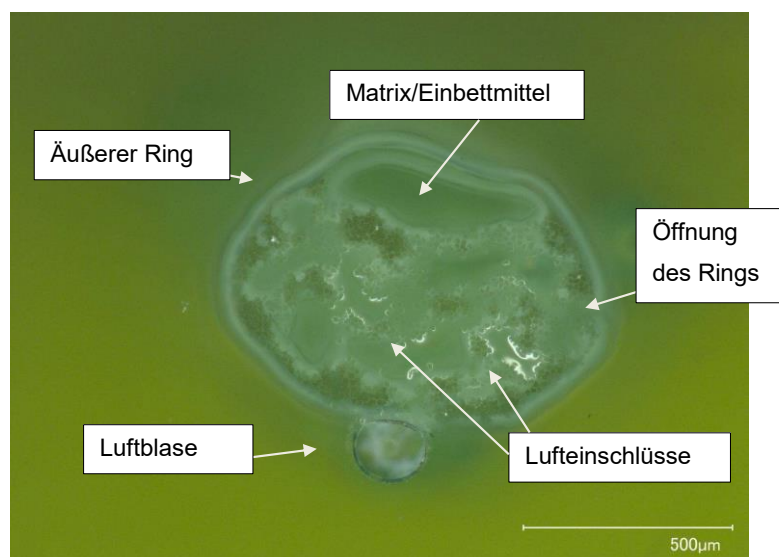


Abb. 23 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe P-100.

Die nachfolgende Abb. 24 stellt den mikroskopisch aufgenommenen Filamentquerschnitt der Probe P-150 dar. Abb. 24 zeigt auf, dass die Fasern sehr unregelmäßig im Querschnitt des Filaments liegen. Dagegen sind einige Flächen ohne eingebettete Faserfilamente in sehr großen Dimensionen ersichtlich, die mit Matrix oder auch Einbettmittel gefüllt sein können. Der äußere, weiße Ring zeigt eine vergrößerte Öffnung im Vergleich zu Probe P-100. Im Innern des Filaments sind einige große Lufteinschlüsse wahrzunehmen. Hinsichtlich der Betrachtung der Querschnittsform ist erkenntlich, dass ein nahezu runder Querschnitt erreicht wurde, der eine leicht ovale Tendenz anstrebt.

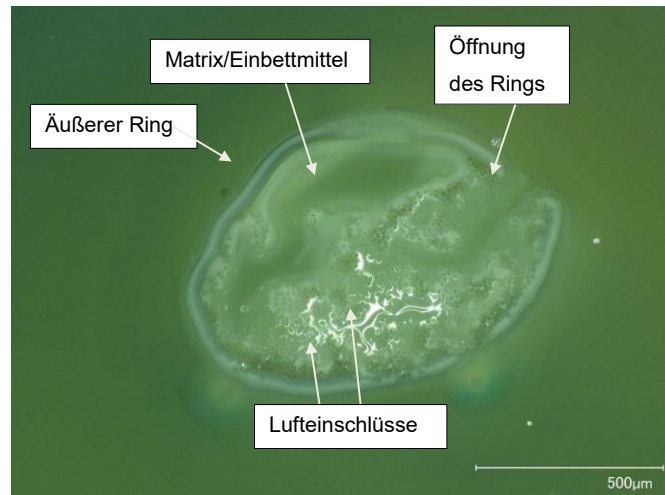


Abb. 24 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe P-150.

Abb. 25 veranschaulicht die mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe G-RT. In Abb. 25 ist festzustellen, dass die Fasern homogen in der Matrix vorliegen. Das Roving ist nahezu komplett von der Matrix umschlossen ist. Der äußere, weiße Ring umgibt das Roving beinahe ganzheitlich. Die Betrachtung der Querschnittsform zeigt, dass eine wolkenförmige, flach ovale Form wahrzunehmen ist, die eine sehr unregelmäßige Gestalt angenommen hat. Im Filamentinnern sind einige Luftporen zu erkennen. Des Weiteren muss bei der Aufnahme angemerkt werden, dass Luftblasen außerhalb des Filaments ersichtlich sind.

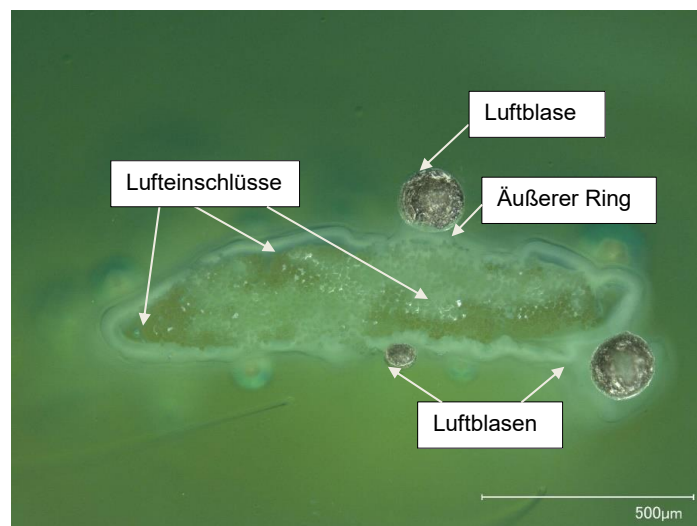


Abb. 25 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe G-RT.

Abb. 26 zeigt die mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe G-80. In Abb. 26 ist ersichtlich, dass die Fasern inhomogen in der Matrix vorliegen. Insbesondere im Vergleich zur Probe G-RT haben die Fasern an Regelmäßigkeit hinsichtlich ihrer Anordnung abgenommen. Im Innern des Filaments sind kaum Luftporen wahrzunehmen. Das Roving ist nicht ganzheitlich mit Matrix umschlossen, denn der äußere, weiße Ring zeigt mehrere,

kleine Öffnungen auf. Die Betrachtung der Querschnittsform zeigt auf, dass eine regelmäßige, nicht mehr wolkenförmige Formgebung ersichtlich ist und eine ovale Gestalt des Querschnitts erzeugt wurde. Des Weiteren muss bei der Aufnahme angemerkt werden, dass Luftblasen außerhalb des Filaments ersichtlich sind.

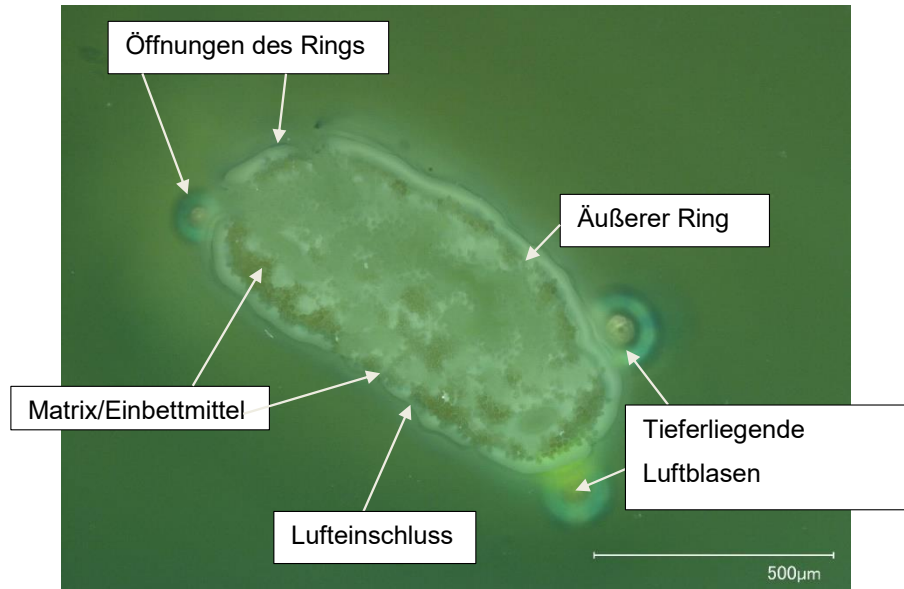


Abb. 26 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe G-80.

Die Abb. 27 legt den mikroskopisch aufgenommenen Filamentquerschnitt der Probe G-100 dar.

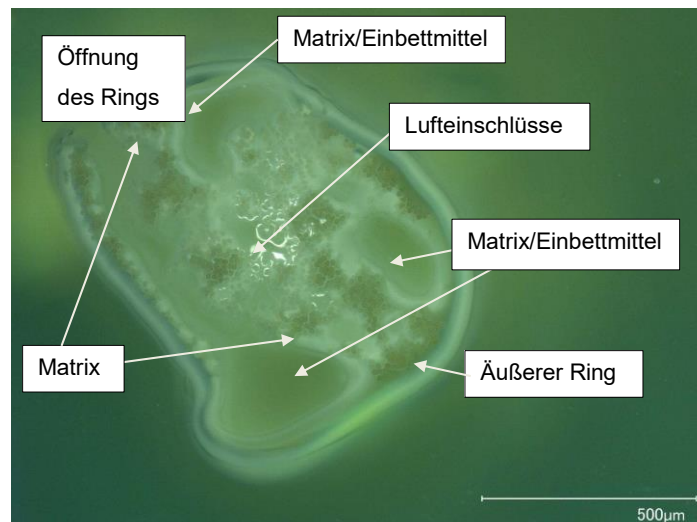


Abb. 27 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe G-100.

In Abb. 27 ist sichtbar, dass die Fasern sehr unregelmäßig in der Matrix vorliegen. Dagegen sind einige Flächen ohne eingebettete Faserfilamente in größeren Dimensionen ersichtlich. Diese Segmente können entweder mit Matrix oder Einbettmittel gefüllt sein. Der äußere, weiße Ring zeigt eine große Öffnung auf. Im Innern des Filaments sind nur wenige Lufteinschlüsse wahrzunehmen. Hinsichtlich der Betrachtung der Querschnittsform ist erkenntlich, dass ein

nahezu runder Querschnitt erreicht wurde. Die Filamentquerschnittsformen weichen jedoch stark voneinander ab. Es sind flache, wolkenförmige oder auch sehr unregelmäßige Formgebungen erkennbar. Zusätzlich zur sehr variablen Querschnittsform zeigen die anderen Querschnittsproben kleinere Öffnungen des äußeren Rings.

Abb. 28 veranschaulicht die mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe G-150.

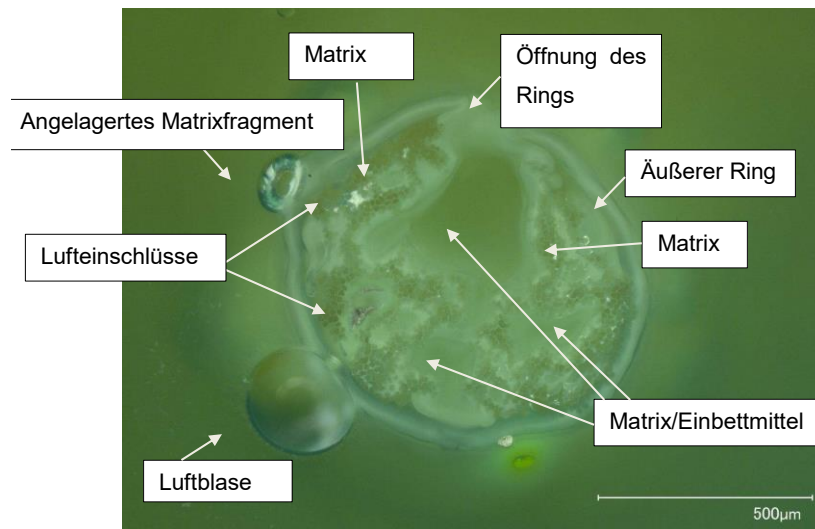






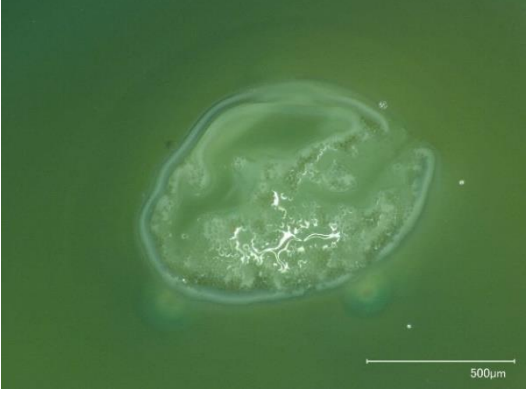
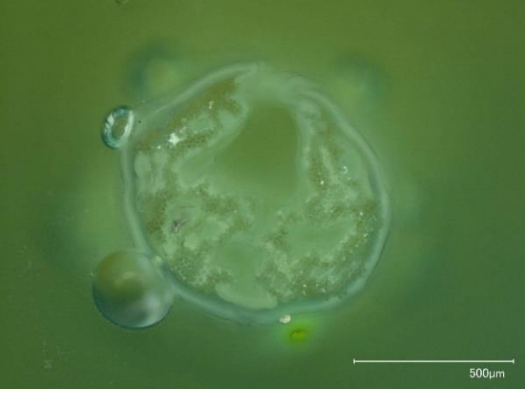


Abb. 28 Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Filamentprobe G-150.

Abb. 28 zeigt auf, dass die Fasern sehr unregelmäßig im Querschnitt des Filaments liegen. Zeitgleich sind einige Flächen in sehr großen Dimensionen ersichtlich, die mit Matrix oder Einbettmittel gefüllt sein können. Der äußere, weiße Ring zeigt eine maßgeblich größere Öffnung im Vergleich zu Probe G-100. Im Innern des Filaments sind wenige Luftporen wahrzunehmen. Hinsichtlich der Betrachtung der Querschnittsform ist erkenntlich, dass ein nahezu runder Querschnitt erreicht wurde. Des Weiteren muss bei der Aufnahme angemerkt werden, dass eine Luftblase außerhalb des Filaments sowie ein angelagertes Matrixfragment ersichtlich sind. Jedoch sind die erzeugten Filamentquerschnittsformen leicht voneinander abweichend, weswegen auch ovalere oder unregelmäßigere Formgebungen ersichtlich sind.

Nachfolgend ist in Tabelle 7 ein Vergleich der mikroskopischen Aufnahmen der P- und G-Proben abgebildet. Dies dient zur Darstellung der Veränderung der Querschnittsform und -fläche im Hinblick auf die Erhöhung der Fällungstemperatur und den angewandten Konsolidierungsdurchmesser.

Tabelle 7 Vergleich der P- und G-Proben – Lichtmikroskopie

	P-Filamentproben	G- Filamentproben
RT	 <p>Micrograph of a P-Filament specimen at room temperature (RT). The filament is elongated and contains numerous small, dark, granular inclusions. A scale bar in the bottom right corner indicates 500µm.</p>	 <p>Micrograph of a G-Filament specimen at room temperature (RT). The filament is elongated and contains several large, dark, circular inclusions. A scale bar in the bottom right corner indicates 500µm.</p>
80 °C	 <p>Micrograph of a P-Filament specimen at 80 °C. The filament is elongated and contains numerous small, dark, granular inclusions. A scale bar in the bottom right corner indicates 500µm.</p>	 <p>Micrograph of a G-Filament specimen at 80 °C. The filament is elongated and contains several large, dark, circular inclusions. A scale bar in the bottom right corner indicates 500µm.</p>
100 °C	 <p>Micrograph of a P-Filament specimen at 100 °C. The filament is elongated and contains numerous small, dark, granular inclusions. A scale bar in the bottom right corner indicates 500µm.</p>	 <p>Micrograph of a G-Filament specimen at 100 °C. The filament is elongated and contains several large, dark, circular inclusions. A scale bar in the bottom right corner indicates 500µm.</p>
150 °C	 <p>Micrograph of a P-Filament specimen at 150 °C. The filament is elongated and contains numerous small, dark, granular inclusions. A scale bar in the bottom right corner indicates 500µm.</p>	 <p>Micrograph of a G-Filament specimen at 150 °C. The filament is elongated and contains several large, dark, circular inclusions. A scale bar in the bottom right corner indicates 500µm.</p>

In Tabelle 7 ist ersichtlich, dass sich bei den P- sowie G- Proben mit zunehmender Temperatur der Querschnitt der Filamente vergrößert und zugleich die Regelmäßigkeit der Faserverteilung im Verbund abnimmt. Dabei haben die G-Proben eine qualitativ beurteilt geringfügig größere Querschnittsfläche aufgrund des größeren Konsolidierungsdurchmessers. Darüber hinaus ist ab einer Temperatur von 100 °C wahrzunehmen, dass die Zielvorgabe einer kreisförmigen Querschnittsform durch die Konsolidierungsdüse erreicht werden kann.

Im Folgenden sind je eine vergrößerte, mikroskopische Aufnahme des äußeren, weißen Rings sowie der Lufteinschlüsse dargestellt (siehe Abb. 29). Es handelt sich bei der linken Aufnahme um die Probe P-RT und bei der Rechten um die Filamentprobe G-100.

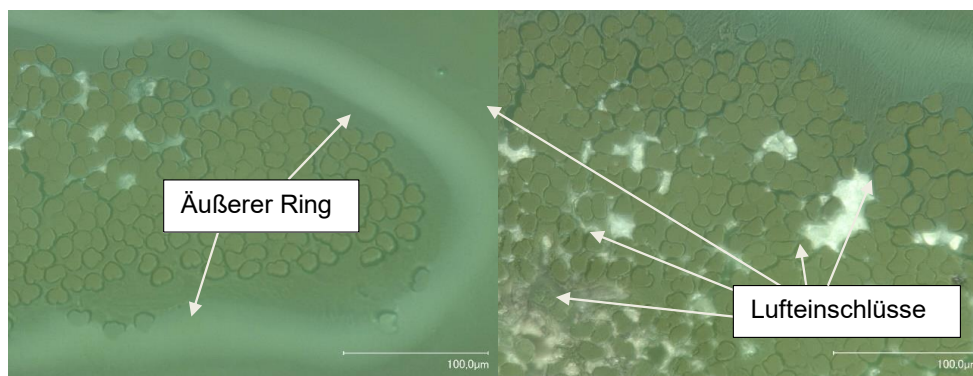


Abb. 29 Mikroskopische Nahaufnahme der Proben P-RT (links), G-100 (rechts).

Die Abb. 29 links zeigt exemplarisch, dass der äußere, das Filament umschließende Ring dichte Strukturen aufweist. Des Weiteren verdeutlicht die rechte Abbildung, dass die Lufteinschlüsse im Filamentinnern primär mit Poliermittel gefüllt sind, wodurch starke Reflexionen sichtbar sind.

Biegeeigenschaften des Filaments

Zur Ermittlung der Biegesteifigkeiten der hergestellten Filamentproben wird das Frank-PTI Biegesteifigkeitsprüfgerät 58565 verwendet, das in Abb. 30 veranschaulicht wird.

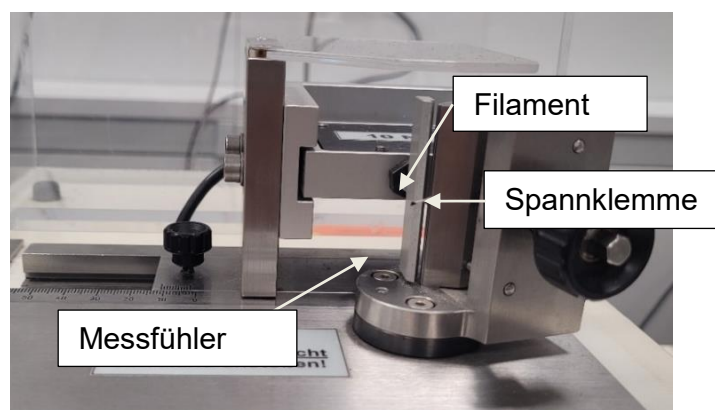


Abb. 30 Darstellung des Frank-PTI Biegesteifigkeitsprüfgerät 58565.

Mittels des Prüfgeräts kann in Anlehnung an die DIN 53121 ein Zweipunkt-Biegeversuch durchgeführt werden. Die Filamentproben werden auf 50 mm zugeschnitten und daraufhin für mindestens 24 h in einem Normklima bei einer Temperatur von $20,0 \pm 2 \text{ °C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $65,0 \pm 2 \text{ %}$ konditioniert. Danach werden die Proben orthogonal zum Messfühler einseitig an der Spannklemme auf 2 mm Messlänge eingespannt. Hierbei wird aufgrund der fragilen Proben keine Vorlast aufgebracht. Anschließend wird das Filament mit einer Geschwindigkeit von 2 °/s bis zu einem Biegewinkel von 90° gebogen. Nach Erreichen des maximalen Biegewinkels wird die dabei aufgewandte Biegekraft vom Messfühler ermittelt. Die ermittelte Prüfkraft, welche auf den Messfühler wirkt, wird durch eine Computereinheit auf die Biegesteifigkeit S (Nmm) mittels der nachfolgenden umgerechnet.

$$S = \frac{60}{\pi} \cdot \frac{F}{\alpha} \cdot \frac{l^2}{b}$$

Dabei ist F die eingesetzte Biegekraft beim maximalen Biegewinkel α , l die Messlänge und b die Probenbreite beziehungsweise der Durchmesser des Filaments [28].

Die Biegesteifigkeitsprüfung dient zur Quantifizierung der Filamentproben gegenüber dem Widerstand bei Biegungen im elastischen Bereich. Die ermittelten Werte werden hinsichtlich der variierten Herstellparameter verglichen. Um statistisch valide Ergebnisse zu erhalten, werden pro Filamentprobe bis zu 20 Messungen durchgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse der hergestellten Filamentproben anhand ihrer evaluierten Biegesteifigkeiten dargestellt. Im Anhang A.2 befinden sich tabellarisch die Einzelmesswerte. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Modifikation der Fällungsstrecke und -temperatur sowie des Konsolidierungsdurchmessers. Das Abb. 31 zeigt die Biegesteifigkeiten der Filamente im Hinblick auf die Fällungsstrecke bei einer Verfestigung durch Ausfällung bei RT an.

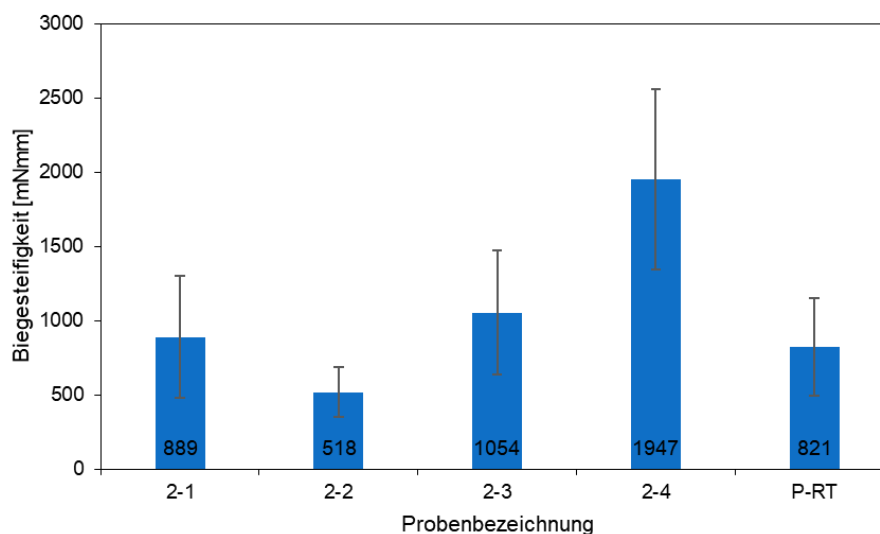


Abb. 31 Einfluss der Fällungsstrecke auf die Biegesteifigkeit der Filamentproben bei RT.

In Abb. 31 ist ersichtlich, dass die höchste Biegesteifigkeit von 1947 mNmm mittels Filamentprobe 2-4 erzielbar ist. Zugleich sind hohe Standardabweichungen erkennbar, die auf die halbmanuelle Herstellung zurückzuführen sind. Im Vergleich dazu weisen die automatisiert hergestellten Filamentproben (2-1; 2-2; 2-3; P-RT) bei RT eine durchschnittliche Biegesteifigkeit von 820,6 mNmm auf. Die Probe P-RT, welche eine beträchtlich längere Fällungsstrecke (prozentualer Unterschied der Fällungsstrecke: Probe 2-1: 40 %, Probe 2-2: 49 %, Probe 2-3: 60 %) aufweist, zeigt im Vergleich zum Mittelwert der Biegesteifigkeiten von den Proben 2-1 bis 2-3 (820,4 mNmm) keinen signifikanten Unterschied. Die Biegesteifigkeitswerte dieser automatisiert hergestellten Filamentproben variieren stark hinsichtlich des Mittelwerts.

Im weiteren Vergleich der Biegesteifigkeiten wurden die Filamentproben mittels unterschiedlicher Fällungstemperaturen und Konsolidierungsdurchmesser erzeugt. Die Abb. 32 veranschaulicht die Biegesteifigkeiten in Abhängigkeit des Konsolidierungsdurchmessers sowie der Fällungstemperatur.

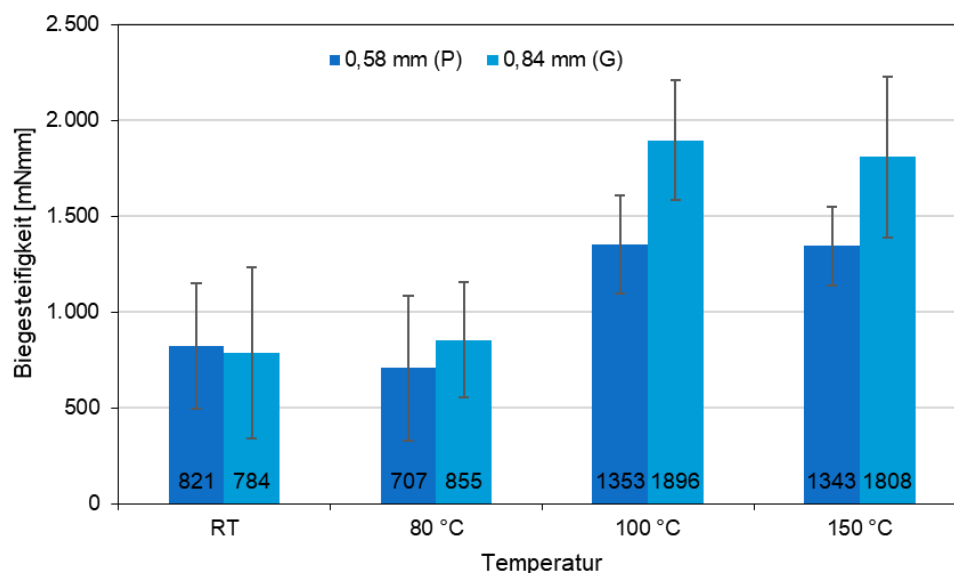


Abb. 32 Einfluss des Konsolidierungsdüsendurchmessers sowie der Fällungstemperaturen auf die Biegesteifigkeit der Filamentproben.

Abb. 32 zeigt auf, dass bei RT und einem geringeren Konsolidierungsdüsendurchmesser eine höhere Biegesteifigkeit auftritt. Das gegenteilige Ergebnis ist ab 80 °C ersichtlich. Hierbei ist bei größerem Düsendurchmesser eine höhere Biegesteifigkeit zu erkennen. Von RT auf 80 °C ist bei einem Konsolidierungsdüsendurchmesser von 0,58 mm eine Verringerung der Biegesteifigkeit von 13,9 % aufgetreten. Bei einem Düsendurchmesser von 0,84 mm ist hierbei eine Vergrößerung der Biegesteifigkeit von 9,1 % erkennbar. Ab einer Fällungstemperatur von 80 °C ist ausnahmslos eine Tendenz sichtbar, dass mit einem Konsolidierungsdurchmesser von 0,84 mm höhere Biegesteifigkeiten erzielbar sind. In Abb. 32 ist ebenfalls ersichtlich, dass ab

einer Fällungstemperatur von 100 °C ein signifikanter Anstieg der Biegesteifigkeit bei beiden Konsolidierungsdurchmessern auftritt. Prozentual steigt die Biegesteifigkeit von 80 °C auf 100 °C bei 0,58 mm um 91,4 % und bei 0,84 mm um 121,8 % an. Bei einer Fällungstemperatur von 150 °C hingegen ist ein Abfall der Biegesteifigkeiten bei beiden Konsolidierungsdüsen-durchmessern ersichtlich. Prozentual entspricht dies bei einem Düsendurchmesser von 0,58 mm 0,7 % und bei 0,84 mm 4,6 %. Die höchsten Biegesteifigkeiten der Filamentproben mit einem Konsolidierungsdurchmesser von 0,58 mm sowie 0,84 mm sind damit bei einer Temperatur von 100 °C realisierbar.

Nachfolgend wird die Korrelation zwischen den ermittelten Biegesteifigkeiten und Feinheiten der Filamente dargestellt. Mit Hilfe von Abb. 33 wird aufgezeigt, ob die Herstellparameter der Filamente Auswirkungen auf eine Abhängigkeit hinsichtlich der Biegesteifigkeit und Feinheit haben.

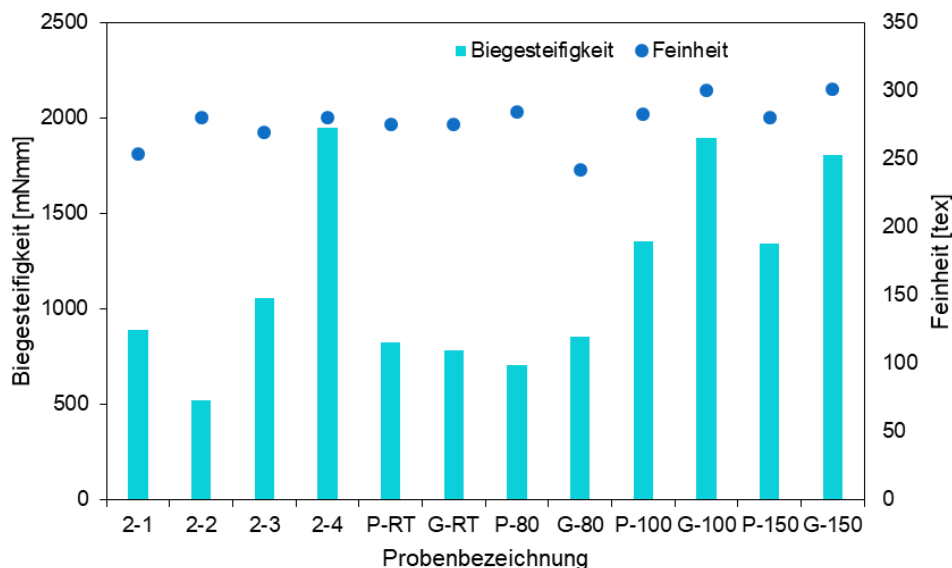


Abb. 33 Korrelation zwischen der Biegesteifigkeit und Feinheit der Filamente.

Die höchste Biegesteifigkeit (Probe: 2-4) geht nicht mit der höchsten Feinheit einher sowie analog dazu korreliert der niedrigste Biegesteifigkeitswert (Probe: 2-2) nicht mit der geringsten Feinheit (Probe: G-80). Erst bei den Fällungstemperaturen 100 °C und 150 °C ist eine Korrelation zwischen einer höheren linearen Dichte sowie höheren Biegesteifigkeiten ersichtlich. Verdeutlicht wird dies durch die geringeren Biegesteifigkeiten bei den Proben P-100 und P-150, die mittels einem Konsolidierungsdurchmesser von 0,58 mm hergestellt worden sind. Dagegen wurden höhere Biegesteifigkeiten bei G-100 und G-150 erreicht, die mit Hilfe eines Düsendurchmesser von 0,84 mm realisiert worden sind.

Zusammenfassend kann dargelegt werden, dass eine Korrelation zwischen Biegesteifigkeit und Feinheit von den Fällungsparametern abhängig ist. Das heißt, es liegt nur eine bedingte

Korrelation vor, die ab einer Fällungstemperatur von 100 °C auftritt. Der Zeitfaktor im Fällungsvorgang ist ein wichtiger Parameter, der die finalen Filamenteigenschaften maßgeblich beeinflusst. Somit muss das Filament entweder die nötige Zeit erhalten, um hohe Biegesteifigkeiten zu erzielen oder der Fällungsprozess muss mittels einer Temperaturerhöhung beschleunigt werden. Unter dem wirtschaftlichen Gesichtspunkt betrachtet, werden die höchsten Biegesteifigkeiten bei 100 °C erreicht. Das Weiter nimmt mit steigendem Faservolumengehalt die erreichbare Biegesteifigkeit ab. Dies wird bei den Proben P-100 und G-100 verdeutlicht. Resultierend daraus kann eine Empfehlung für die Proben P-100 und G-100 ausgesprochen werden, die weiteren Optimierungen unterzogen werden sollten. Eine mögliche Optimierung der Biegesteifigkeit könnte mittels einer Veränderung der Werkstoffauswahl im Hinblick auf die Zusammensetzung des Binders geschaffen werden. Eine Verringerung des Matrixgehalts in der Polymerlösung kann zu einer Verbesserung der Tränkbarkeit des Rovings und damit zur Minimierung der Lufteinschlüsse im Filament führen, wodurch eine höhere Biegesteifigkeit erzielbar wäre. Jedoch geht mit einer Verringerung des Matrixgehalts auch ein Rückgang der mechanischen Eigenschaften einher. Dies könnte in weiteren Versuchen im Projektvorhaben abgewägt werden. Des Weiteren könnte die Änderung des Matrix-Lösemittel-Systems eine Erhöhung der Biegesteifigkeit begünstigen. Beispielsweise könnten dichtere Strukturen der Matrix durch die Zugabe eines Fällungsmittels in die Polymerlösung oder ein nachträgliches Koagulationsbad realisiert werden.

3.4 Druckkopf Entwicklung

Der Druckkopf führt das vorkonsolidierte Filament und die CAB-Lösung zusammen und extrudiert beides durch eine Düse, so dass die CAB-Lösung zusammen mit den Fasern schichtweise auf dem Druckbett abgelegt werden kann, wie im Konzept in Abb. 34 dargestellt.

Als 3D-Drucker für die in dieser Arbeit entwickelten Druckköpfe dient ein H-Portal mit Schrittmotor-Antrieben mit den Abmessungen X- und Y-Achse von je 300 mm, Z-Achse von 100 mm Hub. Angetrieben werden die Portalachsen und die Achsen der jeweiligen Druckköpfe mit einer Ramps 1.4 Platine, die auf einem Arduino Mega2560 R3 aufgesteckt wird. Die Firmware für den Drucker wurde mit dem quelloffenen Marlin Projekt auf GitHub erzeugt.

Das vorkonsolidierte Filament wird dabei durch eine Edelstahl-Kapillare in die Düsenspitze eingeführt. Die Kapillare endet kurz vor der Düsenbohrung in der Düsenspitze. Der verbleibende Weg bis zur Düsenbohrung dient der Benetzung des vorkonsolidierten Filaments mit der Polymerlösung sowie dem Erweichen der Vorkonsolidierung für die folgende Umlenkung im Druckspalt.

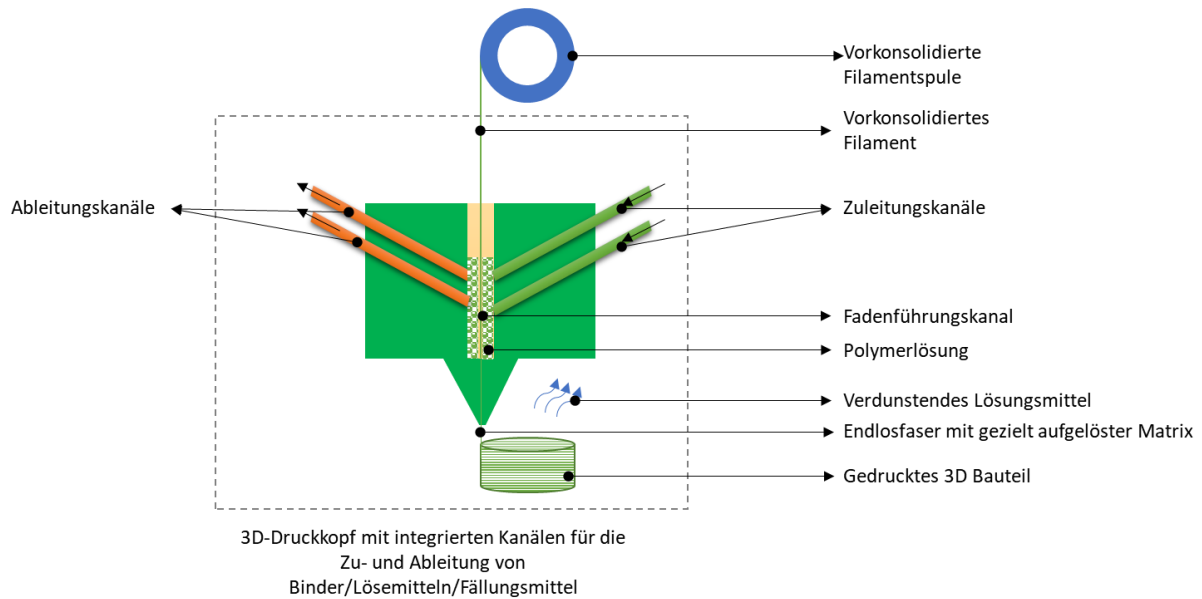


Abb. 34: Druckkopfkonzept für die Herstellung von endlosfaserverstärkten Bauteilen aus Cellulosefasern mit CAB/CA im lösungsbasierten 3D-Druckverfahren.

Version 1 des Druckkopfmoduls

In der ersten Version des Druckkopfes wird die pastenförmige CAB-Lösung durch ein Spindelkörper (Vieweg) dosiert. Der Vorschub des vorkonsolidierten Filaments wird mit einem Dual-Drive Bowden-Extruder (Micro-Swiss) realisiert, siehe Abb. 35. Beide Elemente werden mit Schrittmotoren der Größe NEMA 17 angetrieben.



Abb. 35: Links: Spindelkörper-Antrieb (Vieweg) für die Pasten-Dosierung; rechts: Bowden Dual Gear Extruder (Micro Swiss) für den Transport des vorkonsolidierten Filamentes.

Zusammengeführt werden Paste und Filament in einer Anordnung der beiden Förder-Elemente, die in einer 3D-gedruckten Anordnung kombiniert sind (FormLabs, Form3 mit Gray Pro Resin), die in Abb. 36 abgebildet ist. Die Konstruktion erfolgte mit Creo Parametrics 5.0.

Die Lösung wird in Kartuschen (Vieweg, 55 ccm, 8000er Serie) abgefüllt und mit einem Vor-
druck von 1 bar beaufschlagt und so an den Spindelantrieb herangeführt.

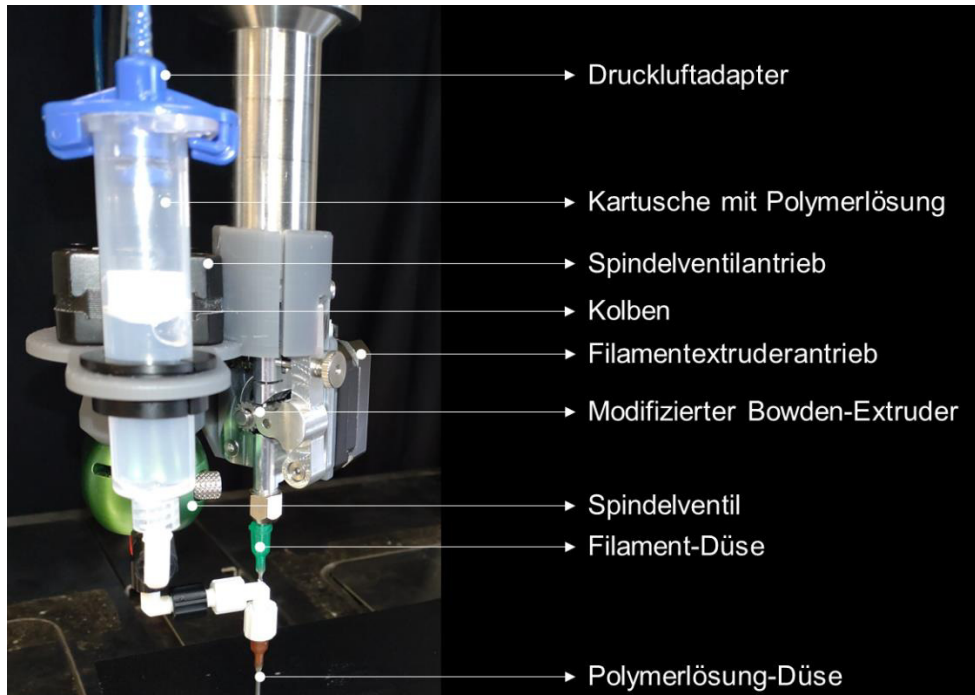


Abb. 36: Version 1 des Druckkopfmodul für das 3D-Drucken von Endlosfasern.

Durch die Verwendung von den Verbrauchsmaterialien für den Spindelantreib, die Kartuschen sowie die Luer-Lock-Adapter und Kunststoff-Fittings konnte ein variabler, Aceton-beständiger und verschleißarmer Aufbau erzeugt werden. Für erste Versuche mit der kombinierten Faser-Matrix-Extrusion konnte damit ein funktionierender Aufbau mit Marlin-3D-Druck-Steuerung realisiert werden, um Erfahrungen mit der geeigneten Polymerlösung, dem Materialaustrag, der Druckgeschwindigkeit sowie mit der Benetzung der Fasern in der Druck-Düse zu sammeln.

Die ersten Versuche wurden ohne vorkonsolidierte Fasern durchgeführt, hierbei wurde der durch den Druckkopf gezogen und dabei mit der CAB-Lösung benetzt und in die Lösung eingebettet. Der Druckgeschwindigkeit wurde mit 5 mm/sec im Simplify3D so gewählt, dass die CAB-Lösung durch Verdampfen des Azetons unmittelbar nach dem Düsenaustritt ausreichend standfest wurde und die Fasern nicht mehr aus dem Verbund gezogen wurden. Im Pronterface konnte die Druckgeschwindigkeit weiter auf 10% gesenkt werden, so dass auch Kurven und Richtungsumkehr möglich werden.

Nachteilig bei diesem Aufbau ist der mögliche Reflux im Spindelantreib sowie die Leckage durch den Spindelantreib. Dadurch war eine gleichmäßige Pastendosierung nicht gewährleistet und das Faser-Matrix-Volumen nicht sicher reproduzierbar.

Version 2 des Druckkopfmoduls

Daher wurden für die Version 2 des Druckkopfes Dosierpumpen mit Endloskolben-Prinzip (ViscoTec, Vibro-HEAD 3/3) ausgewählt, da hier ein exzentrisch bewegter Rotor in einem Stator eine Förder- und Dosiercharakteristik realisiert wird, die einem sich endlos bewegenden Kolben gleichkommt, wodurch drehwinkelproportional immer ein konstantes Volumen gefördert wird (Abb. 37).

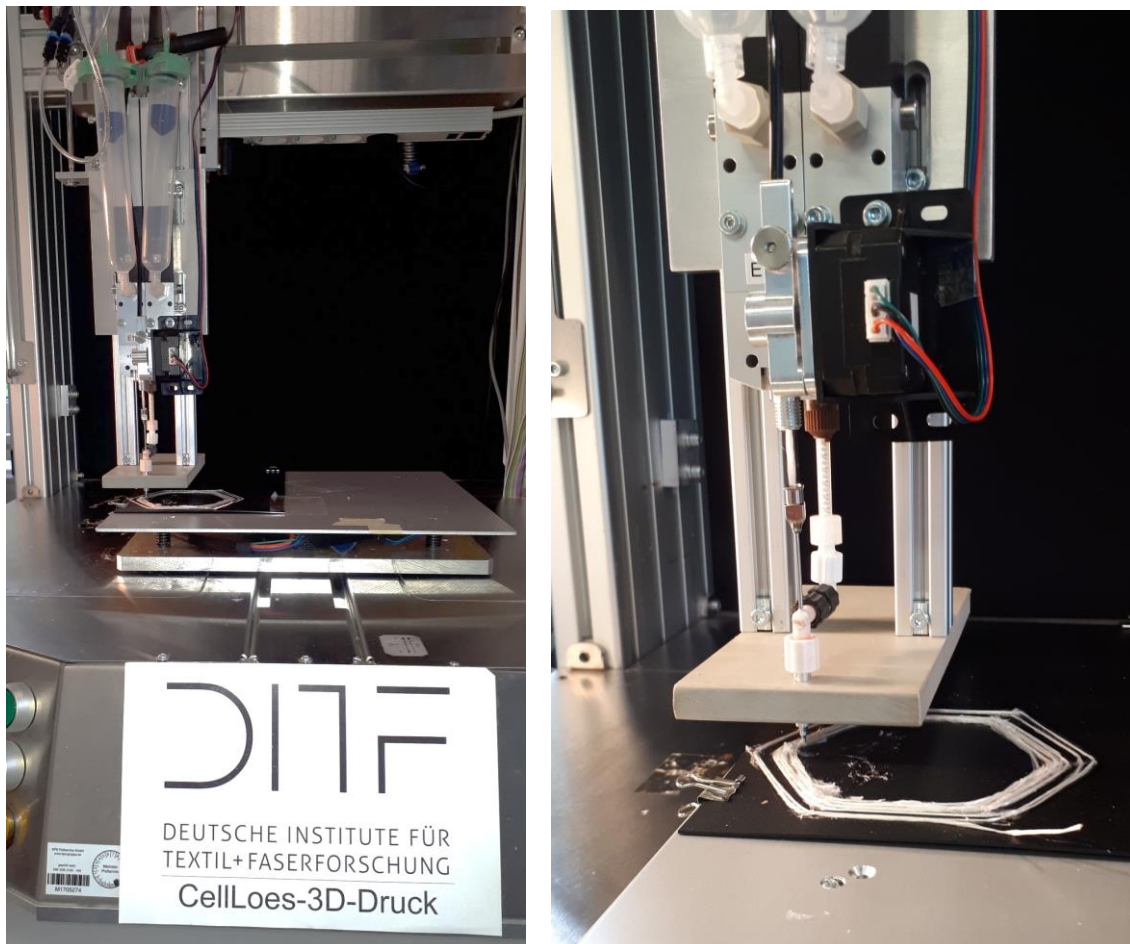


Abb. 37: Version 2 des Druckkopfmoduls: links H-Portal für den Endlosfaser-3D-Druck, rechts: weiterentwickeltes Druckkopfmodul für das 3D-Drucken von Endlosfasern (Endloskolbenprinzip).

Untersuchungen zur möglichen Integration einer Faser-Schneide-Vorrichtung

Im Berichtszeitraum konnten keine kontinuierlichen vorkonsolidierten Filamente mit gleichbleibend rundem Querschnitt und gleichbleibendem Durchmesser hergestellt werden (vergl. Kapitel 3.3), so dass sich diese nicht geeignet waren, mit dem Filamentantrieb (dual gear extruder) durch die Kanüle in und durch die Düse gefördert zu werden. Der ungleichmäßige Querschnitt führte regelmäßig zur Verklebung in der Kanüle bzw. zu Verstopfung der Düse. Die Kanüle konnte nicht größer gewählt werden, da sonst die Lösung zu weit in der Kanüle aufsteigt und die CAB-Matrix der vorkonsolidierten Filamente an- und auflöst. Daher wurde auf

die Integration des Schneidmoduls in den Druckkopf verzichtet. Schneidversuche wurden an einem Composer Fiber Cutter (Fa. Anisoprint) durchgeführt, siehe Abb. 38.

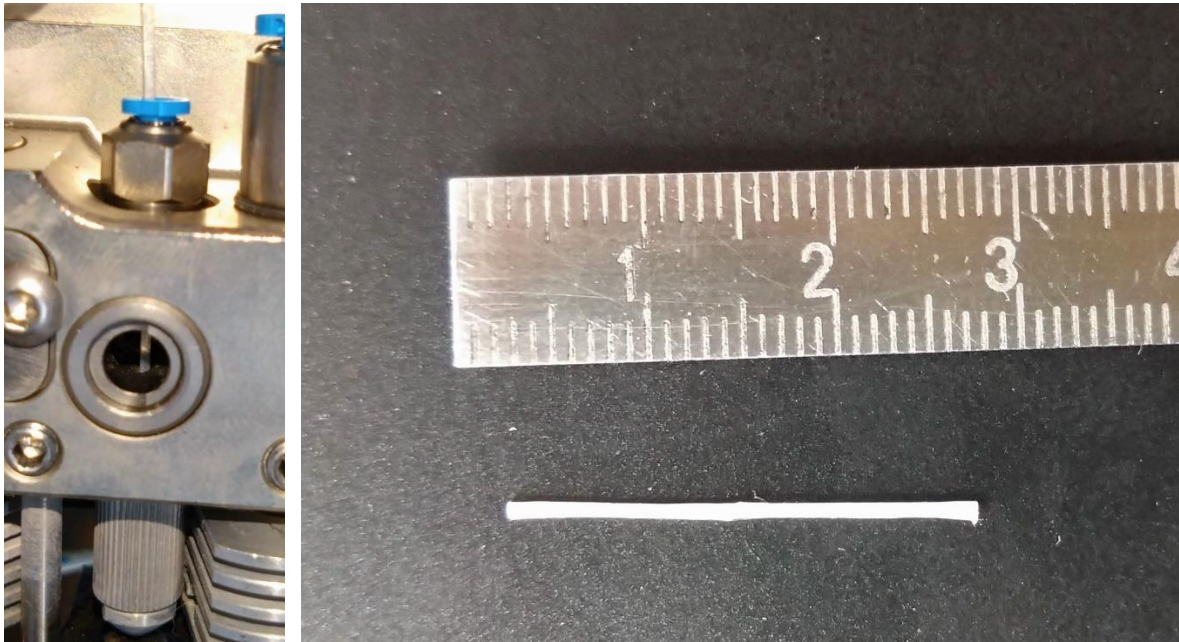
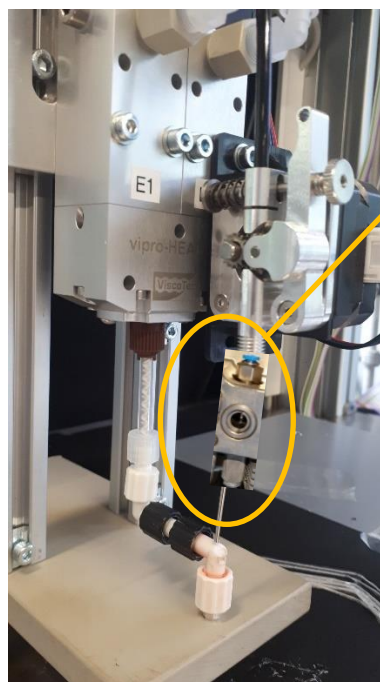


Abb. 38: Schneideversuche an vorkonsolidierten Filamenten, links: Composer Fiber Cutter (Anisoprint); rechts: geschnittenes vorkonsolidiertes Filament bestehend aus Reifenkord (Cellulosefasern) mit CAB-Matrix

Wie in Abb. 38 zu sehen ist, konnte das Cellulose/CAB-Filament in den Fiber Cutter eingeführt und durch Rotation des Schneidmessers sauber geschnitten werden.



Möglicher Ort zur Integration
einer Schneidevorrichtung

Abb. 39: Ansicht des Druckkopfmoduls von vorne, potentielle Position des Schneidemoduls mit Rotationsmesser zwischen Filament-Antrieb und Kanüle.

3.5 Entwicklung von 3D-Druckprozessen

3.5.1 Druckprozess

Für den 3D-Druck wurden zwei Beispiel-Bauteile entworfen.

Ein Bauteil, „Rahmen“ genannt, hat eine quadratischen Grundfläche von 80 x 80 mm, eine Rahmenbreite von 10 mm und einer Höhe von 5 mm, wie in Abb. 40 dargestellt. Durch die gleichbleibende Rahmenbreite von 10 mm soll sichergestellt werden, dass eine parallele Endlosfaserverstärkung im gesamten Bauteil möglich ist. Die Ecken sind mit einem Außenradius von 20 mm abgerundet. Damit lassen sich aus einem Rahmen 4 Prüfkörper mit den Abmessungen 40 x 10 x 5 mm für mechanische Testungen, z.B. 3-Punkt-Biegung, generieren.

Ein weiteres Bauteil, „Planktontech“ genannt, basiert auf der bionischen Leichtbaustruktur einer Kieselalge, wie in Abb. 42 abgebildet.

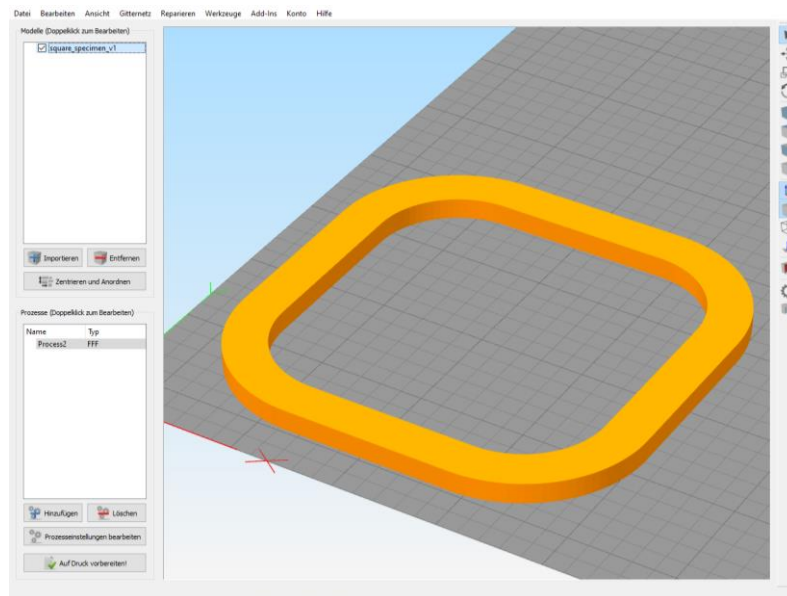


Abb. 40: Beispiel-Bauteil „Rahmen“ im Slicer-Programm Simplify3D

Für die additive Fertigung mit Endlosfaserverstärkung aus wurde zunächst an der Geometrie „Rahmen“ (Abb. 40) erprobt. Hier werden der CAB-Lösungsstrang mit den Cellulosefasern in konzentrischen Bahnen schichtweise abgelegt. Die Extrusionsbreite wurde mit 0,5 mm etwa so breit wie der Durchmesser des konsolidierten Filaments gewählt. Die Schichthöhe wurde dabei variiert, von 0,5 bis 1,25 mm. In Abb. 41 sind die Bahnen der einzelnen abgelegten Stränge dargestellt. Die im Slicer-Programm generierten Druckdaten werden als G-Code abgespeichert und mit Pronterface (Open Source Software, Abb. 42) von einem angeschlossenen PC über eine USB-Schnittstelle an die Marlin-Steuerung gesendet, wo die G-Code-Daten abgearbeitet werden. Dabei können die Druckgeschwindigkeit und der Materialfluss noch während des Drucks beeinflusst werden.

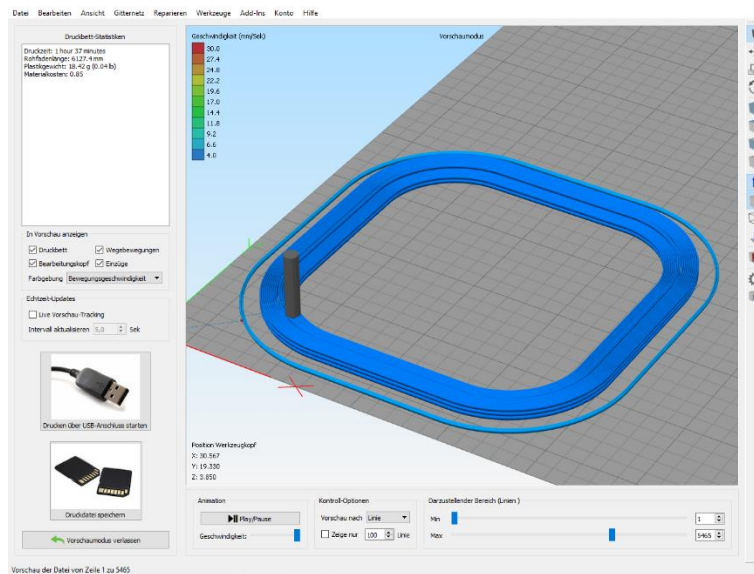


Abb. 41: Simulation der Strangablage mit Endlosfasern im Beispiel-Bauteil „Rahmen“

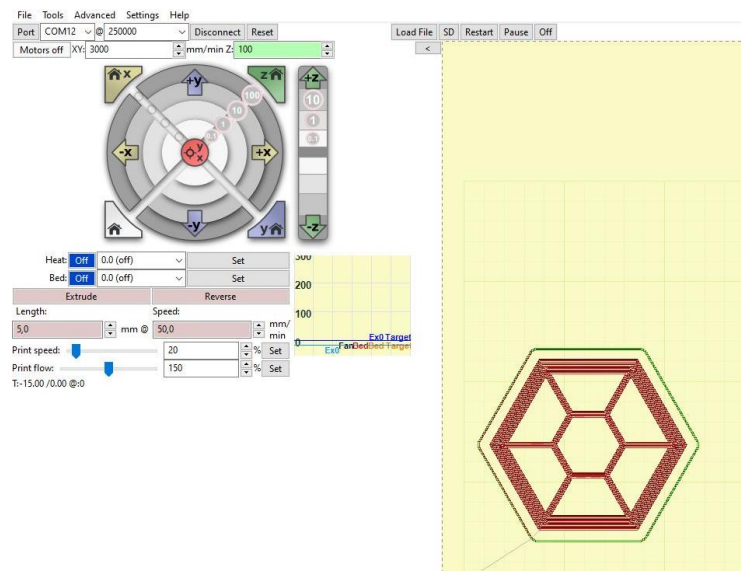


Abb. 42: Pronterface-Oberfläche mit Terminalfenster zur Steuerung des 3D-Druckers vom PC aus

Mit dem hier entwickelten und beschriebenen Prozess konnten Ausdrücke des Bauteils „Rahmen“ erzeugt werden (Abb. 43). Dabei wurde kein wesentliches Warping (Aufwölbung oder Verzug durch unterschiedliche Schwindung im Bauteil) beobachtet, so dass sich die Bauteile nicht während des Druckes von der Druckplatte lösen.

Die Druckgeschwindigkeit wurde dabei so lange reduziert, bis die Radien des Rahmens mit dem fasergefüllten CAB-Strang bahngerecht gedruckt werden konnten, ohne dass die Fasern beim Verlassen der geraden Strecken aus der Matrix herausgezogen wurden. Da keine vor-konsolidierten Filamente zur Verfügung standen, wurden die Verstärkungsfasern passiv durch das Druckkopfmodul gezogen, in der Düse benetzt und mit Matrix getränkt. Die Höhe der

schichten wurde ebenfalls empirisch ermittelt. Basierend auf der Druckbreite von 0,5 mm wurde die Schichthöhe schrittweise von 0,5 mm auf 1,25 mm erhöht. Dadurch konnte das Bauteil mit 4 Schichten in einer Höhe von ca. 5 mm erzeugt werden. Unterstützt wurde die Verdunstung des Lösemittels durch Ventilatoren.

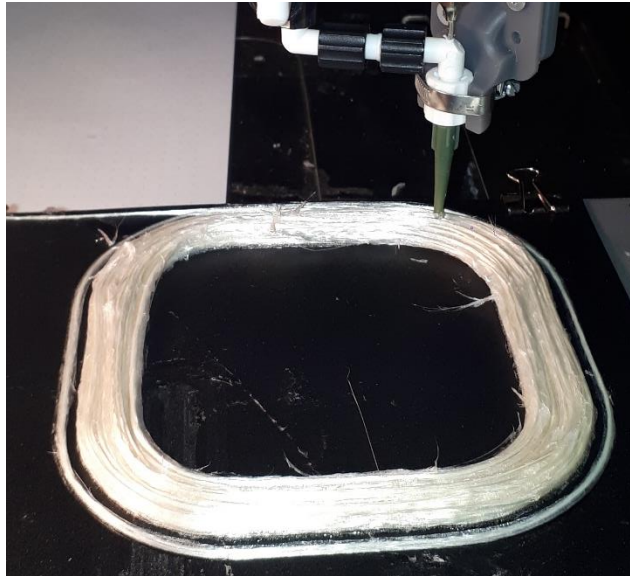


Abb. 43: Druck-Beispiel des Bauteiles „Rahmen“ mit CAB-Lösung und Endlosfaserverstärkung

Die Beispielgeometrie „Planktontech“ wurde ebenfalls im CAD konstruiert, als 3D-Model im Slicer in Schichten zerlegt und als G-Code an Pronterface übergeben. Abb. 44 zeigt auf der linken Seite den Druck der reinen Matrix als pastöse CAB-Lösung und auf der rechten Seite exemplarisch einen Ausdruck mit Cellulosefasern.

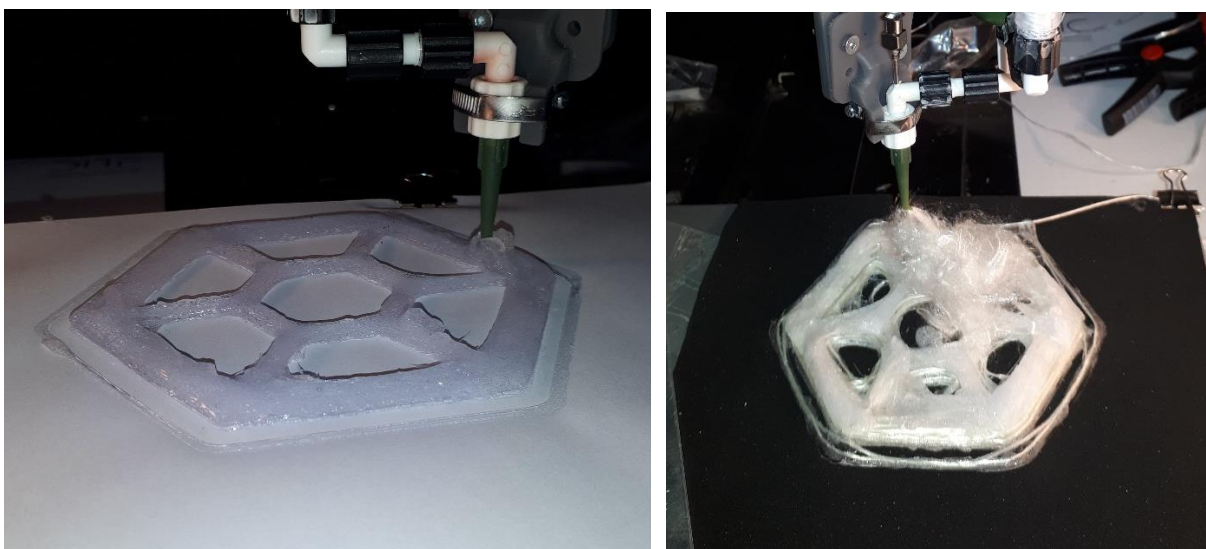


Abb. 44: Druckversuch zu Beispielgeometrie „Planktontech“, links: Matrix aus CAB-Lösung ohne Fasern; rechts: CAB-Lösung und passiv eingezogener Reifenkord

In Abb. 44 ist zu erkennen, dass es in den scharfen Umlenkungen der inneren Geometrie zum Ausreißen der Verstärkungsfasern und in der Folge zu einem Fehldruck kam. Mit den passiv durch den Druckkopf gezogenen Verstärkungsfasern konnte hier kein akzeptables Druckergebnis erreicht werden. Hier muss die Entwicklung der vorkonsolidierten Filamente mit einem aktiven Transport durch den Bowden Dual Gear Extruder Abhilfe schaffen.

3.5.2 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des gedruckten Bauteils

Die mechanischen Eigenschaften der 3D-gedruckten Bauteile wurden auf einer Zwick-Roell 5 kN Universalprüfmaschine nach der DIN ISO 14125 geprüft. Da die gedruckten Bauteile vergleichsweise kleiner waren als die Standard-Norm-Proben, wurde der Prüfaufbau an die Probengröße angepasst (Abb. 45). Für die Prüfung der Proben wurde eine Stützlänge von 30 mm verwendet und die Prüfung wurde mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt.

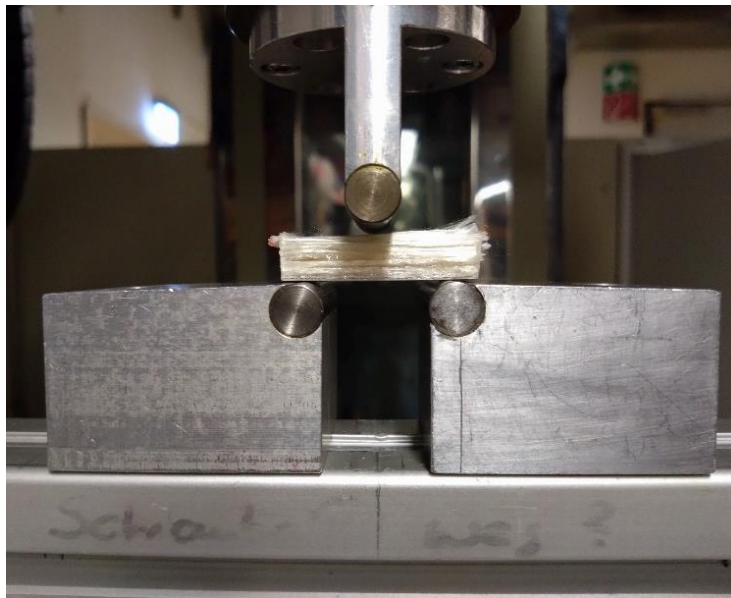


Abb. 45 Versuchsaufbau der 3-Punkt-Biegeprüfung.

Die Biegeversuche wurden an den in Abb. 43 dargestellten Proben durchgeführt. Die Proben wurden durch Herausschneiden der abgerundeten Ecken der gedruckten abgerundeten quadratischen Proben vorbereitet. Aus jedem gedruckten Bauteil wurden vier Proben ausgeschnitten. Tabelle 8 beschreibt die Proben und die Druckbedingungen, die für den Druck der Proben verwendet wurden. Die Bauteile wurden unidirektional gedruckt, damit die Fasern bei der Prüfung senkrecht zur Längsachse der Druckfinne liegen. Aufgrund des Umlaufs des Druckkopfs (vergl. Abb. 41) sind die Fasern an einigen Stellen verrutscht, was in einigen Fällen zu einem nicht rechtwinkligen Querschnitt der Proben führte.

Tabelle 8 Beschreibung der für die Biegeversuche verwendeten Probentypen

Probe	Druckparameter			Durchschnittliche Probendicke [mm]
	Anzahl der Schichten [-]	Ausgewählte Schichtdicke [mm]	CAB Lösung	
Bauteil 1	10	0,5	40 % in Act	9,5
Bauteil 2	5	1	40 % in 75:25 Act:Iso	6,5
Bauteil 3	4	1,25	40 % in 75:25 Act:Iso	6,5

Abb. 46 zeigt die Kraft-Verformungs-Kurve der Proben, die beim Biegeversuch gemessen wurde. Aus den Kurven ist ersichtlich, dass die Druckparameter die mechanischen Eigenschaften stark beeinflussen. Das Bauteil 1 weist eine große Verformung auf, während das Bauteil 3 eine höhere Steifigkeit aufweist.

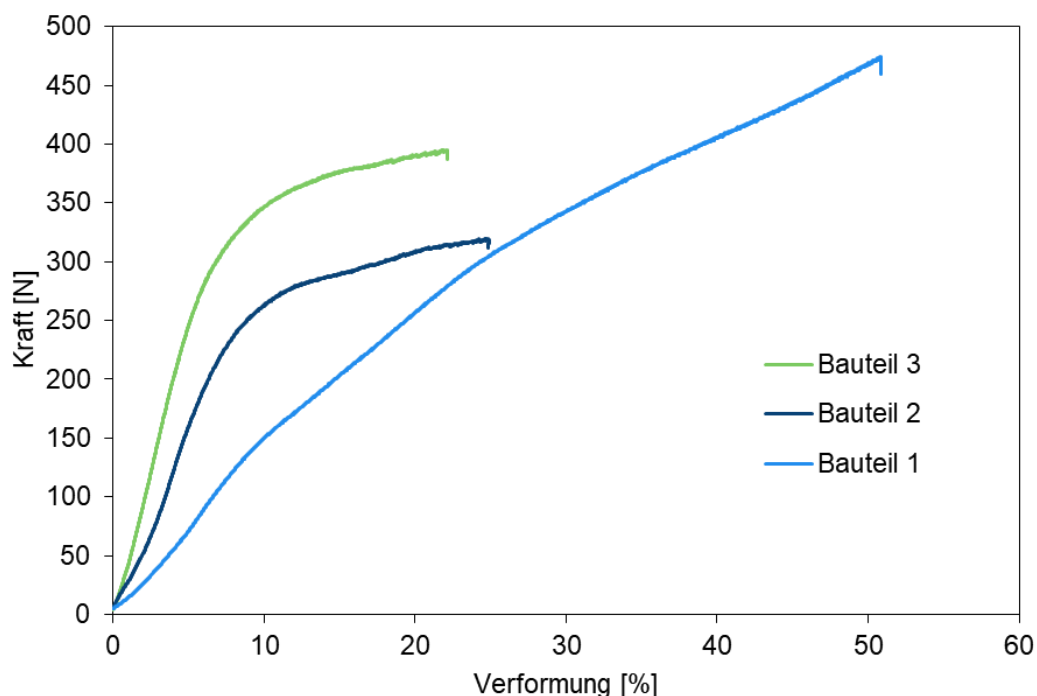


Abb. 46 Kraft-Verformungs-Kurve bei 3-Punkt-Biegung von gedruckten Probekörpern.

Aus der Abb. 47 ist zu erkennen, dass das Teil 1, das mit 0,5 mm Schichthöhe und 40% CAB in Aceton gedruckt wurde, die geringste Steifigkeit aufweist. Im Gegensatz dazu zeigen die Teile 2 und 3 mit 1 mm bzw. 1,25 mm Schichthöhe, die mit 40% CAB in Acteton/Isopronanol-Mischung gedruckt wurden, eine zehnfache Erhöhung der Steifigkeit. Bei der Prüfung wurde festgestellt, dass sich das Bauteil 1 ähnlich wie herkömmliche Schaumstoffe verformte.

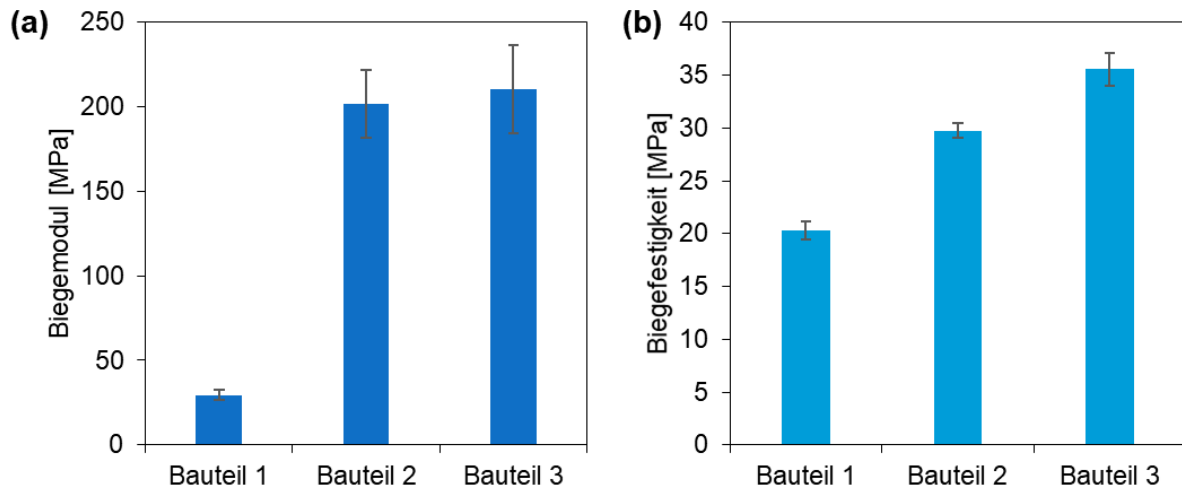


Abb. 47 Biegeeigenschaften der gedruckten Bauteile: (a) Elastizitätsmodul und (b) Biegefestigkeit.

3.5.3 Optische Untersuchung des gedruckten Bauteils

Die Querschnitte der gedruckten Teile wurden mit Hilfe von REM-Aufnahmen analysiert, um die Faser-Matrix-Haftung und die relative Position der gedruckten Faserbündel zu untersuchen. Die Proben wurden in ähnlicher Weise vorbereitet wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben. Für die REM-Aufnahmen wurde das Tischrasterelektronenmikroskop Hitachi TM-1000 eingesetzt.

Aus Abb. 48 (a) ist ersichtlich, dass die Filamente relativ eng beieinander liegen (ca. 0,2 mm Abstand), wobei sich zwischen den einzelnen Filamenten jeweils eine Polymermasse befindet. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Querschnittsdimensionen der Filamente zueinander stark variieren.

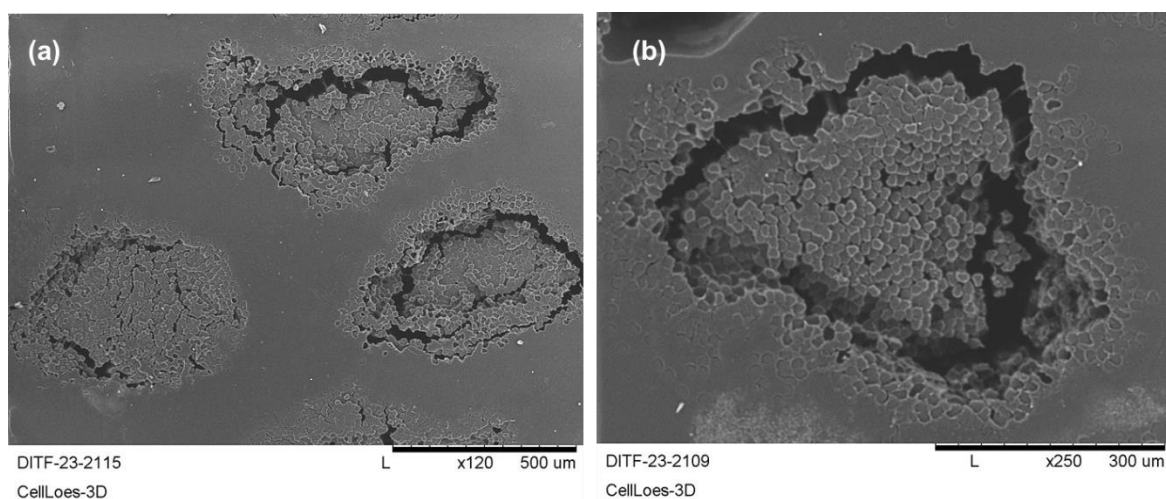


Abb. 48 REM-Aufnahme der Querschnitte des gedruckten Bauteils (a) Position des Filamentbündels im gedruckten Bauteil und (b) Schwindung um den Kern des Filamentbündels

Darüber hinaus verdeutlichen die REM-Bilder Abb. 48 (a) und (b), dass die Fasern eine schlechte Haftung mit der Matrix sowie eine schlechte Benetzung aufweisen. Der Kern der Filamentbündel ist in fast allen Fällen an den Randbereichen von der Bulkphase getrennt.

Aus Abb. 49 ist ersichtlich, dass die Mitte des Filamentbündels nicht mit dem Bindemittel benetzt wurde und somit trocken bleibt. Andererseits trennen sich die Fasern an den Rändern, die vollständig benetzt waren, ebenfalls vom Bindemittel, sobald das Lösungsmittel verdunstet, d. h. das CAB schrumpft von der Faseroberfläche weg, während es regeneriert.

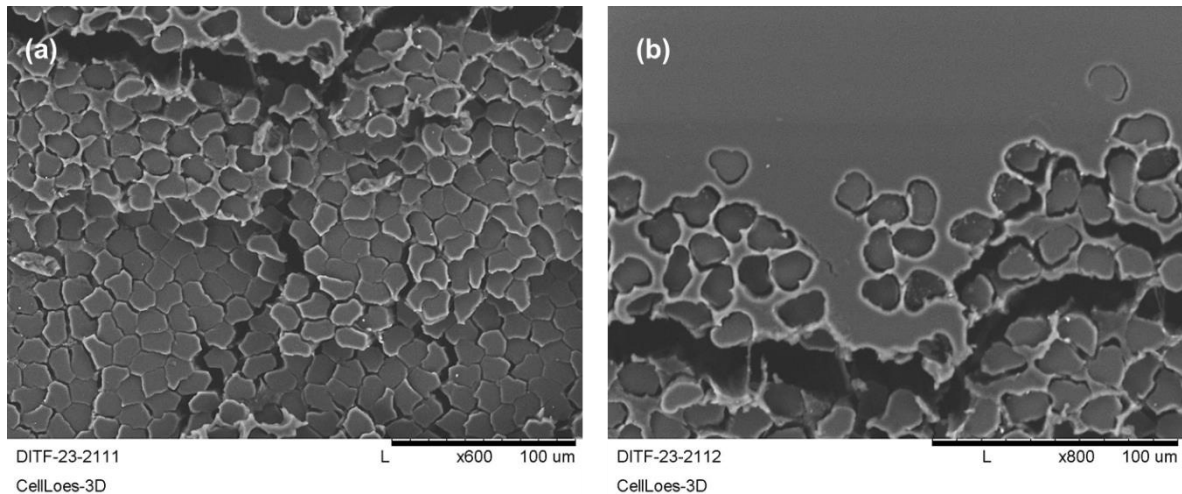


Abb. 49 REM-Aufnahmen der Filamente in (a) der Mitte des Filamentbündels und (b) an der Grenze zwischen Filamentbündel und Polymermasse.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Faser-Matrix-Haftung zwischen dem Reifenkord und der CAB-Lösung gering sind. Dies kann auf die nicht verträgliche Beschichtung der Filamente hindeuten. Infolgedessen weisen die gedruckten Teile im Vergleich zu ihren Bestandteilen (d. h. dem reinen CAB) des Verbundstoffs schlechte mechanische Eigenschaften auf.

3.6 Technologieerprobung auf dem Freeformer

Durch das Industriepraktikum bei Arburg wurde die Technik der freeformer intensiv erarbeitet. Aufgrund der daraus erworbenen Kenntnisse wurde festgestellt, dass im freeformer nur Thermoplaste verarbeitet werden können und dies auch der Schwerpunkt der Firma Arburg sein wird. Daher wurden nach Abschluss des Industriepraktikums zwei Ansätze verfolgt:

- a) Technologieentwicklung für das lösungsmittelbasierte 3D-Drucken von Cellulosematerialien bei Niedertemperatur
- b) Herstellung von vorkonsolidierten Cellulosefilamenten für das lösungsmittelbasierte 3D-Drucken sowie für das AKF-Verfahren.

In diesem Zusammenhang wurden die CAB-Granulate, die zur Herstellung der Polymerlösung verwendet wurden, auf dem Freeformer getestet. In der Regel müssen für ein Material, das auf dem Freeformer gedruckt werden soll, Materialqualifizierungstests durchgeführt werden, um geeignete Druckparameter zu bestimmen, die für ein Material auf dem Freeformer spezifisch sind. Die im Projekt verwendeten Granulate qualifizierten sich im Rahmen der Versuche mit dem Freeformer, und das in Abb. 50 dargestellte Turbinenmodell wurde mit den CAB-Granulaten gedruckt. Es ist zu erkennen, dass das Material thermisch abgebaut wurde, wodurch sich das gedruckte Bauteil bräunlich verfärbt.

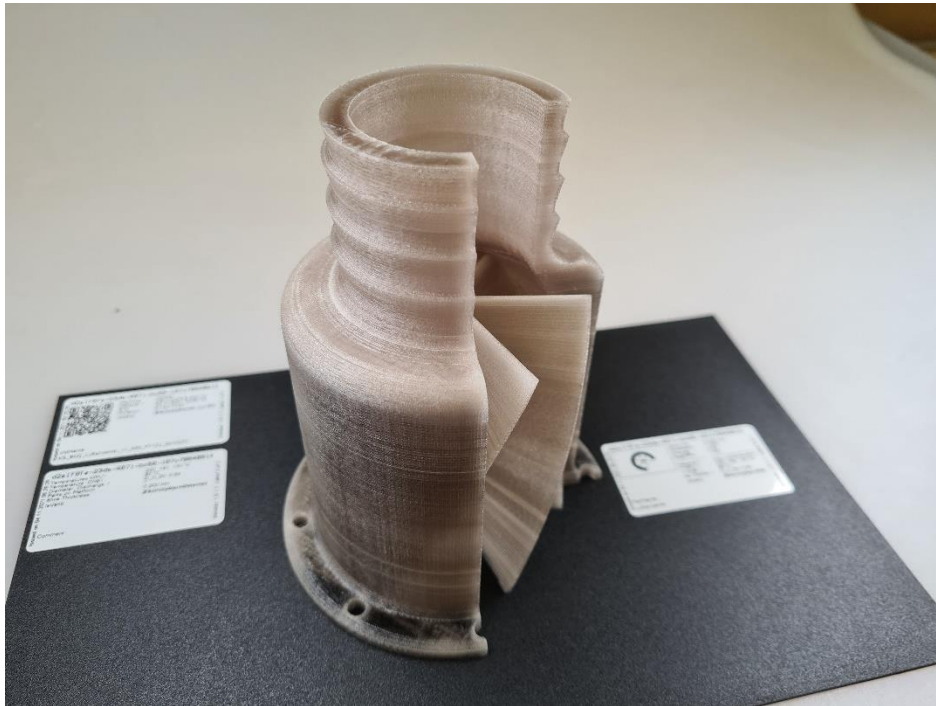


Abb. 50 Turbinenmodell gedruckt aus CAB-Granulaten auf Arburg freeformer

In einem nächsten Schritt wurde beschlossen, das vorkonsolidierte Cellulosefilament auf dem Freeformer zu verwenden, um Bauteile mit den gleichen Materialien zu drucken, die beim lösungsmittelbasierten 3D-Druck verwendet werden. Bei der Verwendung der entwickelten Filamente gab es jedoch noch weitere Herausforderungen. Eine der größten Herausforderungen ist die Dimensionierung der Filamentzuführung am Freeformer. Der Faserkanal (siehe Abb. 51) des Freeformers ist so ausgelegt, dass er Filamente mit einem maximalen Durchmesser von 0,2 mm führt, der zugleich die Schichtdicke des Freeformers ist. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Filamente haben einen Durchmesser von mehr als 0,5 mm, da die Reifenkord-Filamente nicht in kleineren Feinheiten zur Verfügung standen. Dennoch kann der Faserkanal im Freeformer durch einen dickeren Durchmesser ersetzt werden. Allerdings konnte der Umbau nicht innerhalb des Projektzeitraums realisiert werden.

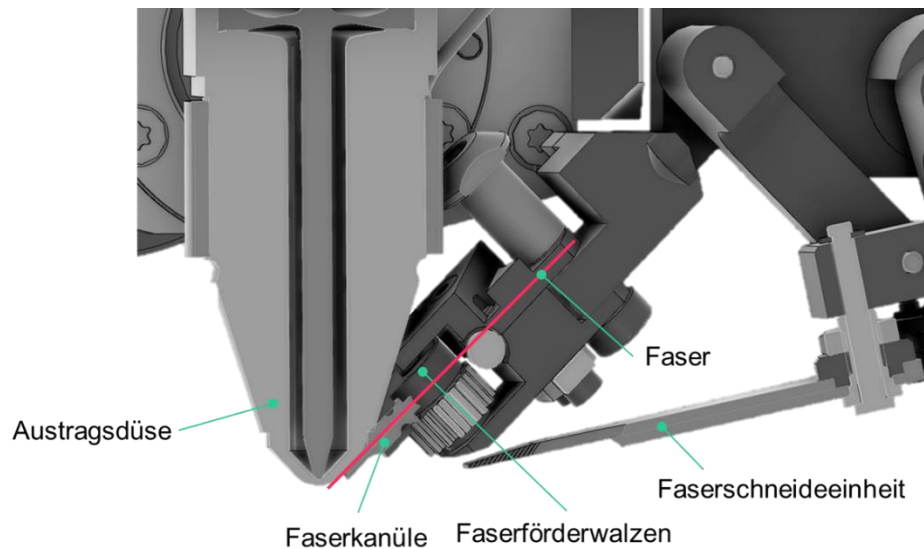


Abb. 51 Schema des Querschnitts der Freeformer-Düse mit dem Faserzuführungsmodul (Quelle: Arburg)

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass das vorkonsolidierte Filament immer in Kontakt mit der Düse des Freeformers stehen sollte (siehe Abb. 51). Dies würde zu einer Degradation des Filaments führen und somit den Druckprozess sowie die Eigenschaften des gedruckten Bauteils beeinträchtigen. Daher sind zusätzliche Anpassungen erforderlich, um die Nutzung der im Rahmen dieses Projekts entwickelten Materialien und Technologien zu ermöglichen.

Alternativ konnten manuell eingelegte vorkonsolidierte Filamente in unidirektional verstärkten Bauteilen realisiert werden, die in Abb. 52 dargestellt sind. Hierbei werde in die einzelnen Schichten Kanäle gedruckt, in die Cellulosefilamente eingelegt werden können. Jedoch konnte durch das manuelle Einlegen noch keine ausreichende Faser-Matrix-Haftung erzielt werden, so dass die Fasern aus dem Bauteil herausgezogen werden und bisher nicht relevant zur Festigkeit beitragen.

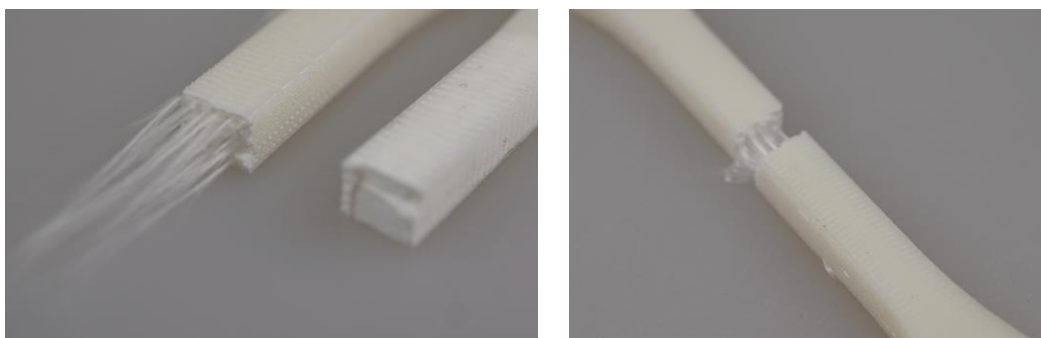


Abb. 52 Manuell eingelegte Fasern in einen Faserkanal im Freeformer ohne Nutzung des Faserzuführungsmoduls (Quelle: Arburg)

3.7 Zusammenfassung

Im Mittelpunkt dieses Projekts stand die Entwicklung eines „Proof of Concept“ für die Herstellung von endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoffen mittels lösungsmittel-basierten 3D-Druck. In dieser Hinsicht, wurde ein lösungsbasiertes Verfahren zur Herstellung eines faserverstärkten Endlosfilaments aus Rayon-Reifenkord-Endlosfasern und einer CAB-Matrix sowie eines Lösungsmittels (Aceton) entwickelt. Darüber hinaus wurde ein in den 3D-Druckprozess integrierbares Filament, das kontinuierlich im Prozess gefördert werden kann, hergestellt. Im Folgenden werden die Herangehensweise sowie Forschungsergebnisse zusammengefasst dargelegt. Nach Betrachtung des Stands der Technik erfolgte in dieser Arbeit die Vorentwicklung des Filaments durch die methodische Charakterisierung des Binders. Untersuchungen legten dar, ob die Materialauswahl für die Herstellung eines 3D-Druckfilaments geeignet ist. Hierbei wurde validiert, dass mit einem CAB-Matrixgehalt von 40 Gew.-% ein optimales Bindermaterial für die Faserversteifung hergestellt werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Verwendung von Aceton sowie Aceton/Isopropanol gemisch als Lösungsmittel, welches einen hohen Dampfdruck und demzufolge eine hohe Flüchtigkeit besitzt, der Verfestigungsprozess jedoch nicht bei RT ablaufen kann. Die Auswertung des Massenverlusts des Binders durch Lösemittlevaporation zeigt, dass der Fällungsprozess über mehrere Stunden (4 h) andauert. Bei den zeitabhängigen Viskositätsmessergebnissen geht hervor, dass bei erhöhter Fällungstemperatur auch eine Abnahme der Fällungszeit einhergeht und das Matrixmaterial bei 80 °C nach ca. 1 h verfestigt ist. Demnach ist das Matrix-Lösemittel-System im Pultrusionsprozess erst bei höheren Temperaturen (ab 80 °C) prozessierbar. Des Weiteren konnte mit einer Fällungstemperatur von 80 °C festgestellt werden, dass hiermit höher erreichbare Maximalviskositätswerte der Matrix erzielt werden können. Diese Erkenntnis kann vorteilhaft für die Einbindung der Matrix im Faserverbund und deren mechanische Eigenschaften genutzt werden. Außerdem ging aus Versuchen hervor, dass die Matrix-Prüfkörper eine je nach Fällungstemperatur variierende strukturelle Porosität aufweisen. Jedoch ist eine Tendenz zu erkennen, dass mit zunehmender Fällungstemperatur eine Zunahme der Porenanzahl in Kombination mit der Abnahme des Porenvolumens einhergeht. Dieses Vorkommen konnte bei den Filamentproben, die mikroskopisch im Querschnitt untersucht worden sind, in den Matrixsegmenten nicht festgestellt werden. Demnach ist die Fällung im Filamentherstellprozess durch das flächige Verdampfen des Acetons aus dem Filamentstrang vorteilhaft und wirkt einer strukturellen Porenentstehung entgegen.

Auf Grundlage der CAB-Aceton-System-Untersuchung wurde eine Anlagentechnik zur Faserversteifung entwickelt. Die Parametereinstellung der Pultrusionsanlage basierte auf den Vorversuchen bezüglich der Bindercharakterisierung und erfolgte im Hinblick auf die Qualität der produzierten Filamentproben. Elementare Parameter, die die Qualität der Filamentproben

beeinflusst haben, waren zum einen die Fällungstemperatur sowie zum anderen der Konsolidierungsdüsendurchmesser. Die erstellten Filamentproben wurden daraufhin werkstofftechnisch mittels unterschiedlicher quantitativer und qualitativer Prüfmethoden analysiert und validiert. Hierbei wurde lichtmikroskopische Untersuchungen der Filamentquerschnitte vorgenommen, um die Profiltreue, Porosität und Querschnittsfläche zu bewerten.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine hohe Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Feinheit und des Profilquerschnitts bei Fällungstemperaturen ab 100 °C erreicht werden können. Dabei nimmt die Reproduzierbarkeit des Querschnittsprofils aufgrund der Schwindung mit Zunahme des Matrix-Volumengehalts ab und ein wolkenförmiger Querschnitt geht hervor. Diese Eigenschaft kann im 3D-Druckprozess vorteilhaft sein, denn aufgrund der größeren Oberfläche kann eine Zweitbenetzung im Extruder des 3D-Druckers optimaler erfolgen.

Des Weiteren steigt mit zunehmender Temperatur die Porosität zwischen den Faserfilamenten an. Bei einem höheren FVG durch einen geringeren Konsolidierungsdüsendurchmesser ist dieses Vorkommen verstärkter. Aufgrund dessen kann auf eine geringere Faser-Matrix-Haftung geschlossen werden. Im Hinblick auf den 3D-Druckprozess kann dieses Charakteristikum genutzt werden. Wie bei den eingebetteten Filamentproben zu erkennen ist, fließt das Einbettmittel aufgrund von Kapillareffekten in die Poren beziehungsweise Lufteinschlüsse. Die Porosität hat grundsätzlich Einfluss auf die späteren mechanischen Eigenschaften sowie die Prozessierbarkeit im 3D-Druckprozess, denn das Filament soll während des Druckprozesses erneut mit der Polymerlösung benetzt und infiltriert werden. Im Druckkopf beim 3D-Drucken könnte von Vorteil sein, dass das Filament einer Zweitinfiltration unterzogen werden kann und dies zu einer optimalen Filament-Matrix-Haftung im Bauteil führen könnte.

Darüber hinaus wurde die Biegesteifigkeit der Filamente untersucht. Diese stellt eine relevante Filamenteigenschaften dar, denn anhand dieser Ergebnisse kann eine Aussage über die kontinuierliche Zuführbarkeit des Filaments im 3D-Druckprozess getätigt werden. Die Biegesteifigkeit wurde methodisch über einen Zweipunkt-Biegeversuch ermittelt. Eine Empfehlung kann für die Proben P-100 und G-100 ausgesprochen werden. Diese besitzen die höchsten Biegesteifigkeiten und sind in einem wirtschaftlich tragbaren Rahmen produziert worden. Aus den Ergebnissen der Filamentvalidierung hinsichtlich der Herstellparameter geht hervor, dass nicht nur der Faservolumengehalt ausschlaggebend für eine hohe Biegesteifigkeit ist, sondern auch die Fällungstemperatur Auswirkung darauf hat. Die Temperatur beschleunigt den Regenerationsprozess, wodurch die Konsolidierung des Verbunds optimal hervorgeht. Ab 100 °C ist ein Formerhalt des Filamentquerschnitts möglich, womit hohe Biegesteifigkeiten begünstigt werden. Die Wahl des Konsolidierungsdurchmessers hat in Kombination mit der Fällungstemperatur Auswirkungen auf die Biegesteifigkeit. Erst ab Fällungstemperaturen von 100 °C sowie 150 °C ist eine hinreichende Korrelation zwischen einer höheren linearen Dichte in Bezug auf

eine höher erreichbare Biegesteifigkeit ersichtlich. Eine hohe Reproduzierbarkeit der Filamenteigenschaften ist daher erst ab 100 °C gegeben. Anzumerken ist, dass grundsätzlich ein möglichst geringer Durchmesser generiert werden soll, damit feine Strukturen beim 3D-Drucken realisiert werden können. Auf Grundlage dessen fällt die Wahl der Filamentherstellparameter auf einen Konsolidierungsdüsendurchmesser von 0,58 mm und eine Fällungstemperatur von 100 °C, womit das Filament optimal in den 3D-Druckprozess integriert werden kann. Andererseits sind zur Herstellung von Filamenten mit Durchmessern unter 0,2 mm feinere Reifenkord-Rovings erforderlich. Es wäre möglich, solche Rovings in Zusammenarbeit mit dem Filamenthersteller bereitzustellen.

Des Weiteren wurde ein Druckkopf zum Drucken des lösungsmittelbasierten Bindemittels und des zuvor konsolidierten Filaments entwickelt. Der Druckkopf wurde in eine Portalmaschine integriert. Die Druckbarkeit der Polymerlösungen zusammen mit dem Filament wurde getestet und es konnte festgestellt werden, dass der Druckkopf der Firma Viscotec bei der Verwendung einer Exzentrerschneckenpumpe gegenüber der bisher verwendeten Schraubenspindelpumpe verbesserte Ergebnisse liefert. Dennoch konnte das entwickelte Filament aufgrund der größeren Durchmesserschwankungen entlang der Filamentlänge nicht im Druckkopf verwendet werden. Dadurch wurde auch die Integration der Schneideeinheit in den Druckkopf erschwert. Die Schneidefähigkeit des Filaments wurde jedoch auf dem Composer (von der Firma Anisoprint) getestet.

Die 3D-Druckversuche mit dem lösungsmittelbasierten System konnten im Rahmen dieses Projekts erfolgreich demonstriert werden. Es konnten Bauteile zur mechanischen Charakterisierung gedruckt werden. Weiterhin wurden die Druckparameter Schichthöhe, Druckgeschwindigkeit und scharfe Kurven mit verschiedenen Polymerlösungen getestet. Die Drucke mit 40 %iger CAB-Lösung in Aceton/Isopropanol-Gemisch zeigten eine bessere Druckbarkeit und lieferten zudem Bauteile mit besseren mechanischen Eigenschaften. Dennoch wird die Faser-Matrix-Haftung als kritisch angesehen, und es müssen weitere Methoden entwickelt werden, um dieses Problem gezielt anzugehen.

3.7.1 Ausblick

Resultierend aus den Ergebnissen und Erkenntnissen dieses Projekts ergeben sich weitere, mögliche Optimierungsprozesse hinsichtlich des Bindermaterials, zum Beispiel im Hinblick auf das Benetzungsverhalten. Hierzu können Versuche mit einem niederviskoserem Binder beziehungsweise einem Binder mit geringerem Matrixgehalt unter 40 Gew.-% durchgeführt werden. Jedoch sind die Vor- und Nachteile hinsichtlich der daraus resultierenden Eigenschaften abzuwägen.

Des Weiteren könnte in Bezug auf die weitere Umsetzung seitens der DITF auch ein anderes Polymerlösungsgemisch für die 3D-Druckmasse aus beispielsweise CA, und weitere Lösungsmittelgemisch herangezogen werden. Untersuchungen, wie in den Grundlagen bereits aufgeführt, zeigen, dass hierbei besonders dichte Strukturen erzeugbar sind, jedoch auch eine langsamere Fällung stattfindet. Die Geschwindigkeit der Regeneration könnte sich nachteilig auf den Prozess auswirken, aber die mechanischen Eigenschaften könnten davon ausschlaggebend profitieren.

Das Drucken nur mit Fasern ohne zusätzliche Bindemittel könnte ebenfalls eine effektive Methode sein, um den Faservolumengehalt und damit die mechanischen Eigenschaften des Bauteils zu erhöhen. Allerdings sind die verwendeten Standard-Slicing-Programme nur sehr begrenzt in der Lage, kontinuierliche Pfade für die Verlegung von Fasern ohne unerwünschte Kreuzungen zu erzeugen. Daher müssen Slicing-Programme für den Druck von faserverstärkten Bauteilen mit lösungsmittelbasiertem 3D-Druck entwickelt werden.

Aufgrund der unkontrollierten Verdampfung des Lösungsmittels aus der Lösung bei Raumtemperatur bilden sich Poren, die jedoch im Vergleich zur Verdampfung bei höheren Temperaturen sehr gering sind. Aus diesem Grund sind weitere Lösungsmittelentfernungsmethoden und -modelle zu entwickeln bzw. zu erforschen, um porenfreie Komponenten zu erzeugen. Ebenso muss die Faser-Matrix-Haftung verbessert werden, insbesondere bei lösungsmittelbasierten Systemen, bei denen die geringere Konzentration des Polymers in der Lösung zu einer höheren Schwindung der Masse führt.

4 VERWERTUNGSPLAN

4.1 Wirtschaftliche Verwertungsperspektive

Abgesehen von anwendungsrelevanten Limitierungen (z.B. mechanische Eigenschaften, Flammschutz, Langzeitbeständigkeit), hängen die Marktdurchdringung innovativer und nachhaltiger Verbundwerkstofflösungen sowie deren potentielle Marktanteile z.B. in der Automobilindustrie vor allem von den Gesamtkosten der angebotenen Lösungen ab. Ein erfolgreicher Projektverlauf wird die Aspekte Verarbeitbarkeit, Gesamtperformance und Nachhaltigkeit der Verbundwerkstoffmaterialien bei weiterhin wettbewerbsfähigen Kostenstrukturen (siehe Abb. 53) wesentlich verbessern und somit wird ein verbreiteter Einsatz in den Anwendungsfeldern der Automobil- und Leichtbauindustrie erwartet.

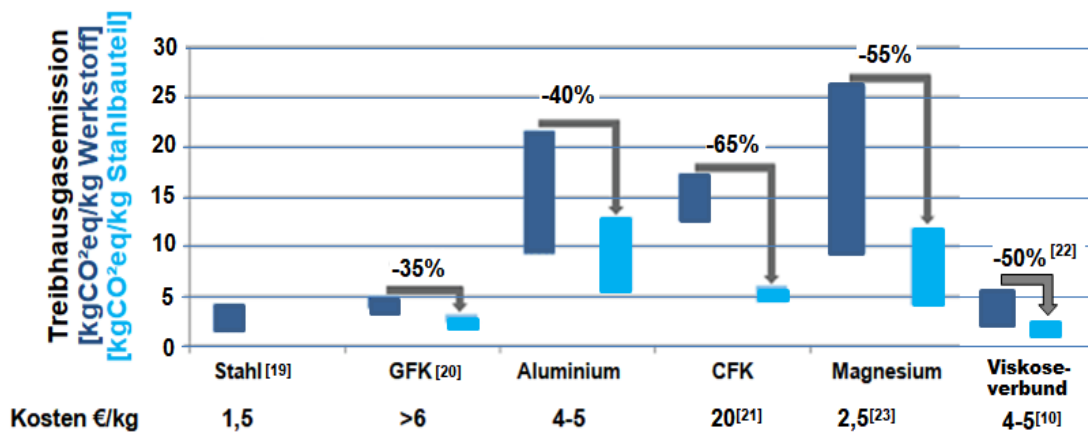


Abb. 53 Vergleich des (gewichtsbezogenen) Treibhausgasemission (GWP) eines Viskoseverbunds mit weiteren Werkstoffen. Kostenkalkulierung auf Basis von Angaben von DITF-Projektpartnern. Die Recyclingquote Stahl wird mit 40% angenommen.

Aufgrund der in Abb. 53 gezeigten positiven Kostenkalkulationen und ökologischen Vorteile von Cellulosematerialien möchte die Fa. Arburg im Rahmen ihres neuen Firmenprogramms „arburgGREENworld“ die Anwendung ihres 3D-Drucker-Freeformers und der Drucker LiQ Serie von deren Tochterunternehmen Fa. InnovatiQ GmbH auf den Druck von biobasierten Materialien, im besonderen Cellulosefasern und biobasierten Matrices ausweiten. Fa. Arburg erwartet durch die derzeitige gesellschaftliche Forderung für eine nachhaltigere Industrie eine verbesserte Wettbewerbssituation und die Erschließung neuer Marktpotenziale. Weiter kann dieses Verbundprojekt durch die Entwicklung maßgeschneiderter, gut verfügbarer nachwachsender CO₂-neutraler Verbundwerkstoffe zum Paradigmenwechsel in den Bereichen Verkehr und Leichtbau insgesamt beitragen und die deutsche Leichtbauindustrie „nachhaltig“ stärken.

Durch den erfolgreichen Nachweis der technologischen Machbarkeit in diesem Projekt und die sich daraus ergebenden ökonomischen und ökologischen Perspektiven werden Folgeprojekte mit dem Ziel der Produktentwicklung für weitere Anwendungen von biobasierten Verbundwerkstoffen angestoßen. Beispielsweise entwickeln die DITF mit den Projektpartnern AMC und CSI im Rahmen des TTP-Programms des BMWK eine 3D-gewickelte Mittelkonsole aus nachwachsenden Rohstoffen. BMW ist als assoziierter Partner an dem Projekt beteiligt und setzt sich stark für Nachhaltigkeit ein. Für die Mittelkonsole wären in bestimmten Bereichen auch 3D-gedruckte Inserts als Stützstrukturen von Vorteil.

Im Falle der Schaffung gemeinsamer Intellectual Property werden DITF und Arburg verschiedene Lizenzmodelle für die entwickelten Technologien prüfen. Dies ebnet neben den von den Projektpartnern repräsentierten Geschäftsfeldern den Weg zur Erschließung eines breiten Anwendungsfeld in Transportwesen, Industrie, Sport, Bauwesen und Lifestyle. Der Neuheitsgrad und die wesentlichen Elemente lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Einsatz von naturbasierten Fasern und naturbasierten Matrices für den 3D-Druck mit Erzeugung des Materials direkt im Druckkopf und Verringerung von sonst notwendigen Zwischenschritten,
- Nutzung der energiesparenden CellLös-3D Druck-Bauweise für nachhaltige, biobasierte hochfeste Werkstoffe mit sehr guter Rezyklierbarkeit,
- Schließen der digitalen Prozesskette und Vergleichmäßigung/Sicherung der mechanischen Eigenschaften für die Herstellung biobasierter FVK-Bauteile durch 3D-Druck durch Automatisierung durch wesentliche Reduzierung händischer Arbeiten.

Das erarbeitete Wissen und Innovations- wie Wertschöpfungspotenziale stehen durch den weltweit agierenden Partner Arburg branchen- und werkstoffübergreifend zur Verfügung. Die weltweite Spritzgusstechnik, aber vor allem auch die der Fa. Arburg, hat sich in den letzten Jahren bezüglich der Einarbeitung von Endlosfasern durch sogenannte Einleger weiterentwickelt, so dass bestimmte hochbelastete Bereiche des Bauteils mit Endlosfasern abgesichert werden. Solche Endlosfaser-Einleger können durch das Einlegen und Umspritzen von vorimprägnierten Geweben (Organobleche) 3D-gewickelte Strukturen, pultrudierten Profilen und eben auch durch endlosfaser-3D-Druck gefertigt werden. Diese neue Möglichkeit im Faserverbund-Leichtbau wird diesen für eine breitere industrielle Anwendung weiter qualifizieren und helfen, Klima- und Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

4.2 Wissenschaftlich technologische Verwertungsperspektive

Für die Faserverbundtechnik an den DITF bedeutet die industrielle Nutzung des 3D-Drucks mit biobasierten Materialien den Eintritt in ein neues industrielles Umfeld. Andererseits sind mehrere 3D-Drucker an den DITF installiert, auch stehen dem DITF weitere 3D-Drucker in der ARENA 2036 zur Verfügung. Damit besitzen die Mitarbeiter der DITF bereits wesentliche Erfahrungen im Bereich 3D-Druck. Die erfolgreiche Entwicklung eines endlosfaserverstärkten, lösungsbasierten 3D-Drucks nach dem Vorbild der Natur in einem weitgehend digitalisierten und automatisierten Produktionsprozess in Kombination mit biobasierten, recycelbaren Materialien ist ein neuartiger hochinnovativer Ansatz zur Herstellung von FVK - bei vergleichbaren Kosten zu GFK und Aluminium. Die Reduzierung des Energieeinsatzes mittels des angestrebten Löseprozesses ohne Aufschmelzen von Material wird die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Forschung und Industrie im Bereich Faserverbundtechnik stärken und deren Vorteile gegenüber Metallen verdeutlichen.

Die Arbeiten im Projekt erweitern das Wissen für wissenschaftliche Mitarbeiter und technisches Personal in der Zukunfts-Technik „3D-Druck“. Die DITF werden den Industriepartnern auch nach Beendigung des Projektes weiterhin als kompetente Ansprechpartner zur Seite stehen. Damit können neue Projektpartner akquiriert und weitere Forschungstätigkeiten generiert werden.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt werden in die Berufs- und Hochschulausbildung einfließen, außerdem können Bachelor- und Masterarbeiten mit dem Projekt verbunden werden. Bei späteren Folgeprojekten können evtl. auch Promotionsarbeiten vergeben werden.

Die im Rahmen dieses Projekts entwickelte lösungsmittelbasierte 3D-Drucktechnologie könnte neben der Verarbeitung von Cellulose auch die Möglichkeit eröffnen, auch weitere nicht schmelzbare polymere Materialien wie PTFE, Aramide, lyotrophe LCPs in 3D-Druckern zu verarbeiten. Geplant ist für die möglichen Folgeprojekte, in denen die Erweiterung der entwickelten Technologie untersucht wird, ob neben der Cellulosematrix auch Cellulosefasern direkt im Druckkopf versponnen werden können.

Durch die Entwicklung des neuen 3D-Druckverfahrens zur energiesparenden Herstellung maßgeschneiderter, gut verfügbarer, kostengünstiger, nachwachsender CO₂-neutraler Endlosfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit geringstem Verschnitt nach dem Vorbild „Spinnfaden“ wird das Verbundprojekt wesentlich zur Nachhaltigkeit im Leichtbau beitragen. Profitieren können alle Leichtbauindustrien, beispielsweise Elektroindustrie, Luft- und Raumfahrt, Sportartikel und Bauwesen. Im Besonderen können auch deutsche Cellulose- / Viskose-Hersteller (Kelheim Fibres, Cordenka, Enka, Glanzstoff) und die österreichische Firma Lenzing

ihre Position am Markt verstärken, neue Absatzmärkte erschließen und internationale Wettbewerbsvorteile erlangen.

Das Projekt CellLös-3D Druck fügte sich gut in laufende DITF-Projekte zum Einsatz von Biopolymeren in Verbundwerkstoffen ein. Bereits in laufenden Projekten (z.B. AiF-Projekt Pure-Cell, FNR-Projekt PULaCell, ZIM-Projekt LightPro) besteht großes Interesse an alternativen biobasierten Matrices für Verbundwerkstoffe. Weiterhin führt das Projekt CellLös-3D Druck auch Forschungsarbeiten zur Raumwickeltechnik weiter, welche bereits im Jahr 2009 mit dem Projekt PlanktonTech begannen.

Bezüglich der Anschlussfähigkeit ergeben sich die folgenden wesentlichen verwertbaren Ergebnisse des Projektes: (a) Durch die Digitalisierung bzw. Parametrisierung führt bereits ein geringer Aufwand an Prozessentwicklung zu neuen Hochleistungsbauteilen auf Basis nachwachsender Rohstoffe, die (b) über Prozessoptimierungen des entwickelten CellLös-3D Druck Verfahrens zu Formbauteilen bzw. Demonstrationsmustern weiterverarbeitet und für die (c) ein geeignetes Verwertungskonzept der End-of-Life Verbundwerkstoffe entwickelt werden können. Diese Ergebnisse können von den involvierten Projektpartnern nach Abschluss des Projektes patentiert und wirtschaftlich verwertet werden.

Da Massenware in Niedriglohnländern deutlich preiswerter produziert werden kann, ist eine entsprechende Forschung im Bereich innovativer Produkte und Verfahren vor allem auch auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstoffe für die Sicherung von industriellen Arbeitsplätzen in Deutschland wichtig. Aufgrund des vorhandenen Know-hows werden in Deutschland vornehmlich qualitativ hochwertige Produkte produziert. Als noch relativ neuem Verfahren wird dem industriellen 3D-Druck sehr hohe Marktchancen eingeräumt. Die Projektpartner erwarten durch die Verbindung des Endlofaser-3D-Drucks und biobasierten Materialien besondere Marktchancen im Leichtbau. Das Forschungsvorhaben trägt maßgeblich zur Entwicklung und Markteinführung einer Prozessinnovation bei, wodurch nachhaltig der Zugang der Verbundwerkstoff-Industrie in die europäischen und weltweiten Märkte und weitere Arbeitsplätze unterstützt wird.

5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Das Forschungsprojekt wurde von den DITF in enger Zusammenarbeit mit dem assoziierten Industriepaten Fa. Arburg durchgeführt. Mit Fa. Arburg fanden regelmäßige Projektbesprechungen statt. Zwei der Wissenschaftler der DITF absolvierten zwei getrennte Praktika bei der Firma Arburg. Während des ersten Praktikums (Oktober 2021) wurden die theoretischen Grundlagen und Funktionsprinzipien des Freeformers erlernt sowie eine intensive „Hands-on training“ am Freeformer durchgeführt. Während des zweiten Praktikums (August 2022) wurde die Untersuchung zur Integration des Fasermoduls in den Schwerpunkt gelegt. Weitere Gespräche wurden mit der Fa. InnovatiQ über die mögliche Implementierung der entwickelten Druckkopftechnologie in deren Drucker der LiQ-Serie geführt.

6 BEKANNTGEWORDENER FORTSCHRITT AN ANDEREN STELLEN

Im Projektzeitraum wurden nach Kenntnis der Autoren keine weiteren Fortschritte an anderen Stellen bekannt, die sich mit einem ähnlichen Thema befassen.

7 AUßENDARSTELLUNG

In Absprache mit Arburg veröffentlichten die DITF Informationen über die erzielten Projektergebnisse in Zeitschriften (Kunststoffe, Textile Network). Weiterhin werden die Ergebnisse in den nationalen Konferenzen und Arbeitskreisen (z.B. Aachen-Dresden-Denkendorf; Innovationstag der DITF) und Messen (z.B. JEC Messe) vorgestellt. Dies dient dazu, weitere Projektpartner für ein umfangreicheres Projekt zu gewinnen. Darüber hinaus wurden bereits Veröffentlichungen in Marketingkanälen der DITF (Newsletter, Pressemitteilungen, etc.) umgesetzt. Weiter wurden die Projektergebnisse durch einen Podcast auf dem Druckwelle-Kanal von VDI Nachrichten öffentlich vorgestellt. Das erworbene Wissen wird in Lehrveranstaltungen integriert. Tabelle 9 gibt eine Zusammenfassung der Ergebnistransfer in Wirtschaft und Forschung.

Tabelle 9 Ergebnistransfer in Wirtschaft und Forschung

Maßnahme	Ort/Rahmen	Erledigt / Geplant
Gezielte Ansprache von potenziell interessierten Unternehmen	auf Fachtagungen oder Messen	Wird vorgestellt in JEC World 2023 (25.04.2023 – 27. 04.2023)
Vorträge / Präsentationen / Posterpräsentationen auf nationalen Kongressen	DITF-Innovationstag der DITF, Industrieverband Garne und Flächen (IVGT), Südwesttextil, Composite United (CU)	Vorgestellt auf dem DITF Innovationstag 2023 (16. 02. 2023)
Tagungen, Workshops, Kongresse	½ -tägige Veranstaltungen für Unternehmen und Forschung	Geplant für Q4 2023 bei 3D-Druck Workshop bei AFBW
Industrieberatung, Informationsaustausch	Individuelle Beratungsgespräche	Erste Besprechung mit Fa. Colasit GmbH wurde am 17.03.2023 durchgeführt Vorgestellt im ARENA2036 am 05.04.2023
Freischaltung der Wissensbasis für den biobasierten Endlosfaser-3D-Druck	Projekt-Schlussbericht Internet-Auftritt der DITF, DITF-Newsletter,	Erledigt <ul style="list-style-type: none"> • Projekt-Schlussbericht • DITF-Newsletter
Wissenschaftliche Publikationen online-Formate und Fachzeitschriften	Kunststoffe, Textile Network	Veröffentlicht in: Kunststoffe (10.01.2023) Textile Network (Ausgabe 01 2023) ADD Konferenz 2023 - Geplant
Lehre	Univ. Stuttgart: Polymerchemie, Textilmaschinen; Hochschule Reutlingen: Textiltechnik	Geplant ab Sommer Semester 2023
Kooperationsprojekte	bilateraler Industriauftrag	Weiterentwicklungsprojekt Geplant ab Q1 2024 mit der Fa. Arburg

8 QUELLEN

- [1] E. Yasa und K. Ersoy, „A review nn the Additive Manufacturing of fiber reinforced polymer“, in *29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2018, S. 1024–1033.
- [2] A. Le Duigou, D. Correa, M. Ueda, R. Matsuzaki, und M. Castro, „A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites“, *Mater. Des.*, Bd. 194, S. 108911, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108911.
- [3] T. T. Wohlers u. a., *Wohlers Report 2022: 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry*. Wohlers Associates, 2022.
- [4] S. Ritter, „AM Field Guide Compact“, Frankfurt am Main, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://formnext.mesago.com/content/dam/messefrankfurt-mesago/formnext/2022/documents/pdf/Formnext2022_AM-Field-Guide_2022_Deutsch_Englisch_WEB.pdf.
- [5] E. C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada, und T. Laoui, „Rapid manufacturing of metal components by laser forming“, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Bd. 46, Nr. 12, S. 1459–1468, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.005>.
- [6] J.-P. Kruth, M. C. Leu, und T. Nakagawa, „Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping“, *CIRP Ann.*, Bd. 47, Nr. 2, S. 525–540, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5).
- [7] I. Ribeiro u. a., „Framework for life cycle sustainability assessment of additive manufacturing“, *Sustain.*, Bd. 12, Nr. 3, 2020, doi: 10.3390/su12030929.
- [8] „Polymer Additive Manufacturing Technology Landscape“, *Insights, AMPOWER*, 2023. <https://ampower.eu/infographics/polymer-additive-manufacturing/>.
- [9] S. W. Pattinson und A. J. Hart, „Additive Manufacturing of Cellulosic Materials with Robust Mechanics and Antimicrobial Functionality“, *Adv. Mater. Technol.*, Bd. 2, Nr. 4, 2017, doi: 10.1002/admt.201600084.
- [10] Q. Wang, J. Sun, Q. Yao, C. Ji, J. Liu, und Q. Zhu, „3D printing with cellulose materials“, *Cellulose*, Bd. 25, Nr. 8, S. 4275–4301, 2018, doi: 10.1007/s10570-018-1888-y.
- [11] N. D. Sanandiya, Y. Vijay, M. Dimopoulou, S. Dritsas, und J. G. Fernandez, „Large-

- scale additive manufacturing with bioinspired cellulosic materials“, *Sci. Rep.*, Bd. 8, Nr. 1, S. 1–8, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-26985-2.
- [12] „Nachhaltiger 3D-Druck dank Kunststoff aus Cellulose“. <https://www.chemie.de/news/1163583/nachhaltiger-3d-druck-dank-kunststoff-aus-cellulose.html>.
- [13] „Aus Holz wird Biopolymer für 3D-gedruckte Leichtbauteile“. <https://www.k-zeitung.de/aus-holz-wird-biopolymer-fuer-3d-gedruckte-leichtbauteile>.
- [14] A. Matschinski, „Integration of Continuous Fibers in Additive Manufacturing Processes“, *Virtual Symposium on AFP and AM*. Technical University of Munich and Australian National University, Online, 2020.
- [15] Anisoprint-LLC, „COMPOSITE FIBER CO-EXTRUSION“, 2020. <https://anisoprint.com/?tech=show> (zugegriffen Sep. 06, 2020).
- [16] O. Stauß, „Composites aus dem 3D-Drucker“, 2016. <https://industrieanzeiger.industrie.de/allgemein/composites-aus-dem-3d-drucker/>.
- [17] H. Prüß und T. Vietor, „Design for Fiber-Reinforced Additive Manufacturing“, *J. Mech. Des. Trans. ASME*, Bd. 137, Nr. 11, 2015, doi: 10.1115/1.4030993.
- [18] „3D-Druck mit Endlosfasern für maximalen Leichtbau“, 2019. <https://www.k-zeitung.de/3d-druck-mit-endlosfasern-fuer-maximalen-leichtbau>.
- [19] „Vortrag beim AFBW Workshop ‚Endlosfaser 3D-Druck‘ an den DITF, 06.Nov. 2018“.
- [20] M. Manka und D. Von Zeppelin, „ARBURG Plastic Freeforming“, *Eng. Biomater.*, Bd. 20, Nr. 143, S. 90, 2017.
- [21] E. Duffner und F. Baumann, „Device and method for producing a three-dimensional object with a fibre feeding device“, WO2017108758A1, 2017.
- [22] F. Baumann, „Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff- Freiform Verfahren“, Karlsruher Instituts für Technologie, 2019.
- [23] W. Nachtigall, „Bionik-Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler (1998)“. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2002.
- [24] CORDENKA® 700, „Premium rayon reinforcement for high performance tires“, *Cordenka Broschuere Tire*. Cordenka GmbH & Co. KG, Obernburg, 2017.
- [25] F. Schultze-Gebhardt und K.-H. Herlinger, *Ullmann’s Fibers Volume 1*, Bd. 1.

Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

- [26] S. Schicker, „Entwicklung und Aufbau einer Technologie zur Herstellung von 3D-Druck-Filamenten aus Stapelfasern“, Universität Stuttgart, 2021.
- [27] S. K. Selvarayan, „Development of a novel method and apparatus for analysis of the dynamics of an isothermal thermoset pultrusion process“, University of Stuttgart, 2021.
- [28] „DIN 53121: Prüfung von Papier, Karton und Pappe – Bestimmung der Biegesteifigkeit nach der Balkenmethode“, 2014.

9 ANHANG

A.1 Ergebnisse der Viskositätsmessung der Polymerlösungen mit 40 % CAB (w/v)

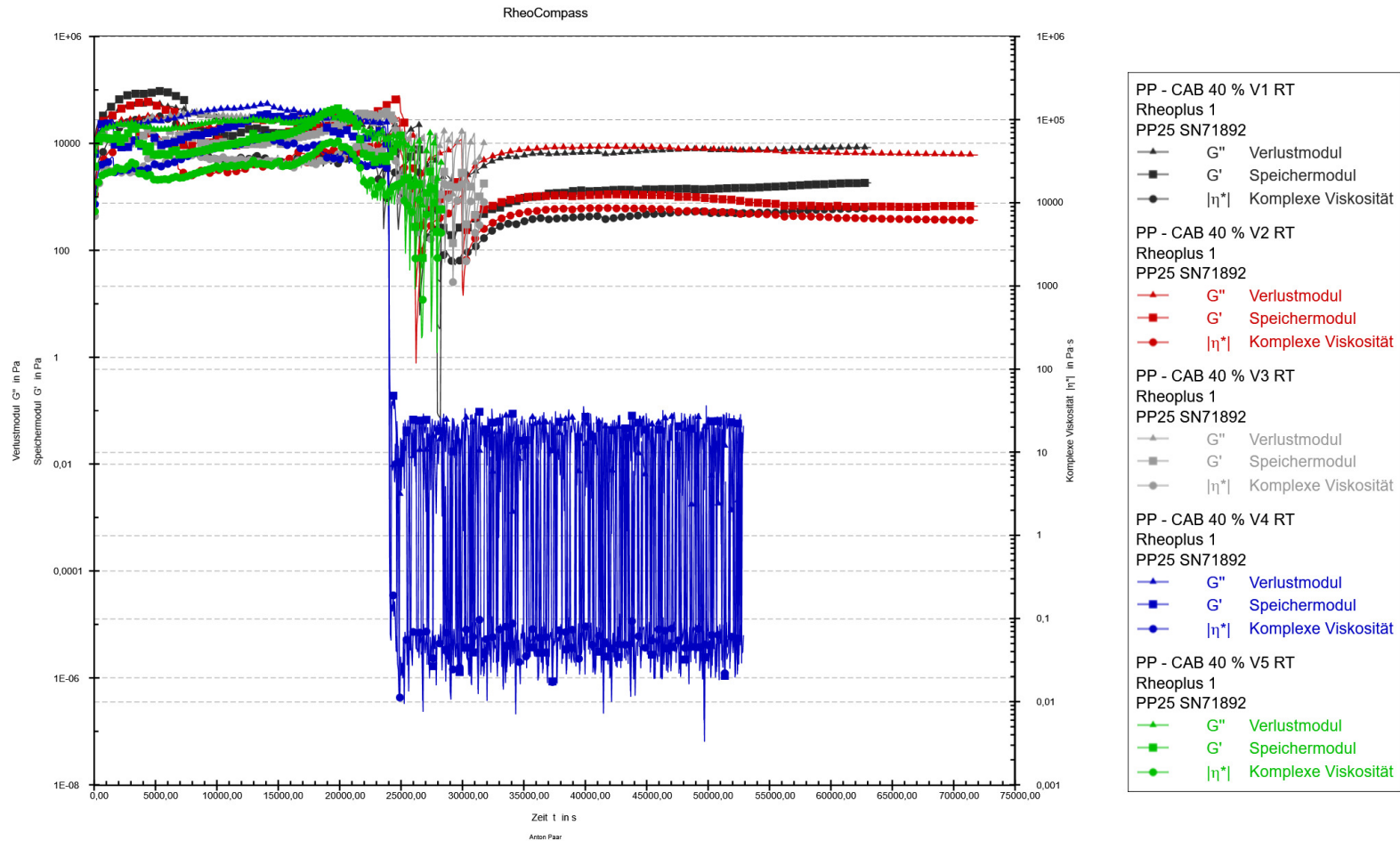


Abb. 54 Zeitabhängige Viskositätskurven des Oszillationsversuchs bei 20 °C.

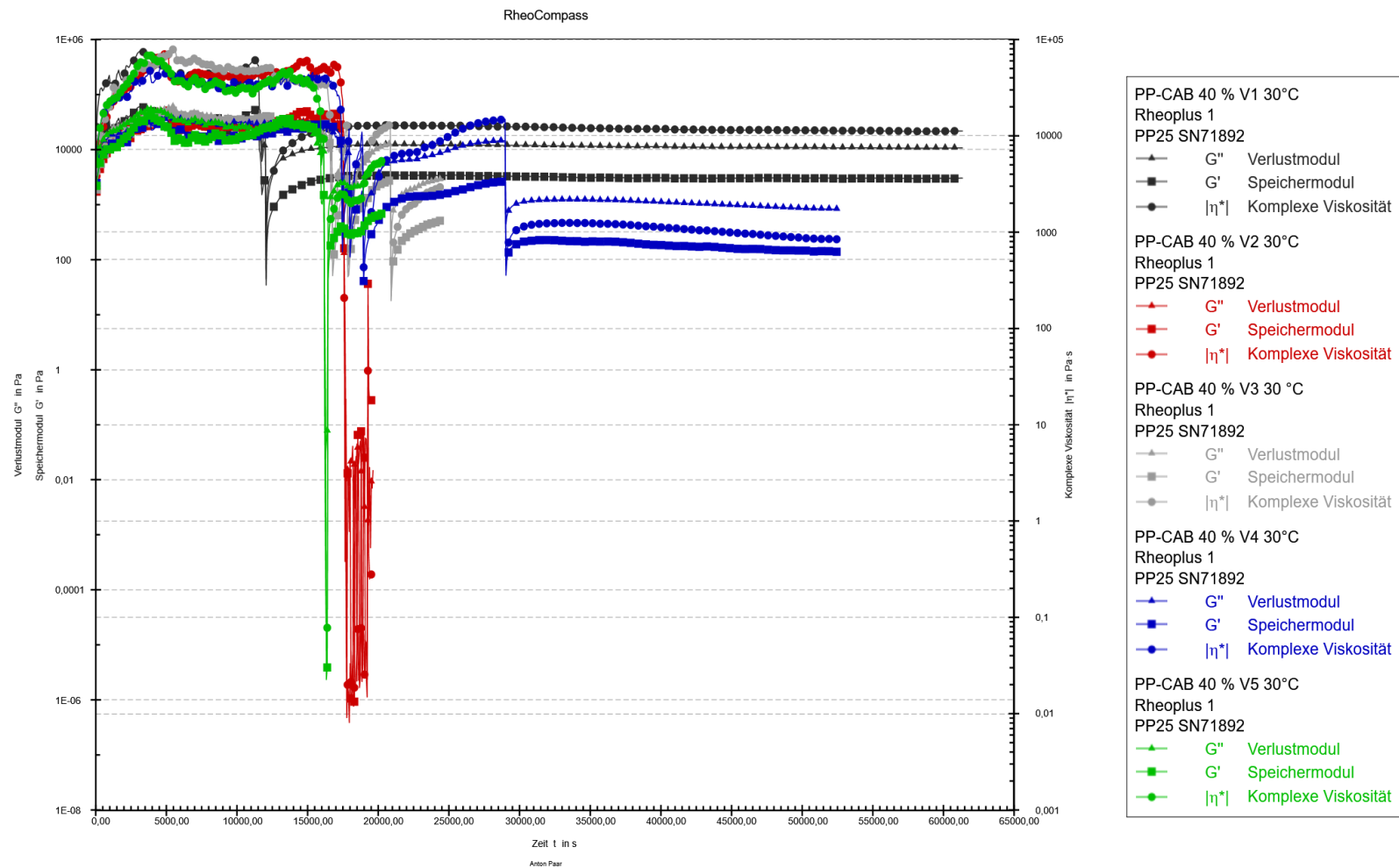


Abb. 55 Zeitabhängige Viskositätskurven des Oszillationsversuchs bei 30 °C.

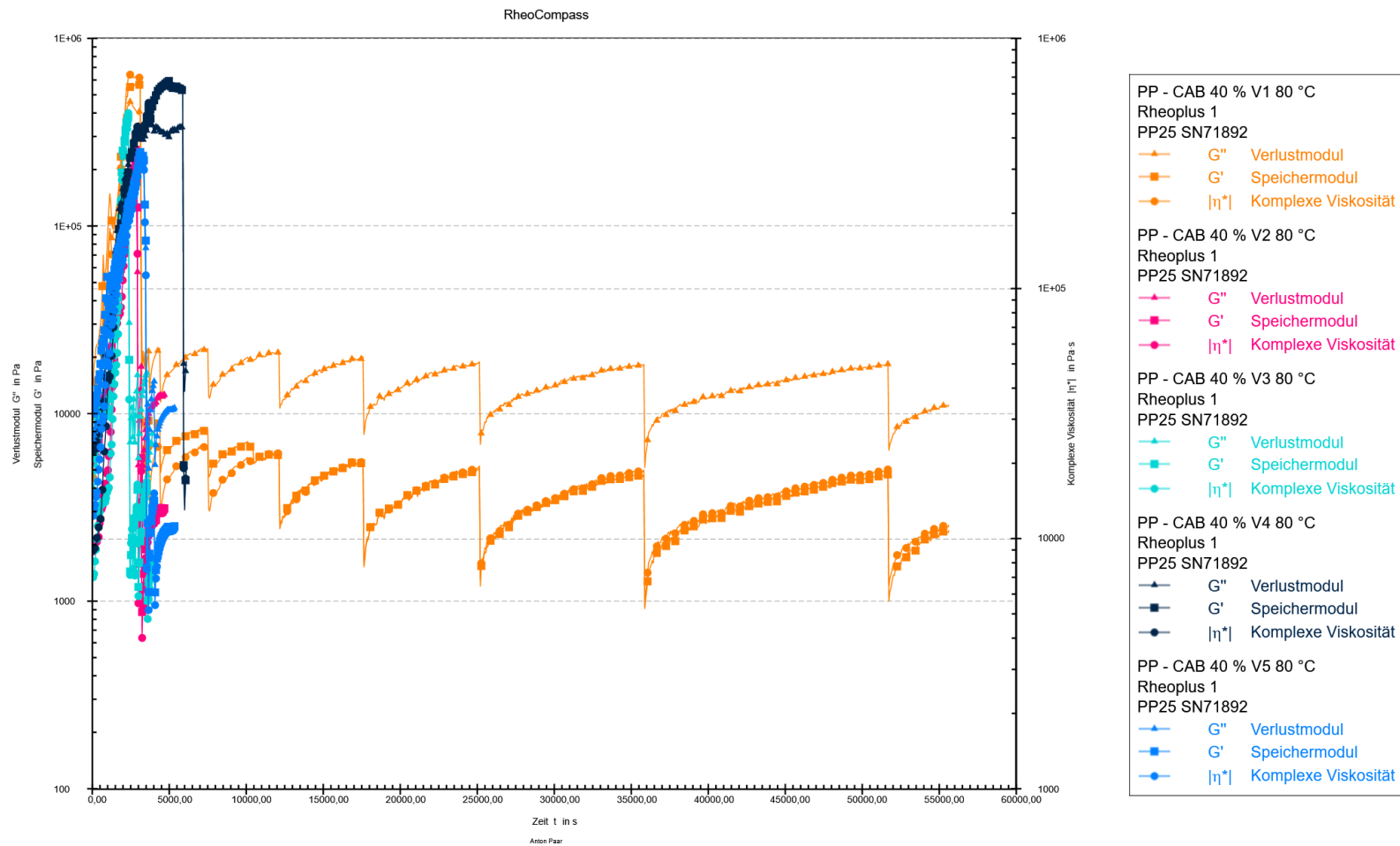


Abb. 56 Zeitabhängige Viskositätskurven des Oszillationsversuchs bei 80 °C.



Abb. 57 Vergleich der Matrix-Prüfkörper hinsichtlich unterschiedlicher Fällungstemperaturen.

A.2 Ergebnisse der Filament-Biegesteifigkeit

Biegesteifigkeit [mNmm]												
Probenbezeichnung	2-1	2-2	2-3	2-4	P-RT	G-RT	P-80	G-80	P-100	G-100	P-150	G-150
	1169,35	429,83	1370,42	1855,25	918,94	1295,08	503,35	1266,50	1159,50	1982,15	1706,86	1623,89
	461,12	447,33	590,42	1537,88	955,02	419,74	673,28	1013,78	1806,71	2132,04	1121,05	2226,01
	567,36	338,41	968,89	1801,62	688,24	818,58	504,67	1134,20	1140,46	1693,96	1508,81	1357,75
	560,63	939,30	689,58	1063,59	580,34	466,03	508,37	607,43	1821,30	1990,26	1298,85	2360,84
	1134,96	673,15	1759,09	2759,35	855,45	623,04	276,70	825,81	1095,66	1803,54	1149,39	1879,91
	949,22	383,52	1827,13	2705,28	1247,67	443,28	544,95	921,41	1102,20	1745,18	1661,23	2147,29
	1458,50	468,36	900,83	2496,97	691,38	1744,28	737,65	1565,80	1011,01	1917,99	1411,92	2062,37
	487,21	565,18	749,92	2575,41	1043,63	329,31	490,95	820,24	1501,63	1485,78	1604,76	1632,58
	1600,96	432,71	797,51	1472,68	649,66	718,88	602,97	622,48	1541,01	1584,38	1218,13	1735,05
	498,16	506,26	886,32	1204,29	492,65	680,11	972,35	753,05	1091,72	1957,08	1384,01	2418,06
					683,81	1729,71	365,99	573,59	1176,99	1349,35	1075,98	1114,72
					712,69	951,54	1577,64	913,26	1578,63	2042,42	1274,35	1383,91
					497,12	549,89	435,92	487,24	1705,37	2270,60	1149,26	2197,56
					492,15	397,19	733,62	551,90	1007,44	1418,72	1439,33	2352,82
					1061,81	539,26	701,03	1247,02	1499,02	1804,09	1549,00	1541,82
					959,82	358,67	974,37	543,96	1280,44	1604,61	1164,89	1311,98
					563,22	721,02	604,19	814,62	1307,40	2592,37	1646,49	1257,88
					1930,10	837,84	440,09	643,66	1347,44	2204,98	1054,53	1931,99
					662,61	1632,07	651,63	1265,74	1442,05	2181,95	1210,87	1321,17
					737,08	432,43	1834,51	520,58	1450,28	2155,33	1226,38	2293,66
\bar{x}	888,75	518,41	1054,01	1947,23	821,17	784,40	706,71	854,61	1353,31	1882,18	1342,80	1807,56
s	410,18	166,36	419,50	607,14	327,06	447,18	376,79	299,74	250,11	310,23	205,40	419,95
v	0,462	0,321	0,398	0,312	0,398	0,570	0,533	0,351	0,185	0,165	0,153	0,232

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AKF	Arburg Kunststoff Freiformen
CA	Celluloseacetat
CAB	Celluloseacetat-butyrat
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsche Institut für Normung
DITF	Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FWW	Faserverbundwerkstoffe
GFK	Glasfaserverstärktekunststoff
HPMC	Hydroxypropylmethylcellulose
PA	Polyamide
PET	Polyethylenterephthalat
PLA	Polylactide
RT	Raum Temperatur
SLA	Stereolithografie
SLS	Selektives Lasersintern
STL	Standard Tessellation Language