



Masterarbeit

Auswirkung der Materialeigenschaften von ungefüllten und holzgefüllten Biopolymeren für die Anwendung von Fused Filament Fabrication

verfasst von

Peter Mooslechner

Matr.-Nr.: 0935238

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Clemens Holzer
Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Dr.mont. Ivica Duretek, Dipl.-Ing. Stephan Schuschnigg



Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Clemens Holzer

Leoben, Mai 2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Die vorliegende Masterarbeit wurde im Rahmen des FFG Projekts „Stärkung der österreichischen Wertschöpfungsketten für generativ Fertigung in der industriellen Produktion“ kurz „Addmanu“ (Projektnummer 849297) geschrieben.

Ich möchte mich für das Ermöglichen dieser Arbeit bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Clemens Holzer bedanken.

Für die Betreuung während meiner praktischen Arbeit und die großartige Unterstützung gilt mein Dank ganz besonders Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Ivica Duretek und Dipl.-Ing. Stephan Schuschnigg, die mir mit fachlichen und persönlichen Ratschlägen stets zur Seite standen.

Weiters bedanke ich mich bei allen Lehrstuhlmitarbeiter und Mitarbeiterinnen für die nette Zusammenarbeit und das freundliche Arbeitsklima.

An dieser Stelle bedanke ich mich auch bei meinen Eltern, die mir eine solch außerordentlich gute Ausbildung schon von der Volksschule an ermöglichten und die mich zu jeder Zeit unterstützt haben.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch meinen Freunden und Kommilitonen, mit denen ich während der Zeit in Leoben außerordentlich schöne und lustige Momente erleben durfte, sowie die schwierigen Zeiten im Studium gemeinsam durchstehen konnte.

Während meines Studiums hatte ich die Möglichkeit beim Verband Leobener Kunststofftechniker und IAESTE Leoben tolle Projekte mitzugestalten und dadurch wertvolle Erfahrung zu sammeln, sowie viele Länder zu bereisen. Darum bedanke ich mit an dieser Stelle auch bei meinen Kollegen und Kolleginnen, ohne die eine solche Arbeit nicht möglich wäre.

Kurzfassung

Wood Plastic Composites (WPC) oder Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe, bilden eine relativ junge Werkstoffgruppe, die in den letzten Jahren aufgrund des steigenden Umweltbewusstseins ein starkes Wachstum erfuhr. Vorrangig wird das umweltfreundliche Material als Ersatz für teure Tropenhölzern im Außenbereich für Terrassenböden und Abdeckungen verwendet. Da es zu einem großen Anteil aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz besteht, werden Optik und Haptik des Holzes nachgeahmt. Neue Verarbeitungstechnologien sollen neue Anwendungsgebiete für diesen Werkstoff erschließen. Daher wird in dieser Masterarbeit die Eignung von holzgefüllten Kunststoffen für generative Fertigungsverfahren (FFF / 3D-Druck) untersucht. Ziel dieser Arbeit war den Unterschied zwischen holzgefüllten und ungefüllten Materialien in Bezug auf ihre Stoffdaten und folglich auf die Verarbeitbarkeit am 3D-Drucker zu ermitteln. Zum Vergleich wurden gefüllte und ungefüllte Biopolymere von Tecnar, kommerziell erhältliche WPC Filamente von Colorfab und hochgefüllte WPC-Spritzgusstypen von der Firma Jelu getestet.

Dazu wurde eine thermische und rheologische Untersuchung durchgeführt, um ein erstes Verständnis des Materialverhaltens zu erhalten. Mittels einer Strömungssimulation in Ansys Polyflow® wurden Parameter wie Druckabfall, Scher- und Fließgeschwindigkeit in der 3D-Druckdüse simuliert. Abschließend wurden die einzelnen Materialien am 3D-Drucker getestet, um die Einflüsse der Materialeigenschaften auf die Verarbeitung, bzw. Festigkeit der gedruckten Bauteile zu charakterisieren. Aus den gewonnen Erkenntnissen sollten die Anforderungen an ein holzgefülltes Filament definiert werden.

Die deutlich höhere Viskosität der hochgefüllten Systeme, im Vergleich zu ungefüllten Biopolymeren, führt in der Polyflow-Simulation zu einem höheren Druckabfall in der Düse des 3D-Druckers. Bereits bei der Extrusion der Filamente entstehen Schwierigkeiten, da hochgefüllte Polymere sehr spröde sind und bei einem Durchmesser von 1,75 mm sehr leicht brechen. Zudem ist die Oberfläche der Filamente sehr rau und die Filamente reißen beim Abziehen.

Der praktische Test am 3D-Drucker zeigte für die Biopolymere sowie für die kommerziellen WPC-Filamente (30 Gew.-%) gute Ergebnisse, wohingegen die hochgefüllten Spritzgusstypen nicht mit dieser Technologie verarbeitet werden konnten. Wie aus der Simulation hervorgeht ist der Druckbedarf für diese Materialien zu hoch. Die Einzugsrollen bringen den nötigen Druck nicht auf und das Filament bleibt stecken. Zudem verstopfen die groben Holzpartikel die Düse. Herkömmliche Polyolefine (PP, PE) sind als Matrixmaterial aufgrund ihrer Kristallinität für den 3D-Druck schlecht geeignet, da sie beim Abkühlen stark schrumpfen und sich vom Druckbett lösen.

Diese Arbeit zeigt die Einsatzgrenzen der verarbeitbaren WPC-Materialien. In weiterführenden Arbeiten sind zusätzliche Untersuchungen zur Füllstoffgröße und Füllstoffgehalt nötig.

Abstract

Wood Plastic Composites (WPC) form a relatively young material-group that experienced large growth in recent years due to increasing environmental awareness. The environmental friendly material is mainly used as a substitution for expensive tropical woods for outdoor decking and flooring. New processing technologies should open up new fields of application for this material. Thus, in this thesis the suitability of Wood Plastic Composites for generative production methods (FFF / 3D printing) is investigated. The aim of this work was to determine the difference between filled and unfilled materials with respect to their material data and consequently the processability on 3D printers. For comparison, filled and unfilled biopolymers (Tecnaro), commercially available WPC filaments (Colorfabb) and highly filled WPC for injection molding (Jelu) were tested.

For this purpose, thermal and rheological tests were performed to obtain an understanding of material behaviour. In a simulation with Ansys Polyflow® parameters such as pressure drop, shear- and flow rate in the 3D-printing-nozzle were simulated. Finally, the individual materials were tested on the 3D printer to characterize the influence of the material properties on the processing and strength of the printed components. From the gained knowledge, the requirements for a wood fibre filled filament should be determined.

The significantly higher viscosity of the high filled systems, compared to the unfilled biopolymers, leads to an increased pressure drop in the nozzle of the 3D printer. In practical tests the extrusion of the filaments appeared to be difficult, because highly filled polymers are very brittle and break very easily at a diameter of 1.75 mm. In addition, the surface of the filaments is very rough.

The test prints of the biopolymers as well as the commercial WPC filaments (30 wt-%) were successful, whereas the highly filled WPC for injection molding could not be processed with this technology. This high filler content results in a high viscosity and hence in a high pressure required in the nozzle. The filament gets stuck or the wood particles lead to clogging of the nozzle. In addition, conventional polyolefines such as PE and PP are not suitable as a matrix material for 3D printing.

This work shows the application limits of processable WPC materials. In further work, additional studies on the filler size and filler content are necessary.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	2
2.1	WOOD PLASTIC COMPOSITES	2
2.1.1	Zusammensetzung.....	3
2.1.1.1	Matrix	3
2.1.1.2	Holz	3
2.1.1.3	Additive.....	4
2.1.2	Aufbereitung und Verarbeitung.....	4
2.1.3	WPC im 3D-Druck.....	4
2.2	GENERATIVE FERTIGUNGSVERFAHREN	6
2.2.1	3D-Druck mit Pulver.....	6
2.2.2	Flüssigkeitsbasierter 3D-Druck.....	7
2.2.3	Schmelzschichtung	7
2.2.3.1	Geschichte und Entwicklung	8
2.2.3.2	Aufbau und Funktion	8
2.2.3.3	Materialen	9
2.3	DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY.....	10
2.4	RHEOLOGIE	12
2.4.1	Bestimmung der Viskosität am Platte-Platte Rheometer	14
2.4.2	Fließverhalten von hochgefüllten Systemen	17
2.5	STRÖMUNG IN EINEM KREISROHR	18
3	EXPERIMENTELLE VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	21
3.1	MATERIALEN	21
3.2	GERÄTE	21
3.3	DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY.....	22
3.4	ANALYTISCHE BERECHNUNG DES FLIEßVERHALTENS.....	22
3.5	RHEOLOGIE	25
3.5.1	Probenvorbereitung für rheologische Messungen	25
3.5.2	Durchführung der rheologischen Messungen	25
3.6	POLYFLOW SIMULATION	26
3.7	FILAMENTEXTRUSION UND 3D-DRUCK	28
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	29
4.1	THERMISCHE ANALYSE.....	29
4.2	RHEOLOGISCHE ANALYSE	30
4.2.1	Amplituden-Versuch.....	30
4.2.2	Frequenz-Versuch.....	31
4.2.3	Stationärer Versuch	37
4.3	POLYFLOW SIMULATION	40
4.4	3D-DRUCK	43
4.4.1	Filamentextrusion	43
4.4.2	Test-Druck unterschiedlicher Materialien.....	44
4.4.3	Schwierigkeiten beim Druck von hochgefüllten Materialien	46
4.4.4	Herstellen von Zugprüfkörper mit unterschiedlicher Druckgeometrie	46
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	51

Inhaltsverzeichnis

6	ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE	53
1	LITERATURVERZEICHNIS	54
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	58
8	TABELLENVERZEICHNIS.....	60
9	ANHANG	61

1 Einleitung und Zielsetzung

Aufgrund des steigenden Umweltbewusstseins gewinnen Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen und umweltfreundliche Verarbeitungstechnologien immer mehr an Bedeutung. Wood Plastic Composites (WPC), Kunststoff mit Holzfasern vermengt, ist eine stark wachsende Werkstoffgruppe mit vielseitigen Eigenschaften. Bislang wird dieser Werkstoff vorwiegend als Substitution teurer Hölzer im Außenbereich für Bodenbeläge und Abdeckungen verwendet. Dabei kann das Holz als Füllstoff in Form von Holzmehl zu Kostenreduktion oder Fasern als Verstärkungsmaterial dienen. Aus der Kombination unterschiedlichster Matrixmaterialien sowie Größe und Form der Füllstoffpartikel ergeben sich unterschiedliche Verarbeitungsparameter und Bauteilqualität. Während das Compoundieren, das Extrudieren sowie das Spritzgießen von WPC schon kommerziell betrieben werden, steckt das 3D-Drucken noch in den Kinderschuhen [7, 24, 26]. Die vorliegende Arbeit behandelt ein Teilgebiet des Forschungsprojektes „Stärkung der österreichischen Wertschöpfungsketten für generativ Fertigung in der industriellen Produktion“ kurz „Addmanu“ (Projektnummer 849297). Im Rahmen dieses Projekts sollen neue Technologien und Materialien für generative Fertigungsmethoden entwickelt werden. Viele Industriepartner sind daran interessiert das Potential dieser Technologie für eine effiziente Fertigung auszuschöpfen und neue Anwendungsbereiche zu erschließen.

In dieser Arbeit sollte die 3D-Druckbarkeit mittels FFF-Technologie (Fused Filament Fabrication) von WPC und Biopolymeren getestet werden, sowie der Einfluss deren Materialcharakteristik auf die Verarbeitbarkeit untersucht werden. Zunächst wird eine thermische und rheologische Analyse durchgeführt, um relevante Stoffdaten für die Simulation zu erhalten. Mittels der Simulation in Ansys Polyflow® werden der Druckbedarf sowie die Fließ- und Schergeschwindigkeit in der 3D-Druckdüse bestimmt. Mit Hilfe dieser Ergebnisse sollte eine Vorhersage getroffen werden, ob die einzelnen Materialien am 3D-Drucker verarbeitet werden können. Abschließend werden die einzelnen Materialien zu Filamenten extrudiert und am 3D-Drucker getestet. Es sollten unidirektionale Zugprüfkörper gedruckt werden und deren Festigkeit mit der von spritzgegossenen Prüfkörper verglichen werden.

Ziel dieser Arbeit war es, die Anforderungen an ein WPC-Filament für den 3D-Druck hinsichtlich Viskosität, Füllgrad und Partikelgröße zu definieren. Der umweltfreundliche Werkstoff sollte für die aufstrebende Technologie des 3D-Drucks zugänglich gemacht werden. Dies soll ein Drucken von holzähnlichen Figuren ermöglichen. In Zukunft könnten sogar Designer-Möbel mit komplexer Geometrie und ansprechendem Design in Holzoptik (siehe Abbildung 1) aus einem 3D-Drucker stammen.



Abbildung 1: Zukunftsvision: Designer-Möbel aus einem 3D-Drucker [39]

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Wood Plastic Composites

Wood Plastic Composites (WPC) bilden eine relativ junge Werkstoffgruppe, die im letzten Jahrzehnt einen gewaltigen Aufschwung, vor allem in der Anwendung für Terrassenböden und Abdeckungen im Außenbereich, erlebte. WPC, zu Deutsch Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe, sind die Kombination von Kunststoffen, Holzmehl, -Fasern oder -Späne und Additiven, die durch thermoplastische Formgebungsverfahren, wie z.B. Extrusion, Spritzguss oder Presstechniken verarbeitet werden. Sie stellen damit eine Untergruppe der Naturfaser-Verbundwerkstoffe (Natural Fibre Composites - NFC) dar [54]. Mit dieser Definition grenzt sich WPC von anderen Holzverbundwerkstoffen wie z.B. Spanplatten oder MFD-Platten ab, die aus einer duroplastischen Matrix, meist Melaminharze, bestehen. Die Hauptanwendungen von WPC liegen in extrudierten Profilen für Holz-, Bau- und Möbelindustrie, aber auch Anwendung für den Spritzguss gewinnen mehr und mehr an Bedeutung für Konsumgüter und Automobilindustrie (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Anwendungsbeispiele von extrudierten und spritzgegossenen WPC-Produkte [22]

Das Zusammenspiel von Kunststoff und Holzfasern vereint die Vorteile beider Werkstoffe. Einerseits sind Optik und Haptik dem Holz sehr ähnlich, andererseits schützt der Kunststoff vor Witterungseinflüsse, Pilzen, Splitterbildung und verringert den Wartungsaufwand. Ein wesentlicher Vorteil liegt in der Verarbeitung und in der Umweltfreundlichkeit. So kann WPC mit herkömmlichen Verarbeitungstechnologien der Kunststofftechnik, wie Extrusion und Spritzguss, in beliebige Form gebracht werden und gilt aufgrund des nachwachsender Rohstoffs Holz (25-85 Gew.-%) als ein umweltfreundlicher und preiswerter Rohstoff [24, 49]. Beim Extrudieren von Hohlprofilen kann im Vergleich zu Vollholz eine Material- und Gewichtersparnis erzielt werden.

Der natürliche Werkstoff Holz stellt die Kunststoffindustrie vor neue Herausforderungen. Schwankende Qualität, hohe Feuchtigkeit und Staub erschweren die Verarbeitung gegenüber

reinen Kunststoffen. Beim Compoundieren sind spezielle Entgasungszonen notwendig, um die Feuchtigkeit der hydrophilen Fasern zu entfernen. Die Bestandteile von Holz haben eine niedrige Temperaturbeständigkeit und verfärben bzw. zersetzen sich bei höheren Temperaturen. Damit ist das Prozessfenster für die Verarbeitung eingeschränkt. Auch Feuchtigkeitsaufnahme, Verzug und Schwindung nach der Verarbeitung zählen zu den Nachteilen dieses Materials.

2.1.1 Zusammensetzung

Ein Großteil der WPC-Produkte wird im Extrusionsverfahren hergestellt und besteht je nach Anwendung zu 25-70 Gew.-% aus Kunststoffmatrix, meist Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder Polyvinylchlorid (PVC), zu 25-85 Gew.-% aus Holzanteil und zu 5 Gew.-% aus Additiven.

2.1.1.1 Matrix

Als Matrix für holzfaserverstärkte Kunststoffe können verschiedene thermoplastische Kunststoffe eingesetzt werden. Für die Verarbeitung eignen sich Kunststoffe, deren Verarbeitungstemperatur unter 200 °C liegt, da es bei höheren Temperaturen zu Schädigungen der Bestandteile im Holz (Lignine, Hemicellulosen) kommt [54]. Zusätzlich zu den am häufigsten verwendeten Materialien, wie PP, PE, PVC, werden in Spezialfällen auch ABS und PS verwendet. Neben den genannten thermoplastischen Polymeren können laut weiteren Definitionen noch thermoplastisch verarbeitbare Duroplaste (Melamin-, Epoxidharz) zu den Matrixmaterialien in der WPC-Produktion zählen [44, 54].

2.1.1.2 Holz

In der Holzindustrie fallen aufgrund der Verarbeitungsmethoden ca. 16 % Abfall in Form von Hackschnitzel, Spänen oder Mehl an, die nach Aufbereitung für die WPC-Produktion genützt werden können. Es wird zwischen Weichholz (Nadelholz) wie Fichte, Kiefer, Tanne oder Hartholz (Laubholz) wie Eiche und Ahorn unterschieden, wobei der größte Teil der WPC-Produktion aus Weichhölzer besteht [49].

Eine wichtige Eigenschaft der Holzfasern ist der Schlankheitsgrad. Er gibt das Verhältnis zwischen Länge und Durchmesser einer Faser an. Typische Werte für den Schlankheitsgrad von Holzfasern mit einer Länge von 0,5 - 30 mm und einem Durchmesser von 0,02 - 0,04 mm ist 1:100. Die Fasern müssen durch thermo-mechanische aber auch chemische Prozesse aufbereitet werden und dienen als Verstärkungsmaterial. Holzmehl hingegen ist ein homogenes fein gemahlene Holz mit einer Korngröße von 300 - 400 µm mit einem Schlankheitsgrad 1:1 und kann nur als Füllstoff eingesetzt werden. In der Praxis werden die Größen und Größenverteilung der Fasern anhand vom Siebrückstand ermittelt [29, 49, 54].

2.1.1.3 Additive

Additive sind in der WPC-Herstellung ein wichtiger Bestandteil, die bis zu 5 Gew.-% des Gesamtanteils ausmachen können. Eines der bedeutendsten Additive ist Maleinsäureanhydrid (MA), das als Haftvermittler zwischen den hydrophoben Kunststoff und dem hydrophilen Holz dient, um bessere mechanische Eigenschaften zu erzielen. Weitere Additive sind je nach Anwendungsgebiet Gleitmittel, UV-Stabilisator, Geruchsabsorber, Biozide oder Flammschutzmittel [44].

2.1.2 Aufbereitung und Verarbeitung

Grundsätzlich wird zwischen zwei Arten der Aufbereitung von WPC unterschieden. Zum einen gibt es das zweistufige Verfahren, bei dem in einem Compounder die Holzfasern und Additive in die Polymerschmelze eingemischt werden. Dieser Holz-Kunststoff-Strang wird abgekühlt, zu Granulat geschreddert und in einem zweiten Prozessschritt (Extrudieren, Spritzguss) noch einmal aufgeschmolzen und zum Endprodukt verarbeitet. Beim direkten Verfahren hingegen werden Aufbereitung und Verarbeitung in einem Prozess zusammengefasst, somit fällt das zwischenzeitlich Erstarren und Wiederaufschmelzen weg. Dies bietet Vorteile durch die geringe thermische Belastung und geringere Herstellungskosten. In Abbildung 3 werden die typischen Aufbereitungs- und Verarbeitungsverfahren schematisch dargestellt. Für die Aufbereitung werden meist gegenläufige Doppelschneckenextruder DSE (konisch oder parallel) eingesetzt, da sie bei kontinuierlicher Kompression und durch die kurze Verweilzeit die thermische Belastung des Materials reduzieren.

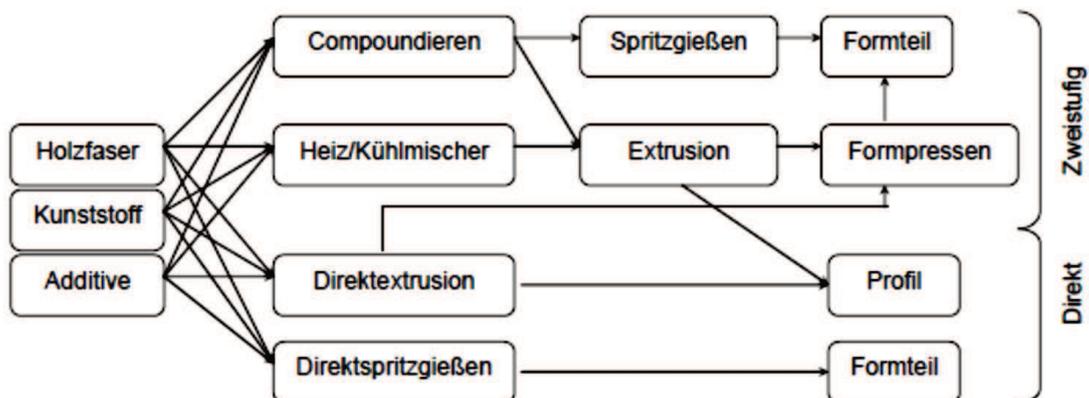


Abbildung 3: Übersicht typischer Aufbereitungs- und Produktionsverfahren von WPC [44]

2.1.3 WPC im 3D-Druck

Es gibt bereits verschiedene kommerzielle WPC-Filamente für 3D-Drucker am Markt. Colorfabb entwickelte Filamente auf PLA-Basis gefüllt mit Kiefer, Bambus oder Kork. Der Holzanteil in diesen Filamenten liegt bei 30 Gew.-%, bei Laywood sogar bei 40 Gew.-%, und die Partikelgröße liegt durchschnittlich bei 150 µm. Diese Materialien können an bestehenden Druckern verarbeitet werden.

Griffey [18] hat bereits die Verarbeitung von WPC (Laywood) am 3D-Drucker getestet. Er fand heraus, dass WPC abhängig von der Temperatur aufgrund der thermischen Belastung die Farbe ändert; je höher die Temperatur, desto dunkler die Farbe, aber auch desto rauer die Oberfläche. Damit lassen sich optische Strukturen herstellen, sofern der Drucker variable Temperaturen während eines Druckprozesses zulässt (siehe Abbildung 4). Außerdem führt eine höhere Temperatur zur Viskositätsabnahme in der Düse und einer besseren adhäsiven Anbindung der einzelnen Schichten und damit zu einer höheren Festigkeit. Eine zu hohe Temperatur kann allerdings eine thermische Schädigung und einen Polymerkettenabbau bewirken und Rückstände im Aufschmelzkanal hinterlassen. Jelwek, ein polnisches Startup, druckt 3D-Uhren mit Holzoptik (Abbildung 4). Das Drucken mit normalen Kunststoffen wird Hobbybastlern und Künstlern mittlerweile zu langweilig. Daher sind neue Materialien mit neuen optischen Effekten gefragt.



Abbildung 4: Holzprodukte aus dem 3D-Drucker [23, 35]

Erfahrungsberichten zur Folge ist das Laywood Filament mit 40 Gew.-% Holzanteil sehr spröde. Obwohl das Filament mit 3 mm verwendet wurde, brach das Filament beim Abrollen und beim „Füttern“ (Einfädeln in den Druckkopf) ab. Hier bietet ein einfacher Trick Abhilfe, indem die Filamentrolle mit einem Föhn vorgewärmt und dadurch das Material flexibler wird [35]. Ein weiteres Risiko bei der Verarbeitung von WPC am 3D-Drucker ist, dass die Holzpartikel die Düse verstopfen. Griffey empfiehlt daher beim Druck von WPC eine größere Düse (>0.4 mm) zu verwenden [18]. Die produzierten Bauteile können wie Holz mit Schleifpapier nachbehandelt und lackiert oder bemalt werden [15].

Zudem hat Pandey [43] Untersuchungen mit 50 Gew.-% gefüllten NFC am 3D-Drucker unternommen. Diese ergaben, dass es bereits beim Extrudieren zu Schwierigkeiten kam, da das Filament bei einem so kleinen Durchmesser (1,75 mm) leicht abreisst. Er empfiehlt einen größeren standardmäßigen Durchmesser für 3D-Druckfilamente (3 mm) zu verwenden. Die Standardgeräte am Markt sind jedoch auf 1,75 mm ausgelegt. Beim 3D-Drucken von NFC kam es zur Verstopfung der Düse und das Filament brach während des Einzugs in den Druckkopf. Zudem wurden als Matrixmaterial für das Naturfaser-Composites LDPE, HDPE sowie PP gewählt, die für die Verarbeitung am 3D-Druck schlecht geeignet sind. Somit konnte kein vollständiges Bauteil gedruckt werden.

2.2 Generative Fertigungsverfahren

Der Begriff „Generatives Fertigungsverfahren“ (GF), auch Additives Verfahren (AV), (engl.: additive manufacturing) beschreibt alle Verfahren, die durch Zusammenfügen einzelner Volumenelemente, vorzugsweise schichtweise, feste Bauteile produzieren. Im deutschen Sprachgebrauch hat sich umgangssprachlich der Begriff „3D-Druck“ durchgesetzt. Im Vergleich zum herkömmlichen Verarbeitungsmethoden der Kunststofftechnik ist der 3D-Druck eine kostengünstige Alternative für das rasche Fertigen komplexer Bauteile und Prototypen. Aus einem dreidimensionalen CAD-Modell wird ein reales Bauteil durch gezieltes Auftragen von Material Schicht für Schicht aufgebaut. Damit ist dieses Verfahren flexibel für Änderungen, beliebig oft wiederholbar und skalierbar. Für GF werden unterschiedliche Kunststoffgruppen eingesetzt. Diese Technologie verwendet nicht nur Kunststoffe, sondern auch Metalle, Keramiken, Schokolade, Beton, sogar menschliche Zellen können 3D-gedruckt werden [14, 21]. Abhängig von der Form des Grundmaterials (Filamente, Pulver oder flüssig) können verschiedene Technologien des Additiven Fertigungsverfahren angewendet werden. Damit können diverse Materialien mit unterschiedlicher Bauteilqualität hergestellt werden.

Unabhängig von der Drucktechnologie oder von dem verwendeten Material folgen alle Technologien demselben Grundprinzip vom 3D-Modell bis hin zum gedruckten Bauteil. Zuerst wird ein 3D-Modell mittels eines CAD-Programms im Dateiformat „.stl“ erstellt. Eine Slicing-Software schneidet das Bauteil virtuell in Schichten mit vordefinierter Schichtstärke und errechnet daraus den Programm-Code für den NC-gesteuerten (Numeric Control, Rechnergesteuerten) Druckkopf. Der 3D-Drucker setzt die Schichten laut diesem Programm-Code zusammen und produziert ein reales Bauteil. In Abbildung 5 wird das Grundprinzip von 3D-Modell bis zum realen Bauteil schematisch dargestellt.

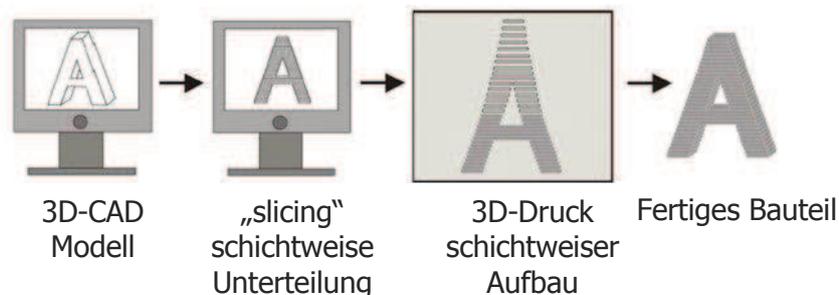


Abbildung 5: Schematischer Ablauf vom 3D-Modell bis zum gedruckten Bauteil [27]

2.2.1 3D-Druck mit Pulver

Bei diesem Verfahren wird eine hauchdünne Pulverschicht mittels einer Rakel auf die Grundplatte aufgetragen. Ein oder mehrere Druckköpfe benetzen das Pulver stellenweise mit einem Bindemittel, nämlich genau an den Stellen, wo später das Bauteil entstehen soll. Anschließend wird eine neue Pulverschicht darübergerlegt und der Vorgang wiederholt sich. Der Vorteil dabei ist, dass das lose Pulver als Stützstruktur dient und somit überhängende Strukturen hergestellt werden können. Das nichtverklebte Material kann leicht entfernt und später teilweise wieder verwendet werden. Zudem besteht die Möglichkeit das Bindemittel je

nach Wunsch stellenweise einzufärben, wodurch farbige Skulpturen entstehen. Nachteile hingegen liegen in der manuellen Nacharbeit und in der Staubentwicklung. Zudem bestimmt die Feinheit des Pulvers die Auflösung und ist dadurch beschränkt.

Werden die Körner anstelle von Bindemittel mittels Laser verschmolzen, können mit diesem Prinzip neben thermoplastischen Kunststoffen auch metallische Werkstoffe 3D-gedruckt werden, wie zum Beispiel beim „Selektives Laser Sintern“ oder beim „Elektronenstrahlschmelzen“ [5].

2.2.2 Flüssigkeitsbasierter 3D-Druck

Der Flüssigkeitsbasierte 3D-Druck (engl.: liquid-based 3D-printing) hat ein flüssiges Photopolymer als Grundlage, welches sich mit Licht (UV oder Laser) und Sauerstoff vernetzen lässt. Die Objekte werden Schicht für Schicht durch gezielte Bestrahlung vernetzt und aus der flüssigen Polymerlösung herausgezogen oder abgesenkt. Dieses Verfahren ist nicht nur wesentlich schneller als der herkömmliche 3D-Druck, es lassen sich feinste Mikrostrukturen realisieren. Die wichtigsten Verfahren sind die Stereolithografie und die „Continuous Liquid Interface Production“ (CLIP). Der deutschen Firma Nanoscribe GmbH in Karlsruhe gelingt es Strukturen im Sub-Mikrometer Bereich zu drucken, wie zum Beispiel ein detailgetreues Mikro-Modell des Brandenburger Tors (siehe Abbildung 6) mit einer Länge von 2,5 mm und einer Höhe von 1 mm [13, 21].

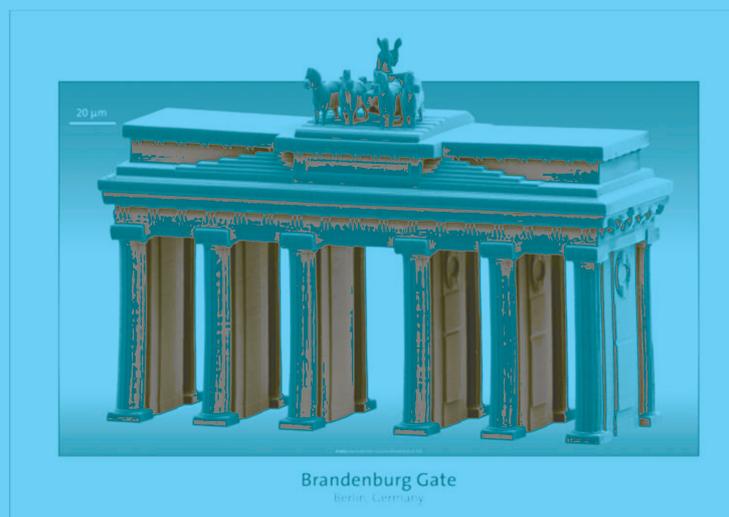


Abbildung 6: 3D-gedrucktes Mikro-Modell des Brandenburger Tors (L: 2,5 mm; H: 1 mm) [21]

2.2.3 Schmelzschtichtung

Die Schmelzschtichtung oder englisch „Fused Filament Fabrication“ (FFF), auch „Fused Deposition Modeling“ (FDM™), ist das bekannteste und kostengünstigste Verfahren zur Erzeugung von 3D-Modellen. Dies ist die Technologie, die für diese Arbeit verwendet wurde und wird daher näher erläutert.

2.2.3.1 Geschichte und Entwicklung

Das Prinzip des Schmelzschicht-3D-Druckers wurde von S. Scott Crump schon in späten 80er Jahren entwickelt und 1990 unter dem Firmennamen Stratasys vertrieben. Als Patent meldete Crump einen Apparat mit einer in x-, y- und z-Achse beweglichen Düse an, der durch gezieltes Ablegen und Verfestigen eines geschmolzenen Kunststoffstrangs ein vorausbestimmtes 3-dimensionales Objekt formt [6]. Der Name „Fused Deposition Modeling“ (FDM™) ist markenrechtlich von Stratasys geschützt. Durch das Patent dominierte Stratasys den Markt bis das Patent 2009 auslief und weitere Firmen sich dieser Technologie bedienen konnten. Weiterentwicklungen der Technologie und Materialien ermöglichten eine weite Bandbreite an verfügbaren Geräten vom kleinen Bürodrucker bis zu einem Mehrfachdruckkopf mit unterschiedlichen Farben und Materialien. Die kommerzielle Nutzung führte zu einer rapiden Preissenkung von 3D-Druckern und Filamenten, sodass diese Technologie auch für Hobby-Bastler zugänglich ist. Wobei „Low-cost“-Geräte durch geringeres Bauteilvolumen, Funktionen und verarbeitbaren Materialien eingeschränkt sind [20].

2.2.3.2 Aufbau und Funktion

3D-Drucker gibt es in verschiedenen Ausführungen und Größen. Die ausschlaggebenden Dimensionen sind die Grundfläche des Druckbetts und die druckbare Höhe, wodurch das Druckvolumen bestimmt wird. In Abbildung 7 wird der Aufbau eines 3D-Druckers skizziert und im Folgenden das Funktionsprinzip erklärt. Das Filament ist auf einer Rolle (5) aufgewickelt und wird über zwei Einzugsrollen zum Druckkopf (2) geführt. Beim 3D-Druck wird von einem Extrusionsverfahren gesprochen. Aber im Gegensatz zu Extrudern mit einer Granulat-Speisung und Zylinder mit einer rotierenden Schnecke, wird dabei lediglich ein Kunststofffilament in einem heißen Zylinder aufgeschmolzen und durch eine Düse gedrückt. Dabei dient das unaufgeschmolzene Filament als Kolben [52]. Ein hochtemperaturbeständiges Kunststoffteil aus PEEK isoliert, bei manchen Modellen, die heiße Düse vom Materialeinlauf, um das vorzeitige Erwärmen des Materials zu vermeiden. Die Düse kann aus Bronze, Stahl oder Aluminium sein und hat üblicherweise einen Durchmesser von 0,2 - 0,5 mm. Der NC-gesteuerter Druckkopf bewegt sich über eine Führung in der x-y-Ebene und legt das Material (3) schichtweise auf der Grundplatte ab. Bei einer gegebenen zweiten Düse kann ein weiteres Material, zum Beispiel ein lösliches Stützmaterial (4), extrudiert werden. Die Feinabstimmung zwischen Einzugs geschwindigkeit des Filaments, Druckgeschwindigkeit und Temperatur ist ausschlaggebend für die Bauteilqualität. Die Grundfläche (1) ist meist eine Glasplatte, die für eine bessere Haftung beheizt werden kann und/oder mit einer Kaptonfolie beschichtet wird. Die Grundplatte wird nach jeder Schicht abgesenkt und bestimmt dadurch die Schichthöhe.

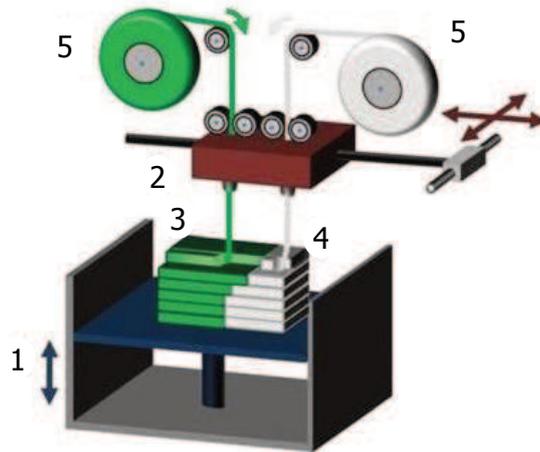


Abbildung 7: Schematische Aufbau eines 3D-Druckers; 1) beheizbares Druckbett, 2) Druckkopf mit zwei Düsen und Einzugsrollen, 3) schichtweise aufgetragenes Material, 4) Stützmaterial, 5) Filamentrollen [19]

Mit dieser Technologie lassen sich viele komplexe Geometrien (siehe u.a. Abbildung 8) herstellen, die mit konventionellen Verfahren nicht realisiert werden können. Dabei können überhängende Strukturen nur mit Hilfe von Stützstrukturen realisiert werden, die z.B. aus wasserlöslichem Polymeren u.a. Polyvinylalkohol (PVA) bestehen und somit leicht ausgewaschen werden können. So können auch bewegliche Teile wie Scharniere oder Kugellager in einem Schritt hergestellt werden. Die Nachteile dieser Technologie sind lange Druckdauer und hohe Toleranzen [21].

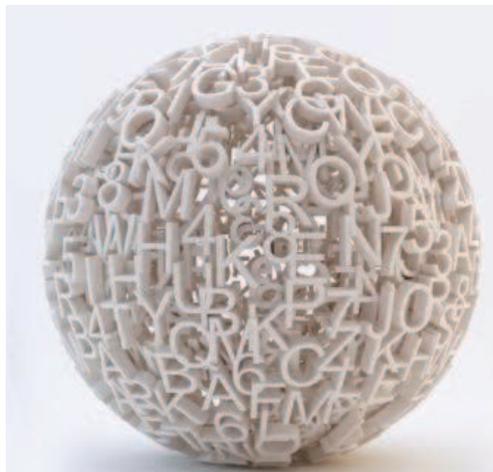


Abbildung 8: Komplexität und Designfreiheit von 3D-gedruckten Bauteilen [36]

2.2.3.3 Materialien

Mit diesem Verfahren lassen sich im Allgemeinen nur thermoplastische Kunststoffe im niedrigeren Schmelzbereich (<250 °C) verarbeiten. Es wurde bereits eine große Palette an Materialien entwickelt die sich gut verarbeiten lassen. Dabei ist vor allem die Adhäsion der einzelnen Stränge wichtig, um eine gute Bauteilfestigkeit zu gewährleisten. Die Adhäsion ist von mehreren Faktoren abhängig, wie zum Beispiel dem Schwindungsverhalten oder der

Abkühlgeschwindigkeit. Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polylactide (PLA) sind derzeit die gebräuchlichsten Kunststoffe für das FDM-Verfahren [18, 21]

Polylactide

PLA (vom englischen Wort polylactic acid) wird aus nachwachsenden Rohstoffen, wie Zucker und Stärke von Mais oder Kartoffel, synthetisiert und ist biologisch abbaubar. Wegen seiner Umweltfreundlichkeit und seiner guten Verarbeitbarkeit ist er der am häufigsten verwendete Kunststoff im FFF. Außerdem entwickelt er beim Verarbeiten keinen unangenehmen Geruch, ist nicht gesundheitsschädlich und kann daher als Werkstoff für Implantate eingesetzt werden. Unmodifiziertes PLA ist sehr spröde und schmilzt bereits bei 150 - 160 °C [50]. In den 3D-Onlineshops werden die PLA-Filamente in vielen verschiedenen Farben, opak oder sogar fluoreszierend angeboten.

Acrylnitril-Butadien-Styrol

Bei den 3D-Druckern von Stratasys ist ABS das standardmäßig verwendete Material und wird aufgrund seiner guten mechanischen Eigenschaften speziell für technische Anwendungen häufig verwendet. Die wohl bekannteste Anwendung von ABS ist LEGO®. ABS hat eine höhere Schmelztemperatur als PLA und kann bei 220 - 240 °C am 3D-Drucker mit geringer Reibung extrudiert werden. Allerdings neigt dieser Werkstoff durch die Abkühlung leicht zu schwinden, dem kann mit Hilfe eines beheizten Druckbetts (90 - 120 °C) entgegengewirkt werden. ABS sollte nur in gutgelüfteten Räumen verarbeitet werden, da der während der Verarbeitung entstehende Geruch Kopfweg verursachen kann.

Weitere Kunststoffe

Neben den gängigen PLA und ABS gibt es viele weitere Kunststoffe, die sich mittels FFF verarbeiten lassen. Diese werden meist nur für Spezialanforderungen, wie Löslichkeit und Beständigkeit, herangezogen. Darunter ist Polyvinylalkohol (PVA) ein beliebtes Stützmaterial, da es ein wasserlösliches Polypolymer ist und leicht wieder entfernt werden kann. Auch High Impact Polystyrol (HIPS) eignet sich gut als Stützmaterial für ABS, kann allerdings nur in Limonen gelöst werden. Polyamid (PA) weist eine sehr gute Adhäsion der einzelnen Schichten auf und ist im Gegensatz zu ABS und PLA beständig gegen Azeton, aber auch teurer. Polyolefine sind bislang aufgrund ihrer hohen Schwindung nicht gut für den 3D-Druck geeignet, da der Kunststoff beim Abkühlen schwindet und sich von der Druckoberfläche ablöst [18, 21]. Der neuste Trend geht dahin optische Effekte mit dem Material zu erzielen. Ob neonleuchtende, fluoreszierende, metallisch oder sogar in Zementoptik, die Filamenthersteller versuchen allen Bedürfnissen dieser Branche nachzukommen.

2.3 Differential Scanning Calorimetry

Die dynamische Differenz-Kalorimetrie (DSC) ist eine thermische Analyse und misst die Wärmemenge, die bei einer physikalischen oder chemischen Umwandlung einer Probe aufgenommen oder abgegeben wird. Dabei ändert sich deren innere Energie und wird bei konstantem Druck als Enthalpie H bezeichnet. Bei Änderung der Enthalpie, die als ΔH bezeichnet wird, wird zwischen exothermen Vorgängen (Härtungsreaktion, Zersetzen,

Kristallisieren) und endothermen Vorgängen (Schmelzen, Glasübergang, Verdampfen) unterschieden.

Die DSC-Analyse wird als ein wichtiges Messverfahren in der Werkstoffprüfung und Qualitätssicherung von Kunststoffen angesehen. Folgende Werkstoffparameter können erfasst und analysiert werden:

- Schmelzverhalten, -enthalpie, -temperatur
- Härtingsreaktion, -enthalpie, -temperatur
- Glasübergangstemperatur, Phasenumwandlung
- Kristallinität, Kristallisationsgrad
- Thermische Vorgeschichte des Kunststoffes [10, 41]

Die Abbildung 9 zeigt eine schematische DSC-Kurve, in welcher mögliche thermodynamische Effekte, wie Glasübergangstemperatur (T_g), Kristallisation/Reaktion, Schmelzvorgang und Zersetzung, ersichtlich sind.

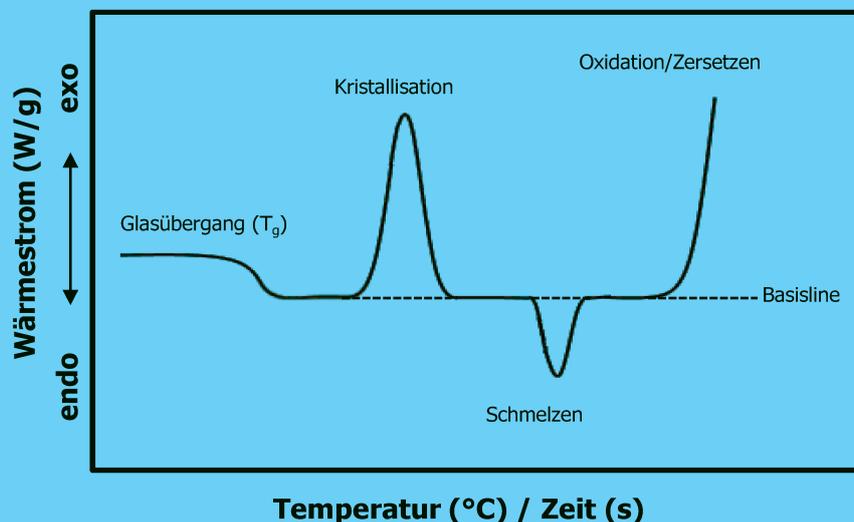
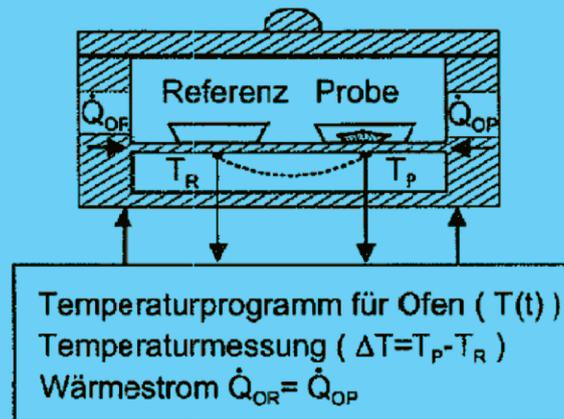


Abbildung 9: Schematische DSC-Kurve mit exemplarischen exo- u. endothermen Effekten [10]

Das Messprinzip beruht auf dem Vergleich kalorischer Effekte einer Probe im Vergleich zu einer Referenzsubstanz. Die Änderung des Wärmestroms \dot{Q} wird in Abhängigkeit von der Temperatur oder der Zeit gemessen. Die Probe wird gemeinsam mit einem Referenztiegel mit einer kalibrierten Referenzsubstanz in einen Ofen gestellt und mit einem vorgegebenen Heizprogramm erwärmt. Dabei wird deren Temperatur kontinuierlich gemessen. Aus der Temperaturabweichung ΔT zwischen Probe und Referenzsubstanz resultiert die Wärmestromänderung. In Abbildung 10 wird der schematische Aufbau der DSC-Messkammer dargestellt.



T_R = Temperatur der Referenz, T_P = Temperatur der Probe,
 \dot{Q}_{OR} = Wärmestrom vom Ofen zum Referenztiegel,
 \dot{Q}_{OP} = Wärmestrom vom Ofen zum Probentiegel

Abbildung 10: Schematische Aufbau der DSC-Messkammer [10]

2.4 Rheologie

Rheologie (griech.: rheos = das Fließen) ist die Lehre des Fließverhaltens von Stoffen unter Einwirkung äußerer Kräfte. Dabei wird die Viskosität, sprich die Zähigkeit eines Kunststoffes und dessen Deformationsverhalten auf äußere Kräfte gemessen. Dies ist eine wichtige Eigenschaft für die Kunststoffverarbeitung. Durch mathematische Modelle wird versucht dieses Verhalten zu beschreiben, um es als Parameter für Simulationen einfließen zu lassen.

In Abbildung 11 wird das Modell der Scherung bei zwei parallel angeordneten Platten skizziert.

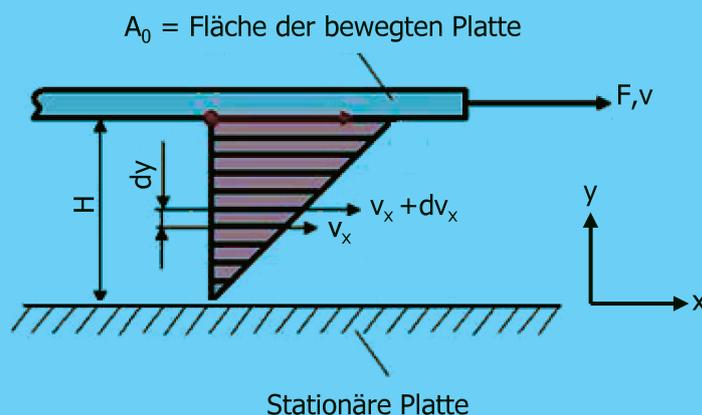


Abbildung 11: Fließverhalten bei Scherversuch zwischen zwei parallelen Platten [17]

Wird die Platte mit konstanter Kraft F bzw. Geschwindigkeit v in x -Richtung bewegt ergeben sich für newtonsche Fluide folgende Zusammenhänge zwischen Viskosität η , Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ und Schubspannung τ .

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

Die Geschwindigkeit v stellt eine lineare Funktion $v_x(y)$ über die Höhe da, wobei Wandhaften vorausgesetzt wird ($v_x(y=0)=0$ und $v_x(y=H)=v$). Die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ ist der Geschwindigkeitsunterschied zwischen zwei Flüssigkeitsschichten und wird als Quotient von Geschwindigkeit dv_x und der differentiellen Höhe dy berechnet. Für newtonsche Fluide ist $\dot{\gamma}$ über die Höhe und unabhängig von der Position konstant [42].

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy} \quad (2)$$

Die Schubspannung τ wird über die Kraft F und die aufliegende Fläche A_0 berechnet:

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

Als Beispiel werden in Abbildung 12 Fließkurven (Schubspannung über Schergeschwindigkeit) und Viskositätskurven (Viskosität über Schubspannung) von unterschiedlichem rheologischen Verhalten dargestellt. Newtonsche Fluide zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen Schubspannung und Schergeschwindigkeit und die Viskosität ist unabhängig von der Schergeschwindigkeit. Strukturviskoses Verhalten zeigt in der Viskositätskurve nach einem newtonschen Plateau (Nullviskosität) bei der kritischen Schergeschwindigkeit einen Abfall der Viskosität. Dies ist ein typisches Verhalten von Kunststoffschmelzen. Dilatante und Bingham-Flüssigkeiten stellen Sonderfälle dar und werden daher nicht näher beschrieben [55].

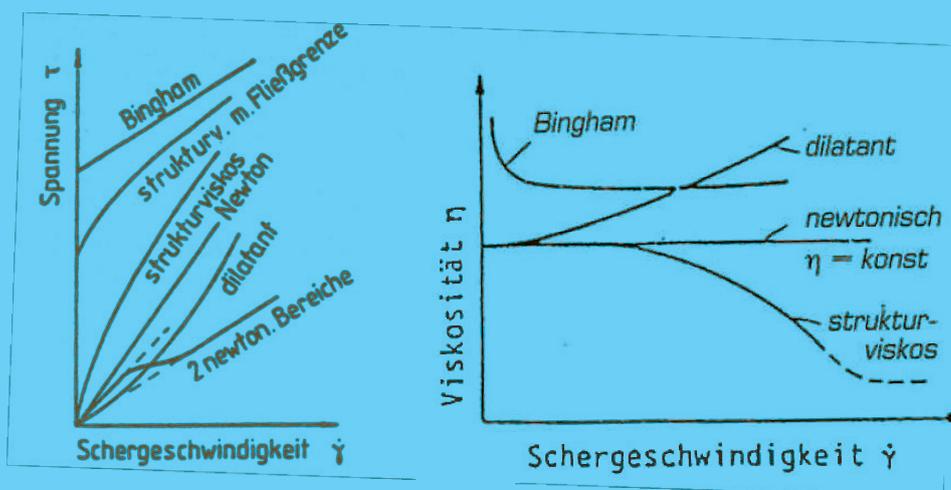


Abbildung 12: Typische Fließ- und Viskositätskurven unterschiedlicher Fließverhalten [42]

Dieses Verhalten kann durch verschiedene mathematische Modelle beschrieben werden. Eine solche Approximation hat das Ziel eine Messkurve mit wenigen Parametern vollständig zu beschreiben. Dazu gibt es für strukturviskoses Verhalten mehrere Ansätze:

Der Potenzansatz von Ostwald/de Waele (engl. Power Law) beschreibt die Steigung im strukturviskosen Bereich mit den Parametern Konsistenz k und Fließindex n .

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

Dieses Regressionsmodell hat den Nachteil, dass es die Kurve im niedrigen Schergeschwindigkeitsbereich, Richtung Nullviskosität, nicht abbilden kann. Dennoch wird es in der Polymerindustrie bei Anwendungen im mittleren $\dot{\gamma}$ -Bereich oft verwendet.

In der Praxis wird häufig der Carreau-Ansatz verwendet. Dabei stehen die Konstanten A für die Nullviskosität η_0 , B für die reziproke Übergangsschergeschwindigkeit und c gibt die Steigung im strukturviskosen Bereich an. Damit kann im Gegensatz zum Potenzansatz auch das Fließverhalten bei geringen Scherraten beschrieben werden [34].

$$\eta = \frac{A}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^c} \quad (5)$$

Dem Carreau-Ansatz sehr ähnlich ist der Cross-Ansatz, der sich in der Beschreibung der Krümmung im Übergang zwischen newtonschen und strukturviskosem Bereich unterscheidet [33].

$$\eta = \frac{A}{1 + (B \cdot \dot{\gamma})^c} \quad (6)$$

2.4.1 Bestimmung der Viskosität am Platte-Platte Rheometer

Am Rotations-Schwingungsrheometer werden unterschiedliche Versuche durchgeführt, um die rheologischen Eigenschaften von Kunststoffen zu messen. Dieses besteht aus zwei parallel angeordneten Platten, wobei sich die obere Platte entweder mit kontrollierter Drehzahl bzw. Schergeschwindigkeit (engl.: controlled shear rate) oder mit vorgegebenem Drehmoment bzw. Schubspannung (engl.: controlled shear stress) dreht. Die untere Platte ist starr. Die dynamischen Messungen mit Oszillation liefern Auskunft über das viskoelastische Verhalten von der untersuchten Probe. Wird die obere Platte mit einer Geschwindigkeit in eine Richtung bewegt, erfährt die Probe eine Deformation, welche um die Phasenverschiebung δ nacheilt. In Abbildung 13 wird ein Zyklus einer oszillatorischen Messung dargestellt und folglich die Berechnung der komplexen Viskosität η^* erklärt [28, 33].

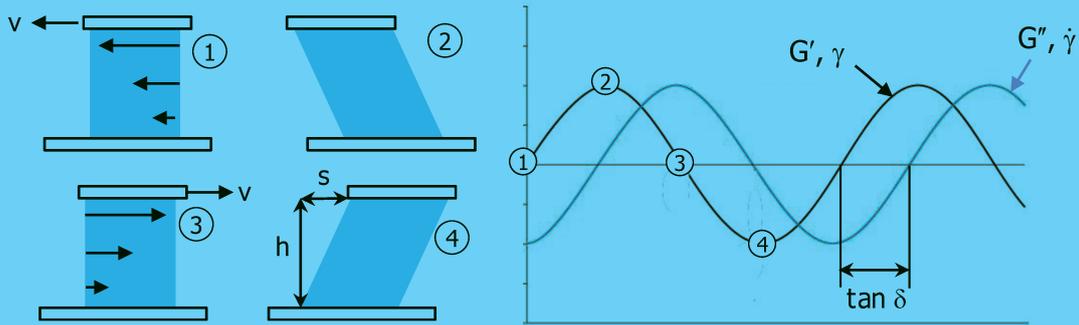


Abbildung 13: Schema einer oszillatorischen Messung von viskoelastischen Materialien [40]

Der zeitliche Verlauf der Scherung $\gamma(t)$ wird durch einer Sinusschwingung beschrieben mit der Deformationsamplitude $\hat{\gamma}$ und der Kreisfrequenz ω .

$$\gamma(t) = \hat{\gamma} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (7)$$

Die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}(t)$ ergibt sich aus der Ableitung des zeitlichen Verlaufs der Scherdeformation und ist somit 90° phasenverschoben [42].

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{d\gamma(t)}{dt} = \hat{\gamma} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (8)$$

Der Speichermodul G' stellt hierbei das elastische Verhalten dar und beschreibt den Teil der Probe, der nach der Deformation reversibel im unveränderten Zustand vorliegt. G' ist proportional zur Scherung.

$$G' = \frac{\tau}{\hat{\gamma}} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (9)$$

Hingegen ist ein ideal viskoses Material proportional zur Schergeschwindigkeit und dem Proportionalfaktor Viskosität und wird durch den Verlustmodul (G'') beschrieben.

$$G'' = \frac{\tau}{\hat{\gamma}} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (10)$$

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ wird als Quotient der verlorenen (G'') und der gespeicherten (G') Deformationsenergie berechnet und kennzeichnet das Dämpfungsvermögen. Er gibt das Verhältnis zwischen dem viskosen und dem elastischen Anteil an. Eine ideal viskose Flüssigkeit hat keinen elastischen Anteil ($G'=0$) und ein ideal elastischer Körper keine viskosen Anteil ($G''=0$).

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (11)$$

Der Betrag des komplexen Schubmoduls G^* wird über den Speichermodul (Realteil) und den Verlustmodul (Imaginärteil) errechnet.

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (12)$$

Aus dem komplexen Schubmodul und der Kreisfrequenz ω kann die komplexe Viskosität η^* berechnet werden.

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} \quad (13)$$

Amplituden-Versuch

Der Amplituden-Versuch (engl.: amplitude sweep) ist eine oszillatorische Messung, bei der bei gleichbleibender Frequenz stufenweise die Deformation γ erhöht wird. Diese Messung wird als erster durchgeführt, um die Grenzen des viskoelastischen Bereichs für den Frequenz-Versuch zu ermitteln (siehe Abbildung 14). Dabei werden Speicher- und Verlustmodul gemessen und über der Deformation aufgetragen. Bei kleinen Auslenkungen sind G' und G'' konstant. Das wird als linear viskoelastischer Bereich (LVE) bezeichnet. Wird die Deformation größer, so wird das Material irreversibel (plastisch) verformt und die innere Struktur zerstört. Dies ist der Übergang von viskoelastischer zu plastischer Verformung und kennzeichnet sich im Abfall der beiden Moduli. Außerhalb des linear viskoelastischen Bereichs gelten die beschriebenen Zusammenhänge zwischen Schubmodul und Viskosität nicht [33].

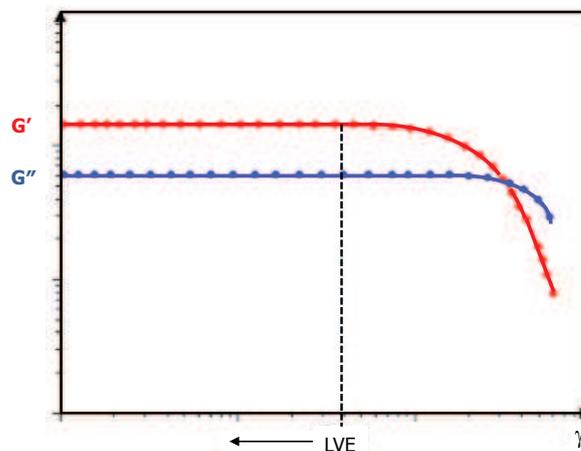


Abbildung 14: Speicher- und Verlustmodul über die Deformation, um den linear viskoelastischen Bereich zu ermitteln [9]

Frequenz-Versuch

Beim dem Frequenz-Versuch (engl.: frequency sweep) variiert die Frequenz, während die Deformation auf einem konstanten Wert im viskoelastischen Bereich bleibt. Es wird das Deformationsverhalten bei Änderung der Frequenz beobachtet. Dazu werden in einem Diagramm η^* , G' und G'' über die Frequenz aufgetragen. Bei niedrigen Frequenzen hat der viskose Anteil die Gelegenheit der Deformation nachzugehen. Mit steigender Frequenz kann

der viskose Anteil den schnellwechselnden Deformationen nicht mehr folgen und das Material verhält sich zunehmend elastischer. So kommt es bei Materialien, bei denen zunächst der viskose Anteil (G'') überwiegt, bei höheren Frequenzen zu einem Schnittpunkt der beiden Kurven. Dieser wird als Cross-Over Point bezeichnet.

Rotationsversuch und Cox-Merz Regel

Der Rotationsversuch ist im Gegensatz zum Amplituden- und Frequenzversuch ein stationärer Versuch, bei dem die Schergeschwindigkeit oder die Schubspannung stufenweise erhöht wird. Dadurch kann die schergeschwindigkeitsabhängige Viskosität auch Scherviskosität η bestimmt werden.

Die Art der Scherbelastung (stationär oder oszillatorisch) kann einen Einfluss auf das Fließverhalten haben. Um das zu überprüfen, werden die Viskositätskurven der beiden Versuche gegenübergestellt. Die Cox-Merz-Regel besagt, dass kleine Kreisfrequenzen der Schergeschwindigkeit gleichgesetzt werden können. Dies ist eine empirische Relation und muss in den einzelnen Fällen überprüft werden [33].

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta^*(\omega) \quad (14)$$

2.4.2 Fließverhalten von hochgefüllten Systemen

Die Rheologie von gefüllten Polymeren mit beispielsweise Talkum, Calcium und Glasfasern wurde von zahlreichen Wissenschaftlern untersucht und der Effekt der Polymermatrix, der Füllstoffgröße und des Füllstoffgehalts auf das Fließverhalten ist bekannt. Holzgefüllte Polymere hingegen bilden eine relativ neue Werkstoffgruppe, über deren rheologisches Verhalten einige Arbeiten veröffentlicht sind [3, 4, 25, 26], aber wo noch großer Forschungsbedarf herrscht. Im Vergleich zu thermorheologischen einfachen Thermoplasten ist das Fließverhalten von hochgefüllte System komplexer. Aufgrund der Füllstoffpartikel treten unterschiedliche anisotrope Effekte auf, die die Charakterisierung der rheologischen Daten mittels Rotations- oder Kapillarrheometer verfälschen. Durch die Scherbelastung kann es zur Entmischung oder zu Wandgleiten kommen. Im Allgemeinen ist bekannt, dass sich die Viskosität mit steigendem Füllstoffgrad erhöht. Geiger [31] hat sich intensiv mit diesem Thema beschäftigt und stellte ein neues Stoffgesetz, den CARPOW-Ansatz, für hochgefüllte Polymere auf. Dieser ist eine Mischung aus dem Carreau- und dem Potenzansatz und beschreibt den Anstieg der Viskosität bei niedrigen Scherraten. Für hochgefüllte Materialien beschreibt der CARPOW-Ansatz die Viskositätskurve:

$$\eta = \frac{d}{\omega^n} + \frac{a}{(1 + b \cdot \omega)^c} \quad (15)$$

Wobei c und n dimensionslose Fließexponenten sind, welche die Steigungen in den strukturviskosen Bereichen respektive im Bereich der Fließbehinderung angeben. Die Konstanten a und b beschreiben, wie bei Carreau-Ansatz, die Nullviskosität und den Übergangsbereich. Die Schergeschwindigkeit, bei der es zu einem Anstieg der Viskosität in Richtung niedriger Scherraten kommt, wird durch d festgelegt. Geiger spricht von einer rheologischen Perkolationschwelle, wo bei überkritischer Füllstoffkonzentration die Füllstoffe durch interpartikuläre Wechselwirkungen eine dreidimensionale Struktur ausbilden und die

Viskosität bei niedrigen Scherraten erhöhen. In Abbildung 15 werden ein ungefülltes und gefülltes Material mit Carreau- bzw. CARPOW-Ansatz gegenübergestellt, bei welcher der Anstieg der Viskosität bei niedrigen Scherraten gut zu erkennen ist.

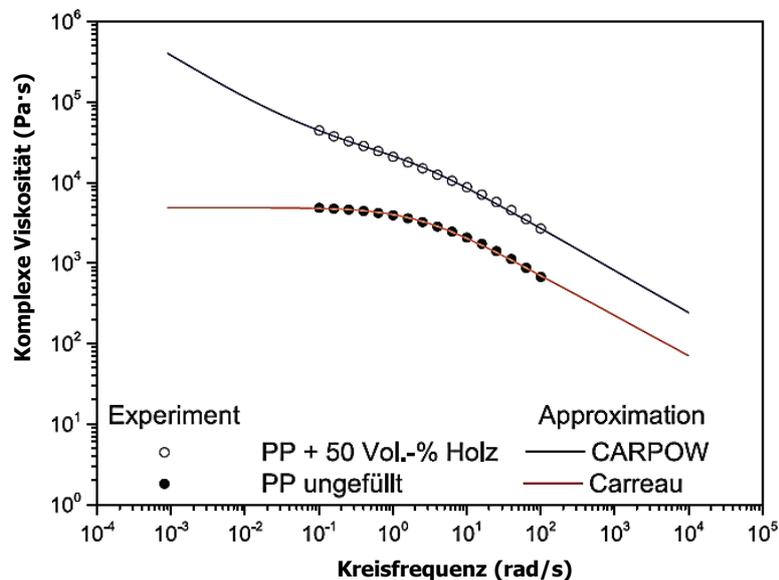


Abbildung 15: Gegenüberstellung von Viskositätskurven mit Carreau- und CARPOW-Ansatz [31]

2.5 Strömung in einem Kreisrohr

Um das Strömungsverhalten in einer Düse zu verstehen, werden im Folgenden die Grundlagen einer Kapillarströmung und Zusammenhang zwischen Massestrom, Druckabfall, Scher- und Strömungsgeschwindigkeit beschrieben. Das Ausflussvolumen pro Zeiteinheit \dot{V} einer newtonschen Flüssigkeit in einem Kreisrohr mit der Länge L und Radius R wird durch das Gesetz von Hagen-Poiseuille mit dem Druckabfall Δp und dem Düsenleitwert k beschrieben [28].

$$\dot{V} = \frac{k \cdot \Delta p}{\eta} \quad (16)$$

Für eine Kapillare mit kreisrunden Querschnitt gilt:

$$k = \frac{\pi R^4}{8L} \quad (17)$$

Der Volumenstrom ist eine Funktion der Stoffkonstante, dem Druck und dem Düsenleitwert k . Die Abbildung 16 zeigt das Strömungsprofil einer Kapillarströmung für newtonsche Flüssigkeiten. Dabei sind die Wandschubspannung und die Schergeschwindigkeit am Rand am größten, während die Strömungsgeschwindigkeit Null ist, da wandhaftes Verhalten gilt. In der Mitte hat die Strömungsgeschwindigkeit ihr Maximum und Wandschubspannung sowie

Schergeschwindigkeiten sind Null. Die Maximalwerte werden daher am Rand ($r=R$) angesehen [17, 46]

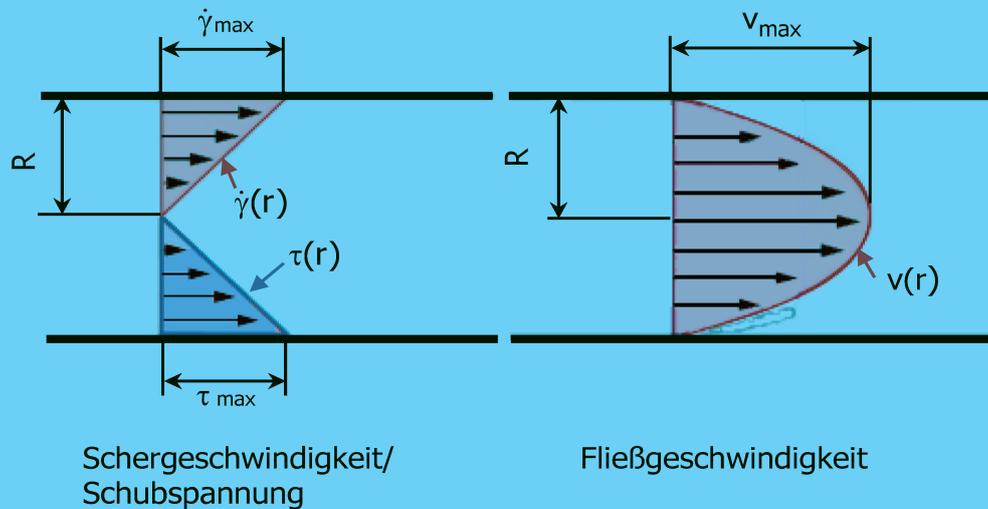


Abbildung 16: Strömungsprofil einer newtonschen Flüssigkeit in einem Kreisrohr [37]

Der Volumenstrom ist das Volumen pro Zeiteinheit \dot{V} und ergibt sich aus dem Querschnitt A und der mittleren Fließgeschwindigkeit \bar{v} .

$$\dot{V} = A \cdot \bar{v} = R^2 \cdot \pi \cdot \bar{v} \quad (18)$$

Der Massestrom \dot{m} wird über die mittlere Fließgeschwindigkeit, die Dichte und den Querschnitt berechnet.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = \rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot \bar{v} \quad (19)$$

Der Druckabfall in der Düse wird wie folgt berechnet:

$$\Delta p = \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot \frac{8 \cdot \eta}{R^4 \cdot \pi} \cdot L \quad (20)$$

Verändert sich der Durchmesser d in der Kapillare ändert sich die Strömungsgeschwindigkeit. Da aber der Volumendurchsatz am Düsen Eintritt dem am Düsenaustritt entspricht, können mittels der Kontinuitätsgleichung ($\dot{V}_1 = \dot{V}_2$) die Strömungsbedingungen v_2 und $\dot{\gamma}_2$ berechnet werden.

$$v_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot v_1 \quad (21)$$

Die Wandschergeschwindigkeit am Düsenaustritt ist der Quotient der Fließgeschwindigkeit und dem Radius bzw. der Höhe des Kanals.

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{4}{\pi \cdot R^3} \cdot \dot{V}_1 \quad (22)$$

Bei der Berechnung komplexer Düsengeometrien kann es zu einer Serien- oder Parallelschaltung kommen wie in Abbildung 17 dargestellt. Dabei kann die konische Düse als Serienschaltung unendlich vieler unendlich kurzer Düsen aufgefasst werden.

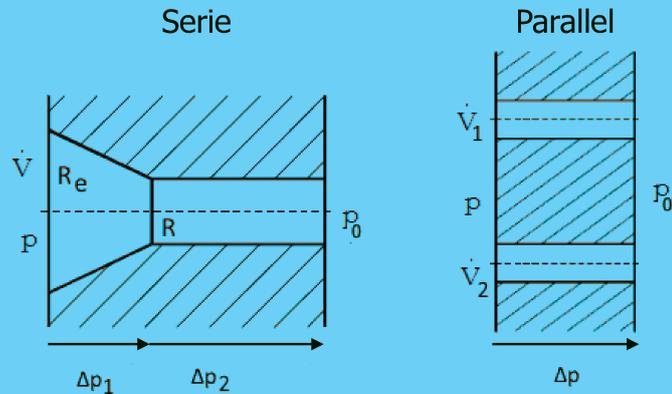


Abbildung 17: Serielle und parallele Anordnung von Düsen

Dabei ist bei der Serienschaltung der Volumenstrom konstant und der gesamte Druckabfall Δp die Summe der einzelnen Druckabfälle. Daraus ergibt sich für das Hintereinanderschalten von Düsen folgender Zusammenhang:

$$\dot{V} = \dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \text{konst.} \quad (23)$$

$$\Delta p_{\text{ges}} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots + \Delta p_n = \sum_i \Delta p_i \quad (24)$$

$$\Delta p_{\text{ges}} = \dot{V}_1 \cdot \eta \cdot \sum_i \frac{1}{k_i} \quad (25)$$

Bei der Parallelschaltung ist der Druckabfall konstant und die einzelnen Volumenströme summieren sich zu einem gesamten Volumenstrom, wie hier dargestellt wird.

$$\dot{V}_{\text{ges}} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_n \quad (26)$$

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \text{konst.} \quad (27)$$

$$\dot{V}_{\text{ges}} = \frac{\Delta p}{\eta} \cdot \sum_i k_i \quad (28)$$

Für konische Düsen mit kreisrunden Querschnitt gilt für den Düsenleitwert, wobei R der Eingangsradius und r der Radius am Austritt ist:

$$k = \frac{3 \cdot \pi}{8L} (R - r) \cdot \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{R^3} \right)^{-1} \quad (29)$$

3 Experimentelle Versuchsdurchführung

3.1 Materialien

Die Palette an ausgewählte Materialien umfasst folgende Gruppen: WPC-Granulat für Spritzguss von der Fa. Jelu, gefüllte und ungefüllte Biopolymer von der Fa. Tecnar und herkömmliche WPC-Filamente für 3D-Druck von der Fa. ColorFabb. Die Zusammensetzung der Polymere und deren Füllstoffgehalt sind aus Tabelle 1 zu entnehmen bzw. in Datenblättern im Anhang ersichtlich. Eine genaue Zusammensetzung der Biopolymer-Blends von Tecnar ist nicht bekannt. Laut Hersteller besteht ARBOBLEND[®] je nach Rezeptur aus Biopolymeren, Polyhydroxialkanoaten, -butyraten, Polycaprolacton, Polyester, Stärke, Ingeo, Lignin, Naturharzen, -wachsen, -ölen, natürlichen Fettsäuren, Cellulose, biologischen Additiven und natürlichen Verstärkungsfasern [51]. Als ungefülltes Referenzmaterial für die rheologische Untersuchung wurde zusätzlich ein ungefülltes PLA von der Fa. NatureWorks herangezogen.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Materialien

Nr.	Hersteller	Type	Abkürzung	Matrix	Füllstoff (Gew.-%)	Form
1	Jelu, Deutschland	JELU WPC PP H50-500-14	1WPC-PP-50	PP	50	WPC – Spritzguss (Granulat)
2		JELU WPC PP H60-500-14	2WPC-PP-60	PP	60	
3		JELU WPC PE H50-500-9	3WPC-PE-50	PE	50	
4		JELU WPC BIO PLA H60- 500-14	4WPC-PLA-60	PLA	60	
5	TECNARO, Deutschland	ARBOBLEND V2 / EX	5AB-V2	-	-	Bio- Kunststoff (Granulat)
6		ARBOBLEND V3NF15	6AB-V3-15	-	15	
7		ARBOBLEND 1117 V	7AB-1117	-	-	
8	ColorFabb, Niederlande	Woodfill Filament PLA/PHA-Kiefer 70_30	8WF-30	PLA/ PHA	30	Filament
9		Bamboofill Filament PLA/PHA-Bamboo 80_20	9BB-20	PLA/ PHA	20	
10	NatureWorks, USA	PLA2003D	PLA pur	PLA	-	Granulat

3.2 Geräte

Die verwendeten Geräte wurden vom Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung zur Verfügung gestellt und sind in Tabelle 2 angeführt.

Tabelle 2: Übersicht über die verwendeten Geräte

Messung	Type	Hersteller
DSC	DSC1	Mettler Toledo GmbH, Schweiz
Vakuumtrockner	VD23	Binder GmbH, Deutschland
Vakuumpresse	P200PV	Dr. Collin GmbH, Deutschland
Rotationsrheometer	MCR501	Firma Anton Paar GmbH, Österreich
Feuchtemessgerät	Hydrotracer FMX	aboni GmbH für Mess- und Automatisierungstechnik, DE
Extruder	Filtertestsystem FT-E20T-MP-IS	Dr. Collin GmbH, Deutschland
3D Drucker	3Dp-A2	Hage GmbH, Österreich
Zugprüfung	Roell Z010	Zwick GmbH & Co. KG, Deutschland

3.3 Differential Scanning Calorimetry

Die Materialien wurden ohne einen vorausgehenden Trocknungsvorgang gemessen. Es wurden jeweils 5 - 6 mg der Proben in perforierte DSC-Tiegel untersucht. In Tabelle 3 wird die Übersicht über das Heizprogramm dargestellt. Die Probenkammer wurde während der Messung mit Stickstoff gespült (50 ml/min). Das Hauptaugenmerk der thermischen Untersuchung war es, die Schmelzbereiche und die Glasübergangstemperatur der Materialien zu ermitteln, um die Verarbeitungsparameter abschätzen zu können.

Tabelle 3: Versuchsparameter für DSC-Messungen

Starttemperatur. (C°)	Haltezeit (min)	Endtemperatur. (C°)	Heizrate (K/min)	Probenmasse (mg)
25	2	240	20	5 - 6

3.4 Analytische Berechnung des Fließverhaltens

Als Ausgangspunkt für die Schergeschwindigkeiten, Volumenströme und Druckabfall in der Düse des 3D-Drucker wurde zunächst eine analytische Rechnung für newtonsche Flüssigkeiten aufgestellt.

Um den Volumenstrom bzw. Massenstrom in der Düse zu berechnen, musste zuerst die Einzugsgeschwindigkeit des Filaments ermittelt werden. Im errechneten Programmcode (g-code) ist die Länge des extrudierten Filaments für eine gewisse Wegstrecke angegeben. Diese Wegstrecke ist definiert durch den Abstand zweier Koordinatenpunkte. Die Einzugsmenge ist über die Strecke definiert, somit steht die Einzugsgeschwindigkeit des Filaments (flow rate) im direkten Verhältnis zur Schrittgeschwindigkeit (feed rate) des

Druckkopfes. Die Versuche ergaben, dass das Verhältnis flow rate/feed rate bei 0,1 liegt. Somit wird bei einer Schrittggeschwindigkeit von 40 mm/s das Filament mit 4 mm/s eingezogen. Aus der Einzugsgeschwindigkeit v_1 und dem Querschnitt des Filaments mit dem Durchmesser d_1 wird der Volumenstrom \dot{V}_1 des Filaments berechnet.

$$\dot{V}_1 = \frac{d_1^2 \cdot \pi \cdot v_1}{4} = \frac{1,75^2 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{4} = 9,62 \cdot 10^{-9} \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (30)$$

Es wird angenommen, dass das Filament nach einem Drittel der Düsenlänge vollständig aufgeschmolzen ist. Dabei ändert sich beim Phasenübergang die Dichte, deswegen darf nicht gleicher Volumenstrom angenommen werden, sondern gleicher Massenstrom. So ist der Massestrom am Düseneingang \dot{m}_1 gleich dem Massestrom am Düsenaustritt \dot{m}_2 .

$$\dot{m}_1 = \dot{V}_1 \cdot \rho_{\text{fest}} = 9,62 \cdot 10^{-9} \cdot 1474 = 14,210^{-6} \text{ (kg/s)} \quad (31)$$

Daraus kann die Geschwindigkeit am Düsenaustritt v_2 sowie die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}_2$ über das Querschnitts- und Dichteverhältnis berechnet werden. Wobei ρ_{fest} die Dichte des unaufgeschmolzenen und ρ_{Schmelze} die Dichte des aufgeschmolzenen Filaments ist. Die beiden Werte wurden als Referenz aus einer pVT-Messung eines holzgefüllten Filaments (40 Gew.-%) von Laywood herangezogen.

$$v_2 = \frac{d_1^2 \cdot \rho_{\text{fest}}}{d_2^2 \cdot \rho_{\text{Schmelze}}} \cdot v_1 = \frac{1,75^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1474}{0,5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1376} \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 52,4 \text{ (mm/s)} \quad (32)$$

Die maximale Schergeschwindigkeit in der Düse wird berechnet, um abschätzen zu können, in welchem $\dot{\gamma}$ -Bereich die rheologischen Untersuchungen durchgeführt werden müssen.

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{4}{\pi R^3} \cdot \dot{V}_1 \cdot \frac{\rho_{\text{fest}}}{\rho_{\text{Schmelze}}} = \frac{4}{\pi \cdot 0,25^3 \cdot 10^{-9}} \cdot 9,62 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1474}{1376} = 839 \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (33)$$

Die Geometrie der Düse lässt sich in drei Zonen unterteilen und ist somit für die Berechnung eine Serienschaltung von einzelnen Düsen. Die Zonen werden inklusive ihren Abmaßen in Abbildung 18 dargestellt. Für den Druckabfall wird nur der untere Bereich ($L = 20$ mm) berechnet, in dem das Filament vollständig aufgeschmolzen ist, da für das feste Filament eine unendlich hohe Viskosität angenommen wird und somit kein Druckabfall berechnet werden kann. Die angenommene Viskosität basiert auf einer Messungen eines holzgefüllten Filaments von Laywood. Bei gegebener Temperatur 200 °C und Schergeschwindigkeit 800 s⁻¹ beträgt der Wert für die Viskosität 220 Pa·s, der für die analytische Berechnung herangezogen wird.

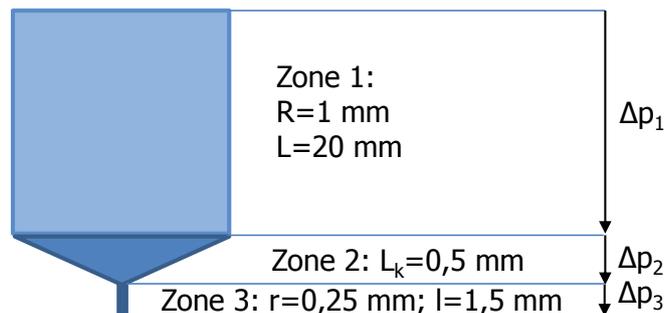


Abbildung 18: Serieller Aufbau der Düse mit unterschiedlichen Zonen

Im Folgenden werden die Düsenleitwerte der unterschiedlichen Geometrien berechnet und anschließend der gesamt Druckabfall in der Düse. In Tabelle 4 werden die Parameter und die Ergebnisse der Berechnung aufgelistet.

Zone 1:

$$k_1 = \frac{\pi R^4}{8L} = \frac{1^4 \cdot 10^{-12} \cdot \pi}{8 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 1,96 \cdot 10^{-11} \text{ (m}^3\text{)} \quad (34)$$

Zone 2:

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{3 \cdot \pi \cdot (R - r)}{8L_k} \cdot \left(\frac{1}{r^4} - \frac{1}{R^4} \right)^{-1} = \\ &= \frac{3 \cdot \pi \cdot (1 \cdot 10^{-3} - 0,25 \cdot 10^{-3})}{8 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{1}{0,25^4 \cdot 10^{-12}} - \frac{1}{1^4 \cdot 10^{-12}} \right)^{-1} = 6,9 \cdot 10^{-12} \text{ (m}^3\text{)} \end{aligned} \quad (35)$$

Zone 3:

$$k_3 = \frac{\pi r^4}{8l} = \frac{0,25^4 \cdot 10^{-12} \cdot \pi}{8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ (m}^3\text{)} \quad (36)$$

Mit den errechneten Düsenleitwerten kann der gesamte Druckabfall berechnet werden.

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{ges}} &= \frac{\dot{m}}{\rho_2} \cdot \eta \cdot \sum_i \frac{1}{k_i} = \\ &= \frac{1418}{1376} \cdot 224 \cdot \left(\frac{1}{1,96 \cdot 10^{-11}} + \frac{1}{10^{-12}} + \frac{1}{6,9 \cdot 10^{-12}} \right) = 2,76 \cdot 10^6 \text{ (Pa)} \end{aligned} \quad (37)$$

Tabelle 4: Zusammenfassung der Angaben und Ergebnisse

Angaben			
Symbol	Bedeutung	Wert	Einheit
d_1	Filamentdurchmesser	$1,75 \cdot 10^{-3}$	m
ρ_{fest}	Dicht des Festkörpers	1376	kg/m ³
ρ_{Schmelze}	Dicht der Schmelze	1474	kg/m ³
v_1	Einzugsgeschwindigkeit	$4 \cdot 10^{-3}$	m/s
R	Radius des Düseneingangs	$1 \cdot 10^{-3}$	m
r	Radius des Düsenaustritts	$2,5 \cdot 10^{-4}$	m
Ergebnisse			
Symbol	Bedeutung	Wert	Einheit
\dot{m}	Massestrom	$14,2 \cdot 10^{-6}$	kg/s
v_2	Einzugsgeschwindigkeit	$4 \cdot 10^{-3}$	m/s
$\dot{\gamma}_2$	Schergeschwindigkeit	839	s ⁻¹
Δp	Druckabfall	27,6	bar

3.5 Rheologie

3.5.1 Probenvorbereitung für rheologische Messungen

Das Material wurde für mind. 6 Stunden im Vakuumsschrank bei 80 °C und einem Endvakuum von 2 mbar vorgetrocknet. Anschließend wurde mit dem Feuchtemessgerät Hydrotracer FMX die Restfeuchte der Materialien bestimmt. Die Restfeuchte betrug bei den holzgefüllten unter 0,2 % und bei den ungefüllten Biopolymeren unter 0,1 %. Die Proben wurden in einer 2 mm dicken Lochplatte mit dem Durchmesser 25 mm bei 195 °C und mit 100 bar in der Vakuumpresse gepresst.

3.5.2 Durchführung der rheologischen Messungen

Die rheologische Analyse wurde am Platte-Platte Rheometer MCR501 von Anton Paar GmbH durchgeführt. Aufgrund der niedrigen Schergeschwindigkeiten, die im 3D-Druck auftreten, wurde das Rotationsrheometer dem Kapillarrheometer vorgezogen. Zudem kann es bei der Messung am Kapillarrheometer durch die anisotrope Druckverteilung zu Verfälschungen kommen. Die Kegel-Platte Anordnung gewährleistet eine konstante Schergeschwindigkeit über den Radius, ist aber für hochgefüllte Systeme nicht geeignet. Durch die Geometrie kommt es zu erhöhten Normalkräften und der Messabstand von 100 µm kann nicht erreicht werden. In manchen Untersuchungen werden strukturierte Platten einzusetzen, um

Wandgleiten zu unterdrücken. Dies liefert aber laut Kirchhoff keine merklichen Verbesserung, somit wurden glatte Platten verwendet [4, 25, 30].

Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der DSC-Analyse wurden die Temperaturen für die rheologischen Messungen festgelegt. Alle Messungen wurden bei 200 °C durchgeführt, da es bei höheren Temperaturen zur Schädigung des Füllstoffes kommen kann. Der Probendurchmesser betrug 25 mm und der Messspalt 1 mm. Während der Messung wurde der Probenraum mit Stickstoff gespült, um einen sauerstoffbedingten Polymerabbau zu verhindern. Zunächst wurde bei der oszillatorischen Rotationsmessung ein Amplitudenversuch durchgeführt, um die Grenzen des linear viskoelastischen Bereichs zu ermitteln. Der Messbereich wurde bei einer Deformation von 10^{-3} - 50 % und bei einer Kreisfrequenz von 1 rad/s gewählt. Anschließend wurden pro Material drei Messungen in Frequenzversuch mit einer Deformationsstufe von 0,04 % durchgeführt und die Frequenz stufenförmig von 0,1 - 500 rad/s erhöht.

Des Weiteren wurden drei Messungen im stationären Messmodus im Schergeschwindigkeitsbereich von 10^{-3} - 15 rad/s untersucht, um zu überprüfen, ob die Cox-Merz-Regel auf diese Materialien zutrifft. In Tabelle 5 werden die Messparameter zusammengefasst. Die WPC-Spritzgusstype PLA-60 konnte am Rotationsrheometer nicht gemessen werden, da im Messspalt zu hohe Normalkräfte wirkten. Da keine rheologischen Daten erfasst werden konnten, wurde dieses Material für die Polyflow Simulation nicht berücksichtigt.

Tabelle 5: Übersicht über die Versuchsparameter am Rotations-Schwingungsrheometer

Messung	Temp. (°C)	Spalt (mm)	Kreisfrequenz ω (rad/s)	Deformation γ (%)	Schergeschw. $\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)
Amplitudenver.	200	1	1	10^{-3} - 50	-
Frequenzver.	200	1	0,1 - 500	0,04	-
Rotationsver.	200	1	-	-	10^{-3} - 50

3.6 Polyflow Simulation

Polyflow® (Ansys Inc., United States) ist ein CFD-Programm, welches auf der Methode der Finiten Element FEM beruht, zur Analyse und Simulation von strömungsmechanischen Problemen. Damit lassen sich durch unterschiedliche Modelle kontinuierliche Prozesse der Kunststoffverarbeitung viskoelastisch oder auch strukturviskos beschreiben [38]. Effekte und Auswirkungen der Füllstoffpartikel auf das Fließverhalten können nicht simuliert werden.

In den fünf folgenden Modulen wurden die nötigen Daten für die Simulation und Berechnung eingeben [56]:

Design Modeler

Im ersten Schritt muss die Geometrie der 3D-Druckdüse mit der gesamt Länge L_{ges} im Design Modeler gezeichnet werden. Die Abmessungen entsprechen der verwendeten 3D-Druckdüse von Hage (vgl. Abbildung 19): Filamentdurchmesser 1,75 mm; Düseneintritt \varnothing 2 mm, $L_{ges} = 29,9$ mm; Düsenaustritt \varnothing 0,5 - 0,8 mm, $l = 1,5$ mm

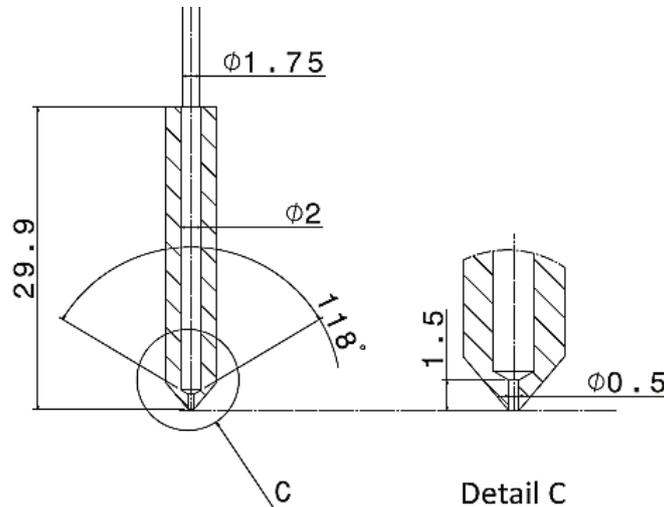


Abbildung 19: Düsengeometrie für die Simulation mit Detail C der Düsen Spitze

Da die Düse rotationssymmetrisch ist wurde nur ein Viertel der Düse modelliert, um den Rechenaufwand zu minimieren. Ein Material wurde bei drei unterschiedlichen Düsendurchmessern simuliert (0,5 mm, 0,6 mm und 0,8 mm), um den Einfluss der Düsengeometrie auf den Druckabfall zu bestimmen.

Meshing application

Für die Simulation muss über die Geometrie ein Netz (engl.: mesh) für die Unterteilung der Volumenkörper definiert werden. Im Bereich der Durchmesserverengung am Düsenaustritt wird das Netz feiner gelegt, um in diesem Bereich genaue Ergebnisse zu erzielen.

Fluent application

Dieses Modul dient zur Eingabe der Randbedingungen und Materialdaten (Preprocessing). Für die Simulation sind die Viskositätsberechnung mittels Cross-Ansatz sowie die Rahmenbedingungen erforderlich. Die Konstanten für den Cross-Ansatz wurden aus den rheologischen Daten im Origin Pro berechnet. Die Simulation wurde isotherm bei 200 °C und mit einem Volumenstrom im Inflow von $1,03 \cdot 10^{-8} / 4 \text{ m}^3/\text{s}$ berechnet. Es sind dieselben Bedingungen wie bei der analytischen Berechnung des Druckabfalls angenommen worden. Weiters wurde eine stationäre Strömung und Wandhaften angenommen und dass das Filament nach einem Drittel der Düsenlänge vollständig aufgeschmolzen ist. In der Symmetrieebene wurde eine kräftefreie tangentielle Oberfläche und keine Geschwindigkeit normal dazu angenommen. Der Austritt wurde ebenfalls kräftefrei angenommen. Ramanath [45] hat den Einfluss des Verjüngungswinkels und der Einzugsgeschwindigkeit auf den Druckabfall in einer 3D-Druckdüse für andere Materialien mit vergleichbaren Annahmen simuliert.

Polyflow applicator

Dies ist das eigentliche Simulationstool zur Berechnung des Fließproblems, in dem die Rechenoperationen durchgeführt werden.

Ansys CFD-Post

Hier werden die Ergebnisse dargestellt (Postprocessing). Der Druck, die Fließ- sowie Schergeschwindigkeit werden in einem Diagramm mit farblicher Skala dargestellt. Für den Druck wurde ein Referenzpunkt ausgewählt, an dem für alle Materialien der Druck ermittelt und verglichen wird.

3.7 Filamentextrusion und 3D-Druck

Die Materialien lagen in Granulatform vor und wurden zunächst auf dem Filtertestsystem FT-E20T von Collin zu ein Filament für den 3D-Drucker mit einem Durchmesser von 1,75 mm bei einer Temperatur von 185 °C extrudiert. Zusätzlich kann eine Schmelzepumpe angeschlossen werden, um einen konstanteren Volumenstrom zu gewährleisten. Das Filament wurde je nach Material zur Kühlung durch ein Wasserbad gezogen oder auf ein Förderband extrudiert. Mit Hilfe eines Lasermessgeräts (Laser Series 2000, Sikora, Bremen, D) wurden der Durchmesser sowie die Rundheit des Filaments überprüft und anschließend auf Rollen aufgewickelt. Dabei war eine enge Toleranz erforderlich, da das Filament mit größerem Durchmesser im Einzugssystem des 3D-Druckers stecken bleibt.

Aus den Ergebnissen der oben angeführten Voruntersuchung wurden die Parameter für den 3D-Druck ermittelt. Als erstes Musterobjekt wurde ein Schlüsselanhänger der Montanuniversität Leoben gedruckt, um die Feineinstellung für das jeweilige Material zu adjustieren. So wurden die Einflüsse von Temperatur, Schichthöhe und Druckgeschwindigkeit beurteilt und daraus passende Prozessparameter gefunden. Das Verhältnis zwischen feed rate und flow rate spielt dabei eine wichtige Rolle, um den Materialfluss zu optimieren. Für die Zugprüfung wurde ein Prüfkörper mit den Dimensionen lt. Norm DIN EN ISO 527 (siehe Abbildung 20) in einer 3D-Zeichnung als STL-File erstellt. Diese Geometrie wurde mittels des Programms Skeinforge-Slicer in Schichten unterteilt und in einen Programmcode (g-code) umgewandelt. Die Druckrichtung der einzelnen Stränge sollte in die Belastungsrichtung ausgelegt sein, um eine maximale Festigkeit zu erreichen. Da die Einstellungen am Skeinforge-Slicer keine vollständige UD-Geometrie berechnen kann, wurde ein Teil der Geometrie im g-code angepasst. Die gedruckten Zugprüfkörper wurden am Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe auf der Zugprüfmaschine Roell Z010 von Zwick nach DIN EN ISO 527 getestet.

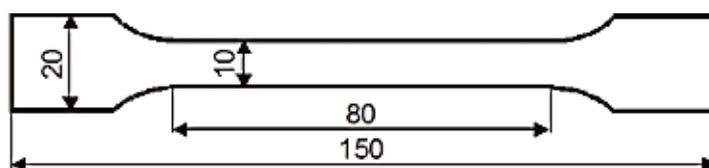


Abbildung 20: Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527 [17]

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Thermische Analyse

Die Messung wurde auf das Probengewicht normiert und mit Origin Pro9 (OriginLab Corporation, United States) ausgewertet.

Abbildung 21 zeigt in einem DSC-Diagramm 1WPC-PP-50 repräsentativ für hochgefülltes WPC und 5AB-V2 für ungefüllte Biokunststoffe. Bei dem WPC auf PP-Basis ist kein Glasübergangstemperatur T_g sichtbar, da dieser außerhalb des untersuchten Temperaturbereichs bei 0 - 10 °C liegt [44]. Die T_g der ungefüllten Materialien liegt zwischen 60 °C und 65 °C. Hier kommt es zu Überlagerungen mit dem Abdampfvorgang der Restfeuchtigkeit.

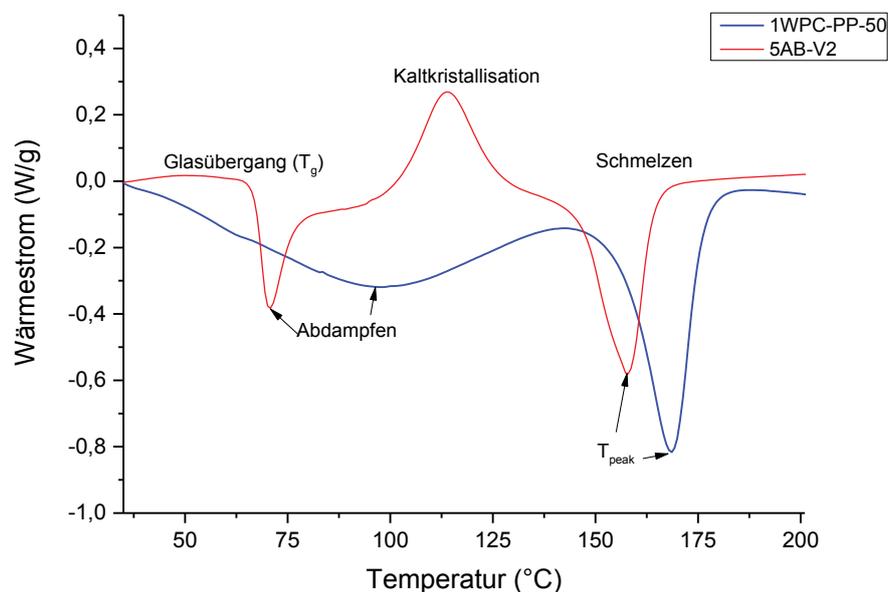


Abbildung 21: DSC-Kurve eines gefüllten und ungefüllten Materials (1WPC-PP-50, 5AB-V2)

Die Ergebnisse der Messungen in Tabelle 6 zeigen, dass die Schmelzpunkte der einzelnen Materialien zwischen 150 °C und 170 °C liegen. Der Schmelzpunkt von Polyethylen liegt etwas unterhalb der anderen Materialien bei 142 °C. Für die rheologische Untersuchung wird daher ein Bereich von 180 - 200 °C möglich sein. Materialien, die zwischen 150 °C und 160 °C schmelzen, werden mit 180 - 220 °C am 3D-Drucker verarbeitet [17]. Auf Empfehlung des Herstellers sollten die holzgefüllten PLA/PHA-Mischungen zwischen 220 °C und 240 °C gedruckt werden.

Tabelle 6: Ergebnisse der DSC-Messungen

Probe	Material	T _{peak} (°C)	T _g (°C)
1	1WPC-PP-50	168	-
2	2WPC-PP-60	167	-
3	3WPC-PE-50	142	-
4	4WPC-PLA-60	168	-
5	5AB-V2	157	68
6	6AB-V3-15	154	67
7	7AB-1117	150	64
8	8WF-30	150	58
9	9BB-20	150	58
10	PLA pur	162	60

4.2 Rheologische Analyse

Ziel dieser Untersuchung war es, die einzelnen Materialien in ihrer Viskosität zu vergleichen und die Parameter für die Simulation in Polyflow zu ermitteln. Im Folgenden werden die Ergebnisse der rheologischen Analysen, Amplituden-Versuch, Frequenz-Versuch und stationärer-Versuch, erläutert.

4.2.1 Amplituden-Versuch

Zunächst wurde in einem Amplituden-Versuch bei einer Frequenz von 1 rad/s die Deformation stufenweise von 10^{-3} % auf 50 % erhöht. Dabei wurden der Speicher- und Verlustmodul gemessen. Solange die beiden Kurven konstant auf einem Level verlaufen, wird das Material im linear viskoelastischen Bereich verformt. Sobald der linear viskoelastische (LVE) Bereich verlassen wird und die Deformation zu groß wird, fallen beiden Kurven ab. So kann eine maximal zulässige Deformation im linear viskoelastischen Bereich für den Frequenz-Versuch abgeschätzt werden. Repräsentativ für alle Materialien sind in Abbildung 22 im Amplituden-Versuch von 2WPC-PP-60 G' und G'' über die Deformation aufgetragen. Die Werte zu Beginn der Messung weisen eine größere Streuung auf, da Einschwingeffekte auftreten. Dennoch ist der Abfall der Kurven bei etwa 0,1 % zu erkennen. Für den Frequenz-Versuch wird daher als Deformation im LVE-Bereich 0,04 % gewählt. Die stimmt mit anderen wissenschaftlichen Arbeiten überein [25, 32].

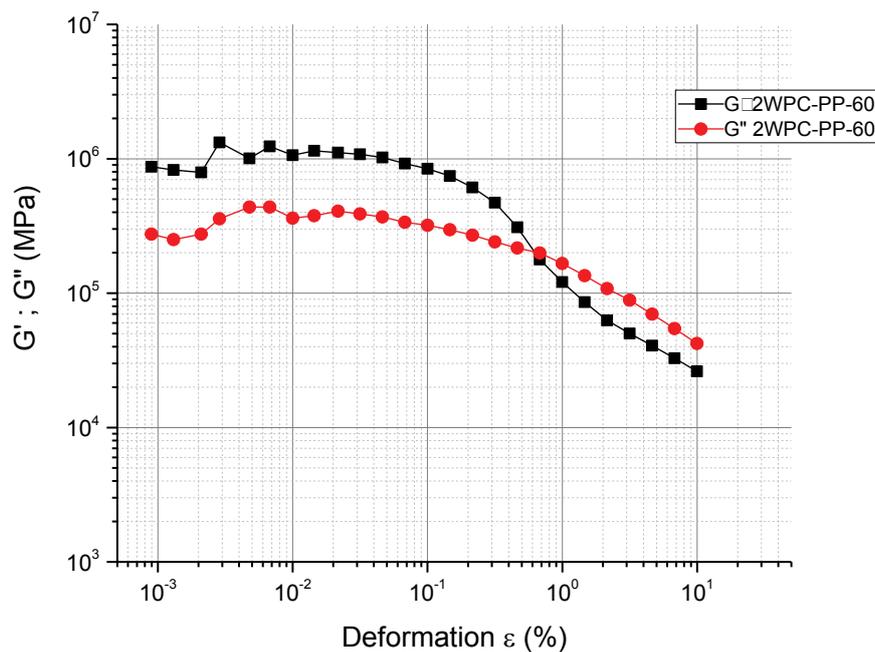


Abbildung 22: Amplituden-Versuch: Speicher- und Verlustmodul über die Deformation (2WPC-PP-60)

4.2.2 Frequenz-Versuch

Allgemein ist bekannt, dass ein höherer Füllstoffgrad eine höhere Viskosität zu Folge hat. In Abbildung 23 sind die komplexen Viskositäten aller untersuchten Materialien gegenübergestellt. Die drei obersten Kurven sind die Messungen von den hochgefüllten Spritzgusstypen (1WPC-PP-50, 2WPC-PP-60, 3WPC-PE-50). Wie zu erwarten sind die Viskosität und die Streuung der hochgefüllten Systeme deutlich höher als die der ungefüllten. Die ungefüllten bzw. niedriggefüllten Systeme sind in einem deutlich niedrigeren Viskositätsbereich und zeigen ein typisches rheologisches Verhalten von Kunststoffen. Da der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Schergeschwindigkeiten zu einer Änderung der Viskosität führen kann, wurde zum Vergleich eine Messung bei hohen Frequenzen gestartet und stufenweise verringert. Die Ergebnisse zeigen keine merklichen Unterschiede.

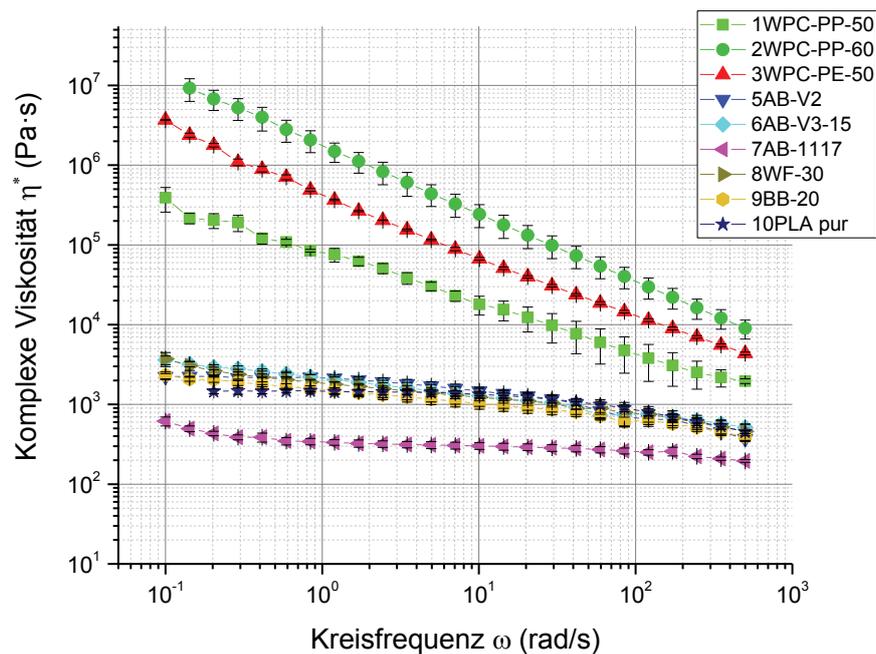


Abbildung 23: Übersicht über die Viskositätskurven aller Materialien

Biopolymere

Die Biopolymere von Tecnar (5,6), die holzgefüllten Filamente von Jelu (8,9) und das ungefüllte PLA (10) sind sich in ihrem rheologischen Verhalten sehr ähnlich. Das Material 7AB-1117 ist etwas niedrigviskoser und thermisch unbeständiger als die beiden vergleichbaren Materialien von Tecnar. Bei diesem Material konnte ein Viskositätsabfall in Abhängigkeit der Messdauer festgestellt werden, deswegen weicht der Kurvenverlauf von den anderen Materialien ab. Abbildung 24 zeigt die Viskositätskurven der Biokunststoffe. Die Viskosität von 6AB-V3-15 (15 Gew-% gefüllt) weicht nur wenig vom vergleichbaren ungefüllten Biopolymer 5AB-V2 ab. Es ist zu erkennen, dass sich bei den ungefüllten Materialien (5, 10) ein Plateau der Nullviskosität einstellt, wohingegen beim gefüllten Biopolymer (6) ein Anstieg der Viskosität sichtbar ist.

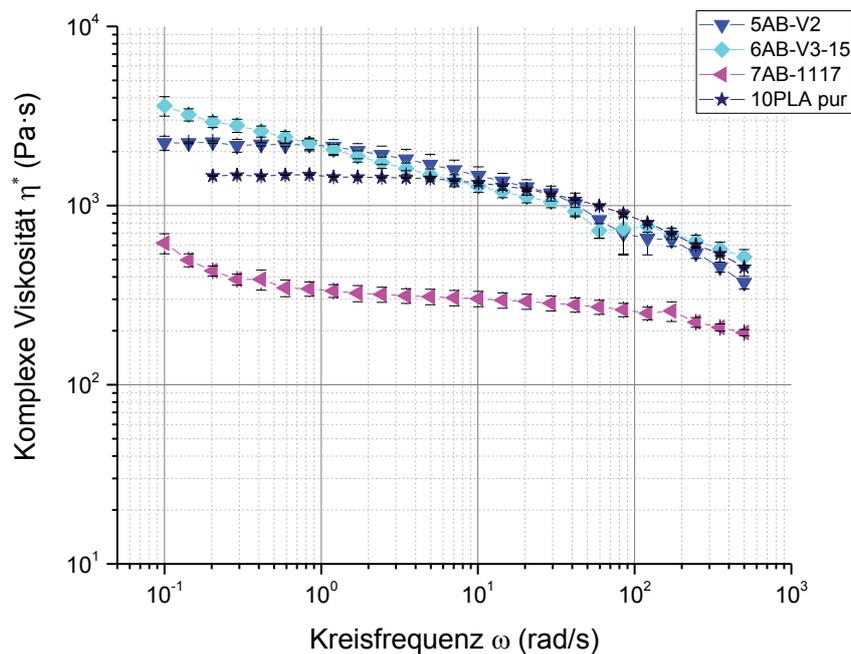


Abbildung 24: Gegenüberstellung der Viskosität der Biopolymere von Tecnaro und dem ungefüllten PLA

WPC-Filament von Colorfabb

Die WPC-Filamente von Colorfabb (8WF-30, 9BB-20) weisen trotz ihrer Füllstoffe nur eine geringe Erhöhung der Viskosität im Vergleich zu ungefüllten Systemen auf. Grund dafür sind der geringe Füllstoffgehalt von 20 - 30 Gew.-% und die feine Partikelgröße von 150 μm (lt. Hersteller). Ein solches Holzmehl hat keine Verstärkungsfunktion und aufgrund der geringen Menge nur eine bedingte Holzoptik. Die beiden Viskositätskurven werden in Abbildung 25 gegenübergestellt. Dabei ist ein Anstieg der Viskosität in Richtung niedriger Schergeschwindigkeiten zu erkennen. Es bildet sich nicht, wie bei ungefüllten Kunststoffen, ein Plateau der Nullviskosität aus, was auf die interpartikuläre Wechselwirkung der Füllstoffpartikel zurückzuführen ist. Wie zu erwarten wirkt sich wegen des sogenannten hydrodynamischer Effekts eine Erhöhung des Füllgrades von 20 Gew.-% auf 30 Gew.-% in einem gleichmäßigen Viskositätsanstieg aus [31]. Die Streuung der Messungen von den gefüllten Systemen liegt bei 15 - 30 % und ist im Vergleich zu den ungefüllten Materialien (5 - 10 %) deutlich höher, da sich die Füllstoffe unterschiedlich auf das Fließverhalten auswirken können.

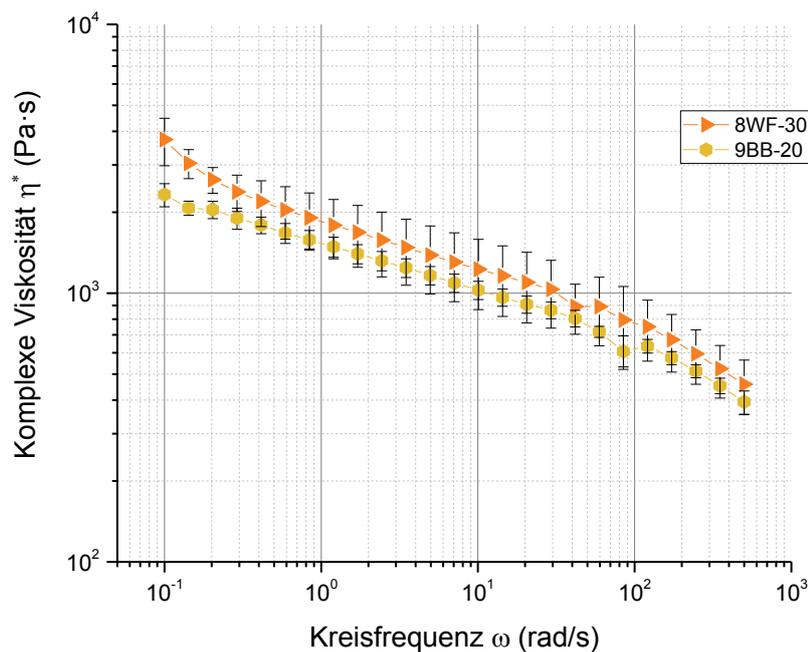


Abbildung 25: Vergleich der Viskosität der WPC-Filamente von Colorfabb

Hochgefüllte WPC-Spritzgusstypen

Die rheologische Untersuchung von holzgefüllten Materialien stellt aufgrund des komplexen Fließverhaltens eine Herausforderung dar. Unterschiedliche Füllgrade und Partikelgrößen und Additive können verschiedene Effekte bei der Messung auslösen, wie z.B. Wandgleiten, Scherverdünnung oder Entmischen. Umlagerungen durch die Schereinwirkung führen zu großen Streuungen in der Messung. Die Restfeuchtigkeit in den hydrophilen Materialien verstärkt diese Effekte und wirkt sich negativ auf die Messungen aus.

Die hochgefüllten WPC-Spritzgusstypen (1-3) weisen die höchste Viskosität auf. Bei der Messung kam es zu einigen Problemen, die in einer großen Streuung resultieren. Die Probe wurde zwischen den Stempeln eingelegt und 2 min bei Prüftemperatur 200 °C temperiert. Danach wurde die Probe von ursprünglichen 2 mm Dicke auf die Höhe des Messspaltes (1 mm) komprimiert und überschüssiges Material quoll seitlich heraus. Während des Komprimierens steigt die Normalkraft des Stempels an und sinkt normalerweise nach Relaxieren der Spannungen wieder auf Null. Bei den hochgefüllten Kunststoffen sank die Normalkraft nicht mehr auf Null ab. Dies kann zur Erhöhung der Messwerte und zu größeren Streuung führen. Bei 4WPC-PLA-60 war das Komprimieren auf die Höhe des Messspaltes nicht möglich, da die maximal zulässige Normalkraft für hochgefüllte Material nicht ausreichte.

Wie Geiger [31] bereits gezeigt hat, kommt es bei hochgefüllten Kunststoffschmelzen zu keinem Plateau in der Nullviskosität. Bei niedrigen Schergeschwindigkeiten ist die Viskosität zu hoch und erst bei höheren Schergeschwindigkeiten wirkt der Füllstoff scherverdünnend. In Abbildung 25 werden die Viskositätskurven der hochgefüllten WPC-Spritzgusstypen

gegenübergestellt. Daraus ist ersichtlich, dass 1WPC-PP-50 die niedrigste Viskosität aufweist und 2WPC-PP-60 aufgrund des höheren Füllgrads die höhere Viskosität.

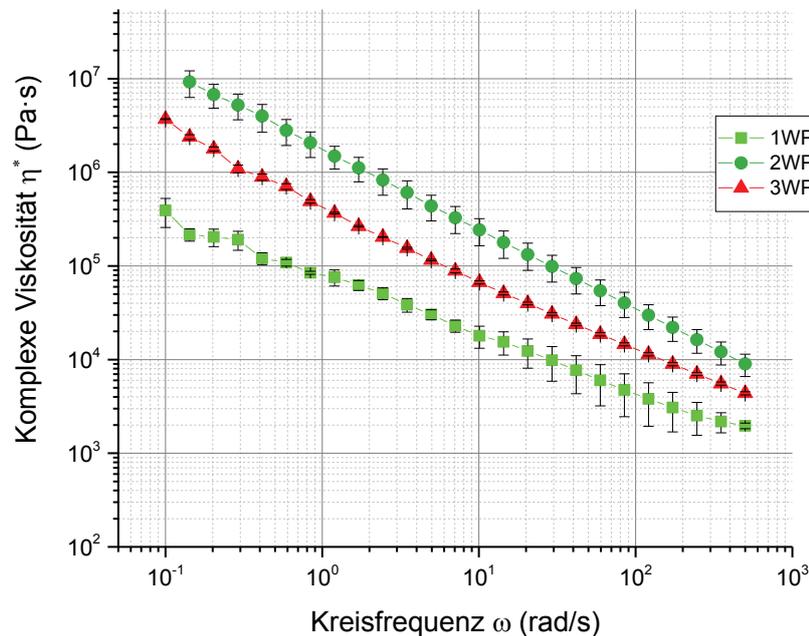


Abbildung 26: Viskositätskurven der hochgefüllten WPC-Spritzgusstypen

Bekannte Fehlereinflüsse von hochgefüllten Polymeren auf deren rheologische Untersuchung, wie Wandgleiten, Umlagerungen und Entmischung sind bereits in mehreren Veröffentlichungen berichtet worden [3, 26]. Darüber hinaus wirken sich Fehler in der Probenvorbereitung und Messvorbereitung auf die Messergebnisse aus. Beim Pressen der Probenplättchen wird bei einem Materialüberschuss das überschüssige Polymer im Spalt zwischen Pressfläche und Formplatte herausgedrückt. Durch den mikrometer-großen Spalt kann nur das dünnflüssige Polymer austreten, die Holzfasern werden zurückgehalten. Dies kann zu einer lokalen Konzentrationsänderung in der Probe kommen. Dieser erhöhte Füllstoffgehalt kann in einer Verfälschung der Viskositätsmessung zu höher Werte resultieren.

Regressionsmodell

Die Viskositätskurven wurden mittels Cross-Ansatz approximiert, da dieser in der Polyflow-Software verwendet wurde. In Abbildung 27 wird die Approximation an die Viskositätskurve anhand von 8WF-30 gezeigt. Die Polyfit-Funktion von Origin berechnet die Konstanten der Gleichung, die in der Tabelle im Diagramm angegeben sind. Diese Konstanten werden für die Simulation in Polyflow benötigt. Die Konstanten aller Materialien sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

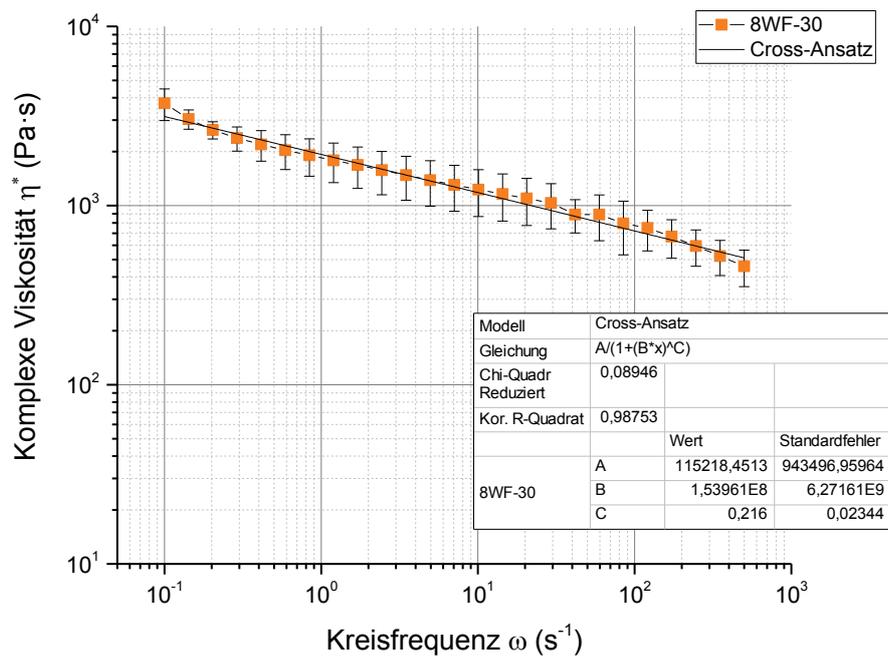


Abbildung 27: Approximation der Viskositätskurve mit Cross-Ansatz von 8WF-30

Tabelle 7: Stoffkonstanten aus der rheologischen Messung für den Cross-Ansatz

Cross-Ansatz: $\eta = \frac{A}{1 + (B \cdot \dot{\gamma})^C}$				
Probe	Material	A (Pa·s)	B (s)	C (/)
1	1WPC-PP-50	$2,53 \cdot 10^6$	313,9	0,601
2	2WPC-PP-60	$2,11 \cdot 10^8$	268,5	0,854
3	3WPC-PE-50	$4,66 \cdot 10^{12}$	$2,51 \cdot 10^8$	0,834
4	4WPC-PLA-60	-	-	-
5	5AB-V2	$2,36 \cdot 10^2$	$3,38 \cdot 10^{-2}$	0,586
6	6AB-V3-15	$4,18 \cdot 10^4$	$3,40 \cdot 10^5$	0,230
7	7AB-1117	$2,01 \cdot 10^3$	$9,37 \cdot 10^5$	0,109
8	8WF-30	$1,15 \cdot 10^5$	$1,54 \cdot 10^8$	0,216
9	9BB-20	$3,82 \cdot 10^3$	3,73	0,273
10	PLA pur	$1,50 \cdot 10^3$	$6,56 \cdot 10^{-3}$	0,724

4.2.3 Stationärer Versuch

Beim stationären Rotationsversuch wird überprüft, ob das Fließverhalten des Materials unabhängig von der Art der mechanischen Belastung ist. In Abbildung 28 wird zur Überprüfung der Cox-Merz Regel das Ergebnis des stationären Versuchs von unverstärktem PLA gezeigt. Dazu werden Scherviskosität η und komplexe Viskosität η^* über die Scherrate bzw. der Kreisfrequenz aufgetragen. Zudem wird die Normalkraft, die während dem stationären Versuch gemessen wurde, dargestellt. Die Normalkraft steigt aufgrund des Weissenberg-Effekts linear an, wie im Diagramm durch die angelegte Tangente veranschaulicht ist. Kommt es zu einem Abweichen der Gerade, ist es ein Indiz dafür, dass die Probe entweder gerissen ist oder aus dem Messspalt herausgeschleudert wurde. Ab diesem Punkt knickt die Viskositätskurve nach unten ab und die Werte für die gemessene Scherviskosität sind nicht mehr gültig [33]. Vergleicht man das Plateau der beiden Messungen, liegen die Werte in tolerierbarer Abweichung und erfüllen die Bedingung für die Cox-Merz-Regel. Somit kann die Kreisfrequenz der Schergeschwindigkeit gleichgesetzt werden.

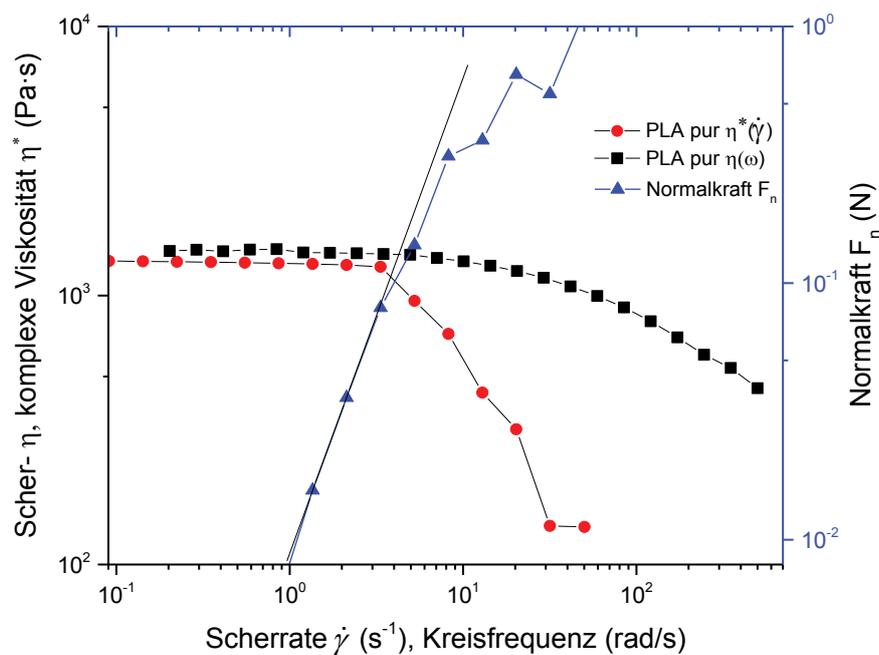


Abbildung 28: Pures PLA zeigt typisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen

Das Biopolymer 5AB-V2 von Tecnar zeigt einen ähnlichen Verlauf, wie das pure PLA (Abbildung 29). Die Normalkraft verläuft bis zu einer gewissen Scherrate linear und weicht dann von der Geraden ab. Vor diesem Punkt sind die beiden Viskositätsverläufe auf gleichem Niveau. Dies bedeutet, dass auch für dieses Material die Cox-Merz-Regel gültig ist.

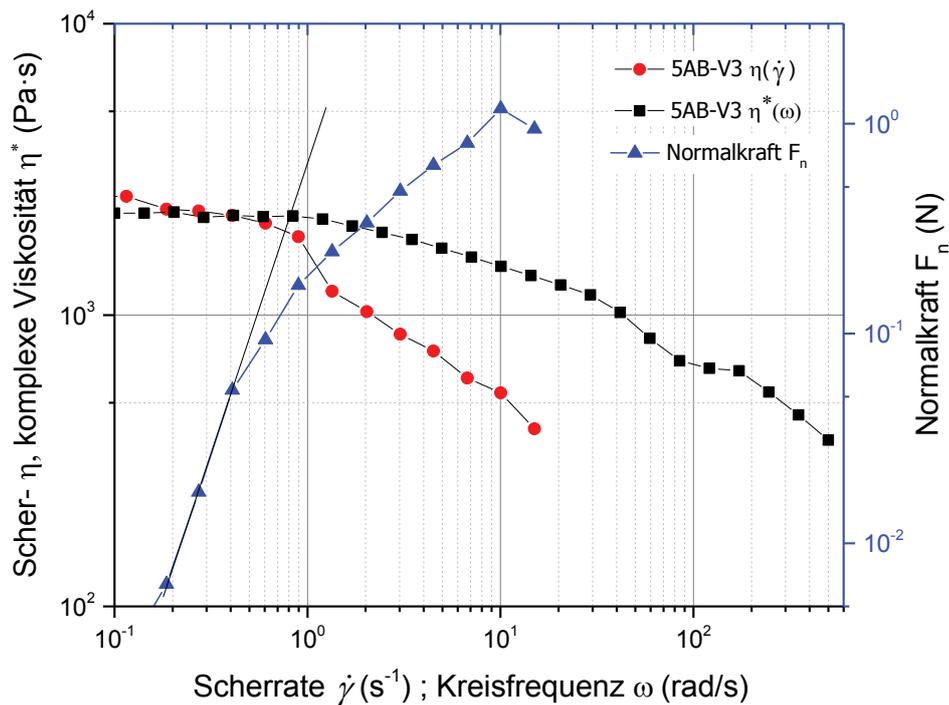


Abbildung 29: Gültigkeit der Cox-Merz-Regel für 5AB-V2

Bei den übrigen Materialien zeigte der Vergleich zwischen oszillatorischer und stationärer Messung keine ausreichende Übereinstimmung, sodass für diese Materialien die Cox-Merz-Regel nicht zutrifft. Als Beispiel wird das holzgefüllte Filament 8WF-30 von Colorfabb in Abbildung 30 dargestellt.

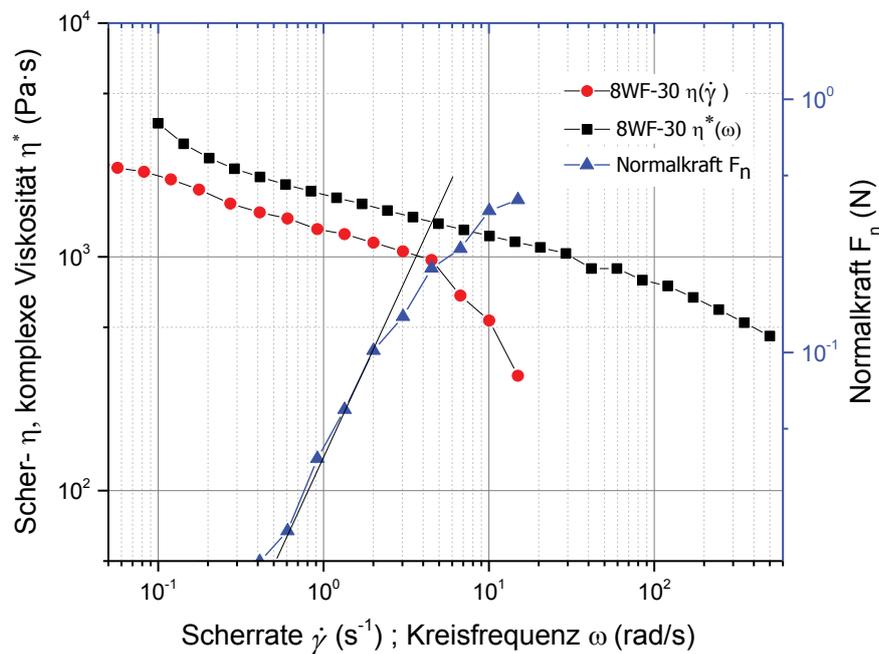


Abbildung 30: Abweichen zwischen oszillatorischer und stationärer Messung von 8WF-30

Hochgefüllte Systeme lassen sich mit dem stationären Versuch schlecht untersuchen, da die Holzfasen ein langsames Fließen verhindern. Grund dafür sind, laut Geiger [31], interpartikuläre Wechselwirkungen. Die fortlaufende Deformation hat hohen Spannungen in der Probe zufolge, sodass diese beschädigt wird oder Wandgleiten auftritt. Die Art der Scherbelastung führt zu unterschiedlichen rheologischen Effekten und hat einen Einfluss auf das Fließverhalten. Folglich ist die Cox-Merz-Regel für hochgefüllte Materialien nicht anwendbar, was den Erwartungen entspricht [16]. Bei hohen Scherraten zeigt sich eine Spaltentleerung, die durch Umlagerungen von großen Holzpartikeln ausgelöst werden kann. Abbildung 31 zeigt eine WPC-Probe, die während des stationären Versuchs aus dem Probenspalt geschleudert wurde. Somit ist die Bestimmung der Scherviskosität nur in sehr niedrigem Schergeschwindigkeitsbereich möglich. Ein Extrapolieren hin zu höheren Scherraten kann hier nicht durchgeführt werden.

Dieser Unterschied des Fließverhaltens bei stationärer und oszillatorischer Belastung kann sich auch auf die Simulation auswirken, da die Scherung in der 3D-Düse stationär ist. Womöglich führt die Annahme der komplexen Viskosität zu verfälschten Ergebnissen. Da jedoch eine Bestimmung der Viskosität bei stationärer Schergeschwindigkeit am Rotationsrheometer, sowie am Kapillarrheometer für hochgefüllte Materialien schwierig ist, reicht der Wert der komplexen Viskosität für eine Näherung aus.



Abbildung 31: WPC-Probe wurde nach stationärem Versuch aus dem Messspalt herausgeschleudert

4.3 Polyflow Simulation

Der Fokus der Simulation lag darin den Druckabfall in der 3D-Druckdüse der unterschiedlichen Materialien zu ermitteln und daraus eine Aussage über die verarbeitbaren Materialeigenschaften zu schließen. Weiters wurden auch Fließgeschwindigkeitsprofile und Schergeschwindigkeiten berechnet und mit der analytischen Rechnung verglichen. Abbildung 32 zeigt das Ergebnis der Polyflow-Simulation für die Berechnung des Druckabfalls für das holzgefüllte Filament von Colorfabb (8WF-30) bei 0,5 mm Düsendurchmesser. Ein Maßstab gibt die Größenverhältnisse der Düse an. Die farbliche Skala zeigt den Druckverlauf über die gesamte Länge der Düse. Der Druck, der am Düsenaustritt durch die Quellströmung am Druckbett verursacht wird, wurde vernachlässigt. Um den Druck der Quellströmung bei fahrender Düse zu ermitteln, müssen noch weitere Simulationen durchgeführt werden.

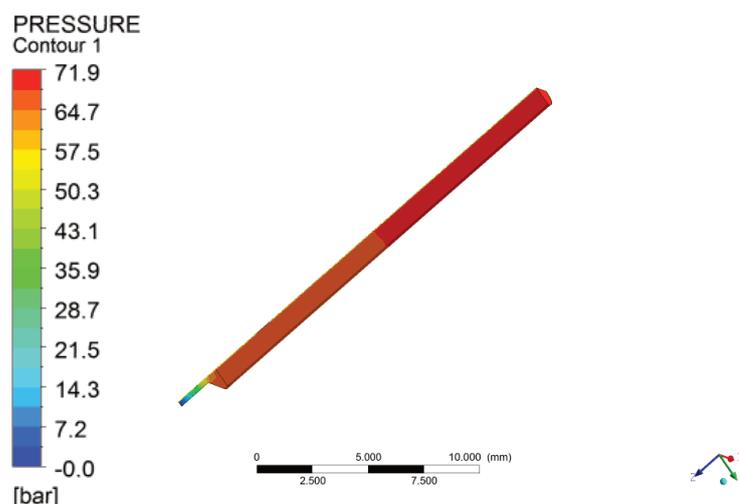


Abbildung 32: Ergebnis der Polyflow-Simulation für die Berechnung des Druckabfalls für 8WF-30 bei 0,5 mm Düsendurchmesser

4. Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 33 und Abbildung 34 werden die Ergebnisse der Fließ- und Schergeschwindigkeiten dargestellt. Aus den Berechnungen geht hervor, dass die beiden Geschwindigkeiten im Eingangsbereich der Düse sehr gering sind, da das Filament mit 4 mm/s eingezogen wird. Die Geschwindigkeit am Rand ist Null, da Wandhaften vorausgesetzt wird. Erst in der Verjüngung des Düsenquerschnitts zu 0,5 mm steigt die Fließgeschwindigkeit in der Düsenmitte auf über 100 mm/s an. Das hat auch eine höhere Scherung zufolge, die am Randbereich des Düsenaustritts über 800 s^{-1} beträgt (siehe Abbildung 34).

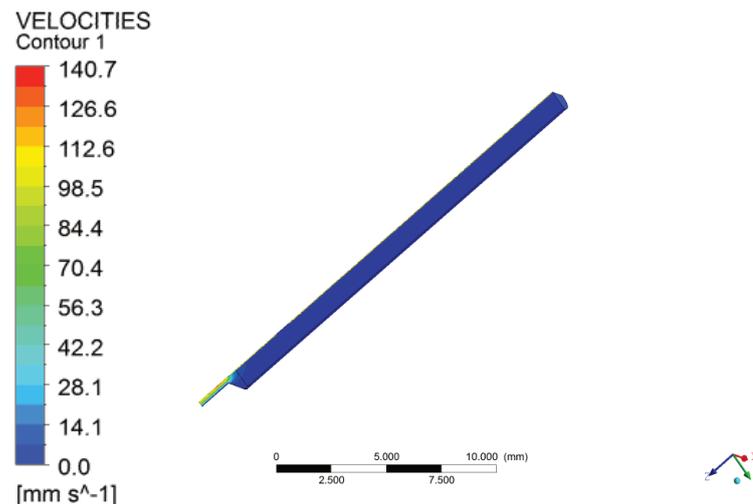


Abbildung 33: Ergebnis der Polyflow-Simulation für die Berechnung der Fließgeschwindigkeit für 8WF-30 bei 0,5 mm Düsendurchmesser

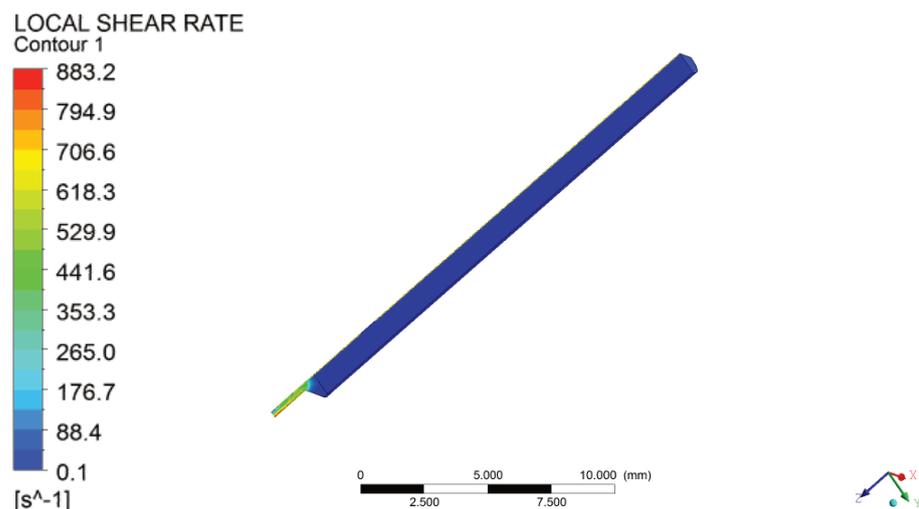


Abbildung 34: Ergebnis der Polyflow-Simulation für die Berechnung der Schergeschwindigkeit für 8WF-30 bei 0,5 mm Düsendurchmesser

Die Parameter für die Schergeschwindigkeiten bei den rheologischen Messungen basieren auf den Ergebnissen der analytischen Rechnung, welche mit den Ergebnissen der Polyflow-

Simulation gut übereinstimmen. In Tabelle 8 werden die Ergebnisse der analytischen Berechnung und der Polyflow-Simulation gegenübergestellt und verglichen. Die angenommene Viskosität der Berechnung unterscheidet sich von der gemessenen Viskosität des WPC-Filaments, wodurch sich auch Unterschiede in der Druckberechnung ergeben. Beim Vergleich der Geschwindigkeiten zwischen analytischer Rechnung und Simulation muss berücksichtigt werden, dass bei der ersteren die mittlere Geschwindigkeit berechnet wurde.

Tabelle 8: Gegenüberstellung der analytischen Rechnung und der Polyflow Simulation für das 8WF-30

Parameters	Analytische Berechnung	Polyflow Simulation
Viskosität (Pa·s)	224	450
Scherrate (s ⁻¹)	840	880
Fließgeschwindigkeit (mm/s)	54	100
Druck (bar)	27,6	55

In Tabelle 9 werden die Ergebnisse der Simulation in die vier Werkstoffgruppen, hochgefüllte WPC >50 Gew.-%, Biopolymere, WPC-Filamente von Colorfabb und pures PLA zusammengefasst. Es ist deutlich zu erkennen, dass die hochgefüllten Polymere durchschnittlich auf einem höheren Druck-Niveau sind als die restlichen Materialien. Dies hängt sehr stark mit dem Ergebnis der rheologischen Analyse zusammen, da eine höhere Viskosität einen höheren Druck erfordert. Die restlichen Werkstoffe liegen eng beieinander, da sie auch ähnliche Viskositätskurven haben. Die Scherrate hängt von der Viskosität ab und ist somit bei jedem Material unterschiedlich. Wie zu erwarten nimmt der Druck mit steigendem Düsendurchmesser ab. Dennoch ist der Druckbedarf für hochgefüllte Materialien auch bei größeren Durchmessern viel höher als der Druckbedarf bei den restlichen Materialien für kleinere Durchmesser.

Tabelle 9: Übersicht über die Ergebnisse der Drücke und Schergeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Düsendurchmessern

Düsendurchmesser (mm)	0,5		0,6		0,8	
Parameters	Scherrate (s ⁻¹)	Druck (bar)	Scherrate (s ⁻¹)	Druck (bar)	Scherrate (s ⁻¹)	Druck (bar)
WPC >50 Gew.-%	1100	320	690	280	300	180
Biopolymere	935	50	625	30	230	15
WPC Filamente	885	55	580	35	235	15
PLA pure	970	55	625	35	220	15

4.4 3D-Druck

Auf dem 3D-Drucker wurde praktisch überprüft, ob die Materialien mit der FFF-Technologie verarbeitbar sind.

4.4.1 Filamentextrusion

Die ungefüllten Biopolymere von Tecnar (5AB-V2, 6AB-V3-15, 7AB-1117) ließen sich problemlos mit konstantem Durchmesser (1,75 mm) extrudieren. Bei der Extrusion der hochgefüllten WPC ergaben sich einige Schwierigkeiten, da das Material nicht leicht zu verarbeiten war. Das Material durfte nicht über 200 °C erhitzt werden, da es sonst zur Schädigung der Holzbestandteile kommen kann. Für die Verarbeitung hochgefüllter Holz-Kunststoff-Verbunde (~60 Gew.-%) sind Einschneckenextruder nicht geeignet, da es zu einer zu hohen Scherbelastung und thermischen Schädigung kommen kann [44]. Zudem ist der Zylinderdurchmesser der Extrusionsanlage 20 mm und wird über einen Konus in der Düse auf 1,75 mm verengt. Diese Kompression des Materials in der Düse erfordert hohe Drücke. Die Holzfasern wurden so stark komprimiert, dass sie nach der Düse auf Grund der Strangaufweitung zu einer rauen Oberfläche führten (siehe Abbildung 35). Die Strangaufweitung wird hauptsächlich von der Düsenlänge und dem Düsenwinkel bestimmt. Beim Düseneintritt erfährt der Kunststoff eine Scherdeformation in Strömungsrichtung, die sich am Düsenaustritt wieder zurückformt. Bei einer längeren Düse haben die Molekülketten mehr Zeit in der Düse zu relaxieren. Die Düsenlänge am Extruder betrug nur 3 mm, so kam es zur Strangaufweitung und somit zu einer rauen Oberfläche. Eine Verstreckung bei der Extrusion ist nicht möglich, da die Fasern keine Kontraktion des Querschnitts zulassen und somit das Filament reißt. Weiters konnte der Strang nicht abgezogen werden, da die Matrix auf den verringerten Querschnitt die Normalkräfte nicht tragen konnte und das Filament riss. Da der Extruder auf maximal 150 bar Schneckenstanzendruck beschränkt war, konnte das hochgefüllte PLA (4WPC-PLA-60) aufgrund des hohen Druckbedarfs nicht extrudiert werden. Die am Extruder produzierten hochgefüllten Filamente waren so spröde, dass sie kaum ohne zu brechen auf die Filamentrollen aufgewickelt werden konnten.

Die hochgefüllten Materialien wurden zusätzlich am Hochdruckkapillar-Rheometer (HKR) extrudiert. Da das Abziehen der Filamente beim herkömmlichen Extruder nicht möglich war, wurde das Material durch eine 1,75 mm Düse auf ein Förderband extrudiert. Der Stempel des HKR bringt höhere Drücke als der Extruder auf. Auf diese Weise konnten aufgrund des diskontinuierlichen Prozesses zwar keine endlos Filamente, sondern nur Teilstücke hergestellt werden, die aber für Testzwecke ausreichend waren. Es stellte sich heraus, dass der Durchmesser wesentlich konstanter war als beim Extrudieren. Zudem war die Oberfläche glatter und frei von ausgefranzten Fasern (siehe Abbildung 35). Das Material 3WPC-PE-50 konnte zwar am HKR zu einem Filament extrudiert werden, aber wies aufgrund der Strangaufweitung einen zu großen Durchmesser auf, sodass das Filament nicht in den Druckkopf des 3D-Druckers eingezogen werden konnte.

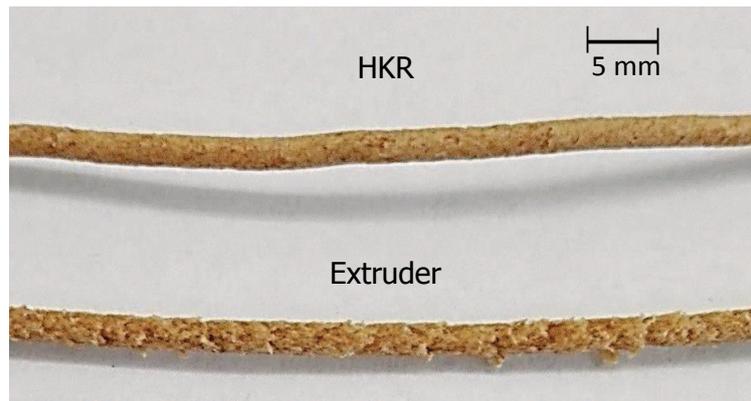


Abbildung 35: Vergleich der Oberflächengüte von Filament aus HKR und Extruder

4.4.2 Test-Druck unterschiedlicher Materialien

Zunächst wurde als Testgeometrie der Schlüsselanhänger der Montanuniversität Leoben gedruckt, um die Einstellungen der einzelnen Materialien zu optimieren bzw. um die Druckbarkeit zu überprüfen. Die Filamente der einzelnen Materialien wurden anhand mehrerer Kriterien bewertet: Verarbeitbarkeit am Extruder bzw. HKR, Oberflächengüte und Flexibilität des Filaments, sowie die Verarbeitung am 3D-Drucker. Zudem werden die Viskosität und der simulierte Druckabfall angeführt und folglich deren Zusammenhang diskutiert. Die Ergebnisse der Testdrucke der einzelnen Materialien werden in Abbildung 36 abgebildet und in Tabelle 10 zusammengefasst.

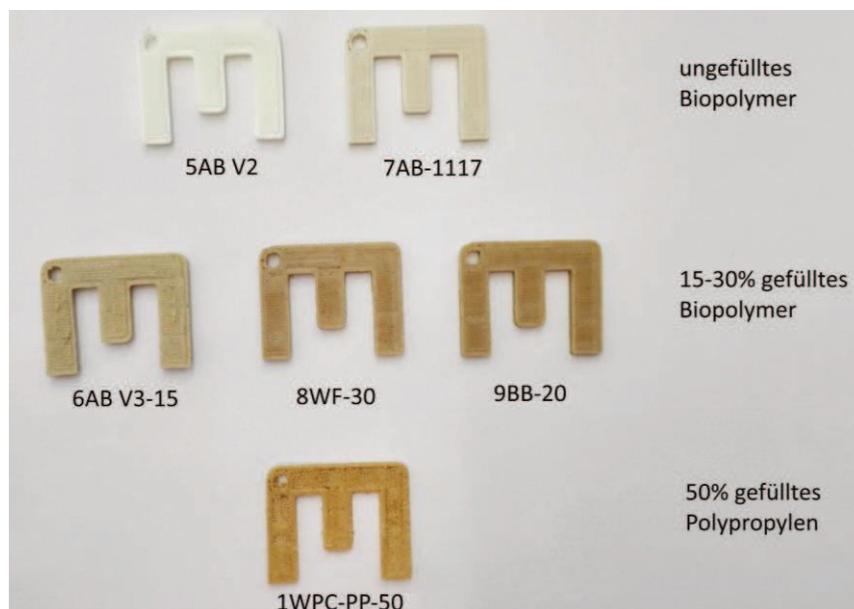


Abbildung 36: M-Schlüsselanhänger aus gefüllten und ungefüllten Materialien

Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse

Abkürzung	Füllstoff (Gew.-%)	Extrusion	HKR	Oberflächengüte Filament	Flexibilität / Elastizität	3D-Druck	Viskosität bei 500 s ⁻¹ (Pa·s)	Druck in der 0,8 mm Düse (bar)
1WPC-PP-50	50	-	+	o	-	o	1900	190
2WPC-PP-60	60	-	+	o	-	-	9000	1750
3WPC-PE-50	50	-	-	o	-	-	4400	480
4WPC-PLA-60	60	-	o	o	-	-	-	-
5AB-V2	-	+	+	+	+	+	370	22
6AB-V3-15	15	+	+	+	+	+	520	22
7AB-1117	-	+	+	+	+	+	200	6
8WF-30	30	+	+	+	+	+	460	20
9BB-20	20	+	+	+	+	+	400	18

Bewertung: gut (+), mittel (o), schlecht/nicht möglich (-)

Die getesteten Biopolymere von Tecnar (5AB-V2, 6AB-V3-15, 7AB-1117) sind ähnlich zu verarbeiten wie herkömmliche PLA Filamente. Der Füllgrad von 15 Gew.-% bei 6AB-V3-15 wirkt sich kaum auf die Verarbeitungseigenschaften aus. Nur die Oberfläche des 3D-gedruckten Teils wird ein wenig rauer als die von 5AB-V2. Bei dem geringen Füllgrad ähnelt das Bauteil keinem klassischen WPC, da kaum Holzfasern zu erkennen sind.

Die 3D-Druck Filamente von Colorfabb sind, wie vom Hersteller versprochen, leicht am Drucker verarbeitbar. Höhere Verarbeitungstemperaturen führen zu einer dunkleren Farbe vom Bauteil. Die Kunststoffmatrix ist zusätzlich hellbraun eingefärbt, um die Holzoptik zu verstärken, aber da an der Oberfläche die Holzfasern nur schwer zu erkennen sind, realisiert das Material nur eine bedingte Holznachahmung.

Bei den hochgefüllten WPC-Spritzgusstypen ließ sich bei einem Düsendurchmesser von 0,5 mm keines der Materialien drucken. Erst nach Vergrößern des Durchmessers auf 0,6 mm bzw. 0,8 mm konnte das 1WPC-PP-50 extrudiert werden. Die übrigen hochgefüllten Materialien konnten trotz erweitern des Düsendurchmessers nicht verarbeitet werden. Diese führten zum Verstopfen der Düse. Dieses Ergebnis weist eine Parallele zu den Rheologie bzw. den Polyflow Simulationen auf. Die Viskosität und somit der Druckverbrauch in der Düse ist zu hoch.

4.4.3 Schwierigkeiten beim Druck von hochgefüllten Materialien

Beim Verarbeiten von hochgefüllten WPC-Filamenten am 3D-Drucker ergaben sich einige Schwierigkeiten. Da die Filamente sehr spröde waren, brachen die Filamente teilweise schon beim Abrollen von der Filamentrolle ab. Das Einfädeln des Filaments zwischen die beiden Einzugsrollen stellte auch eine Herausforderung dar, da das Filament bei Druckbelastung brach. Auch im Druckkopf knickte das Filament aufgrund der Druckkraft ab, da der Abstand zwischen Einzugsrollen und Düse zu groß ist. In Abbildung 37 ist das Einzugsystem mit abgeknicktem Filament dargestellt. Zusätzlich hatte die raue Oberfläche eine hohe Reibung, da im Druckkopf enge Toleranzen des Filaments erforderlich sind. In der Verjüngung, in der Düse, ist ein großer Druck nötig um das Material durch die formgebende Düse zu fördern, was auch in der Simulation berechnet wurde. Dieser große Druck kann von den beiden Einzugsrollen nicht aufgebaut werden und führt dazu, dass die Einzugsrollen durchdrehen und keinen Vorschub mehr bewirken. Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurde die Düse stufenweise von 0,5 mm auf 0,8 mm aufgebohrt. Dies führt laut Simulation zu einer deutlichen Verringerung des Druckbedarfs. So wird es möglich, dass das Material 1WPC-PP-50 zumindest für kurze Zeit durch die Düse extrudiert wurde. Dabei konnte ein Schlüsselanhänger mit halber Dicke hergestellt werden, ehe das Filament die Düse verstopfte. Zudem löste sich das Material, wie erwartet [18, 21], aufgrund der großen Schwindung des Polyolefins vom Druckbett.

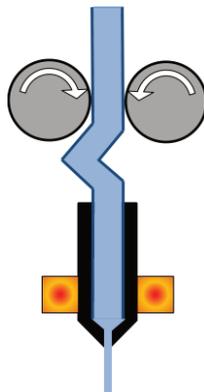


Abbildung 37: Einzugsystem mit zwei Einzugsrollen mit abgeknicktem Filament [12]

4.4.4 Herstellen von Zugprüfkörper mit unterschiedlicher Druckgeometrie

Beim Zugprüfkörper sollten alle Stränge in Zugrichtung ausgelegt sein, um eine unidirektionale Belastung der einzelnen Stränge zu erhalten. Im Schulterbereich führt dies unweigerlich zur Diskontinuität der durchgehenden Stränge. Die dadurch entstandenen Fehlstellen führten bei der Zugprüfung zu einem Versagen im Schulterbereich. Es wurden unterschiedliche Druck-Geometrien getestet, um die Fehlstellen zu vermeiden bzw. zu minimieren. Der Einfluss verschiedener Druckparameter wie Temperatur, Schichtstärke, Winkel und Strangabstand auf die Festigkeit der Bauteile wurde bereits von mehreren Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen untersucht [1, 8, 11, 47, 48, 53]. Allerdings wurde hierzu kein unidirektionaler Strangverlauf gewählt, sondern meist +45°/-45°.

Gerade mit Perimeter

Die Standardeinstellung der UD-Zugstäbe waren zwei Außenschichten (Perimeter). Dies führte zu einer optisch sehr guten Außenschicht mit glatten Konturen, aber zu einer Fehlstelle im Übergang zwischen Prüfkörperquerschnitt und Schulter (siehe Abbildung 38). Die Schulter bewirkt eine homogene Krafteinleitung in den nominellen Querschnitt des Prüfkörpers. So werden mehrdimensionale Spannungszustände, die aufgrund der Einspannung entstehen können kompensiert. Fehlstellen im Querschnitt führen bei der Zugprüfung zum Versagen an dieser Stelle. Da diese Stelle nicht im genormten Querschnitt des Prüfkörpers liegt können die Werte nicht verglichen werden.

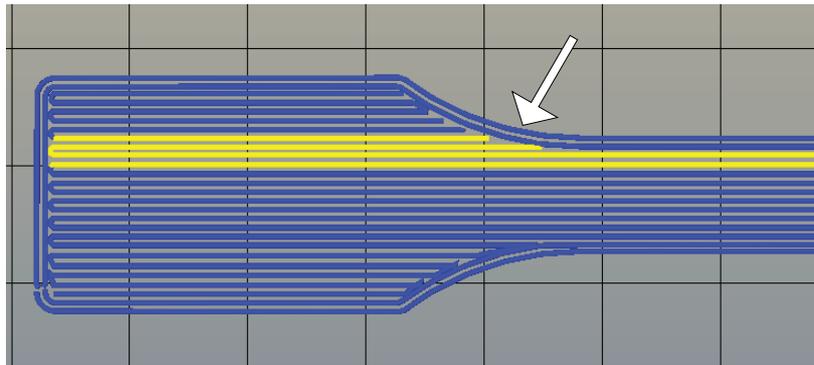


Abbildung 38: Unidirektionaler Zugprüfkörper mit zwei Perimetern

Gerader Querschnitt ohne Perimeter

Um die Undurchgängigkeit der Fasern in der Schulter zu vermeiden, wird der effektive Querschnitt in geraden Strängen gedruckt und die Schultern erst im Nachhinein. Ein durchgehender Querschnitt sollte frei von Fehlstellen sein und somit bessere Ergebnisse liefern. In Abbildung 39 wird der durchgehende Querschnitt in gelb dargestellt und die aufgedickte Schulter blau.

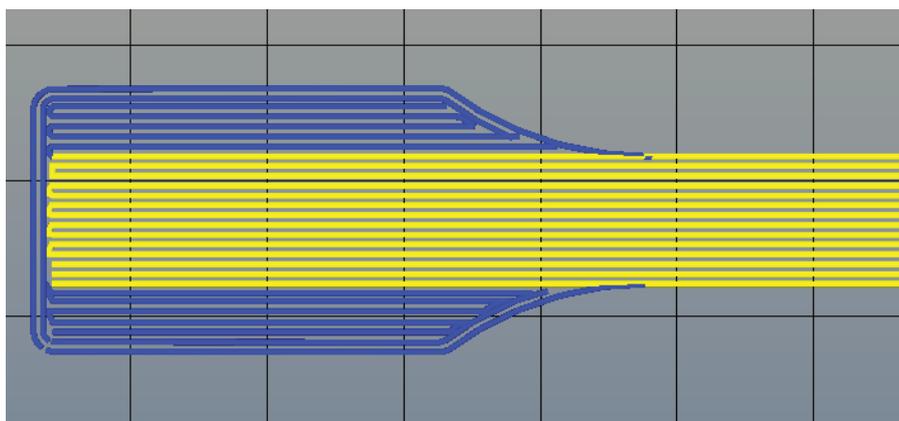


Abbildung 39: Durchgehende Fasern im belasteten Querschnitt

Die Kontur der Schulter soll für eine sanfte Krafteinleitung sorgen und wird bis zur Mündung nachgezogen. Jedoch beim Ab- und Ansetzen der Druckdüse bildet der Tropfen, der beim

„Traveln“ (Düsenbewegung ohne Material zu fördern) entsteht, ausgefranzte Fasern und kleinen Kanten, die zu Spannungsspitzen und zum Versagen der Prüfkörper genau an dieser Stelle führen (siehe Abbildung 40).

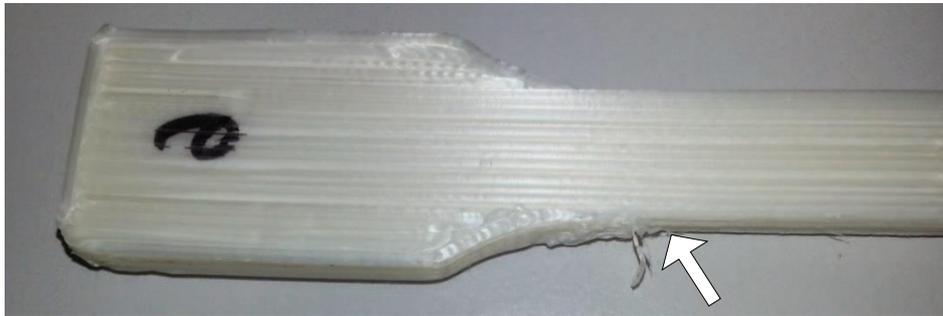


Abbildung 40: Tropfenbildung beim Absetzen im Schulterbereich

Konzentrischer Aufbau

Um die Kräfteinleitung in der Schulter besser zu gewährleisten, wurde eine konzentrische Geometrie angedacht (siehe Abbildung 41). Auch bei dieser Geometrie kommt es unweigerlich zu Fehlstellen in der Mitte der Schulter und es bildet sich ein Keil. Dieser Keil bewirkt bei einer Zugbelastung der Strängen eine Druckkraft nach außen, welche den Spannungszustand im Schulterbereich erhöht und dadurch zum Versagen an dieser Stelle führt.

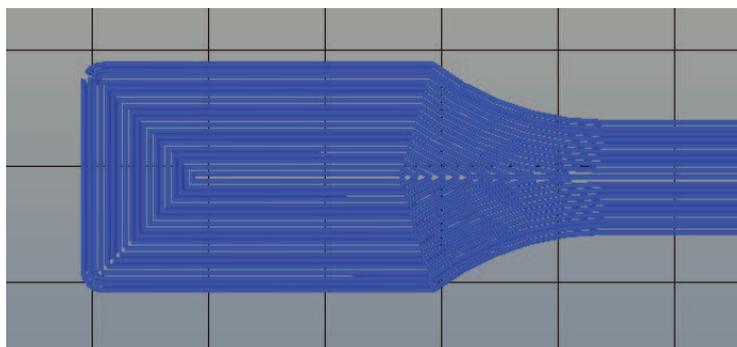


Abbildung 41: Konzentrischer Zugstab mit Fehlstellen in der Mitte

Aufdickung im Einspannbereich

Aus der Faserverbund-Technologie ist die Problematik von unidirektionalen Zugprüfkörpern ein bekanntes Problem, da es, genau wie beim 3D-Druck, im Schulterbereich zu einer Unterbrechung der Fasern kommt und somit nur noch die schwächere Matrix trägt. Als Abhilfe werden an den Zugprüfkörpern Aufleimer aufgebracht, um die Kraft sanft in den effektiven Querschnitt einzuleiten. Diese Aufdickung im Einspannbereich wird durch eine Änderung der Geometrie, wie in Abbildung 42 dargestellt, realisiert. Anders als die normalen Schultern ist diese Aufdickung 90° zur Einspannrichtung gedreht, wodurch eine bessere Haftwirkung erwartet wird.

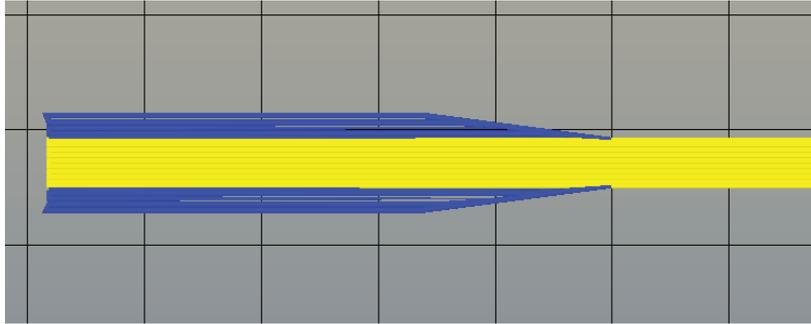


Abbildung 42: Zugstab mit Aufdickung im Einspannbereich

Da keiner der Probekörper im Normbereich riss, kann keine qualitative Aussage über die Festigkeit der Zugprüfkörper getroffen werden. Abbildung 43 zeigt die einzelnen Bruchbilder der unterschiedlichen Geometrien.



Abbildung 43: Bruchbild der unterschiedlichen Geometrien

Weitere Aspekte

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Anzahl der einzelnen Stränge über den Querschnitt. Dies kann bei Skeinforge unter dem Einstellungsregister Inset - Width/Height-ratio (Breite/Höhen-Verhältnis) eingestellt werden. Das gibt das Verhältnis von Breite und Höhe im „Infill“ (Füllung) an. Je größer diese Zahl, desto breiter werden die einzelnen Stränge berechnet und folglich werden weniger Bahnen über den Querschnitt benötigt, um dieselbe Fläche zu bedecken. Ist das Width/Height-Verhältnis größer eingestellt, als die tatsächlich abgelegten Stränge, überlagern sich die einzelnen Stränge nicht und haften nicht untereinander. Bei einem niedrig eingestellten Width/Height-Verhältnis verschmelzen die Stränge besser, jedoch liegen sie so dicht aneinander, dass das Überlagern zu einem Materialüberschuss führt, der sich in die z-Richtung ausbreitet. Infolgedessen wird das gedruckte Objekt dicker, als die eigentliche Abmessung und die Oberfläche der letzten Schicht uneben (siehe Abbildung 44). Wird der Zugprüfkörper in die Backen der Prüfmaschine eingespannt, so greifen die Backen

nur an den Erhöhungen und leiten somit die Kraft unregelmäßig in den Querschnitt ein. Das kann den Spannungszustand im Prüfkörper so verfälschen, dass die Probe ungültig im Schulterbereich bricht. Als Gegenmaßnahme wurden die Schultern in der Einspannfläche plan geschliffen, was zu keiner Verbesserung führte.



Abbildung 44: Unebenheit der Oberfläche aufgrund von Materialüberschuss

Ahn [2] stand vor derselben Herausforderung unidirektionale Prüfkörper aus ABS zu drucken. Er konnte das Problem nur durch eine Änderung der Prüfkörpergeometrie und zusätzlichen Aufleimer, wie es in den Verbundwerkstoffen gehandhabt wird, lösen. Dabei stellte er fest, dass die Festigkeit unidirektional-gedruckter Geometrie bis zu 70 % der Festigkeit von spritzgegossenen Zugprüfkörpern erreichen. Ein Versuch die Zugprüfkörper mit einem Aufleimer zu prüfen fiel ebenfalls negativ aus (siehe Abbildung 45). Weitere Untersuchungen der Festigkeit von unidirektional-gedruckten Prüfkörpern lag nicht im Rahmen dieser Arbeit.



Abbildung 45: UD-gedruckter Zugprüfkörper mit Aufleimer

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die Verarbeitbarkeit von ungefüllten Biopolymeren und hochgefüllten WPC-Materialien am 3D-Drucker, sowie den Einfluss deren Materialeigenschaften auf die Bauteilfestigkeit zu untersuchen. Daraus sollten die Anforderung an ein WPC-Filament in Bezug auf Viskosität, Füllstoffgehalt und Füllstoffgröße definiert werden.

Die Versuche zeigten, dass sich die ungefüllten Biopolymere von Tecnaro problemlos am 3D-Drucker verarbeiten lassen. Auch mit den kommerziell erhältlichen WPC-Filamenten, die für diese Technologie entwickelt wurden, lassen sich Bauteile erzeugen. Allerdings ist das Filament etwas spröde und die Oberfläche der gedruckten Bauteile ist rauer im Vergleich zu den ungefüllten Materialien.

Die bisher erhältlichen WPC-Filamente gelten zwar aufgrund ihres Anteils an nachwachsenden Rohstoffen als umweltfreundlich, aber für eine zufriedenstellende Holzoptik sind Füllstoffgehalt und Partikelgröße, im Vergleich zu den extrudierten WPC-Produkten, zu gering.

Die hochgefüllten WPC-Spritzgusstypen hingegen bereiteten schon beim Extrudieren der Filamente Probleme. Da die Filamente einen Durchmesser von nur 1,75 mm haben und die hochgefüllten Systemen sehr spröde sind, brechen diese leicht. Die Verarbeitung am 3D-Drucker war daher nicht möglich. Das Matrixmaterial (PP und PE) ist außerdem aufgrund der großen Schwindung für den 3D-Druck schlechter geeignet. Beim Spitzgießen wirken die Fasern durch die hohe Schergeschwindigkeit scherverdünnend und können somit leichter verarbeitet werden.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Zusammenhang zwischen Viskosität, simuliertem Druckabfall und Verarbeitbarkeit festgestellt. Die Biopolymere mit niedriger Viskosität benötigen wenig Druck, um durch die 3D-Druckdüse extrudiert zu werden. Bei den hochgefüllten Systemen mit deutlich höherer Viskosität wurde in der Simulation ein höherer Druckbedarf berechnet. Folglich lässt sich daraus schließen, dass die Viskosität ein entscheidender Faktor für die Anforderung an ein Holzgefülltes Material ist. Aber auch weitere Faktoren wie Füllgrad, Fasergröße und Elastizität sind für die Verarbeitbarkeit entscheidend. Um deren Auswirkungen auf die Verarbeitung am 3D-Drucker zu verstehen, sind noch weitere Untersuchungen mit Variationen der Parameter notwendig. Zusätzlich könnte eine Modifikation durch Additive die Filamente elastischer machen, damit das Handling der spröden Materialien erleichtert wird. Forschungen dahingehend werden gerade am WOOD K plus (Holzkompetenzzentrum, Linz) im Zuge einer Dissertation gemacht.

In weiterer Folge muss die Konstruktion des Druckkopfes angepasst werden. Das Einzugssystem funktioniert bei den meisten Druckern gleich. Beim Hage 3Dp-A2 ist der Abstand zwischen Einzugsrollen und Düse größer im Vergleich zu anderen Druckern. Dadurch steigt die Gefahr, dass das Filament im Einzug knickt. Die Einzugsrollen können den erforderlichen Druck nicht aufbauen. Dazu kann die Düse, um den Druckverbrauch zu reduzieren, speziell beim Einlaufwinkel, noch strömungstechnisch optimiert werden.

Ein Drucken eines unidirektionalen Prüfkörpers mit den getesteten Geometrien war nicht möglich. Weitere Untersuchungen über das Materialverhalten beziehungsweise die Festigkeit zwischen den Strängen kann helfen, das Versagen der Bauteile vorher zu sagen.

In Zukunft werden der Markt und die Anwendung des 3D-Drucks weiter wachsen, vor allem für die Fertigung komplexer und hochtechnischer Bauteile, Kleinserien sowie in der Medizintechnik. Jede Technologie der generativen Fertigung hat seine Vor- und Nachteile und erschließt unterschiedliche Anwendungsgebiete. Den Werkstoff WPC für diese Technologie zugänglich zu machen, eröffnet weitere neue Möglichkeiten und sorgt für Nachhaltigkeit. Speziell in der Möbelindustrie könnte das generative Fertigungsverfahren revolutionierend für die Herstellung komplexer Designer-Möbel sein. Diese Arbeit war ein erster Schritt, um grundlegendes Verständnis aufzubauen und die Grenzen der bisherigen Technologie herauszufinden. Um diese Vision zu verwirklichen muss die Forschung und Entwicklung dahingehend vorangetrieben werden.

6 Abkürzungen und Symbole

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
3D	3-Dimensional	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
CLIP	Continuous Liquid Interface Production	
DSC	Differential Scanning Calorimetry	
G'	Speichermodul	MPa
G''	Verlustmodul	MPa
H	Enthalpie	J
HKR	Hochdruckkapillarrheometer	
LVE	Linear viskoelastisch	
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
NC	Numerical Controlled	
\dot{Q}	Wärmestrom	W
$\tan\delta$	Verlustfaktor	-
T_p	Probentemperatur	°C
T_R	Referenztemperatur	°C
UD	unidirektional	
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
v	Fließgeschwindigkeit	m/s
\bar{v}	Mittlere Fließgeschwindigkeit	m/s
WPC	Wood Plastic Compstites	
$\hat{\gamma}$	Deformationsamplitude	%
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit	s ⁻¹
ΔH	Änderung der Enthalpie	J
ΔT	Temperaturdifferenz	°C
η	Viskosität	Pa·s
η^*	Komplexe Viskosität	Pa·s
η_0	Nullviskosität	Pa·s
τ	Schubspannung	N/m ² , Pa

1 Literaturverzeichnis

- [1] Afrose, M.F.; Masood, S.H.; Nikzad, M., et al.: Effects of Build Orientations on Tensile Properties of PLA Material Processed by FDM, *Advanced Materials Research* 1044-1045, 2014, S. 31–34
- [2] Ahn, S.; Montero, M.; Odell, D., et al.: Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, *Rapid Prototyping Journal* 8 (4), 2002, S. 248–257
- [3] Ares, A.; Bouza, R.; Pardo, S.G., et al.: Rheological, Mechanical and Thermal Behaviour of Wood Polymer Composites Based on Recycled Polypropylene, *Journal of Polymers and the Environment* 18 (3), 2010, S. 318–325
- [4] Azizi, H.; Ghasemi, I.: Investigation on the dynamic melt rheological properties of polypropylene/wood flour composites, *Polymer Composites* 30 (4), 2009, S. 429–435
- [5] Ciric, D.; Fastermann, P.: *Fabucation. 3D-Druck in der Schule, Die revolutionäre Technologie und ihre Folgen einfach erklärt*, Books on Demand, Norderstedt, 2014
- [6] Crump, S.: Apparatus and method for creating three-dimensional objects, US5121329 A, 1992
- [7] Daniel, M.: *Wood-plastic composites in Europe and North America, A market and technical analysis*, Diplomarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2006
- [8] Di, J.: *Introduction of Fused Deposition Modeling and the Study of Effects of Layer Height and Nozzle Speed on Strength*, Bakkalaureatsarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2015
- [9] Eckelt, A.: *Oscillatory test: Amplitude sweep - Homepage WEE-Solve GmbH*, 2015, <http://www.wee-solve.de/en/amplitude-sweep.html> (abgerufen am: 05.04.2016)
- [10] Ehrenstein, G.W., Riedel, G., Trawiel, P.: *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*, Hanser Verlag, München, 2003
- [11] El-Gizawy, A.S.; Corl, S.; Graybill, B.: *Process-induced Properties of FDM Products*, In: *Proceedings of The ICMET, International Conference on Mechanical Engineering and Technology Congress & Exposition*, 2011
- [12] Fahrni, S.: *April 2015 - 3D Druck*, 2015, <http://sebastianfahrni.blogspot.co.at/2015/04/april-2015-3d-druck.html> (abgerufen am: 4.4.16)
- [13] Fleur, N.: *3-D Printing Just Got 100 Times Faster*, 2015, <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2015/03/3d-printing-just-got-100-times-faster/388051/> (abgerufen am: 02.07.2015)
- [14] Gebhardt, A.: *Generative Fertigungsverfahren, Additive manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*, 4. Aufl., Hanser, München, 2013
- [15] Gibson, I.; Rosen, D.W.; Stucker, B.: *Additive manufacturing technologies, Rapid prototyping to direct digital manufacturing*, Springer, New York, 2010
- [16] Gleissle, W.; Hochstein, B.: *Validity of the Cox–Merz rule for concentrated suspensions*, *Journal of Rheology* 47 (4), 2003, S. 897
- [17] Grellmann, W.: *Kunststoffprüfung*, 3. Aufl., Hanser, München, 2015
- [18] Griffey, J.: *Chapter 3 of Library Technology Reports, Types of Plastics*, vol. 50, no 5, 2014

- [19] Gurr, M., Mülhaupt, R.: Rapid Prototyping, Polymer Science, A Comprehensive Reference, 2012
- [20] Hashmi, S.; Batalha, G.F.; et al: Comprehensive Materials Processing, Elsevier, Oxford, 2014
- [21] Hausman, K.K.; Horne, R.: 3D Printing for dummies
- [22] JELU-WERK: WPC-Anwendung und Produkte, <http://www.jeluplast.com/wpc/jeluplast-dt/anwendungen/> (abgerufen am: 31.3.16)
- [23] Jelwek Sp. z o. o.: Jelwek Watch, <http://jelwek.pl/pl/akcesoria/90-jelwek-watch.html> (abgerufen am: 01.04.16)
- [24] Kahr, S.C.: Wood plastic composites, determination and comparison of the specific energy consumption for WPC compounding methods based on two state-of-the-art formulations, Diplomarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2010
- [25] Kirchhoff, N.; Schröder, C.; Stute, D., et al.: Wood-Plastic-Composites, Rheologische Charakterisierung und Füllverhalten im Spritzgießprozess, Chemie Ingenieur Technik 84 (9), 2012, S. 1584–1589
- [26] Klesov, A.A.: Wood-plastic composites, Wiley-Interscience, Hoboken, N.J, 2007
- [27] Kovshenin, K.: 3D-Drucker im irdischen und außerirdischen Einsatz, 20.2014, <http://www.erkennnshorizont.de/raumfahrt/3d-drucker-im-irdischen-und-auserirdischen-einsatz/> (abgerufen am: 26.04.2016)
- [28] KULICKE, W.-M.: Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen, Hüthig & Wepf Verlag, 1987
- [29] Lechner, M.D.; Gehrke, K.; Nordmeier, E.H., et al.: Makromolekulare Chemie, Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker, 4. Aufl., Birkhäuser, Basel, 2010
- [30] Li, T.Q.; Wolcott, M.P.: Rheology of HDPE–wood composites. I. Steady state shear and extensional flow, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 35 (3), 2004, S. 303–311
- [31] Matthias Musialek, K. Geiger, C. Bonten: WPC-gerechte Werkzeugauslegung, Das Fließverhalten hochgefüllter Formmassen richtig berechnen, 2013, <http://wpc-conference.com/media/files/flyer/13-12-05wpc-journal2013.pdf>
- [32] Mazzanti, V.: Rheological and Thermal Properties of PP-based WPC, AIP Conference Proceedings, AIP Publishing LLC, 2014
- [33] Mezger, T.G.: Das Rheologie-Handbuch, Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern, Farbe und Lack Edition, 3. Aufl., Vincentz Network, Hannover, 2010
- [34] Michaeli, W.: Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk, Bauarten, Gestaltung und Berechnungsmöglichkeiten, 3. Aufl., Hanser, München, 2009
- [35] N.N.: Advanced 3D Print Materials Analysis, BendLay, Laywoo-D3 And LayBrick, 3D Printing For Beginners, 2014, <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-materials-bendlay-laywood-laybrick/> (abgerufen am: 01.04.2016)
- [36] N.N.: Graphische Revue, Das Portal für Mediendesign und -produktion, <http://www.graphische-revue.at/news.php?nid=675>
- [37] N.N.: Lexikon der Kunststoffprüfung, Kapillarrheometer, 2015, <http://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Kapillarrheometer> (abgerufen am: 11.04.2016)

- [38] N.N.: Polyflow in Workbench User's Guide, 2010, <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Polyflow%20in%20ANSYS%20Workbench%20Users%20Guide.pdf> (abgerufen am: 31.03.2016)
- [39] N.N.: Rattan Möbel mit Charakter, ungewöhnlicher Chic für den Garten, deavita.com/gartengestaltung-pflege/patio-bereich/rattan-mobel-charakter-garten.html (abgerufen am: 23.4.16)
- [40] N.N.: Rheologiekurs - Teil 2, 2006, <http://rheologie.homepage.t-online.de/kurs3.html> (abgerufen am: 05.04.2016)
- [41] Oksman, N.K.; Sain, M.: Wood-polymer composites, CRC Press; Woodhead Publishing, Boca Raton, Cambridge, England, 2008
- [42] Pahl, M.; Gleißle, W.; Laun, H.-M.: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere, Kunststofftechnik, 4. Aufl., VDI-Verl., Düsseldorf, 1995
- [43] Pandey, K.: Natural fibre composites for 3D Printing, University of Arcada, 2015
- [44] Radovanovic I.: Verarbeitung und Optimierung der Rezeptur von Wood Plastic Composites (WPC), Osnabrück, 2007
- [45] Ramanath, H.S.; Chandrasekaran, M.; Chua, C.K., et al.: Modelling of Extrusion Behaviour of Biopolymer and Composites in Fused Deposition Modelling, Key Engineering Materials 334-335, 2007, S. 1241–1244
- [46] Schramm G.: Einführung in die Rheologie und Rheometrie, Gebrüder HAAKE GmbH, Karlsruhe, 1995
- [47] Smith, W.C.; Dean, R.W.: Structural characteristics of fused deposition modeling polycarbonate material, Polymer Testing 32 (8), 2013, S. 1306–1312
- [48] Sood, A.K.; Ohdar, R.K.; Mahapatra, S.S.: Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, Materials & Design 31 (1), 2010, S. 287–295
- [49] Stadlbauer W., Sehnal E., Weiermayer L.: Wood Plastic Composites, Neue Wertschöpfung aus Holzspänen Entwicklung einer Holzspänedirekt dosierung Entwicklung eines Extrusionswerkzeuges, 2006
- [50] Svoboda, M.A.: Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, Dissertation an der Montanuniversität Leoben, 2003
- [51] TECNARO GmbH: Arboblend, <http://www.tecnaro.de/deutsch/arboblend.htm?section=arboblend> (abgerufen am: 4.4.16)
- [52] Turner, B.N.; Strong, R.; Gold, S.A.: A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling, Rapid Prototyping Journal 20 (3), 2014, S. 192–204
- [53] Tymrak, B.M.; Kreiger, M.; Pearce, J.M.: Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, Materials & Design 58 (0), 2014, S. 242–246
- [54] Vogt D., K.M.: Wood-Plastic-Composites (WPC), Märkte in Nordamerika, Japan und Europa mit Schwerpunkt auf Deutschland Technische Eigenschaften – Anwendungsgebiete Preise – Märkte – Akteure, 2006
- [55] White, J.L.: Principles of polymer engineering rheology, Wiley, New York, 1990

- [56] Winkler-Ebner, J.: Simulationsgestützte Schneckenengeometrieoptimierung für die Herstellung von nanoverstärkten Polypropylencompounds, Montanuniversität Leoben, 2014

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zukunftsvision: Designer-Möbel aus einem 3D-Drucker [39].....	1
Abbildung 2:	Anwendungsbeispiele von extrudierten und spritzgegossenen WPC-Produkte [22]	2
Abbildung 3:	Übersicht typischer Aufbereitungs- und Produktionsverfahren von WPC [44].	4
Abbildung 4:	Holzprodukte aus dem 3D-Drucker [23, 35].....	5
Abbildung 5:	Schematischer Ablauf vom 3D-Modell bis zum gedruckten Bauteil [27]	6
Abbildung 6:	3D-gedrucktes Mikro-Modell des Brandenburger Tors (L: 2,5 mm; H: 1 mm) [21]	7
Abbildung 7:	Schematische Aufbau eines 3D-Druckers; 1) beheizbares Druckbett, 2) Druckkopf mit zwei Düsen und Einzugsrollen, 3) schichtweise aufgetragenes Material, 4) Stützmaterial, 5) Filamentrollen [19]	9
Abbildung 8:	Komplexität und Designfreiheit von 3D-gedruckten Bauteilen [36].....	9
Abbildung 9:	Schematische DSC-Kurve mit exemplarischen exo- u. endothermen Effekten [10]	11
Abbildung 10:	Schematische Aufbau der DSC-Messkammer [10]	12
Abbildung 11:	Fließverhalten bei Scherversuch zwischen zwei parallelen Platten [17]	12
Abbildung 12:	Typische Fließ- und Viskositätskurven unterschiedlicher Fließverhalten [42].	13
Abbildung 13:	Schema einer oszillatorischen Messung von viskoelastischen Materialien [40]	15
Abbildung 14:	Speicher- und Verlustmodul über die Deformation, um den linear viskoelastischen Bereich zu ermitteln [9]	16
Abbildung 15:	Gegenüberstellung von Viskositätskurven mit Carreau- und CARPOW-Ansatz [31]	18
Abbildung 16:	Strömungsprofil einer newtonschen Flüssigkeit in einem Kreisrohr [37].....	19
Abbildung 17:	Serielle und parallele Anordnung von Düsen	20
Abbildung 18:	Serieller Aufbau der Düse mit unterschiedlichen Zonen	24
Abbildung 19:	Düsengeometrie für die Simulation mit Detail C der Düsenspitze	27
Abbildung 20:	Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527 [17]	28
Abbildung 21:	DSC-Kurve eines gefüllten und ungefüllten Materials (1WPC-PP-50, 5AB-V2)	29
Abbildung 22:	Amplituden-Versuch: Speicher- und Verlustmodul über die Deformation (2WPC-PP-60).....	31
Abbildung 23:	Übersicht über die Viskositätskurven aller Materialien	32

Abbildung 24: Gegenüberstellung der Viskosität der Biopolymere von Tecnar und dem ungefüllten PLA.....	33
Abbildung 25: Vergleich der Viskosität der WPC-Filamente von Colorfabb.....	34
Abbildung 26: Viskositätskurven der hochgefüllten WPC-Spritzgusstypen	35
Abbildung 27: Approximation der Viskositätskurve mit Cross-Ansatz von 8WF-30	36
Abbildung 28: Pures PLA zeigt typisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen	37
Abbildung 29: Gültigkeit der Cox-Merz-Regel für 5AB-V2.....	38
Abbildung 30: Abweichen zwischen oszillatorischer und stationärer Messung von 8WF-30 .	39
Abbildung 31: WPC-Probe wurde nach stationärem Versuch aus dem Messspalt herausgeschleudert	40
Abbildung 32: Ergebnis der Polyflow-Simulation für die Berechnung des Druckabfalls für 8WF-30 bei 0,5 mm Düsendurchmesser	40
Abbildung 33: Ergebnis der Polyflow-Simulation für die Berechnung der Fließgeschwindigkeit für 8WF-30 bei 0,5 mm Düsendurchmesser	41
Abbildung 34: Ergebnis der Polyflow-Simulation für die Berechnung der Schergeschwindigkeit für 8WF-30 bei 0,5 mm Düsendurchmesser	41
Abbildung 35: Vergleich der Oberflächengüte von Filament aus HKR und Extruder.....	44
Abbildung 36: M-Schlüsselanhänger aus gefüllten und ungefüllten Materialien.....	44
Abbildung 37: Einzugssystem mit zwei Einzugsrollen mit abgeknicktem Filament [12]	46
Abbildung 38: Unidirektionaler Zugprüfkörper mit zwei Perimetern	47
Abbildung 39: Durchgehende Fasern im belasteten Querschnitt.....	47
Abbildung 40: Tropfenbildung beim Absetzen im Schulterbereich.....	48
Abbildung 41: Konzentrischer Zugstab mit Fehlstellen in der Mitte	48
Abbildung 42: Zugstab mit Aufdickung im Einspannbereich	49
Abbildung 43: Bruchbild der unterschiedlichen Geometrien	49
Abbildung 44: Unebenheit der Oberfläche aufgrund von Materialüberschuss.....	50
Abbildung 45: UD-gedruckter Zugprüfkörper mit Aufleimer	50

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die verwendeten Materialien	21
Tabelle 2:	Übersicht über die verwendeten Geräte.....	22
Tabelle 3:	Versuchsparameter für DSC-Messungen	22
Tabelle 4:	Zusammenfassung der Angaben und Ergebnisse.....	25
Tabelle 5:	Übersicht über die Versuchsparameter am Rotations-Schwingungsrheometer	26
Tabelle 6:	Ergebnisse der DSC-Messungen.....	30
Tabelle 7:	Stoffkonstanten aus der rheologischen Messung für den Cross-Ansatz	36
Tabelle 8:	Gegenüberstellung der analytischen Rechnung und der Polyflow Simulation für das 8WF-30	42
Tabelle 9:	Übersicht über die Ergebnisse der Drücke und Schergeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Düsendurchmessern	42
Tabelle 10:	Zusammenfassung der Ergebnisse	45

9 Anhang

PRODUKTDATENBLATT
PRODUCT DATA SHEET



WPC PP H50-500-14-KS

Identifikation / Identification

Holzfaser-Kunststoff-Compound
Wood Plastic Composite

Aussehen / Appearance

Granulat / Granulate
ca. 4,5 x 10 mm

Farbe / Colour

Natur / Natural

Faseranteil / Fibre content

[%] 50

Kunststoffanteil / Plastic content

[%] 47

Zusätze / Additives

[%] 3

Trockenverlust / Loss on drying

[%] ~ 1

Schüttgewicht / Bulk density

[g/l] ~ 550

Anwendungen / Applications

Spritzgießen / Injection moulding

Mechanische Kennwerte / Mechanical characteristics

Biegeeigenschaften / Flexural properties

Biegefestigkeit / Flexural strength [MPa] ca. 32

Dehnung Biegefestigkeit / Flexural elongation [%] ca. 5,8

Biegemodul Young / Young's flexural modulus [MPa] ca. 1650

Biegemodul Sehnen / Chordal flexural modulus [MPa] ca. 1630

Zugeigenschaften / Tensile properties

Zugfestigkeit / Tensile strength [MPa] ca. 18

Dehnung Zugfestigkeit / Tensile elongation [%] ca. 5,4

Zugmodul Young / Young's tensile modulus [MPa] ca. 1820

Zugfestigkeit Sehnen / Chordal tensile modulus [MPa] ca. 1795

PRODUKTDATENBLATT
PRODUCT DATA SHEET



Schlageigenschaften / Impact properties

Schlagzähigkeit ohne Kerbe [kJ/m²] ca. 24,0
Impact strength without notch

Schlagzähigkeit mit Kerbe [kJ/m²] ca. 8,5
Impact strength with notch

Dichte / Density ca. 1,1

Sonstige Eigenschaften / Other properties

Fließweg (max. mögl. Gesamtlängelänge 130 cm) [cm] ca. 54
Flow distance (max. possib. flow length 130 cm)

Unsere Merkblätter, Druckschriften und technischen Daten dienen zur Unterrichtung und Beratung. Alle Werte sind Richtwerte. Eine Verbindlichkeit kann hieraus nicht hergeleitet werden. Wir bitten die Verarbeitung und Anwendung der Produkte den jeweiligen besonderen Verhältnissen anzupassen.
Our leaflets, booklets and technical data serve for information and advice. All values are approximate values, and no liability can be derived therefrom. Please adapt product processing and application to the respective special conditions. 01-2013



Natural fibres. Simple and effective.

JELU-WERK • J. Ehrler GmbH & Co. KG
 Ludwigsmühle • 73494 Rosenberg • Germany
 Tel.: +49 (0)7967 - 90 91 - 0
 team@jelu.de • www.jeluplast.com

PRODUKTDATENBLATT
PRODUCT DATA SHEET



WPC PP H60-500-14

Identifikation / Identification

Holzfaser-Kunststoff-Compound
Wood Plastic Composite

Aussehen / Appearance

Granulat / Granulate
ca. 4,5 x 10 mm

Farbe / Colour

Natur / Natural

Faseranteil / Fibre content

[%] 60

Kunststoffanteil / Plastic content

[%] 37

Zusätze / Additives

[%] 3

Trockenverlust / Loss on drying

[%] ~ 1

Schüttgewicht / Bulk density

[g/l] ~ 550

Anwendungen / Applications

Spritzgießen / Injection moulding

Mechanische Kennwerte / Mechanical characteristics

Biegeeigenschaften / Flexural properties

Biegefestigkeit / Flexural strength [MPa] ca. 58,7

Dehnung Biegefestigkeit / Flexural elongation [%] ca. 2,1

Biegemodul Young / Young's flexural modulus [MPa] ca. 4530

Biegemodul Sehnen / Chordal flexural modulus [MPa] ca. 4550

Zugeigenschaften / Tensile properties

Zugfestigkeit / Tensile strength [MPa] ca. 39,8

Dehnung Zugfestigkeit / Tensile elongation [%] ca. 1,6

Zugmodul Young / Young's tensile modulus [MPa] ca. 5620

Zugfestigkeit Sehnen / Chordal tensile modulus [MPa] ca. 5390

PRODUKTDATENBLATT
PRODUCT DATA SHEET



Schlageigenschaften / Impact properties

Schlagzähigkeit ohne Kerbe <i>Impact strength without notch</i>	[kJ/m ²]	ca. 9,6
Schlagzähigkeit mit Kerbe <i>Impact strength with notch</i>	[kJ/m ²]	ca. 2,9

Dichte / Density ca. 1,1

Sonstige Eigenschaften / Other properties

Fließweg (max. mögl. Gesamtlängelänge 130 cm) [cm] ca. 21
Flow distance (max. possib. flow length 130 cm)

Unsere Merkblätter, Druckschriften und technischen Daten dienen zur Unterrichtung und Beratung. Alle Werte sind Richtwerte. Eine Verbindlichkeit kann hieraus nicht hergeleitet werden. Wir bitten die Verarbeitung und Anwendung der Produkte den jeweiligen besonderen Verhältnissen anzupassen.
Our leaflets, booklets and technical data serve for information and advice. All values are approximate values, and no liability can be derived therefrom. Please adapt product processing and application to the respective special conditions. 01-2013



Natural fibres. Simple and effective.

JELU-WERK • J. Ehrler GmbH & Co. KG
 Ludwigsmühle • 73494 Rosenberg • Germany
 Tel.: +49 (0)7967 - 90 91 - 0
 team@jelu.de • www.jeluplast.com

PRODUKTDATENBLATT
PRODUCT DATA SHEET



WPC PE H50-500-9

Identifikation / Identification

Aussehen / Appearance

Farbe / Colour

Faseranteil / Fibre content

Kunststoffanteil / Plastic content

Zusätze / Additives

Trockenverlust / Loss on drying

Schüttgewicht / Bulk density

Holzfasern-Kunststoff-Compound Wood Plastic Composite

Granulat / Granulate
ca. 4,5 x 10 mm

Natur / Natural

[%] 50

[%] 47

[%] 3

[%] ~ 1

[g/l] ~ 550

Anwendungen / Applications

Spritzgießen / Injection moulding

Mechanische Kennwerte / Mechanical characteristics

Biegeeigenschaften / Flexural properties

Biegefestigkeit / Flexural strength [MPa] ca. 54

Dehnung Biegefestigkeit / Flexural elongation [%] ca. 4,1

Biegemodul Young / Young's flexural modulus [MPa] ca. 3670

Biegemodul Sehnen / Chordal flexural modulus [MPa] ca. 3480

Zugeigenschaften / Tensile properties

Zugfestigkeit / Tensile strength [MPa] ca. 39

Dehnung Zugfestigkeit / Tensile elongation [%] ca. 2,9

Zugmodul Young / Young's tensile modulus [MPa] ca. 4450

Zugfestigkeit Sehnen / Chordal tensile modulus [MPa] ca. 3870

PRODUKTDATENBLATT
PRODUCT DATA SHEET



Schlageigenschaften / Impact properties

Schlagzähigkeit ohne Kerbe <i>Impact strength without notch</i>	[kJ/m ²] ~ 11,4
Schlagzähigkeit mit Kerbe <i>Impact strength with notch</i>	[kJ/m ²] ~ 3,7

Dichte / Density ca. 1,05

Sonstige Eigenschaften / Other properties

Fließweg (max. mögl. Gesamtlängelänge 130 cm) [cm] ca. 27
Flow distance (max. possib. flow length 130 cm)

Unsere Merkblätter, Druckschriften und technischen Daten dienen zur Unterrichtung und Beratung. Alle Werte sind Richtwerte. Eine Verbindlichkeit kann hieraus nicht hergeleitet werden. Wir bitten die Verarbeitung und Anwendung der Produkte den jeweiligen besonderen Verhältnissen anzupassen.
Our leaflets, booklets and technical data serve for information and advice. All values are approximate values, and no liability can be derived therefrom. Please adapt product processing and application to the respective special conditions. 01-2013



Natural fibres. Simple and effective.

JELU-WERK • J. Ehrlar GmbH & Co. KG
 Ludwigsmühle • 73494 Rosenberg • Germany
 Tel.: +49 (0)7967 - 90 91 - 0
 team@jelu.de • www.jeluplast.com

PRODUKTDATENBLATT
PRODUCT DATA SHEET



WPC BIO PLA H60-500-14

Identifikation / Identification

Holzfaser-Kunststoff-Compound
Wood Plastic Composite

Aussehen / *Appearance*

Granulat / *Granulate*
 ca. 4,5 x 10 mm

Farbe / *Colour*

Natur / *Natural*

Faseranteil / *Fibre content*

[%] 60

Kunststoffanteil / *Plastic content*

[%] 37

Zusätze / *Additives*

[%] 3

Trockenverlust / *Loss on drying*

[%] ~ 1

Schüttgewicht / *Bulk density*

[g/l] ~ 550

Anwendungen / Applications

Spritzgießen / Injection moulding

Material ist biologisch abbaubar / Material is biodegradable

Mechanische Kennwerte / Mechanical characteristics

Biegeeigenschaften / Flexural properties

Biegefestigkeit / *Flexural strength* [MPa]

Dehnung Biegefestigkeit / *Flexural elongation* [%]

Biegemodul Young / *Young's flexural modulus* [MPa]

Biegemodul Sehnen / *Chordal flexural modulus* [MPa]

PRODUKTDATENBLATT
PRODUCT DATA SHEET



Zugeigenschaften / Tensile properties

Zugfestigkeit / <i>Tensile strength</i>	[MPa]	ca. 26
Dehnung Zugfestigkeit / <i>Tensile elongation</i>	[%]	ca. 1,2
Zugmodul Young / <i>Young's tensile modulus</i>	[MPa]	ca. 4380
Zugfestigkeit Sehnen / <i>Chordal tensile modulus</i>	[MPa]	

Schlageigenschaften / Impact properties

Schlagzähigkeit ohne Kerbe <i>Impact strength without notch</i>	[kJ/m ²]	~ 7,2
Schlagzähigkeit mit Kerbe <i>Impact strength with notch</i>	[kJ/m ²]	~ 2,8

Dichte / Density ca. 1,21

Sonstige Eigenschaften / Other properties

Fließweg (max. mögl. Gesamtlängelänge 130 cm) [cm]
Flow distance (max. possib. flow length 130 cm)

Unsere Merkblätter, Druckschriften und technischen Daten dienen zur Unterrichtung und Beratung. Alle Werte sind Richtwerte. Eine Verbindlichkeit kann hieraus nicht hergeleitet werden. Wir bitten die Verarbeitung und Anwendung der Produkte den jeweiligen besonderen Verhältnissen anzupassen. *Our leaflets, booklets and technical data serve for information and advice. All values are approximate values, and no liability can be derived therefrom. Please adapt product processing and application to the respective special conditions. 01-2013*




Natural fibres. Simple and effective.

JELU-WERK • J. Ehrler GmbH & Co. KG
 Ludwigmühle • 73494 Rosenberg • Germany
 Tel.: +49 (0)7967 - 90 91 - 0
 team@jelu.de • www.jelu-werk.com



Technical data sheet

Product name: Fibrolon® V 143301 (trial grade)
Date of issue: 04 November 2014

Version: 1.0
 Page 1 / 1

1. Designation of product, preparation and manufacturer

1.1 Trade name: Fibrolon® V 143301 (trial grade)

1.2 Use of product: Biodegradable compound suitable for the production of 3D printing filaments. Contains bamboo fibres.

1.3 Manufacturer: FKUR Kunststoff GmbH
 Siemensring 79
 D - 47 877 Willich
 Phone: + 49 (0) 2154 / 92 51-0
 Fax: + 49 (0) 2154 / 92 51-51
 Mail: info@fkur.com
 Web: www.fkur.com

2. Mechanical properties

Tensile modulus of elasticity	3,300	[MPa]	ISO 527
Tensile strength	46	[MPa]	ISO 527
Tensile strain at tensile strength	5	[%]	ISO 527
Tensile stress at break	36	[MPa]	ISO 527
Tensile strain at break	8	[%]	ISO 527
Flexural modulus	3,600	[MPa]	ISO 178
Flexural strain at break	8	[%]	ISO 178
Flexural stress at 3.5 % strain	70	[MPa]	ISO 178
Notched impact strength (Charpy), RT	3	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1 eA
Impact strength (Charpy), RT	22	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1 eU
Density	1.19	[g/cm ³]	ISO 1183
Bulk density	n/a	[kg/m ³]	ISO 60

3. Thermal properties

Melt temperature	> 155	[°C]	ISO 3146-C
Vicat A softening temperature	n/a	[°C]	ISO 306
Heat distortion temperature HDT B	n/a	[°C]	ISO 75
Melt volume rate (190 °C/2.16 kg)	9 - 12.5	[cm ³ /10 min]	ISO 1133
Melt flow rate (190 °C/2.16 kg)	10 - 14	[g/10 min]	ISO 1133

4. Legal notice

The values listed have been established on standardized test specimens at standard temperature and humidity conditions. The figures should be regarded as guide values only. Under certain conditions the properties can be influenced to a significant extent by the processing conditions.

Neither FKUR Kunststoff GmbH nor its marketing affiliates shall be responsible for the use of this information or of any product, method or equipment mentioned. Customers must undertake their own determination of this product's suitability and completeness for their own use, for the protection of the environment, for the health and safety of their employees and purchasers of their products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product, and nothin herein waives any of the seller's conditions of sale.

The current version of General Conditions of Sale of FKUR Kunststoff GmbH is valid.

The brands „FKuR – Plastics made by nature“ and “BIO-FLEX“ are registered trademarks of FKUR Kunststoff GmbH, according to the international ‘Nice-Classifications’ (NCL9), no. 01, 02 and 17.



Technical data sheet

Product name: Fibrolon® V 135002 (trial grade)

Date of issue: 18 December 2014

Version: 1.1

Designation of product, preparation and manufacturer

Trade name: Fibrolon® V 135002 (trial grade)

Use of product: Polymer blend based on poly lactid acid, suitable for the production of 3D printing filaments. Contains wood fibers.

Manufacturer: FKuR Kunststoff GmbH
Siemensring 79
D - 47 877 Willich
Phone: + 49 (0) 2154 / 92 51-0
Fax: + 49 (0) 2154 / 92 51-51
Mail: info@fkur.com
Web: www.fkur.com

Mechanical properties

Modulus of elasticity	3,290	[MPa]	ISO 527
Tensile strength	46.0	[MPa]	ISO 527
Tensile strain at tensile strength	4.8	[%]	ISO 527
Tensile stress at break	42	[MPa]	ISO 527
Tensile strain at break	5.5	[%]	ISO 527
Flexural modulus	3,930	[MPa]	ISO 178
Flexural strain at break	5	[%]	ISO 178
Flexural stress at 3.5 % strain	70	[MPa]	ISO 178
Notched impact strength (Charpy), RT	4.2	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1 eA
Impact Strength (Charpy), RT	19.0	[kJ/m ²]	ISO 179-1/1 eU
Shore D hardness	n/a	[-]	DIN 53505
Density	1.15	[g/cm ³]	ISO 1183
Bulk density	n/a	[kg/m ³]	ISO 60

The values listed have been established on standardized test specimens (DIN EN ISO 3167, type A) at standard temperature and humidity conditions.

Thermal properties

Melting temperature	> 155	[°C]	ISO 3146-C
Vicat A softening temperature	n/a	[°C]	ISO 306
Heat distortion temperature HDT B	n/a	[°C]	ISO 75
Melt volume rate (190 °C/2.16 kg)	n/a	[cm ³ /10 min]	ISO 1133
Melt flow rate (190 °C/2.16 kg)	4.0 - 7.5	[g/10 min]	ISO 1133

Legal notice

The figures should be regarded as guide values only. Under certain conditions the properties can be influenced to a significant extent by the processing conditions.

Neither FKuR Kunststoff GmbH nor its marketing affiliates shall be responsible for the use of this information or of any product, method or equipment mentioned. Customers must undertake their own determination of this product's suitability and completeness for their own use, for the protection of the environment, for the health and safety of their employees and purchasers of their products. No warranty is made of the merchantability or fitness of any product, and nothing herein waives any of the seller's conditions of sale.

The current version of General Conditions of Sale of FKuR Kunststoff GmbH is valid.

The brands „FKuR – Plastics made by nature“ and „BIO-FLEX“ are registered trademarks of FKuR Kunststoff GmbH, according to the international 'Nice-Classifications' (NCL9), no. 01, 02 and 17.

plastics - made by nature!