

Verarbeitung von Weichkomponenten mithilfe eines Schneckenextruders in der Additiven Fertigung durch Materialextrusion mit Kunststoffgranulaten

Verfasser des Aufsatzes:

Niclas Norman Henrichs (M. Sc.)

Impetus Plastics Engineering GmbH, Bad Aibling, Deutschland

Co-Verfasser des Aufsatzes:

Prof. Dr.-Ing. Jan T. Sehart, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Deutschland;

Prof. Dr.-Ing. Thomas Brinkmann, Impetus Plastics Engineering GmbH, Bad Aibling, Deutschland;

Daniel Michael Berger (M. Sc.), Impetus Plastics Engineering GmbH, Bad Aibling, Deutschland

<https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte-2023-004>

Zusammenfassung Die Additive Fertigung bietet die Möglichkeit, innerhalb einer kurzen Zeitspanne funktionsfähige Prototypen herzustellen (Rapid Prototyping). In diesem Zusammenhang haben sich in den letzten Jahren viele unterschiedliche Additive Fertigungsverfahren und dazugehörige Materialien im Markt etabliert. Trotz der Materialvielfalt im Markt (vor allem im Bereich der Materialextrusion) sind die unterschiedlichen Filamente meist auf die Materialklassen und nicht in Handelstypen untergliedert. Dies hat zur Folge, dass der Endanwender die exakte Zusammensetzung seines verarbeiteten Materials meist nicht kennt.

Die Motivation der Untersuchungen dieser Arbeit ist die additive Verarbeitung von originären Standardgranulaten mithilfe eines eigens entwickelten Schneckenextruders. In diesem Zusammenhang werden hier verschiedene medizinisch zugelassene thermoplastische Elastomere (kurz: TPE) untersucht. TPE-Materialien existieren ebenfalls als Filament, können dort allerdings aufgrund der geringeren Härte und hohen Flexibilität nur ab einer gewissen Shore-Härte (ca. > 70 Shore A) verarbeitet werden. Da allerdings für viele Anwendungen Shore-Härten in niedrigeren Bereichen benötigt werden (bspw. Dichtungen, medizinische Implantate, etc.), beziehen sich die Untersuchungen im Rahmen dieser Veröffentlichung auf drei Materialien unterhalb der oben angegebenen Shore-Härte.

Die Untersuchungen zielen dabei auf den Nachweis einer konstanten Fördermenge und die reproduzierbare Erstellung von Testgeometrien aus TPE-Materialien ab.

Abstract Additive manufacturing offers the possibility of producing functional prototypes within a short period of time (rapid prototyping). In this context, many different additive manufacturing processes and associated materials have become established on the market in recent years. Despite the diversity of materials on the market (especially in the area of material extrusion), the different filaments are mostly subdivided into material classes and not into commercial types. As a result, the end user usually does not know the exact composition of his processed material.

The motivation of the investigations in this thesis is the additive manufacturing of original standard granulates with the help of a specially developed screw extruder. In this context, various medically approved thermoplastic elastomers (TPE for short) are examined here. TPE materials also exist as filaments but can only be processed there from a certain Shore hardness (approx. > 70 Shore A) due to their lower hardness and high flexibility. However, since many applications require Shore hardnesses in lower ranges (e.g. seals, medical implants, etc.), the investigations in this publication refer to three materials below the Shore hardness specified above.

The investigations are aimed at demonstrating a constant flow rate and the reproducible creation of test geometries from TPE materials.

Einleitung

Bei der Additiven Verarbeitung von Kunststoffen ist das Fused Layer Modeling (kurz: FLM) das meistgenutzte Verfahren [1]. Dieses Verfahren der Materialextrusion gemäß DIN EN ISO/ASTM 52900 (MEX-TRB/P) ist auch unter der Bezeichnung Fused Filament Fabrication (kurz FFF) bekannt. Als Ausgangsmaterial wird hier ein Kunststoffdraht, auch Filament genannt, in einer Düse aufgeschmolzen und anschließend auf die so genannte Bauplattform schichtweise aufgetragen. Durch den einfachen Zugang zu kostengünstigen FFF-Maschinen, sowohl für industrielle als auch private Anwendungen, ist dieses Verfahren auf dem Markt weit verbreitet und etabliert [2]. Auch aufgrund der einfachen und sicheren Lagerung sowie dem Handling der Filamentrollen zählt dieses Verfahren mit zu den meist verbreiteten AM-Verfahren im Kunststoffbereich [3]. Für die Filamentherstellung wird dabei Kunststoffgranulat mittels einer Extrusionsanlage zu Filament verarbeitet.

Um die hohen Qualitätsansprüche (z. B. gleichbleibender Durchmesser, hohe Rundheit etc.) von Filamenten zu erfüllen, werden oft Additive hinzugefügt, welche später nicht deklariert werden [4]. Durch den kostenintensiven Herstellungs- und Verpackungsprozesses ist das Filament teuer und kann den Preis im Vergleich zum verwendeten Granulat um das Zehn- bis Zwanzigfache übersteigen [5]. Dies lässt sich am Beispiel eines Standard-Kunststoffes wie ABS beobachten. Während das Spritzgussgranulat etwa 3 €/kg kostet (bei Abnahme eines 25 kg Sackes), werden beim Filament je nach Hersteller zwischen 30 €/kg und 60 €/kg aufgerufen.

Ein weiterer Nachteil bei der Verwendung von Filament ist die eingeschränkte Materialauswahl. Die verarbeiteten Handelstypen sind meist unbekannt und der Endanwender erfährt lediglich, welches Grundmaterial verwendet wird [4]. Dies ist für den Hobbybereich in den meisten Fällen ausreichend, für die industrielle Anwendung allerdings nicht. Hier möchte der Endkunde bzw. der Inverkehrbringer der Produkte meist wissen, um welche Handelstype bzw. welche Additive (Brandschutz, Farben, etc.) es sich handelt.

Neben den klassischen thermoplastischen Materialien wie z. B. PLA, PETG, PA, etc. können auch thermoplastische Elastomere im FFF-Verfahren verarbeitet werden. Unabhängig vom Material wird das Filament mithilfe eines Filamentförderers (in der Regel zwei Reibrollen) in eine beheizte Düse geschoben, in der das Material aufgeschmolzen wird. Dieses Vorgehen ist bei Materialien hoher Steifigkeit problemlos anwendbar, während es bei Materialien geringer Steifigkeit vermehrt zu Problemen kommen kann [6]. Hier ist besonders die geringe Knickfestigkeit des Filaments aus einem Elastomer während des Vorschubs problematisch. Die Förderprobleme zeichnen sich dadurch aus, dass das Filament in Folge der Vorschubkraft knickt und so den Fördermotor oder auch andere Bestandteile der Filamentführung verstopft. Dies ist bei Filamenten unter einer Shore-Härte von < 70 Shore A festzustellen [7, 8]. Dort ist es nur unter hohem Aufwand und in einem sehr langsamen Prozess möglich das Filament zu verarbeiten [7, 8].

Ein weiteres Verfahren, welches ebenfalls der Materialextrusion angehört (gemäß DIN EN ISO/ASTM 52900: MEX-TRB/P), ist das Fused Granular Fabrication (kurz: FGF). In diesem Verfahren werden anstelle von Filamenten die Materialien in Granulatform zugeführt und mithilfe eines Schneckenextruders plastifiziert und dosiert [9]. Auf dem Markt sind bereits unterschiedliche FGF-Maschinen erhältlich (z. B. Arburg Freeformer, Tumaker BigFoot, re3D Gigabot X etc.). Ein Schneckenextruder bietet den Vorteil, die meisten auf den Markt verfügbaren Handelstypen von thermoplastischen Kunststoffen verarbeiten zu können [10]. Um vollen Eingriff auf die Maschinen- und Verarbeitungsparameter

gewährleisten zu können, wird für die diese Arbeit ein eigens entwickelter Forschungsextruder verwendet.

Zusammen mit der zu Anfang erwähnten Designfreiheit von additiv gefertigten Bauteilen bietet das FGF-Verfahren ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten. Die Medizin ist ein interessantes Anwendungsgebiet des FGF-Verfahrens mit Materialien niedriger Shore-Härte [11]. In der Medizin ist es, aufgrund des Zulassungsverfahrens, wichtig, die exakten Inhaltsstoffe der Materialien zu kennen, da diese Zulassungskriterien (bspw. die der Food and Drug Association (kurz: FDA)) erfüllen müssen [12].

Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die Grundlagen der Additiven Fertigung mit einem Schneckenextruder zur Verarbeitung von weichen, medizinisch zugelassenen Materialien untersucht.

1. Grundlegende Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit von weichen Kunststoffgranulaten in der Additiven Fertigung mithilfe eines Schneckenextruders (FGF)

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, werden im Rahmen dieser Veröffentlichung Untersuchungen zur Verarbeitung von weichen Materialien (< 70 Shore A) auf einem FGF-Gerät gezeigt.

Kunststoffgranulate werden in Schneckenextrudern unter Scherung und unter Temperatureintrag plastifiziert. Dies wird sowohl beim Spritzgussprozess als auch beim Extrusionsprozess dazu verwendet, den Ausgangswerkstoff in eine formbare schmelzeförmige Masse zu überführen.

Bereits zu Beginn dieser Veröffentlichung werden die Nachteile des FFF-Verfahrens erläutert. Mithilfe des FGF-Verfahrens gibt es die Möglichkeit, dass aus den anderen Kunststoffformgebungsverfahren bekannte Granulat direkt zu verarbeiten. Bei diesem Verfahren wird mittels eines Schneckenextruders das Granulat aufgeschmolzen, plastifiziert und anschließend mit dem aus dem FFF-Prozess bekannten Ablegeverfahren auf der Bauplattform positioniert. Die Materialdosierung im FGF-Verfahren wird z. B. mithilfe der Schneckendrehzahl des Schneckenextruders verwirklicht.

In Abbildung 1 ist der Aufbau eines Schneckenextruders im FGF-Verfahren dargestellt. Allgemein fällt im Vergleich zum Extrusionsverfahren die um 90° gedrehte Anordnung der Schnecke auf. Durch die vertikale Anordnung (bei der konventionellen Extrusion ist der Extruder in den meisten Fällen horizontal angeordnet) ähnelt der Aufbau der FFF-Methode. Durch den Zuführungstrichter (1) wird das Kunststoffgranulat der Schnecke (2) bzw. dem Schneckenraum (3) zugeführt. Die Schnecke wird mithilfe eines Schrittmotors betrieben und durch die Schneckengänge bzw. die rotatorische Bewegung wird das Kunststoffgranulat von oben nach unten, also von Trichter in Richtung der Düse (4), gefördert. Durch die Heizwendel bzw. Heizmanschetten (je nach Aufbau) wird das Kunststoffgranulat aufgeschmolzen und mit Hilfe der Extruderschnecke plastifiziert und homogenisiert. Die Masse wird anschließend durch die Düse auf die Bauplattform (5) gefördert. Daraus entsteht das Bauteil inkl. potenzieller Stützstruktur (6). Der Fertigungsprozess ab der Düse ist analog anzusehen zu dem Prozess des FFF-Verfahrens.

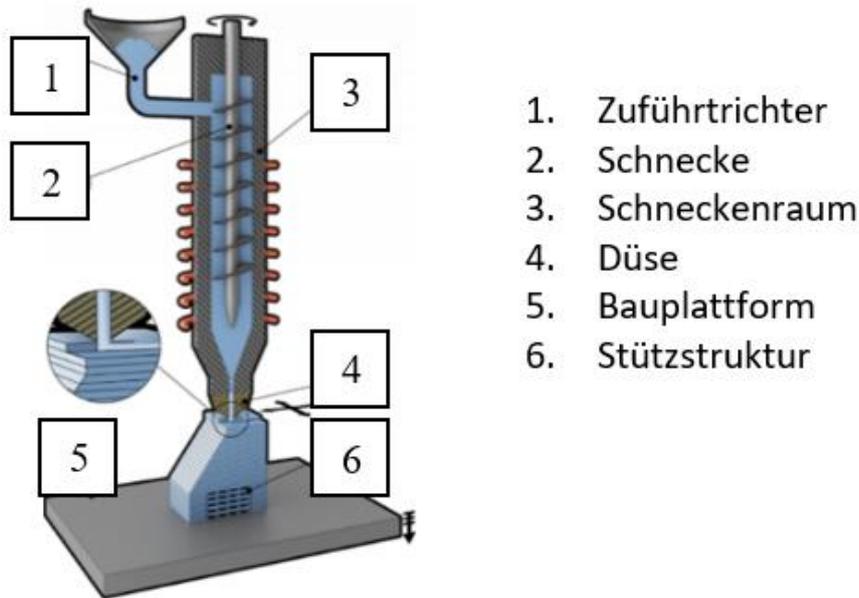


Abbildung 1: Schema eines FGF-Extruders [13]

Ein Großteil der am Markt befindlichen FGF-Maschinen nutzen deutlich größere Düsendurchmesser (> 2 mm), um großflächige und hochvolumige Fertigungsaufträge mit weniger Detaillierungsgrad zu fertigen. Dies ist allerdings für viele technische Bauteile wie Dichtungen, Stoßdämpfer oder medizinische Anwendungen zu grob. Der Düsendurchmesser kann analog dem FFF-Verfahren variiert werden. Da in den meisten Standard-Anwendungen \varnothing 0,4 mm Düsen zum Einsatz kommen [7], werden diese auch in dieser Veröffentlichung untersucht.

Ein Problem, welches unter anderem durch die vertikale Anordnung und den sich abbauenden Innendruck des Extruders ergibt, ist das unkontrollierte Herauslaufen der Kunststoffschmelze. Dies wird beim FFF-Verfahren mithilfe der Retraction-Funktion, also einem Zurückziehen des Filamentstrangs durch Rückwärtsdrehen der Reib-/ Antriebsrollen, realisiert. Aufgrund der bereits aufgeschmolzenen Masse beim FGF-Verfahren hat die Retraction durch das Rückwärtsdrehen der Schnecke nur eine deutlich verringerte Wirkung [14]. Hierdurch kann zwar ein gewisser Rückzugseffekt erzielt werden, dieser reicht aber in der Regel nicht aus, um den Effekt des Stringings (Fäden ziehen) während der Fertigung zu vermeiden. Aus diesem Grund wird in einem anderen Projekt bereits an verschiedenen Verschlussfunktionen gearbeitet. Im Rahmen der hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen wird jedoch noch der Ansatz des Rückwärtsdrehens der Schnecke ausgenutzt, um das Material zurückzuführen.

Aufgrund der zahlreichen Vorteile durch die Materialvielfalt bei der FGF für die Medizintechnik werden im weiteren Verlauf der Untersuchung drei Materialien untersucht, welche eine medizinische Zulassung besitzen.

2. *Verwendete Thermoplastische Elastomere*

Für die Untersuchungen werden drei unterschiedliche Materialien der Firma Kraiburg verwendet (siehe Tabelle 1: Verwendete Materialien und deren Shore-Härte). Diese thermoplastischen Styrol-Block-Copolymere (kurz: TPS) finden in der Medizintechnik eine breite Anwendung. Die

Anwendungsfälle sind vielseitig und würden sich insbesondere durch den Einsatz der Additiven Fertigung durch das FGF-Verfahren zusätzlich vergrößern, um z. B. patientenindividualisierte Bauteile herzustellen. Hierzu könnte die speziell für jeden Patienten angefertigte Dichtung bei einer Beatmungsmaske, aber auch der Einsatz bei patientenindividuellen Prostata- oder Herzkranzgefäßstents zählen.

In der nachfolgenden Tabelle sind die verwendeten Materialien im Detail mit Handelsnamen aufgelistet.

Tabelle 1: Verwendete Materialien mit deren Shore-Härte und Massetemperatur [15, 16, 17]

Material-Typ	Handelstyp	Shore-Härte	Massetemperatur laut Datenblatt
TPS	TM3MED Kraiburg	27 Shore A	200 °C – 250 °C
TPS	TM6MED Kraiburg	56 Shore A	200 °C – 250 °C
TPS	TF4ATL Kraiburg	40 Shore A	200 °C – 250 °C

3. Beschreibung der verwendeten FGF-Testanlage und verwendete Einstellungen

In Abbildung 2 ist eine Detailaufnahme der FGF-Extrusionseinheit zu sehen. Dabei wird über den Trichter links oben (1) das Kunststoffgranulat zugeführt. Mithilfe eines Riemenantriebs (2) und des Schrittmotors (3) wird das Material an drei Heizzonen vorbei (4) nach unten gefördert. Am unteren Ende des Befestigungsbleches ist der Heizblock mit Düse (5) zu sehen.

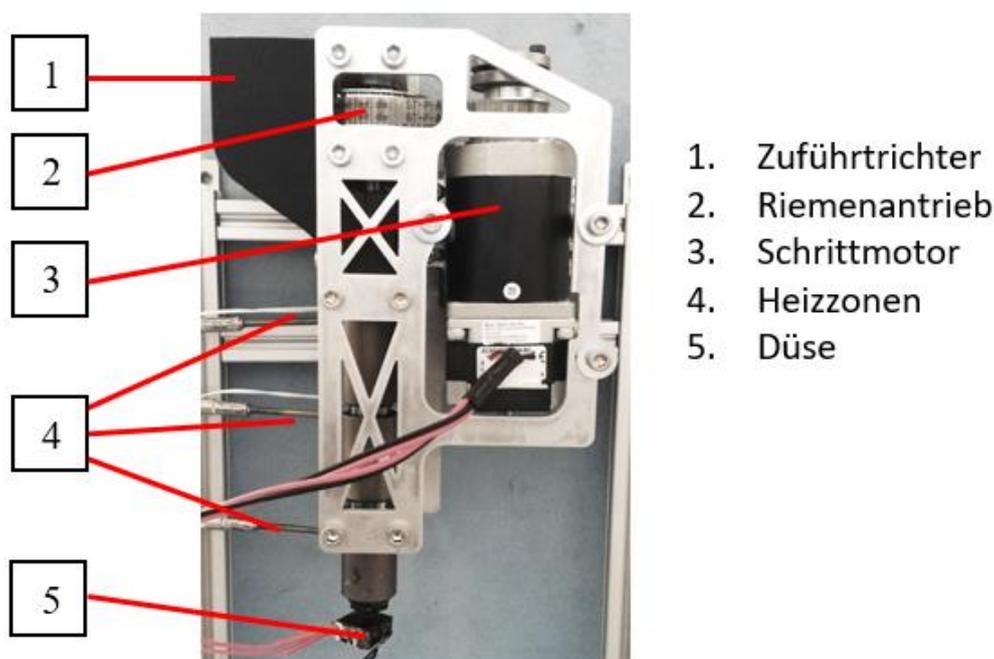


Abbildung 2: Verwendeter Einschneckenextruder [18, 19, 20]

Der Extruder wird für die drei unterschiedlichen TPS-Materialien mit denselben Temperatureinstellungen gefahren, da die Verarbeitungstemperaturen der Materialien ähnlich sind. Die Schneckendrehzahl sowie alle weiteren Verarbeitungsparameter sind ebenfalls für alle drei Materialien identisch gewählt.

(siehe Tabelle 2):

Tabelle 2: Verarbeitungsparameter des Schneckenextruders

Obere Heizzone	70 °C
Mittlere Heizzone	210 °C
Untere Heizzone	220 °C
Düsentemperatur	230 °C
Schneckendrehzahl für Ausbringungsversuche	1,25 1/min
Verfahrgeschwindigkeit während der Fertigung	20 mm/s
Schichtdicke	0,2 mm
Düsendurchmesser	0,4 mm

4. Ausbringungsversuche über Zeit

In diesem Kapitel werden die drei Materialien hinsichtlich Ihres Ausbringungsverhaltens untersucht.

Das Ausbringungsverhalten in Form einer konstanten Förderung des Materials ist maßgeblich für ein fehlerfreies Druckbild. In der Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5 sind jeweils die Ergebnisse von drei wiederholten Versuchen zu sehen, welche die Ausbringung über die Zeit darstellen. Es ist bei allen drei Materialien eine konstante Materialausbringung zu erkennen, was sich über die linear ansteigende Gerade zeigt. Die drei Geraden zeigen vor allem zu Beginn der Tests nahezu deckungsgleich verlaufende Graphen. Sie driften anschließend im Verlauf der Untersuchung ca. 8,4 % (TM3MED), 10,0 % (TM6MED) und 5,8 % (TF4ATL) auseinander. Dies ist aber aufgrund nicht erkennbarer Unter- oder Überextrusionen aus den Untersuchungen der Benchmark-Bauteile aus Kapitel 5 im Rahmen dieser Veröffentlichung zu vernachlässigen.

Das im Mittel ausgebrachte Gewicht bei einem TM3MED liegt bei ca. 4,2 g/15 min, was einer Ausbringungsmenge von 16,8 g/h entspricht.

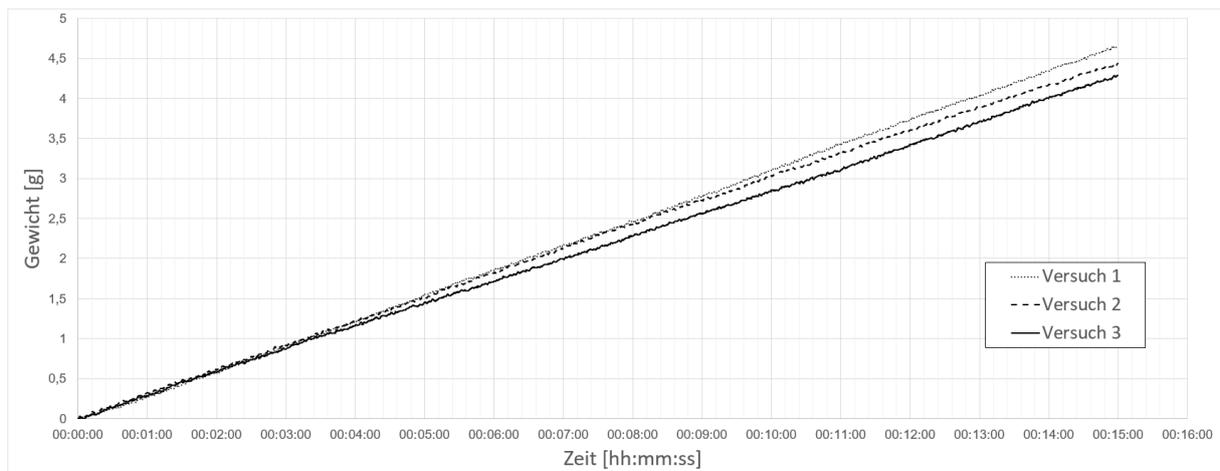


Abbildung 3: Austragsversuch über Zeit - TM3MED

In Abbildung 4 sind die Versuchsergebnisse des Materials TM6MED zu sehen. Hierbei liegen die

Ausbringungsmengen im Mittel bei ca. 4,0 g/15 min (16 g/h).

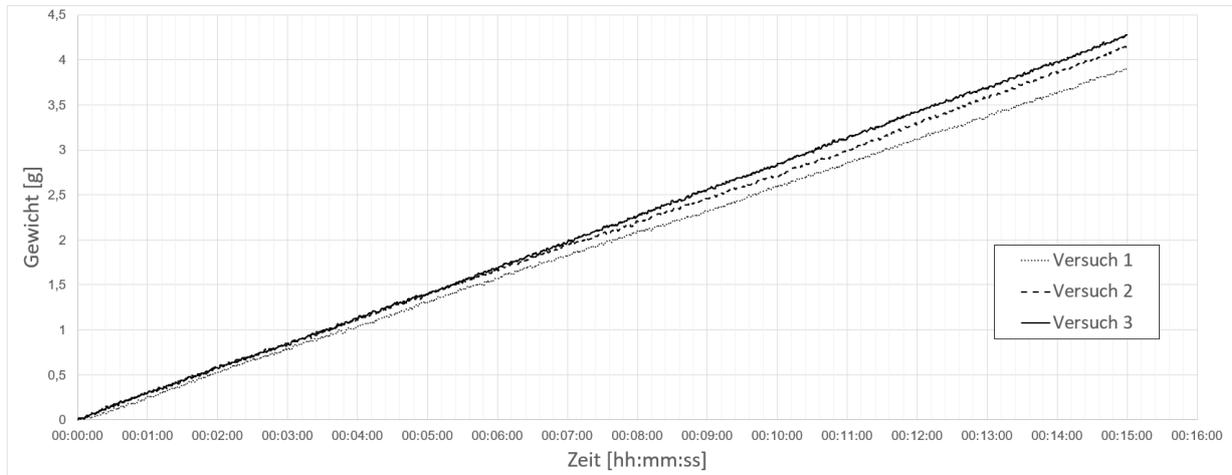


Abbildung 4: Austragsversuch über Zeit – TM6MED

Folgend werden in Abbildung 5 die Austragsversuche des Materials TF4ATL dargestellt. Hierbei liegen die Ausbringungsmengen im Mittel bei ca. 2.4 g/15 min (9,6 g/h).

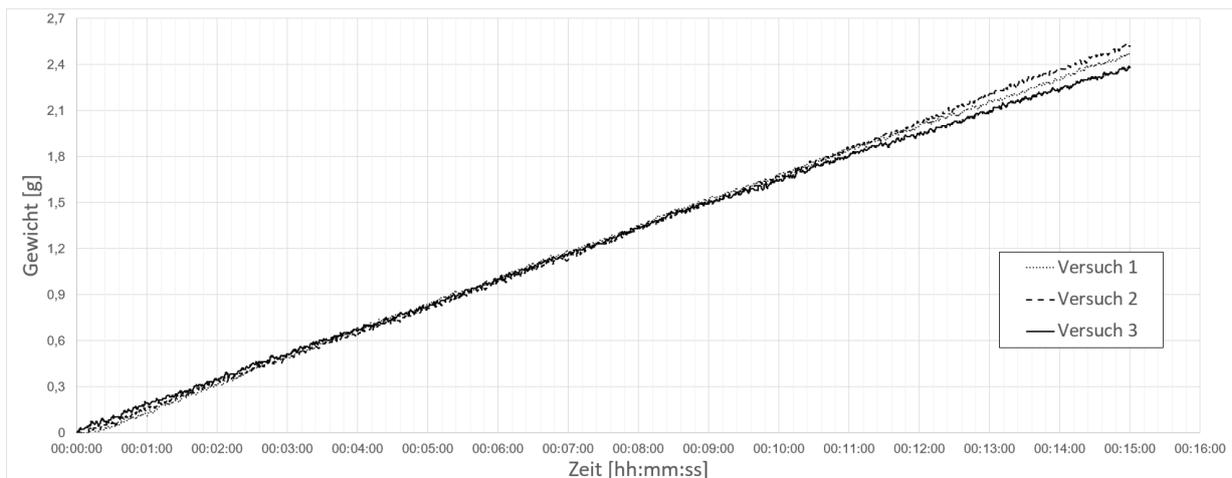


Abbildung 5: Austragsversuche über Zeit - TF4ATL

Tabelle 3: Ergebnisgegenüberstellung Austragsversuche über Zeit

Material	Shore-Härte	Mittlere Ausbringungsmenge	Max. Austragsschwankung um den Mittelwert
TM3MED	27 Shore A	4,2 g /15 min	4,4 %
TF4ATL	40 Shore A	2,4 g/15 min	3,3 %
TM6MED	56 Shore A	4,0 g /15 min	5,0 %

Die Materialien unterscheiden sich in einem hohen Maße in ihrer Austragsmenge über der Zeit. Jeder Graph der drei Wiederholungen pro Material ist allerdings im Rahmen der Messunsicherheit sehr konstant. Hierbei sind bspw. Messungenauigkeiten durch Luftströme von Kühlventilatoren anzuführen. Aufgrund der Ergebnisse kann für die untersuchten Werkstoffklassen mit unterschiedlichen Shore-Härten die Aussage getroffen werden, dass mithilfe dieser Maschine eine Austragung mit einer mittleren

Schwankung von rund 4 % möglich ist, was zu einer sehr guten Ausgangslage für qualitativ hochwertige Druckergebnisse führt. Die Versuche bestätigen auch, dass - im Gegensatz zum FFF-Verfahren - für jedes Material eine eigene Schneckendrehzahl bestimmt werden muss, da die unterschiedlichen Ausstragsmengen über 15 min um bis zu 60 % schwanken. Dies lässt auf unterschiedliche Schmelzeviskositäten der untersuchten Materialien schließen.

5 Benchmarking mithilfe einfacher Testgeometrien

Ziel dieser Arbeit ist es, eine möglichst vereinfachte Testgeometrie mit einer filigranen Innenstruktur herzustellen. Aus diesem Grund werden die Untersuchungen an einer Würfelgeometrie mit einer engen Gitterstruktur im Inneren durchgeführt. Zum einen ist es ein Ziel an der Außenhaut festzustellen, ob etwaige Förderaussetzer oder Einschlüsse zu sehen sind, was für eine inkonstante Förderung des Materials sprechen würde. Zum anderen dienen die engen Überkreuzungen im Inneren dazu, die Möglichkeit zur Verarbeitung von filigranen Strukturen zu untersuchen. Die Düsenbewegung kann bei den Kreuzungspunkten potenziell dazu führen, dass die flexible Wandung bewegt wird und die Geometrie im Inneren des Bauteils aufreißt. In Abbildung 6 ist die Testgeometrie zu sehen. Der Würfel hat eine Kantenlänge von 30 mm in der xy-Ebene. Die Wandstärke beträgt hierbei 1,8 mm. Die Füllung ist mit einer Gitterstruktur (-45° / 45°) dargestellt und hat eine Dichte von 20 %. Die Verfahrensgeschwindigkeit während der Fertigung beträgt 20 mm/s (siehe Tabelle 2). Der Würfel wird bis zu einer Höhe von ca. 10 mm gefertigt. Die Bewegungsrichtung der Düse ist innerhalb der Abbildungen mit gestrichelten Pfeilen dargestellt. Bei dem Material TM6MED (56 Shore A) sind keine materialspezifischen Probleme in der Verarbeitung erkennbar. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, sind die Oberflächen geschlossen und keine Förderaussetzer erkennbar. Die Gitterstruktur ist vollständig gefüllt und ebenfalls ohne Fehl- und Abrisstellen. Es lassen sich lediglich leichte Wellen im Füllmuster erkennen. In der Gesamtheit zeigt sich eine sehr gute Verarbeitung mit den gewählten Parametern.

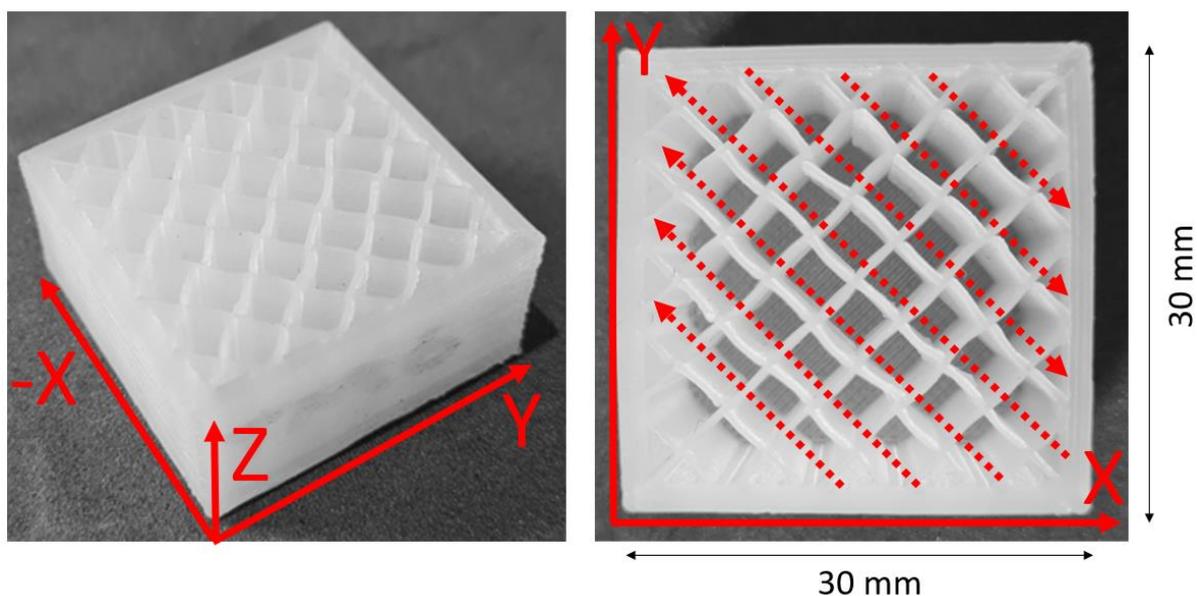


Abbildung 6: Benchmark - TM6MED

Nach der erfolgreichen Durchführung der Fertigung mit TM6MED werden anschließend die gleichen Versuche mit dem Material TF4ATL durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 zu sehen. Dabei ist bei der Betrachtung des äußeren Schichtverbundes ähnlich zu dem härteren Material kein Unterschied zu erkennen, es zeigen sich allerdings die bereits oben erwähnten Probleme. Hierbei wird durch die Düsenbewegung und der flexiblen Wandung eine zu hohe Dehnung auf die Überkreuzung der inneren Schichten ausgeübt. Dies führt zu einem Aufreißen an mehreren Stellen und in vielen verschiedenen Schichten.

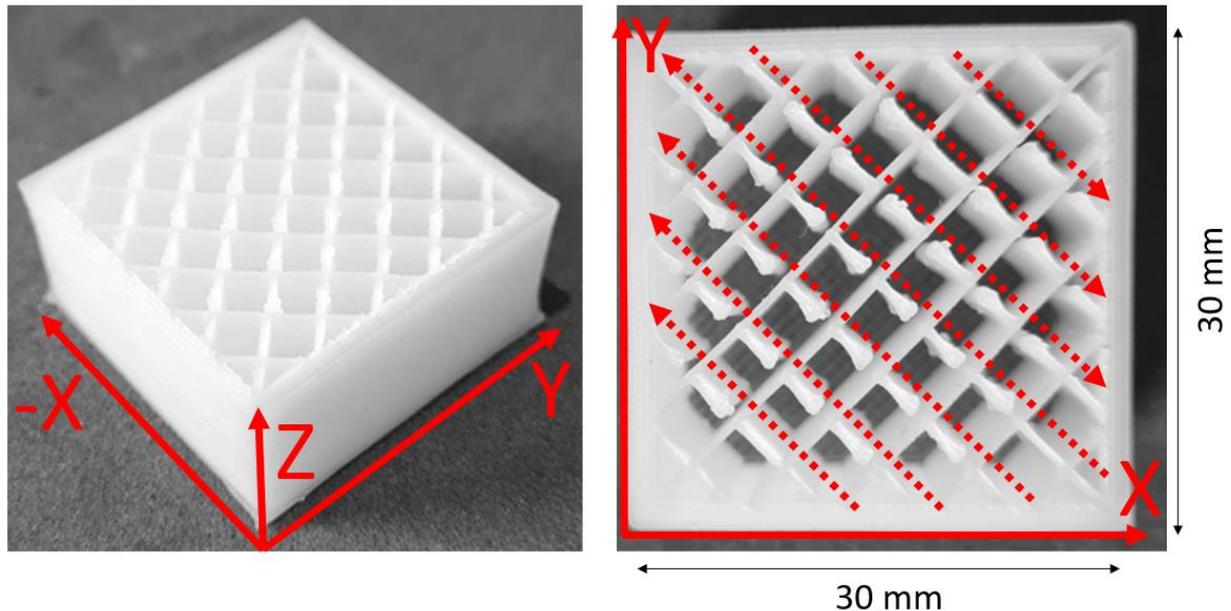


Abbildung 7: Benchmark TF4ATL

Auf dem rechten unteren Bildabschnitt sind die Wandungen an den Kreuzungen miteinander verbunden, da hier ein geringerer „Federweg“ bzw. ein geringeres Zurückfedern des Materials als in der Mitte des Bauteils verursacht wird.

Das dritte Material TM3MED verstärkt die oben gezeigte Problematik deutlich. Dies ist in Abbildung 8 zu sehen. Hier können bei konstanter Druckgeschwindigkeit keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzeugt werden. Die Wandungen an der Außenwand sind regelmäßig und zeigen ebenfalls einen guten Schichtverbund. Der Gitterbereich im Inneren wird allerdings kaum abgebildet. Die Förderung des Materials und die Ablage auf die darunter befindende Schicht ist hierbei nicht mehr möglich. Weitere Untersuchungen und Optimierungen des Prozesses werden aktuell durchgeführt. Grund hierfür könnte eine zu hohe Flexibilität der bereits abgebildeten Bereiche darstellen, da diese von der Extrusionsdüse während der Materialablage verschoben werden können.

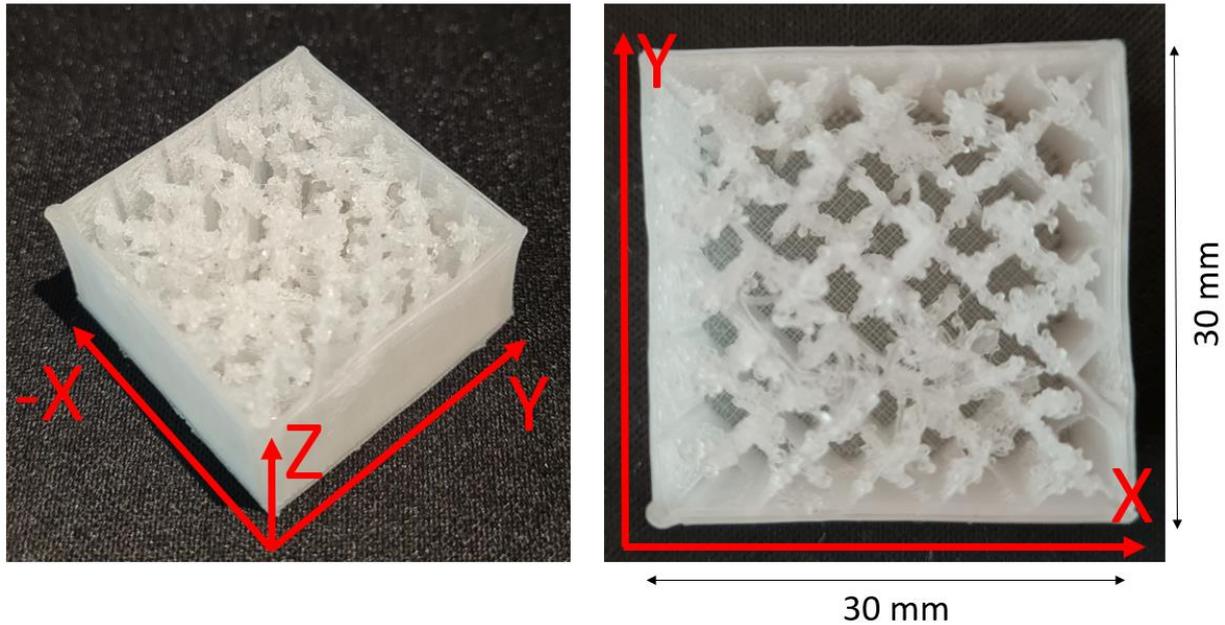


Abbildung 8: Benchmark – TM3MED

6 *Ausblick und weiterführende Untersuchungen*

Wie bereits im vorherigen Kapitel dargestellt, zeigen sich bei allen Materialien interessante Erkenntnisse. Grundsätzlich lassen sich alle drei untersuchten Materialien mithilfe der verwendeten FGF-Maschine verarbeiten. Ebenfalls wird im Rahmen dieser Arbeit der Nachweis erbracht, dass eine kontinuierliche Förderung auch bei geringen Shore-Härten und einer 0,4 mm Düse möglich ist.

Hierbei spielen auch die unterschiedlichen Shore-Härten für die reine Extrusion keine größere Rolle. Lediglich bei der Detailbetrachtung sind hier Unterschiede zu erkennen. Während bei dem Material mit der geringsten Flexibilität (57 Shore A) durchwegs positive Ergebnisse mit einem breiten Verarbeitungsfenster erzielt werden können, zeigen bei den weicheren 40 Shore A und 27 Shore A Materialien Probleme bei der Überkreuzung des Gitters im Inneren des Probekörpers, dem sogenannten Infill.

Durch eine Parameterstudie in Form eines Design of Experiments (kurz: DoE) wird im weiteren Verlauf nach passenden Einstellungen gesucht, um die beschriebenen Verarbeitungsprobleme zu beheben. Anschließend ist geplant, Tests mit kleinerem Düsendurchmessern (0,2 mm und 0,1 mm) und weiteren Materialien durchzuführen. Außerdem sollen im nächsten Schritt bereits komplexere Strukturen, sowohl in der Außengeometrie als auch im Infill, untersucht werden.

Literatur

- [1] I. Durgun, R. Ertan: Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost, *Rapid Prototyping Journal* 20/3: 228-235, 2014 (DOI: 10.1108/RPJ-10-2012-0091)
- [2] S. Singh, D. Singh, C. Prakash, S. Ramakrishna: Current status and future directions of fused filament fabrication, *Journal of Manufacturing Processes* 55, 288-306, 2020 (DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.04.049)
- [3] A. A. Rashid, M. Koç: Fused Filament Fabrication Process: A Review of Numerical Simulation Techniques, *Polymers*, 13, 3534, 2021 (DOI: 10.3390/polym13203534)
- [4] A. Dey, I. N. R. Eagle, N. Yodo: A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5, 69, 2021 (DOI: 10.3390/jmmp5030069)
- [5] S. C. Albu, E. Nutiu: Study in Designing the Extruder for 3D Printers with Pellets, *Acta Marisiensis, Seria Technologica*, 16, No. 1, 2019 (DOI: 10.2478/amset-2019-0004)
- [6] B. N. Turner, R. Strong, S. A. Gold: A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling, *Rapid Prototyping Journal* 20/3, 192-204, 2014 (DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012)
- [7] G. Kim, E. Barocio, B. Pipes, R. Sternkenburg: 3D Printed Thermoplastic Polyurethane Bladder for Manufacturing of Fiber Reinforced Composites, *Additive Manufacturing*, 2019 (DOI: 10.1016/j.addma.2019.100809)
- [8] A. Georgopoulou, L. Egloff, B. Vanderborght, F. Clemens: A Sensorized Soft Pneumatic Actuator, Fabricated with Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Actuators*, 10, 102, 2021 (DOI: 10.3390/act10050102)
- [9] S. C. Altiparmak, V. A. Yardley, Z. Shi, J. Lin: Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives, *Journal of Manufacturing Processes* 83, 607-636, 2022 (DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.09.032)
- [10] J. M. J. Netto, H. T. Idogava, L. E. F. Santos, Z. C. Silveira, P. Romio, J. L. Alves: Screw-assisted 3D printing with granulated materials: a systematic review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 115, 2711-2727, 2021 (DOI: 10.1007/s00170-021-07365-z)

- [11]** S. Whyman, K. M. Arif, J. Potgieter: Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96, 3417-3428, 2018 (DOI: 10.1007/s00170-018-1843-y)
- [12]** M. D. Prima, J. Cobrun, D. Hwang, J. Kelly, A. Khairuzzaman, L. Ricles: Additively manufactured medical products – the FDA perspective, *3D Printing in Medicine*, 2:1, 2016 (DOI: 10.1186/s41205-016-0005-9)
- [13]** Manufacturingguide.com, Internet Stand 04.12.2022, (<https://www.manufacturingguide.com/en/fused-granular-fabrication-fgf>)
- [14]** R. Wick-Joliat, M. Schroffenegger, D. Penner: Multi-material ceramic material extrusion 3D printing with granulated injection molding feedstocks, *Ceramics International*, 49, 2023 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.170>)
- [15]** Datenblatt Thermolast M TM3MED, Kraiburg TPE GmbH & Co. KG
- [16]** Datenblatt Thermolast M TM6MED, Kraiburg TPE GmbH & Co. KG
- [17]** Datenblatt Thermolast K TF4ATL, Kraiburg TPE GmbH & Co. KG
- [18]** B. Schwabl: Inbetriebnahme und Verbesserung der Prozessstabilität eines Schneckenextruders für die Anwendung von Standardgranulat in der Additiven Fertigung, Masterarbeit, TH Rosenheim, 2022
- [19]** J. Mitteregger, M. Konetzki, N. Rolinck: Development and Design of a miniature Screw Extruder, Masterprojekt, TH Rosenheim, 2020
- [20]** J. Hirnböck: Montage, Inbetriebnahme und Prozessfindung eines Prototyp-Granulatextruders auf einer FLM-Maschine, Bachelorarbeit, TH Rosenheim, 2022

Kontaktangaben

M. Sc. Niclas Norman Henrichs
Impetus Plastics Engineering GmbH
Bahnhofstr. 9
D – 83043 Bad Aibling
E-Mail: niclas.henrichs@gmx.de