

Untersuchung des Fließverhaltens von Kunststoffen im Hotend eines Extruders für den 3D-Druck mittels Röntgendurchstrahlung

Julian EHRLER¹, Mike KORNELY¹, Julian KATTINGER¹,
Tobias SCHAIBLE¹, Marc KREUTZBRUCK¹
¹ Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart

Kontakt E-Mail: julian.ehrler@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Die additive Fertigung hat sich im 21. Jahrhundert als das Verfahren zur Herstellung von Prototypen und Kleinstserien etabliert. In der Kunststoffindustrie wird neben anderen 3D-Druckverfahren auch das Fused Filament Fabrication (FFF) eingesetzt; auch als Strangablegeverfahren bekannt. Beim FFF wird ein Kunststoff-Filament in einer Düse aufgeschmolzen und das Bauteil durch Ablegen eines extrudierten Strangs Schicht für Schicht aufgebaut. Wie bei allen Fertigungsverfahren wird auch hier ständig versucht, den Prozess durch Modellierung und Simulation weiter zu optimieren. Im Falle des FFF-Prozesses besteht ein Interesse daran, den Aufschmelz- und Extrusionsmechanismus besser zu verstehen, um das volle Potenzial des Prozesses auszuschöpfen.

Die Röntgendurchstrahlungsprüfung ermöglicht es, während der Strangextrusion die sich ausprägenden Geschwindigkeitsprofile in der Düse zu untersuchen, ohne den Prozess selbst zu beeinflussen. Mit einem optimierten Versuchsaufbau und angepassten Werkstoffen der Düse ist es erstmals möglich das Strömungsprofil im Hotend eines Filamentextruders für den FFF-Prozess in Echtzeit darzustellen. Das Hotend ist dazu aus einem Stück Aluminium gefertigt. Um einen Kontrast im Strömungsprofil der Düse zu erzeugen, wurde ein Polystyrolfilament mit und ohne feinverteilten Wolframpartikeln mit einem maximalen Volumenanteil von 1 Vol.-% eingesetzt. Die Extrusionsgeschwindigkeiten wurden variiert und die daraus resultierenden Geschwindigkeitsprofile analysiert. Diese Methode ermöglicht es, den Prozess der Materialextrusion besser zu verstehen, Simulationen zu validieren und künftig auf die Extrusionsgeschwindigkeit angepasste Düsen zu entwickeln.

1. Einführung

Aufgrund der niedrigen Einstiegskosten für Maschine und Material ist das Fused Filament Fabrication (FFF) Verfahren eines der am weitesten verbreiteten additiven Fertigungsverfahren. Heute umfasst das Anwendungsspektrum neben dem schnell wachsenden Hobbybereich auch viele Industriezweige wie die Medizin oder die Luft- und Raumfahrtindustrie. Hier wird das FFF-Verfahren zur Herstellung komplexer und hochfunktionaler Teile eingesetzt [1]. Zur Herstellung eines Objekts wird über einen Fördermechanismus ein Kunststoff filament in einem Druckkopf, der auf einem xyz-Tisch montiert ist, über das Druckbett bewegt. In dem Druckkopf wird das Filament geschmolzen und durch eine Düse gepresst, um einen dünnen Strang zu extrudieren. Während die Mechanik den Druckkopf in zwei Dimensionen (x-y-Ebene) bewegt, wird der Strang entsprechend dem Druckpfad auf der Bauplattform abgelegt.



Nach Fertigstellung einer Schicht, wird eine neue Schicht auf die vorherige Schicht aufgebracht und diese verschweißt mit der vorherigen. Wie in Abb. 1 a) dargestellt, wird die schichtweise Ablage entlang der z-Achse wiederholt, bis das Bauteil vollständig aufgebaut ist. [2]

Im Folgenden wird der Druckkopf näher betrachtet, dessen Hauptaufgabe es ist, einen stabilen Extrusionsprozess mit verhältnismäßig hohen Schmelzraten bei geringem Druckverlust zu ermöglichen. Aus diesen Anforderungen ergibt sich der typische zweiteilige Aufbau eines Druckkopfes (Abb. 2(b)), bestehend aus dem sogenannten Hot-End und Cold-End. Dieser ist so in nahezu allen kommerziell erhältlichen Systemen zu finden. Das Hot-End besteht aus der Düse und einem umgebenden Metallblock, in den eine Heizpatrone eingebaut ist. Während das Hot-End das Filament erhitzt und aufschmilzt, soll das angrenzende Cold-End das Filament kalt genug halten, um einen Spalt zwischen der Außenfläche des Filaments und der Innenfläche des zylindrischen Schmelzkanals zu gewährleisten und so ein zu frühes Aufschmelzen verhindern. Um dies zu erreichen, besteht das Cold-End aus einem entsprechenden Kühlkörper, der in der Regel durch einen Ventilator gekühlt wird. Um den Wärmeübergang zwischen den Zonen zu minimieren, wird außerdem ein entsprechender Wärmeisolator, in diesem Falle aus Stahl, als s.g. Heat-Break verwendet.

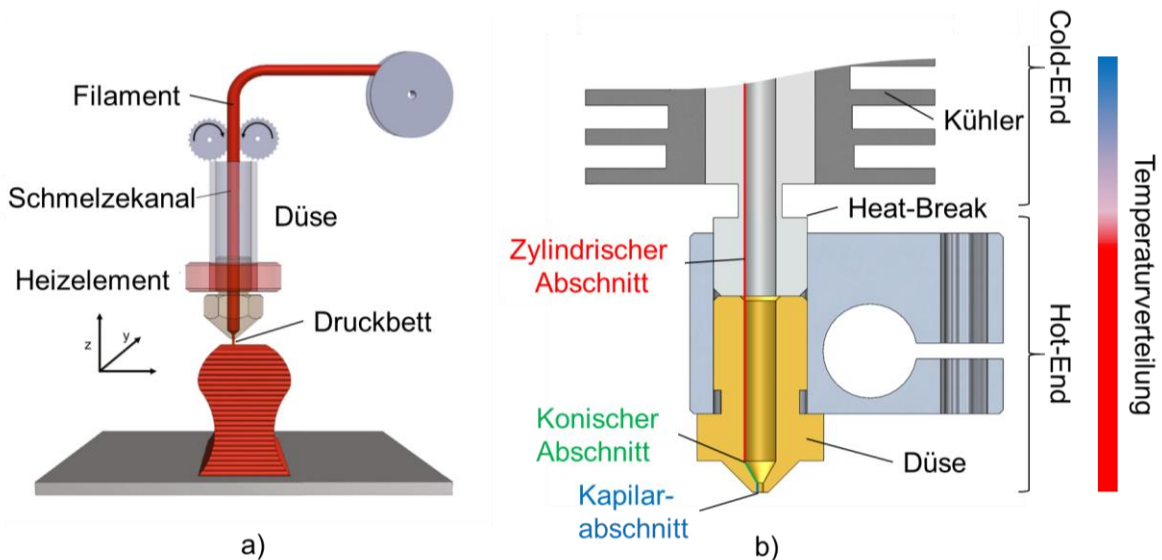


Abb. 1. a) Aufbau eines FFF-Druckers [3], b) Detailansicht durch den Düsenbereich [4]

2. Stand der Technik

Durch einen modifizierten Versuchsaufbau ist es möglich den Aufschmelz- und Extrusionsprozess unter realen Bedingungen mit Hilfe der Röntgendurchstrahlung zu beobachten. Der Aufbau ist in Abb. 2 dargestellt. Neben der Betrachtung der Filamentförderung und den geometrischen Relationen zwischen Filament und der Wand des zylindrischen Schmelzkanals im Hot-End-Cold-End-Übergang lässt sich weiterhin die Strangaufweitung sowie die Strömung selbst darstellen. [5]

Es finden sich in der Literatur bislang nur statische Ansätze, die die CT verwenden [6-8]. Hong et al. Verwenden eine Düse aus Glas, um die Schmelze im Prozess zu beobachten. [9]

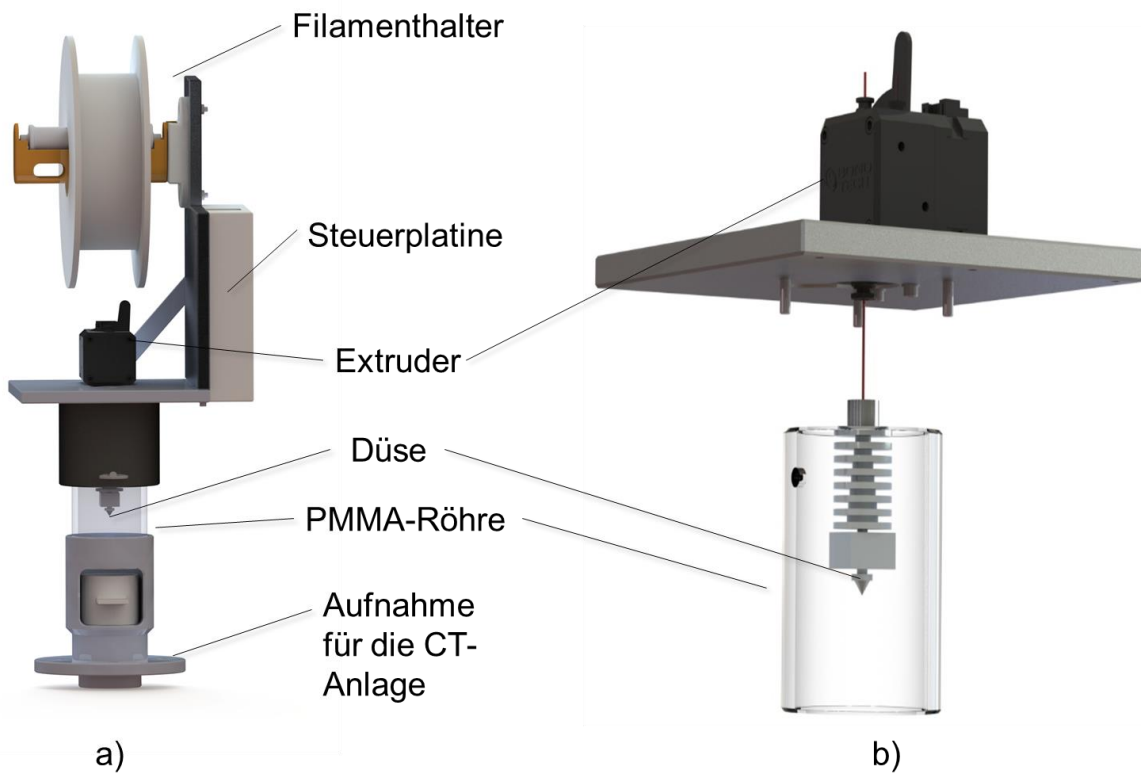


Abb. 2. CAD-Rendering des Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Aufschmelzprozesses im FFF-Prozess. a) Gesamtaufbau. b) Prozesseinheit ohne Gehäusekomponenten. [5]

Für die analytische Berechnung der Strömung gibt es unterschiedliche Modelle. Bei einem gängigen Ansatz wird davon ausgegangen, dass die Düse vollständig mit Schmelze gefüllt ist. Die Schmelze wird von dem als Kolben wirkenden festen Filament kontinuierlich durch die Kapillare gepresst. Bei diesem Ansatz, der zuerst von Bellini et al. veröffentlicht wurde, wird die Strömung im Inneren der Düse unter der Prämisse eines Power-Law-Fluids und der Annahme isothermer Schmelze und einer voll ausgebildeten Strömung modelliert [10]. Wie in Abb. 1 b) dargestellt, ist die Düse in drei wesentliche Bereiche unterteilt. Der obere zylindrische Bereich, der konische Übergangsbereich und der Kapillarbereich am unteren Ende. Die Bereiche mit konstantem Querschnitt lassen sich, wie folgt, analytisch berechnen. Hierbei wird der Druckabfall auf der Grundlage der Hagen-Poiseuille-Gleichung unter Verwendung des Potenzgesetzmodells für die Flüssigkeitsviskosität berechnet, das wie folgt lautet:

$$\eta = m(T)\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

Wobei $\dot{\gamma}$ die Größe des Verformungstensors, n der Potenzgesetzindex und m der Konsistenzindex darstellt. Die axiale Geschwindigkeitsverteilung als Funktion des Radius $u_z(r)$ ist gegeben durch

$$u_z(r) = \frac{Q}{\pi R^2} \left(\frac{3n+1}{n+1} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]. \quad (2)$$

Dabei steht Q für den Volumendurchfluss und R für den Radius des Schmelzekanals.

3. Versuchsdurchführung

Für diese Arbeit wurde der in Abb. 2 gezeigte Versuchsaufbau verwendet, der in einer Röntgenanlage betrieben werden kann. Die Prozesseinheit basiert auf einem kommerziellen Extruder (Modell LGX von Bondtech, Värnamo, Schweden), der mit einem Hote-End vom Typ E3D-V6 ausgestattet wurde. Die Ansteuerung erfolgte über ein Duet2 Ethernet-Controllboard (Duet3D, Peterborough, Vereinigtes Königreich), das mit der Open Source Software RepRap gesteuert wird. Um einen Röntgenscan mit hoher Auflösung zu ermöglichen, wird der Versuchsaufbau so konzipiert, dass er während des Extrusionsvorgangs vor der Röntgenquelle, während der kontinuierlichen Extrusion, rotiert werden kann. Ein weiterer Aspekt, der bei der Konstruktion berücksichtigt wurde, ist, dass der zu untersuchende Bereich während des Scans nicht durch Metallteile verdeckt wird. Aus diesem Grund sind alle Kabel durch einen Kanal von oben in den Aufbau geführt. Ein Rohr aus PMMA wurde als Verbindungselement zwischen dem unteren und oberen Teil des Aufbaus konzipiert, um die Röntgenstrahlung so wenig wie möglich abzuschwächen.

Der Versuchsaufbau wurde in einer YXLON FF20 μ CT Anlage montiert, die mit einer FXE-Transmissionsstrahl-Röntgenröhre (YXLON International GmbH, Hamburg, Deutschland) und einem Varex 2530HE (Varex Imaging, Salt Lake City, Utah, USA) Detektor mit 16 Bit Bildtiefe ausgestattet ist. In dieser Arbeit wurde das Röntgen verwendet, um reine 2D-Durchstrahlungsbilder zu generieren. Für die Experimente wurde eine Röhrenspannung von 190 kV und ein Strom von 60 μ A verwendet, was einer Röntgensystemleistung von 11,4 W entspricht. Diese Einstellungen erforderten die Verwendung eines leistungsstarken Transmissionstargets. Zur Verringerung des Rauschens, wurde ein 2x2-Pixel-Binning, eine Empfindlichkeit von 2 pF und eine Bildfrequenz von 2 Hz verwendet.

Das Strömungsverhalten in der Düse wurde durch Videoaufnahmen der Röntgendurchstrahlung beobachtet. Aufgrund der hohen Röntgenabschwächung wäre der in den Stahlheizblock eingeschraubte Bereich der Düse aufgrund der hohen Röntgenstrahlung nur schwer zu untersuchen gewesen. Daher wurde ein, hinsichtlich der Röntgendämpfung optimierter, Aluminium-Heizblock hergestellt (vgl. Abb. 3 c). In diesem ist die Düse direkt integraler Bestandteil des gesamten Bauteils. Hierdurch werden Materialübergänge vermieden. Das nun homogen verteilte Material bietet im Gegensatz zum bisher geschraubten Zusammenbau einige Vorteile bei der Röntgenprüfung. Sowohl die Durchstrahlungsprüfung als auch die noch gedachte CT-Prüfung ist nun mit verbesserten Ergebnissen möglich, da Artefakte der Rekonstruktion an Kanten und Übergängen verhindert werden können. Zusätzlich wurde der zylindrische Schmelzkanal verlängert, sodass sich die Heizpatrone und der Temperaturfühler nicht im unteren relevanten Sichtbereich der CT-Prüfung befinden. (Vgl. Abb. 3 a) – d))

Als Werkstoff wurde eine Aluminium-Magnesium-Legierung (EN AW 6082) gewählt, die einen geringeren Anteil an schweren Elementen aufweist. Aluminium bzw. Magnesium sind mit Ordnungszahl $Z = 13$ bzw. $Z = 12$ die am besten geeigneten Metalle für einen derartigen Aufbau. Eine Magnesiumlegierung oder kohlenstoffbasierte Polymerwerkstoffe sind aufgrund des hohen Preises, der sehr aufwändigen Bearbeitung bzw. stark abweichenden thermischen Eigenschaften nicht in Betracht gezogen worden.

Nachteil des neuen Düsenaufbaus ist, dass nun kein Tausch der Düse bei Verschleiß oder Defekt mehr möglich ist. Dies wurde aber wegen der, im Vergleich zum üblichen Produktionsbetrieb, eher sehr geringen Nutzungszeit als vertretbar bewertet.

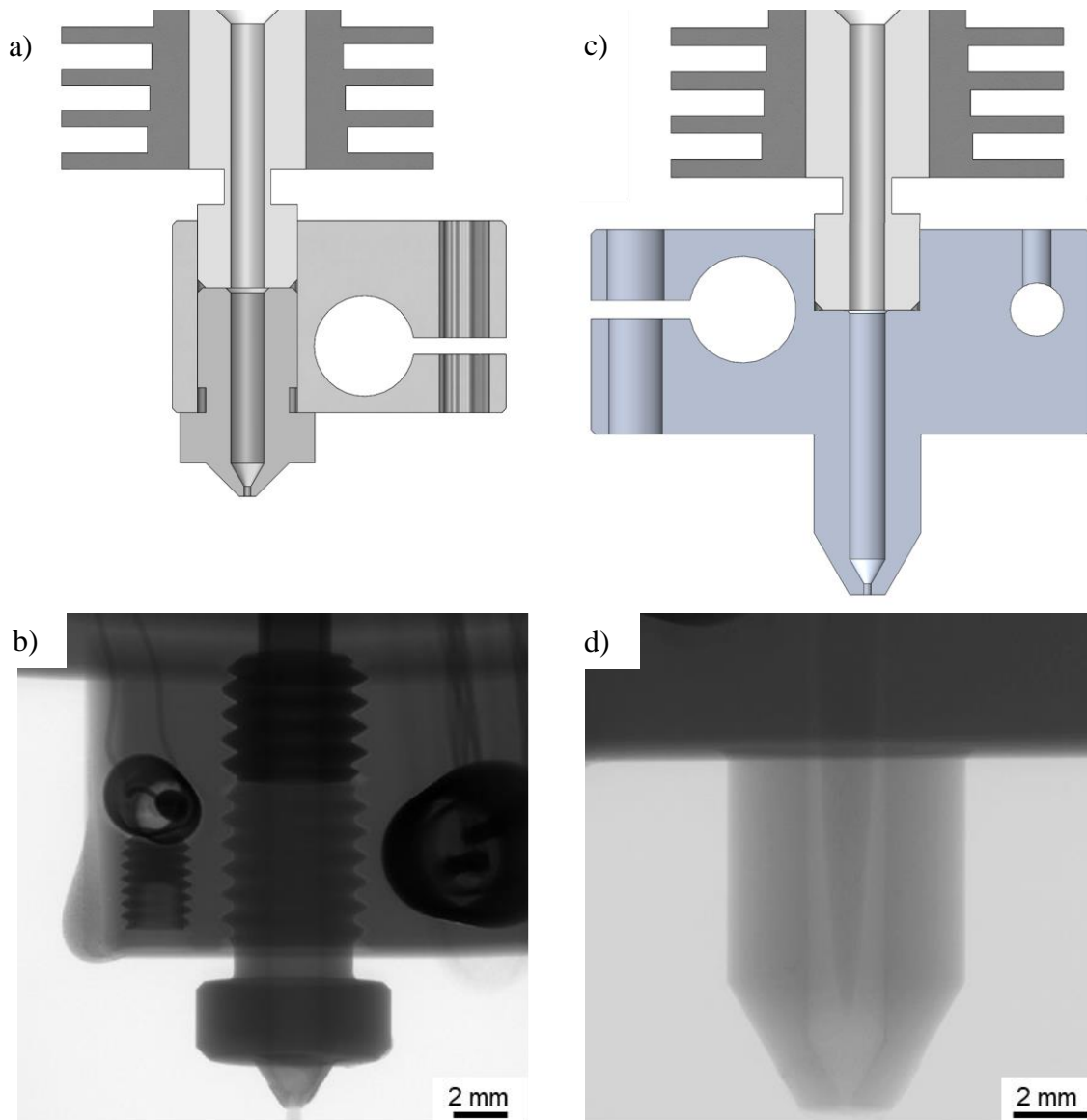


Abb. 3. a) Skizze eines herkömmlichen Hot-Ends bestehend aus Heat-Break, Heizblock und eingeschraubter Düse. b) Durchstrahlungsbild eines Hot-Ends aus a) mit Titandüse. c) Skizze des neu entworfenen Hot-Ends mit Integraldüse. d) Durchstrahlungsbild des Hot-Ends aus c). Der Schmelzkanaldurchmesser beträgt bei allen Darstellungen 2 mm.

Für die Experimente wurde ein hoch-röntgenstrahlabsorbierendes Polystyrol Filament (Styrolution PS 486N) eigens am IKT hergestellt. Hierzu wurde Wolframpulver mit 1 Vol.-% in das Polystyrol eincompoundiert und ein Filament mit einem Durchmesser von 1,75 mm mit einem Schneckenextruder hergestellt. Das Pulver hatte dabei eine mittlere Partikelgröße von kleiner 6,3 μm . Untersuchungen vorab zeigten, dass hierdurch die thermischen Eigenschaften, im Besonderen die Wärmeleitung, nicht signifikant verändert werden.

Um die Beobachtung des Strömungsverhaltens zu ermöglichen, wurde die Düse zunächst mit reinem Polystyrol gefüllt. Anschließend wurde das wolframpulverhaltige Filament mit einer definierten Geschwindigkeit in die Düse eingeführt, während Röntgenbilder mit einer Bildwiederholrate von 2 Hz aufgenommen wurden. Dies wurde für drei praxisnahe Filamentgeschwindigkeiten (0,5 mm/s, 1,0 mm/s, 2,0 mm/s) durchgeführt. Sobald die gesamte Düse mit dem stärker absorbierenden Filament gefüllt war, wurde die Aufzeichnung gestoppt. Da weder ein Videoexport noch ein Export der resultierenden Bilder möglich war, wurde die Soft-

ware OBS, (Open Broadcaster Software, OBS Studio Contributors) verwendet, um den Bildschirm mit der Live-Ansicht aufzunehmen. Das Ergebnis war ein 8 Bit Video das für die weitere Untersuchung wieder in die einzelnen Bilder aufgeteilt wurde. Die hierbei erzeugten Grauwertbilder konnten anschließend auf den interessanten Bereich zugeschnitten werden. Von den Bilddaten wurden daraufhin ein Ruhebild der gefüllten Düse ohne Wolframpartikel abgezogen, um Differenzbilder zu erhalten und hiermit den Kontrast des gefüllten Schmelzkanals weiter zu erhöhen. Veränderungen in den Bildern können so sehr leicht sichtbar gemacht werden. Für eine bessere Orientierung wurden zusätzlich die ursprünglichen Kanten des Schmelzkanals und der Düse wieder zusätzlich an der korrekten Position mit Hilfslinien dargestellt. Für alle drei Vorschubgeschwindigkeiten wird ein Zeitraum von 18 Sekunden ab dem ersten Eintritt des gefüllten Filaments in den Sichtbereich ausgewertet.

Für den Vergleich mit der Modelllösung nach Gleichung (2) wurden die folgenden Parameter für die Geometrie bzw. das Materialmodell verwendet: $R = 1 \text{ mm}$, $n = 0,321$. Der Volumenstrom Q wurde aus der Filamentvorschubgeschwindigkeit und dem Verhältnis von Filamentradius und Schmelzkanalradius entsprechend berechnet.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die berechneten und zugeschnittenen Differenzbilder sind in den Abb. 4 bis Abb. 6 dargestellt. Der Kontrast zwischen dem Wolframpartikel filament, Hintergrund, Düsenwand und ungefülltem Polystyrol wird deutlich. In Orange ist die analytische Modelllösung für die jeweilige Geschwindigkeit eingezeichnet. Der obere Bereich befinden sich noch im quaderförmigen Teil des Hot-Ends. Hier verdeckt mehr Aluminium den Schmelzkanal, wodurch mehr Röntgenstrahlung absorbiert wird. Dieser Bereich lässt sich nur durch die Differenzbilder klar sichtbar machen. Bei reinen Durchstrahlungsbildern reicht die Dynamik nicht, um sowohl den unteren Düsenbereich, als auch den oberen Bereich darzustellen.

Es wird deutlich, dass mit den Röntgenexperimenten das analytische Modell abgeglichen werden kann. Weiterhin zeigt sich, dass gerade zum Zentrum des zylindrischen Schmelzkanals hin die reale Strömung von der Berechnung abweicht. Hier eilt die Strömung voraus. Die konische Verjüngung kann weiterhin sehr gut dargestellt werden. Dieser Bereich ist für einen künftigen Vergleich mit Simulationen besonders interessant.

Erstmals deutlich gemacht werden konnten mit dem Versuch die Grenzschichten an der Schmelzkanalwand einerseits und andererseits die Totzonen im Bereich des konischen Übergangs.

Der hier vorgestellte Weg zur Visualisierung, zeigt allerdings auch noch Schwächen auf. So wird die Lösung mit der Aufnahme des Röntgenvorschauvideos mittels OBS als nicht ausreichend erachtet, da hierbei die mögliche Dynamik des Detektors nicht ausgeschöpft werden kann. Dies liegt daran, dass mittels dieses Wegs lediglich Bilder mit 8 Bit Tiefe erzeugbar sind. Der Detektor könnte jedoch bis zu 16 Bit liefern. Weiterhin zeigte sich, dass der Wechsel von ungefülltem zu gefülltem Filament im Prozess noch zu verbessern ist. Angedacht ist hier bei künftigen Versuchen ein kontinuierliches Filament aus Polystyrol. Hierbei sollen einzelne Abschnitte des gefüllten Filaments mit Abschnitten des ungefüllten Filaments bündig zu einem verarbeitbaren Filament verschweißt werden. So können mehrere Experimente schneller hintereinander durchgeführt werden ohne den Prozess zu stoppen.

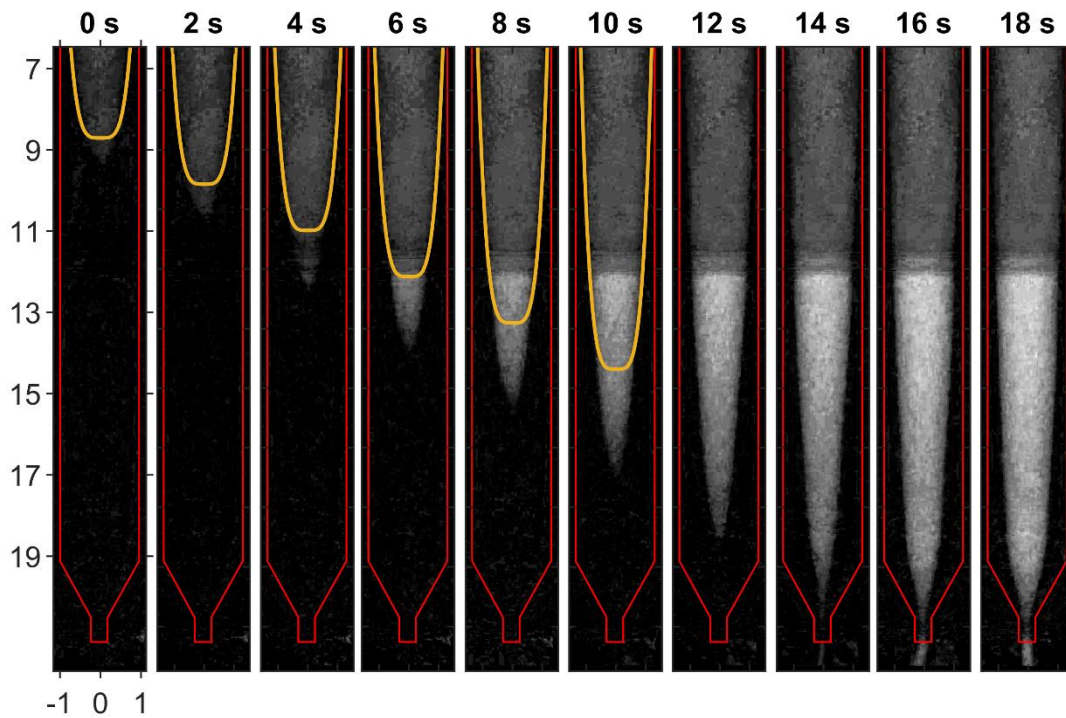


Abb. 4. Darstellung der Röntgendifferenzbilder von 0 bis 18 Sekunden. Abmessungen in Millimetern. Extrusionsgeschwindigkeit 0,5 mm/s, rot: Kontur des Schmelzkanals, orange: analytische Lösung mit Gl. (2)

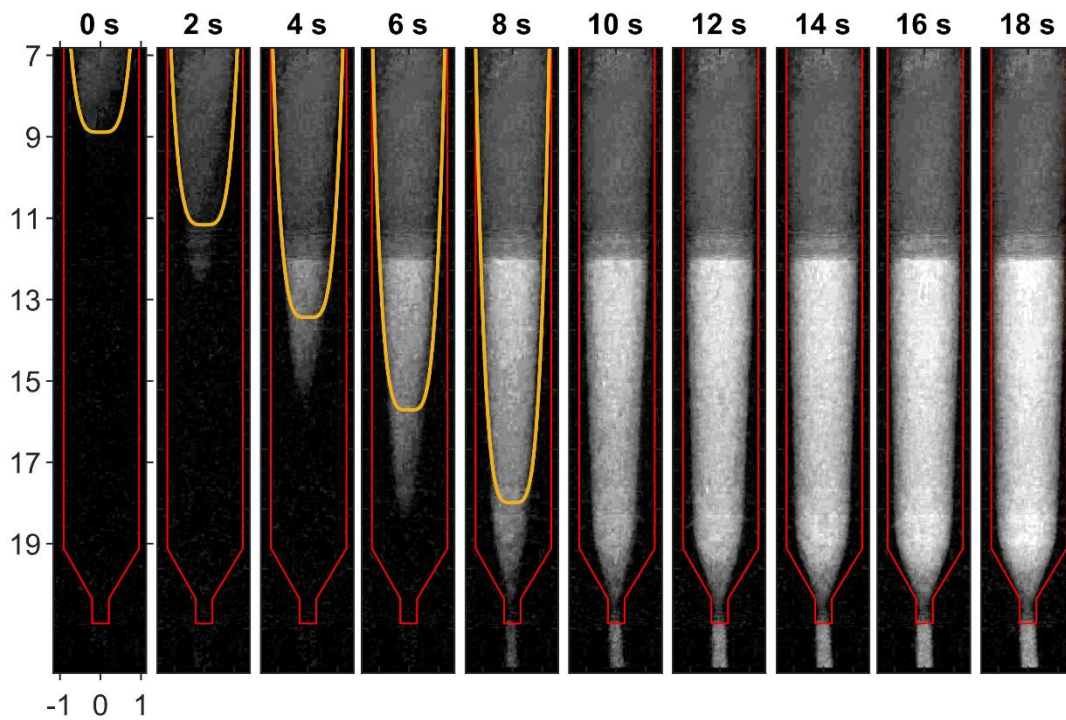


Abb. 5. Darstellung der Röntgendifferenzbilder von 0 bis 18 Sekunden. Abmessungen in Millimetern. Extrusionsgeschwindigkeit 1,0 mm/s, rot: Kontur des Schmelzkanals, orange: analytische Lösung mit Gl. (2)

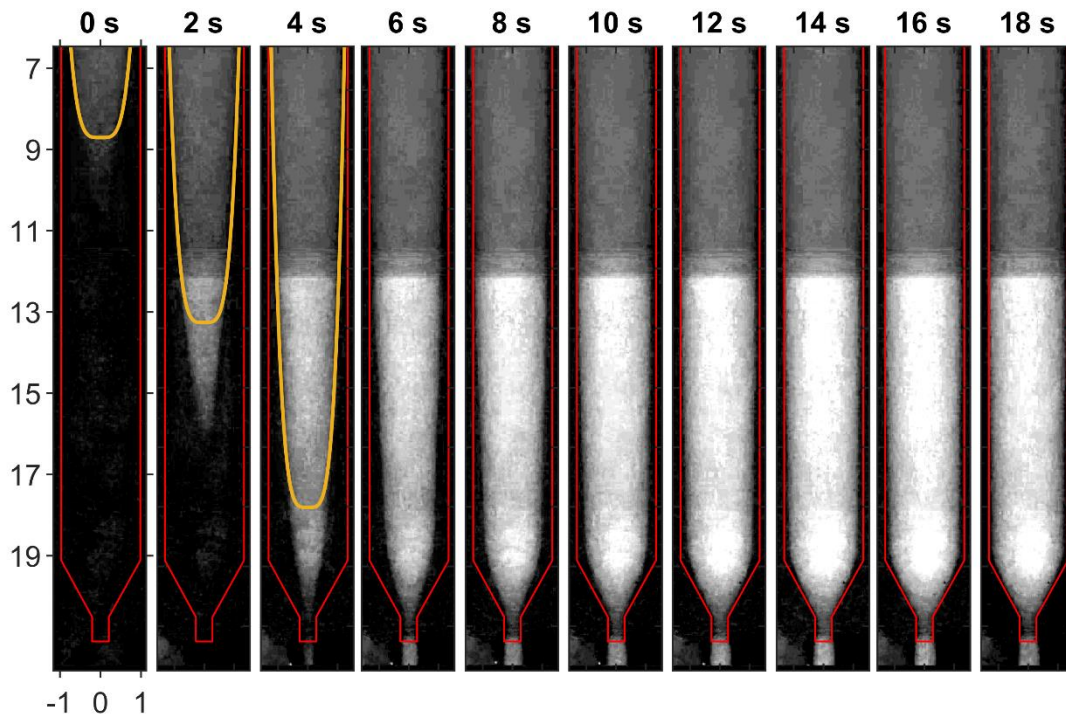


Abb. 6. Darstellung der Röntgendifferenzbilder von 0 bis 18 Sekunden. Abmessungen in Millimetern. Extrusionsgeschwindigkeit 2,0 mm/s, rot: Kontur des Schmelzkanals, orange: analytische Lösung mit Gl. (2)

5. Fazit und Ausblick

Mit dem hier vorgestellten Aufbau und Vorgehen konnte erstmals die reale Strömung in einem Hot-End eines FFF-Extruders beobachtet werden. Diese Variante ermöglicht die zuverlässige Validierung von Simulationen und somit die effiziente Auslegung neuer Düsengeometrien in der Zukunft.

Die auf die Röntgenprüfung hin verbesserte Hot-End-Geometrie zeigte bereits deutlich kontrastreichere Bilder. Es ist darüber hinaus geplant hier noch weitere Verbesserungen vorzunehmen, sodass der komplette Schmelzkanal ohne störende Elemente abgebildet werden kann. Die Bildaufnahme kann durch eine angepasste Software verbessert werden, wodurch es letztendlich ermöglicht wird die vollen 16 Bit des verwendeten Detektors bei dieser Versuchsart auszunutzen.

Das hier vorgestellte Verfahren eröffnet die Möglichkeit, nicht nur die Strömung in einer 2D-Durchstrahlung zu untersuchen, sondern es wäre auch möglich mittels Particle Image Velocimetry (PIV) agglomerierte Wolframpartikel in der Strömung zu vermessen. Dies würde weitere Informationen über das real existierende Geschwindigkeitsfeld, auch in der Schmelzkanaltiefe zu liefern.

Referenzen

- [1] SCULPTEO. The State of 3D Printing 2021 Edition, 2021 [Zugriff am: 16. März 2023]. <https://www.sculpteo.com/en/ebooks/state-of-3d-printing-report-2021/>
- [2] Gebhardt, A., Additive Fertigungsverfahren, 2016, ISBN 978-3-446-44401-0
- [3] Osswald, T.A., J. Puentes und J. Kattinger. Fused filament fabrication melting model. In: Additive Manufacturing, 2018, 22, 51-59. ISSN 22148604. doi:10.1016/j.addma.2018.04.030
- [4] Kattinger, J., T. Ebinger, R. Kurz und C. Bonten. Numerical simulation of the complex flow during material extrusion in fused filament fabrication. In: Additive Manufacturing, 2022, 49, 102476. ISSN 22148604.: doi:10.1016/j.addma.2021.102476
- [5] Kornely, M., J. Ehrler, J. Kattinger, M. Kreuzbruck. Untersuchung des Aufschmelzverhaltens im FFF-Druck mittels Durchstrahlungsprüfung. In: DGZFP Jahrestagung 2022, Kassel. <https://www.ndt.net/?id=27064>
- [6] Peng, F., B.D. Vogt, M. Cakmak. Complex flow and temperature history during melt extrusion in material extrusion additive manufacturing. In: Additive Manufacturing, 2018, 22, 197–206. Doi:10.1016/j.addma.2018.05.015
- [7] Zhang, H., L. Zhang, H. Zhang, J. Wu, X. An und D. Yang. Fibre Bridging and Nozzle Clogging in 3D Printing of Discontinuous Carbon Fibre Reinforced Polymer Composites: Coupled CFD-DEM Modelling, 2021.
- [8] Yang, D., H. Zhang, J. Wu, E.D. McCarthy. Fibre flow and void formation in 3D printing of short-fibre reinforced thermoplastic composites: An experimental benchmark exercise. In: Additive Manufacturing, 2021, 37, 101686. Doi:10.1016/j.addma.2020.101686
- [9] Hong, Y., M. Mrinal, H.S. Phan, V.D. Tran, X. Liu und C. Luo. In-situ observation of the extrusion processes of Acrylonitrile Butadiene Styrene and Polylactic Acid for material extrusion additive manufacturing. In: Additive Manufacturing, 2022, 49, 102507. Doi:10.1016/j.addma.2021.102507
- [10] Bellini, A., S. Güceri, M. Bertoldi, M. Liquefier Dynamics in Fused Deposition In: J. Manuf. Sci. Eng. Mai 2004; 126(2): 237–246. <https://doi.org/10.1115/1.1688377>