

Untersuchung des Aufschmelzverhaltens im FFF-Druck mittels Durchstrahlungsprüfung

Mike KORNELY¹, Julian EHRLER¹, Julian KATTINGER¹,
Marc KREUTZBRUCK¹

¹ Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart

Kontakt E-Mail: mike.kornely@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Der 3D-Druck hat sich im 21. Jahrhundert als das Verfahren zur Herstellung von Prototypen und Kleinstserien etabliert. Im Kunststoffbereich wird insbesondere das Fused Filament Fabrication (FFF) eingesetzt, bei dem ein Kunststofffilament in einer Düse aufgeschmolzen und schichtweise ein Bauteil aufgebaut wird. Wie bei allen Fertigungsverfahren besteht auch beim FFF-Verfahren ein Interesse daran, den Prozess durch Simulation weiter zu optimieren. Um das Aufschmelzverhalten des Kunststoffs in der Düse besser zu verstehen, sind Kenntnisse über das reale Aufschmelzverhalten erforderlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Aufbau vorgestellt, der eine zerstörungsfreie Untersuchung des Aufschmelzverhaltens im Druckprozess ermöglicht. Hierfür wurde eine 3D-Druckerdüse in eine Röntgen-Computertomografieanlage integriert, wodurch eine Durchstrahlung der Düse während des Druckprozesses realisiert wurde. Durch die Verwendung von Filamenten mit hochabsorbierenden Füllstoffen (wie z. B. Bronze oder Wolfram) kann ein entsprechender Kontrast zwischen der Metalldüse und dem Kunststofffilament erzielt werden. Hierdurch kann festgestellt werden, wo in der Düse der Aufschmelzvorgang beginnt und ab wann ein Kontakt zwischen Schmelze bzw. Filament und der Düsenwand vorliegt. Durch die so gewonnenen Informationen, können künftig Simulationen verifiziert und verbessert werden. Zusätzlich bietet der Aufbau die Möglichkeit, Düsengeometrien im Druckprozess zu analysieren und anschließend zu optimieren.

Einführung

Fused Filament Fabrication (FFF) ist das Fertigungsverfahren im Rapid Prototyping, welches sich in den vergangenen Jahren als das meistgenutzte Verfahren im Prototypenbau etabliert hat [1]. Durch die relativ niedrigen Einstiegskosten ist das Verfahren auch für Heimanwender interessant, wobei auch ein starkes Wachstum von industriellen Systemen in den nächsten Jahren zu erwarten ist [2]. Hierbei liegen die größten Anforderungen an das industrielle Verfahren in der Verbesserung der Festigkeit und der Qualitätskontrolle des Fertigungsprozesses [1]. Zum besseren Verständnis des Prozesses und zur Vorhersage der Druckqualität sowie zur Prozessoptimierung stehen Simulationsmethoden des Ablege- und Aufschmelzvorgangs immer stärker im Fokus von Forschung und Entwicklung. Ein Grund sind die Untersuchungen von Go et al. welche gezeigt haben, dass das Aufschmelzverhalten des Filaments einen wesentlichen Einfluss auf die Bauteilqualität hat [3]. Die Validierung der Simulation durch experimentelle Untersuchungen ist dabei essentiell für die Aussagequalität des Simulationsmodells, weshalb hier ein hoher Forschungsbedarf besteht. In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze, um eine Aussage über das



Aufschmelzverhalten in der Düse des 3D-Druckers treffen zu können. Als problematisch stellt sich die hohe Verarbeitungstemperatur, die kleine Düsengeometrie und der kontinuierlich stattfindende Verarbeitungsprozess dar, wodurch eine direkte Beobachtung des Aufschmelzens des Kunststoffes in der Düse verhindert wird. Analysen des erstarrten Kunststoffes in der ausgebauten Düse mittels CT [4–6] oder die Verwendung von Glasdüsen zur optischen Analyse [7] bieten eine Möglichkeit das Aufschmelzverhalten besser zu verstehen jedoch bilden diese den realen Druckprozess nur unvollständig ab, da der Prozess durch diese Hilfsmittel stark verändert wird. Beim Ausbauen und Abkühlen kann bspw. nicht sichergestellt werden, dass die Kunststoffschmelze derart erstarrt, dass auf den eigentlichen Prozess korrekt rückgeschlossen werden kann. Eine Glasdüse weist deutlich veränderte thermische und tribologische Eigenschaften auf, als die sonst verwendeten Metalldüsen (Titan, Bronze, Wolfram etc.). Eine Lösung dieser Problematik soll die nachfolgende Arbeit aufzeigen. Dabei soll ein Aufbau entwickelt werden, bei dem ein 3D-Drucker in eine Computertomografieanlage integriert wird. Damit kann das Aufschmelzverhalten in einem 3D-Drucker während des Druckprozess untersucht werden.

1. Stand der Technik

Das Fused Filament Fabrication (FFF), auch Strangablegeverfahren genannt, ist ein Verfahren zur Herstellung von 3D-Strukturen aus thermoplastischem Kunststoffen oder in neueren Anwendungen auch aus metallischen Werkstoffen. Der Werkstoff wird dem Prozess als Filament zugeführt und in einer Düse mittels Heizelementen aufgeschmolzen. Die aus der Düse austretende Schmelze wird mit einem Druckkopf schichtweise auf einer Bauteilplattform in x/y-Richtung abgelegt, wodurch fast beliebig komplex geformte Bauteile entstehen können. Abb. 1 zeigt auf der linken Seite den schematischen Aufbau des FFF. Nachdem eine Schicht in der x/y-Ebene fertiggestellt wurde, wird die Bauplattform in z-Richtung verfahren und die nächste Schicht kann auf dem entstehenden Bauteil abgelegt werden.

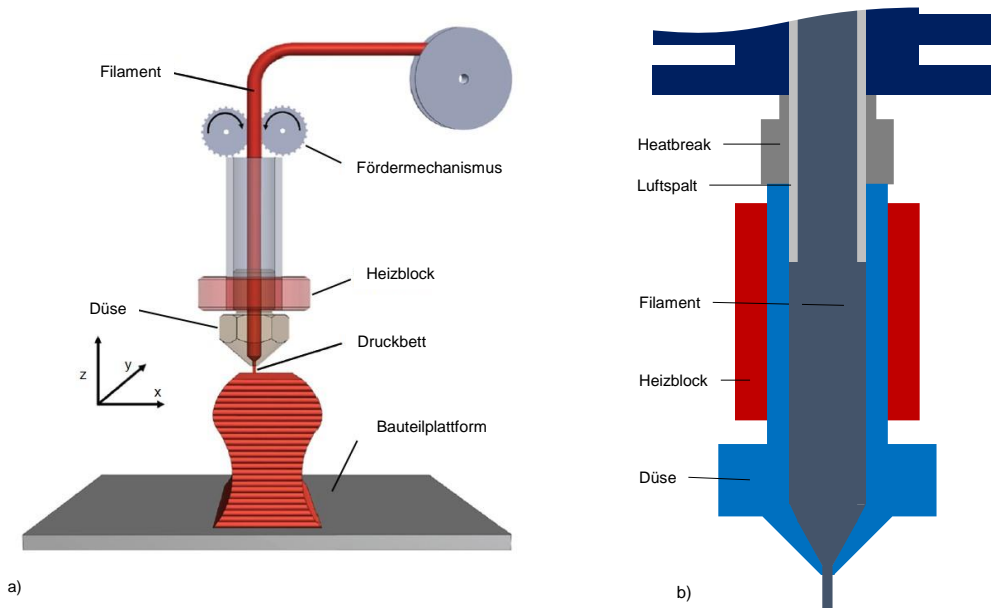


Abb. 1: a) Schematischer Aufbau des FFF [8]; b) Schematischer Aufbau der Düse mit Filament [9]

Der Versatz in z-Richtung kann variiert werden und ist vom vorhanden Drucker abhängig und orientiert sich in der Regel am Düsendurchmesser. Im rechten Teil von Abb. 1 ist die Düse mit Heizblock vergrößert dargestellt. Das feste Filament wird von oben zugeführt, schmilzt im Bereich des Heizblocks auf und die Düse wird mit Schmelze gefüllt [9]. Durch den Vorschub des Filaments entsteht Druck in der Düse, der zu einem kontinuierlichem Schmelzestrang am Düsenausgang führt. In der Düse kommt es somit zu einem Übergang von schmelzflüssiger Phase und fester Phase, wodurch sich der Luftspalt zwischen Düsenwand und Filament im unterm Teil der Düse mit Schmelze ausfüllt.

Soll das Aufschmelzverhalten des Filaments simuliert werden, ist eine Kenntnis über die Größe und Ausprägung des Luftspaltes bzw. den Übergang von Fest- zu Schmelzphase wichtig, da sich hier die Mechanismen der Wärmeübertragung ändern. Während im Bereich der, an der Düsenwand anliegenden, Schmelze alle drei Übertragungsarten (Leitung, Konvektion und Strahlung) wirken, wirken im Bereich des Luftspaltes nur Konvektion und Strahlung. Das Aufschmelzverhalten ist hierbei abhängig von den Prozessparametern (Düsentemperatur und Vorschubgeschwindigkeit) und von den eingesetzten Werkstoffen (Düsenwerkstoff und Filamentmaterial).

2. Konstruktion und Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des Aufschmelzverhaltens in der Düse wurde eine Vorrichtung entwickelt, die eine Überwachung des 3D-Drucks mittels Durchstrahlungsprüfung und Computertomografie ermöglicht, wobei bestimmte Anforderungen an den Aufbau gestellt wurden. Der Aufbau muss in eine vorhanden Computertomografieanlage Yxlon FF20 integrierbar sein während ein Druck- bzw. Extrusionsprozess bei laufender Anlage durchgeführt wird. Hierbei wurde der Fokus ausschließlich auf den Extrusionsprozess gelegt, da ein Ablegen des Filamentes zur Untersuchung des Aufschmelzverhaltens nicht erforderlich ist. Der Aufbau soll einen freien Blick auf die Düse gewährleisten, sodass auch bei einer Rotation keine störenden Bauteile in das Durchstrahlungsbild rotieren. Gleichzeitig sollte eine möglichst hohe Vergrößerung gegeben sein. Der entwickelte Aufbau ist in Abb. 2 zu sehen.



Abb. 2: Für Röntgenaufnahmen optimierter FFF-Drucker; Links: Gesamtansicht; Rechts: Vergrößerung mit ausgeblendeten Bereichen

Bei den Bauteilen für die Extrusion wurde darauf geachtet, dass es sich um handelsübliche Baugruppen für 3D-Drucker handelt. Im linken Bild (vgl. Abb.2) ist der gesamte Aufbau ohne Anschlüsse gezeigt und im rechten Bild ist vergrößert der relevante Düsenbereich mit zum Teil ausgeblendeten Bauteilen dargestellt. Die Ansteuerung erfolgt über ein handelsübliches 3D-Drucker-Controllerboard (Duet 2 Ethernet). Alle Versorgungsleitungen befinden sich über dem Strahlengang, sodass eine 360° Rotation möglich ist. Der Aufbau wurde aus Stahl, Aluminium und 3D-Druck-Bauteilen aus Kunststoff gefertigt, wobei darauf geachtet wurde, dass sich keine hochabsorbierenden Teile im Bereich der Düse befinden. Das transparente Rohr, welches das Ober- und Unterteil verbindet besteht aus PMMA. Der konventionell erhältliche Heizblock mit Heizelement und Temperatursensor besteht aus Aluminium, wobei das Heizelement und der Temperatursensor schwerere Elemente (Kupfer etc.) in den Kabeln enthalten, die einen negativen Einfluss auf die Messung haben können. Die Heatbreak besteht aus Stahl. Als Düsenmaterial wurde Titan gewählt, da dieses die geringste Absorption aller kommerziell erhältlicher Düsen aufweist. Prinzipiell können aber auch Düsen aus anderen Werkstoffen (Stahl, Messing oder Wolfram) gewählt werden. Da die eingesetzte Röntgenanlage mit ihrer Nanofokus Röhre auf 190 kV begrenzt ist, wurden keine stark absorbierenden Werkstoffe untersucht.

Die Absorption von Röntgenstrahlen in Materie ist abhängig von der Dichte ρ des Werkstoffes sowie der Kernladungszahl Z und der Wellenlänge λ der Röntgenstrahlung. Die hinter dem Werkstoff austretende Intensität der Röntgenstrahlung I berechnet sich nach Formel (1). Hierbei kann der lineare Abschwächungskoeffizient über Formel (2) angenähert werden.

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

I_0 : Anfangsintensität
 μ : linearer Abschwächungskoeffizient
 x : durchstrahlte Strecke

$$\mu \sim \lambda^3 \cdot Z^3 \cdot \rho \quad (2)$$

Nach Formel (2) ist der lineare Abschwächungskoeffizient von Kunststoffen (Filament) um den Faktor 200 niedriger als der von Titan (bei Stahl Faktor 1000), was dazu führt, dass im Durchstrahlungsbild der Kontrast zwischen niedrig absorbierendem Kunststofffilament und Luft fast nicht vorhanden ist. Die Problematik des schlechten Kontrastes im Durchstrahlungsbild von Kunststofffilament und Luft konnte durch die Wahl eines geeigneten Filaments reduziert werden. Kommerziell sind Filamente mit Bronzepartikeln erhältlich. Durch den hohen Bronzeanteil verändert sich allerdings die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes, was zu einer Veränderung des Aufschmelzverhaltens führt. Deshalb wurden Filamente hergestellt, welche neben dem Grundmaterial Polystyrol (Styrolution® PS 486N) einen geringen Anteil an Wolframpulver (1,3 Vol. %; 0,56 Vol. % und 0,27 Vol. %) enthalten. Der Durchmesser der einzelnen Wolframpartikel ist dabei kleiner als 6,3 μm . Nach der Eincompounding des Wolframpulvers in den Kunststoff, wurde aus dem entstanden Extrudat in einem zweiten Schritt ein Filament mit einem Durchmesser von 2 mm extrudiert. Dafür wurde ein Schneckenextruder verwendet. Durch den geringen Volumenanteil verändert sich die Wärmeleitfähigkeit des Filaments nur geringfügig, sodass das Verhalten einem reinen Kunststofffilament ähnelt. Das hergestellte Filament liefert eine deutliche Kontrastverbesserung im Vergleich zum reinen Kunststofffilament.

Als Extrusionsparameter wurden drei Temperaturen (220 °C, 240 °C und 260 °C) sowie drei Filamentvorschubgeschwindigkeiten (0,5 mm/s, 2 mm/s und 4 mm/s) angewendet. Während des Scanvorgangs wurde kontinuierlich Filament extrudiert, sodass mit Artefakten durch die Bewegung zu rechnen ist. Mit den in Tabelle 1 gezeigten Röntgenparametern wurden die CT-Scans durchgeführt und es konnte so eine Scanzeit von unter 5 Minuten erzielt werden.

Tabelle 1: Röntgenparameter und Einstellung des CT-Scan

Spannung	190 kV
Stromstärke	71 μ A
Geometrische Vergrößerung	11,67
Belichtungszeit	357 ms
Bilder	720
Kantenlänge Voxel	23,8 μ m
Detektor	Varex 2530 HE 2x2 2 pF

3. Ergebnisse

Mit dem Aufbau wurden unterschiedliche Versuche durchgeführt. In der Durchstrahlungsprüfung kann im Livebild das Filament beim Eintauchen in die Düse beobachtet werden. Auch wenn der Kontrast im interessanten Bereich der Düse zwischen Filament, Düse und Luft noch nicht optimal ausfällt (Abb. 3), konnte durch die Verwendung des Wolframfilament der Kontrast so verbessert werden, dass im Livebild das Filament direkt beobachtet werden kann und somit Rückschlüsse auf das Aufschmelzverhalten gezogen werden können.

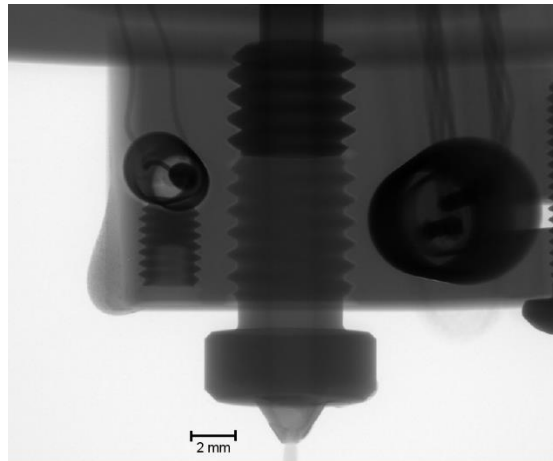
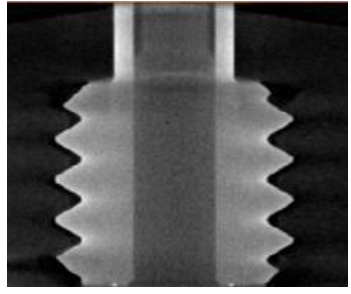
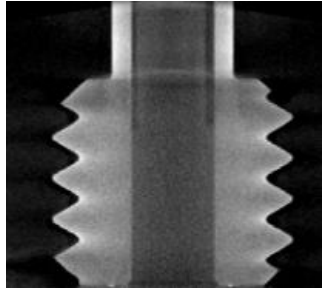
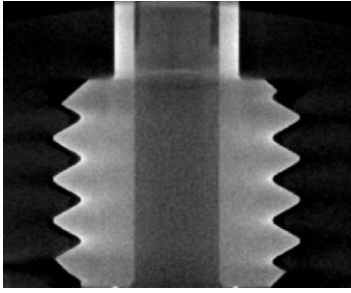
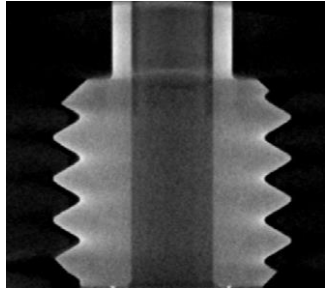
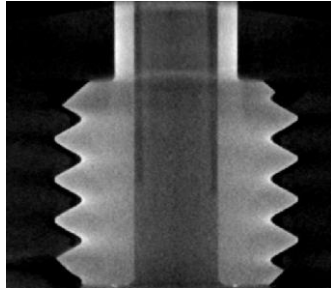
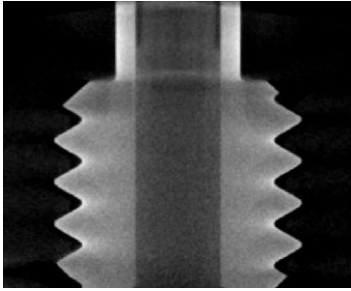
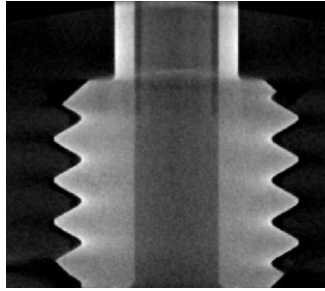
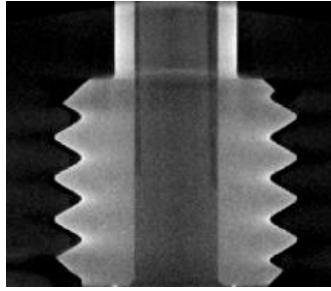


Abb. 3: Durchstrahlungsbild der Düse bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 mm/s und einer Temperatur von 240 °C; Düse im Zentrum; Links: Temperaturfühler; Rechts: Heizelement

Der CT-Scan des Aufbaus bei einem laufendem Extrusionsprozess lieferte sehr gute Ergebnisse, obwohl der Extrusionsprozess kein stationärer Prozess ist und mit Bewegungsartefakten zu rechnen ist. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse des CT-Scans bei unterschiedlichen Verfahrensparametern gezeigt. Die Bilder zeigen je einen Teil eines Schnittbilds aus dem oberen Bereich der Düse, nämlich den oberen Teil des Heizblocks und den unteren Teil der Heatbreak. Gut zu erkennen ist bei allen Bildern der Luftspalt im oberen Bereich der Düse zwischen Filament und Düse. Es wird deutlich, dass sich mit einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit der Luftspalt zunehmend über einen längeren Bereich der Düse erstreckt. Der Einfluss der Temperatur ist im untersuchten Temperaturbereich (220 °C, 240 °C und 260 °C) nicht ausgeprägt. Bei 220 °C und 4 mm/s konnte keine Messung durchgeführt werden, da durch die niedrige Temperatur und hohe Vorschubgeschwindigkeit ein zu hoher Gegendruck in der Düse entsteht, sodass kein Extrusionsprozess möglich ist. Die Kombination aus hoher Vorschubgeschwindigkeit und niedriger Düsenemperatur spiegelt jedoch kein praxisrelevantes Verarbeitungsfenster wieder und soll als Extrembeispiel dienen.

Tabelle 2: Schnittbilder des CT-Scans bei unterschiedlichen Versuchsparametern (Vorschubgeschwindigkeit und Düsentemperatur) aus dem oberen Düsenbereich

	0,5 mm/s	2 mm/s	4 mm/s
220 °C			Keine Messung durchführbar
240 °C			
260 °C			

In Abb. 4 ist vergrößert die Messung bei 260 °C und 2 mm/s als Durchstrahlungsbild und rekonstruiertes Schnittbild im Ganzen dargestellt. Um eine quantitative Bewertung des Kontrasts zu ermöglichen wurden die Grauwerte entlang von vier Linien ermittelt. Die Lage der Linien sind in Abb. 4 dargestellt. Die Positionen wurden so gewählt, dass zwei Linien im Bereich des festen Filaments liegen (obere und mittlere Position), eine im Übergangsbereich zwischen festem und flüssigem Bereich (untere Position) und eine im schmelzflüssigen Bereich (schmelzflüssige Position). Im Durchstrahlungsbild Abb. 5 ist eine Änderung des Grauwertes im oberen Bereich der Düse beim Übergang von der Düse zu Filament zu erkennen. An der unteren Position bzw. der schmelzflüssigen Position ist diese Änderung weniger ausgeprägt, was auf die größere Materialdicke im Gewindebereich der Heatbreak zurückzuführen ist. In Abb. 6 sind die Grauwerte des rekonstruierten Schnittbildes entlang der Linien aufgetragen. Deutlich zu erkennen sind die niedrigen Grauwerte im Bereich von 0,3 mm und 2,1 mm bei der oberen und mittleren Position sowie bei der unteren Position mit geringerer Ausprägung. In der schmelzflüssigen Position zeigt der Gauwertverlauf keinen Luftspalt. So kann über die Grauwerte ein Nachweis über die Breite des Luftspaltes geführt werden. Der Ort des Aufschmelzvorgangs kann so genau bestimmt werden. Für die Analyse der Aufschmelzzone ist ein CT-Scan während des Extrusionsprozesses somit deutlich besser geeignet, als die Untersuchung mit einfacher Durchstrahlung. Der Kontrast kann im 3D-Scan so erheblich verbessert werden, während der Einfluss der Bewegung des Filaments bzw. der Schmelze keinen essentiellen Einfluss auf die CT-Bildgebung hat. Dies lässt auf einen nahezu stationären Prozess schließen.

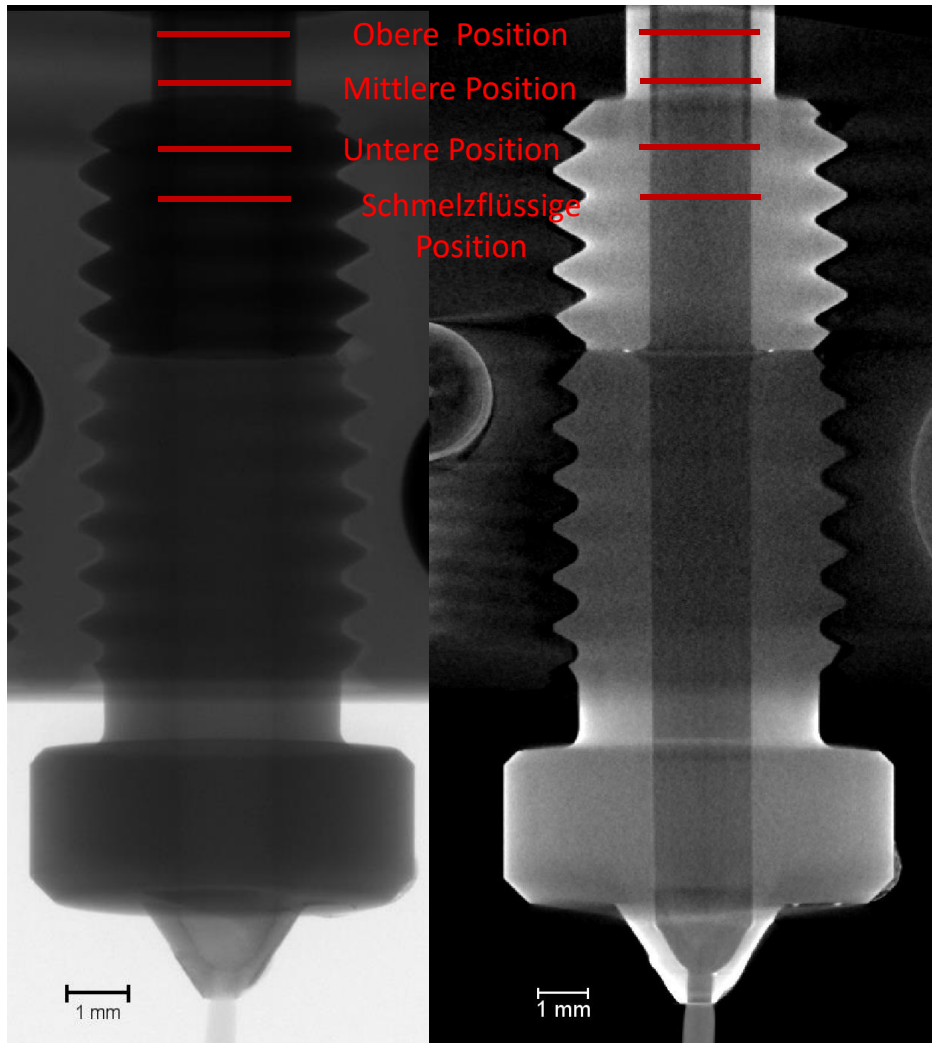


Abb. 4: Lage der Linien zur Grauwertanalyse Rechts: Durchstrahlungsbild 260 °C/ 2 mm/s; Links: Rekonstruiertes Schnittbild bei 260 °C und 2 mm/s

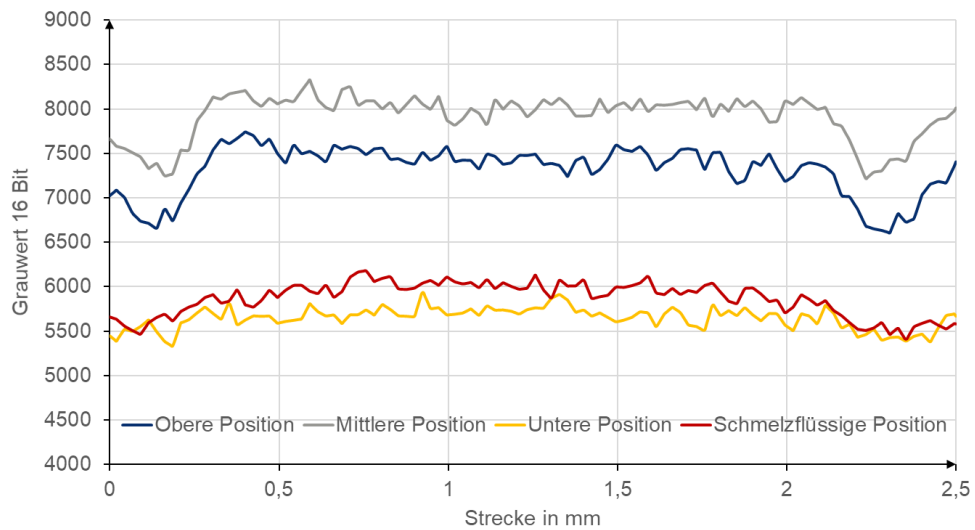


Abb. 5: Grauwertverlauf entlang der Linien im Durchstrahlungsbild

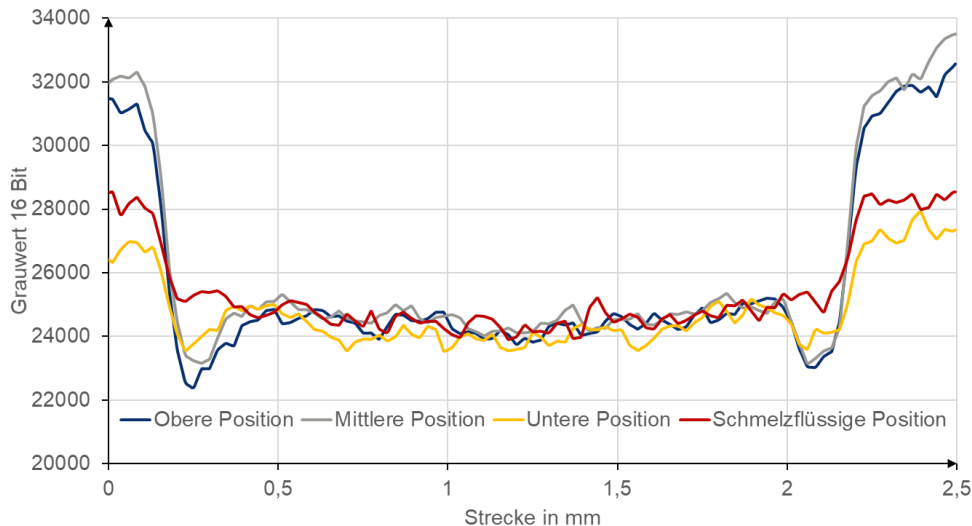


Abb. 6: Grauwertverlauf entlang der Linien im Rekonstruktionsbild

4. Fazit und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass der entwickelte Aufbau sich bei CT-Messungen sehr gut zur Untersuchung des Extrusionsprozesses beim FFF-Druck eignet und hier eine detaillierte Betrachtung der Aufschmelzzone möglich ist. Hierdurch können Simulationen nun erstmals exakt validiert werden. Dies soll im nächsten Schritt geschehen. In Zukunft ist eine weitere Optimierung des Aufbaus zur Verbesserung des Durchstrahlungskontrasts mit anschließender Verbesserung der Düsengeometrie angedacht. Außerdem hat sich in den CT-Scans gezeigt, dass eine Bestimmung der Strangaufweitung beim Austritt aus der Düse möglich ist, was einen weiteren direkten Vergleich mit Simulationen ermöglicht.

Referenzen

- [1] SCULPTEO. *The State of 3D Printing 2021 Edition*, 2021 [Zugriff am: 2. März 2022]. <https://www.sculpteo.com/en/ebooks/state-of-3d-printing-report-2021/>
- [2] STRATEGY&. *Marktvolumen für gedruckte Produkte steigt bis 2030 auf 22,6 Milliarden Euro*. München, 2018.
- [3] GO, J., S.N. SCHIFFRES, A.G. STEVENS and A.J. HART. Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design. In: *Additive Manufacturing*, 2017, **16**, 1–11. Doi:10.1016/j.addma.2017.03.007
- [4] PENG, F., B.D. VOGT and 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
- [5] 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.
- [6] YANG, D., H. ZHANG, J. WU and 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
- [7] HONG, Y., M. MRINAL, H.S. PHAN, V.D. TRAN, X. LIU and 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
- [8] OSSWALD, T.A., J. PUENTES and J. KATTINGER. Fused filament fabrication melting model. In: *Additive Manufacturing*, 2018, **22**, 51–59. Doi:10.1016/j.addma.2018.04.030
- [9] KATTINGER, J., T. EBINGER, R. KURZ and C. BONTEN. Numerical simulation of the complex flow during material extrusion in fused filament fabrication. In: *Additive Manufacturing*, 2022, **49**, 102476. Doi:10.1016/j.addma.2021.102476