

Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen des Laser-Sinterns mit Endlosfaserverstärkung

Fehlstellen im Laser-Sintern mit Endlosfasern

S. Zeidler, S. Henschel, J. Fleischer

ZUSAMMENFASSUNG Die additive Fertigung von endloskohlenstofffaserverstärkten Kunststoffbauteilen (CFK) ermöglicht die wirtschaftliche Herstellung komplexer Bauteile für diverse Branchen. Laser-Sintern als Verfahren konnte erst vor Kurzem zur Herstellung von CFK befähigt werden. Während die Integration validiert wurde, sind die Mechanismen hinter dem Prozess nicht vollständig verstanden. In diesem Beitrag werden erste Einflüsse der Prozessparameter auf die resultierende Porosität vorgestellt, um die Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen als Schlüssel zu einer Prozess-optimierung zu erforschen.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Faserverbundwerkstoffe, Forschung

Porosity in laser-sintering with continuous fibers

ABSTRACT Additive manufacturing of continuous fibre-reinforced plastic components (CFRP) enables the cost-effective production of complex components for various industries. Laser sintering as a process has only recently been enabled for the production of CFRP. While the integration has been validated, the mechanisms behind the process are not yet fully understood. In this paper, first influences of the process parameters on the resulting porosity are presented in order to investigate the process-structure-property relationships as the key to process optimisation.

1 Motivation

CFK-Bauteile bieten eine effiziente und kostengünstige Möglichkeit, den Energieverbrauch und die Emissionen zukünftiger Produkte zu reduzieren [1]. Der Einsatz von Endloskohlenstofffasern erlaubt die belastungsgerechte Verbesserung der mechanischen Eigenschaften dieser faserverstärkten Bauteile [2]. Steigende Kundenanforderungen resultieren in einer Zunahme der Anzahl der Produktvarianten und steigern damit auch den Bedarf an einer wirtschaftlichen und flexiblen Fertigung dieser Varianten. Additive Fertigung (AM) zeichnet sich als eine Lösung für diese Herausforderungen ab, indem sie eine werkzeuglose und zeiteffiziente Herstellung von CFK-Bauteilen ermöglicht, die einen hohen Grad an Individualisierung und Komplexität der Bauteile zulässt.

Für die Herstellung solcher Bauteile existieren prinzipiell zwei additive Verfahrensklassen: Die Materialeextrusion (MEX) ist ein in der Literatur gut untersuchtes und dokumentiertes Verfahren zur additiven Fertigung von CFK-Bauteilen. Verfahren zur Herstellung von CFK-Bauteilen in dieser Klasse sind das Fused Layer Modeling (FLM, auch FDM oder FFF genannt) oder das Arburg Kunststoff Freiformen (AKF) [3–7]. Die mit diesem Verfahren hergestellten Teile für technische Anwendungsfälle entsprechen jedoch nicht den Anforderungen der Kunden beziehungsweise Verbraucher an die Matrix. Dies liegt an der Bildung von Hohlräumen durch die Ablagerung von Polymersträngen bei MEX. Darüber hinaus erfordert die Notwendigkeit von Stützstrukturen für diese Prozesse ein zeitaufwendiges Entfernen dieser Struktu-

ren in Nachbearbeitungsschritten. Stützstrukturen schränken auch die mögliche Komplexität der Teile ein, verhindern die Herstellung von Überhängen, Hohlräumen oder Hinterschneidungen und führen häufig zu unebenen Oberflächen. Das Pulverbettverfahren (LPBF), bietet eine Lösung für diese Herausforderungen. Bei pulverbasierten AM-Verfahren wirkt das Pulver, das das gefertigte Bauteil umgibt, als Träger, wodurch Stützstrukturen wegfallen und komplexere Bauteile mit größerer Designfreiheit möglich sind. In dieser Klasse bietet das Lasersintern (LS) deutliche Vorteile hinsichtlich der mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie der Langzeitstabilität, welche an Spritzguss heranreichen [8, 9]. Im Vergleich zu MEX-gefertigten Bauteilen weisen LS-Teile eine höhere Maßgenauigkeit, eine geringere Oberflächenrauheit und eine deutlich geringere Anisotropie auf [8, 10].

Aufgrund dieser Eigenschaften lassen sich mit dem LS in einem Prozessschritt hochfunktionale, endproduktnahe Bauteile herstellen. Durch den Verzicht auf Stützstrukturen kann der Pulverbettraum vollständig mit vertikal und horizontal angeordneten Bauteilen gefüllt werden, was eine kostengünstige Produktion von Kleinserien ermöglicht [8]. LS stellt somit eine vielversprechende Alternative für die additive Herstellung von CFK-Bauteilen dar. Aufgrund der aus dem Pulverbettverfahren resultierenden Herausforderungen wurde dieses Verfahren jedoch erst kürzlich für die automatisierte Herstellung von CFK-Bauteilen durch die Integration von endlosen Kohlenstofffaser-Rovings in eine Polyamid 12 (PA 12)-Matrix befähigt [11–14].

Hierbei ist für einen industriellen Einsatz in funktionalen Bauteilen eine robuste, wiederholbare und einstellbare Fertigung not-

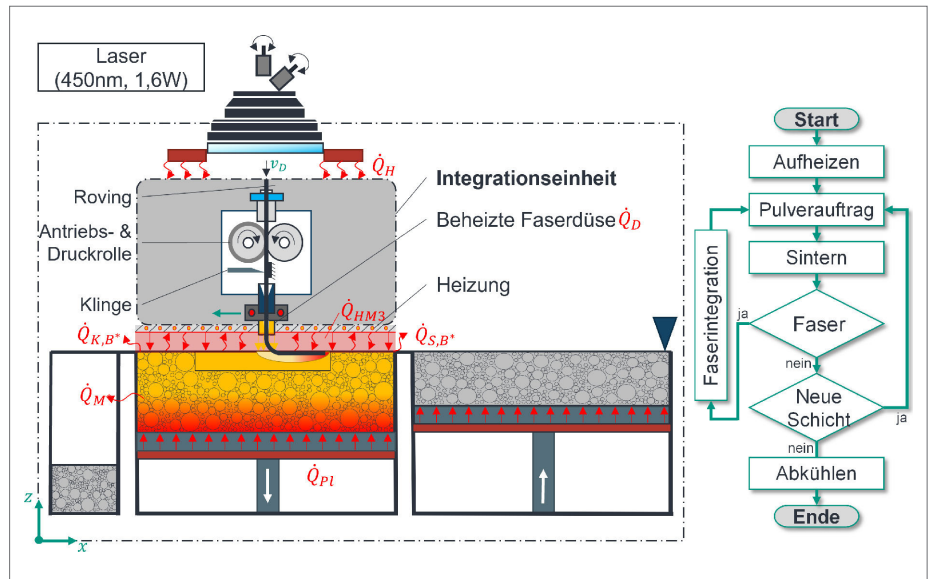
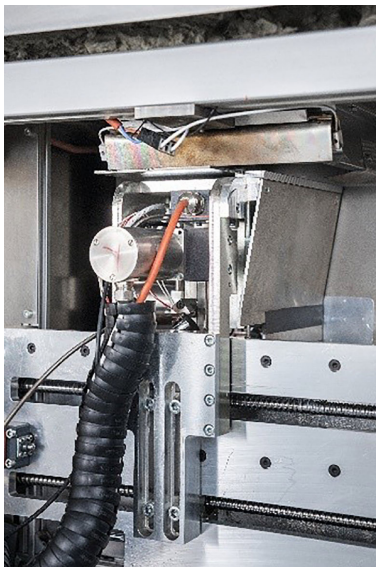


Bild 1. Die entwickelte Faserintegrationseinheit. Grafik: links, ©KIT, Amadeus Bramsiepe und Prozessschema, rechts, KIT/wbk nach [17]

wendig. Essentiell für diesen neuen Prozess ist daher ein Verständnis der Wirkungszusammenhänge, um den aktuell noch unreifen Prozess zu einem robusten und industriell brauchbaren Prozess reifzumachen.

2 Lasersinteranlage für CFK-Bauteile

Die entwickelte Prototypmaschine besteht aus einer Lasersintermaschine mit Faserintegrationseinheit, um Rovings in die bereits gesinterten Bereiche des Bauteils zu integrieren. Erreicht wird dies durch eine beheizte Düse zum lokalen Aufschmelzen des Polymers und eine Förderung für den Roving. Maschine und Prozess sind in **Bild 1** abgebildet. Die Düse erzeugt eine Wärmeinflusszone (WEZ) mit charakteristischer Breite und Tiefe [15]. Die Integration des Roving erfolgt dann durch eine synchronisierte Bewegung zwischen Düsenvorschub und Rovingförderung. Dieser Prozess wurde in [12–14] analysiert. Die mechanischen Eigenschaften wurden am identifizierten Punkt der zeitoptimalen Integration analysiert und lagen signifikant unter den theoretischen Werten des Mischungsmodells von Voigt [16]. Als ursächlich wurde Porosität identifiziert, die hauptsächlich aus dem Rovingmaterial und dem Integrationsprozess stammen. Diese Porosität tritt an der Grenzfläche und im Roving selbst auf, was zu Bereichen ohne Kraftübertragung und damit zu einer reduzierten Belastbarkeit führt. Für die Herstellung von CFK-Bauteilen mit bestmöglichen mechanischen Eigenschaften, muss die Porosität sowohl prozess- als auch werkstoffseitig reduziert werden.

3 Ziel und Ansatz zur Untersuchung

Fokus dieses Beitrags ist die Untersuchung der prozessinduzierten Porosität. Um bestmögliche mechanische Eigenschaften zu erzielen, muss die Entstehung dieser Porosität untersucht und gezielt eingestellt werden. Dabei erzeugt die Prozessführung eine innere Bauteilstruktur auf Mikro- und Mesoebene, welche maßgeblich die Bauteileigenschaften diktiert. Aus diesem Grund soll eine detaillierte Untersuchung der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen angestrebt werden, um schlussendlich eine Fertigung

nach Eigenschaftsvorgabe und die Optimierung des Prozesses basierend auf Vorgaben des Anwendungsfalls zu ermöglichen [18].

In einem ersten Schritt wurden die relevanten Einflussfaktoren der Rovingintegration herausgestellt. Hierbei haben sich die Faktoren Düsenvorschub v_D , -temperatur T_D , -abstand d_D sowie die Temperatur der Oberfläche T_O herausgestellt. Zusätzlich wurden Proben mit einem anderen Material mit besserer Tränkung hergestellt. Zu diesem Zweck wurde zunächst eine Auswahl vielversprechender Prozessparameter getroffen. Die Temperatur der Heizmatte (Wärmequelle 3) und der Abstand zwischen der Heizmatte und der Pulveroberfläche beeinflussen den Druck in gleicher Weise: Sie bestimmen die Temperatur der Pulveroberfläche. Daher wurde beschlossen, nur den Einfluss der Temperatur der Heizmatte zu untersuchen. Die daraus resultierende Parameterauswahl für eine OFAT-Untersuchung (one-factor-at-a-time) ist in **Tabelle 1** aufgeführt. Die Studie verwendet rechteckige Proben mit einer Länge 75 mm, einer Breite von 10 mm und einer Höhe von 3 mm. Der Grund für die gewählte Länge der Proben ist die Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Parameter im Versuchsplan (**Tabelle 2**) und der beschriebenen Varianten der Faserablagerung (gefördert und herausgezogen). Mit der gewählten Länge sind beide Bereiche groß genug, um später getrennt und separat untersucht werden zu können.

Zur Abschätzung der Stichprobenmenge kann unter Zugrundelegung annähernd normalverteilter Ergebnisse die Formel

$$N \geq \left(\frac{z^* \sigma}{e} \right)^2$$

mit Standardabweichung σ , Konfidenzniveau z und Größe des maximal tolerierbaren Fehlers e . Setzt man den Fehler auf die Größe des zu erkennenden Effekts Δ , wählt ein Konfidenzniveau von 99 % (resultierend in einem z -Wert von circa 2,33) und wählt für die Größe des zu erkennenden Effekts ein σ , resultiert eine Stichprobenmenge von 5,43 Bauteilen. Um bei Prozessfehlern ausreichend Proben vorliegen zu haben, wurden je Versuch neun Proben gefertigt. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass für jedes Bauteil zwischen dem Beginn der Faserintegration im vorderen Bereich des Bauteils und dem Ende der Faserintegration im hinteren Bereich des Bauteils unterschieden wird. Der

Tabelle 1 Wahl der Prozessparameter.

Faktor	Faktorstufe 1 (+)	Faktorstufe 2 (-)
Düsenvorschub (v_D)	30 mm/min	100 mm/min
Düsentemperatur (T_D)	345 °C	280 °C
Düsenhöhe über dem Pulverbett (h_D)	0,6 mm	0,8 mm
Temperatur der Wärmequelle 3 (T_{HM3})	190 °C	180 °C
Material	Tejin Tenax 1k mit Pericoat 20 %	Markforged CFF

Tabelle 2 Versuchsplan („+“ = Standardwert oder Faktorstufe 1, „-“ = Faktorstufe 2).

ID	T_D	h_D	v_D	T_{HM3}	Material
1	+	+	-	+	+
2	+	+	+	+	+
3	-	+	+	+	+
4	+	+	+	+	-
5	+	+	+	-	+
6	+	-	+	+	+

Grund dafür ist, dass die Rovings zunächst aus der Düse gefördert werden, während sie am Ende (nach dem Trennen des Roving) durch die Bewegung der Integrationseinheit aus der Düse herausgezogen werden. Um den daraus resultierenden potenziellen Einfluss zu bestimmen, wurde beschlossen, für jedes gedruckte Bauteil zwei Proben zu entnehmen, eine vorne und eine hinten.

Untersucht werden die Proben zum einen mittels CT-Scan, um eine räumliche Verteilung der Porosität zu erfassen. Zum anderen werden von als interessant identifizierten Bereichen Schliffbilder angefertigt um mit einer deutlich höheren Auflösung als im CT arbeiten zu können. Daraus ergeben sich acht Mikroskopaufnahmen pro Faktorkombination aus den vier gedruckten Proben pro Faktorkombination. Da die CT-Scans zeitaufwändiger sind, wurde die Anzahl der Proben hier halbiert, sodass für jede Faktorkombination zwei Scans vorne und zwei hinten durchgeführt wurden.

4 Ergebnisse

Die Einflüsse der Prozessparameter auf die entstehende Porosität wurden in Effektdiagrammen dargestellt (**Bild 2**). Gezeigt werden konnte, dass die Düsentemperatur die Porosität in geringem Maße beeinflusst. Dabei sinkt die Porosität bei steigender Temperatur, was den in der Literatur bekannten Zusammenhängen entspricht. Hierbei führt eine höhere Temperatur zu einer niedrigeren Viskosität des schmelzflüssigen PA12. Dadurch können die Partikel schneller versintert werden und etwaige Lufteinschlüsse besser entweichen. Der leicht gesteigerte Effekt für die vorderen Bauteilbereiche lässt sich mit der durch die aktive Förderung geschuldeten tieferen Integration erklären, welche durch eine Absenkung der Schmelzviskosität weiter gesteigert wird. Der Abstand der Düse beeinflusst die Porosität stark [19]. Der Unterschied von bis zu 10 % lässt sich potentiell durch den geringeren Druck auf die Schmelze erklären, was aus der Biegesteifigkeit des Roving resultiert. Hierbei wird eine stärkere Biegung bei geringe-

rem Düsenabstand erwartet, welche in einer höheren Kraft resultiert [20]. Einen Einfluss weist auch der Düsenvorschub aus. Hierbei wird eine bis zu 12 % höhere Porosität beobachtet, wenn der Düsenvorschub von 30 mm/min auf 100 mm/min angehoben wird. Auch dies deckt sich mit den aus Charakterisierungen von Materialextensionsverfahren stammenden Beobachtungen der Literatur. Durch die geringere Geschwindigkeit verbleibt das Polymer länger auf einer höheren Temperatur, was das Schließen von Poren begünstigt. Die Oberflächentemperatur weist ebenfalls einen positiven Effekt auf die Porosität auf. Eine nur um 10 °C höhere Temperatur der Oberfläche begünstigt den Wärmeübertrag zwischen der beheizten Faserdüse und dem im Pulverbett befindlichen Bauteil, wodurch eine im Mittel um etwa 10 % geringere Porosität beobachtet wird. Ebenfalls beobachtet werden konnten Unterschiede zwischen vorderem (aktiv gefördertem) und hinterem (ausgezogenem) Probenbereich. Die Effektrichtung ist hierbei äquivalent. Mit Ausnahme der Oberflächentemperatur werden die aktiv geförderten Bauteilbereiche stärker von den Prozessparametern beeinflusst. Der leicht stärkere Einfluss der Oberflächentemperatur bei den ausgezogenen Bereichen lässt sich durch den Wegfall der Druckkomponente aus der Förderung erklären. Hierbei ist lediglich noch die Schmelzviskosität entscheidend, welche durch eine höhere Oberflächentemperatur abgesenkt wird.

Aufgefallen ist neben entstehender Porosität ein Bereich von unversintertem Pulver über der Faser (siehe **Bild 3**). Dieser stellt ebenfalls eine Schwächung des Bauteils dar, welche im nicht im klassischen Sinne als Pore identifiziert werden würde, jedoch durch mangelhafte Anbindung der Faser und fehlender Kraftübertragung einen ähnlichen Effekt aufweist, jedoch als separate Defektklasse einzustufen ist. Aus diesem Grund wird dieses Phänomen in die nähere Betrachtung aufgenommen um die Entstehung und Vermeidung solcher Bereiche zu untersuchen. Vermutet wird, dass die Integration des Roving in die tieferen Schichten eine Art Graben erzeugt, den das Pulver der nächsten Schicht füllt und für dessen vollständige Versinterung die mit der nächsten Schicht

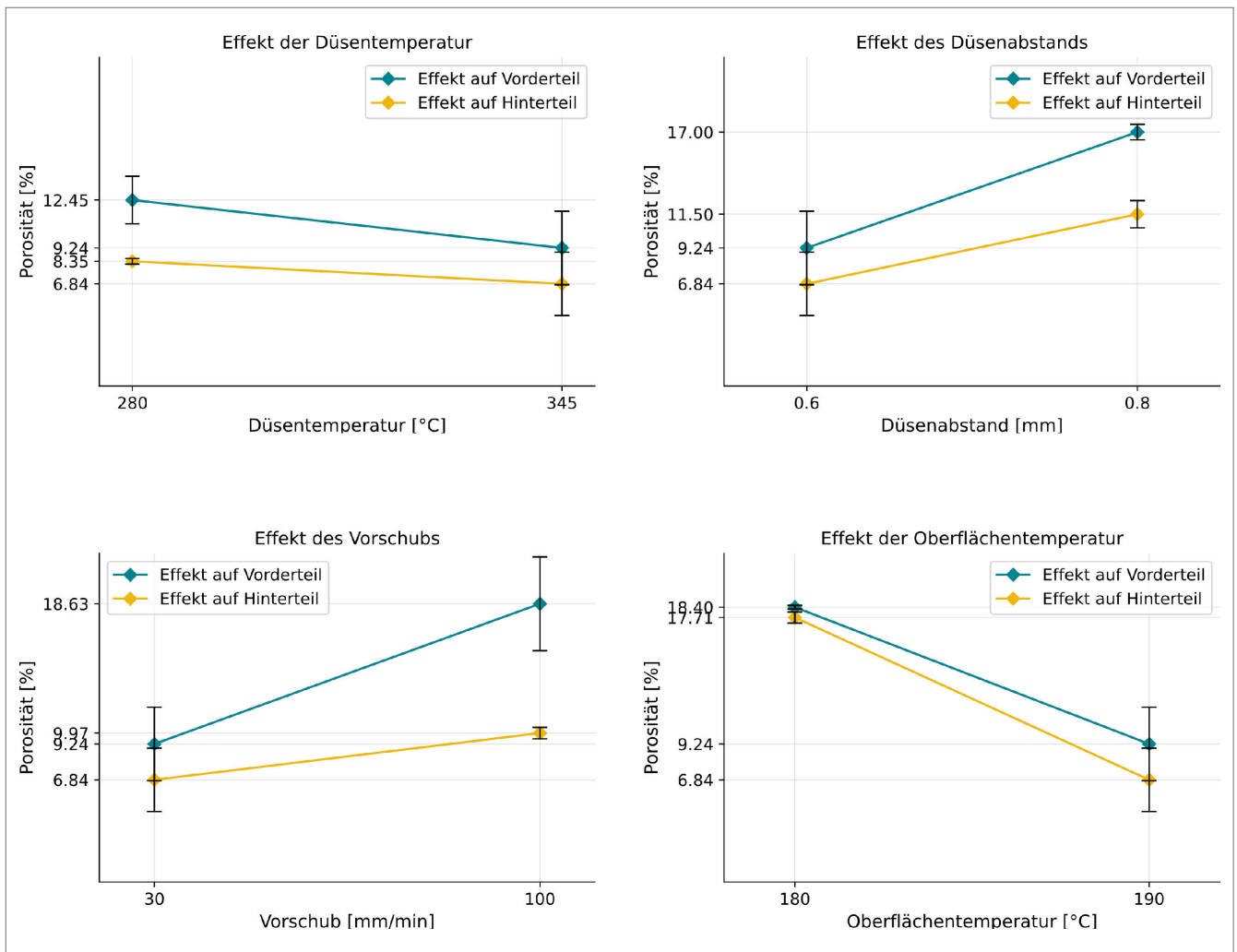


Bild 2. Haupteffektdiagramme der Prozessparameter vs. Porosität. Grafik: KIT/wbk

eingebraachte Laserenergie nicht ausreichend ist. Die Effekte der Prozessparameter auf die Entstehung von Bereichen unversinteren Pulvers soll phänomenologisch untersucht werden. Hierfür wurde ein Bereich von 2 mm Höhe und 4 mm Breite mit Mittelpunkt des Faserpfades untersucht. Die Segmentierung der Bilder in die Bereiche Vollmaterial, Pore und unversinterter Pulver fand dabei mittels der in der zur Auswertung genutzten Software („VGStudio Max“, Volume Graphics GmbH, Heidelberg) integrierten KI statt. Hierbei konnten durch den Anwender Materialbereiche im Schnittbild gelabelt werden, welche dann zur Auswertung des gesamten Volumens genutzt wurden. Dadurch werden nicht nur Leerstellen – wie in der ersten Auswertung mittels der Methode „VG EasyPore“ untersucht – markiert, sondern auch Bereiche unversinterter Materials.

Für das entstandene, unversinterter Pulver über dem Roving konnte gezeigt werden, dass die Menge bei höherer Düsentemperatur zunimmt. Die Größe der Effekte zwischen vorderen und hinteren Bauteilbereichen ähnelt sich hierbei stark, weshalb lediglich eine Mittelung stattfindet. Die Zunahme beträgt dabei 4 %. Erklärt wird dies durch eine geringere Einbettiefe des Roving, wodurch die lokale Höhe der Frischpulverschicht abnimmt. Der Abstand der Düse vom Pulverbett wirkt sich wie auch auf die Porosität negativ auf das unversinterter Pulver aus, wobei der Effekt



Bild 3. Beispielhafter CT-Scan einer Probe. Gelb markiert sind Poren und unversinterter Pulver. Deutlich zu sehen ist der Bereich unversinterter Pulvers entlang des Roving. Grafik: KIT/wbk

hier 4 % beträgt und damit deutlich geringer ist, als der Effekt auf die Porosität. Die Düsengeschwindigkeit weist ebenfalls einen positiven Effekt auf das unversinterter Material auf. Das unversinterter Material nimmt bei höherem Düsenanschub um 4 % zu. Ein Einfluss der Oberflächentemperatur konnte nicht beobachtet werden. Der Effekt von weniger als 1 % kann nicht sicher von Messrauschen getrennt werden. Aufgrund der geringeren untersuchten Probenmenge wurde auf Fehlerbalken verzichtet, da statistische Aussagekraft nicht gegeben ist. Beschrieben wurde an dieser Stelle lediglich die phänomenologische Beobachtung.

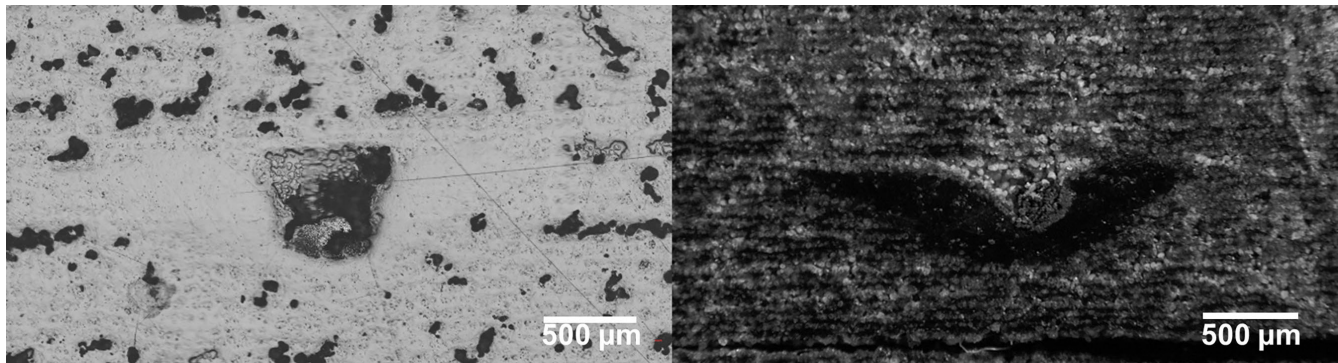


Bild 4. Mikro- (links) und Makroskopaufnahmen (rechts) der untersuchten Proben. In der Mikroskopaufnahme deutlich zu sehen: Der Kegel an unversintetem Pulver über dem Roving und die Poren (Schwarz). In der Makroskopaufnahme deutlich zu sehen ist der Bereich der Schmelze (Schwarz) und etwas heller als das Vollmaterial das unversinterte Pulver. Grafik: KIT/wbk

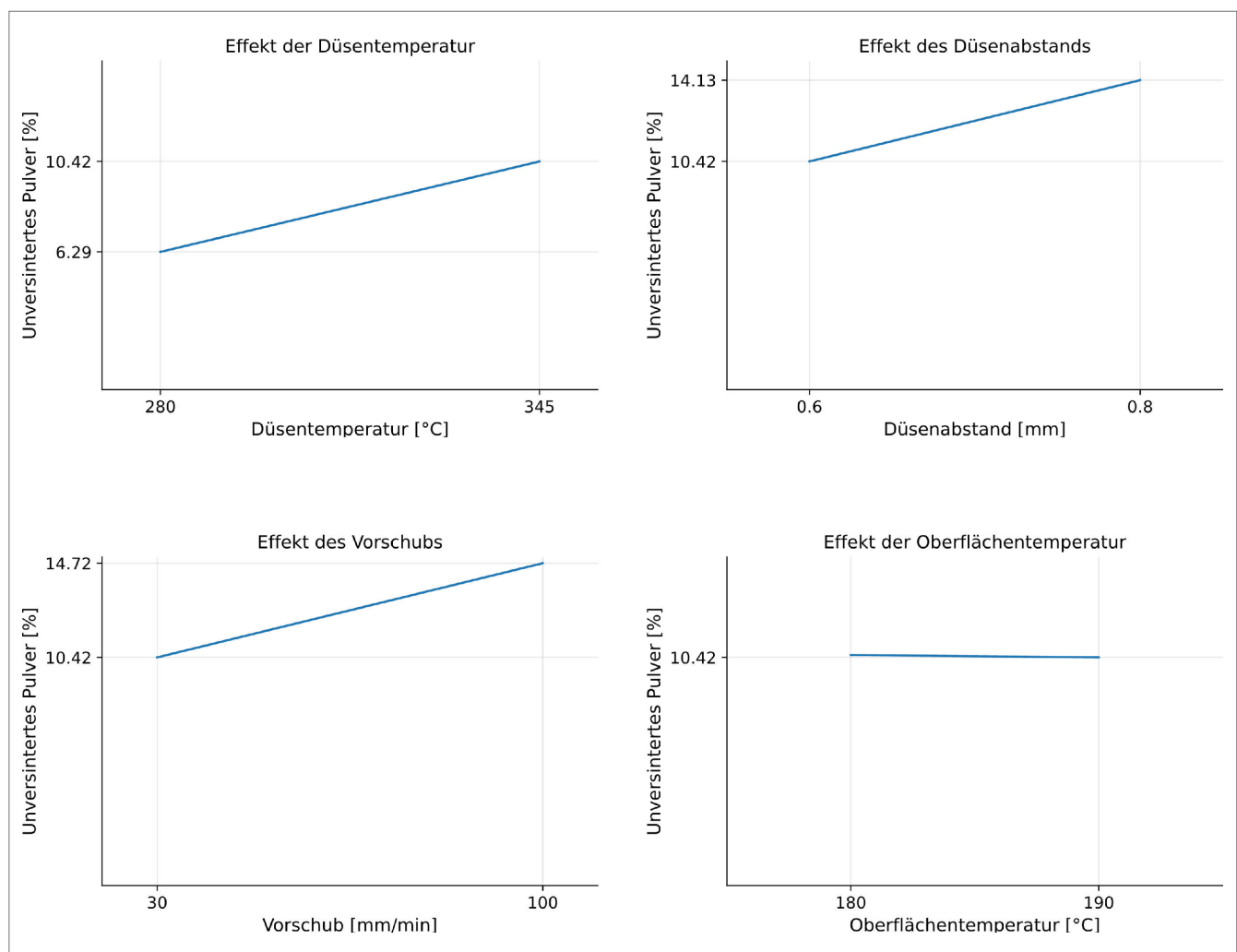


Bild 5. Haupteffektdiagramme der Prozessparameter vs. unversintertes Pulver. Grafik: KIT/wbk

Bild 5 stellt gesondert den Einfluss der Faserart dar, welcher im Anschluss mit zwei unterschiedlichen Rovingmaterialien untersucht wurde. Der negative Effekt von 10 % des geänderten Fasermaterials steht im Widerspruch zu den erwarteten Effekten. Der im Rovingkern schon getränkte Markforged CFF Roving sollte die Porosität senken. Erklärt werden könnte der beobachtete, gegenteilige Effekt durch die Förderung in der beheizten Düse, wobei die Düsentemperatur mit 345 °C deutlich

über der Schmelz- und an der Zersetzungstemperatur des Onyx-Materials (ebenfalls ein Polyamid) liegt. Dadurch könnte der thermische Einfluss der Faserdüse die Matrix angegriffen haben, wodurch entweder Gasporen oder defekte Materialstellen entstanden sein könnten. Das Fasermaterial weist ebenso einen starken Einfluss auf das unversinterte Pulver von 8 % auf. Dieses Phänomen lässt sich jedoch physikalisch nur schwer erklären.

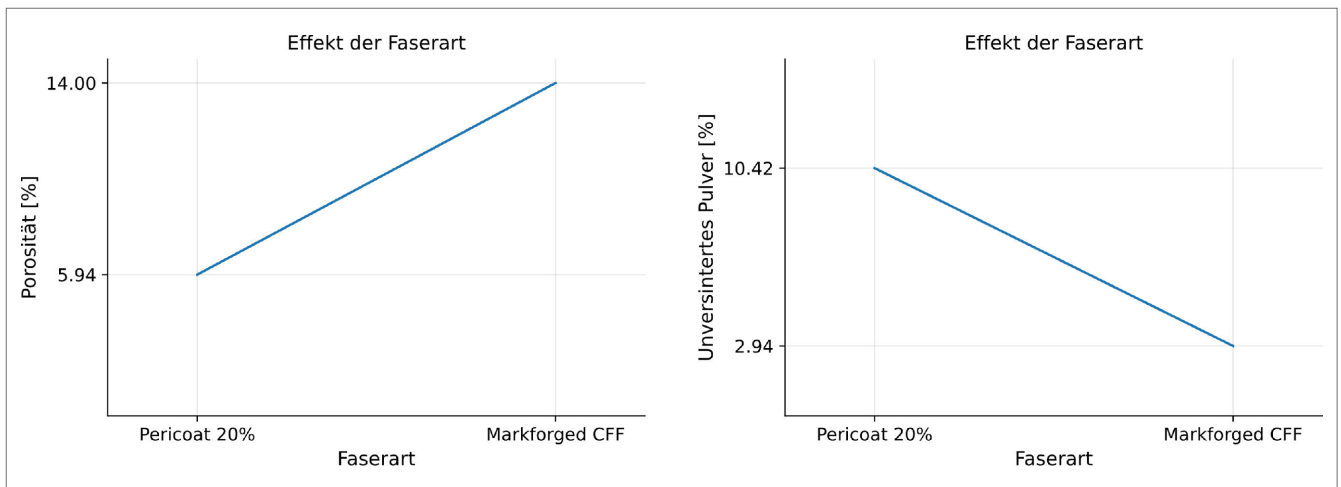


Bild 6. Haupteffektdiagramm der Faserart auf Porosität und unversintertes Pulver. Grafik: KIT/wbk

5 Zusammenfassung und Ausblick

Als Lösungsansatz zur ökonomischen Herstellung komplexer, faserverstärkter Bauteile wurde das endlosfaserverstärkte Lasersintern vorgestellt. Dieser neue Prozess weißt jedoch noch nicht die notwendige Reife auf, um in die Serie zu gehen. Um die Mechanismen hinter dem Prozess vollständig zu verstehen, ist eine detailliertere Analyse notwendig. Daher ist ein Ansatz zur Untersuchung der Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen und der dadurch optimierbaren Prozessführung des kontinuierlichen faserverstärkten Lasersinterprozesses notwendig, um Bauteile mit definierten und optimierten mechanischen Eigenschaften herzustellen. Untersucht wurden in diesem Beitrag erste Wechselwirkungen zwischen den Prozessparametern und der resultierenden Porosität. Hierbei wurde beobachtet, dass nicht nur Luft, sondern auch unversinterte Pulverbereiche entstehen, welche als Fehlstellen einzustufen sind. Für diese beiden Typen an Defekten wurde ein OFAT-Versuchsplan durchgeführt um die Relevanz der Parameter zu identifizieren um sie in späteren, detaillierteren Versuchsplänen untersuchen zu können. Die Ergebnisse zeigen dabei einen Einfluss der Parameter auf die untersuchten Zielgrößen.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen zukünftig in einer Studie der Integration einer Einzelfaser genauer untersucht werden, um mittels Wirkungsflächenversuchsplan eine Optimierung der Prozessparameter vornehmen zu können. Die Entstehung des unversinterten Pulvers durch den Integrationsprozess und das Auftragen der nächsten Schicht soll simulativ untersucht werden, um auch hier Empfehlungen für eine optimierte Integration zu geben. Schlussendlich sollen die Effekte des Versinterns der frisch aufgetragenen Schicht auf das Schließen dieses „Grabens“ an unversintertem Pulver numerisch und experimentell untersucht werden. Dann werden die Einflüsse des Ablageradius der Faser im Pulverbett sowie schlussendlich Wechselwirkungen mit anderen Rovingsträngen und Faserpfaden untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Ableitung einer Optimierungsstrategie des Prozesses. Das entwickelte Modell wird abschließend validiert und die Prozessgrenzen hinsichtlich maximaler Qualität ermittelt.

FÖRDERHINWEIS

Die dargelegte Forschung ist zum Teil durch eine Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) mit der Projektnummer 530064792 gefördert. Wir danken der DFG für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Schlüsseltechnologie Leichtbau Innovationstreiber und Garant für Ressourcen- und Energieeffizienz“, 2019. Accessed: Apr. 24 2024
- [2] H. Schürmann, Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. Accessed: Apr. 24 2024. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-540-72190-1>
- [3] B. Akhouni, A. H. Behraves, and A. Bagheri Saed, „Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer“, Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 38, no. 3, pp. 99–116, 2019, doi: 10.1177/0731684418807300
- [4] R. Matsuzaki et al., „Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation“, Scientific Reports, vol. 6, no. 1, p. 23058, 2016, doi: 10.1038/srep23058
- [5] T. Vaneker, „Material Extrusion of Continuous Fiber Reinforced Plastics Using Commingled Yarn“, Procedia CIRP, vol. 66, pp. 317–322, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.367
- [6] A. N. Dickson, J. N. Barry, K. A. McDonnell, and D. P. Dowling, „Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing“, Additive Manufacturing, vol. 16, pp. 146–152, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.06.004
- [7] F. Baumann, Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren. Düren: Shaker Verlag, 2020
- [8] M. Schmid, Laser Sintering with Plastics: Technology, Processes, and Materials. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018. Accessed: Apr. 24 2024. [Online]. Available: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9781569906842>
- [9] M. Fischer and S. Josupeit, „Material properties of additive manufactured polymer parts“, in Proceedings of the Inside 3D Printing Conference and Expo, Berlin, Germany, 2014, pp. 10–11
- [10] J. Breuninger, R. Becker, A. Wolf, S. Rommel, and A. Verl, Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

- Accessed: Apr. 24 2024. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-24325-7>
- [11] M. Baranowski, S. Beichter, M. Griener, S. Coutandin, and J. Fleischer, „Additive manufacturing of continuous fibre-reinforced plastic components by a novel laser-sintering process,” in Proceedings of the SAMPE Europe Conference, 2021
 - [12] M. Baranowski, F. Basalla, M. Friedmann, and J. Fleischer, Thermal Analysis of a Novel Laser Sintering Machine for Additive Manufacturing of Continuous Carbon Fiber Reinforced Polymer Parts. Accessed: Apr. 24 2024
 - [13] M. Baranowski, L. Völger, M. Friedmann, and J. Fleischer, „Experimental Analysis and Optimisation of a Novel Laser-Sintering Process for Additive Manufacturing of Continuous Carbon Fibre-Reinforced Polymer Parts,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 9, p. 5351, 2023, doi: 10.3390/app13095351
 - [14] M. Baranowski, V. Rabenseifner, F. Kößler, and J. Fleischer, „Experimental Determination of Mechanical Properties of Additively Manufacturing Continuous Carbon Fibre Reinforced Polymer Parts Produced by a Novel Laser Sintering Process,” in Proceedings of the SAMPE Europe Conference 2023, 2023, p. 1
 - [15] M. Baranowski, Z. Shao, A. Spintzyk, F. Kößler, and J. Fleischer, „Simulation-Based Identification of Operating Point Range for a Novel Laser-Sintering Machine for Additive Manufacturing of Continuous Carbon-Fibre-Reinforced Polymer Parts,” *Polymers*, vol. 15, no. 19, p. 3975, 2023, doi: 10.3390/polym15193975
 - [16] W. Voigt, „Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper,” *Annalen der Physik*, vol. 274, no. 12, pp. 573–587, 1889, doi: 10.1002/andp.18892741206
 - [17] M. Baranowski, „Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess: Maschinentechnik, Prozess-

entwicklung und -modellierung,” Dissertation, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2024

- [18] S. Zeidler, F. Kößler, und J. Fleischer, „Laser-Sintern mit Endlosfasern verstehen - Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen des Laser-Sinterns mit Endlosfaserverstärkung,” *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 115, Nr. 05, S. 334, 2025, doi: 10.37544/1436-4980-2025-05-24.
- [19] S. Zeidler, M. Baranowski, F. Kößler, und J. Fleischer, „Experimental analysis of fibre characteristics and their expected effects on a novel laser sintering process for additively manufactured continuous carbon fibre reinforced polymer parts,” in Proceedings of the SAMPE Europe Conference 2024, Belfast, 24th-26th September 2024, 2024
- [20] S. Zeidler, M. Güngör, F. Kößler, J. Fleischer, „Characterisation of fibre materials and treatments for continuous carbon fibre-reinforcement in a novel laser-sintering process,” in *Sampe Europe Conference 2025*, Amsterdam, 6th – 7th October 2025, 2025, S. 45992

Simon Zeidler, M.Sc. 
simon.zeidler@kit.edu

Sebastian Henschel, M.Sc. 

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer 

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
wbk Institut für Produktionstechnik
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
www.kit.edu

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)