

## Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen des Laser-Sinterns mit Endlosfaserverstärkung

# Laser-Sintern mit Endlosfasern verstehen

S. Zeidler, F. Köfler, J. Fleischer

**ZUSAMMENFASSUNG** Die additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffbauteilen (CFK) ermöglicht die wirtschaftliche Herstellung komplexer Bauteile für diverse Branchen. Das Laser-Sintern als Verfahren ist erst seit kurzem für die Herstellung von CFK geeignet. Während die Integration validiert wurde, sind die Mechanismen hinter dem Prozess nicht vollständig verstanden. Hier wird ein Ansatz zur Untersuchung der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen und der dadurch möglichen Optimierung vorgestellt.

## STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Faserverbundwerkstoffe, Forschung

## Understanding laser-sintering with continuous fibers

**ABSTRACT** The 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 developed for the production of CFRP. While the integration has been validated, the mechanisms behind the process are not fully understood. This paper presents an approach to investigate the process-structure-property relationships and the optimisation that is possible as a result.

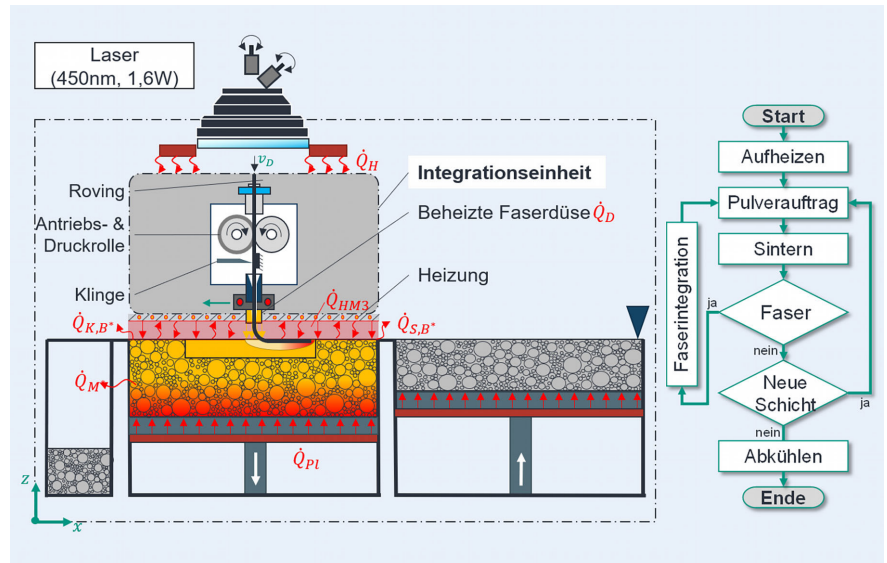
## 1 Motivation

CFK-Bauteile bieten die Möglichkeit, den Energieverbrauch und die Emissionen zukünftiger Produkte effizient und kostengünstig zu reduzieren [1]. Durch den Einsatz von Endloskohlenstofffasern können die mechanischen Eigenschaften dieser faserverstärkten Bauteile beanspruchungsgerecht verbessert werden [2]. Aufgrund steigender Kundenanforderungen nimmt die Anzahl der Produktvarianten zu und damit auch der Bedarf an einer wirtschaftlichen Fertigung dieser Varianten. Die Additive Fertigung (AM) bietet eine Lösung für diese Herausforderungen, indem sie eine werkzeuglose und zeiteffiziente Herstellung von CFK-Bauteilen ermöglicht, die einen hohen Grad an Individualisierung und Komplexität der Bauteile zulässt und findet Anwendung in beispielsweise der Luft- und Raumfahrt (Satellitenteile), der Sportindustrie (Anbauteile am Fahrrad) und der Medizintechnik (Implantate, Prothetik und Orthetik).

Die additive Fertigung kann in drei Klassen eingeteilt werden. Die Materialextrusion (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 Plastic Feeforming (APF) [3–7]. Die zweite Klasse für die additive Fertigung von CFK-Bauteilen ist die Stereolithographie (SL) oder Vat Photopolymerization (VPP) [8–10]. Die mit diesen beiden Verfahren hergestellten Teile entsprechen jedoch nicht den Anforderungen der Kunden beziehungsweise Verbraucher an die Matrix. Dies liegt an der Auswahl der Materialien, die bei VPP lichtempfindlich sein müssen, und 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 und Verschieben dieser Strukturen in Nachbearbeitungsschritten. Diese Stützstrukturen schränken auch die mögliche Komplexität der Teile ein, verhindern die Herstellung von Überhängen, Hohlräumen oder Hinterschneidungen und führen häufig zu unebenen Oberflächen. Schließlich sind diese Verfahren nicht für eine wirtschaftliche Kleinserienfertigung geeignet. Die dritte Klasse, das Pulverbettverfahren (PBF), bietet eine Lösung für diese Herausforderungen. Bei pulverbasierten AM-Verfahren dient das Pulver, das das gefertigte Bauteil umgibt, als Träger, wodurch komplexere Bauteile und eine größere Designfreiheit möglich sind. In dieser Klasse bietet das Lasersintern (LS) deutliche Vorteile hinsichtlich der mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie der Langzeitstabilität. Diese Eigenschaften sind mit denen von Spritzgussteilen vergleichbar [11; 12]. Im Vergleich zu FLM-gefertigten Bauteilen weisen LS-Teile eine höhere Maßgenauigkeit, eine geringere Oberflächenrauheit und eine deutlich geringere Anisotropie auf [12; 13].

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 [12]. Aufgrund der Matriceigenschaften stellt LS somit eine vielversprechende Alternative für die Herstellung von CFK-Bauteilen dar. Aufgrund der Herausforderungen wurde dieses Verfahren jedoch erst kürzlich für die automatisierte Herstellung von CFK-Bauteilen durch die Integration von end-



**Bild 1.** Die entwickelte Faserintegrationseinheit und Prozessschema. Grafik: links, KIT, Amadeus Bramsiepe / rechts, KIT/wbk nach [20]

losen Kohlenstofffaser-Rovings in eine Polyamid 12 (PA 12)-Matrix befähigt [14–17].

Hierbei ist für einen industriellen Einsatz in funktionalen Bauteilen eine robuste, wiederholbare und einstellbare Fertigung notwendig. Essenziell für diesen neuen Prozess ist daher ein Verständnis der Wirkungszusammenhänge, um den aktuell noch unreifen Prozess zu einem robusten und industriell brauchbaren Prozess reifzumachen. Daher werden in den folgenden Kapiteln die Anlagentechnik (Kapitel 2) und das Ziel und der Ansatz zur Untersuchung und Optimierungen vorgestellt (Kapitel 3) und in Kapitel 4 abschließend zusammengefasst, ohne Ergebnisse bereits erfolgter (zur Materialcharakterisierung) oder gerade im Prozess befindliche Untersuchungen (Prozessparameter) vorwegzugreifen.

## 2 Lasersinteranlage für CFK-Bauteile

Die von Baranowski entwickelte Prototypmaschine besteht aus einer Lasersintermaschine, die zusätzlich um eine Faserintegrationseinheit erweitert wurde, um Rovings in die bereits gesinterten Bereiche des Bauteils zu integrieren. Dies wird durch eine beheizte Düse zum lokalen Aufschmelzen des Polymers und eine Führung für den Roving erreicht. Die Maschine und der Prozess sind in **Bild 1** zu sehen. Die Düse erzeugt eine Schmelzzone (SZ) mit charakteristischer Breite und Tiefe [18]. Die Integration des Rovings erfolgt dann durch Platzierung über eine Synchronisation zwischen der Vorschubgeschwindigkeit des Rovings und der Bewegung der Düse. Dieser Prozess ist in **Bild 1** dargestellt und wurde in [14–16] analysiert. Die mechanischen Eigenschaften wurden am identifizierten Punkt der optimalen Integration analysiert und lagen signifikant unter den theoretischen Werten des Mischungsmodells von Voigt [19].

Als Ursache wurden Poren identifiziert, die hauptsächlich aus dem Roving und dem Integrationsprozess stammen. Diese Poren treten sowohl an der Grenzfläche zum Roving als auch im Roving selbst auf, was zu Bereichen ohne Kraftübertragung und damit zu einer reduzierten Belastbarkeit führt. Um mit der entwickelten Lasersintermaschine CFK-Bauteile mit bestmöglichen mechani-

schen Eigenschaften herstellen zu können, muss die Anzahl der Poren sowohl prozess- als auch werkstoffseitig reduziert werden.

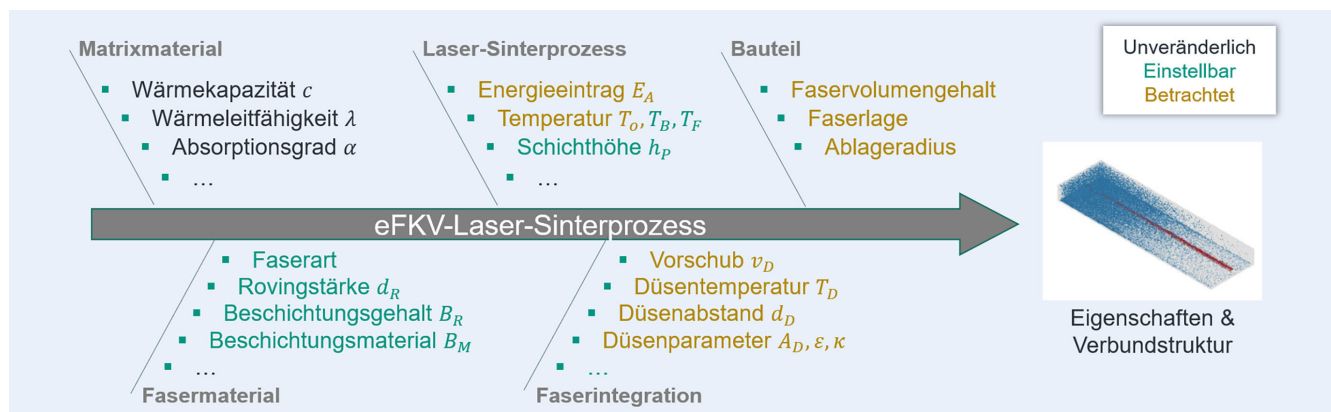
## 3 Ziel und Ansatz zur Untersuchung und Optimierung

Um bestmögliche mechanische Eigenschaften zu erzielen, müssen die prozessinduzierten Poren, die Anbindung und Tränkung des Rovings 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 zur Reifung des Prozesses eine detaillierte Untersuchung der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen angestrebt werden. Dies ermöglicht schlussendlich eine Fertigung nach Eigenschaftsvorgabe und die Optimierung des Prozesses basierend auf Vorgaben des Anwendungsfalls.

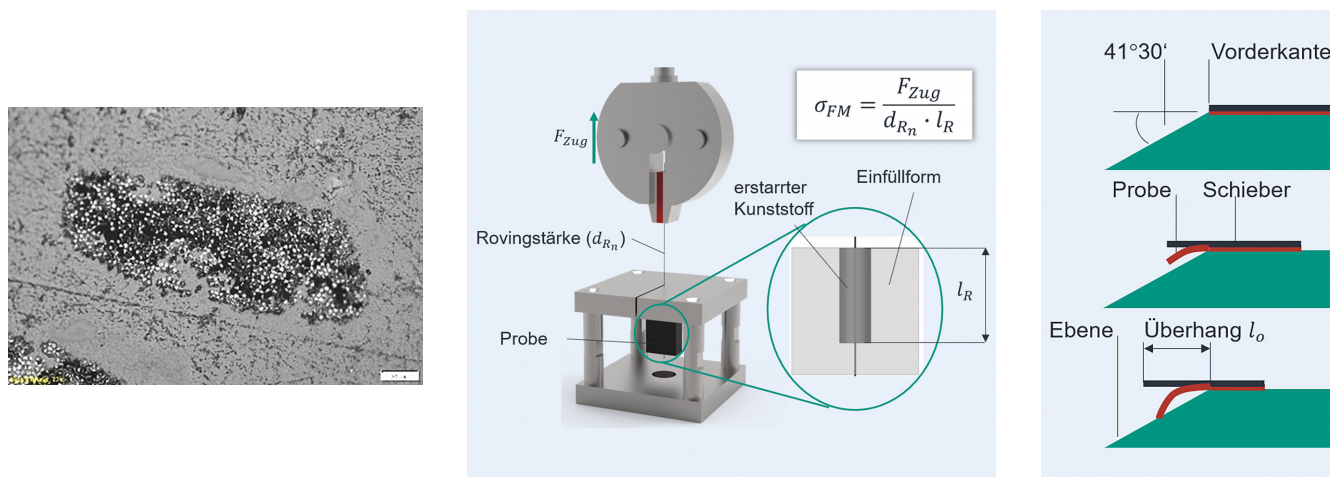
Zunächst gilt es, die relevanten Einflussfaktoren herauszustellen. Dafür wird im ersten Schritt eine Analyse der Einflussfaktoren durchgeführt. Hierbei ergeben sich Faktoren, die auf das Material, auf den Laser-Sinterprozess und auf die realisierte Faserverstärkung zurückzuführen sind. Die relevanten Einflussfaktoren sind in **Bild 2** dargestellt.

Die Faktoren wurden mit Integrations-Experimenten an der Anlage ermittelt und mittels materialografischer (Schliffbilder) und computertomografischer Methoden untersucht. Dazu wurden beispielsweise in [20] die Parameter mit Fokus auf die erstmalige Realisierung der Faserintegration untersucht. Hierbei standen vor allem die Zusammenhänge der Parameter mit der geometrischen Ausprägung der Schmelzzone untersucht. Diese Parameter besitzen jedoch auch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die entstehende Verbundstruktur. Daher ist die reine Optimierung des Faservolumengehaltes als Prozessverständnis nicht ausreichend.

Diese Faktoren werden im Anschluss in einem Screening auf ihre Auswirkungen auf die Bauteilstruktur untersucht. Dabei werden die Zielgrößen Porengehalt, -verteilung und -größe herangezogen, um eine Bewertung des Einflusses vorzunehmen. Die Auswertung der Versuche hinsichtlich der Zielgrößen erfolgt auf



**Bild 2.** Einflüsse von Material, Laser-Sintern und Faserintegration auf die Verbundstruktur. Grafik: KIT/wbk nach [20]



**Bild 3.** Poren (schwarz) im Inneren der integrierten Rovinge (links), Pulloutversuch (mitte) und Bestimmung der Biegesteifigkeit nach DIN53362 (rechts). Grafik: KIT/wbk

dreierleiweise mittels Schlichtbildern, gravimetrisch oder mittels Computertomographie. Dabei konnte ein Einfluss von Temperaturen, Integrationsgeschwindigkeiten, dem Faserpfad und den verwendeten Materialien beobachtet werden, **Bild 3**.

Im nächsten Schritt wird das zu verarbeitende Halbzeug- und Fasermaterial für den Laser-Sinterprozess charakterisiert. Hierbei sind vor allem die Faser-Matrix-Anhaftung, also die Kompatibilität zum Matrixmaterial, durch einen Pull-Out Versuch, die Eigensteifigkeit in Anlehnung an DIN53362, Geometrie durch Schlichtbilder und die Prozesszuführbarkeit mit Fehlerbildern zu untersuchen.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wird eine Optimierung der entwickelten Integrationseinheit zur Befähigung der Verarbeitung weiterer Materialsysteme ermöglicht. Dabei soll nach VDI2221 mit einer Definition von Ablauf und Anforderungen nach DIN66001 vorgegangen werden, **Bild 4**.

Anschließend folgt die Untersuchung des Prozesses, der Verbundstruktur und den resultierenden Bauteileigenschaften mit dem Ziel eines Verständnisses der Zusammenhänge. Hierbei wird in drei Schritten vorgegangen. Zunächst wird der Einfluss des Laser-Sinterns auf die Verbundstruktur untersucht. Dabei wird der Einfluss des Lasers mit den Parametern Scangeschwindigkeit und Spur-Abstand, sowie die Schichthöhe des Frischpulvers und der Faserüberstand über die letzte gesinterte Schicht mit Mitteln der statistischen Versuchsplanung vollfaktoriell untersucht. Hierbei

liegt der Fokus auf einem einzelnen integrierten Roving. Zielgrößen hierbei sind der Porengehalt, die Verteilung dieser und die Porengröße.

Ebenfalls mit einem integrierten Roving werden die Einflüsse der Faserintegration auf den Verbund untersucht. Hierbei werden die Faktoren Düsenvorschub  $v_D$ , -temperatur  $T_D$ , -abstand  $d_D$  sowie die Temperatur der Oberfläche  $T_o$ , die zusammengesetzte Größe „Tiefe der Schmelzzone  $t_{SZ}$ “ (siehe **Bild 5** (links)) und das Fasermaterial ebenfalls vollfaktoriell untersucht. Zielgrößen hierbei sind wieder Kenngrößen der Porosität und mechanische Kennwerte. Ebenfalls einen Einfluss auf die Zielgrößen besitzt der Ablageradius der Faser im Pulverbett. Dieser wird daher zunächst einfaktoriell untersucht.

Die aus diesem Schritt gewonnen Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Prozess und Bauteilstruktur werden im nächsten Schritt um die Integration und die Wechselwirkungen bei Integration mehrerer nebeneinanderliegender Rovinge erweitert. Dabei ist ebenfalls eine vollfaktorielle Untersuchung der Einflüsse der Faktoren Roving-Abstand in der Ebene ( $\Delta\alpha_x, \Delta\alpha_y$ , siehe **Bild 5** (rechts)) und in Aufbaurichtung ( $\Delta\alpha_z$ ) sowie die Tiefe und Breite ( $b_{SZ}$ ) der Schmelzzone hinsichtlich derselben Zielgrößen untersucht. Ebenfalls wird die Wechselwirkung bei der Integration mehrerer Rovinge auf Kurven mit dem Faktor der Radiusdifferenz untersucht.



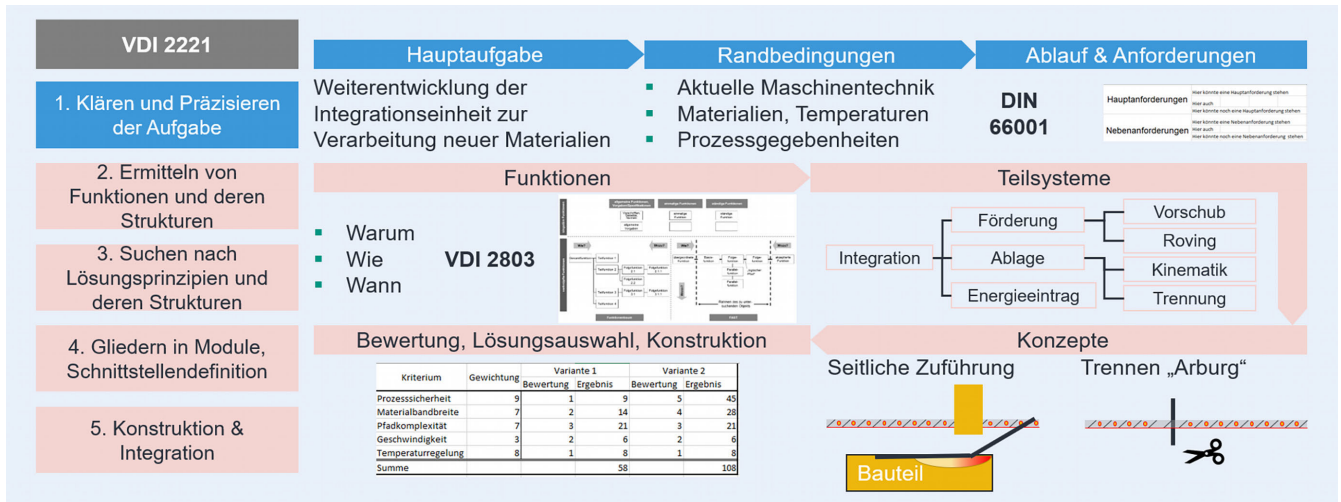


Bild 4. Vorgehen zur Weiterentwicklung der Faserintegrationseinheit. Grafik: KIT/wbk

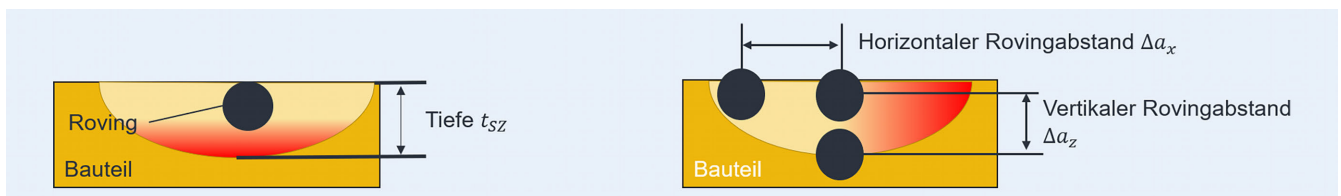


Bild 5. Darstellung ausgewählter Faktoren der Untersuchung mit Einzelroving (links) und mehreren Rovings (rechts). Grafik: KIT/wbk



Bild 6. Zielgrößenkonflikt (links) und beispielhafte schematische Darstellung der entstehenden Paretofront mit Isocharakteristika (rot) und Isochrone (lila). Grafik: rechts, KIT/wbk nach Grafik aus [21]

Durch diese Erkenntnisse ist die Ableitung einer Optimierungsstrategie des Prozesses aus dem Zielgrößenkonflikt „Verbundqualität“, „Vorschub“ und „Faservolumengehalt“ möglich (siehe Bild 6 (links)). Dazu muss aus den gewonnenen Erkenntnissen eine Pareto-Front abgeleitet werden. Auf dieser kann mittels Isocharakteristiken oder Isochronen eine Optimierung der Zeit bei gleichbleibenden Eigenschaften oder eine Optimierung der Eigenschaften bei gegebener Fertigungszeit und die dafür notwendigen Prozessparameter bestimmt werden. Eine Darstellung ist in Bild 6 (rechts) zu sehen.

Das entwickelte Modell wird abschließend mit der Fertigung von Bauteilen nach Eigenschaftsvorgabe und der mechanischen Prüfung dieser Bauteile nach ISO 527 validiert und schlussendlich Prozessgrenzen hinsichtlich maximaler Qualität ermittelt werden. Die dadurch realisierten Eigenschaftssteigerungen und Reduktionen in Prozesszeit werden mit der Literatur verglichen.

In Summe gilt es, das Prozessverständnis zu erhöhen um den bestehenden Limitationen der Prozesstechnik, wie der Prozesszeit und den realisierbaren FVG, zu begegnen. Dazu ist ein tieferes Verständnis der Faserintegration mit besonderem Fokus auf die Implikationen des Prozesses auf die Verbundstruktur notwendig.

Die besondere Herausforderung dieser Untersuchungen liegen in der Vielzahl der Faktoren sowie im limitierten Prozessraum begründet.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Als Lösungsansatz der wirtschaftlichen Herstellung komplexer Bauteile wurde das endlosfaserverstärkte Lasersintern vorgestellt. Um die Mechanismen hinter dem Prozess vollständig zu verstehen, ist eine detailliertere Analyse des Prozesses 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. Dazu werden prozessinduzierte Poren, die Anbindung und Tränkung des Roving untersucht. Eine detaillierte Analyse der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen soll die Fertigung nach Eigenschaftsvorgaben ermöglichen. Zunächst werden relevante Einflussfaktoren analysiert, die auf Material, Laser-Sinterprozess und Faserverstärkung zurückzuführen sind. Diese Faktoren werden auf ihre Auswirkungen auf die Bauteilstruktur untersucht, wobei Porengehalt, -verteilung und -größe bewertet werden. Das Halbzeug- und Faser-material wird charakterisiert, um die Faser-Matrix-Anhaftung und die Prozesszuführbarkeit zu untersuchen. Basierend auf diesen in drei Schritten gewonnenen Erkenntnissen wird die Integrationseinheit optimiert. Zunächst wird der Einfluss des Laser-Sinterns auf die Verbundstruktur untersucht, wobei Parameter wie Scangeschwindigkeit, Spur-Abstand und Schichthöhe analysiert werden. Dann werden die Einflüsse der Faserintegration und der Ablageradius der Faser im Pulverbett sowie schlussendlich Wechselwirkungen mit anderen Roving-Strängen 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] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. Accessed: Apr. 24 2024. Internet: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-540-72190-1>
- [3] Baumann, F.: Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren. Düren: Shaker Verlag, 2020
- [4] Dickson, A. N.; Barry, J. N.; McDonnell, K. A.; Dowling, D. P.: 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
- [5] Vaneker, T.: 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] Matsuzaki, R.; 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
- [7] Akhouni, B.; Behraves, A. H.; Bagheri Saed, A.: 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
- [8] Lu, Y.; Han, X.; Gleadow, A.; Chen, F.; Zhu, W.; Zhao, L.: Continuous fibre reinforced Vat photopolymerisation (CONFIB-VAT). Additive Manufacturing, vol. 60, p. 103233, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103233
- [9] Goh, G. D.; Yap, Y. L.; Agarwala, S.; Yeong, W. Y.: Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite. Advanced Materials Technologies, vol. 4, no. 1, p. 1800271, 2019, doi: 10.1002/admt.201800271
- [10] Karalekas, D.; Antoniou, K.: Composite rapid prototyping: overcoming the drawback of poor mechanical properties,” Journal of Materials Processing Technology, 153-154, pp. 526–530, 2004, doi: 10.1016/j.jmatproc.2004.04.019
- [11] Fischer, M.; Josupeit, S.: Material properties of additive manufactured polymer parts. In: Proceedings of the Inside 3D Printing Conference and Expo, Berlin, Germany, 2014, pp. 10–11
- [12] Schmid, M.: Laser Sintering with Plastics: Technology, Processes, and Materials. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2018. Accessed: Apr. 24 2024. Internet: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9781569906842>
- [13] Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. Accessed: Apr. 24 2024. Internet: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-24325-7>
- [14] Baranowski, M.; Rabenseifner, V.; Kößler, F.; Fleischer, J.: 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] Baranowski, M.; Völger, L.; Friedmann, M.; Fleischer, J.: 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
- [16] Baranowski, M.; F. Basalla, F.; M. Friedmann, M.; Fleischer, J.: Thermal Analysis of a Novel Laser Sintering Machine for Additive Manufacturing of Continuous Carbon Fiber Reinforced Polymer Parts. Accessed: Apr. 24 2024
- [17] Baranowski, M.; Beichter, S.; Griener, M.; Coutandin, S.; Fleischer, J.: Additive manufacturing of continuous fibre-reinforced plastic components by a novel laser-sintering process., In: Proceedings of the SAMPE Europe Conference, 2021
- [18] Baranowski, M.; Shao, Z.; Spintzyk, A.; Kößler, F.; Fleischer, J.: 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
- [19] Voigt, W.: Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elastizitäts-constanten isotroper Körper. Annalen der Physik, vol. 274, no. 12, pp. 573–587, 1889, doi: 10.1002/andp.18892741206
- [20] Baranowski, M.: Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess: Maschinenteknik, Prozessentwicklung und -modellierung,” Dissertation, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2024
- [21] Chen, J.; Severson, E. L.: Optimal Design of the Bearingless Induction Motor for Industrial Applications. In: 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 5265–5272



**Simon Zeidler**   
*simon.zeidler@kit.edu*  
*Tel. +49 1523 950 2628*  
*Foto: KIT / wbk*

**Florian Kößler** 

**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer** 

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe  
[www.wbk.kit.edu](http://www.wbk.kit.edu)

#### LIZENZ



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