

# **Thermische und strukturelle Analyse von Polymermaterialien in generativ gefertigten Optomechaniken für den Einsatz in der Laserentwicklung**

*F. Kranert, J. Budde, M. Hinkelmann, J. Neumann, D. Kracht*

*Laser Zentrum Hannover e.V.*

*f.kranert@lzh.de (Korrespondenz)*

*R. Lachmayer*

*Leibniz Universität Hannover / Institut für Produktentwicklung und Gerätebau*

*ipeg@ipeg.uni-hannover.de*

---

## **Abstract**

Die traditionelle Laserentwicklung basiert auf einer Vielzahl von diskreten Bauteilen mit thermischer, struktureller oder optomechanischer Funktionalität. Durch die Kombination von innovativen Designkonzepten mit der additiven Fertigung wird die kostengünstige Herstellung hochkomplexer optischer Systeme in funktionsintegrierten Bauteilen erstmals möglich. Während generative Fertigungsverfahren, wie die sogenannte Fused Filament Fabrication (FFF), im Bereich der Strukturbauteile bereits weit verbreitet sind, ist deren Potenzial zum Multi-Materialdruck für die Funktionsintegration nahezu unerforscht. In diesem Beitrag werden verschiedene polymerbasierte Materialien und Materialkombinationen für den FFF 3D-Druck hinsichtlich ihrer thermischen und strukturellen Eigenschaften untersucht und ihre Eignung für die Anwendung in der Laserentwicklung evaluiert.

---

## **1 Einleitung**

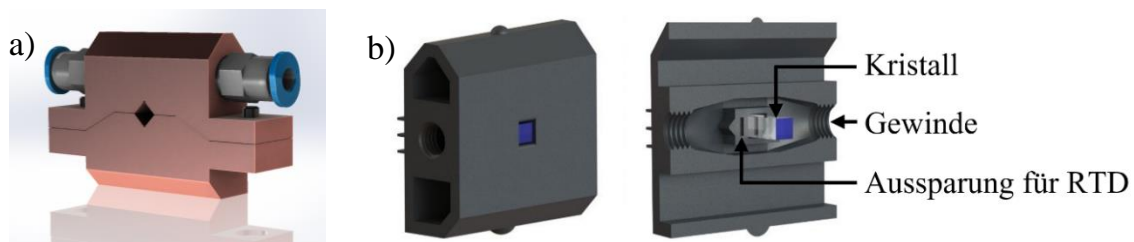
Gegenwärtig sind Lasersysteme, vor allem im Forschungskontext, komplexe Aufbauten, die aus diskreten optischen Komponenten, Halterungen und Stativen bestehen, die auf einem optischen Tisch justiert werden. Nach der Entwicklungsphase sind zusätzliche Arbeiten erforderlich, um diese Laboraufbauten in kleine, kompakte und auch preiswerte Systeme zu überführen. Dieser Entwicklungsschritt erfordert nach wie vor Handarbeit und Anpassungen, die den üblichen industriellen Anforderungen nicht gerecht

werden und im Widerspruch zu den Fortschritten im Zusammenhang mit Automatisierung und globaler Vernetzung stehen. Bei der Entwicklung von Lasersystemen sollte daher die Überführung des Systems in eine automatisierte Fertigungsumgebung mitgedacht werden. Der Bedarf an platzsparenden, ressourcenschonenden und kostengünstigen Systemen sollte dabei berücksichtigt werden. Eine vielversprechende Technologie zur Erreichung dieser Ziele ist die generative Fertigung [1]. Durch die generative Fertigung, also dem schichtweisen Aufbau von Komponenten aus einem digitalen Design, ergeben sich völlig neue Möglichkeiten der Strukturgestaltung. Diese Designfreiheit kann genutzt werden, um Modelle mit komplexen Designmerkmalen und fortschrittlichen mechanischen Eigenschaften zu realisieren. Diese Vorteile wurden beim Erstellen von Bauteilen über das FFF-Verfahren bereits umgesetzt. Außerdem bietet das Verfahren die Möglichkeit zum Multi-Materialdruck, also der Kombination unterschiedlicher Materialien in einem Druckvorgang, um dadurch die Funktionalität gedruckter Komponenten zu erhöhen [2, 3]. Unter anderem dadurch können ehemals separate Elemente in einem Produktionsschritt in einem Bauteil integriert werden. Gleichzeitig lassen sich beim FFF-Verfahren auch zusätzliche Komponenten in ein Bauteil eindringen und damit der Integrationsgrad noch weiter steigern [3, 4]. Im Bereich der Fertigung optomechanischer Komponenten konnten Vorteile der generativen Fertigung bereits umgesetzt werden, wobei die Individualisierung und Kostenreduktion im Vordergrund standen [5, 6]. In diesem Beitrag werden innovative Designansätze mit dem 3D-Multimaterialdruck im FFF-Verfahren zusammengeführt, um das Potenzial der generativen Fertigung für funktionsintegrierte Optomechaniken eines Lasersystems zu heben. Im Fokus steht dabei die Evaluation geeigneter Materialien für eine Laserkristallhalterung, welche die im Laserbetrieb entstehende Wärme effizient abführen muss [7]. Dabei wird erstmals ein Laserkristall mit zusätzlichen Messsensoren in einem additiv gefertigten, polymerbasierten Kühlkörper mit optimierten Kühlkanälen eingedruckt, um nicht nur die Realisierbarkeit, sondern auch die wirtschaftlichen Vorteile hinsichtlich der Material- und Kostenersparnis zu demonstrieren.

## **2 Experimente und Auswertung**

Die Untersuchungen gliedern sich in verschiedene Blöcke. Dabei werden sowohl die Materialparameter der verwendeten Polymere als auch der Kristallhalter als optomechanisches Bauteil in seiner späteren Einsatzumgebung getestet. Das Design des hier untersuchten Kühlkörpers ist in *Abb. 1b* dargestellt und erlaubt eine optimierte Umströmung des Kristalls mit Wasser. Die Materialdicke zwischen Kristall und Kühlkanal beträgt 0,8 mm. Der Kühlwasseranschluss erfolgt über das mitgedruckte M5-Gewinde. Zusätzlich wird unter dem Kristall im Abstand von ebenfalls 0,8 mm ein Widerstandstemperaturfühler (RTD) mit eingedruckt, um so die Temperatur im Halter messen zu können.

Es wurden drei verschiedene, kommerzielle Polymerfilamente untersucht, bestehend aus Polylactid (PLA; *RAL 9005, Ultimaker*), einer Kupfer-PLA-Mischung (Cu-PLA; *MetalFil – Classic Copper, FormFutura*) und Polyethylenterephthalat (PET, *3dkTOP, 3dk.berlin*) Das PET-Filament kann nach dem Druck getempert werden und erreicht dadurch eine Temperaturfestigkeit bis 230 °C. Wenn nicht anders beschrieben, handelt es sich im Folgenden bei Bauteilen aus PET immer um getemperte Bauteile. Für alle gefertigten Probekörper wurde ein *Ultimaker 3* verwendet. Parallel zu den gedruckten Kühlkörpern wurde ein ebenfalls wassergekühlter Kristallhalter aus Kupfer getestet, welcher durch subtraktive Fertigungsverfahren hergestellt wurde (*Abb. 1a*) und als Referenz zu den gedruckten Kühlkörpern dient. Es wurde ein RTD an die Oberfläche des Halters geklebt, um auch hier eine Messung der Temperatur zu ermöglichen. In dem Kupferhalter wird der Kristall mit Indiumfolie der Dicke 100 µm umwickelt, um die Kontaktfläche und somit den Wärmefluss mit dem Kühlkörper zu optimieren. Auch bei den gedruckten Haltern wurde teilweise der Kristall vor dem Eindrucken mit Indiumfolie umwickelt, um eine optimierte thermische Anbindung an die Polymerkühlkörper zu untersuchen.



*Abb. 1: a) CAD-Modell des subtraktiv gefertigten Kühlkörpers aus Kupfer. b) CAD-Modell des gedruckten Kühlkörpers dargestellt als Vollkörper (links) und als Schnitt (rechts). In Letzterem sind die innenliegenden Strukturmerkmale sichtbar.*

## 2.1 Einfluss des Kühlwassers auf die Polymere

Um die strukturelle Langlebigkeit der Polymerkühlkörper zu testen, wurde je ein Kühlkörper aus jedem der drei Materialien in einem Dauerteststand kontinuierlich mit Wasser durchströmt und auf Dichtigkeit getestet. Dabei konnte über den gesamten Beobachtungszeitraum von 79 Tagen kein Austreten von Wasser beobachtet werden. Zusätzlich wurde die Wasseraufnahme der Polymere über die Zeit bestimmt. Grundlage dafür bildet die entsprechende Norm [8]. Dabei wurden aus jedem Material fünf zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Höhe von 25 mm gedruckt, welche zu Proben mit Durchmessern (8,36 - 0,25 / + 0,17) mm und Höhen von (25,15 - 0,14 / + 0,13) mm führten. Ein Probensatz aus PET wurde getempert. Anschlie-

ßend wurden alle Proben über 24 h bei  $(50 \pm 2)$  °C getrocknet, auf 0,1 mg genau gewogen und danach in destilliertem Wasser bei  $(23 \pm 1)$  °C gelagert. Nach fortlaufenden Zeitintervallen wurden die Probekörper entnommen, erneut gewogen und damit die Wasseraufnahme bestimmt (Abb. 2). Davon ausgehend, dass die Gewichtszunahme allein auf der Aufnahme von Wasser beruht, lässt sich erkennen, dass PLA am meisten und PET am wenigsten Wasser aufnimmt, wobei das getemperte PET nochmals bessere Eigenschaften aufweist. Auch das Cu-PLA zeigt eine deutlich geringere Wasseraufnahme als PLA. Insgesamt ist die Wasseraufnahme bei allen Proben sehr gering und liegt bezogen auf das Gewicht der Proben in allen Fällen bei unter 1 % über einen Zeitraum von 380 Stunden.

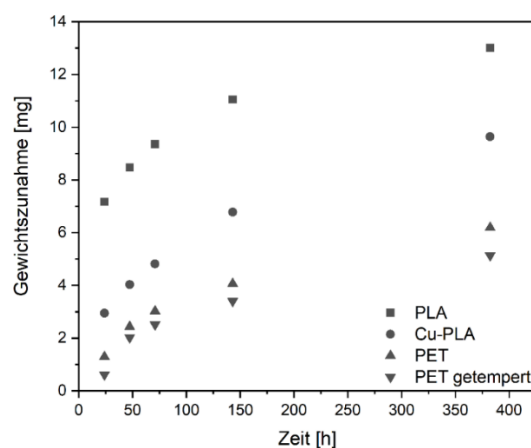


Abb. 2: Gewichtszunahme der unterschiedlichen Polymere über die Zeit, gemittelt über jeweils 5 Proben je Polymer.

## 2.2 Kühlverhalten der unterschiedlichen Polymere

Um die Eignung der gedruckten Kühlkörper in einem Lasersystem bewerten zu können, wurden Nd:YVO<sub>4</sub>-Kristalle, mit einer Abmessung von 3 x 3 x 11 mm<sup>3</sup> und einer Nd-Dotierung von 0,27 at.%, in einen Kühlkörper eingedruckt. Die Kristalle in den Kühlkörpern wurden mit einer fasergekoppelten Laserdiode (WSLX-808-008-M-H2, Wavespectrum Laser Group Limited) mit einer Wellenlänge bei 808 nm und einer optischen Ausgangsleistung von circa 3 W angeregt. Dabei wurde die Pumpstrahlung in den Kristall fokussiert, so dass dort ein Strahldurchmesser von 340 µm erzeugt wird. Die Wärmeentwicklung wird über den eingedruckten RTD gemessen und an der Kristalloberfläche von einer Wärmebildkamera (E53, FLIR, Genauigkeit  $\pm 2$  °C) erfasst. Für den Emissionsgrad der Nd:YVO<sub>4</sub>-Kristalle wird ein Literaturwert von 0,74 angenommen [9]. In Tab. 1 sind die gemessenen Temperaturen an der Kristalloberfläche bei den verschiedenen Kühlkörper aufgelistet. Dabei zeigt sich zum einen, dass der Einsatz von Indiumfolie zur Verbesserung der Anbindung kaum einen Effekt auf die Wärmeleitung

von Kristall zu gedrucktem Kühlkörper hat. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die Folie die Unebenheiten zwischen Kühlkörper und Kristall nicht so gut ausgleicht, wie es bei einem zweiteiligen Halter (*Abb. 1a*), bei dem durch das Einspannen des Kristalls zusätzlich Druck aufgebracht werden kann. Zum anderen zeigt sich, dass bei Verwendung von PLA die Temperatur an der Kristalloberfläche bei circa 90 °C liegt, während beim Einsatz von PET die Temperatur auf unter 60 °C und mit Cu-PLA auf unter 30 °C reduziert werden kann. Dies ist wichtig für das spätere Lasersystem, da die Effizienz eines Nd:YVO<sub>4</sub>-basierenden Lasers mit steigender Temperatur im Kristall sinkt [7]. Allerdings wird auch beim Cu-PLA nicht die Temperatur erreicht, die mit einem Kristallhalter aus Kupfer möglich ist. Dies war zu erwarten, da die Wärmeleitfähigkeit des Polymers mehrere Größenordnungen geringer ist als die von Kupfer. So gibt die Literatur für Cu-PLA eine Wärmeleitfähigkeit von circa 0,25 W/m·K und für Kupfer zwischen 240–380 W/m·K abhängig von der genauen Zusammensetzung des Kupfermaterials an [10, 11].

*Tab. 1: Temperatur im Kristallhalter und an der Kristalloberfläche. Die Temperatur im Halter ist gemittelt über eine Stunde. Die Temperatur an der Kristalloberfläche ist mit der Wärmebildkamera gemessen.*

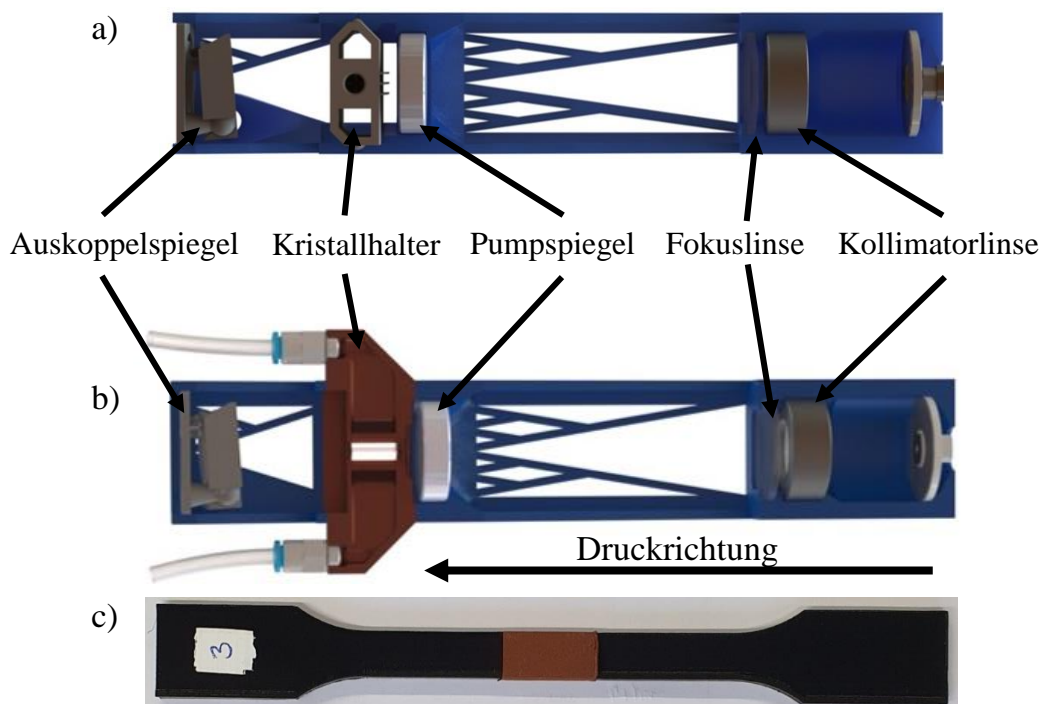
Kühlkörpermaterial	Temperatur Halter / °C	Temperatur Kristall / °C
PLA ohne Indiumfolie	56,1 ± 0,7	91,6
PLA mit Indiumfolie	55,0 ± 0,6	87,8
PET mit Indiumfolie	42,0 ± 0,3	56,9
Cu-PLA ohne Indiumfolie	29,7 ± 0,2	40,8
Kupfer mit Indiumfolie	18,2 ± 0,1	22,6

Die Messung der Temperatur an der Kristalloberfläche deckt sich mit den Ergebnissen der RTDs. Die Temperatur in den Kühlkörpern beim optischen Pumpen über 1 h ist ebenfalls in *Tab. 1* aufgeführt. Insgesamt zeigt sich, dass am Ort der RTDs die Temperatur im Vergleich zur Kristalloberfläche bereits merkbar gefallen ist. Auch zeigt sich wieder, dass der Einsatz von zusätzlicher Indiumfolie keinen nennenswerten Effekt zeigt. Für den Halter aus Cu-PLA wurde eine weitere Messung durchgeführt, bei der der Kristall über einen Zeitraum von 24 h ebenfalls mit einer Leistung von 3 W gepumpt wurde. Es zeigte sich, dass es auch bei dieser deutlich längeren Einsatzdauer des Kristallhalters zu keiner Verringerung der Kühlleistung über den Messzeitraum kam. Außerdem konnte keine Deformation am Kristallhalter durch den Temperatureinfluss beobachtet werden. Dies ist auch nicht zu erwarten, da die Glasübergangstemperatur für dieses Material mit über 60 °C angegeben wird. Im Gegensatz dazu ist die Tempera-

turentwicklung im PLA bereits kritisch, denn auch hier liegt die Glasübergangstemperatur bei 60–65 °C. Das getemperte PET hält, wie bereits beschrieben, Temperaturen bis 230 °C stand. Damit ist für die Kühlkörper aus Cu-PLA und PET auch eine Verwendung bei höheren Pumpleistungen denkbar.

### 2.3 Multimaterialdruck

Die in *Abb. 1* dargestellten Kühlkörper sind so konstruiert, dass sie in eine ebenfalls gedruckte Optomechanik eines Lasersystems eingesetzt werden können (*Abb. 3a*). Langfristig soll eine quasi-monolithische Optomechanik, also Halterung für Linsen, Spiegel und gekühlter Kristall, ohne austauschbare Teile zum Einsatz kommen (*Abb. 3b*). Die Temperaturmessungen haben gezeigt, dass Cu-PLA die besten Kühleigenschaften aufweist und damit am besten für die Halterung des Kristalls geeignet ist. Die übrige Optomechanik wird aus PLA gedruckt werden. Deshalb soll die strukturelle Anbindung zwischen diesen beiden Polymeren untersucht werden. Dazu wurden entsprechend der Norm [12] Zugversuche mit verschiedenen Kombinationen getestet, bestehend aus jeweils fünf Probekörpern aus reinem PLA, aus reinem Cu-PLA und außerdem Körper, die halb aus Cu-PLA und halb aus PLA bestehen, sowie PLA mit einem kleinen Bereich aus Cu-PLA in der Mitte (*Abb. 3c*).



*Abb. 3:* a) Modell des generativ gefertigten Lasersystems mit austauschbarem Kristallhalter aus *Abb. 1*. b) Modell des generativ gefertigten Lasersystems mit fest verbundenem Kristallhalter. c) Probekörper für Zugversuche entsprechend der Norm (Form 1A), gedruckt PLA und Cu-PLA. Die angezeigte Druckrichtung gilt für alle 3 Körper.

Die wichtigsten Druckparameter für die beiden Polymere sind in *Tab. 2* aufgeführt. Die Unterschiede in den Druckparametern resultieren aus der unterschiedlichen Verarbeitbarkeit der Polymere, sowie die beschriebene unterschiedliche Verwendung im späteren Lasersystem. Allgemein, das zeigt auch die Literatur, ist die Verarbeitung des Cu-PLA herausfordernd [13]. So führt es auch bei größeren Düsendurchmessers immer wieder zu Verstopfungen der selbigen und damit zu einem Abbruch des Drucks. Die Optomechanik des Lasers wird vertikal stehend gedruckt, ebenso wie die Probenkörper (*Abb. 3*). Während des Druckes der Multimaterialprüfkörper entwickelte sich im ersten Übergangsbereich eine Wulst aus Cu-PLA, bedingt durch den höheren Materialfluss (*Tab. 2*). Durch die Bewegung der Düse während des Druckprozesses wurden die Prüfkörper mit zunehmender Höhe in Schwingung versetzt. Im Fall der Multimaterialprüfkörper mussten zusätzlich Stützstrukturen eingesetzt werden, um die Schwingungen zu minimieren. Die Zugversuche selbst wurden mit einer Zuggeschwindigkeit von 1 mm/min (*Unimat Plus 052-5kN, Erichsen*) durchgeführt.

*Tab. 2: Druckparameter bei der Herstellung der Prüfkörper.*

Parameter	PLA	Cu-PLA
Druckrichtung	Vertikal (90°)	Vertikal (90°)
Schichthöhe / mm	0,2	0,2
Linienbreite / mm	0,35	0,6
Füllgrad / %	20	100
Materialfluss / %	100	130

In *Abb. 4* sind die Bruchspannungen aller Prüfkörper aufgeführt. Dabei entspricht die Bruchspannung dem Quotienten aus der maximalen Zugkraft und der gemessenen Querschnittsfläche. Es zeigte sich für die Prüfkörper aus reinem PLA eine Bruchspannung von 14,0 MPa. Die Bruchstellen aller PLA-Zugproben sind im oberen Bereich aufgetreten. Die Ursache konnte noch nicht eindeutig geklärt werden. Ein starker Einflussfaktor könnten jedoch die beschriebenen Schwingungen des Prüfkörpers während des Druckprozesses und somit eine Abnahme der strukturellen Festigkeit mit zunehmender Höhe gewesen sein. Ein Vergleich mit Werten aus der Literatur ist auf Grund unterschiedlicher Druckparameter sowie den abweichenden Bedingungen der Versuchsdurchführen nicht möglich [14, 15]. Die Cu-PLA-Prüfkörper haben eine geringe Bruchspannung von etwa 8,0 MPa. Die beigemischten Kupferpartikel könnten dabei für die Reduktion der Bruchspannung verantwortlich sein. Beim Zugversuch konnte vor dem endgültigen Bruch des Materials eine weißliche Verfärbung im Bruchbereich beobachtet werden. Gleichzeitig war eine leichte Einschnürung im Material erkennbar, bevor das Material letztlich brach. Die Bruchstellen traten meist im unteren Bereich der Proben auf. Sie

verliefen, mit Ausnahme einer Probe, glatt zwischen zwei Druckschichten. Während des Druckes der Cu-PLA-Prüfkörper schwankte der Fluss des extrudierten Materials immer wieder kurzzeitig und es entstanden kleine Ungleichmäßigkeiten im Material. An einer dieser Fehlstellen brachen jeweils die Proben. Die Bruchspannung der Multimaterial-Prüfkörper lag im gleichen Spannungsbereich wie die Cu-PLA-Proben und wiesen eine Bruchspannung von 6,2 MPa beziehungsweise 8,5 MPa auf. Die Brüche der Cu-PLA/PLA-Proben traten in allen Bereichen des Prüfkörpers auf, sowohl in den PLA- und Cu-PLA Bereichen als auch an den Materialübergangsstellen. Das deutet bei diesem Probentyp auf eine ausreichend starke Anbindung zwischen den beiden verschiedenen Polymeren hin. Die Bruchstellen der PLA/Cu-PLA/PLA-Prüfkörper waren dagegen alle an den Übergangsstellen zwischen den Polymeren aufgetreten, wobei vier Proben an der ersten Übergangsstelle also beim Wechsel von PLA auf Cu-PLA brachen. Trotzdem war die Zugfestigkeit der Multimaterial-Proben nur 20% schwächer als die der reinen Cu-PLA-Proben.

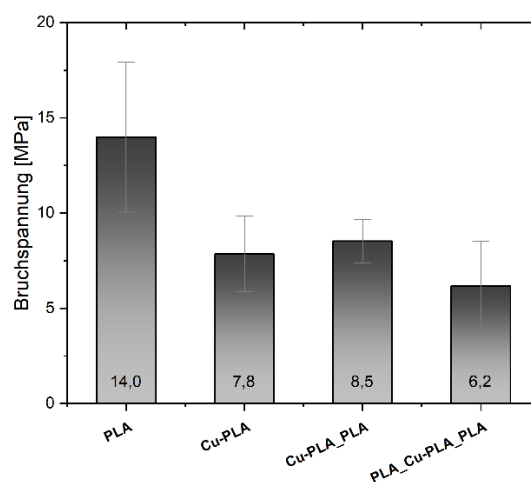


Abb. 4: Bruchspannung der unterschiedlichen Polymere beziehungsweise der Polymerkombinationen jeweils gemittelt aus den Ergebnissen von 5 Probekörpern.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial, auf Basis des FFF-Verfahrens multifunktionale Bauteile aus Polymeren wie beispielsweise komplexe Laserkristall-Kühlkörper zu fertigen. Es wurden verschiedene Polymermaterialien untersucht, wobei Cu-PLA die effektivsten Kühleigenschaften erreicht. Gleichzeitig deuten die geringe Wasseraufnahme und Langzeittests mit diesem Material auf eine entsprechende Langlebigkeit hin. Der Einsatz von Indiumfolie zwischen Kristall und gedrucktem Kühlkörper hat einen vernachlässigbaren Einfluss. Bei der generativen Fertigung können die



Designfreiheiten genutzt werden und zusätzliche Sensorik, sowie Gewinde für den Wasseranschluss im Kühlkörper mit eingedruckt werden. Die Zugversuche an PLA-, Cu-PLA- und Multimaterialprüfkörpern haben gezeigt, dass eine weitere Funktionsintegration hin zu individualisierten, quasi-monolithischen Optomechaniken für komplexe Lasersysteme möglich ist. Dabei wurden auch fertigungstechnische Herausforderungen wie Schwingungen im Bauteil während des Druckvorgangs, welche die Anbindung von Materialübergängen verschlechtern können, erkannt. Damit wurde gezeigt, dass die Realisierung einer komplexen optomechanischen Baugruppe über den Einsatz des FFF-Verfahrens möglich ist.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des EFRE - NBank geförderten Projektes "GROTESK - Generative Fertigung optischer, thermaler und struktureller Komponenten" durch das Teilprojekt sGROTESK (ZW6-85017815) durchgeführt.



## Literatur

- [1] I. Gibson, D. Rosen und B. Stucker: Additive Manufacturing Technologies. New York: Springer-Verlag, 2015. – ISBN 978-1-4939-2113-3
- [2] D. Espalin, J. A. Ramirez, F. Medina und R. Wicker, „Multi-material, multi-technology FDM: exploring build process variations,“ *Rapid Prototyping J*, Nr. 20, pp. 236-244, 2014.
- [3] F. Li, N. P. Macdonald, R. M. Guijt und M. C. Breadmore, „Increasing the functionalities of 3D printed microchemical devices by single material, multimaterial, and print-pause-print 3D printing,“ *Lab Chip*, Nr. 19, pp. 35-49, 2019.
- [4] F. Kranert, J. Budde, P. Neef, R. Bernhard, M. Lammers, K. Rettschlag, T. Grabe, Wienke, J. Neumann, H. Wiche, V. Wesling, H. Ahlers, R. Lachmayer und D. Kracht: 3D-printed, low-cost, lightweight optomechanics for a compact, low-power solid state amplifier system. *Components and Packaging for Laser Systems VI*, SPIE, 2020.
- [5] M. Delmans und J. Haseloff:  $\mu$ Cube: A Framework for 3D Printable Optomechanics. *J Open Hardw*, 2 (2018) 1.

- [6] L. Zou, M. Mahmoud, M. Fahs, R. Liu und J. F. Lo: 3D printed miniaturized spectral system for tissue fluorescence lifetime measurements. *Imaging, Manipulation, and Analysis of Biomolecules, Cells, and Tissues IX*, SPIE, 2016.
- [7] W. Koechner: Solid-State Laser Engineering. New York: Springer Science+Business Media, 2006. – ISBN 978-0387-29094-2
- [8] *Norm DIN EN ISO 62:2008-05: Kunststoffe – Bestimmung der Wasseraufnahme.*
- [9] G. A. Newburgh und M. Dubinskii: A High Gain, Composite Nd:YVO4/SiC Thin Disk Amplifier. *Laser Technology for Defense and Security X*, SPIE, 2014.
- [10] A. Elkholy, M. Rouby und R. Kempers: Characterization of the anisotropic thermal conductivity of additively manufactured components by fused filament fabrication. *Prog Addit Manuf*, 4 (2019) 4, S. 497 – 515.
- [11] H.-J. Bargel, G. Schulze: Werkstoffkunde. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – ISBN 978-3-540-79296-3
- [12] *Norm DIN EN ISO 527:2012-06 Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften.*
- [13] Z. Liu, Q. Lei und S. Xing: Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *J Mater Res Technol*, 8 (2019) 5, S. 3741-3751.
- [14] C. Grabowik, K. Kalinowski, G. Ćwikła, I. Paprocka und P. Kogut: Tensile tests of specimens made of selected group of the filament materials manufactured with FDM method. *MATEC Web Conf.* 112 (2017).
- [15] F. Afrose, S. Masood, P. Iovenitti, M. Nikzad und I. Sbarski: Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material. *Prog Addit Manuf*, 1 (2016) S. 21-28.

## **Autorenanschriften**

M.Sc. Fabian Kranert

Laser Zentrum Hannover e.V.  
Abteilung Laserentwicklung  
Hollerithallee 8  
30149 Hannover

Telefon: 0511-2788-308  
E-Mail: f.kranert@lzh.de