

3D-gedruckte PEEK Formeinsätze für das Mikropulverspritzgießen

3D-printed PEEK mold inserts for micro injection molding

Prof. Dr.-Ing- T. Hanemann^{1,2}, Dr.-Ing. S. Antusch¹, S. Baumgaertner¹, Dr. S. Bonk¹, B. Eng. A. Klein¹, H. Walter¹, MSc Eng. D. Wilhelm¹, ¹Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Materialien, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, thomas.hanemann@kit.edu, ²Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik, Georges-Köhler-Allee 102, 79110 Freiburg

Kurzfassung

Mittels Fused Filament Fabrication (FFF) 3D-gedruckte Kunststoff-Formwerkzeuge stellen eine kostengünstige Möglichkeit dar, im Sinne eines Rapid Tooling schnell und kostengünstig die Abformung von Kunststoffbauteilen zu erlauben. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Polymeren muss der als Formeinsatz zu verwendende Kunststoff eine hohe Dauergebrauchstemperatur aufweisen, um eine gute Abformqualität zu ermöglichen. Diese Arbeit beschreibt die Prozessentwicklung der Formeinsatzherstellung mittels FFF aus Polyetheretherketon (PEEK) und dessen Abformung im keramischen Pulverspritzguss. Es konnten erste keramische Grünlinge in guter Bauteilqualität abgeformt werden.

Abstract

Rapid Tooling of metal mold inserts is an established technique for the realization of plastic parts featuring a new design or functional items; mainly metals like aluminium or brass are used as tool material enabling pilot run polymer replication. In this work Fused Filament Fabrication (FFF) applying Polyetheretherketon (PEEK) as high-performance polymer with a continuous operation temperature larger than 250 °C has been selected as fabrication method for rapid tooling. Different printed part properties and qualities as function of printing parameters will be discussed, first results using (micro-)structured PEEK mold inserts in ceramic injection molding will be presented.

1 Einleitung

Heutzutage sind verschiedene Methoden der additiven Fertigung (3D-Druck) zur Realisierung technischer Bauteile weitestgehend etabliert. Zu den wichtigsten Verfahren im Bereich der Kunststoffe gehört das der Materialextusion (MEX) zugeordnete Thermoplast-verarbeitende Fused Filament Fabrication (FFF) [1]. FFF-Drucker im Preissegment über 5000 € weisen mittlerweile einen robusten mechanischen Aufbau und eine reproduzierbare Druckqualität bei kommerziellen technischen Thermoplasten auf. Die derzeit am Markt verfügbaren 3D-Druck Technologien erlauben neben dem Rapid Prototyping eine Bauteilfertigung im Sinne eines Rapid Manufacturing in kleinen Stückzahlen [2], insbesondere bei Kunststoff- und Metallbauteilen. Das Rapid Tooling als Brückentechnologie, zur Herstellung von Formwerkzeugen, steht nicht im Fokus aktueller Forschungsarbeiten, obwohl bereits vor ca. 20 Jahren erste Arbeiten zur Direktfertigung von Polyamidbauteilen bzw. Formeinsätzen aus Rapidsteel (Stahl-Kupfer-Mischung) über Selektives Lasersintern beschrieben wurden [3]. Aktuelle Übersichtsartikel zu dieser Thematik erwähnen ein Rapid Tooling zur Werkzeugherstellung nicht [4]. Ursache könnten im Fall der laserbasierten Verfahren eine zu schlechte Oberflächenqualität sein [5]. Eine Herstellung von Formwerkzeugen aus Kunststoff ist nur dann sinnvoll, wenn die thermische Leitfähigkeit deutlich gesteigert werden kann. Diese liegt im Bereich von 0,15-0,35 W/(m K) und ist signifikant niedriger als bei typischen metallischen Formwerkzeugmaterialien (Tabelle 1); eine effektive Werkzeugtemperierung ist somit nicht möglich.

Material	Thermische Leitfähigkeit (W/(m K))
Kupfer (Handelsware)	372
Stahl	15 - 42
Aluminiumnitrid (AlN)	180 - 220
ABS	0,17
PA	0,25 – 0,35
PEEK	0,25
CF30/PEEK	0,66

Tabelle 1 Thermische Leitfähigkeit verschiedener Materialien. Quellen: www.wikipedia.de; www.schweizerfn.de/stoff/wleit_metall/wleit_metall.php; www.poly-mehr.com/wp-content/uploads/technisches-datenblatt-abs.pdf, Zugriff 05.07.2021).

Seit einigen Jahren finden sich in der Literatur vereinzelte Untersuchungen zur Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit von Kunststoffen durch Füllstoffe und FFF als 3D-Druck-Verfahren. FFF gedruckte Formeinsätze aus einem PLA-Bronze-Komposit für das Metal Injection Molding ist in [6] beschrieben, allerdings zeigten sich ausgeprägte Schwierigkeiten während der Entformung. Ebenfalls wurde die Verwendung von Formeinsätzen aus gegossenen Epoxid-Aluminium-Kompositen in einem laborähnlichen Aufbau untersucht, es konnte ein positiver Einfluss des Aluminiums auf den Wärmetransport festgestellt werden [7]. Das PolyJet[®]-Verfahren bietet sich als alternatives Formeinsatzherstellungsverfahren an, allerdings sind die verfahrensbedingten Materialien (Duroplaste) mit Erwei-

chungstemperaturen zwischen 50-70 °C nur sehr eingeschränkt einsetzbar [8], da es zu einer irreversiblen Deformation während der Abformung kommt.

2 Gedruckte PEEK Probekörper

2.1 Materialauswahl

Um das o.g. Problem der sehr niedrigen Erweichungstemperatur zu umgehen, wurden das Hochleistungspolymer Polyetheretherketon (PEEK) bzw. ein Komposit mit 30% Kohlefasern CF30/PEEK verwendet, die Materialspezifikationen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Druckversuche wurden mit dem APIUM P220 3D-Drucker (Apium Additive Technologies GmbH, Karlsruhe) durchgeführt, dieser FFF-Drucker erlaubt eine maximale Drucktemperatur von 540 °C, eine maximale Druckbetttemperatur von 160 °C, eine minimale gedruckte Schichtdicke von 0,1 mm sowie eine minimale druckbare Wanddicke von 0,3 mm.

	PEEK	CF30/PEEK
Filament-Hersteller	APIUM	Ensinger
Typ	450 Natural	Tecapeek CF30
Zugfestigkeit (MPa)	97	190
E-Modul (GPa)	3,7	17,5
Schmelzpunkt (°C)	358	343
Glasübergangstemperatur (°C)	147	143
Max. Dauergebrauchstemp. (°C)	260	260

Tabelle 2 Spezifikationen der verwendeten Formeinsatzmaterialien (Quellen: Herstellerangaben).

2.2 FFF-Druckparameterauswahl

Zur Realisierung einer guten Bauteilqualität, speziell der Oberflächenbeschaffenheit, sind drei FFF-Druckparameter - Extrudertemperatur, Druckgeschwindigkeit und Infill-Orientierung - von besonderer Bedeutung und müssen in umfangreichen Versuchsreihen erarbeitet werden.

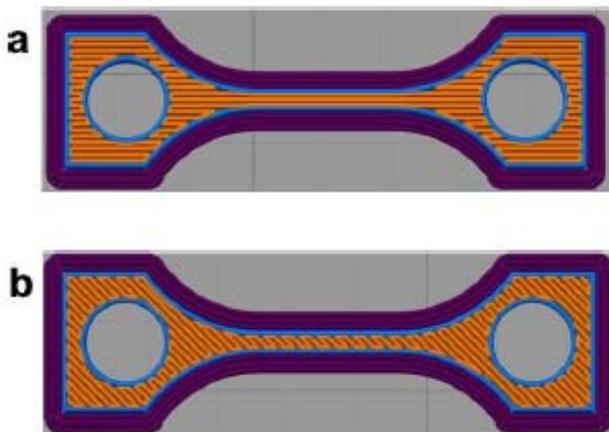


Bild 1 Infill-Orientierung: a) 0°, b) 45° Füllwinkel.

Die Infill-Orientierung beschreibt die Ausrichtung der abgelegten Filamentstränge innerhalb der Randlinien des Bauteils (**Bild 1**). Es wurden Flachzugproben gedruckt und die Bauteilbeschaffenheit sowie die mechanischen Kennwerte als Funktion der Druckparameter beurteilt, die Tabellen 3 (PEEK) und 4 (CF30/PEEK) zeigen die eingestellten Druckparameter. Für das Drucken des APIUM-PEEKs dienten die vom Hersteller gelieferten Voreinstellungen (Extrudertemperatur: 485 °C, Druckbetttemperatur: 115 °C, Druckgeschwindigkeit: 33,3 mm/s) als Ausgangspunkt.

Druckparameter	Bezeichnung		
Extrudertemperatur (°C)	485	440	420
Druckgeschwindigkeit (mm/s)	33,3	20	16,7
Infill-Orientierung (°)	0		45

Tabelle 3 Druckparameter der PEEK-Zugproben.

Druckparameter	Bezeichnung		
Extrudertemperatur (°C)	510	485	460
Druckgeschwindigkeit (mm/s)	33,3	20	16,7
Infill-Orientierung (°)	0		45

Tabelle 4 Druckparameter der CF30/PEEK-Zugproben.

2.3 Zugprobendruck

Es ließen sich Flachzugproben mit den o.g. Parametersätzen aus beiden Materialien drucken, **Bild 2** zeigt die Bruchflächen nach dem Zugversuch. Es lässt sich ein deutlicher Einfluss der Kohlefasern im CF30/PEEK auf das Bruchbild erkennen. Im Fall des reinen PEEK ist ein kompaktes Bruchbild beobachtbar, im Fall des Komposits sind einzelne Schichten erkennbar.

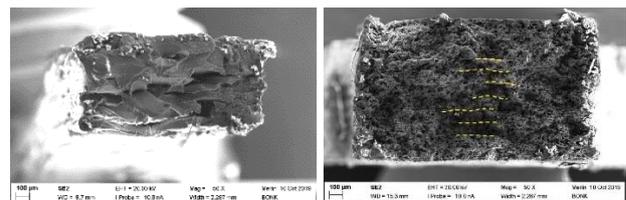


Bild 2 REM-Aufnahmen von Zugprobenbruchflächen von PEEK bzw. CF30/PEEK (Drucktemperatur: 485 °C).

Die mechanischen Kennwerte für PEEK als Funktion der Druckparameter sind in **Bild 3** zusammengestellt. Die höchsten Zugfestigkeiten ergeben sich bei einer Drucktemperatur von 440 °C und einer mittleren Druckgeschwindigkeit von 200 mm/s. Die höchste Bruchdehnung resultiert bei den höchsten Drucktemperaturen und -geschwindigkeiten, in diesem Fall lassen sich im Bruchbild keine einzelnen Schichten mehr erkennen. Eine Einstellung der Eigenschaften ist je nach Anforderung über die Druckparameter somit in gewissen Grenzen möglich. Das Komposit CF30/PEEK zeigt deutlich höhere Zugfestigkeiten bei allen untersuchten Druckparametern (**Bild 4**).

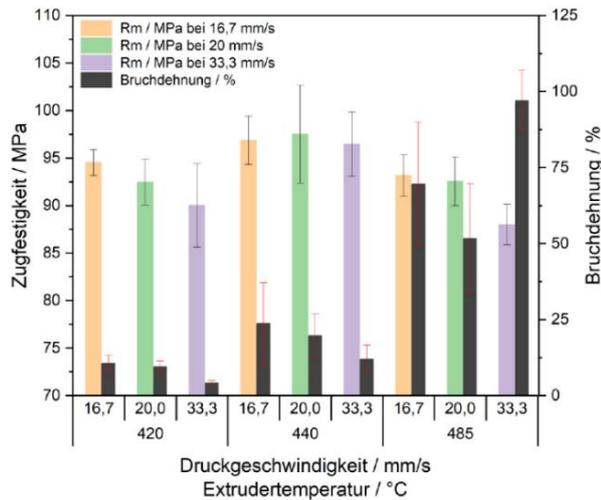


Bild 3 Mechanische Kennwerte als Funktion der Druckparameter.

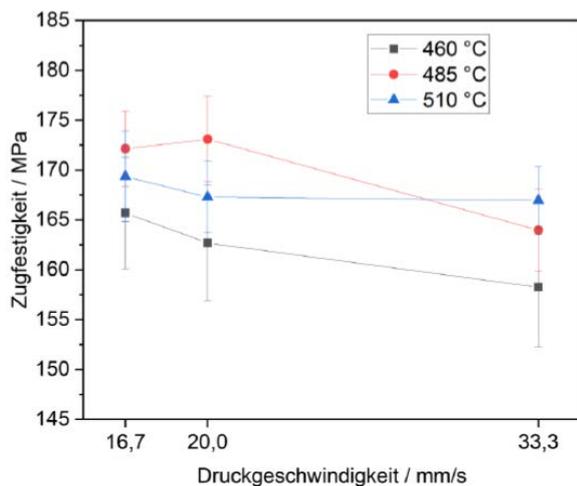


Bild 4 Zugfestigkeit der CF30/PEEK Proben als Funktion der Druckparameter, die Werte der Füllwinkel 0° und 45° sind gemittelt.

3 Gedruckte PEEK Formeinsätze

3.1 Mikrofluidik Teststruktur

Ziel dieser Untersuchungen ist, kostengünstig und schnell Formeinsätze für das (Mikro-)Spritzgießen herzustellen. Dabei müssen für jede herzustellende Struktur individuelle Druckstrategien und Parameter erarbeitet werden. Dies zeigt sich z.B. bei der in **Bild 5** gezeigten mikrofluidischen Struktur, welche in der Mikroreaktionstechnik für die Nanopartikelsynthese Anwendung finden soll [8]. Bei zu hoher Drucktemperatur und schnell aufeinanderfolgendem Druck auf der gleichen Stelle kann die Wärme nicht abgeführt werden, somit verschmiert die inselartige Struktur beim Drucken der nachfolgenden Schicht. Die Absenkung der Drucktemperatur in Kombination mit einer zeitlichen Verzögerung durch Druck einer zusätzlichen Hilfsstruktur (Opferturm) führt zu einer Verbesserung der Druckqualität. Dennoch ist die Oberflächenqualität zu schlecht für eine Verwendung als Formeinsatz.

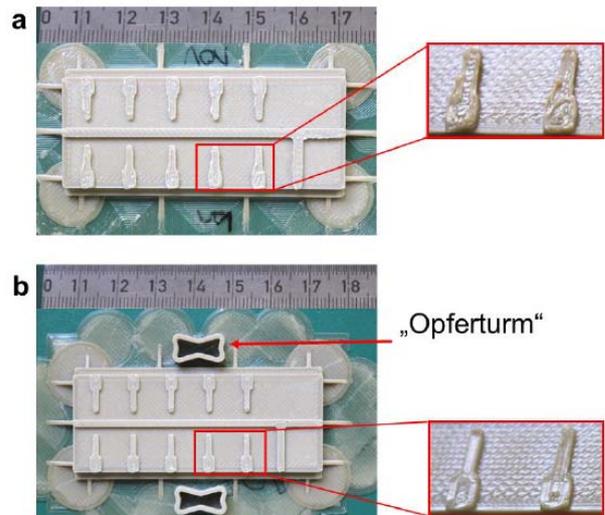


Bild 5 FFF-Druck einer mikrofluidischen Struktur mit PEEK: a) Extrudertemperatur: 470 °C, Druckgeschwindigkeit: 10 mm/s; b) Extrudertemperatur: 450 °C, Druckgeschwindigkeit: 10 mm/s sowie Opferturmhilfsstrukturen.

3.2 KIT-Logo Teststruktur

Das KIT-Logo wurde als Teststruktur mit unterschiedlichen strukturellen Details, wie gerade Seitenwände, spitz zulaufender Fächerstruktur, sowie scharfe Kanten und Ecken, gewählt. Im Rahmen einer Parameterstudie wurden die in **Tabelle 5** gezeigten Druckparameter und die zu optimierenden Eigenschaften durchgeführt.

Variante	A	B	C	D
Zieleigenschaft	Oberflächenqualität	Strukturhaftung auf Grund	Dichte	Minimierte Kantenverrundung
Volumenfüllung (%)	70	70	100	40/60/100
Füllwinkel (°)	45/-45	45/-45	-20/70	-20/70
Extrudertemperatur (°C)	460	460	460	485/470/450

Tabelle 5 Druckparameter für Formeinsatz KIT-Logo. Die Druckgeschwindigkeiten wurden auf 33,3 bzw. 20 mm/s eingestellt.

Ziel der Variante „A“ ist es, eine möglichst geschlossene und gleichmäßige Deckschicht der Formeinsatzgrundfläche zu gewährleisten. Im Fall „B“ steht die Haftung der Oberflächenstruktur auf der Grundfläche des Formeinsatzes im Vordergrund. Im Fall von „C“ soll eine Erhöhung der Füllung des Gesamtbauteils auf 100% eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit bewirken. Bei Parametersatz „D“ werden zusätzlich konstruktive Veränderungen vorgenommen, d.h. die Kanten der Oberflächenstruktur werden mit Verjüngungen und Abrundungen versehen. Bei den Druckparametern soll eine sich steigernde Volumenfüllung erprobt werden, um die Dichte des Bauteils weiter zu optimieren. Außerdem soll durch die Variation der Druckgeschwindigkeit die Kontur der Struktur verbessert werden.

Die resultierenden Formeinsätze zeigten unterschiedliche Bauteilqualitäten: Variante „A“ wies kleine Hinterschnitte auf, welche durch Nachbearbeitung entfernt werden konnten, „B“ zeigte Oberflächendefekte sowie Hinterschnitte auf, „C“ löste sich beim Drucken durch Verzug von der Bauplattform und zeigt somit keine einheitliche Oberflächenqualität, „D“ erlaubt durch die konstruktiven Änderungen eine sehr gute Oberflächenqualität (**Bild 6, links**), die gespiegelte Variante mit geschliffener Oberfläche ist in **Bild 6, rechts**, dargestellt. Formeinsätze aus CF30/PEEK konnten aufgrund der schlechten Bauteilqualität nicht verwendet werden.

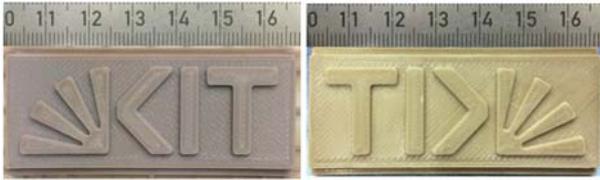


Bild 6 PEEK Formeinsätze „D“.

4 Abformung im Pulverspritzguss

Die verwendete keramische Formmasse bestand aus einem feinskaligem Aluminiumoxid, einem Binder aus Polyvinylbutyral und Polyethylenglykol sowie Stearinsäure als Dispergator [8]; die Abformversuche wurden mit Hilfe einer Arburg 420 C Spritzgussmaschine durchgeführt. Folgende Spritzgießparameter ergaben die besten Abformergebnisse: Massetemperatur 130 °C, Werkzeugtemperatur 30 °C, Einspritzgeschwindigkeit 30 mm/s, Einspritzdruck 450 bar, Nachdruck 230 bar. Das Abschleifen der gespiegelten Variante „D“ lieferte aufgrund der verbesserten Oberflächenqualität die besten Abformqualitäten. **Bild 7** zeigt den PEEK-Formeinsatz nach der Abformung und dem Ausbau aus der Formeinsatzhalteplatte sowie ein keramisches Grünteil. Nach der Abformung von 5 - 7 Bauteilen wies der Formeinsatz erste Defekte an der Oberfläche auf, eine weitere Abformung war nicht mehr möglich.



Bild 7 Oben: PEEK-Formeinsatz „D“ nach dem Ausbau, unten: Keramischer Grünling.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Arbeiten zeigen, dass ein Formwerkzeug aus PEEK mittels FFF gedruckt und im Pulverspritzgießprozess eingesetzt werden kann. Allerdings belegen die Druckergebnisse auch, dass für jede zu druckende Struktur die individuellen Druckstrategien und -parameter optimiert werden müssen. Die gleichzeitige Optimierung unterschiedlicher für die Abformung im Pulverspritzguss relevanter Eigenschaften, wie defektfreie Oberflächenbeschaffenheit, Vermeiden von Hinterschnitten an Kanten bzw. Ecken oder die Minimierung der Bauteilkrümmung ist aufwändig und nicht immer möglich. Für eine zukünftige Anwendung von Kunststoffformeinsätzen ist neben der hohen Wärmebeständigkeit eine deutliche Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit zwingend notwendig, um eine verlängerte Standzeit der Formeinsätze zu realisieren.

6 Literatur

- [1] DIN EN ISO/ASTM 52900, Ausgabedatum 06.2018.
- [2] Ngo, T. D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K. T. Q.; Hui D.: Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites B* 143, (2018) S. 17-196.
- [3] King, D.; Tansey, T.: Rapid tooling: selective laser sintering injection tooling”, *Journal of Materials Processing Technology* 132 (2003), S. 42-48.
- [4] DebRoy, T.; Wei, H. L.; Zuback, J. S.; Mukherjee, T.; Elmer, J. W.; Milewski, J. O.; Beese, A. M.; Wilson-Heid, A.; De, A.; Zhang, W.: Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science* 92 (2018), S. 112-224.
- [5] Bourell, D.; Kruth, J. P.; Leu, M.; Levy, G.; Rosen, D.; Beese, A. M.; Clare, A.: Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals* 66(2) (2017), S. 659-681.
- [6] Qayyum, J. A.; Altaf, K.; Abdul Rani, M. A.; Ahmad, F.; Jahanzaib, M.: Performance of 3D printed polymer mold for metal injection molding process, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 12(22) (2017), S. 6430-6434.
- [7] Altaf, K.; Abdul Rani, A. M.; Ahmad, F.; Baharom, M.; Raghavan, V. R.: Determining the effects of thermal conductivity on epoxy molds using profiled cooling channels with metal inserts. *Journal of Mechanical Science and Technology* 30(11) (2016), S. 4901-4907.
- [8] Medesi, A.J.; Nötzel, D.; Pursche, K.; Hanemann, T.; Franzreb, M.; Wohlgemuth, J.: Ceramic Injection Moulding with 3D-printed Mold Inserts. *Ceramics in Modern Technologies* 2 (2019), S. 104-110.

Repository KITopen

Dies ist ein Postprint/begutachtetes Manuskript.

Empfohlene Zitierung:

Hanemann, T.; Antusch, S.; Baumgaertner, S.; Bonk, S.; Klein, A.; Walter, H.; Wilhelm, D.
[3D-gedruckte PEEK Formeinsätze für das Mikropulverspritzgießen](#).
2021. MikroSystemTechnik Kongress 2021
[doi:10.5445/IR/1000139953](https://doi.org/10.5445/IR/1000139953)

Zitierung der Originalveröffentlichung:

Hanemann, T.; Antusch, S.; Baumgaertner, S.; Bonk, S.; Klein, A.; Walter, H.; Wilhelm, D.
[3D-gedruckte PEEK Formeinsätze für das Mikropulverspritzgießen](#).
2021. MikroSystemTechnik Kongress 2021, 60–63, VDE Verlag

Lizenzinformationen: [KITopen-Lizenz](#)