

› **Fused Filament Fabrication (FFF) im Werkzeugbau**

# Ein geeignetes AM-Verfahren für Formeinsätze

Um grösstmögliche Gestaltungsfreiheit in der Herstellung von Spritzgusswerkzeugen zu ermöglichen, ist die additive Fertigung eine vielversprechende Technologie. Ein geeignetes AM-Verfahren für Formeinsätze im Werkzeugbau ist die FFF-Technologie mit Metall. Die Resultate zeigen ein hohes Potenzial des FFF-Verfahrens zur Herstellung der Spritzgusswerkzeuge.

› **Mohammad Rabiey<sup>1</sup>**  
**Luca Urban<sup>2</sup>**  
**Gian-Marco Cunti<sup>2</sup>**

Die additive Fertigung ermöglicht die Herstellung komplizierter Geometrien einschliesslich interner Strukturen. Diese Gestaltungsfreiheit kann vorteilhaft genutzt werden, um die Wärmeübertragung in Spritzgiesswerkzeugen durch eine konforme Kühlung zu verbessern. Hauptziel ist es, die Zykluszeiten zu verkürzen und die Teilequalität durch gleichmässige Kühlung der Kunststoffprodukte zu verbessern.

Ursprünglich wurden die 3D-Druck Techniken für die Herstellung von Polymerteilen entwickelt.

Im Laufe der Zeit wurden sie jedoch auch auf metallische und keramische Werkstoffe ausgedehnt, da sie eine attraktive Alternative zu herkömmlichen Fertigungssystemen darstellen (Naranjo et al. 2021).

Ein solches AM-Verfahren ist die Fused Filament Fabrication (FFF). FFF kombiniert den dreidimensionalen (3D) Druck von Metallteilen mit Entbindern und Sintern (Godec et al. 2020).

### Additive Fertigung für Spritzgiessformen

Ein bedeutender Vorteil von FFF für Spritzgussformen ist das Potenzial zur Schaffung verbesserter Kühlkanäle. Die Rauheit von 3D-gedruckten Einsätzen kann durch maschinelle Bearbeitung verfeinert werden (Naranjo et al. 2021). Im Vergleich zu herkömmlichen geraden Kühlkanälen besteht die Idee der konfor-

men Kühlung darin, den Abstand zwischen dem Kühlmittel und den Kavitäten an die Formteile anzupassen (Wahl et al. 2022). Beim Spritzgiessen hängen Teilequalität und Zykluszeit stark von der Kühlstufe ab, da die Kühlstufe bis zu 80% der Gesamtzykluszeit ausmacht und sich direkt auf Formabweichungen (z. B. durch Schwindung, Biegung und Verzug) des entstandenen Kunststoffteils auswirkt (Feng et al. 2021).

### Der Vorteil der additiv gefertigten Kühlung

Metal Conformal Cooling (CC) sind Kühlkanäle, die in gleichem Abstand zu den Oberflächen des Formhohlraums liegen. CC-Systeme sind ein vielversprechender Ersatz für herkömmliche, gerade gebohrte Kühlsysteme, da erstere eine gleichmässige und effizientere Kühlwirkung bieten und somit die Produktionsqualität und -effizienz erheblich verbessern (Feng et al. 2021). In einigen Fällen können CC-Kanäle bei geeigneter Gestaltung der Kühlkanäle die Kühlzeit um bis zu 80% und die Zykluszeit um 60 bis 70% reduzieren (Feng et al. 2021).

### Ziel dieser Arbeit

Ziel dieses Projektes ist es, die Thematik Werkzeugbau mit Ansatz der Additiven Fertigung von Formeinsätzen mittels 3D-Metall-Druck zu untersuchen. Dazu wird ein Werkzeug mit Formeinsatz und kontur-

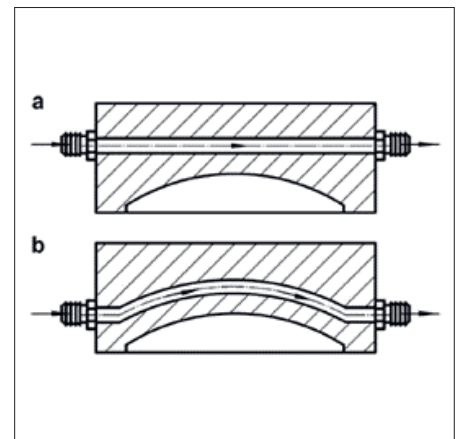


Abb. 1: Schematische Darstellung (a) eines gerade gebohrten Kühlkanals, (b) eines konformen Kühlkanals (Feng et al. 2021)

nahen Kanälen hergestellt. Das gleiche Spritzgiesswerkzeug existiert mit standardmässigen geraden Kanälen und ermöglicht somit einen genauen Vergleich zwischen dem additiv gefertigten Formeinsatz und dem konventionell hergestellten Werkzeug. Das Werkzeug wird dann auf einer Spritzgiessmaschine getestet. In einem letzten Schritt wird die Spritzgussform optisch analysiert, um ihren Zustand hinsichtlich der Kontaktflächen zu überprüfen.

### Experimentelle Untersuchung

#### Materialauswahl für das additive Verfahren

Für das an der OST (Ostschweizer Fachhochschule) zur Verfügung stehende 3D-Drucksystem wird das Metal X System von

H13 Werkzeugstahl / 1.2344								
Cr	Mo	Si	V	C	Mn	P	S	Fe
4.7–5.5%	1.3–1.7%	0.8–1.2%	0.8–1.2%	0.3–0.45%	0.2–0.5%	0.03% max.	0.03% max.	bal

Tabelle 1 (Bilder und Tabellen: IWK)

<sup>1</sup> Prof. Dr. Mohammad Rabiey, Fachbereichsleiter Fertigungstechnik Metall, IWK

<sup>2</sup> wissenschaftliche Mitarbeiter, IWK



Abb. 2: Formeinsatz vor dem Sinterprozess.



Abb. 3: Formeinsatz nach dem Sinterprozess.

Markforged verwendet. Zwischen den vorhandenen Materialien wurde der Werkzeugstahl H13 gewählt. In Tabelle 1 ist die Zusammensetzung von H13-Werkzeugstahl ersichtlich.

**Entwurf von konformen Kanälen**

Nachdem das Material definiert wurde, muss die Konstruktion geeigneter Kanäle für die Kavität festgelegt werden. Wie es in zahlreichen Veröffentlichungen und in der Literatur benötigt ist, müssen die Kanäle, wie in Abbildung 1 dargestellt, an die Kavität angepasst sein, um die bestmögliche Leistung zu erzielen.

**Geometrie des Hohlraums und des Kühlkanals**

Im Falle dieser Arbeit ist ein Flaschenöffner aus Hochtemperatur Polyamid mit Glasfaser das Endprodukt des Spritzgiesswerkzeugs. Hierbei muss das Werkzeug

für die Kunststoffverarbeitung temperiert werden. In diesem Fall werden die Kanäle als Heizkanäle für das Werkzeug anstelle von Heizpatronen verwendet.

Verfahrensbedingt wird die Geometrie Schicht für Schicht hergestellt. Damit die Stützstruktur entfällt, müssen die Kanäle in Tropfenform mit einem maximalen Winkel von 45° an der Oberseite konstruiert werden.

**Herstellung von Spritzgiesswerkzeugen mittels FFF**

Nach Abschluss des Konstruktionsprozesses werden die Spritzgiesswerkzeuge mit H13-Werkzeugstahl (1.2344) gedruckt. Die Abbildung 2 zeigt die Form während des Druckprozesses mit Filament. Das Material enthält Metallpulver und Polypropylen, welches das Pulver zusammenhält. Nach dem Druckprozess ist das Teil etwa 20% grösser als nach dem Sinterprozess. Ausserdem ist Polypropylen (PP) in den Partikeln enthalten, da die Teile sonst nicht gedruckt werden könnten. In einem zweiten Schritt wird das Teil in einer Entbindungsanlage entbunden, um das gesamte PP-Material zu entfernen, damit ein reines Metallteil entsteht. Der Sinterofen wird verwendet, um die maximale Dichte und Festigkeit zu erreichen. Dabei schrumpft das Bauteil auf die gewünschten Abmessungen (etwa 20%). In Abbildung 3 ist der endgültige Formeinsatz abgebildet.

**Analyse der gedruckten Spritzgiessformen**

In diesem Kapitel wurden die Einsätze nach dem Sinterprozess gemessen, um die Werte für Rauheit und Verzug zu analysieren. Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen sind in Ra-Werten beschrieben und werden taktil mit einer MahrSurf UD130 Maschine gemessen. Tabelle 2 zeigt die resultierenden Rauheitswerte. Der Formeinsatz weist von beiden Enden aus gemessen etwa 0,3 mm Dickenunter-

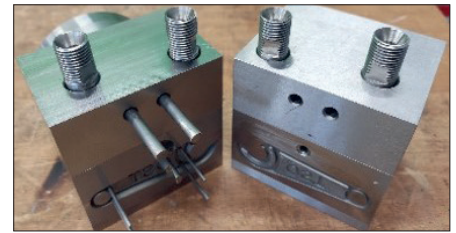


Abb. 4: Werkzeug mit montierten Formeinsätzen.

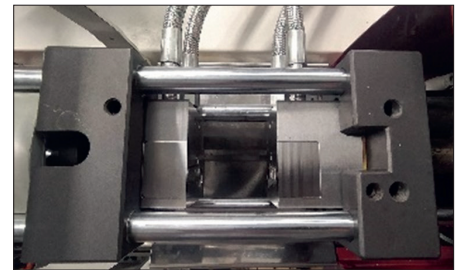


Abb. 5: Komplett montiertes Werkzeug auf Spritzgiessmaschine.

schied auf. Um Probleme durch Verformung bei der Nachbearbeitung zu vermeiden, wurde der Formeinsatz in allen Dimensionen, in denen eine Bearbeitung erforderlich ist, mit 0,5 mm Aufmass gedruckt.

**Fräsen von additiv gefertigten Teilen und Werkzeug**

Aufgrund des Verzugs nach dem Sintergang ist die spanende Bearbeitung für eng tolerierte Merkmale erforderlich. Bei der Nachbearbeitung wurden die Befestigungsbohrungen des Angusses, die Passungen der Auswerferstifte, die Gewinde sowie der Umfang des Formeinsatzes bearbeitet. Um die Unterschiede der Formeinsätze zu veranschaulichen, wurde die Kavität nicht nachbearbeitet. Zudem wurden die beiden Werkzeugteile konventionell gefertigt (Abb. 4).

**Komplette Werkzeugmontage**

Das Werkzeug wurde in die Spritzgiessmaschine eingebaut und mit vier Schläuchen an zwei Temperiergeräte angeschlossen (Abb. 5).

**Tests an der Spritzgiessmaschine**

Für die Versuche wurde ein schwarz eingefärbtes Hochtemperatur Polyamid mit Glasfaser PA6T/6I-GF50 verwendet. Es besitzt eine minimale Verarbeitungstemperatur von 330°C und eine Werkzeugtemperatur von 140°C (Temperierung).

**Rauheitsmessung (MahrSurf UD130)**

Bereich	Auswerferseite (AS)		Düsenseite (DS)	
	Ra [µm]	Rz [µm]	Ra [µm]	Rz [µm]
Kavität	4.189	29.662	2.301	17.483

Tabelle 2





Abb. 6: Füllstudie



Abb. 7: Musterteil von konventionellem Werkzeug



Abb. 8: Musterteil von additivem Werkzeug

Die Spritzgussparameter wurden grundsätzlich vom Originalwerkzeug übernommen. Die Füllstudie wurde durchgeführt (Abb. 6).

### Vergleich zwischen konventionellem und additivem Werkzeugen

Für die Untersuchung der beiden Werkzeuge wurde das spritzgegossene Musterteil mit dem FFF-Werkzeug und dem Originalwerkzeug verglichen. Dazu wurde eine Vergleichsaufnahme mit dem Keyence VHX Digital Mikroskop gemacht. Im originalen Formeinsatz, dessen Oberflächen gefräst wurden, sind die Kanten schärfer und die Oberflächenrauheit ist geringer (Abb. 7). Beim Musterteil, welches mittels FFF-Formeinsatz gefertigt wurde, sind deutliche Eindrücke und auf

der Seite Rillen, welche durch den Schichtenaufbau der additiven Fertigung gegeben sind, auf das Bauteil übertragen worden. (Abb. 8)

Die abgebildete Bauteiloberfläche wird definiert durch die Topografie des Formeinsatzes. (Abb. 9)

### Schlussfolgerung

Der Formeinsatz mit konturnahen Kanälen wurde mit dem FFF-Verfahren hergestellt.

Herstellung Formeinsatz:

- Mit dem FFF-Verfahren konnte die Geometrie mit Aufmass aufgebaut und mit der anschliessenden Nachbearbeitung die genauen Merkmale hinzugefügt werden.
- Mittel additiver Fertigung (FFF-Verfahren) konnten konturnahe Kanäle im Formeinsatz hergestellt werden.
- Nach dem Sinterprozess wurde eine Härte von 40 HRC erreicht.

Die Spritzgiessversuche mit dem additiv gefertigten Werkzeug haben funktioniert. Es konnte eine Füllstudie durchgeführt werden und die Oberflächen der Musterteile mit den Oberflächen der originalen Bauteile verglichen werden.

- Die Werkzeugtemperatur konnte mit dem angeschlossenen Temperiergerät auf 140 °C geheizt werden.
- Die Kavität wurde komplett mit Kunststoff ausgefüllt und korrekt entformt.
- Die Oberfläche des Musterteils mittels additiv gefertigten Formeinsatzes weist klar eine grössere Oberflächenrauheit und stärker verrundete Kanten als die originalen Musterteile auf. Dies ist auf die schichtweise aufgebaute Kavität und Seitenwände zurückzuführen.
- Um die Qualität der Musterteile zu verbessern, soll die Kavität gefräst und poliert werden.



Abb. 9: Oberflächenstruktur von additiv gefertigtem Formeinsatz

### Literaturverzeichnis

Ehrig, Frank; Studer, Mario (2018): Kunststofftechnik 3. Werkstoffmechanik der Kunststoffe. Hochschule für Technik Rapperswil. Rapperswil, 29.10.2018.

Feng, Shaochuan; Kamat, Amar M.; Pei, Yutao (2021): Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates. In: International Journal of Heat and Mass Transfer 171, S. 121082. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082.

Godec, Damir; Cano, Santiago; Holzer, Clemens; Gonzalez-Gutierrez, Joamin (2020): Optimization of the 3D Printing Parameters for Tensile Properties of Specimens Produced by Fused Filament Fabrication of 17-4PH Stainless Steel. In: Materials (Basel, Switzerland) 13 (3). DOI: 10.3390/ma13030774.

Naranjo, Juan A.; Berges, Cristina; Gallego, Alberto; Herranz, Gemma (2021): A novel printable high-speed steel filament: Towards the solution for wear-resistant customized tools by AM alternative. In: Journal of Materials Research and Technology 11, S. 1534–1547. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.02.001.

Wahl, Jan Philipp; Niedermeyer, Jens; Bernhard, Robert; Hermsdorf, Jörg; Kaieler, Stefan (2022): Design of additively manufacturable injection molds with conformal cooling. In: Procedia CIRP 111, S. 97–100. DOI: 10.1016/j.procir.2022.08.146.

### Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung  
Prof. Dr. Mohammad Rabiyy  
OST Ostschweizer Fachhochschule  
Eichwiesstrasse 18b  
CH-8645 Rapperswil-Jona  
www.ost.ch