

# Additiv gefertigte Werkzeuge mit gezielt porösen Strukturen zur Werkzeugentlüftung in einem Fertigungsschritt

<sup>1</sup>T. Schubert, <sup>2</sup>M. Gebauer, <sup>2</sup>B. Müller, <sup>3</sup>M. Baumgartner

<sup>1</sup>KDS Radeberger Präzisions-Formen- und Werkzeugbau GmbH, Großröhrsdorf

<sup>2</sup>Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

<sup>3</sup>PTZ-Prototypenzentrum GmbH, Dresden

## Kurzfassung

*Generative Fertigung mittels Laserstrahlschmelzen ermöglicht die Herstellung innovativer Werkzeugeinsätze für das Kunststoffspritzgießen mit konturnaher Werkzeugtemperierung, die sehr gezielt steuerbar, je nach Bedarf, beheizt und/oder gekühlt werden kann. Der Einsatz dieser innovativen Fertigungstechnologie erlaubt darüber hinaus zusätzlich eine gezielte Beeinflussung der Werkstoffdichte, um eine optimale Entlüftung und somit eine schnellere und vor allem vollständige Formfüllung zu ermöglichen.*

*Im Forschungsvorhaben wurde mit Hilfe von numerischer Simulation eine innovative, großflächig vernetzte Werkzeugtemperierung entwickelt und schrittweise optimiert. Die entwickelte Werkzeugtemperierung erlaubte eine deutliche Reduzierung der Kühlzeit und dadurch eine Reduzierung der Gesamtzykluszeit. Weiterhin wurde die Formfüllung genau betrachtet und die optimale Position der Werkzeugentlüftung bestimmt. Die Grenzen aktueller Werkzeugbaulösungen wurden dabei gezielt außer Acht gelassen. Zur Erzeugung lokal definierter Porositäten wurden eigens für das Laser-Strahlschmelzen Prozessparameter und eine entsprechende Belichtungsstrategie entwickelt. Durch die Verknüpfung verschiedener Prozessparameter innerhalb eines Bauprozesses entstand so in vorher exakt definierten Bereichen die Werkzeugentlüftung in einem Schritt mit der Werkzeugfertigung. Eine Entlüftung soll auf diese Weise zukünftig auch an konventionell nicht zu entlüftenden Werkzeugbereichen möglich sein. Im Versuch konnte durch die porösen, generativ gefertigten Strukturen der spezifische Spritzdruck und die Spritzzeit reduziert werden.*

## Motivation

Die grundlegenden Aufgaben, die ein Spritzgießwerkzeug zu erfüllen hat, sind die Aufnahme und das gleichmäßige Verteilen der Schmelze (Formgebung), die Abkühlung und die anschließende Ausformung des Formteils [1]. Für die gleichmäßige Verteilung der Schmelze und die vollständige Formfüllung spielt die Entlüftung der Spritzgießform eine entscheidende Rolle. Aufgrund steigender Qualitätsanforderungen und der Notwendigkeit immer effizienter zu fertigen (kürzere Zykluszeiten) nimmt die Formentlüftung im Kunststoffspritzgießen einen immer höheren Stellenwert ein. Ohne ausreichende Entlüftung treten Fehler, wie beispielsweise eine unvollständige Formfüllung, Schwimmhäute, Bindenähte oder Glanzunterschiede an den Oberflächen der Bauteile auf. Gerade komplexe Geometrien mit vielen Formnestern bieten ein hohes Risiko von Lufteinschlüssen. Im industriellen Einsatz werden verschiedene Techniken angewandt, die ein Entweichen der Luft aus der Form ermöglichen sollen. Üblicherweise erfolgt die Entlüftung über die Formtrennung, über die Auswerfer, über das Einschleifen von Kanälen oder über gesinterte Einsätze, wobei deren Positionierung fertigungstechnisch eingeschränkt ist und deshalb die Luft oftmals nicht schnell genug entweichen kann. Ziel des Vorhabens war deshalb, die Entwicklung und generative Fertigung eines innovativen Spritzgießwerkzeuges mit einer großflächig vernetzten Temperierung und integrierter Entlüftung für kürzere Zykluszeiten und höhere Bauteilqualitäten, um projektübergreifend eine effizientere Produktion zu ermöglichen und zukünftig neue Werkzeugbaulösungen anbieten zu können.

## I. ADDITIVE FERTIGUNG VON WERKZEUGEN MITTELS LASERSTRAHLSCHMELZEN

Die generative Fertigung von Werkzeugen oder Werkzeugmodulen besitzt besonders im Hinblick auf die gestalterischen Freiheiten einen großen Vorteil gegenüber der konventionellen Werkzeugfertigung. So lassen sich nahezu beliebig komplexe Strukturen oder Hohlräume und verzweigte Kanalsysteme erzeugen. [2] Beim Laser-Strahlschmelzen (s. Abb. 1), einer Untergruppe generativer Fertigungsverfahren, bildet Metallpulver den Ausgangsstoff für die Herstellung einer definiert konturierten Schicht. Durch einen Laser wird das Pulver selektiv aufgeschmolzen und erstarrt nach der Abkühlung zu einem festen Körper. Das Bauteil entsteht demgemäß durch das schichtweise Aufbringen von Material und nicht durch Abtragen. Für das Laserstrahlschmelzen stehen verschiedene Werkzeugwerkstoffe zur Auswahl. Dazu zählen der martensitaushärtende Warmarbeitsstahl X3NiCoMoTi18-9-5 (1.2709), der korrosionsbeständige Formenstahl Corrax® und der nichtrostende martensitaushärtende Stahl 17-4PH (1.4548).

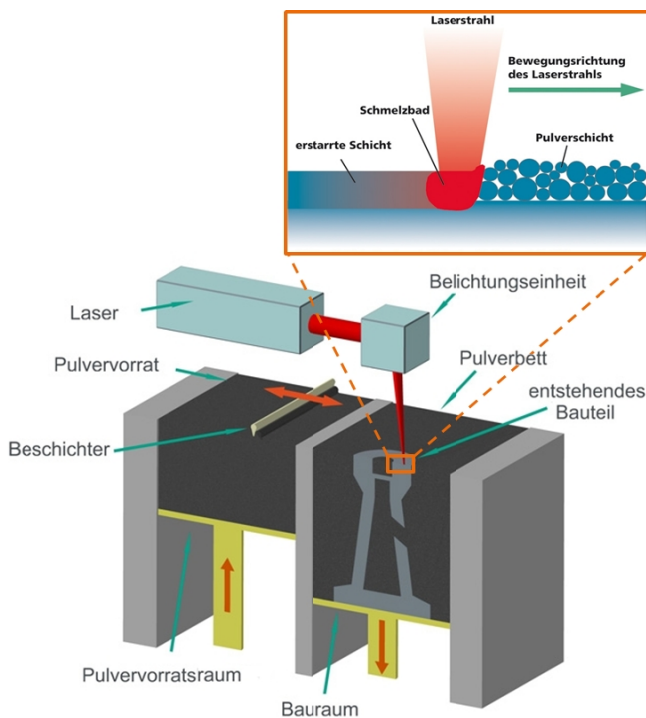


Abb. 1: Prinzipskizze Laser-Strahlschmelzen

## II. ENTWICKLUNG DER WERKZEUGTEMPERIERUNG

Auf Grundlage einer genauen Analyse bestehender Schwächen und Probleme aktueller Werkzeugsysteme wurde zu Beginn des Projektes ein repräsentatives Demonstratorbauteil mit geringer Wandstärke entwickelt. Um später verschiedene Werkzeugvarianten direkt miteinander vergleichen zu können, besitzt das Demonstratorwerkzeug zwei Formnester mit austauschbaren Werkzeugeinsätzen. Das Werkzeug weist

durch seine tiefe Kavität eingeschränkte Möglichkeiten zur konventionellen Formentlüftung und Temperierung auf. In Verbindung mit Thermo- und Strömungssimulation wurde eine innovative netzartige Werkzeugtemperierung mit gleichmäßig geringem Abstand zur Werkzeugkontur entwickelt. Mithilfe der Simulation konnten zudem erste Gestaltungsrichtlinien für solch ein innovatives Temperiersystem abgeleitet werden. Im Verlauf mehrerer Optimierungsschleifen wurde die Werkzeugauslegung bzw. das Kühlsystemdesign sukzessive verbessert und entsprechend im CAD gestaltet. Das Kühlsystem wurde so schrittweise sowohl thermisch als auch strömungstechnisch optimiert und den Anforderungen angepasst (s. Abb. 2). Die Komplexität des entwickelten Temperiersystems macht eine simulative Betrachtung insbesondere der Strömung unumgänglich.

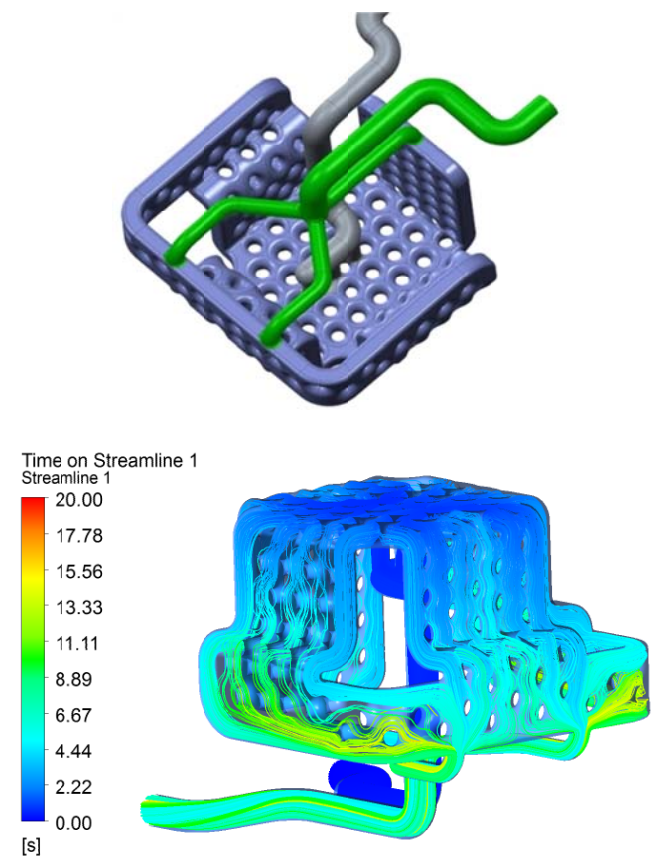
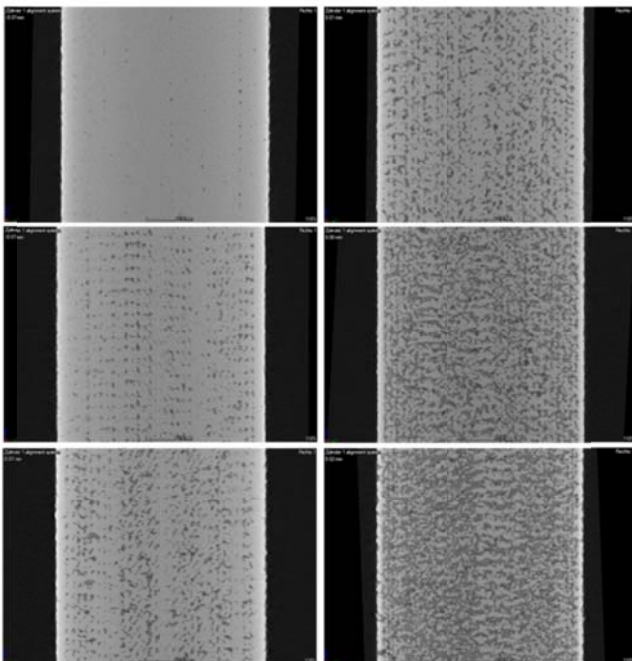


Abb. 2: CAD-Darstellung optimierte Flächenkühlung (oben) mit Strömungsanalyse (unten)

## III. ENTWICKLUNG DER WERKZEUGENTLÜFTUNG

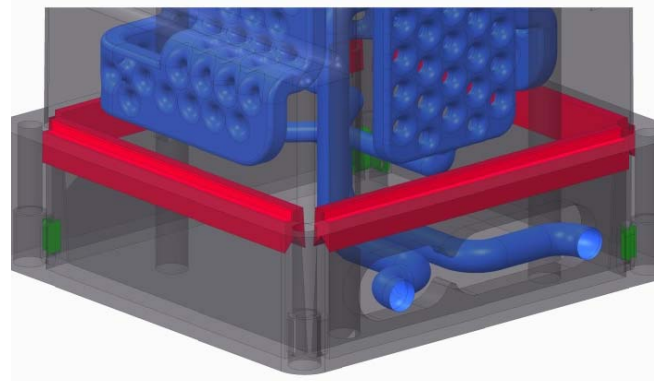
Grundsätzlich wird beim Laser-Strahlschmelzen ein Parametersatz genutzt, der ein möglichst 100 % dichtes Gefüge mit einer hohen Baurate vereint. Bei der Erzeugung der Werkzeugentlüftung sollte zwar die Baurate möglichst hoch bleiben, aber die Dichte gezielt abnehmen. Das Laser-Strahlschmelzen ist ein sehr komplexer Prozess mit einer Vielzahl, sich gegenseitig beeinflussender Faktoren und Parameter, wie beispielsweise Schichtstärke, Laserleistung Belich-

tungsgeschwindigkeit, Spurbestand und Fokusslage, um nur die wichtigsten zu nennen. Durch das Variieren von Anlagenparametern und Belichtungsstrategien wurde eine Vielzahl an Testkörpern mit definierter Porosität generiert und das Prozessfenster schrittweise eingengt. Im Fokus der Untersuchungen standen dabei die durchschnittliche Porengröße, die Porenverteilung und die maximale Porenanzahl. Die Poren sollte dabei eine ausreichende Entlüftung bei gleichzeitig guter Bauteiloberfläche ermöglichen. Die Testkörper wurden mittels Mikroskopie und Micro-CT (s. Abb. 3) analysiert und anschließend die Durchströmbarkeit auf einem eigens entwickelten Prüfstand bewertet. Hauptaugenmerk während der gesamten Untersuchung wurde auf eine exakte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (Poren) gerichtet.



**Abb. 3: Vergleich Porengröße und Porenverteilung mittels Micro-CT an verschiedenen Probekörpern**

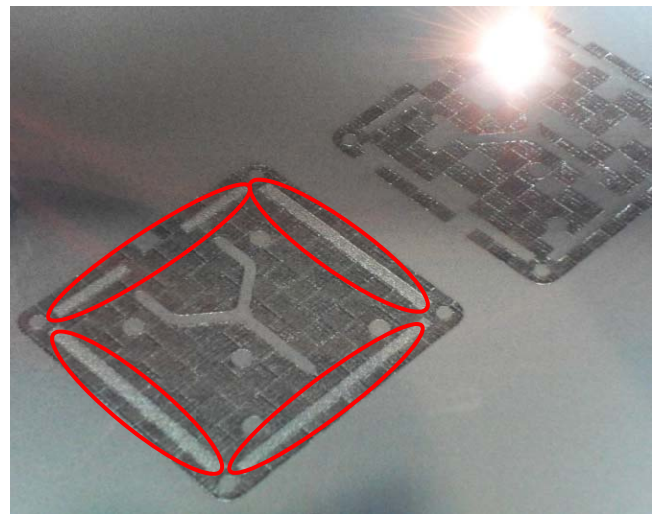
Die Positionierung der Werkzeugentlüftung erfolgte nach eingehender Analyse der Formfüllung am konventionell gefertigten Vergleichswerkzeug, umlaufend am Sockel des Werkzeugeinsatzes (s. Abb. 4). Um eine möglichst ungehinderte Luftabfuhr zu gewährleisten, wurde der Bereich hinter der porösen Werkzeugentlüftung entsprechend freigestellt und zur Stabilisierung mit einem groben, regelmäßigem Gitter verstärkt.



**Abb. 4: CAD-Darstellung - Position und Größe der porösen Entlüftungsstrukturen (rot)**

#### IV. WERKZEUGFERTIGUNG & ERPROBUNG

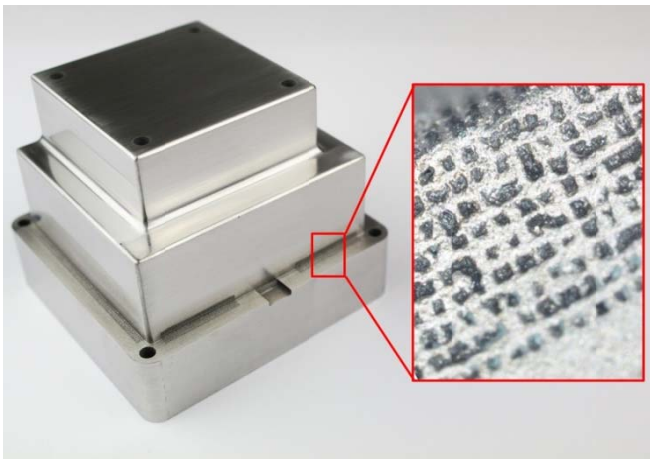
Die Fertigung der Demonstratorwerkzeuge inklusive Kühlung und Entlüftungsstrukturen (siehe rot markierte Bereiche in Abb. 5) erfolgte mittels Laserstrahlschmelzen aus dem Werkzeugstahl X3NiCoMoTi18-9-5 (1.2709). Durch die gezielte Veränderung der Anlagen- bzw. Verfahrensparameter konnte während der generativen Fertigung in den vorher definierten Werkzeugbereichen die poröse Entlüftungsstruktur erzeugt und zusammen mit dem Werkzeug bzw. Werkzeugeinsatz in einem Fertigungsschritt realisiert werden.



**Abb. 5: Laserstrahlschmelzprozess (rot-markiert die porösen Entlüftungsstrukturen)**

Um die für den Einsatzzweck bestmöglichen mechanischen Eigenschaften der Werkzeugdemonstratoren zu garantieren, wurden diese anschließend einer entsprechenden Wärmebehandlung unterzogen. Die Werkzeuge werden beim generativen Laserstrahlschmelzen im Allgemeinen mit einem geringen Aufmaß gefertigt und anschließend mechanisch bearbeitet, um die geforderte Oberflächengüte und Maßhaltigkeit zu gewährleisten. Deshalb war die Entwicklung einer geeigneten maschinellen Nachbearbeitung

der porösen Strukturen im Forschungsvorhaben unumgänglich. Gängige Bearbeitungsverfahren wie Fräsen, Schleifen, Erodieren und Polieren wurden untersucht und die Parameter dabei schrittweise an die besonderen Anforderungen des Werkzeugwerkstoffes und der porösen Strukturen angepasst. Die Testkörper wurden im Anschluss erneut auf die Durchströmbarkeit untersucht. Die Nachbearbeitung wirkt sich direkt auf die Luftdurchlässigkeit aus. Prinzipiell verschlechterte sich der Wert nach der spanenden Bearbeitung, je nach Verfahren und gewählten Parametern, geringfügig. Es kommt zu einem Verschließen der Poren. Funkenerosives Abtragen kehrt diesen Effekt wieder um. (s. Abb. 6) Zur Verifizierung der Optimierungen (Werkzeugentlüftung und -temperierung) wurden das Demonstrator- und das Vergleichswerkzeug unter Serienbedingungen auf einer Standardspritzgießmaschine getestet. Die Prozessparameter wurden überwacht und ausführlich dokumentiert. In einer ersten Versuchsreihe wurden mit dem konventionellen Werkzeug die Referenzparameter und -einstellungen ermittelt. In einer zweiten Versuchsreihe wurden dann mit dem generativ gefertigten Demonstratorwerkzeug die Referenzparameter schrittweise optimiert. Eine unvollständige Formfüllung bzw. Weißbruch am Spritzgießteil zeigte die Grenze der möglichen Optimierung an. Die erreichten Verbesserungen gegenüber dem aktuellen Stand der Technik konnten genau dem jeweiligen innovativen Werkzeulement zugeordnet werden.

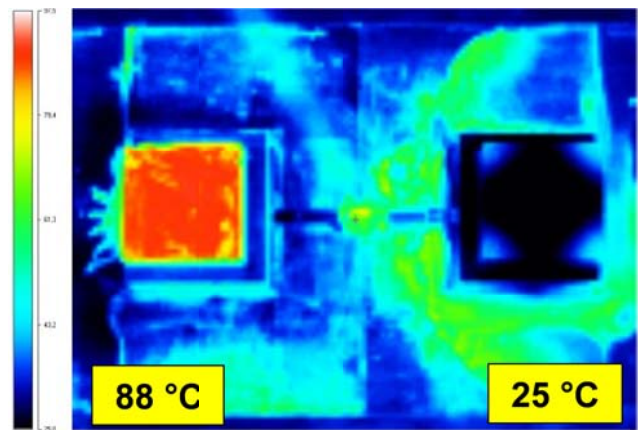


**Abb. 6: additiv gefertigter Werkzeuereinsatz (Demonstratorwerkzeug) mit poröser Entlüftungsstruktur und Flächenkühlung**

#### V. ERGEBNISSE & AUSBLICK

Im Projekt wurden neben einer innovativen Werkzeugtemperierung die Grundlagen zur Herstellung eines definiert porösen Gefüges mittels Laser-Strahlschmelzen geschaffen. Es konnten entsprechende Prozessparameter entwickelt und die Machbarkeit sowie die Funktion nachgewiesen werden. Es wurden geeignete Prozessketten zur mechanischen Nacharbeit entwickelt und anhand eines repräsentativen Demonstratorwerkzeugs erprobt. Die erreichten

Optimierungen können anhand konkreter Zahlen belegt werden und zeigen das große Potential dieser innovativen Fertigungstechnologie. Die Kühlzeit (Haltezeit) wurde um mehr als 33 % und die Zykluszeit um mehr als 19 % reduziert (s. Abb. 7). Messungen ergaben zudem eine höhere Maßgenauigkeit der Bauteile. Die innovative Entlüftung wirkte sich zudem positiv auf Spritzzeit (minus 5,2 %) und den Spritzdruck (minus 5,6 %) aus. Die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse bilden die Basis für weiterführende Untersuchungen. Diese sollten sich auf die exakte Reproduzierbarkeit der Porenverteilung, eine Verringerung der durchschnittlichen Porengröße und auf die Reinigung der Entlüftungsstrukturen konzentrieren.



**Abb. 7: Thermografieaufnahme vorgeheiztes Werkzeug (90 °C) 5 s nach dem Einschalten der Kühlung (20 °C) - konventioneller Werkzeuereinsatz (li.), additiv gefertigter Werkzeuereinsatz (re.)**

***Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Freistaates Sachsen gefördert.***

#### QUELLEN

- [1] Menges, G.: Michaeli, W.; Mohren, P.: „Spritzgießwerkzeuge. Auslegung, Bau, Anwendung“; 6. Aufl.; München: Carl Hanser Verlag, 2007
- [2] Gebhardt, A.: Rapid Prototyping für metallische Werkstücke: Direkte und indirekte Verfahren, In: RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, Ausgabe 2 (2005), 2005, ISSN 1614-0923