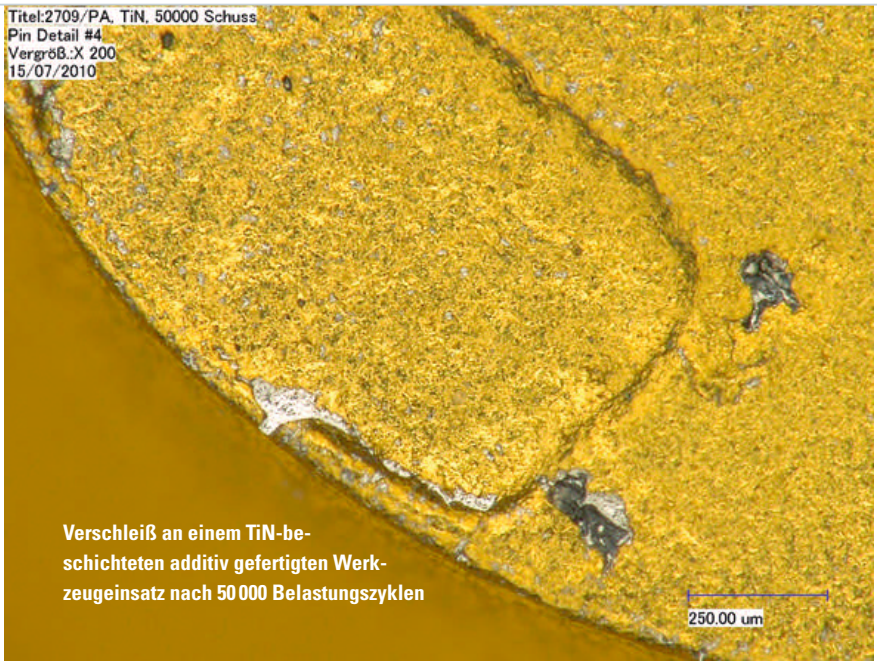

Verschleiß an einem TiN-beschichteten additiv gefertigten Werkzeugeinsatz nach 50 000 Belastungszyklen

Standzeitverlängerung. Um die Forderung der Industrie nach immer kürzeren Zykluszeiten zu erfüllen, nutzen Konstrukteure heute verstärkt additiv gefertigte Werkzeugeinsätze mit konturnahem Kühlkanalverlauf. Die Verschleißeigenschaften und damit die Standzeiten dieser Werkzeugelemente gerade bei der Verarbeitung von abrasiven Formmassen waren bislang noch wenig erforscht und wurden deswegen nun untersucht.

Weniger Verschleiß an additiv gefertigten Werkzeugeinsätzen

BERNHARD HENNRICH
MARTIN BASTIAN
PETER HEIDEMEYER

Zehn Industrieunternehmen und zwei Institute haben in dem Verbundprojekt „InnoSurface“ untersucht, ob und wie sich die durch die effizientere konturnahe Werkzeugtemperierung bewerkstelligte Reduzierung der Zykluszeit mit längeren Standzeiten der additiv gefertigten Formeinsätze vereinbaren lässt. Die Projektpartner **(Tabelle 1, S. 48)** entwickelten und erprobten dazu additiv gefertigte oberflächenfunktionalisierte Werkzeugeinsätze für Analysen des Verschleiß- und Temperierverhaltens.

Das direkte Laserformen, auch als selektives Laserschmelzen (Selective Laser Melting, SLM) bezeichnet, ist ein additives, pulverbettbasiertes Fertigungsverfahren, mit dem Bauteile schrittweise in Schichtdicken von 0,05 bis 0,1 mm aufgebaut werden. Der Laserstrahl schmilzt das Pulvermaterial selektiv auf, sodass sich eine schmelzmetallurgische Bindung mit darunterliegendem massivem Material bzw. zuvor belichteten und erstarrten Bauteilschichten ausbilden kann. Somit können beliebig geformte Temperierkanäle konturnah direkt unterhalb der Kavitätsoberfläche eingebracht werden. In den Versuchen kamen zunächst additiv gefertigte Werkzeugeinsätze aus →

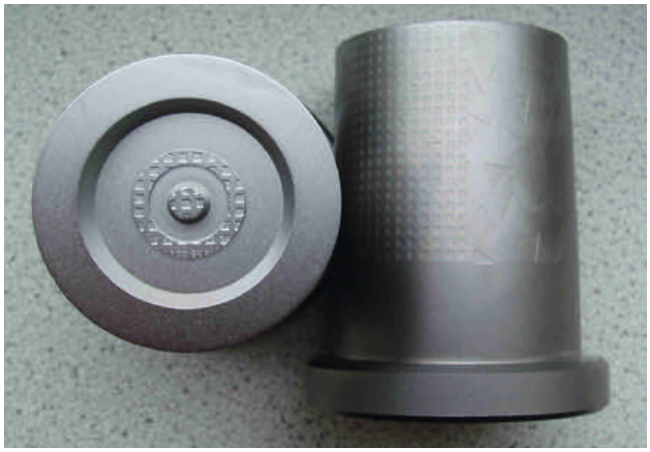

Bild 1. Oberflächen der Werkzeugkerne wurden durch chemisches Ätzen im Bereich der Anspritzung und Mantelfläche funktionalisiert
(Bilder: SKZ)

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
Dokumenten-Nummer KU111194

den Stahlqualitäten 1.2343 und 1.2709 zum Einsatz. Später ist es dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (Fraunhofer ILT) gelungen, auch einen Kupferwerkstoff mit einer deutlich höheren Wärmeleitfähigkeit im SLM-Prozess zu verarbeiten.

Die Oberflächen der aus unterschiedlichen Werkstoffen generierten Werkzeugkerne wurden nach der Endbearbeitung u. a. durch Polieren, Erodieren oder Ätzen funktionalisiert. Insbesondere die geätzten Strukturen dienten zur Analyse des Verschleißverhaltens **(Bild 1)**. Das Versuchsobjekt war ein für die Werkzeugeinsätze konzipiertes Vierfach-Heißkanalwerkzeug **(Bild 2)** zur Herstellung einer becherförmigen Kappe (Außendurchmesser 41 mm, Höhe 37,4 mm, Dicke 1 mm). Das Schussgewicht lag, je nach Dichte des zu verarbeitenden Kunststoffs, bei ca. 24 g.

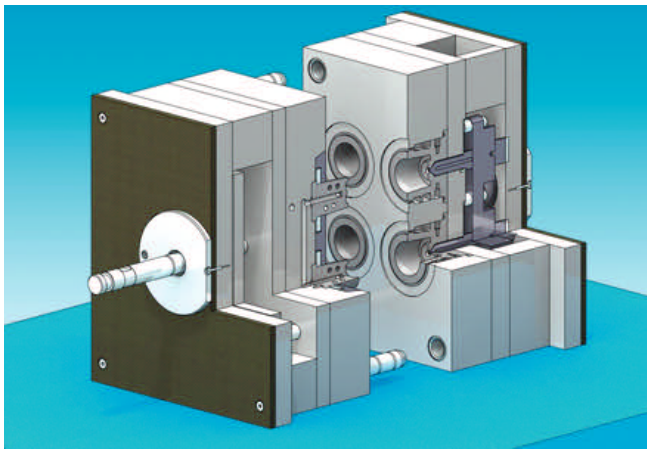

Bild 2. Versuchswerkzeug im Schnitt: Das Vierfach-Heißkanalwerkzeug produziert becherförmige Kappen

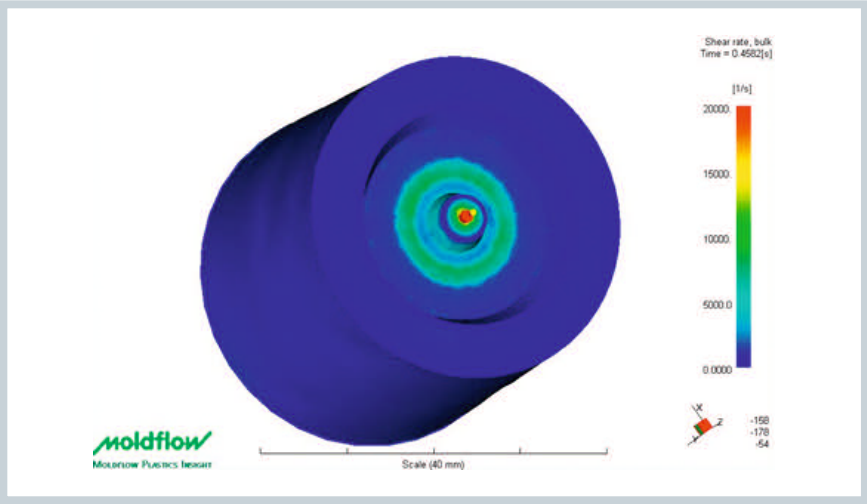

Bild 3. Die Simulation der Formteilfüllung ermittelte direkt am Anspritzpunkt der Heißkanaldüse extrem hohe Scherraten

Zwei wesentliche Verschleißursachen

Der an den Werkzeugeinsätzen zu erwartende Verschleiß lässt sich auf zwei wesentliche Effekte des Spritzgießprozesses zurückführen:

- die teilweise extrem hohen Materialscherraten bei der Formteilfüllung und
- die Zwangsentformung der Kunststoffteile von den Kernen aus dem Werkzeug.

Um den Einfluss einer starken Materialscherung zu verdeutlichen, wurden zwei Bereiche an der Deckfläche des Versuchswerkzeugs mit extrem hohen Scherraten gestaltet. Die Simulation der Formteilfüllung ermittelte direkt am Anspritzpunkt der Heißkanaldüse Scherraten zwischen 10 000 und 20 000 s^{-1}. Im zweiten Bereich mit hoher Materialscherung, der durch eine Halbierung der Formteilwanddicke entsteht, zeigten sich Scherraten in der Größenordnung von 7000 bis 7500 s^{-1} **(Bild 3)**. Der zweite wesentliche Verschleißeffekt wird durch die Zwangsentformung an der innenliegenden Mantelfläche des Formteils infolge einer Ätzstruktur auf dem Kern hervorgerufen. Zudem wurde die Entformungsschräge am Formteil nur mit 1° gewählt.

Im PVD-Verfahren (Physical Vapor Deposition) auf die Werkzeugoberfläche aufgebrachte Dünnschichten (2–3 µm Titannitrid (TiN) und Chromnitrid (CrN)) dienten dazu, eine mögliche Verschleißreduzierung durch Werkzeugbeschichtung zu ergründen. Die Versuche wurden auf einer Spritzgießmaschine mit 1300 kN Schließkraft (Typ: BA1300, Hersteller: Wittmann Battenfeld GmbH, Kottingbrunn/Österreich) mit einem PA 6-GF 50 in einer Gesamtzykluszeit von 12 s durchgeführt. Die Werkzeugeinsätze wurden in regelmäßigen Intervallen zur qualitativen und quantitativen Verschleißanalyse aus dem Werkzeug ausgebaut und mit dem im SKZ entwickelten Oberflächenscanner (SurfScan) untersucht **(Bild 4)**.

Schutzschicht und Werkstoff müssen zueinander passen

Die Untersuchungen zeigen, dass das Verschleißverhalten sowohl von der gewählten Schutzschicht als auch vom beschichteten Grundwerkstoff abhängt. Dies offenbart sich z. B. an unbeschichteten Musterkernen aus den beiden Werkstoffen 1.2343 und 1.2709. So sind bei dem Kern

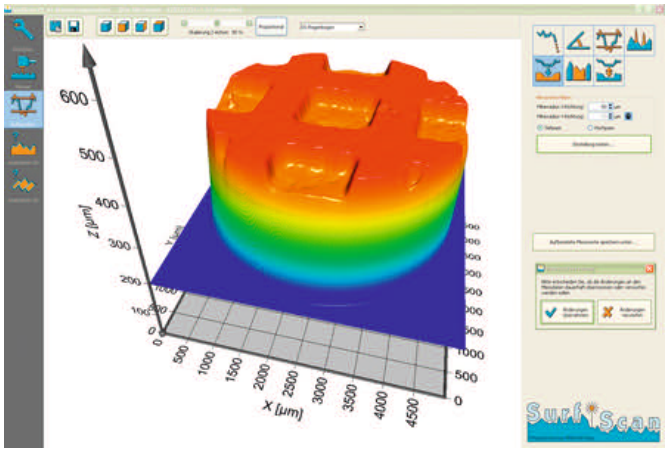

Bild 4. Mit dem Oberflächenscanner SurfScan wurde der Verschleiß der Werkzeugeinsätze in regelmäßigen Intervallen analysiert

© Carl Hanser Verlag, München

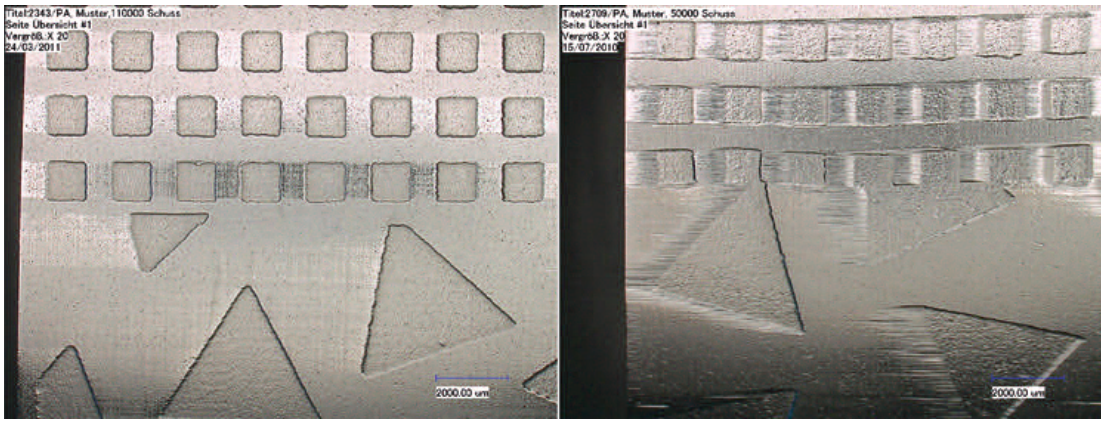

Bild 5. Die Mantelfläche (Entformungsrichtung von links nach rechts) des unbeschichteten Werkzeugeinsatzes aus 1.2343 (links) zeigt nach 110 000 Belastungszyklen weniger Verschleiß im Vergleich zu dem aus 1.2709 (rechts) nach 50 000 Belastungszyklen

aus 1.2709 bereits nach wenigen Belastungszyklen Auswaschungen und Kantenbrüche am Anspritzpunkt und an der Mantelfläche zu erkennen **(Bild 5)**, während bei dem Werkstoff 1.2343 erst bei weit höheren Schusszahlen lediglich im Mantelbereich leichte Kantenabrundungen auftreten. Der chemische Aufbau und das Verschleißverhalten der beiden Stähle sind trotz der annähernd gleichen Härte sehr unterschiedlich. Der Stahl 1.2343 bildet aufgrund seines hohen Kohlenstoffanteils von 0,37 % mehr Carbide in seiner kristallinen Struktur aus als der 1.2709 mit einem Kohlenstoffanteil von ≤ 0,03 % und weist deshalb ein besseres Verschleißverhalten auf.

Die beiden Schichtsysteme auf den Werkzeugeinsätzen aus 1.2343 stellen sich bei den Untersuchungen als gleichwertig dar. Sowohl die CrN- als auch die TiN-Schicht boten in allen kritischen Bereichen der Werkzeugoberfläche einen ausreichenden Schutz gegen den abrasiven Verschleiß bei der Formteilfüllung und den mechanischen Verschleiß beim Entformen der Bauteile. Nach 110 000 Zyklen wurden die Versuche eingestellt.

Beim Werkstoff 1.2709 konnte nur die CrN-Schicht den abrasiven Verschleiß bei der Formteilfüllung bis zu einer Schusszahl von 50 000 Zyklen verhindern. Im Bereich der Mantelfläche zeigte keine der beiden Schichten einen ausreichenden Schutz zum Erhalt der Struktur. Ein deutlicher Verschleiß war hier bereits nach wenigen Tausend Zyklen zu beobachten.

Die additiv gefertigten Kupfereinsätze sind wegen ihrer geringeren Härte ohne Beschichtung für die Verarbeitung von abrasiven Kunststoffformmassen nicht geeignet. Auch die beiden eingesetzten Dünnschichtsysteme CrN und TiN konnten hier keine Abhilfe leisten. An den Kupferkernen wurde daher eine weitere Schutzschicht getestet: die CNBV-Beschichtung (Chemisch Nickel, Typ: PlanoTek). Sie basiert auf einem Abscheideverfahren ohne äußeren elektrischen Strom, das aufgrund der beigefügten Hartstoffpartikel auch unter dem Begriff der Dispersionsabscheidung bekannt ist. Unter einer Chemisch-Nickel-Dispersionsabscheidung versteht man die Mitabscheidung oder Miteinlagerung von einem oder mehreren Feststoffen in die Nickel-Phosphor-Matrix, um so die Schichteigenschaften je nach Anwendungsbereich gezielt zu verändern. Die bei einer Belastungsdauer von 90 000 Zyk- →

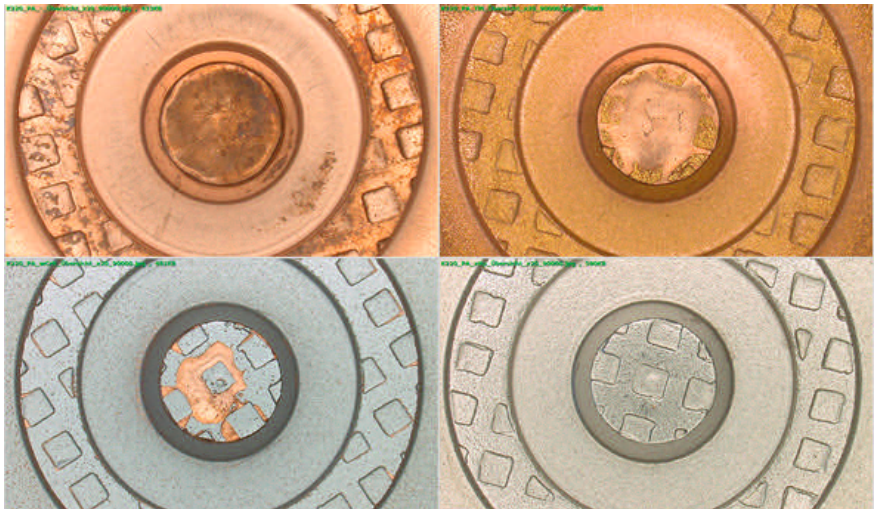

Bild 6. Erst die Chemisch-Nickel-Beschichtung bringt's. Werkzeugeinsätze aus Kupfer (K220) nach 90 000 Belastungszyklen im Bereich der Anspritzung: unbeschichtet (links oben), TiN-beschichtet (rechts oben), CrN-beschichtet (links unten) und CNBV-beschichtet (rechts unten)

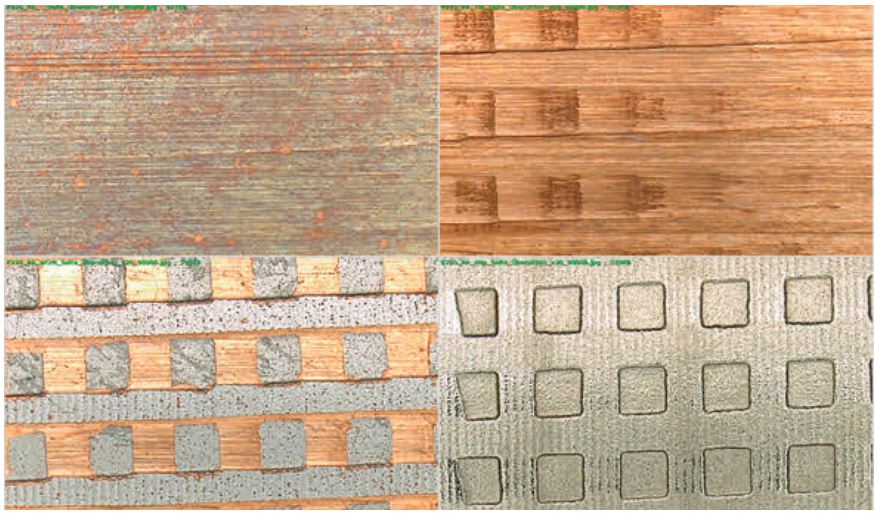

Bild 7. Werkzeugeinsätze aus Kupfer (K220) nach 90 000 Belastungszyklen im Bereich der Mantelfläche (Entformungsrichtung von links nach rechts): unbeschichtet (links oben), TiN-beschichtet (rechts oben), CrN-beschichtet (links unten) und CNBV-beschichtet (rechts unten)

Unternehmen/Institut	Projektanteil	Internet-Adresse
Das Kunststoff-Zentrum SKZ, Würzburg	Werkzeugkonstruktion, rheologische Simulation und Versuchsdurchführung (Projektkoordination)	www.skz.de
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen	Additive Fertigung bzw. Laser-Cusing	www.ilt.fraunhofer.de
Braun GmbH, Marktheidenfeld	Endanwender	www.pg.com
Otto Dunkel GmbH, Mühldorf	Endanwender	www.odu.de
GHD Präzisions-Formenbau GmbH & Co. KG, Großhabersdorf	Konventionelle Fertigung von Werkzeugeinsätzen	www.ghd-formenbau.de
Hofmann Werkzeugbau GmbH, Lichtenfels	Additive Fertigung bzw. Laser-Cusing, rheologische Simulation und Oberflächenfunktionalisierung	www.hofmann-innovation.com
Hohenloher Formstruktur GmbH & Co., Pfedelbach	Oberflächenfunktionalisierung	www.hohenloher-formstruktur.de
NovoPlan GmbH, Aalen	Oberflächenbeschichtung	www.novoplan.com
Oerlikon Balzers Coating GmbH, Bingen	Oberflächenbeschichtung	www.oerlikon.com
Schmelzmetall Deutschland GmbH, Steinfeld-Hausen	Lieferant für Basiswerkstoffe zur Herstellung konventioneller und additiv gefertigter Werkzeugeinsätze	www.schmelzmetall.com
Stehle Laserschweisstechnik, Villingen-Schwenningen	Reparaturschweißen additiv gefertigter Werkzeugeinsätze	www.stehle-laserschweissen.de
Woco Industrietechnik GmbH, Kronach	Endanwender	www.wocogroup.com

Tabelle 1. Zehn Industrieunternehmen und zwei Forschungsinstitute sind am Verbundprojekt „InnoSurface" beteiligt. Die Kompetenzen der Projektpartner umfassen die gesamte Prozesskette von der rheologische Simulation über die additive Fertigung bis zur Oberflächenfunktionalisierung

len erzielten Ergebnisse mit der CNBV-Beschichtung waren sehr vielversprechend **(Bild 6)**. Vor allem im Bereich der Entformungsbewegungen am Mantel konnte das Schichtsystem die geätzte Struktur ausreichend schützen **(Bild 7)**.

Erhöhte Ausbringrate

Bei den Untersuchungen wurden baugleiche konventionell gefertigte Werkzeugkerne aus unterschiedlichen Werkstoffen den additiv gefertigten Einsätzen mit der konturnahen Kühlung gegenübergestellt. Hierbei erfolgte eine Messung und Auswertung der Formteiloberflächentemperatur nach dem Entformen mittels der im SKZ entwickelten Inline-Thermographie. Die konturnahen Kühlkanäle der additiv gefertigten Einsätze liegen nur 1,65 mm **(Bild 8)** unterhalb der Formnestoberfläche, während die Bohrung der Nadelkühlung der konventionellen Kerne einen Abstand von 12 mm aufweist.

Die Ergebnisse verdeutlichen das hohe Potenzial einer additiv gefertigten, konturnahen Kühlung, die Ausbringrate im Vergleich zu den konventionellen Fertigungsverfahren und einem Nadelkühlsystem zu steigern. Die Entformungstemperaturen konnten bei gleicher Gesamtzykluszeit um bis zu 25,2 K gesenkt und bei gleicher Entformungstemperatur 38 % der Zykluszeit eingespart werden. Der Einsatz lasergesinterter Einsätze aus hoch wärmeleitfähigem Kupfer verbesserte die Temperierung im Vergleich zu den additiv gefertigten Kernen aus 1.2343 und 1.2709 kaum – bei der geringen Restwanddicke von 1,65 mm zwischen Formteiloberfläche und Kühlkanal treten die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Werkstoffe in den Hintergrund.

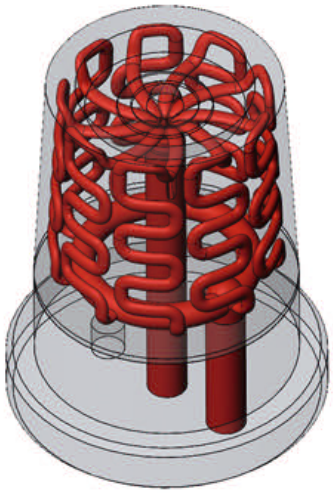

Bild 8. Die konturnahen Kühlkanäle der additiv gefertigten Werkzeugeinsätze liegen nur 1,65 mm unterhalb der Oberfläche

Fazit

Die additive Fertigungstechnik besitzt großes Potenzial, um Spritzgießprozesse effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten. Die Werkzeugkonstrukteure sind nicht mehr an die Einschränkungen der konventionellen Metallbearbeitungsverfahren wie z. B. das Bohren oder Fräsen gebunden und können somit eine konturnahe Formteiltemperierung realisieren. Der Verschleißschutz lässt sich durch geschickte Vorauswahl von Basiswerkstoff und Schichtsystem erheblich verbessern. ■

DANK

Das InnoNet-Vorhaben 16IN0587 der Forschungsvereinigung FSKZ e. V. wurde im Rahmen des Programms zur Förderung von innovativen Netzwerken (InnoNet) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung.

DIE AUTOREN

DIPL.-ING. (FH) BERNHARD HENNRICH, geb. 1984, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am SKZ; B.Hennrich@skz.de

PROF. DR.-ING. MARTIN BASTIAN, geb. 1966, ist Institutsdirektor des Kunststoff-Zentrums SKZ in Würzburg.

DR.-ING. PETER HEIDEMEYER, geb. 1959, ist Geschäftsführer des Bereichs Forschung und Entwicklung am SKZ.

© Carl Hanser Verlag, München