

Ölfiltergehäuse effizienter herstellen

Nutzung biomimetischer Prinzipien zur Optimierung der Bauteilkühlung beim Spritzgießen

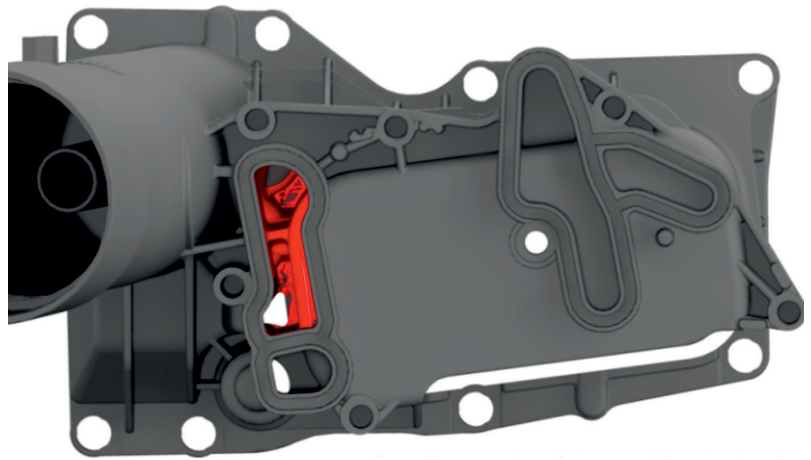
Komplexe Ölfiltergehäuse für Automobile werden häufig im Spritzgießverfahren hergestellt. Geometriebedingte Hotspots können die erforderliche Kühlzeit erheblich verlängern. Ein Team aus Österreich nahm Anleihen aus der Biologie: Ein biomimetisches Kühlkanalsystem ähnlich einer Blutgefäßstruktur wurde in einen Formeinsatz integriert, in der Simulation optimiert, mittels 3D-Druck hergestellt und erfolgreich im realen Spritzgießprozess getestet.

Eine homogene Werkzeugoberflächen-temperatur ist für die Qualität von Spritzgussteilen entscheidend. Sie beeinflusst nicht nur die Oberflächenqualität, die Maßhaltigkeit und das Verhalten unter Last, sondern auch die Wirtschaftlichkeit des Formgebungsprozesses. Beim Spritzgießen ist die Minimierung der Kühlzeit ein wesentlicher Schlüssel zur Kosteneffizienz.

In der einfachsten Variante besteht ein Spritzgießwerkzeug aus zwei Formhälften, mit Stahl-Formeinsätzen, die die Kavität ausbilden, und weiteren Werkzeugkomponenten. Diese Formhälften enthalten eine begrenzte Anzahl von Kühlkanälen – aus Fertigungsgründen oft abseits der Kavität –, durch die Kühlwasser gepumpt wird, um die Wärme aus dem Kunststoff über das Werkzeug in das Kühlwasser abzuführen. Bei Teilen mit einfacher Geometrie dominiert der Kunststoff aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit und der Wanddicke der Formteile die Kühlzeit. Bei komplex geformten Teilen, die tiefe Hohlräume enthalten, bestimmt dagegen auch der angrenzende Formeinsatz die Abkühlung, wenn dessen Querschnitt deutlich kleiner ist als die Kontaktfläche zum heißen Kunststoff.

Blutgefäßstruktur als Vorbild

Um diese Einschränkung zu überwinden, werden Formeinsatzmaterialien mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit als jener der Standardformenstähle verwendet. Diese Materialien, wie Aluminium- oder Kupferlegierungen, sind jedoch empfindlich gegenüber den thermomechanischen Belastungen beim Spritzgießen, die zudem die Anzahl und den Durchmesser der



Das untersuchte Gehäuse aus PA6-GF35. Die rot eingefärbten Bereiche zeigen Masseanhäufungen an, in denen die Wanddicke bis zu 11 mm erreicht © Mahle Filtersysteme

Kühlkanäle im Formeinsatz begrenzen können. Eine andere Lösung sind konturnahe Kühlkanäle in einem additiv hergestellten Formeinsatz; dieses Prinzip und dessen Optimierung sind bereits vielfach erforscht [1–8]. Die Ausführung und die Anzahl der Kühlkanäle können dabei durch den verfügbaren Platz in den Formeinsätzen begrenzt werden.

Der hier vorgestellte Ansatz sah vor, Lösungen für Kühlprobleme aus der Natur zu übernehmen: Innerhalb der biomimetischen Designs, wie sie z.B. in Blattadern [9], lamellaren oder porösen Strukturen [10] verwirklicht sind, erscheint eine Blutgefäßstruktur als sinnvollste Lösung. Diese Struktur verspricht eine gleichmäßigere Oberflächentemperatur, einen geringeren Strömungswiderstand für die Kühlflüssigkeit, weniger mechanisch geschwächte Substrate (Formeinsatz), einen einfachen Aufbau durch additive Fertigung mit Stahlpulver (Laser Powder Bed Fusion) sowie eine verbesserte Kühlung von Hotspots.

Bereits Hermann [11] entwickelte eine planare Blutgefäßstruktur zur Optimierung der Kühlung von Solarpanelen. Im hier diskutierten Fall war es Ziel, eine dreidimensionale Kühlkanalstruktur zur Abschwächung eines Hotspots bei der Herstellung eines komplex geformten Spritzgussbauteils zu entwickeln und in einem realen Fertigungsprozess zu erproben.

Anforderungen an den Formeinsatz und dessen Werkstoff

Gehäuse für Ölfiltersysteme weisen viele Bohrungen, Durchbrüche, Hinterschnitte und Wanddickenunterschiede in der 3D-geformten Bauteilgestalt auf. Dementsprechend muss das Spritzgießwerkzeug aus vielen (und teilweise zusätzlich bewegten) Formeinsätzen aus unterschiedlichen Werkstoffen aufgebaut werden. Insbesondere tiefe und enge Einschnitte im Ölfiltergehäuse erfordern lange und schlanke Formeinsätze. Wird deren Verhältnis zwischen der Oberfläche, die in

Kontakt mit dem Kunststoff steht, und der eigenen Querschnittsfläche zu groß, kann die Formeinsatzkühlung die vom Kunststoff übertragene Wärme nicht ausreichend rasch abführen. Daher werden Einsätze in Hotspot-Bereichen häufig aus hochwärmeleitfähigen Werkstoffen (zumeist Aluminium-, Kupfer- oder Kupfer-Beryllium-Legierungen) aufgebaut.

Diese hochwärmeleitfähigen Werkstoffe weisen jedoch nur eine eingeschränkte Korrosions- und Verschleißbeständigkeit gegenüber den bei Ölfilter-systemen oft verwendeten glasfaserverstärkten Kunststofftypen auf. In manchen Anwendungsfällen ist auch Hochglanzfähigkeit gefragt. Ein oder mehrere aus einem geeigneten Stahlpulver additiv gefertigte Formeinsätze, inklusive möglichst gleichmäßiger, konturnaher, wassertemperierter Kühlkanäle, könnten diese Aufgaben erfüllen.

Um dieses Eigenschaftsprofil bestmöglich zu erreichen, wurde eine spezielle X20Cr13-Legierung von der voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG, Kapfenberg/Österreich, zu feinem Pulver verdüst und dieses anschließend am Lehrstuhl Umformtechnik der Montanuniversität Leoben durch selektives Laserschmelzen (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) zu Probekörpern verarbeitet und nach der Wärmebehandlung verschiedenen Tests unterzogen. Parallel zum X20Cr13 wurden auch der für gedruckte Formeinsätze typische Werkstoff MS1 (entsprechend einem 1.2709) in LPBF-gedruckter Form, ein konventionell hergestellter Werkzeugstahl 1.2709 und ein Produkt des Typs Böhler M333 Isoplast untersucht; letzterer ist ein verschleiß- und

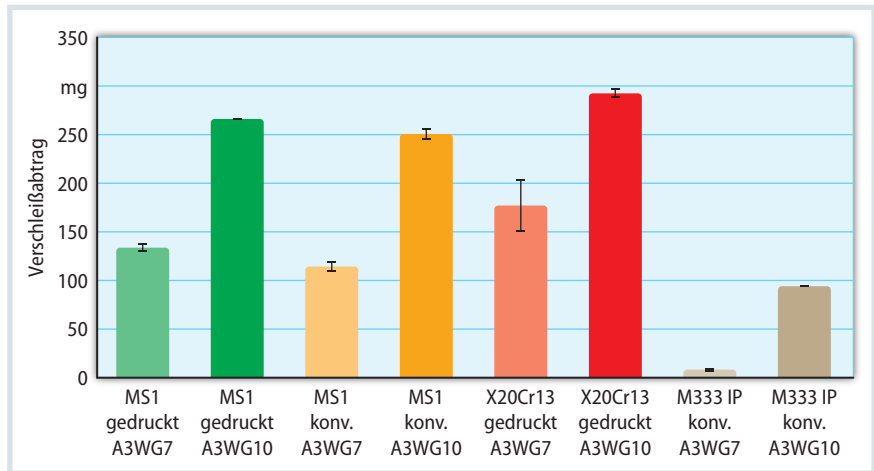


Bild 1. Im praxisnahen beschleunigten Verschleißversuch reagiert der gedruckte X20Cr13 nur etwas schlechter als der gedruckte MS1 auf die PA66-Schmelze (Typ: Ultramid A3W) mit 35% (G7) bzw. 50% (G10) Glasfaseranteil unter einem Schmelzedruck bis 2000 bar und mit maximalen Scherraten über $100\,000\text{ s}^{-1}$ Quelle: Montanuniversität Leoben; Grafik: © Hanser

korrosionsbeständiger und hochglanzfähiger Kunststoffformenstahl.

Tests mit Probekörpern

Wie erwartet, zeigten sowohl der MS1 als auch der X20Cr13 in der gedruckten Variante eine sehr gute Polierbarkeit, gekennzeichnet durch wenige Punktdefekte oder Riefen und eine scharfe Abbildung von Kanten im Spiegelbild. Im relevanten Temperaturbereich von 25 bis 200 °C liegt die mit der „Transient Plane Source“-Methode (Hot Disk TPS 2500 S Thermal Constants Analyzer) gemessene Wärmeleitfähigkeit

- des gedruckten X20Cr13 zwischen 21 und 24 W/m-K,
- jene des gedruckten MS1 zwischen 21 und 25 W/m-K und

- jene des konventionellen M333 Isoplast zwischen 23 und 25 W/m-K.
- Die maximale Härte des gedruckten chromlegierten X20Cr13 betrug nur etwa 45 HRC (Rockwellhärte) im Vergleich zum M333 Isoplast mit 49,2 HRC und zum MS1 mit 55,5 HRC in der gedruckten bzw. 54,7 HRC in der konventionellen Variante des 1.2709.

Im praxisnahen beschleunigten Labor-Verschleißprüfstand an der Montanuniversität Leoben [12] zeigte der gedruckte X20Cr13 einen etwas höheren Verschleißabtrag als der gedruckte MS1 (**Bild 1**). Bei diesem in ein Spritzgießwerkzeug integrierten Verschleißtest wird PA66-Schmelze mit 35% (G7) oder 50% (G10) Glasfaseranteil durch einen engen Spalt mit 0,5 mm Höhe gepresst. Der Verschleißspalt wird durch plättchenförmige (Stahl-)Probekörper gebildet, deren Gewichtsverlust durch Verschleißabtrag als inverses Maß für die Verschleißbeständigkeit gewertet kann. Hohe Schmelzedrücke bis zu 2000 bar und Scherraten weit jenseits der $100\,000\text{ s}^{-1}$ beschleunigen den Verschleiß, sodass bereits nach 50 kg Kunststoff verlässliche Abtragswerte bestimmt werden können. Eindrucksvoll zeigt der deutlich höhere Verschleißabtrag beim konventionellen DIN 1.2709 im Vergleich zum M333 Isoplast, dass nicht die Härte allein die Verschleißbeständigkeit bestimmt.

Für die Validierung in der Praxis wurde daher der ausgewählte Formeinsatz sowohl aus MS1 als auch aus X20Cr13 im LPBF-Verfahren gedruckt. Bereits zu- ➤



Bild 2. Das Design des Kühlsystems im Formeinsatz mit (v.l.n.r.) zwei Kupferstiften, einem konturfolgenden Kühlkanal oder einer blutgefäßähnlichen Kanalstruktur [13] © Montanuniversität Leoben

Die Autoren

Univ.-Prof. Dr. Gerald Berger-Weber ist seit 1. Oktober 2021 Professor für Polymer Processing and Digital Transformation an der Johannes Kepler Universität Linz (JKU). Er habilitierte sich 2018 an der Montanuniversität Leoben für das Fachgebiet Kunststoffverarbeitung; gerald.berger-weber@jku.at

David Zorn, BSc, untersucht in seiner Masterarbeit am Lehrstuhl Spritzgießen von Kunststoffen der Montanuniversität Leoben (MUL-SGK) unterschiedliche Konzepte der Kühlung von Formeinsätzen.

DI David Zidar ist seit 2018 Universitätsassistent am MUL-SGK und widmet sich in seiner Dissertation der praxisnahen Untersuchung und Simulation des Verschleißverhaltens durch gefüllte Kunststoffe an Werkstoffen für Spritzgießwerkzeuge.

Ing. Franz Bevc ist seit 1991 bei der Mahle Filtersysteme Austria GmbH, St. Michael ob Bleiburg/Österreich. Er ist verantwortlich für den Bereich Prozesstechnologie in der Kunststoffverarbeitung im Werk und Mitglied im GTC-Team (Global Technology Coordination) für das Spritzgießen.

Dank

Teile dieses Beitrags basieren auf Arbeiten im Rahmen des Tasks 4.2 „SLM-Einsätze für Spritzgießformen“ im FFG-Leitprojekt addmanu (www.addmanu.at). Die Autoren danken der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und dem österreichischen Ministerium für Transport, Innovation und Technologie (BMVIT) sowie den Partnern Mahle Filtersysteme Austria GmbH, pkt Präzisionskunststofftechnik Bürtlmair Ges.m.b.H, voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH sowie insbesondere Dr. Gerhard Panzl und Prof. Bruno Buchmayr (†), beide ehemals Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben.

Service

Literatur & Digitalversion

➤ Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/onlinearchiv

vor wurde eine Simulationskette zur virtuellen Optimierung des Kühlkanaldesigns und der Prozessparameter aufgebaut.

Entwicklung des Kühlkanaldesigns

Als Testobjekt wurde ein komplex geformtes Gehäuse für ein Ölfiltersystem aus PA6-GF35 (**Titelbild**) ausgewählt, das tiefe Hohlräume und nach einer Designänderung im Zentrum eine lokale Wanddicke von 11 mm aufwies. Diese Kombination verursachte im Serienbetrieb einen Hotspot, der trotz eines unmittelbar benachbarten wärmeleitfähigen Formeinsatzes die Zykluszeit erheblich verlängerte.

Die Hauptabmessungen dieses Formeinsatzes betragen 100 x 59 x 25 mm. Die ursprüngliche Serienlösung (**Bild 2 links**) besteht aus einer marktüblichen Kupferlegierung (mit einer Wärmeleitfähigkeit von 106 W/m·K und einer Rockwellhärte von 33 HRC), in die zusätzlich zwei Kupferstifte eingepresst wurden, um die Wärme noch rascher nach außen zu leiten. Ein wassergefluteter Kanal umgibt die freien Enden der Stifte. Eine direkte Kühlung mit gebohrten Kühlkanälen war baubedingt unmöglich.

Eine Variante des Formeinsatzes mit einem einzigen konturnahen Kanal von 2,5 mm Durchmesser und 445 mm Länge, der direkt durch einen Wasserstrom gekühlt wird, wurde lediglich virtuell untersucht (**Bild 2 Mitte**). In dem auch real umgesetzten Kühlkanaldesign mit der blutgefäßähnlichen Struktur verzweigt sich die Hauptarterie in zwei Subarterien, die sich wiederum in je zwei Kapillaren aufspalten (**Bild 2 rechts**). Die Kapillaren münden in zwei Subvenen und diese schließlich wieder in die Hauptvene. Den dabei angewandten Designregeln gemäß (**Bild 3**) weisen die Gefäßunterabschnitte die gleiche spezifische Länge auf. Die kürzestmögliche Strecke durch den Kanal beträgt 480 mm.

Virtuelle Evaluierung des Temperierernetzes

Der Mindestabstand zwischen Kühlkanal und Oberfläche wurde aus Sicherheitsgründen bei beiden Varianten mit 1,5 mm festgelegt. Diese minimale Wanddicke könnte den Formeinsatz noch immer empfindlich gegen ein Durchbrechen

der Kunststoffschmelze unter Spritzdruck machen. Um die mechanische Stabilität abzuschätzen, wurde mit dem Softwaremodul Cadmould Structural Essential (Anbieter: simcon kunststofftechnische Software GmbH, Würselen) eine einfache statische linearelastische strukturmechanische Simulation an der Blutgefäßvariante durchgeführt. MS1 (entsprechend 1.2709) weist eine Zugfestigkeit von ca. 1200 N/mm² im gedruckten und ca. 2040 N/mm² im gehärteten und anschließend ausgelagerten Zustand auf [14]. Selbst unter Annahme eines am Formeinsatz wirksamen Spritzdrucks von 1500 bar beträgt die berechnete Von-Mises-Vergleichsspannung im kritischsten Bereich maximal 450 MPa [15]. Die dauerhafte Beständigkeit dieses Designs gegenüber Verformungen durch den Kunststoff unter Spritzdruck lässt sich somit annehmen. Die thermische Simulation erfolgte mit Sigmasoft (Anbieter: Sigma Engineering GmbH, Aachen).

Als der reale Serienprozess inklusive des komplexen Werkzeugaufbaus mit elf verschiedenen per Impulskühlung wassertemperierten Kühlkanälen und den eingestellten Prozessbedingungen nachgebildet war, erfolgte ein Parameter-tuning der Softwareeinstellungen mit dem Ziel, dass die simulierte Oberflächentemperatur des Bauteils nach dem Entformen mit der aus Thermografiemessungen bekannten realen Temperatur übereinstimmt. Danach wurden die alternativen Kühlsysteme entwickelt und virtuell optimiert.

Die Simulation erlaubt neben kostengünstigen Parameterstudien auch die Evaluierung von Randbedingungen, die eigentlich (noch) nicht realisiert werden können. Deshalb wurde im Rahmen eines zweistufigen vollfaktoriellen Versuchsplans neben den Kühlsystemvarianten auch der Einfluss sowohl der Wärmeleitfähigkeit des Formeinsatzmaterials als auch des Kunststoffs auf die Bauteilabkühlung evaluiert. Dabei ergaben sich, wie erwartet, folgende Befunde:

- Beide konturnahen Kühlkanalsysteme zeigen trotz des Stahlkörpers eine wesentlich höhere Kühleffizienz als der hochwärmeleitfähige Formeinsatz der Serienvariante – zusätzlich zur größeren Homogenität der Kühlung über die gesamte Kavitätsoberfläche reduziert die Blutgefäßstruktur die maximale Kerntemperatur im Hotspot am

Zyklusende bei konstanter Zykluszeit um 4,7 K im Vergleich zum konturnahen Kanal und um 7,0 K im Vergleich zur Kupferstiftlösung.

- Könnte man die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffs (ohne Änderung seiner weiteren Materialeigenschaften) von 0,27 auf 0,40 W/m·K erhöhen, würde sich die maximale Kerntemperatur im Hotspot am Zyklusende bei konstanter Zykluszeit um 15 K reduzieren.
- Der Wärmestrom zu den Kühlkanälen wird mit steigender Wärmeleitfähigkeit des Formeinsatzes erhöht. Ein Werkstoffwechsel des gedruckten biomimetischen Formeinsatzes von Stahl auf die CuBe-Legierung würde die Hotspot-Temperatur lediglich um 2,0 K reduzieren; eine reale Umsetzung wäre selbst bei technischer Machbarkeit nicht gerechtfertigt.

Die beiden konturnahen Kühlsysteme sind in ihrer Kühlwirkung derart effizient, dass sogar die Impulszeiten für die Wasserkühlung reduziert werden müssen, um eine für den gewählten Kunststoff unzulässig niedrige Werkzeugoberflächentemperatur während der Füllphase zu vermeiden. Ferner könnte der Volumenstrom des Kühlwassers von 11 auf 2 l/min reduziert werden. Der berechnete Druckverlust beläuft sich dabei auf 6,1 bar für das Blutgefäßsystem bzw. 7,5 bar für den einfachen konturnahen Kühlkanal.

Insgesamt lässt die Verwendung des biomimetischen Designs in einem gedruckten Formeinsatz aus X20Cr13-Stahl auf eine Verkürzung der Zykluszeit von 73 auf 63 s hoffen, weil die zulässige Entformungstemperatur früher erreicht würde.

Validierung im realen Spritzgießprozess

Die Blutgefäßstruktur wurde mittels Laser Powder Bed Fusion in gedruckte Formeinsätze aus MS1 und X20Cr13 integriert. Nach Wärmebehandlung und Oberflächenbearbeitung wurden beide Formeinsätze in das Spritzgießwerkzeug eingebaut und unter Serienprozessbedingungen getestet. Wo in den Thermografiebildern zuvor der Hotspot zu erkennen war, zeigt sich nun ein eindeutiger Effekt (Bild 4): Die 10 s nach der Entformung aufgenommene Oberflächentemperatur der Spritzgussteile sinkt über dem Hotspot von ursprünglich 211 °C auf 180 °C (MS1) bzw. auf 174 °C (X20Cr13).

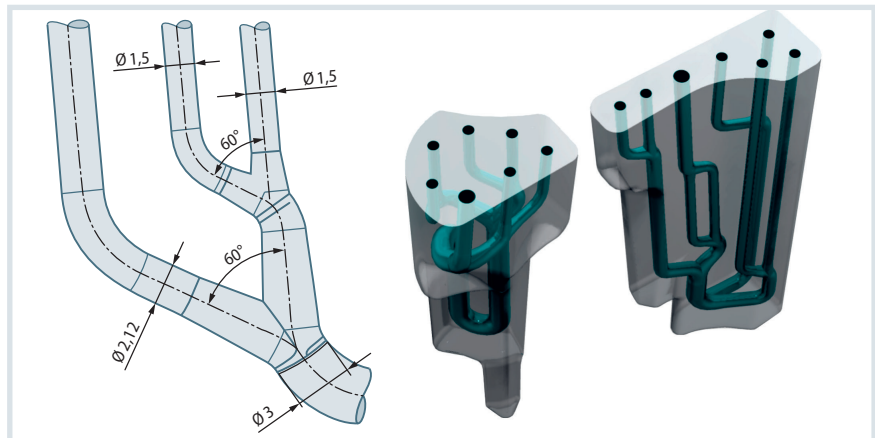


Bild 3. Die Designregeln für die Blutgefäßstruktur ermöglichen einen ausbalancierten Kühlmittelfluss. Quelle: Rapid.Tech – International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing; Grafik: © Hanser

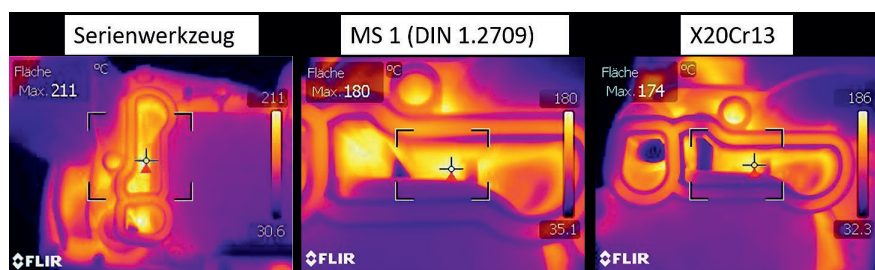


Bild 4. Thermografieaufnahmen der Spritzteiloberfläche 10 s nach der Entformung. Bauteilherstellung in der Serienvariante (links) sowie mit additiv gefertigtem Stahlformeinsatz mit innerer blutgefäßähnlicher Kühlstruktur aus MS1 (Mitte) bzw. aus X20Cr13 (rechts) © Montanuniversität Leoben

Allerdings steigt die Oberflächentemperatur des Bauteils außerhalb des vom Kanalgeflecht gekühlten Bereichs an. Der Grund dafür ist einfach – aber konstruktionsbedingt nicht mehr zu ändern: Die Kühlung des optimierten Formeinsatzes ist mit jener der benachbarten Formeinsätze in Serie geschaltet. Der für die Blutgefäßstruktur ausreichende Volumenstrom von 2 l/min ist zu gering, um die benachbarten konventionell temperierten Formeinsätze effizient zu kühlen. Ein höherer Volumenstrom würde allerdings den Druckverlust in der Blutgefäßstruktur drastisch erhöhen und somit den maximalen Pumpendruck des Temperiergeräts rasch überschreiten.

Fazit

Die biomimetische Übertragung biologischer Temperierstrukturen auf technische Anwendungen erscheint insgesamt vielversprechend. Die laufenden Fortschritte in der additiven Fertigung werden helfen, diese Strukturen effizient zu bauen. Allerdings müssen dabei einige Einschränkungen berücksichtigt werden. So sind kon-

turnahe Kühlungen in additiv gefertigten Stahl-Formeinsätzen besonders dann sinnvoll, wenn die Eingriffstiefe eines schlanken Formeinsatzes in das Bauteil groß ist und die Kanäle bauraumbedingt trotzdem nah an der Außenhaut des Formeinsatzes platziert werden können. Ist die Eingriffstiefe und somit die gemeinsame Kontaktfläche gering und können die konturnahen Kühlkanäle weit entfernte, schmale Formeinsatzfinger nicht erreichen, so ist hoch wärmeleitfähigen Werkstoffen weiterhin der Vorzug zu geben.

Eine zusätzliche Herausforderung für sehr feine im LPBF-Verfahren gefertigte Kühlkanäle ist die Verkalkungsgefahr durch ungefiltertes Kühlwasser. Dagegen können Kühlwasseraufbereitung, spezielle Vorfilter und eine antiadhäsive Innenbeschichtung der Kühlkanäle helfen. Sollen biomimetische Kühlstrukturen bei Neuentwicklungen eingesetzt werden, so müssen die für die Bauteilabkühlung kritischen Formeinsätze eine eigene, getrennte Kühlmittelversorgung erhalten. Diese lassen sich mittels Simulation vorab identifizieren. ■