

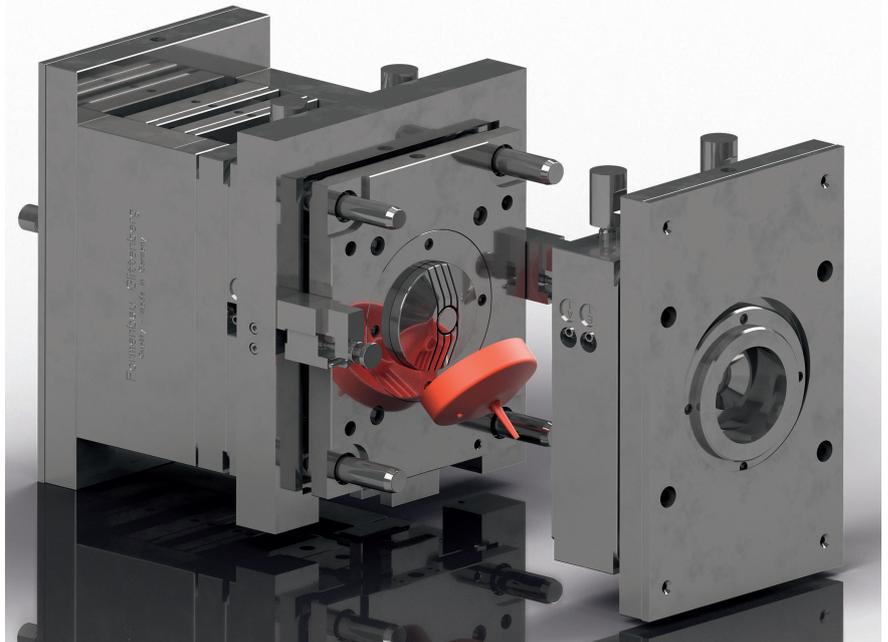
Filigrane Kanäle, maximale Effizienz

Konturnahe Kühlung mit Konstruktions-, Simulations- und Verarbeitungs-Know-how verbessern

Die Herstellkosten für komplexe Spritzgießbauteile hängen neben den Materialkosten stark von der Zykluszeit ab. Sie setzt sich aus Einspritzen, Nachdrücken und (Rest-)Kühlen zusammen. Die Kühlphase nimmt, je nach Kunststoff und Bauteil, 60 bis 90 % der Zykluszeit in Anspruch. Eine adäquate Kühlung kann daher nicht nur die Abkühlzeit, sondern auch die Zykluszeit verkürzen.

Klassischerweise werden Kühlkanäle kostengünstig durch gerade Bohrungen in das Werkzeug eingebracht. Bei komplexen Bauteilgeometrien kann dadurch aber kein einheitlicher Abstand zur Oberfläche der Bauteilkavität mehr eingehalten werden. Das führt zu einer inhomogenen Temperaturverteilung in der Formteilkavität. Idealerweise sollte die Kühlung der Bauteilgeometrie konturnah angepasst sein. Mit additiven Fertigungsverfahren ist dies möglich, es können komplexe Kühlkanalgeometrien realisiert und die Abkühlzeit verkürzt werden. Dadurch steigen Produktivität und Energieeffizienz, die Herstellkosten sinken. Auch die Formteilqualität kann durch eine homogenere Temperaturableitung verbessert werden.

Eine konturnahe Kühlung benötigt im Vergleich zu herkömmlichen Kühlkanälen aber deutlich mehr Aufwand – angefangen bei der Entwicklung des Kühlkanaldesigns über notwendige Vorabsimulationen bis hin zur Herstellung des Werkzeugs. Aufgrund der Komplexität kooperierten in dieser Fragestellung während der letzten beiden Jahre die BASF SE, Ludwigshafen, und die Firma Autodesk Inc., San Francisco, Kalifornien/USA. Dabei brachte die BASF ihre langjährige Expertise im Bereich Kunststoffverarbeitung [1] sowie in der Berechnung [2, 3] ein. Der Software-Hersteller Autodesk wiederum nutzte seine Expertise im CAD-Programm Autodesk Inventor sowie in der Spritzgieß-Simulationssoftware Autodesk Moldflow im Projekt. Anhand eines Testbauteils untersuchten



Mit diesem Werkzeug wurden die maximalen Zykluszeiten ermittelt (Rendering) © BASF

die Partner das Verfahren Schritt für Schritt, um es für die gemeinsamen Kunden zugänglich zu machen.

Konstruktion und Simulation der konturnahen Kühlung

Das **Titelbild** zeigt das Werkzeug, das bei der BASF für die Bestimmung der Kühlzeiten ihrer Thermoplaste eingesetzt wird. Durch die eng nebeneinander angeordneten Rippen ohne Entformungsschragen wird das Auswerfen des Testbauteils absichtlich erschwert. So gelingt es, Unterschiede in den minimalen Zykluszeiten der verschiedenen Mate-

rialien klar herauszuarbeiten. Aufgrund jahrzehntelanger Erfahrung mit diesem Werkzeug wurde es gemeinsam mit Autodesk ausgewählt, um daran etwaige Verbesserungen in der Zykluszeit durch ein konturnahes Kühlkonzept direkt messen zu können. Das herkömmliche Kühlkonzept setzt auf Steigbohrungen mit Trennblechen im Kern, welche allerdings nicht zwischen die feine Rippenstruktur im Inneren des Bauteils reichen (**Bild 1**). Der Abstand zwischen den Rippen beträgt nur 6 mm, was zu eng für klassische Kühlkanäle mit einem typischen Durchmesser von 6 bis 10 mm ist. Bei konventioneller Kühlung enden die

Steigbohrungen daher etwa 5 mm unterhalb der Rippen. Um zu überprüfen, wie sich dies auf die Kühlung auswirkt, wurde mit Autodesk Moldflow der Spritzgießzyklus simuliert. Dazu wurden Bauteil und Kühlkanäle als 3D-Modell vernetzt und eine Cool-FEM-Analyse angewendet. Die Ergebnisse zeigen klar, dass zwischen den Rippen die höchsten Temperaturen auftreten (**Bild 2**). 14,5 s nach der Einspritzung von ungefülltem Polyamid 66 (Ultramid A3K) ist die Werkzeug-Oberflächentemperatur in diesem Bereich beispielsweise noch mehr als 70 K heißer als in der gut gekühlten Außenfläche.

Um die Zykluszeit zu verkürzen, sollten die Bereiche im Kern zwischen den Rippen besser gekühlt werden. Die gegenüberliegende Gesenk-Seite ist dagegen unkritisch. Hier funktioniert eine klassische Kühlung aufgrund der weitgehend ebenen Oberfläche gut. Autodesk entwarf daher für den Kern verschiedene konturnahe Kühlkonzepte, basierend auf additiver Fertigung. All diese Konzepte wurden simulativ mit der Software Moldflow überprüft, um sicherzustellen, dass ein adäquater Wasserfluss gewährleistet und die angestrebte verbesserte Temperaturentwicklung zwischen den Rippen erreicht werden kann. Die zunächst angedachten helix- und fächerartigen Strukturen wurden schnell wieder verworfen, da der Druckverlust des Wassers hier zu groß bzw. die Strömung insgesamt zu ungleichmäßig wurde. Nach insgesamt 15 Konstruktions-Iterationen für den konturnahen Kühlkanal im Kern wurde schlussendlich eine Konstruktion gefunden: Sie besteht aus einem einzigen Kühlkreislauf, der durch die Zwischenräume der Rippen geführt wird (**Bild 1**) und sich auch für die additive Fertigung eignet. Mit diesem Konzept kann die Temperatur zwischen den Rippen um bis zu 70 K reduziert werden, was die Zykluszeit laut Simulation je nach Material um 10 bis 20 % verkürzt.

Um zu überprüfen, ob die Restwandstärke des Werkzeugkerns zwischen den Rippen, die in einigen Bereichen nur noch 1,9 mm beträgt, auch den hohen Drücken während des Spritzgießens standhält, wurde eine finale mechanische FEM-Analyse mit Abaqus durchgeführt. Die ermittelten Spannungs- und Verformungswerte stellten sich aber als unkri-

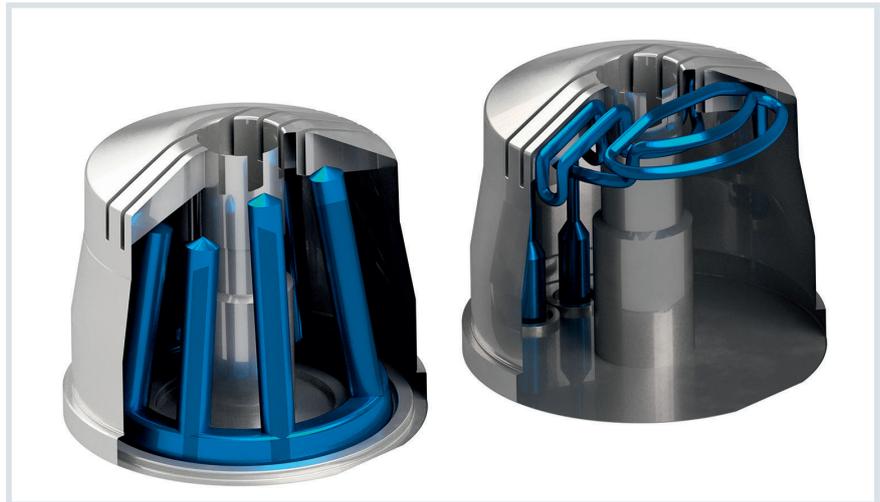


Bild 1. Werkzeugeinsätze mit gerade gebohrten, konventionellen (links) und additiv gefertigten, konturnahen (rechts) Kühlkanälen (© BASF)

tisch heraus. Somit waren simulativ alle Fragestellungen geklärt, um den Kern herstellen zu können.

Herstellung des additiv gefertigten Kerns

Bedingt durch das vorhandene Werkzeug ist der Kern, der die Innenkontur des Bauteils abbildet, vergleichsweise lang, weshalb sich ein hybrides, zweistufiges Herstellungsverfahren anbietet. Zwei Drittel des Kerns können mit herkömmlichen Verfahren wie Drehen, Bohren, Fräsen und Schleifen hergestellt werden, da nur gerade Bohrungen für den Ein- und Auslass des Kühlkanals sowie Nuten für die Abdichtung anzubringen sind. Das letzte

Drittel wird auf dem vorgefertigten Rohling additiv durch selektives Lasersintern (SLS) aufgebaut. Bauzeit und Herstellkosten verringern sich durch das hybride Verfahren deutlich.

Nach Ausrichten des Rohlings in einer Fertigungsanlage Matsuura Lumex beginnt das additive Fertigungsverfahren mit einer Entmagnetisierung. Anschließend wird das Pulver schichtweise aufgebracht und per Laser gesintert. Die Kühlkanäle besitzen zwischen den Rippen eine elliptische Form, um einen möglichst großen Querschnitt zu realisieren und trotzdem noch eine ausreichende Restwanddicke zu behalten. Fertigungstechnisch bedingt sind die Kanäle auch in übrigen Bereichen nicht »

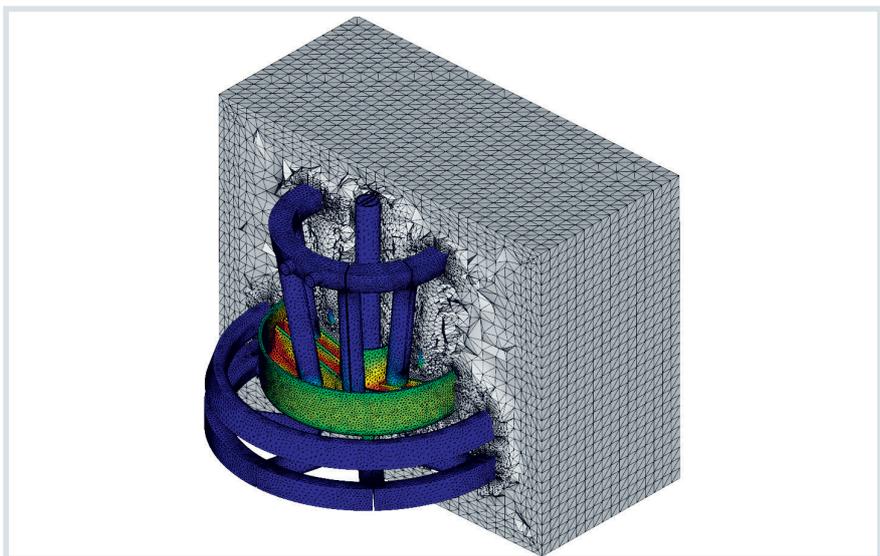


Bild 2. Temperaturentwicklung im Bauteil für das konventionelle Kühlkonzept, simuliert mit Autodesk Moldflow (© BASF)

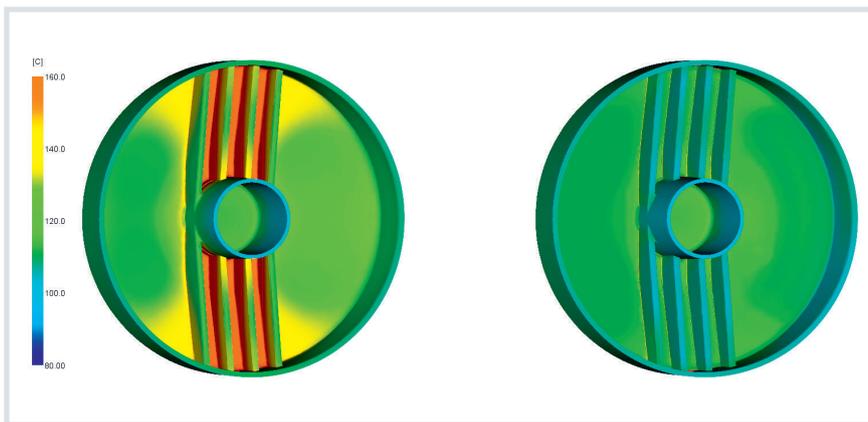
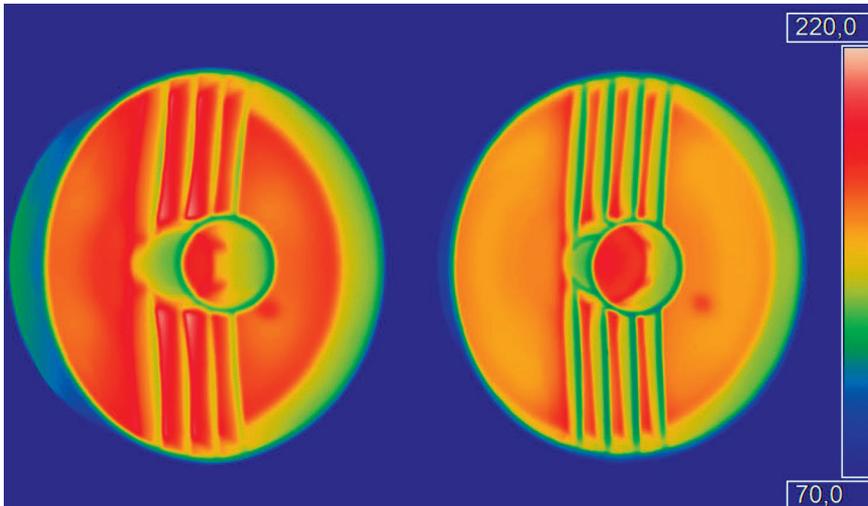


Bild 3. Formteiltontemperaturen (oben), aufgenommen mit einer IR-Kamera direkt nach der Entformung, und Werkzeug- sowie Formteiloberflächentemperaturen (unten) in der Abkühlphase (14,5 s nach Einspritzen) bei konventioneller (links) und konturnaher Kühlung (rechts) (© BASF)

Die Fertigungsanlage von Matsuura kann neben dem Aufbau des Bauteils im SLS-Verfahren dieses in der vorhandenen Aufspannung endkonturnah mit Oberflächenrauigkeiten von $0,4 \mu\text{m}$ in Hochgeschwindigkeit fräsen. Die Endbearbeitung des gesamten Kerns erfolgte durch Fräsen, Drehen und Bohren sowie dem Polieren der formgebenden Oberfläche. Am Ende fand eine Wärmebehandlung statt, um die Härte zu erhöhen.

Zykluszeit-Messung an den Formteilen

Die durchgeführten Verarbeitungsversuche sollen aufzeigen, ob eine konturnaher Kühlung hinsichtlich Qualität der Formteile und Zykluszeitverbesserungen bringen kann. Das Spritzgießwerkzeug bietet die Möglichkeit, Kerne mit unterschiedlicher Kühlung einzubauen.

Bild 3 zeigt die Temperaturen der Formteile direkt nach der Entformung, gemessen mit einer Infrarot-Kamera. Mit konturnaher Kühlung (rechts) ist das gesamte Bauteil bereits deutlich stärker abgekühlt. Der konventionell gekühlte Kern heizt sich bei kurzen Zykluszeiten zwischen den Rippen um 70 K auf, der andere Kern dagegen nur um 10 bis 20 K (**Bild 3**, unten, **Tabelle 1**). Der getrennt gekühlte innere Dorn, auf den die eingespritzte Schmelze direkt trifft, ist in beiden Fällen etwa 20 bis 30 K wärmer als die Solltemperatur. Simulation und Experiment stimmen qualitativ und quantitativ gut überein, die kritischen Werkzeugbereiche mit sehr hohen Temperaturspitzen wurden gut vorhergesagt.

Durch das Auswerfen nur über den Außenrand wird das Formteil stark me-

kreisrund, sondern haben eine tropfenförmige Kontur. Dadurch ist kein Stützmaterial notwendig. Wichtig für die Auslegung des Kühlkanalverlaufs ist auch, dass nicht aufgeschmolzenes Metallpulver im Nachgang entfernt werden kann.



Bild 4. Formteil, links bei ausreichend langer Kühlzeit, rechts bei zu geringer Kühlzeit (© BASF)

Die Autoren

Andreas Wonisch, Reinhard Jakobi, Leonhard Ullrich und **Sebastian Gries**

sind bei der BASF SE, Ludwigshafen, tätig; andreas.wonisch@basf.com; reinhard.jakobi@basf.com

Chris Jones und **Mark Hennebicque** arbeiten für Autodesk Inc., San Francisco/Kalifornien/USA

Service

Literatur und Digitalversion

➤ Ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2019-09

English Version

➤ Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

chanisch beansprucht und deformiert. Wenn es ausreichend abgekühlt ist, besitzt es die notwendige Steifigkeit und Festigkeit zur Aufnahme dieser Kräfte. Die Verformung ist dann nahezu reversibel. Ist das Formteil allerdings noch nicht ausreichend abgekühlt, treten Schädigungen wie Weißbruch oder Risse und plastische Deformationen auf, die sich nicht wieder zurückstellen (Bild 4).

Optische Mängel sind aber nicht ohne Weiteres maschinell erfassbar. Als Kriterien für die Schädigung des Formteils beim Entformen wurden daher neben der visuellen Beurteilung ein mechanischer Belastungstest, die Messung der bleibenden Deformation sowie die im Werkzeug integrierte Verzögerungszeitmessmethode herangezogen. Im mechanischen Belastungstest zeigten die Probekörper unabhängig vom Material und des „Schädigungszustandes“ nach Entformung keine auswertbaren Unterschiede. Selbst Proben, die visuell erkennbar starke Schäden aufwiesen, ertrugen gleich hohe Kräfte bei nahezu gleichen Verformungswegen.

Die minimale Zykluszeit ist mit beiden Verfahren exakt bestimmbar

Die Höhe des Formteils als Maß für die plastische Deformation darf erst nach einer ausreichend langen Abkühlphase gemessen werden. Ansonsten verfälscht die Wärmeausdehnung des Materials das Ergebnis. Direkt bei der Entformung kann man das Auftreten einer plastischen Deformation bereits mithilfe einer optischen Lichtschranke und eines Kontaktgebers nachweisen, welche die Zeitdifferenz zwischen dem Start der Auswerferbewegung und dem Lösen des Formteils vom inneren Dorn erfassen [4]. Viele Vergleichsversuche haben gezeigt, dass die minimale Zykluszeit mit beiden Verfahren exakt bestimmt werden kann. Die Kurven verlaufen zwar unterschiedlich, die wesentlichen Grenzen, die die extreme Deformation beschreiben, stimmen aber überein.

In **Tabelle 1** sind die minimalen Zykluszeiten exemplarisch für ein Formteil aus einem unverstärkten PA 66 (Ultramid A3K) aufgelistet. Unabhängig vom angewendeten Kriterium ist eine Reduzierung der Zykluszeit um etwa 25 % bei diesem Formteil mit konturnaher Kühlung möglich und liegt damit sogar etwas höher als simulativ vorhergesagt.

Zusammenfassung und Ausblick

Autodesk und BASF haben gemeinsam die Vor- und Nachteile konturnaher Kühlkonzepte herausgearbeitet. Für ein BASF-Werkzeug wurde mithilfe umfangreicher Moldflow-Simulationen beider Kooperationspartner ein konturnahes Kühlkonzept entwickelt und der dazu gehörige Werkzeugern additiv gefertigt. Die von der BASF im Spritzgieß-Technikum durchgeführten Versuche am Testbauteil zeigen, dass eine konturnaher Kühlung deutliche Vorteile hinsichtlich der Zykluszeit bietet. Außerdem ist eine Verzugsreduktion möglich, die mit der verwendeten Bauteilgeometrie aber nicht überprüft werden konnte.

Additiv gefertigte Werkzeugeinsätze werden sich im starken Wettbewerbs-

Werkzeug-Solltemperatur: 100 °C	Konventionelle Kühlung	Konturnaher Kühlung
Temperatur zwischen den Rippen T_{rib}	171 °C	108 °C
Temperatur des inneren Dorns T_c	128 °C	125 °C
Minimale Zykluszeit (Deformation)	21,7s	15,5s
Minimale Zykluszeit (Schaden)	23s	17s

Tabelle 1. Experimentell ermittelte Temperaturen und Zykluszeiten im Vergleich am Beispiel von Ultramid A3K (Quelle: BASF)

druck nur durchsetzen, wenn die Vorteile während der Nutzung gegenüber den höheren Kosten überwiegen. Während die zusätzlichen Herstellkosten für die Werkzeugeinsätze in der Regel überschaubar sind, ist vor allem der deutlich höhere Entwicklungsaufwand nicht zu unterschätzen. Wie am vorliegenden Beispiel gezeigt wurde, waren viele Simulations- und Konstruktionsschleifen notwendig, bis der konturnaher Kühlung-Einsatz gefertigt werden konnte. In Zukunft gilt es deshalb vorrangig, diese Entwicklungszeiten und -kosten zu senken, etwa durch automatisierte Optimierungs-Algorithmen. Das Potenzial der konturnaher Kühlung ist auf jeden Fall sehr groß und könnte das Spritzgießen langfristig effizienter machen. ■

