

Kühlen mit dem Wärmerohr

Strukturintegrierte Heatpipe-Werkzeugkerne reduzieren Energieverbrauch und Zykluszeit

Beim Spritzgießen technischer Kunststoffe erfordert die Temperierung von Werkzeugen mehr als ein Drittel des gesamten Energieaufwands. Energie für die Werkzeugtemperierung ist somit ein kontinuierlicher Hauptkostenfaktor, der sich eigenen Berechnungen der Autoren zufolge im Jahr 2019 in Deutschland industrieweit auf ca. 1,1 Mrd. EUR summierte. Eine neuartige Technologie bietet die Chance, diesen Betrag zu reduzieren – und Hotspots zu eliminieren.

Der Markt für die Verarbeitung technischer Kunststoffteile ist ebenso groß wie lukrativ. Die Produktionsmenge belief sich im Jahr 2019 in Deutschland auf 3,3 Mio. t, entsprechend einem Umsatz von 19,3 Mrd. EUR. So konnte die Tonne technischer Kunststoff nach der Wertschöpfung im Durchschnitt für ca. 6000 EUR weiterverkauft werden und liegt damit deutlich über dem Durchschnitt der gesamten Kunststoffverarbeitung von 4500 EUR pro Tonne [1]. Technische Kunststoffe machen zwar nicht den größten Anteil der Produktionsmenge aus, die Zahlen zeigen allerdings, dass es sich um Bauteile mit besonderen Eigenschaften handelt, die zu einem überdurchschnittlich hohen Preis verkauft werden. Jedoch muss von dem erzielten Umsatz ein Großteil in den Prozess investiert werden. Besonders die

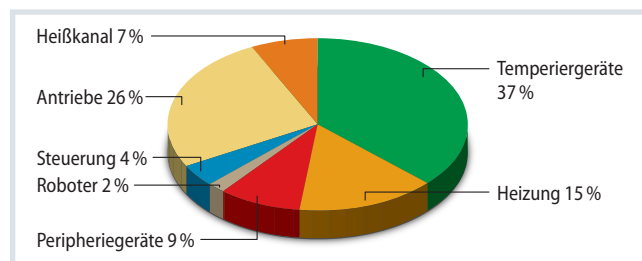


Bild 1. Die Temperiergeräte weisen den höchsten Energieanteil im Spritzgießprozess auf

Quelle: M. Schläger u. a. [2];
Grafik: © Hanser

regelmäßigen Energieausgaben werden zunehmend zum Kostentreiber.

Mit einem Anteil von durchschnittlich 37% am gesamten Energiebedarf (**Bild 1**) stellt die Werkzeugtemperierung den Hauptverbraucher dar [2]. Die meisten Produkte aus technischen Kunststoffen haben hohe mechanische Anforderungen, einhergehend mit einer konstruierten Struktursteifigkeit sowie einem hohen

Maß an Funktionsintegration. Daher ist davon auszugehen, dass diese Bauteile zum größten Teil im Spritzgießverfahren hergestellt werden. Geht man von einer Spritzgießquote von 90% aus, werden dafür in Deutschland ca. 6 TWh Energie benötigt. Die resultierenden Kosten betragen ca. 1,1 Mrd. EUR [3].

Über den prozentualen Anteil der Heizleistung von 15% (**Bild 1**) lässt sich der

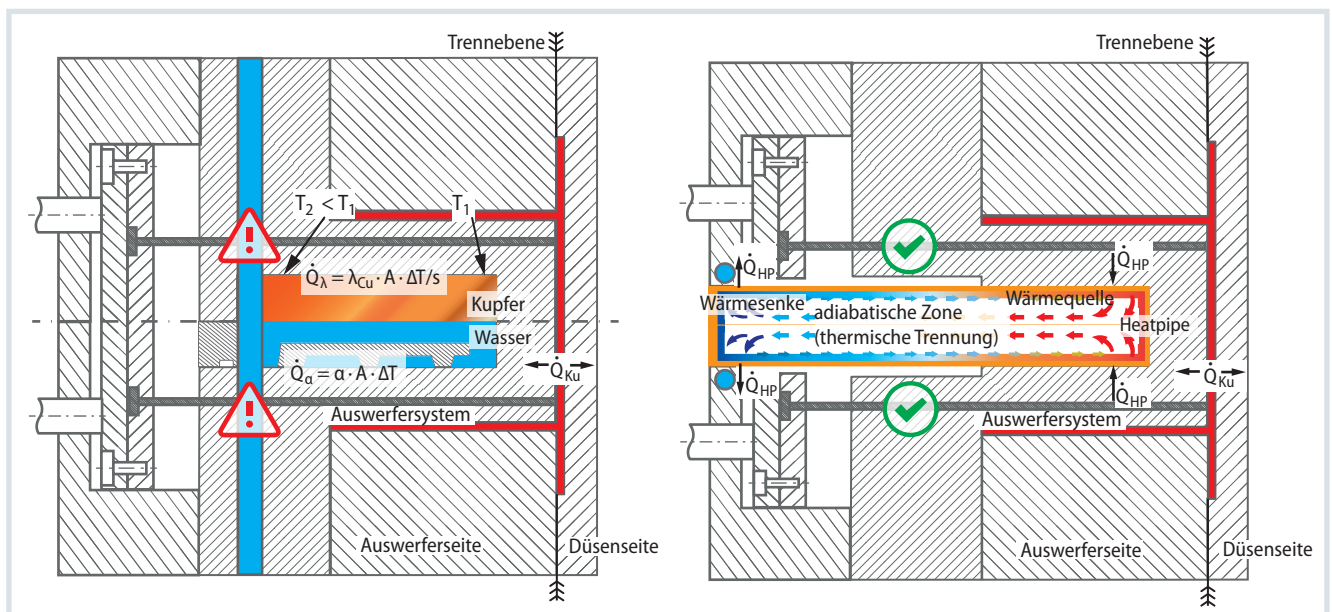


Bild 2. Darstellung der Temperiermethoden Kupfer und Wasser (links) im Vergleich zum System mit Heatpipes (rechts) Quelle: FH Bielefeld; Grafik: © Hanser

absolute Verbrauch für die Temperiergeräte errechnen. Der Energiebedarf wird ermittelt über die mittlere Enthalpie der häufigsten technischen Kunststoffe (ABS, SAN, PC, PMMA, ASA, PBT, POM, PA) und unter der Annahme, dass der Kunststoff von durchschnittlich 30°C auf eine Massetemperatur von 275°C aufgeheizt werden muss [4]. Zunehmend wichtig ist die Umrechnung der benötigten Energie in das Äquivalent an CO₂-Emissionen. Rechnerisch ergibt sich hier ein Wert von ca. 2,4 Mio. t CO₂ [5]. Dies entspricht dem Energieverbrauch von ca. 2 Mio. Haushalten mit je vier Personen [6] bzw. dem der Bevölkerung von Hamburg [7] oder über 250 000 Flügen zwischen Düsseldorf und München [8–10].

Wieso wird diese kostenintensive Energiemenge benötigt?

Bei der Temperierung von Spritzgießwerkzeugen ist in den meisten Fällen eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung in der Kavität qualitäts- und zykluszeitbestimmend [11–13]. Dafür wird die Temperatur in der Regel mit durchströmendem Wasser eingestellt und das Wasser mit zum Teil energieintensiven Temperiergeräten aufgeheizt. Wenn der Temperieraufwand für komplexe Artikelgeometrien besonders hoch ist, werden pro Werkzeugseite oftmals mehrere Temperiergeräte eingesetzt. Eine Stichprobe in der Praxis ergab, dass bei einem Nutzungsgrad von 90% auf 5,2 Tage pro Woche je Temperiergerät ca. 5500 EUR/Jahr an Energiekosten auflaufen. Zwar können die Angaben je nach Pumpensystem variieren, doch macht die Heizleistung den Großteil des Energieverbrauchs aus.

Eine konventionelle Temperierung birgt Nachteile

Das Spritzgießverfahren ermöglicht die Fertigung komplexer Formteile, meist mithilfe ebenso komplexer Werkzeugkonstruktionen. Für viele anspruchsvolle Anwendungen sind die gängigen Temperiermethoden mit Wasser und Kupfer (Bild 2 links) im Werkzeug [14–16] häufig nicht ausreichend. Es entstehen lokale Wärmehäufungen (Hotspots), die zyklusentscheidend sind und die es zu vermeiden gilt. Schätzungen gehen davon aus, dass für ca. 30% aller Spritzgießwerkzeuge keine gleichmäßige Temperatur an

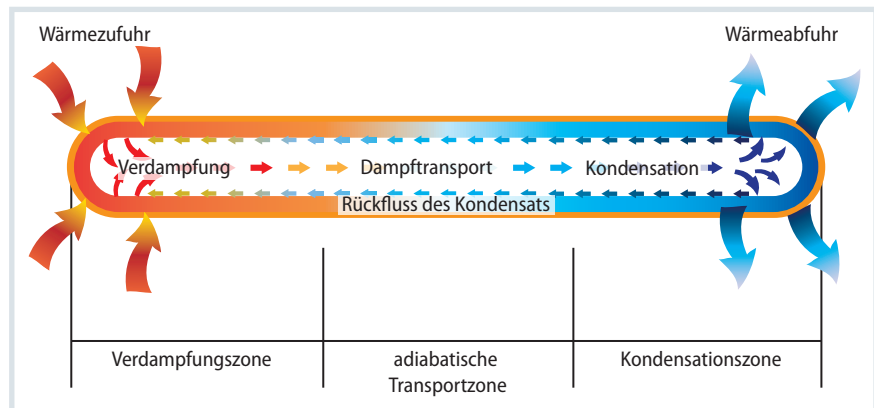


Bild 3. Funktionsdarstellung einer Heatpipe. Dampf- und Kondensattransport, Phasenübergangsbereiche sowie adiabatische Zone. Quelle: FH Bielefeld; Grafik: © Hanser

der Kavität erreicht wird – mit der Folge verlängerter Zykluszeiten.

Grundsätzlich problematisch sind enge und lange Bereiche, in denen Wasser aufgrund des laminaren Fließverhaltens nicht effektiv ist. Ebenso anfällig für eine laminare Strömung sind konturnahe Temperierungen; dabei kommen additiv oder durch Vakuumlöten gefertigte Werkzeugeinsätze zum Einsatz, in denen kleine Kühlkanäle realisiert werden.

Außerdem können sich in den medienführenden Kanälen isolierend wirkende Ablagerungen bilden, die den Wärmestrom behindern oder im Extremfall zu einem irreparablen Versagen des Werkzeugelements führen. Daher ist die Investition in eine Wasseraufbereitung empfehlenswert, denn auch Wartungsintervalle sowie anfallende Rüstvorgänge sind kostenintensiv und können zu Fehlern in der Remontage führen.

Die Werkzeugkomplexität ist auch durch die Temperierkanäle bedingt, die quer zu den Auswerfern liegen. Oftmals gibt der Kunde die Positionen der Auswerfer vor, ohne die Temperierung zu berücksichtigen – die Konstruktion wird dann aufgrund des mangelnden Platzes umso aufwendiger.

Häufig werden Kupfereinsätze in kritische Bereiche eingebracht. Dieses System verlangt jedoch oftmals einen höheren Aufwand an Peripheriegeräten. Zwischen der Werkzeugwandtemperatur und der wärmeabnehmenden Wassertemperatur besteht nur eine kleine Temperaturdifferenz, die einen sehr geringen Wärmestrom bedeutet. Für einen effektiven Wärmetransport muss die Temperatur mit einem separaten Kühlkanalkreislauf und Temperiergerät abgesenkt werden,

wodurch ein zusätzlicher konstruktiver Aufwand entsteht. Ein weiteres Mittel zur Eliminierung von Hotspots sind Kältemittelsysteme [17, 18], die jedoch sehr kostenintensiv sind.

Wie kann diese große Energiemenge reduziert werden?

Ein Forschungsprojekt der FH Bielefeld verfolgt das Ziel, mit der sogenannten Heatpipe-Technologie (Bild 2 rechts) einen Großteil der Energie einzusparen und kürzere Zykluszeiten beim Spritzgießen technischer Kunststoffteile zu erreichen. Der Wärmetransport einer Heatpipe ist um ein Vielfaches höher als der von Kupfer. Sie kann, je nach Ausbildung der Wärmesenke und Anordnung der Kerne, mit den Auswerfern mitlaufen. Dies erhöht die konstruktive Freiheit und verringert den fertigungstechnischen Aufwand. Mit dieser Technologie besteht die Möglichkeit, die Lebensdauer von Freiform- ➤

To-Dos bis zur Serienreife

Die Heatpipe zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteilen aus. Vor dem Serieneinsatz stehen noch einige Pflichtaufgaben:

- Entwickeln einer Rheologie-Simulation mit Heatpipes als Temperierung
- Berücksichtigung weiterer Fertigungsverfahren
- Entwicklung weiterer Strukturen (Oberfläche und Querschnitt) für ein optimiertes thermisches Verhalten
- Ausbildung der adiabaten Zone aus Keramik mit dem Ziel, die mechanische Belastbarkeit zu erhöhen

Kühlkanälen auch in sehr engen Bereichen zu erhöhen. Da das System hermetisch abgeschlossen ist, können sich auch in sehr dünnen Kühlkanälen keine Verunreinigungen bilden, die bei konventioneller Temperierung zu einem irreparablen Ausfall führen.

Heatpipes sind verschlossene Röhre, die im Inneren Unterdruck aufweisen und in der Regel mit wenig Wasser befüllt sind (Bild 3). Durch den Unterdruck verdampft das Wasser bereits bei Temperaturen ab ca. 20 °C. Die Röhre ist in drei Teilberei-

Die Autoren

Stephan Kartelmeyer, M.Sc., studierte Maschinenbau an der FH Bielefeld und der Universität Paderborn. Nach einer mehrjährigen Industrietätigkeit befasst er sich seit 2016 als wissenschaftlicher Mitarbeiter mit Heatpipe-temperierten Werkzeugen; stephan.kartelmeyer@fh-bielefeld.de

Max-Vincent Hüttemann, B. Eng., ist seit Mai 2017 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der FH-Bielefeld tätig.

Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer ist seit 2008 Professor für Kunststofftechnologie am KTP der Universität Paderborn.

Prof. Dr.-Ing. Christoph Jaroschek ist seit 1998 Professor für Kunststoffverarbeitung der FH Bielefeld.

Dank

Diese Arbeit ist Teil eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts – Projektname: „Entwicklung einer neuen Generation Spritzgieß-Werkzeuge mit integrierter Wärmerohrtemperierung – BrazeHeaP-Werkzeug“ – und ebenso des von der Leitmarktagentur.NRW geförderten Projekts „CeraHeaP – Strukturintegrierte Heatpipes in Werkzeugelementen mit thermischer Trennung aus Keramik“. Besonderer Dank geht zudem an die Grohedal Sanitärssysteme GmbH & Co. KG, Porta Westfalica, für das Versuchswerkzeug und an die voestalpine Additive Manufacturing Center GmbH, Düsseldorf, für die Herstellung des Heatpipe-Kerns.

Service

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

www.kunststoffe.de/onlinearchiv

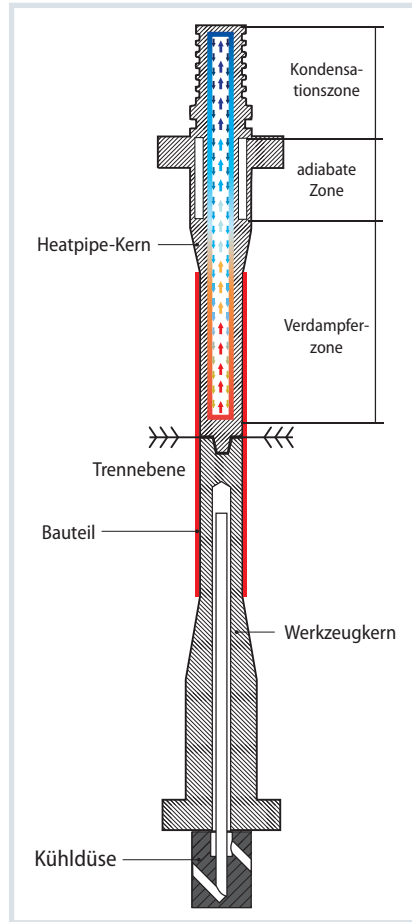


Bild 4. Kernsystem im Längsschnitt: Kühlung auf Wasser-Basis (unten) und mit strukturintegriertem Heatpipe-Kern (oben) Quelle: FH Bielefeld; Grafik: © Hanser

che gegliedert: die Wärmequelle, die Wärmesenke sowie eine thermische Trennung. An der Wärmequelle wird dem Werkzeug Wärmeenergie entzogen, indem das Wasser einen Phasenübergang von flüssig in Dampf erlebt – dies führt zu einer Abkühlung. Der Dampf ist nun der Energieträger und strömt zur Wärmesenke, wo er aufgrund einer geringeren Um-

gebungstemperatur kondensiert. So wird die Wärmeenergie an die dortige Umgebung abgegeben. Das Wasser fließt zurück zur Wärmequelle, um wieder zu verdampfen [19, 20].

Der Werkzeugkern wird zum Hohlkörper mit Kühleffekt

Der wärmeabführende Effekt konnte in ersten Versuchen mit dem Einsatz marktüblicher Heatpipes nachgewiesen werden [21, 22]. Außerdem wurde ein präzises Simulationstool entwickelt [23 – 25]. Mithilfe von Thermosimulationen können Hotspots bereits in der frühen Entwicklungsphase lokalisiert und daraufhin die abzuführende Wärmeenergie bestimmt werden [26 – 28]. Heatpipe-Werkzeugkerne bieten die Chance, Hotspots zu eliminieren, bei denen konventionelle Methoden nicht zielführend sind. So lässt sich die Kühlzeit verkürzen.

Im Gegensatz zur Vergangenheit [15] bildet die FH Bielefeld Werkzeugeinsätze als strukturintegrierte Heatpipes aus; der Kern selber ist die Heatpipe. Im Prinzip sind das Werkzeugkerne, die im Inneren hohl sind und bei der Herstellung evakuiert und mit einer definierten Menge reinen Wassers gefüllt werden. Die Vorteile gegenüber konventionellen und montierten Heatpipes sind u. a. eine definierte und reproduzierbare Befüllung, eine bessere Wärmeleitung von der Kavität in die Dampfchamber sowie eine höhere konstruktive Freiheit.

Anhand eines einfachen Versuchswerkzeugs lässt sich eine Wasserkühlung mit einer Kühlung durch eine additiv gefertigte, strukturintegrierte Heatpipe vergleichen [29, 30]. Der Artikel stellt eine Hülse dar, die durch zwei Kerne ausgeformt wird. Die Trennebene des Kerns-

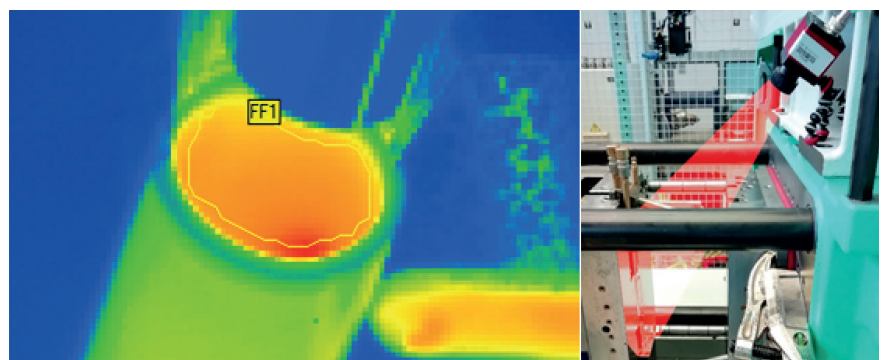


Bild 5. Darstellung der Wärmebildkamera mit Anordnung des Messbereichs für die Artikelinnenseite (links) und Blick der Wärmebildkamera auf die Trennebene (rechts) © FH Bielefeld

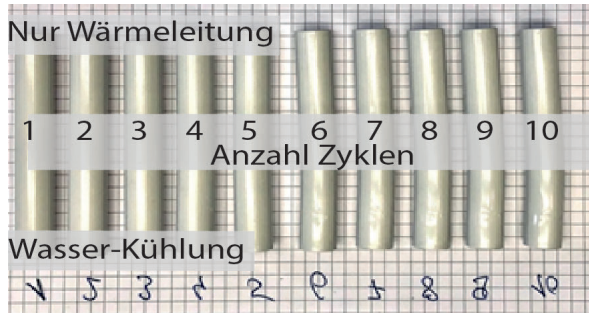


Bild 6. Reine Wärmeleitung im Werkzeugkern. Ohne den wärmeabführenden Effekt der Heatpipe verkrümmt sich das Bauteil bereits ab dem fünften Zyklus © FH Bielefeld

tems verläuft mittig vom Artikel, sodass eine Symmetrie entsteht und einen Vergleich beider Systeme zulässt. Das untere Ende des hülsenförmigen Bauteils wird durch einen konventionell mit Wasser temperierten Kern temperiert, der obere Teil ist als strukturintegrierter Heatpipekern ausgebildet (**Bild 4**).

In der Testreihe (**Tabelle 1**) wurde das Werkzeug auf eine Spritzgießmaschine Allrounder 370E (Hersteller: Arburg) gespannt. Die Temperaturen wurden mit einem Thermografiesystem (Hersteller: Infratec) ermittelt. Hierbei handelt es sich um eine Wärmebildkamera des Typs PIR uc 180 und die Software Irbis 3. Die grafische Auswertung der Ergebnisse erfolgt mit Excel. Das Werkzeug wird durch ein energieeffizientes Temperiergerät mit drehzahl geregelter Pumpe gekühlt. Anhand der optischen Qualität des Bauteils wird, bei möglichst kurzem Zyklus, die Grenze des Prozesses ermittelt.

Über die thermografische Erfassung der Temperatur an der Artikelinnenseite (**Bild 5**) und eine Berechnung über die Kontakttemperatur kann die Kerntemperatur ermittelt werden. Die Kerntemperatur verläuft stationär sowohl bei ABS mit 91 °C als auch bei PP mit 60 °C. An beiden Bauteilenden hat sich die gleiche Artikelqualität eingestellt, sodass im direkten Vergleich zwischen der wassergekühlten und der über den Heatpipekern gekühlten Bauteilseite keine Unterschiede zu erkennen sind [31].

Der Nachweis, dass die Heatpipe einen wärmeabführenden Effekt hat, konnte anhand der reinen Wärmeleitung mit

Wasserkühlung nachgewiesen werden. Hierfür wurde das Vakuum im Wärmerohr aufgelöst und somit der Kern ausschließlich über die Wärmeleitung des Werkzeugstahls selbst gekühlt. Dabei zeigt sich, dass die Bauteilqualität nicht haltbar ist und sich das Bauteil bereits beim fünften Zyklus auf Seiten des neuen Kerns verkrümmt (**Bild 6**); demgegenüber tritt auf der wassergekühlten Seite keine Verformung auf.

Geld und Zykluszeit sparen

Die Verbesserungen beim Energieeinsatz und in der Zykluszeit sind mit dem neuartigen Ansatz einer Heatpipe als Werkzeugelement direkt erkennbar [32]. Der Funktionsnachweis kann im realen Betrieb erbracht werden. Die Kühlung eines Kerns wird mit kaltem Wasser anstatt mit einem Temperiergerät durchgeführt. Möchte man an dem Kern eine andere Temperatur einstellen, so stehen grundsätzlich drei Parameter zur Option: Der Unterdruck und die Flüssigkeitsmenge können variiert werden; und es kann über die Temperatur der Wärmesenke, z. B. durch einen zyklischen Wasserstrom, Einfluss auf die Wärmeübertragungsleistung genommen werden. Grundsätzlich ist auf diesem Weg eine Heatpipe-Impulstemperierung denkbar.

Darüber hinaus beschäftigt sich die FH Bielefeld zukünftig mit einer konvektiven Temperierung der Wärmesenke, sodass das Werkzeug komplett wasserfrei wäre und auch die Pumpe sowie dessen Leistung entfallen würde. ■



Laser Plastic Welding



	Gesamtzykluszeit [s]	Kühlzeit [s]	Nachdruck [s]	Massetemperatur [°C]	Wassertemperatur [°C]
ABS	7,3	2	1,4	230	16
PP	8	2,7	1,4	220	16

Tabelle 1. Prozesswerte für die Versuchsreihe „Temperiervergleich“ Quelle: FH Bielefeld