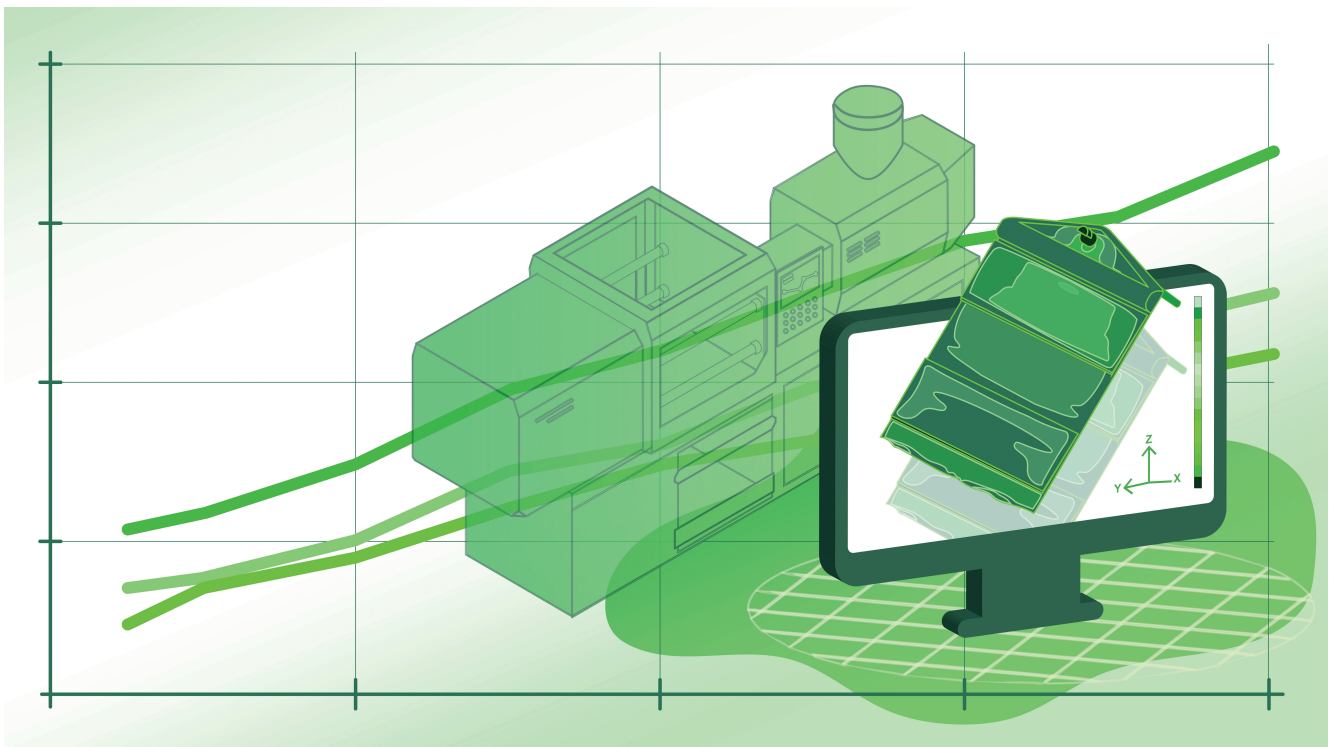


# Optimal einspritzen – aber wie?

*Ein Konzept zur Einspritzprofilierung soll die Einrichtung des Spritzgießprozesses vereinfachen*

Insbesondere bei komplexen Spritzgussbauteilen ist eine Profilierung des Einspritzvolumenstroms notwendig, um die Qualitätsanforderungen an das Bauteil zu erfüllen. Mithilfe einer Optimierungsroutine soll bereits vor der Prozesseinrichtung an der Maschine ein geeignetes Einspritzvolumenstromprofil per Simulation ermittelt werden. Auf diese Weise kann der praktische Versuchsaufwand reduziert und ein sehr gutes Qualitätsergebnis in kurzer Zeit erzielt werden.



Eine automatische Einspritzprofilierung auf Basis der Bauteilgeometrie soll die Prozesseinrichtung beschleunigen und die Bauteilqualität verbessern © IKV

**B**eim Spritzgießen beeinflusst der Einspritzvolumenstrom die Ausbildung von Orientierungen, Eigenspannungen sowie kristallinen Strukturen – und damit auch die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils sowie dessen Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität [1-4]. Damit Präzisionsteile die jeweils gültigen Qualitätsanforderungen erfüllen, ist eine Profilierung des Einspritzvolumenstroms in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie notwendig [1-4]. Die iterative Einstellung des Einspritzvolumenstroms an der Spritz-

gießmaschine anhand von Expertenwissen ist Stand der Technik, jedoch insbesondere für komplexe Bauteile zeitintensiv und aufwendig [5].

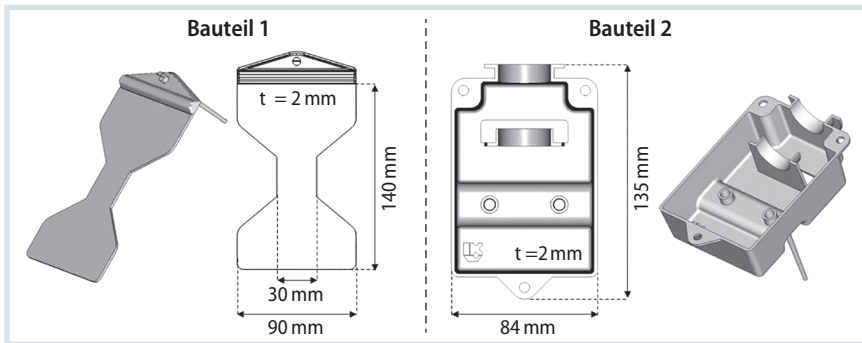
### **Empfehlungen für die Einspritzphase**

Der Einsatz einer Simulationssoftware ermöglicht es, in kurzer Zeit Einspritzvolumenstromprofile zu ermitteln, die Kriterien wie eine konstante Fließfrontgeschwindigkeit umzusetzen helfen. Somit

kann die praktische Phase der Prozesseinrichtung an der Spritzgießmaschine verkürzt werden, um geforderte Qualitätskriterien zu erreichen.

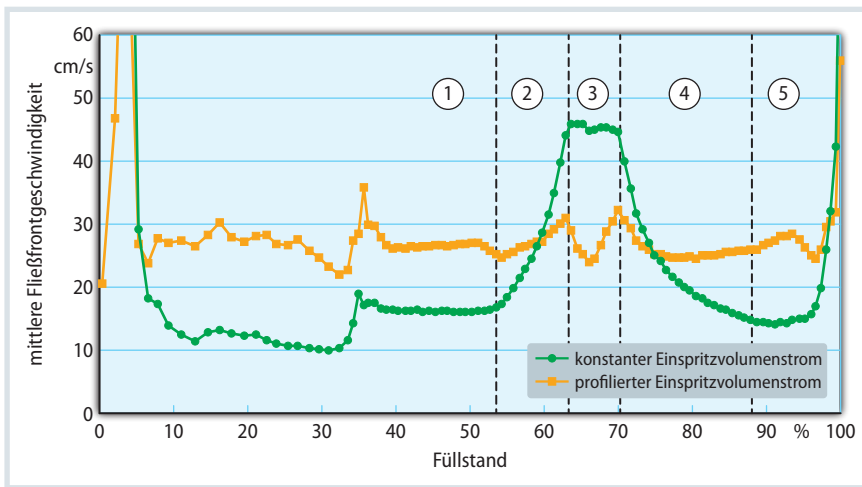
Je nach Anforderung an Prozess und Bauteil gibt es unterschiedliche Kriterien, die in der Einspritzphase entscheidend sind. Dazu gelten in Abhängigkeit des Bauteilbereichs grundlegende Empfehlungen für die Einspritzgeschwindigkeit [4, 5]:

- eine schnelle Füllung des Angussverteilers,



**Bild 1.** Die verwendeten Bauteilgeometrien weisen eine unterschiedliche Komplexität auf

Quelle: IKV; Grafik: © Hanser



**Bild 2.** Die mittlere Fließfrontgeschwindigkeit des profilierten Einspritzvolumenstroms verläuft bei unveränderter Einspritzzeit gleichmäßiger als bei konstantem Einspritzvolumenstrom (Platte mit Querschnittsverengung) Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

- eine Begrenzung der Fließfrontgeschwindigkeit im Anschnitt,
- eine schnelle Füllung des Formteils und
- eine Absenkung der Geschwindigkeit kurz vor Erreichen der volumetrischen Füllung.

Im Angussverteiler sollte die Schmelze schnell eingespritzt werden, um kurze Einspritzzeiten zu erzielen und eine Abkühlung der Schmelze zu vermeiden. Bei Erreichen des Anschnitts ist es geboten, den Einspritzvolumenstrom zu verringern, um zu hohe Schergeschwindigkeiten und somit eine Materialschädigung zu unterbinden. Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit ist ein möglichst hoher Einspritzvolumenstrom empfehlenswert, damit die Zykluszeit sich nicht unnötig verlängert. Zusätzlich kann durch einen hohen Einspritzvolumenstrom die Abkühlung der Schmelze über dem Fließweg minimiert werden, weil die Dissipationswärme die Abkühlung während des Einspritzens kompensiert.

Nach oben ist der Einspritzvolumenstrom durch Materialschädigungen aufgrund zu hoher Scherung und zu großer Druckverluste begrenzt [4, 5]. Ein häufig publizierter Ansatz ist es, die Einspritzgeschwindigkeit so zu profilieren, dass die Fließfrontgeschwindigkeit konstant ist [1, 4, 6-10]. Bei konstanter Wanddicke wird so an der Fließfront eine konstante mittlere Schergeschwindigkeit über der Bauteildicke erreicht, die in einer gleichmäßigen Orientierung der Moleküle entlang des Fließwegs resultiert [1, 6]. Bei Querschnittsänderungen muss der Einspritzvolumenstrom zum Erreichen einer konstanten Fließfrontgeschwindigkeit entsprechend der Kontinuitätsgleichung proportional zur Änderung der Querschnittsfläche angepasst werden.

Gegen Ende des Fließwegs wird eine Verringerung des Einspritzvolumenstroms empfohlen, um Materialschädigungen durch Brennen und ein Überspritzen der Kavität in der Kompressionsphase zu vermeiden [4, 5]. Diese Kriterien zu berück-

sichtigen, gilt bei der Prozesseinrichtung für komplexe Bauteile als Herausforderung, weshalb mithilfe der Spritzgießsimulation das ideale Einspritzvolumenprofil in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie in wenigen Arbeitsschritten ermittelt werden soll.

### Simulation der Einspritzstrategie

Um das optimale Einspritzvolumenstromprofil zu ermitteln, wird die Simulationssoftware Cadmould (Anbieter: simcon kunststofftechnische Software GmbH) genutzt. Das Ziel der Untersuchungen ist das Erreichen einer konstanten Fließfrontgeschwindigkeit. Es werden eine einfache und eine komplexere Geometrie untersucht (**Bild 1**). Dafür wird ein Polypropylen (PP) des Typs Sabic PP 579S mit Materialdaten aus der Cadmould-Materialdatenbank verwendet. »

## Die Autoren

### Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

ist Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen.

**Thilo Köbel, M.Sc.** ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IKV und Leiter der Arbeitsgruppe Maschinenentwicklung; thilo.koebel@ikv.rwth-aachen.de

**Katharina Hornberg, M.Sc.** ist seit 2019 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IKV und Leiterin der Arbeitsgruppe Prozessregelung.

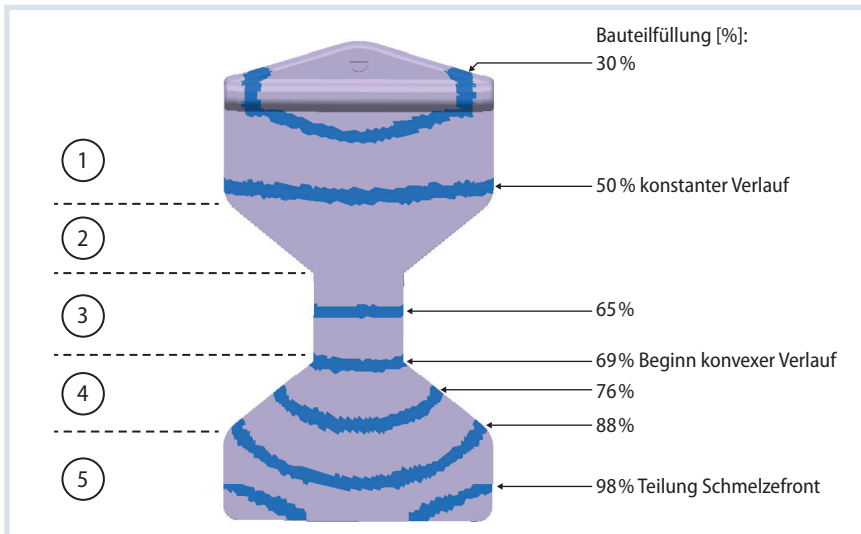
### Dank

Das IGF-Vorhaben 20935 der Forschungsvereinigung Institut für Kunststoffverarbeitung wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Allen Institutionen sprechen die Autoren ihren Dank aus. Weiterer Dank gilt der simcon kunststofftechnische Software GmbH für die fachliche Unterstützung.

## Service

### Literatur & Digitalversion

- » Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)



**Bild 3.** Nach der Verengung zeigt das Füllbild in Bereich 4 eine Quellströmung der Fließfront bei einem konstanten Einspritzvolumenstrom von  $30 \text{ cm}^3/\text{s}$  Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

Die einfache Geometrie verfügt über eine Querschnittsverengung und anschließende Querschnittserweiterung um 66%. In einem ersten Schritt wird mit einem konstanten Einspritzvolumenstrom von  $30 \text{ cm}^3/\text{s}$  virtuell eingespritzt und die mittlere Fließfrontgeschwindigkeit über dem Füllstand ermittelt (**Bild 2**, grüner Kurvenverlauf). Diese errechnet sich aus dem Mittel der Fließfrontgeschwindigkeiten der Berechnungselemente, die bei diesem Füllstand von der Fließfront erreicht werden.

### Veränderter Verlauf der Fließfront

Bei konstantem Einspritzvolumenstrom resultiert hinter dem Filmanschnitt aufgrund einer gleichbleibenden Querschnittsfläche eine konstante Fließfrontgeschwindigkeit. Bei der Querschnittsverengung erhöht sich die Fließfrontgeschwindigkeit linear (Bereich 2) auf ein höheres Niveau (Bereich 3). Auffallend ist, dass die positive Steigung der Fließfrontgeschwindigkeit bei Verengung (Bereich 2) und die negative Steigung bei Erweiterung des Querschnitts (Bereich 4) unterschiedlich ausfallen. Weiterhin fällt auf, dass die Fließfrontgeschwindigkeit am Ende der Füllung stark ansteigt.

Ein Blick auf das Füllbild hilft, um diesen Verlauf zu verstehen (**Bild 3**). Die Entstehung eines Quellflusses nach der Verengung führt zu einem veränderten Verlauf der Fließfront. Indem die Fließfront das Plattenende unterschiedlich schnell erreicht, wird sie in zwei Bereiche geteilt,

sodass die Fließfrontgeschwindigkeit stark zunimmt.

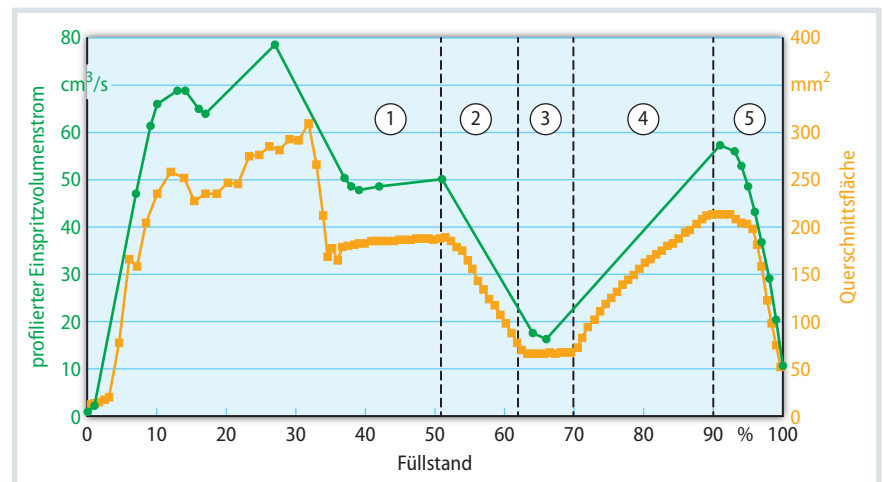
### Einspritzvolumenprofil proportional zum Querschnitt der Fließfront

Im nächsten Schritt wird aus der mittleren Fließfrontgeschwindigkeit bei konstantem Einspritzvolumenprofil der Querschnitt der Fließfront über dem Füllstand berechnet. Nimmt man eine inkompressible Strömung an, kann dieser aus dem Quotienten des Einspritzvolumenstroms und der mittleren Fließfrontgeschwindigkeit zum jeweiligen Zeitpunkt berechnet werden (**Bild 4**, orange Kurve). Es ist gut zu erkennen, dass auch hier der Verlauf des Fließfrontquerschnitts im Bereich der Verengung (Bereich 2) einen anderen Ver-

lauf aufweist als der Wiederanstieg der Querschnittsfläche im Bereich der Erweiterung (Bereich 4). Aufgrund der Quellströmung steigt der Querschnitt beim Füllstand von circa 90% auf ein lokales Maximum an, bevor er am Fließwegende durch die Teilung der Schmelzefront stark abnimmt.

Mit der Software Matlab (Anbieter: MathWorks Inc.) werden die Kurve der Querschnittsfläche geglättet und die Punkte aus der Kurve ermittelt, an denen eine definierte Steigungsänderung überschritten wird. Bei diesen Füllständen werden Stufen für das Volumenstromprofil gesetzt. Je kleiner die kritische Steigungsänderung definiert wird, desto mehr Profilschritte resultieren im Volumenstromprofil. Nach der Vorgabe einer Füllzeit wird das Einspritzvolumenprofil berechnet, das proportional zum Querschnitt der Fließfront ist (**Bild 4**, grüne Kurve).

In einer zweiten Prozesssimulation wird anschließend mit dem so profilierten Einspritzvolumenprofil eingespritzt. Die resultierende mittlere Fließfrontgeschwindigkeit wird dadurch im Vergleich zum konstanten Einspritzvolumenstrom vergleichmäßigt (**Bild 2**, orange Kurve). Im Stangenanguss, im Filmanschnitt sowie am Füllende weist die Fließfrontgeschwindigkeit wie bei dem profilierten Einspritzvolumenprofil noch erhöhte Werte auf. In den restlichen Bereichen schwankt die mittlere Fließfrontgeschwindigkeit maximal um 20% im Vergleich zur Fließfrontgeschwindigkeit bei konstantem Einspritzvolumenstrom, die um bis zu 93% vom Mittelwert abweicht.



**Bild 4.** Aus der Querschnittsfläche über dem Füllstand wird für die Platte mit Querschnittsverengung das optimierte Einspritzvolumenstromprofil abgeleitet Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

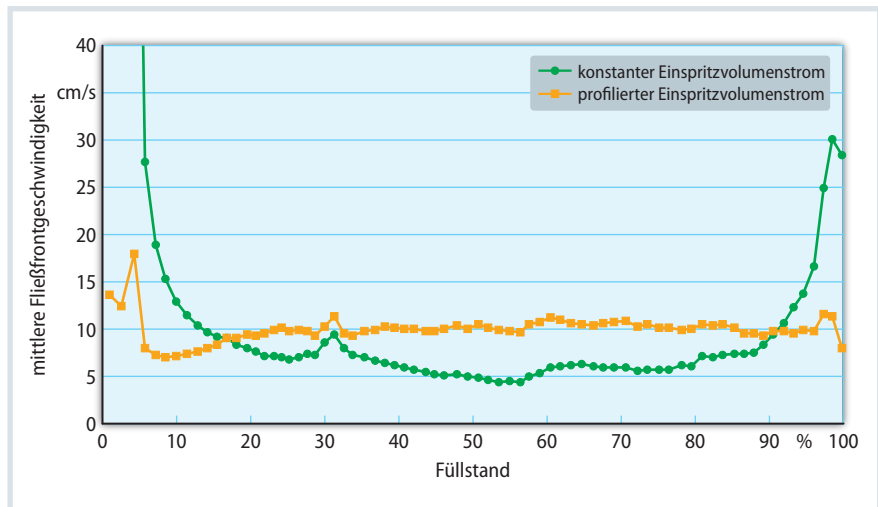
## Von einfachen zu komplexen Geometrien

Dieses Vorgehen wird ebenfalls auf das komplexere Bauteil angewendet. Auf Basis einer ersten Simulation mit konstantem Einspritzvolumenstrom von  $33 \text{ cm}^3/\text{s}$  wird die mittlere Fließfrontgeschwindigkeit ermittelt (Bild 5, grüne Kurve). Bei Kenntnis des Einspritzvolumenstroms und der mittleren Fließfrontgeschwindigkeit kann die Querschnittsfläche in Abhängigkeit des Füllstands berechnet werden. Unter dem Kriterium einer gleichen Füllzeit wird aus der Querschnittsfläche das Einspritzvolumenprofil abgeleitet. Während die mittlere Fließfrontgeschwindigkeit bei profiliertem Einspritzvolumenprofil (Bild 5, orange Kurve) ab Füllen des Stangenangusses um maximal 81 % vom Mittelwert abweicht, sind es bei konstantem Einspritzvolumenprofil über 900 %.

Stellt man die in der Simulation ermittelten lokalen Fließfrontgeschwindigkeiten im Bauteil einander gegenüber (Bild 6), erkennt man: Während die Fließfrontgeschwindigkeit bei konstantem Einspritzvolumenstrom aufgrund der Quellströmung mit steigendem Abstand vom Stangenanguss abnimmt, ist sie bei profiliertem Einspritzvolumenstrom deutlich gleichmäßiger.

## Übertragung der Einspritzstrategie in die Praxis

Der Einsatz eines durch Simulation optimierten Einspritzvolumenstromprofils in der Praxis setzt voraus, den Zusammen-



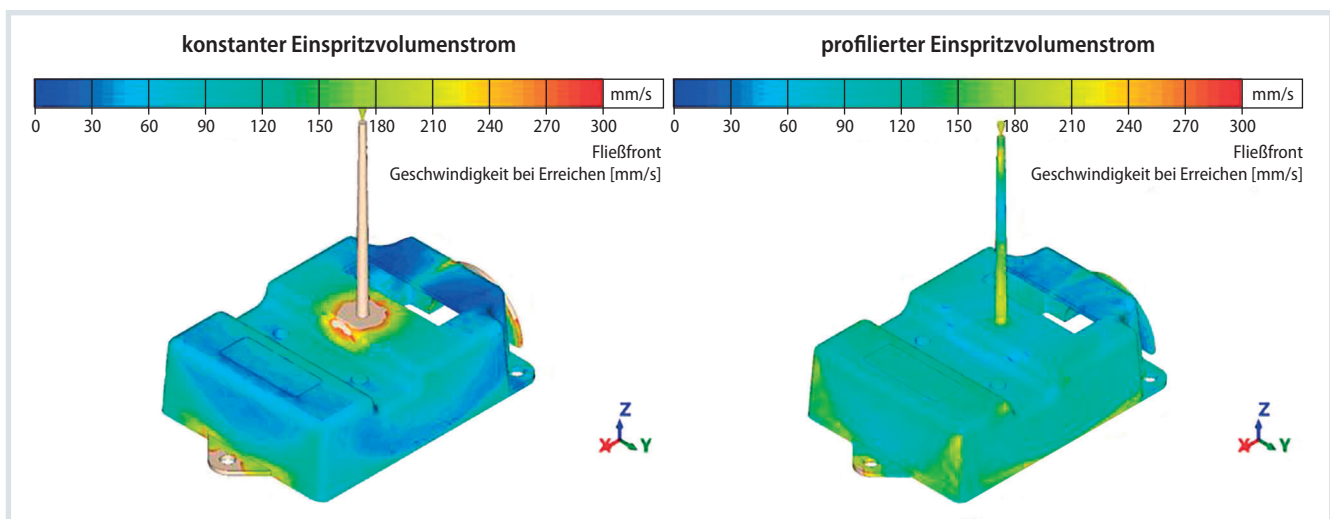
**Bild 5.** Die mittlere Fließfrontgeschwindigkeit des optimierten Einspritzvolumenstromprofils verläuft bei unveränderter Einspritzzeit gleichmäßiger als bei konstantem Einspritzvolumenstrom (komplexes Bauteil) Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

hang zwischen dem an der Maschine eingestellten Einspritzvolumenstromprofil und dem resultierenden Volumenstrom in der Werkzeugkavität genau abzubilden. Grund für Abweichungen zwischen diesen Volumenströmen sind unter anderem die Leckage der Rückströmsperre und die Kompression der Schmelze im Schneckenvorräum.

In aktuellen Arbeiten wird zur Berücksichtigung dieser Einflüsse ein Maschinenmodell entwickelt, das den Zusammenhang zwischen dem eingestellten und dem tatsächlich in die Kavität fließenden Volumenstrom beschreibt. In Kombination mit dem simulierten Einspritzvolumenstromprofil wird somit eine Übertragung von der Simulation in die Praxis möglich.

## Geometrieabhängige Optimierung des Einspritzvolumenstroms

Die vorgestellte Methodik ermöglicht es, mit einer Simulation ein Einspritzvolumenprofil zu generieren, das die mittlere Fließfrontgeschwindigkeit über den Füllstand vergleichmäßigt und dadurch den iterativen Prozess, das Volumenstromprofil einzustellen, beschleunigt. Neben einer konstanten Fließfrontgeschwindigkeit werden weitere Einspritzstrategien, wie beispielsweise eine konstante Schergeschwindigkeit an der Fließfront, getestet. Auf Basis der besten Einspritzstrategie ist das Entwicklungsziel eine universelle Methodik, die eine geometrieabhängige Optimierung des Einspritzvolumenstroms ermöglicht. ■



**Bild 6.** Durch das optimierte Einspritzvolumenstromprofil (rechts) werden die lokalen Fließfrontgeschwindigkeiten im Bauteil gleichmäßiger © IKV