

Gezielt angeströmt

Formluft-Impact-Technologie zur Erhöhung der Formteilqualität

Die Materialverteilung ist beim Thermoformen in vielen Fällen das zentrale Qualitätskriterium. Eine gerichtete lokale Anströmung des Halbzeugs beeinflusst ohne aufwendige Stempelvorstreckeinrichtungen die Formteildicke lokal. Weiterer Vorteil: Das Verfahren lässt sich besonders einfach implementieren.

Das Thermoformen eignet sich besonders zur Verarbeitung von dünnen, flächigen Folien und Platten zu dreidimensionalen Kunststoffformteilen. Der globale Markt für thermogeformte Kunststoffformteile umfasste 11,7 Mrd. EUR im Jahr 2015. Bis 2021 wird mit einem durchschnittlichen Anstieg des Umsatzes von 4,3 % pro Jahr gerechnet [1]. Das Thermoformen verbindet kunststoffspezifische Eigenschaften, wie niedriges Gewicht, hohe Funktionalität durch Multilayer-Eigenschaften oder die Applikation von Leiterbahnen und Bauteilen mit der kostengünstigen Herstellung von geringen und hohen Stückzahlen. Gewünschte Produktmerkmale lassen sich mit geringem Materialeinsatz verwirklichen. Beispiele dafür sind Verpackungen, die Lebensmittel vor Verderb schützen, und leichte Fahrzeugkomponenten, die zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emission beitragen.

Ein Kennzeichen des Thermoformens ist seine einseitige Geometrievorgabe durch das Werkzeug. Folglich beeinflussen neben der Halbzeugdicke die eingesetzten Technologien und Prozessparameter die Materialdicke des Kunststoffformteils. Die jeweiligen Qualitätsanforderungen, z. B. Barriere und/oder Belastbarkeit, erfordern eine Mindestmaterialdicke im Produkt, die bestimmt, wie dick das Halbzeug vor der Verformung mindestens sein muss. Aus wirtschaftlichen Gründen wird versucht, im Produkt eine homogene Materialdicke zu erreichen, um den Materialverbrauch zu senken.

Aktuelle gesellschaftliche und politische Diskussionen zur Verwendung von Kunststoffen zeigen, dass die Reduktion des Materialeinsatzes auch zukünftige

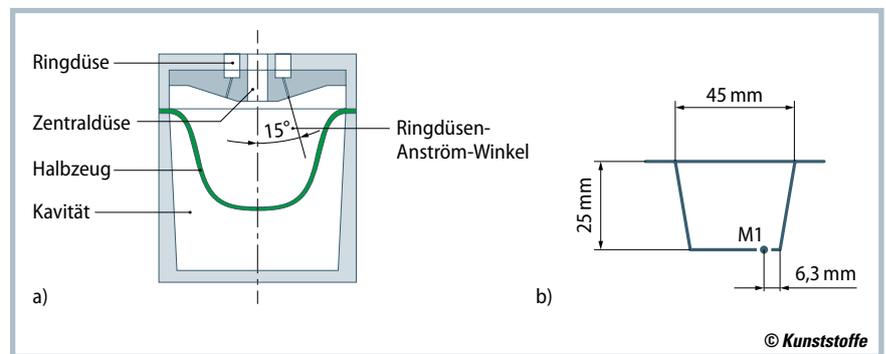


Bild 1. Druckluft-Negativumformen mittels FIT in einem rotationssymmetrischen Werkzeug: a) Versuchsaufbau, b) Formteilgeometrie und Position des Messpunkts (Quelle: Fraunhofer IVW)

Entwicklungen bestimmen wird. Ein durch solche Entwicklungen verbessertes Prozessverständnis und neue Technologien dürften die Möglichkeiten erweitern, den Prozess zu steuern und dehnungsempfindliche Hybridmaterialien zu neuen Bauteilen, z. B. Conformable Electronics (dynamisch verformbare, strukturelle 3D-Elektronik), zu verarbeiten.

Konventionelle Technologien

An Kunststoffformteile werden je nach Anwendungsfall unterschiedliche funktionelle und ästhetische Anforderungen gestellt. Dazu zählen beispielsweise die mechanische Stabilität, Permeabilität, Form- und Maßhaltigkeit, Ausformschärfe, Transparenz, Glanz und Farbtreue [2, 3]. Das zentrale Qualitätskriterium ist in vielen Fällen die Materialverteilung. Um die Formteildicke zu beeinflussen, werden industriell mehrere Verfahren eingesetzt.

Eine sehr weit verbreitete Methode ist das Vorstrecken des Halbzeugs vor dem eigentlichen Umformen mithilfe eines

Stempels. In verschiedenen Forschungsvorhaben wurde der Einfluss der Konstruktions- und Prozessparameter des Stempels auf die Materialverteilung untersucht. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Geometrie, das Material, die Folientemperatur, die Stempelgeschwindigkeit und die Eindringtiefe das Formteilergebn maßgeblich beeinflussen [4, 5]. Darüber hinaus besitzen Maschinen- und Werkzeugbauer umfangreiche empirische Erfahrungen über Parametrierung und Entwicklung von Stempelwerkzeugen. Auf Basis dieses Know-hows wählen sie die Parameter insbesondere von komplexen Geometrien heuristisch.

Ein zweiter Ansatz nutzt das temperaturabhängige Umformverhalten von Kunststoffen. Während konventionelle Thermoformverfahren das Halbzeug homogen erwärmen, lassen sich mit neuartigen Heiztechnologien Temperaturprofile aufbringen, die das lokale Umformverhalten und somit die endgültige Materialverteilung im Kunststoffformteil direkt beeinflussen. Zu diesem Zweck sind derzeit Infrarotstrahlungsquellen [6] (siehe

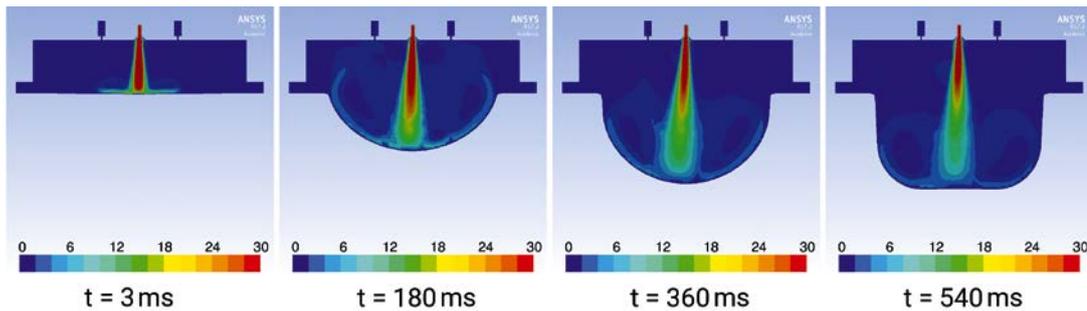


Bild 2. Strömungsgeschwindigkeit (in m/s) des Fluids bei Anwendung der Formluft-Impact-Technologie mit Zentraldüse im Formwerkzeug

(© FAU Erlangen-Nürnberg)

s. 167) und gedruckte Kontaktheizer (z. B. cera2heat, Hersteller: watttron GmbH, Freital) [7] im Einsatz.

Weitere in der Forschung relevante Verfahren sind die Erwärmung mittels Laser [8] und das Maskenverfahren [9]. Bei entsprechender Detaillierung lässt sich eine deutliche Verbesserung der Materialverteilung erreichen. Ein hoher Detaillierungsgrad wird insbesondere bei der Erwärmung mittels gedruckter Kontaktheizer und Laser erreicht. Allerdings erfordern diese Technologien die anspruchsvolle Berechnung eines geeigneten Temperaturprofils, häufig unter Zuhilfenahme numerischer Simulation [10–12].

Insbesondere cera2heat bietet die Möglichkeiten, auf kosten- und bauraumintensive Stempelvorstreckeinrichtungen zu verzichten. Gleichzeitig weist das System eine hohe Flexibilität auf und kann ohne Werkzeugwechsel zwischen unterschiedlichen Produkten umgestellt werden. Jedoch nutzen viele Prozesse für die Herstellung von Massenbedarfsgütern diese Vorteile kaum aus. Für sie wurde am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV), Dresden, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Strömungsmechanik der FAU Erlangen-Nürnberg eine weitere Technologie zur Substitution des Stempels entwickelt, die sich insbe-

sondere durch ihre einfache Implementierung auszeichnet.

Experimentelle und numerische Ergebnisse

Zur Analyse, Auswahl relevanter Parameter und Entwicklung der Formluft-Impact-Technologie (FIT, siehe Kasten auf S. 165) wurden sowohl numerische als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Erster Schritt im Zuge der Entwicklung war eine Reduktion denkbarer Düsenkonfigurationen durch die Beschränkung auf eine Zentral- und eine Ringdüse (Bild 1a). Im Vergleich zu experimentel- »

Die Autoren

Dipl.-Ing. Fabian Kayatz ist Leiter des Teams Formprozesse am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, Institutsteil Verarbeitungstechnik in Dresden; fabian.kayatz@ivv-dresden.fraunhofer.de

Simon Wagner, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Numerische Simulationen am Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM) der FAU Erlangen-Nürnberg; simon.sw.wagner@fau.de

Dipl.-Ing. Andre Schult ist Leiter der Arbeitsgruppe Digitalisierung und Prozesseffizienz am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, Institutsteil Verarbeitungstechnik in Dresden.

Dr.-Ing. Manuel Münsch ist Leiter der Arbeitsgruppe Numerische Simulationen am Lehrstuhl für Strömungsmechanik (LSTM) der FAU Erlangen-Nürnberg; manuel.muensch@fau.de

Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschak ist Leiter des Institutsteils Verarbeitungstechnik am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV in Dresden.

Prof. Dr.-Ing. Antonio Delgado ist seit 2006 Lehrstuhlinhaber des Lehrstuhls für Strömungsmechanik (LSTM) der FAU Erlangen-Nürnberg.

Dank

Das IGF-Vorhaben (18536 BG) der IVLV wurde unterstützt durch die AIF im Rahmen des Programms zur industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags.

Service

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/6650521

English Version

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

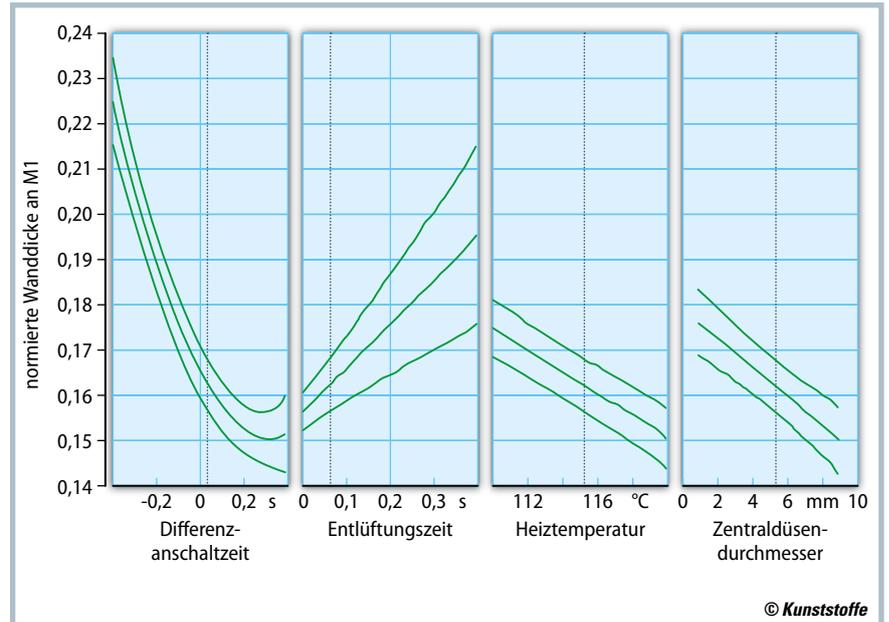


Bild 3. Normierte Wanddicke am Punkt M1 von A-PET in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussgrößen bei Kombination der Ring- und Zentraldüse (Quelle: Fraunhofer IVV)

len Untersuchungen beruht der Vorteil der numerischen Simulation insbesondere darauf, dass sich Einflussparameter einfach ändern lassen und der Informationsgehalt größer ist. Weil sich das temperaturabhängige und materialspezifische Umformverhalten einerseits und die Fluidströmung andererseits wechselseitig beeinflussen, ist ein bidirektional gekoppeltes Thermo-Fluid-Strukturmechanik-Modell (TFSI-Modell, Thermal Fluid Structure Interaction) notwendig, um die FIT numerisch zu simulieren. **Bild 2** zeigt den Ablauf einer Umformung anhand einer Beispieldüsenkonfiguration und macht deutlich, dass insbesondere der Abstand zwischen Düse und Halbzeug-Folie wesentlich ist.

Des Weiteren wurde am Fraunhofer IVV Dresden ein flexibles Werkzeug zur experimentellen Untersuchung der FIT entwickelt und in den vorhandenen Ther-

moformversuchsstand integriert [13]. **Tabelle 1** zeigt den Parameterbereich der Untersuchungen. Als exemplarisches Material wurde ein A-PET mit der Dicke von 500 µm verwendet. Die Analyse der Einflussparameter auf die Wanddickenverteilung erfolgte an Punkt M1 (**Bild 1b**). Dieser Punkt hat den Vorteil, dass er einerseits aufgrund der Nähe zum Bodenradius Aussagen zur kritischen Wanddicke des Formteils zulässt, andererseits bei unzureichender Ausformung die Messergebnisse nicht beeinflusst werden.

Bild 3 zeigt den Einfluss vier ausgewählter Einflussparameter auf die normierte Wanddickenverteilung in einem Response-Prediction-Graph. Dieses Diagramm stellt die mathematische Beschreibung des Einflusses eines Faktors auf die Zielgröße inklusive des vorliegenden Vertrauensbereichs dar. Auffällig ist der Ein-

Parameter	Minimum	Maximum
Zentraldüsendurchmesser	1 mm	9 mm
Ringdüsen-Anströmwinkel	0 °	52,5 °
Ringdüsenpaltbreite	0,4 mm	1 mm
Ringdüsendurchmesser	9,8 mm	40 mm
Öffnungswinkel	10 °	86 °
Differenz-Anschaltzeit (entspricht der Entlüftungszeit)	-0,4 s	1,5 s
Druck	1 bar	6 bar
Heiztemperatur	110 – 120 °C	
Entlüftung Zentraldüse	aus	ein

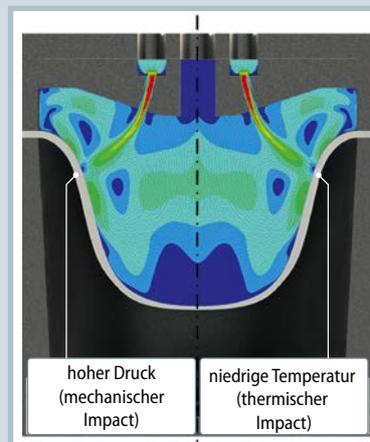
Tabelle 1. In der experimentellen Simulation untersuchte Düsenparameter und deren Parameterbereich (Quelle: Fraunhofer IVV)

fluss der Differenz-Anschaltzeit. Die Abbildung zeigt, dass aus einer negativen Anschaltzeit die höchste Wanddicke im Messpunkt M1 resultiert. Negative Anschaltzeit bedeutet, dass zunächst die Zentraldüse und nach einer definierten Zeitverzögerung die Ringdüse zugeschaltet wird. Wie aus dem Diagramm hervorgeht, sollte die Zeitverzögerung möglichst groß sein, um eine hohe Wanddicke am Messpunkt M1 zu erreichen. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Entlüftung des Volumens zwischen Düse und Folie. Wie **Bild 3** zeigt, verhält sich die normierte Wanddicke direkt proportional zur Entlüftungszeit. Die Erkenntnisse zu Differenz-Anschaltzeit und Entlüftungszeit führen zu dem Schluss, dass für das untersuchte Formteil der Einsatz einer Zentraldüse in Kombination mit einer langen Entlüftungszeit vielversprechend ist.

Darüber hinaus haben Heiztemperatur und Zentraldüsendurchmesser einen Einfluss auf die Wanddicke des Formteils an der Messstelle M1. In beiden Fällen verhält sich die normierte Wanddickenverteilung umgekehrt proportional zum Anstieg der Einflussfaktoren. Bei der Heiztemperatur resultiert der Zusammenhang daraus, dass eine niedrigere Abkühlung des Halbzeugs notwendig ist, um eine Temperatur unterhalb der unteren Umformtemperatur des Materials zu erreichen. Dies führt insbesondere bei lokaler Abkühlung zu einer Senkung der lokalen Dehnung. Die Abkühlung des Materials beeinflusst ebenfalls der Zentraldüsendurchmesser. Eine Reduktion des Querschnitts erhöht die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids und verbessert somit den Wärmeübergang.

Formluft-Impact-Technologie

Die Technologie zur gerichteten lokalen Anströmung des Halbzeugs direkt vor und/oder während des Umformvorgangs wird als Formluft-Impact-Technologie (FIT) bezeichnet. Bei der Umformung mit Druckluft wird üblicherweise das Volumen im Oberwerkzeug mit Luft gefüllt. Der Fokus liegt dabei auf niedrigen Werkzeugkosten und kurzen Prozesszeiten. Dahingegen wird bei der FIT über Düsen-systeme die Luftströmung gezielt auf das Halbzeug aufgebracht und damit sowohl ein thermischer als auch ein mechanischer Einfluss (Impact) ausgeübt (Bild). Infolgedessen lässt sich durch eine geeignete Parametrierung der Düsen die Materialverteilung im Kunststoffformteil gezielt steuern. Eine Herausforderung dabei ist die große Anzahl der Einflussparameter, wie z. B. Strömungsquerschnitt, Position, Anströmwinkel und Druck, sowie deren Wechselwirkung.



Funktionsweise der Formluft-Impact-Technologie: mechanischer Impact (links), thermischer Impact (rechts). Die Farbskala beschreibt die Geschwindigkeit der Luftströmung (© Fraunhofer IVV)

Bild 4 zeigt den Verlauf der Folientemperatur bei der Herstellung des Formteils im herkömmlichen Negativ-Druckumformen und bei Einsatz der Formluft-Impact-Technologie. Während der Umformung mittels FIT wurde zunächst die Ringdüse und anschließend die Zentraldüse zugeschaltet. Beim herkömmlichen Thermoformen entsteht bei einem Abstand von 3,7 bis 12 mm von der Rotationsachse während des Umformprozesses eine Temperaturdifferenz von ca. 4 K, wohingegen beim Einsatz von FIT die Temperaturdifferenz ca. 8 K beträgt. Dies bestätigt die These, dass durch die Formluft-Impact-Technologie eine wesentli-

che Abkühlung des Materials erreicht wird. Die zeitliche Verzögerung resultiert aus dem langsameren Druckanstieg aufgrund der Entlüftung.

Weitere wesentliche Einflussparameter auf die normierte Wanddicke für das untersuchte Formteil sind das Halbzeug und der Ringdüsenquerschnitt. Weil der Einsatz von FIT unter anderem eine Abkühlung des Halbzeugs bewirkt, spielen neben der Halbzeugdick auch verschiedene thermische Materialkennwerte eine bedeutende Rolle. Parameter wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Wärmeübergangskoeffizient beeinflussen den zeitlichen und örtli- »

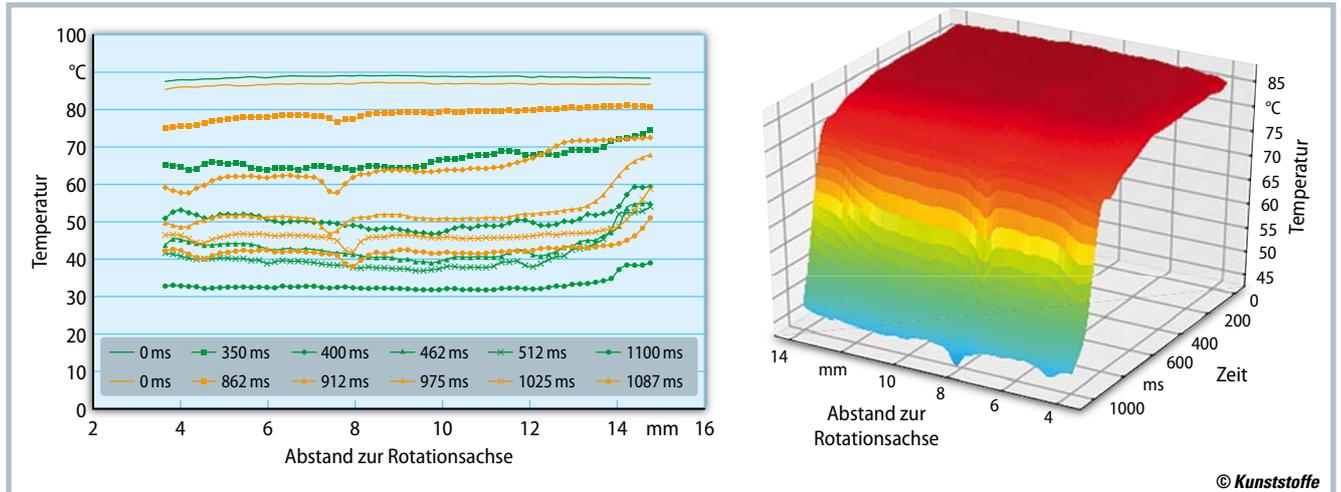


Bild 4. Halbzugtemperatur (links) beim herkömmlichen Negativ-Druckumformen (grün) und dem Einsatz der Formluft-Impact-Technologie (gelb). Rechts das zeitliche Temperaturprofil beim Einsatz der Formluft-Impact-Technologie (Rotationsachse: siehe Bild 1) (Quelle: Fraunhofer IVV)

chen Temperaturgradienten. Das entstehende Temperaturprofil im Halbzeug und der Umformtemperaturbereich des Materials bestimmen das Umformverhalten und die Wanddickenverteilung.

Bestimmend für den Einfluss des Ringdüsenquerschnitts ist der Wärmeübergangskoeffizient. Dieser Kennwert weist eine starke Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit auf. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit wird wie bei der Zentraldüse durch die Reduktion des Düsenquerschnitts erreicht (bis zu Geschwindigkeiten von 30 m/s). Damit verbessert sich der Wärmeübergang und die lokale Abkühlgeschwindigkeit steigt. Sowohl der thermische als auch der mechanische Impact sind abhängig von der Dauer der Einwirkung. Beim Einsatz der Zentraldüse wird aufgrund der Symmetrie konstant die Bodenmitte angeströmt. Durch die starre Positionierung der Düse und der relativen Bewegung der Folie

dazu kann eine längere Anströmung eines lokalen Bereichs nur durch die Berücksichtigung des Ringdüsen-Anströmwinkel realisiert werden. Dadurch lassen sich neben der lokalen Druckerhöhung auch stärkere Abkühlungen erreichen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Optimierung des Materialeinsatzes bei gleichbleibender Funktionalität der thermogeformten Formteile ist ein beständiges Ziel industrieller und wissenschaftlicher Forschung. Ein vielversprechender Ansatz ist die Verwendung der Formluft-Impact-Technologie, weil sie geeignet ist, die lokale Wanddicke anwendungsspezifisch einzustellen und zudem einfach in bestehende Anlagen integriert werden kann. Der Effekt dieser Technologie basiert auf dem thermischen und mechanischen Impact, hervorgerufen durch das auf den Kunststoff auftreffende Fluid.

Der thermische Einfluss und die dadurch hervorgerufene Abkühlung des Halbzeugs im Vergleich zum mechanischen Einfluss bringen den entscheidenden Vorteil. Dies wird von verschiedenen Konstruktions- und Prozessparametern der Düsenkonfiguration hervorgerufen. Zentrale Einflussparameter für das gewählte Formteil sind die Art der Düse, deren Zugschaltzeitpunkte, die Entlüftung, Heiztemperatur und der Zentraldüsen-Durchmesser. Messungen an mehreren Punkten zeigen, dass durch die FIT ein signifikanter Einfluss auf die Wanddickenverteilung genommen werden kann.

Im nächsten Schritt ist, basierend auf der Kenntnis der Einflussgrößen, eine Methode zur einfachen und industrietauglichen Parametrierung der Düsenkonfigurationen zu entwickeln, um so eine Verbesserung des Formteils im Hinblick auf die gestellten Qualitätskriterien zu erreichen. ■