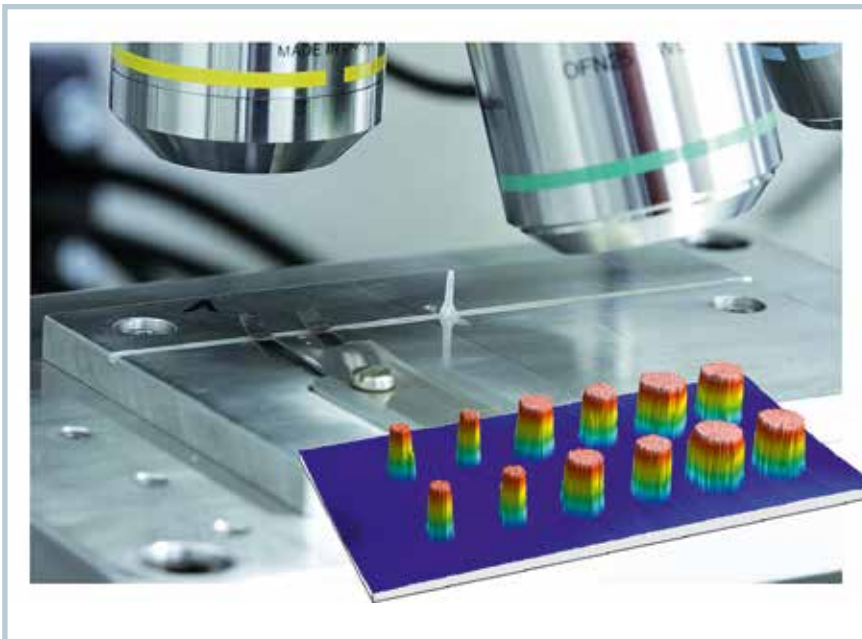


Hier gelten andere Regeln

Simulation versus Praxis – beim Mikrospritzgießen eine besondere Herausforderung

Das Mikrospritzgießen dringt in immer neue Märkte vor. Soll auch hier im Frühstadium der Bauteilentwicklung und Prozessauslegung die Spritzgießsimulation zur Risikominimierung eingesetzt werden, lassen sich die Erkenntnisse aus dem Standard-Spritzgießen nicht eins zu eins übertragen. Das Kunststoff-Zentrum in Leipzig hat sich dieses Problems angenommen und Indikatoren definiert, die die Voraussetzung für zuverlässige Prozessvorhersagen auch im Mikrobereich darstellen.



Auf dem Mikrofließstab (liegend) werden die Mikrostrukturen mit einem Konfokalmikroskop vermessen. Im Vordergrund eine 3D-Darstellung der Mikrostrukturen (Bilder: KuZ)

Um Produktdesign und Herstellprozess abzusichern, ist die Spritzgießsimulation heute ein gängiges Mittel. Wenig zuverlässig funktioniert diese Methode bisher jedoch für Mikrospritzgießanwendungen. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Simulation insbesondere für die Abformung von Mikrostrukturen ungenaue Ergebnisse zur Formfüllung und den resultierenden Druckverlusten liefert.

Mit zunehmendem Miniaturisierungsgrad ändern sich die thermischen Verhältnisse zwischen Werkzeug und Formteil so, dass sich die Realität nur mit einem

experimentell ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten virtuell nachstellen lässt [1–5]. In welchem Umfang dies auch bei der Abformung von Mikrostrukturen notwendig ist, hat das Kunststoff-Zentrum in Leipzig (KuZ) im Rahmen eines Forschungsprojekts systematisch untersucht und dazu die Korrelation zwischen den Ergebnissen der Spritzgießsimulation und der Fertigung mikrostrukturierter Formteile analysiert.

Der Anspruch dieses Forschungsprojekts bestand darin, das Prozessverständnis zum Mikrospritzgießen grundlegend zu untermauern und Zusammenhänge

zwischen den Prozessparametern beim Spritzgießen und der erreichten Qualität z. B. in der Abformgenauigkeit von Mikrostrukturen herauszuarbeiten. Grundsätzlich ging es darum, die Vorteile der Spritzgießsimulation für Makroformteile auf die Mikrotechnik zu übertragen.

Voraussetzungen für die Modellgenerierung und Simulation

Für die Umsetzung des Vorhabens wurde eine komplexe Untersuchungsmethode entwickelt, die darauf basiert, mit mehreren Sensoren die wichtigsten Prozessparameter beim Spritzgießen aufzuzeichnen. Neben dem in der Kavität lokal variierenden Werkzeuginnendruck spielt der Druckverlauf im Einspritzzylinder aufgrund der Kompressibilität der Schmelze und des daraus resultierenden Volumensstroms beim Einspritzen eine besondere Rolle.

Die Versuche wurden auf einer von KuZ und DesmaTec entwickelten Mikrospritzgießmaschine (Typ: formicaPlast) durchgeführt. Das eigens dafür entwickelte Mikrofließstab-Werkzeug ist so konstruiert, dass sich die Formteildicke sehr einfach zwischen 0,2 und 1 mm ändern lässt. Die Formteildicke beeinflusst die Druck- und Abkühlverhältnisse in der Schmelze und damit die Strukturabformung. Die Abformgenauigkeit wird mithilfe von auf dem Fließstab angeordneten zylindrischen Mikrostrukturen (Durchmesser: 100 bis 200 µm; Höhe: 150 µm) untersucht. Die drei Mikrostrukturbereiche befinden sich in verschiedenen Abstän-

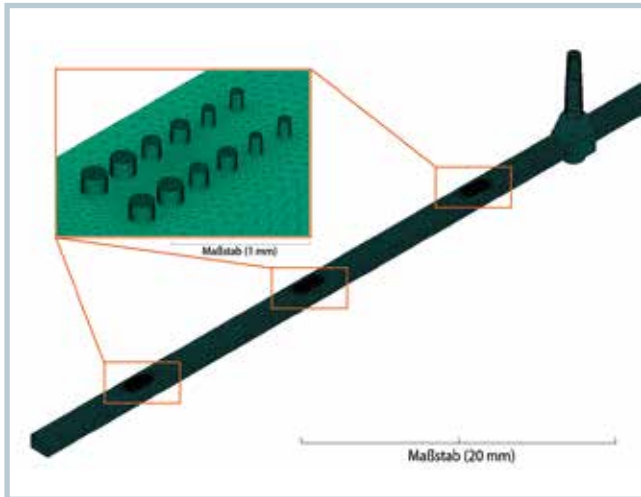


Bild 1. Der Mikrofließstab enthält drei Bereiche mit Mikrostrukturen und lässt sich mit Autodesk Moldflow als Netzmodell mit extrem fein vernetzten Mikrostrukturen erzeugen

den zum Anguss auf einer Hälfte des Fließstabs (**Bild 1**).

Grundlegende Untersuchungen mit der entwickelten Modellgeometrie offenbaren bei den für das konventionelle Spritzgießen üblichen Standardeinstellungen, dass die Güte der Simulationsergebnisse von der Kantenlänge der Elemente des generierten FE-Netzes abhängt. Dabei wurde das Netz nicht nur im jeweiligen Simulationsprogramm – zum Einsatz kamen Autodesk Moldflow 2012 und Cadmould 3D-F in der Version 6.1 – erzeugt, sondern auch unter Verwendung eines externen Mesh-Generators der CAD-Software NX.

Der Einfluss des Netzes auf den Druckverlauf in der Simulation zeigt sich sowohl anhand der Feinheit (Kantenlänge) der erzeugten Netzstruktur als auch durch die Abhängigkeit von der verwendeten Software. Mit zunehmender Netzfeinheit und abnehmender Wanddicke werden diese Schwankungen immer größer. Um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, das Netz einerseits programmintern zu generieren und andererseits die Kantenlänge der Elemente nicht kleiner als 0,25 mm zu wählen.

Bewertungskriterien für die Abformung der Mikrostrukturen

Das Spritzgießwerkzeug ermöglicht es, die Wanddicke des Mikrofließstabs in vier Stufen über austauschbare Leisten zu variieren. Sensoren und Mikrostrukturen bleiben bei der Wanddickenänderung unangetastet (**Bild 2**). Die Mikrostrukturen befinden sich in drei Formeinsätzen in der düsenseitigen Formplatte. Diese sind

als Durchgangslöcher mit angrenzendem Kern gefertigt, sodass die Kavität gut entlüftet und die Mikrostruktur exakt abgebildet wird (**Bild 3**).

Die Thermofühler sind in einem düsenseitigen Formeinsatz fixiert und werden zwischen Formplatte und Aufspannplatte aus dem Werkzeug geführt. Somit behalten sie beim Variieren der Wanddicke ihre Position. Die Drucksensoren sind auswerferseitig im Bereich der Mikrostrukturen positioniert, Heizung und Temperierung kavitätstern im Werkzeug eingebaut.

Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten

Die Abformgenauigkeit wurde mithilfe eines konfokalen Weißlichtmikroskops (Typ: ConfoCam C301; Hersteller: Confovis GmbH, Jena) überprüft. Diese ist am höchsten, wenn der obere Durchmesser der Mikrostrukturen scharfkantig und die Deckfläche nicht kuppelartig, sondern als flache Ebene abgeformt werden (**Titelbild**). Ausgewertet wurde sowohl die Höhe der Mikrostrukturen als auch der Durchmesser der Deckfläche.

Die Untersuchungen ergaben eine Reihe wichtiger Erkenntnisse. So konnte die Eignung des Reverse Engineering (**siehe Kasten 5.44**) und der daraus resultierenden Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten für Materialien wie etwa ein PA 6 (Typ: Akulon F223D natur; Hersteller: DSM Engineering Plastics) und ein PMMA (Typ: Plexiglas 7N; Hersteller: Evonik Industries AG) anhand einer zuvor noch nicht untersuchten Mikroformteilgeometrie (Fließstab) nachgewiesen werden. »

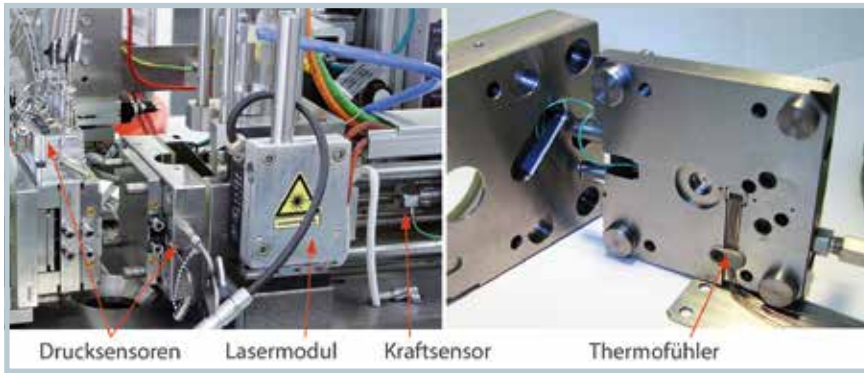


Bild 2. In die Mikrospritzgießmaschine und ins Werkzeug sind mehrere Sensoren integriert, um die Prozessparameter zu erfassen

Reverse Engineering

Das Anpassen des Wärmeübergangskoeffizienten in der Spritzgießsimulation erfolgt auf Basis experimentell ermittelter Zusammenhänge zwischen Spritzdruck und Füllgrad aus den Formfüllstudien einer präzisen Mikrospritzgießmaschine.

Die Autoren

Dipl.-Wi.-Ing. Cindy Löser ist am Kunststoff-Zentrum in Leipzig (KuZ) wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Mikrokunststofftechnik; loeser@kuz-leipzig.de

Dr.-Ing. Gábor Jüttner ist am KuZ wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Mikrokunststofftechnik; juettner@kuz-leipzig.de

Dr. Peter Bloss ist seit 2001 Geschäftsführer am KuZ; blossom@kuz-leipzig.de

Dank

Diese Arbeit wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags (Förderkennzeichen: VF110014).

Service

Literatur & Digitalversion

» Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/1019613

Beim ersten Kontakt zwischen Schmelze und Werkzeug spielt die Viskosität eine große Rolle. Die Versuche zeigen, dass die Wärmeübergangskoeffizienten mit zunehmender Zylinder- und Werkzeugtemperatur steigen (**Bild 4**). Bei höheren Verarbeitungstemperaturen ist aufgrund der geringeren Viskosität der Kunststoffschmelze die Abformung der Werkzeugwand präziser. Damit verbessert sich der Wärmeübergang zwischen Schmelze und Werkzeug.

Mit steigender Einspritzgeschwindigkeit (ab 50 mm/s) verringert sich der Wärmeübergangskoeffizient, im Fall der höchsten Einspritzgeschwindigkeit von 200 mm/s liegt er nur noch bei rund 1500 W/m²K (**Bild 5**). Auch wenn die Druckunterschiede zwischen den einzelnen Prozesseinstellungen nicht erheblich sind, unterscheiden sich die Wärmeübergangskoeffizienten deutlich. Beim schnellen Einspritzen vollzieht sich der Formfüllprozess innerhalb kürzester Zeit, sodass kein vollständiger Kontakt zwischen Werkzeug und Schmelze zustande kommt. Folglich sinkt der Wärmeübergangskoeffizient.

Beim extrem langsamen Einspritzen von 10 mm/s wird ein umgekehrter Trend beobachtet: Der Wärmeübergangskoeffizient wird auch hier kleiner, weil die thermische Schwindung sich wegen der fortgeschrittenen Ausbildung einer Randschicht nicht mehr durch einen höheren Druck im Kavitätinneren kompensieren lässt.

Vergleich zwischen Simulation und Praxis

Der Einfluss unterschiedlicher Wanddicken bei gleicher Formteilgeometrie auf die Abformung von Mikrostrukturen ist eindeutig. Aufgrund des höheren Werkzeuginnendrucks bei kleineren Wanddicken zeigen sich hier nahezu unabhängig von den Prozesseinstellungen scharfkantige Mikrostrukturen. Die Abhängigkeit der Abformqualität steigt mit zunehmender Wanddicke an. Bei einer Wanddicke von 1,0 mm – hier ist die Entfernung der Mikrostrukturbereiche vom Anguss am größten – beeinflussen die Einstellparameter die Abformung am stärksten.

Entgegen der Erwartung werden die Mikrostrukturen bei höheren Schmelztemperaturen nicht besser abgeformt. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der Werkzeugtemperatur unverkennbar: Die Mikrostrukturen sind bei höheren Werkzeugtemperaturen in allen drei Strukturbereichen exakt abgeformt.

Erstmals konnten auch teilgefüllte Mikrostrukturen mit der Spritzgießsimulation dargestellt werden. Häufig zeigen sich nur beim kleinsten Durchmesser von 0,1 mm und vereinzelt beim mittleren Durchmesser von 0,15 mm – unabhängig, ob angussnaher oder -ferner Mikrostrukturbereich – teilgefüllte Mikrostrukturen. Vermutlich hat der experimentell ermittelte Wärmeübergangskoeffizient in Kom-

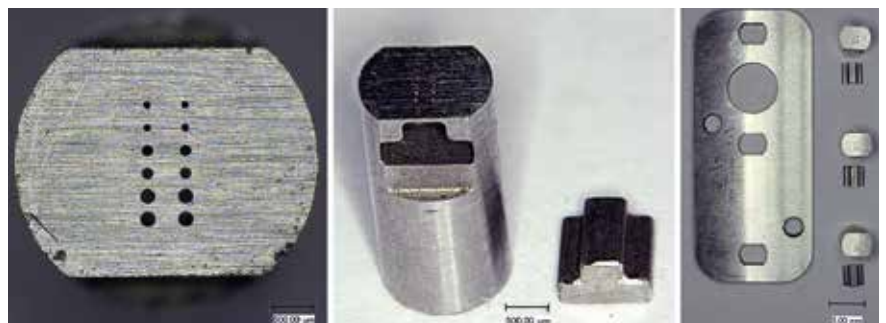


Bild 3. Links: Anordnung der Mikrostrukturen auf einem Formeinsatz; Mitte: Formeinsatz mit integriertem Kern; rechts: die Halteplatte mit den drei mikrostrukturierten Formeinsätzen

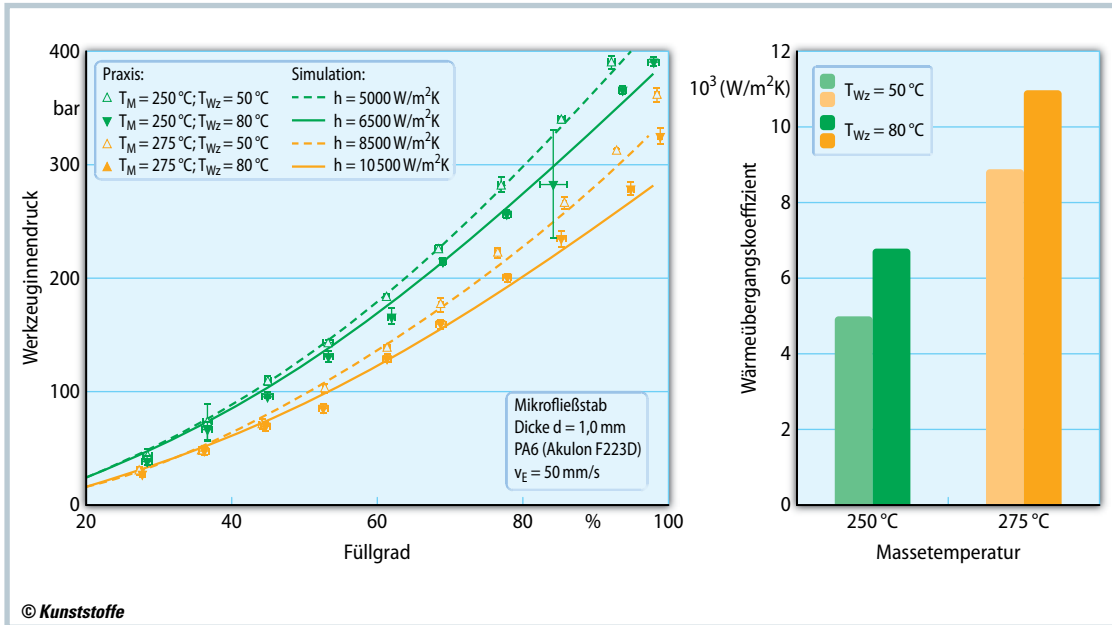


Bild 4. Die Wärmeübergangskoeffizienten steigen mit zunehmender Zylinder- und Werkzeugtemperatur (hier angegeben bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 50 mm/s)

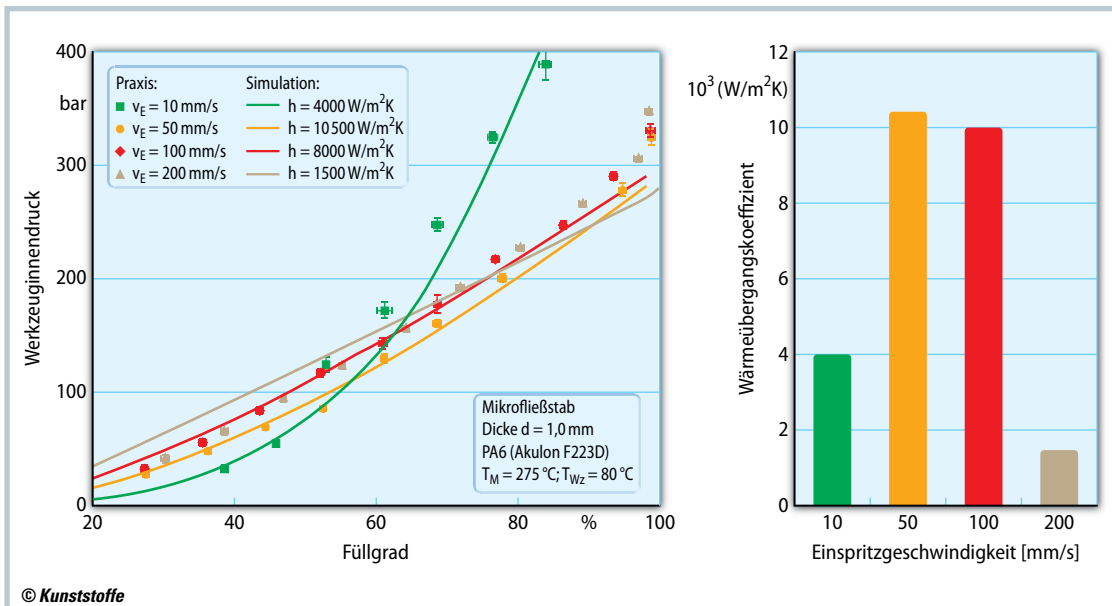


Bild 5. Darstellung der Druck-Füllgrad-Beziehung für den 1 mm dicken Mikrofließstab bei verschiedenen Einspritzgeschwindigkeiten. Der Wärmeübergangskoeffizient fällt mit der Einspritzgeschwindigkeit (Ausnahme bei sehr langsamem Einspritzen)

bination mit den Einstellparametern diese Darstellung der Teilfüllung der Mikrostrukturen ermöglicht.

Die experimentell ermittelte Fließfrontgeschwindigkeit wurde als entscheidender Parameter für die Frage bestimmt, warum praktisch teilgefüllte Mikrostrukturen in der Spritzgießsimulation häufig als gefüllt abgebildet werden. Bei den praktischen Versuchen zeigt sich zu Beginn des Einspritzens eine hohe Geschwindigkeit der Fließfront. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Schmelze im Bereich des Angusskegels während des Füllens so stark komprimiert wird, dass sie sich zu beiden Hälften des Mikrofließstabs explosionsartig ausdehnt.

Aufgrund der hohen Geschwindigkeit kann die Werkzeugoberfläche nicht richtig benetzt werden. Das kann dazu führen, dass besonders in Kombination mit einer niedrigen Werkzeugtemperatur die kleinsten Mikrostrukturen angussnah nicht vollständig abgeformt werden. Mit zunehmendem Fließweg nimmt die Fließfrontgeschwindigkeit kontinuierlich ab, aber in einem Bereich, in dem Abformungen von Mikrostrukturen auch am Fließwegende noch möglich sind. Sinkt die Fließfrontgeschwindigkeit stärker, hat sich die Fließfront am Fließwegende so stark abgekühlt, dass das Abformen von Mikrostrukturen wieder erschwert wird.

Der mittlere Mikrostrukturbereich zeigte sich bei allen Versuchen als der mit den besten Abformergebnissen. Die tatsächliche Fließfrontgeschwindigkeit ist an dieser Stelle vergleichbar mit der konstanten mittleren Fließfrontgeschwindigkeit in der Simulation. Hier ist dieser hohe Anstieg zu Beginn des Einspritzens nicht zu verzeichnen. Die Untersuchungen legen einen Schluss nahe: Die konstante mittlere Fließfrontgeschwindigkeit in der Simulation könnte eine Erklärung dafür sein, dass selbst die kleinste Mikrostruktur in der Berechnung vollständig gefüllt wird – und damit auch für die erheblichen Unterschiede in den Abformergebnissen zwischen Simulation und Praxis. ■