

Christopherus Bader und Per Magnus Kristiansen

# Auf den Punkt gebracht

Prozessregelung



PRIAMUS SYSTEM TECHNOLOGIES AG  
Bahnhofstrasse 36  
CH-8201 Schaffhausen / Schweiz

Tel. +41 (0)52 632 2626  
Fax +41 (0)52 632 2627  
info@priamus.com  
www.priamus.com

Die gezielte Regelung der Fließeigenschaften im Werkzeug ist eine Voraussetzung für die Herstellung von gleichen Teilen auf unterschiedlichen Maschinen

**Prozessregelung.** Die Regelung des Schmelzflusses und der Viskosität über Druck- und Temperatursensoren im Spritzgießwerkzeug bildet eine wesentliche Voraussetzung für eine maschinenunabhängige Qualitätsregelung eines Spritzteils. Versuche mit Nanostrukturen in einer Kavität zeigen, dass außer Festigkeit und Abmessungen eines Spritzteils auch bisher nur schwer zu beschreibende Parameter wie die Abbildungsgenauigkeit von Strukturen gezielt geregelt werden können.

## Auf den Punkt gebracht

**CHRISTOPHERUS BADER  
PER MAGNUS KRISTIANSEN**

**D**urch Kombination eines Druck- und eines Temperatursensors können der Schmelzfluss und die Viskosität direkt in der Kavität eines Spritzgießwerkzeugs bestimmt und geregelt werden [1]. Um den Spritzgießprozess zu regeln und auf unterschiedlichen Spritzgießmaschinen anzupassen, müssen die Grundparameter der Maschinen so verändert werden, dass immer dieselben

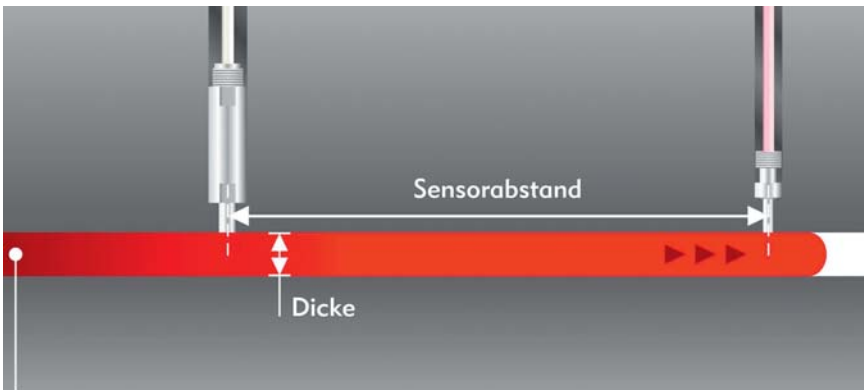
Fließbedingungen, Kompressionsverhältnisse und Schwindungsbedingungen vorherrschen. Wird ein Werkzeug jedoch auf unterschiedlichen Maschinen eingesetzt, können identische Bedingungen im Spritzteil nur erreicht werden, wenn sie mithilfe von Werkzeuginnendruck- und Werkzeugwandtemperatur-Sensoren eingestellt werden. Je nach Maschine werden dann die Einspritzgeschwindigkeit, die Schmelzetemperatur im Zylinder der Maschine oder im Verteiler eines Heißkanals und die Werkzeugoberflächentemperatur über eine Leitreechner-Schnittstelle so lange verändert, bis die Zielwerte in der Kavität erreicht sind. Auf diese Weise kann

ein Werkzeug auch auf Maschinen unterschiedlicher Größe, mit unterschiedlichen Schneckendurchmessern und mit unterschiedlichem Funktionsprinzip – z. B. hydraulisch oder elektrisch – eingesetzt werden, ohne den einmal optimierten Zustand eines Spritzteils zu verlieren.

### Die Regelung der Fließbedingungen

Auf den ersten Blick scheint es naheliegend, die Messsignale Druck und Temperatur miteinander zu kombinieren; allerdings erbringt die Messung der beiden Parameter an derselben Stelle kaum ei-

**ARTIKEL ALS PDF** unter [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de)  
Dokumenten-Nummer KU110767



**Bild 1. Werkzeuginnendruck- und Werkzeugwandtemperatur-Sensor werden zur automatischen Ermittlung und Regelung der Schubspannung und Schergeschwindigkeit in der Kavität genutzt**

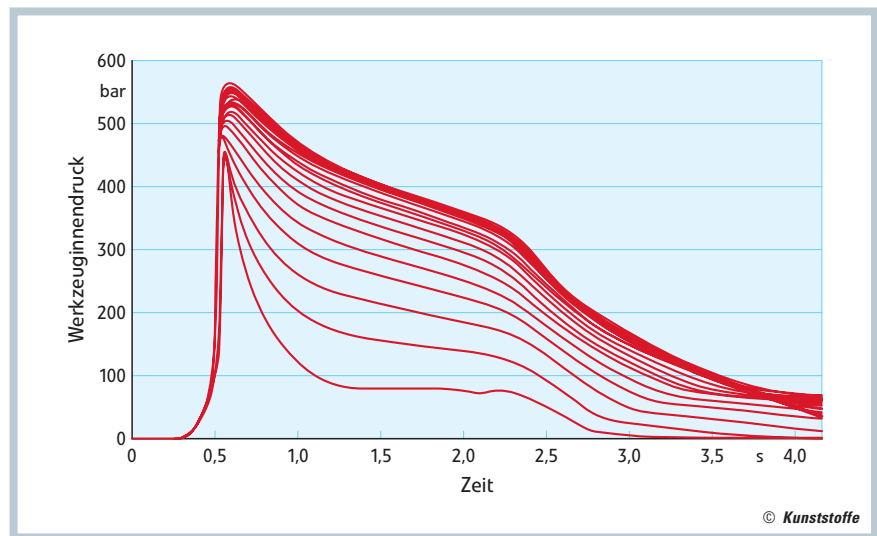
nen Nutzen in der Praxis. Erst ein gewisser Messabstand ermöglicht die Bestimmung von Messgrößen, die den Schmelzfluss beschreiben – so wie die Schergeschwindigkeit, die Schubspannung, und damit auch die Viskosität der Schmelze während der Produktion. Dazu werden nacheinander ein Druck- und ein Temperatursensor in Fließrichtung eingebaut (Bild 1), um mit einem automatisierten Verfahren über die durchschnittliche Wanddicke und den Abstand der beiden Sensoren zueinander sowohl die Schergeschwindigkeit als auch die Schubspannung direkt in der Kavität zu ermitteln. Als Basis der Berechnung dient einerseits die ermittelte Fließzeit der Schmelze zwischen den beiden Sensoren, und andererseits der ermittelte Werkzeuginnendruck in dem Moment, in dem die Schmelze an der zweiten Sensorposition eintrifft [2].

Hierzu ist es notwendig, den Signalanstieg möglichst exakt in den Momenten zu erkennen, in denen die Schmelze die beiden Sensorpositionen erreicht. Da es sich je nach Abstand der Sensoren und je nach Geschwindigkeit der Schmelze um sehr kleine Zeitunterschiede im Millisekundenbereich handeln kann, ist eine Ermittlung der Schmelzefront über eine Schaltschwelle im Druck- und Temperatursignal prinzipiell ungeeignet. Auch bei einer Prozessregelung würde sich der Schmelzfluss derart verändern, dass das Erkennen der Schmelzefront über einfache Schaltschwellen nicht möglich wäre.

Die Schergeschwindigkeiten und Schubspannungen – und damit die Viskosität der Schmelze – müssen deshalb geregelt werden, weil sie die Qualität des fertigen Spritzteils maßgeblich beeinflussen. Unterschiedliche Fließbedingungen führen beispielsweise zu unterschiedlich ausgebildeten Randschichten bei teilkristallinen Materialien, zu uneinheitlichen Bindenähten, zu einer schwankenden Abbildungsgenauigkeit von Oberflächen-

ken die gleichen Nachdruckeinstellungen auf derselben Maschine keineswegs, dass auch die gleiche Verdichtung im Teil erfolgt. Sie muss deshalb mithilfe des Werkzeuginnendrucks gemessen und gegebenenfalls nachgeführt werden.

Um die gleiche Verdichtung auf verschiedenen Maschinen zu erreichen, müssen einige Aspekte beachtet werden. Einerseits müssen die Stützpunkte mehrerer Nachdruckstufen richtig interpretiert und angepasst werden, da sowohl deren Anzahl als auch Logik von Maschine zu Maschine variiert. Gleichzeitig muss der Werkzeuginnendruck so geregelt wer-



**Bild 2. Mehrere überlagerte Werkzeuginnendruck-Verläufe wurden über die Nachdruckstufen der Spritzgießmaschine automatisch auf den Zielwert geregelt (Kompressionsregelung)**

strukturen bis hin zu sporadisch ungefüllten Teilen. Chargenschwankungen des Materials sind ein weiterer Grund für unterschiedliche Fließbedingungen, sie müssen deshalb erkannt und kompensiert werden.

### Die Regelung der Kompression

Um sicherzustellen, dass ein Spritzteil immer mit der gleichen Verdichtung, also auch Festigkeit hergestellt wird, muss der gleiche Werkzeuginnendruck im Spritzteil gewährleistet sein. Da sich die Druckverhältnisse in der Kavität je nach Prozessbedingungen jedoch ändern, bewir-

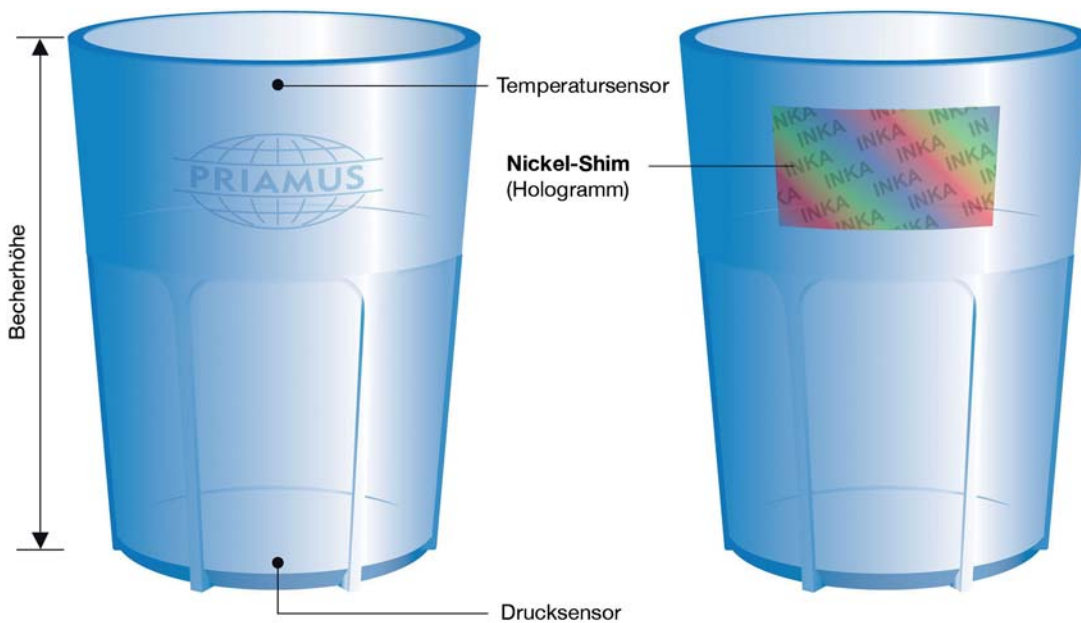
den, dass die Einflüsse von Einspritzen und Nachdruck voneinander getrennt werden. Es ist deshalb wenig sinnvoll, nur den Maximalwert des Werkzeuginnendrucks als Basis heranzuziehen, da dieser nicht nur aufgrund des Nachdrucks, sondern auch aufgrund einer (zu) hohen Einspritzgeschwindigkeit entstehen kann. Anhand mehrerer überlagelter Werkzeuginnendruck-Verläufe lässt sich zeigen, wie die Verdichtung eines Spritzteils über die Variation der Nachdruckeinstellungen optimiert und geregelt werden kann (Bild 2).

### Die Regelung der Schwindung

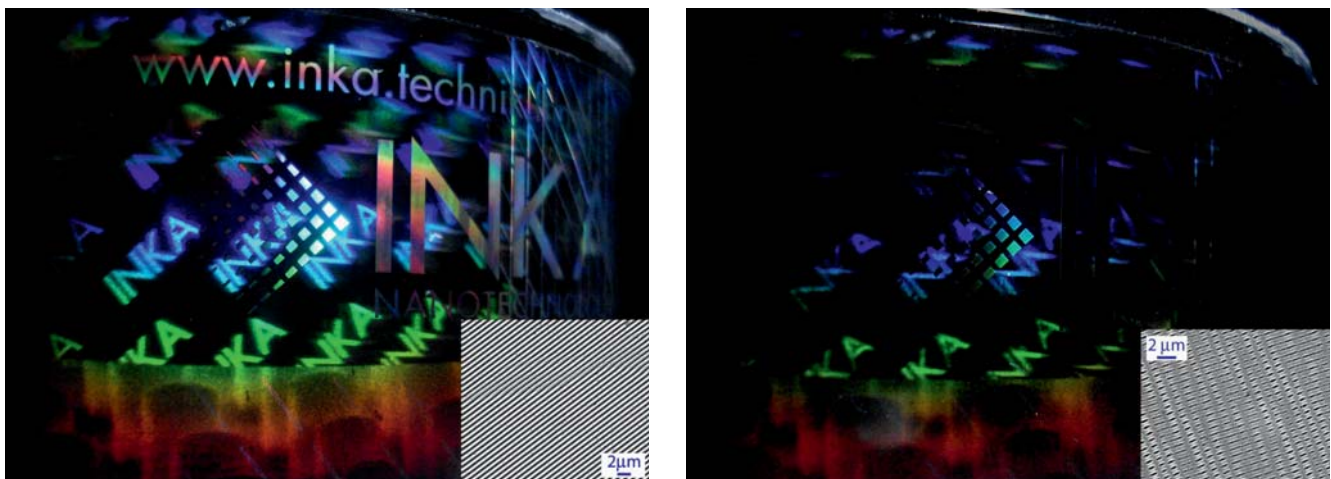
Für die Schwindungsbedingungen eines Spritzteils gelten dieselben Voraussetzungen: Es muss sichergestellt sein, dass immer die gleichen Bedingungen am Teil selbst vorherrschen, unabhängig von der Art, Größe und Einstellung der verwendeten Spritzgießmaschine. Im Fall der Schwindung liegt dies ohnehin nahe, da nicht ein Maschinenparameter, sondern

**i Kontakt**

**Priamus System Technologies AG**  
**CH-8201 Schaffhausen**  
**Schweiz**  
**TEL +41 52 6322626**  
**→ [www.priamus.com](http://www.priamus.com)**



**Bild 3.** Becher aus PC mit holografischer und diffraktiver Abformung eines Nickel-Shims. Die Abformung der Oberfläche wurde mit einem Druck- und Temperatursensor automatisch geregelt



**Bild 4.** Abformqualität des Nickel-Shims unter optimalen (links) und unter bewusst ungünstig gewählten Prozessbedingungen (rechts) inklusive einer REM-Aufnahme der nanostrukturierten Diffraktionsgitter

vor allem die Werkzeugoberflächentemperatur in der Kavität geregelt werden muss, was im Idealfall und der Einfachheit halber auch die Leitreechner-Schnittstelle der Maschine leistet. Da sich die Schwindung eines Spritzteils – und damit dessen endgültige Maße – über das  $p, v, T$ -Verhalten erklären lässt, werden diese Gesetzmäßigkeiten dieser Regelung zugrunde gelegt. Es werden deshalb nicht nur die Oberflächentemperaturen auf einen bestimmten Wert geregelt, sondern sie werden dann auf einen bestimmten Wert geregelt, wenn der Werkzeuginnen-Druck wieder Atmosphärendruck erreicht.

Dies kann aufgrund der unterschiedlichen Prozessbedingungen durchaus zu unterschiedlichen Zeitpunkten geschehen, weshalb eine reine Regelung der Werkzeugtemperatur keinesfalls das gleiche Schwindungsverhalten gewährleistet.

Geht man davon aus, dass sich mit unterschiedlichen Temperiergeräten auch das Temperierverhalten – konkret z. B. der Durchfluss des Kühlmediums – verändert, müssen konsequenterweise die vorgegebenen Einstellungen so lange verändert werden, bis am Spritzteil wieder die gleichen Bedingungen vorherrschen.

### Strukturabformung unter Kontrolle

Die Abformung von Mikro- und Nanostrukturen im Spritzgießprozess stellt hohe Anforderungen an die genaue Kontrolle der Prozessparameter. Die Replikation, insbesondere bei hohen Aspektverhältnissen der abzuformenden Strukturen, hängt wesentlich von der Werkzeugwandtemperatur und dem Fließverhalten des Polymers ab, das durch die Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur und der

Schergeschwindigkeit bestimmt wird. Die Regelung dieser Parameter bietet somit eine ideale Voraussetzung für die genaue Abformung von Mikro- und Nanostrukturen auf der Spritzteiloberfläche.

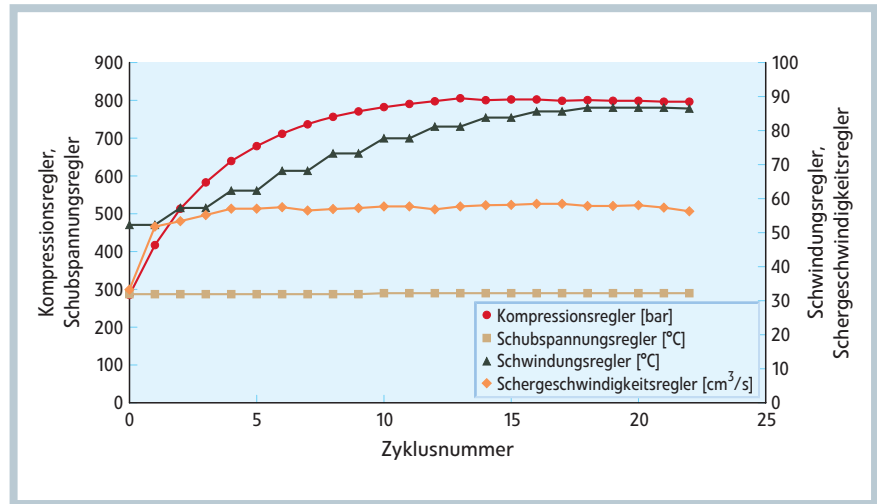
Für einen Becher (**Bild 3**) aus Polycarbonat (Typ: Lexan Resin 123R; Hersteller: Sabic Innovative Plastics) wurde in einer Versuchsreihe der Einfluss unterschiedlicher Maschineneinstellungen auf die resultierenden Formteilabmessungen sowie das Artikelgewicht protokolliert. Das Werkzeug ist außer mit einem Druck- und einem Temperatursensor mit einem in die Form integrierten Nickel-Shim ausgerüstet, der eine Reihe holografischer und diffraktiver Elemente beinhaltet, die unterschiedlich stark auf Veränderungen in den Verarbeitungsbedingungen reagieren. Die holografischen Elemente zeichnen sich durch eine geringe Strukturtiefe (Aspektverhältnis von 0,5 und kleiner)

aus, während die diffraktiven Elemente je nach Lage eine Strukturtiefe von bis zu  $0,5\ \mu\text{m}$  aufweisen.

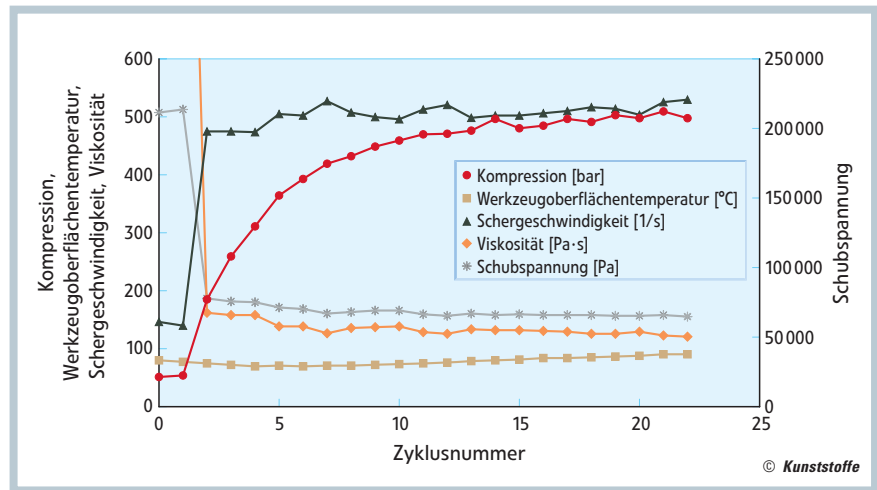
Um die Abformqualität des verwendeten Nickel-Shims in Abhängigkeit der Verarbeitungsbedingungen zu veranschaulichen, wurden Teile aus den Bechern ausgesägt und unter äquivalenten Beleuchtungsbedingungen (schräg von oben einfallendes Weißlicht) fotografiert. In den Aufnahmen der einmal bei optimalen und einmal bei bewusst ungünstig gewählten Prozessbedingungen hergestellten Spritzlinge lassen sich markante Unterschiede in den auftretenden Interferenzeffekten erkennen – dies zeigt sich auch in den dazugehörigen Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen (REM) der nanostrukturierten Diffraktionsgitter (Bild 4).

Erwartungsgemäß ist die holografische Abbildung in beiden Extremfällen noch gut sichtbar. Dies ist auf die geringe Strukturtiefe von ca.  $200\ \text{nm}$  in diesem Bereich des Nickel-Shims zurückzuführen und demonstriert, dass oberflächennahe Hologramme ohne großen Aufwand im Spritzgießprozess realisierbar sind. In diesem Bereich sind mittels REM auch kaum Unterschiede zwischen den zwei Extrembedingungen feststellbar.

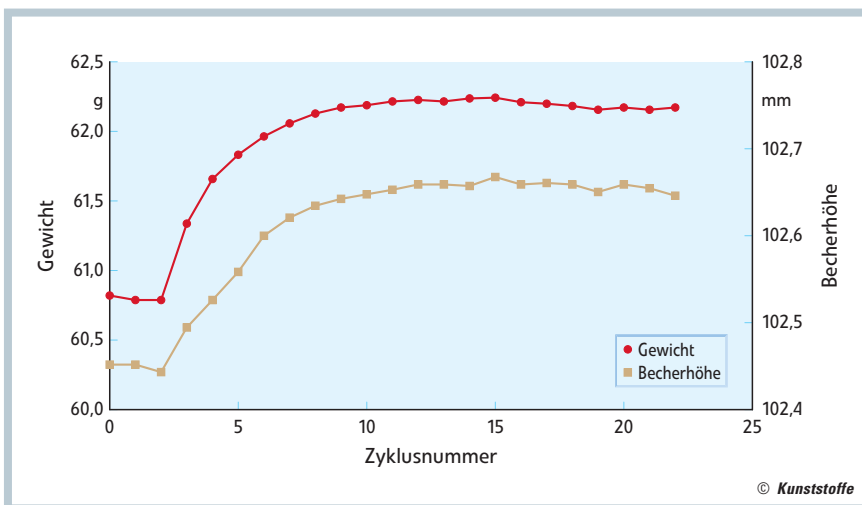
Die eindrucklichsten Unterschiede finden sich bei den großen, horizontal verlaufenden Schriftzügen, die aus diffraktiven Liniengittern (Linienbreite  $400\ \text{nm}$ , Periode  $800\ \text{nm}$ ) aufgebaut sind. Diese Liniengitter weisen die größten Aspektverhältnisse auf (Strukturtiefe  $> 0,5\ \mu\text{m}$ ), weswegen bei ungünstigen Prozessbedingungen eine schlechtere Abformung erreicht wird. Dies verdeutlichen ebenso die REM-Aufnahmen, in denen sich die Ab-



**Bild 5.** Die einzelnen Regler passen die Einstellwerte der Maschine – Einspritz- und Nachdruckprofil, Schmelze- sowie Werkzeugoberflächentemperatur – automatisch an, bis die Zielwerte in der Kavität erreicht sind. Zur Feinjustierung kann eine Heißkanalbalancierung zugeschaltet werden



**Bild 6.** Die Zielwerte – beispielsweise aus einer vorangegangenen Prozessoptimierung – werden schon nach wenigen geregelten Zyklen erreicht. Startwerte: Werkzeugoberflächentemperatur:  $50\ ^\circ\text{C}$ , Schmelzetemperatur:  $280\ ^\circ\text{C}$  (Zone 1–3), Einspritzgeschwindigkeit:  $10\ \text{cm}^3/\text{s}$ , Nachdruck:  $150\ \text{bar}$  (erste Stufe); Zielwerte: Werkzeugoberflächentemperatur:  $90\ ^\circ\text{C}$ , Schubspannung:  $65\ 700\ \text{Pa}$ , Schergeschwindigkeit:  $510\ \text{s}^{-1}$ , Nachdruck:  $500\ \text{bar}$  an Sensorposition



**Bild 7.** Gewicht und Höhe des Bechers sind auf unterschiedlichen Maschinen reproduzierbar

(Bilder: Priamus)

formschwierigkeiten bei ungünstigen Verarbeitungsbedingungen (hier hohe Viskosität, durch niedrige Einspritzgeschwindigkeit erreicht) sowohl in undurchgängigen Linien wie auch in einer niedrigeren Strukturtiefe spiegeln.

### Vollautomatische Prozessregelung

Die in diesen Versuchen abgeformten Strukturen haben alle ein relativ kleines Aspektverhältnis (max. 1,5), weshalb der Einfluss der Schmelze- und Werkzeugtemperatur nur unwesentlich zum Tragen kommt. In diesem Fall wird die Schmelzeviskosität zum entscheidenden Prozessparameter für die Abformgüte, was vor allem bei niedrigen Einspritzgeschwindigkeiten

sichtbar wird. Der so erzwungene markante Anstieg in der Viskosität hatte einen negativen Einfluss auf die Abformung des Nickel-Shims zur Folge.

In der Praxis müssen die Zielwerte für das Fließen, Komprimieren und Schwinden eines Formteils automatisch geregelt werden, um ein Werkzeug auf verschiedenen Maschinen einsetzen zu können. Im Versuch wurden die Einspritz- und Nachdruckprofile sowie die Schmelze- und Werkzeugtemperaturen über die Leitreechner-Schnittstelle einer Allrounder-Spritzgießmaschine (Typ: 420S 800-350; Hersteller: Arburg GmbH + Co KG) automatisch eingestellt, bis die Zielwerte erreicht waren. Die einzelnen Regler veränderten die Einstellwerte der Maschine langsam, wobei sich vor allem die Einstellwerte der Einspritzgeschwindigkeit schnell den Endwerten annäherten (**Bild 5**). Die in der Werkzeugkavität gemessenen und geregelten Zielwerte wurden innerhalb weniger Zyklen erreicht (**Bild 6**). Zum Vergleich wurden sowohl die Becherhöhe wie auch das Gewicht für diese Zyklen ermittelt, die mithilfe der Regelung jederzeit reproduziert werden können (**Bild 7**).

### Ausblick

Die Versuche haben gezeigt, dass sich neben den unmittelbar messbaren Parametern wie Festigkeit sowie Formteilabmessungen und -gewicht auch die Abformgenauigkeit von Mikro- und Nanostrukturen gezielt beeinflussen und regeln lässt. Neben der Regelung der Kompressions-

und Schwindungseigenschaften ist hier vor allem die Regelung der Fließeigenschaften von Bedeutung. Es ist davon auszugehen, dass sich die Oberflächenqualität von Spritzteilen auch bei anderen Verfahren wie dem Variotherm-Verfahren in ähnlicher Weise beeinflussen lässt.

Generell wird der Einsatz einer maschinenunabhängigen Qualitätsregelung immer dann von Nutzen sein, wenn die Prozessoptimierung und die eigentliche Produktion auf unterschiedlichen Maschinen oder Standorten aufbauen. Im Gegensatz zu DoE-basierten Systemen, die einen hohen Zeitaufwand und viel technisches Know-how erfordern, um einen bestimmten Zustand eines Spritzteils zu beschreiben, ist die beschriebene Regelung vergleichsweise einfach zu implementieren. Zum ersten Mal steht mit diesem Ansatz auch ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die einmal optimierten Werte einer Finite-Elemente-Simulation realistisch und automatisch nachgefahren werden können. ■

### DANK

Der Dank der Autoren gilt

- Oskar Häfeli, dem Laborleiter Kunststofftechnik der Fachhochschule Nordwestschweiz, für die Unterstützung bei den Versuchsreihen sowie für die kompetenten Ratschläge zur Realisierung dieser Prozessregelung;
- der AWM Mold Tech AG, Muri/Schweiz, für die werkzeugtechnische Unterstützung;
- der Lenorplastics AG, Aesch/Schweiz, für das Überlassen des Materials;
- der Arburg AG, Münsingen/Schweiz, für die Bereitstellung einer Labormaschine;

■ Christian Spreu vom Paul Scherrer Institut in Villigen/Schweiz, für die REM-Untersuchungen der spritzgegossenen Proben.

### LITERATUR

- 1 Bader, C.; Zeller, S. C.: Die Entdeckung der Schmelzefront. *Kunststoffe* 100 (2010) 6, S. 46–50
- 2 Priamus Patentanmeldung WO 2009/040077

### DIE AUTOREN

DIPL.-ING. (FH) CHRISTOPHERUS BADER, geb. 1962, ist seit 2001 Geschäftsführer der Priamus System Technologies AG, Schaffhausen/Schweiz.

PROF. DR. PER MAGNUS KRISTIANSEN, geb. 1975, ist stellvertretender Leiter der Institute für nanotechnische Kunststoffanwendungen (INKA) und für Kunststofftechnik (IKT) an der Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik, Windisch/Schweiz.

### SUMMARY

#### HITTING THE NAIL ON THE HEAD

PROCESS CONTROL. The control of melt flow and viscosity via pressure and temperature sensors in injection molding tools is a major prerequisite for machine independent quality control of a molded part. Trials with nanostructures in a cavity show that apart from the strength and dimensions of a molded part previously difficult to describe parameters such as the reproduction accuracy of structures can also be controlled in a targeted manner.

*Read the complete article in our magazine*

**Kunststoffe international** and on

[www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)