

# Die Umschaltproblematik und ihre Folgen

## *Phasenlose Prozessregelung soll den Umschaltvorgang revolutionieren*

Der Umschaltvorgang zwischen Einspritz- und Nachdruckphase ist immer wieder ursächlich für eine verminderte Bauteilqualität beim Spritzgießen. Ein alternatives Prozessführungskonzept soll Abhilfe schaffen, indem es den Umschaltvorgang vollständig vermeidet. Dazu wird der Werkzeuginnendruckverlauf für den gesamten Füllvorgang vorgegeben.



Typische Spritzgießfehler entstehen durch einen falschen Umschaltzeitpunkt zwischen Einspritz- und Nachdruckphase (© IKV)

**D**ie Anwendung der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase und der druckgeregelten Nachdruckphase hat bereits ein hohes Niveau erreicht. Der harte Wechsel zwischen zwei Regelgrößen ist allerdings nicht optimal, sodass der falsche Umschaltzeitpunkt zwischen den beiden Prozessphasen eine unzureichende Bauteilqualität von Spritzgussbauteilen verursacht [1].

Der ideale Umschaltzeitpunkt ist erreicht, sobald die Schmelzefront auf das Fließwegende trifft. Zudem sollte der Druckverlauf im Übergang zwischen den beiden Prozessphasen stetig sein [2]. Ein verfrühter Umschaltvorgang löst einen Druckabfall in der Kavität aus, sodass Umschaltmarkierungen oder Einfallstellen am Bauteil auftreten können. Bei einem verspäteten Umschaltzeitpunkt treten

Druckspitzen auf, die zu hohen Eigenspannungen und Schwimmhäuten führen können [3].

Indem äußere Störeinflüsse auf den Spritzgießprozess einwirken, verschiebt sich der optimale Umschaltzeitpunkt während der Produktion, sodass die Maschineneinstellungen für eine konstante Bauteilqualität fortwährend angepasst werden müssen. Zudem muss der Schwellwert

des Umschaltsignals (wie die Schneckenposition oder ein definierter Druckwert) für jede prozessseitige Veränderung von Maschine, Material oder Werkzeug neu bestimmt und somit angepasst werden.

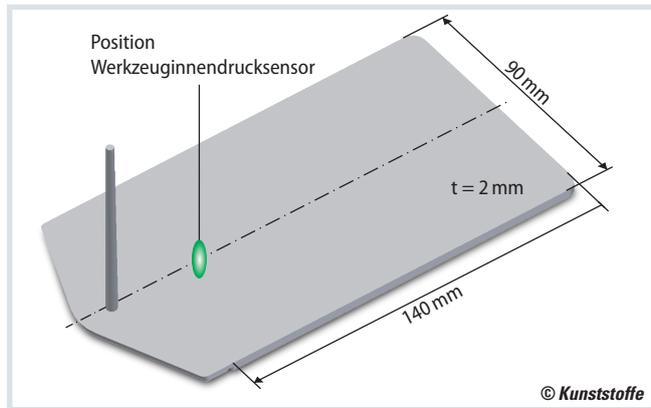
Das Qualitätsergebnis der Prozesseinrichtung hängt dabei stark vom Erfahrungswissen des Maschinenbedieners ab. Anhand einer Füllstudie ermittelt er den Umschaltzeitpunkt experimentell, sodass Reaktionszeiten von Maschinensteuerung, Spritzeinheit und (bedarfsweise) Sensorik berücksichtigt werden können [3]. Assistenzsysteme verschiedener Maschinenhersteller können den Maschinenbediener bei der Prozesseinrichtung zusätzlich unterstützen.

### Welches Umschaltverfahren ist das richtige?

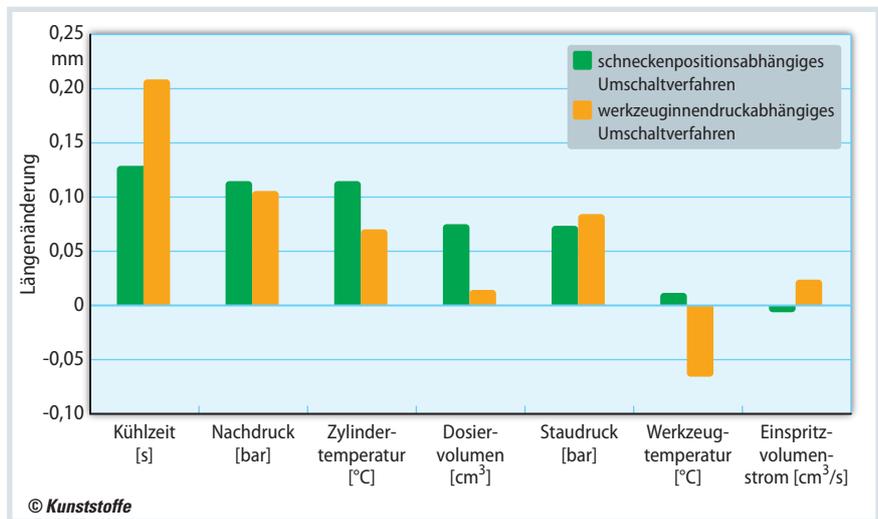
Es existiert eine Vielzahl an Umschaltverfahren und Assistenzsystemen, die verschiedene Vor- und Nachteile aufweisen. Um das richtige Verfahren für einen gegebenen Prozess auszuwählen, muss der Anwender Kosten und Nutzen gegeneinander abwägen.

In der Praxis haben sich das schneckenwegabhängige und das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren etabliert – beide mit einer hohen Reproduzierbarkeit [2]. Bei dem einen wird ein Wert für die Schneckenposition vorgegeben, wohingegen beim anderen ein definierter Werkzeuginnendruck am Sensor überschritten werden muss. Die Prozessgröße Werkzeuginnendruck hat im Gegensatz zum Hydraulikdruck eine starke Korrelation zur Bauteilqualität, sodass deren Verlauf wichtige Rückschlüsse auf die Bauteilqualität zulässt. Werkzeuginnendruckensensoren werden deshalb bei der Herstellung von Präzisionsteilen immer häufiger gefordert.

Darüber hinaus gibt es weitere Umschaltverfahren, die sich in der Praxis je-



**Bild 1.** Die Bauteile wurden auf einer Spritzgießmaschine (Typ: Allrounder 370 A; Hersteller: Arburg GmbH + Co KG, Loßburg) aus einem Polypropylen (Typ: PP579 S; Hersteller: Sabic Deutschland GmbH, Düsseldorf) hergestellt (Quelle: IKV)



**Bild 2.** Die Regressionsanalyse beschreibt die Längenänderung des Bauteils, wenn die jeweilige Maschineneinstellgröße um eine Einheit variiert wird (Quelle: IKV)

doch nicht durchsetzen konnten. Beispielsweise können im Werkzeug verbaute Temperatursensoren in Form von Thermoelementen oder Infrarotsensoren eingesetzt werden. Temperatursensoren reagieren mit einigen Millisekunden Verzögerung sehr träge, sodass der Einsatz eines temperaturabhängigen Umschaltverfahrens nicht reproduzierbar ist [2]. Infrarotsensoren haben eine kurze Reaktionszeit und erlauben daher eine präzise Umschaltung [4], sind jedoch sehr empfindlich und teuer, sodass sie hauptsäch-

lich für Forschungszwecke eingesetzt werden.

### Die Bauteilqualität ist verfahrensabhängig

Ein wichtiger Punkt für den Praktiker bei der Prozesseinrichtung ist die Stabilität des Prozesses. Aber wie genau verhält sich die Bauteilqualität für die verschiedenen Umschaltstrategien, wenn Störeinflüsse auf den Spritzgießprozess einwirken? Neben Veränderungen der Umgebungsbedingungen können beispielsweise Chargenschwankungen oder ein erhöhter Verschleiß von Maschinenteilen den optimalen Arbeitspunkt verschieben.

Um die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität zu bewerten und somit eine Aussage über die Fähigkeit des Prozesses zu erhalten, hat die Arbeitsgruppe Prozessregelung des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Aachen Spritzgießversuche mit gezielt eingebrachten Störungen durchgeführt. Dazu wurden »

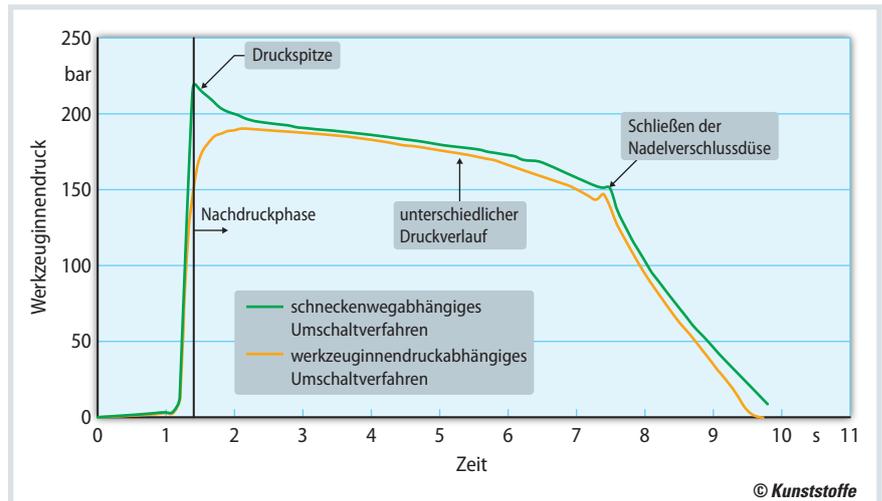
**Tabelle 1.** Die Maschineneinstellgrößen werden in einem teilfaktoriellen 2<sup>7-3</sup> Versuchsplan variiert, um die Auswirkung von Störeinflüssen zu simulieren (Quelle: IKV)

Maschineneinstellgröße	Wert	Variation (+/-)
Düsentemperatur [°C]	240	13
Werkzeugtemperatur [°C]	40	6
Einspritzvolumenstrom [cm³/s]	21	10
Nachdruck [bar]	250	25
Kühlzeit [s]	12	5
Dosiervolumen [cm³]	45	2
Staudruck [bar]	60	5

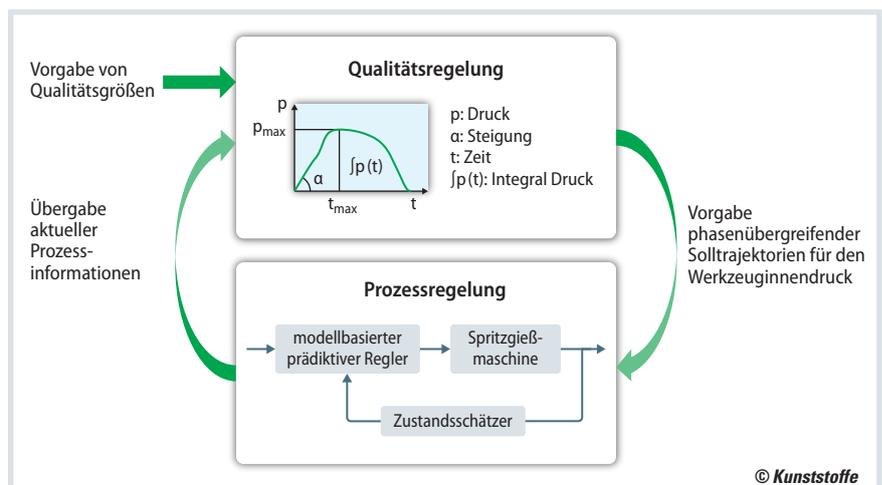
Plattenbauteile aus Polypropylen (PP) mit einem Gewicht von ca. 27 g hergestellt (**Bild 1**) und sieben Maschineneinstellgrößen variiert (**Tabelle 1**), um reale Störeinflüsse nachzustellen. Pro Versuchseinstellung wurden die Qualitätsmerkmale Gewicht, Länge und Breite für jeweils zehn Bauteile bestimmt.

Beide hier dokumentierten Umschaltverfahren sind bekannt dafür, dass sie unterschiedliche Prozessschwankungen ausgleichen. Während das schneckenwegabhängige Verfahren anfällig für Dosierschwankungen ist, weist das werkzeuginnendruckabhängige Verfahren eine hohe Viskositätsabhängigkeit auf [5]. Zur Messung des Werkzeuginnendrucks wurde ein Sensor (Typ: 6157 BA; Hersteller: Kistler Instrumente GmbH, Sindelfingen) verwendet.

Für eine Bewertung der Prozesskonstanz werden die Standardabweichungen der Qualitätsmerkmale beider Verfahren einander gegenübergestellt (**Tabelle 2**). Die Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung aller Versuchsdatensätze. Die Abweichungen von Bauteilgewicht und Länge liegen in einer vergleichbaren Größenordnung. Unterschiede zeigen sich jedoch in der



**Bild 3.** Im Werkzeuginnendruckverlauf für das schneckenwegabhängige Umschaltverfahren ist eine Druckspitze zu erkennen (Quelle: IKV)



**Bild 4.** Der Regelkreis besteht aus einer übergeordneten Qualitätsregelung, die die Solltrajektorien für eine unterlagerte Prozessregelung generiert (Quelle: IKV)

## Vorteile auf einen Blick

Die phasenlose Prozessführungsstrategie hat einige Vorteile gegenüber einer mehrphasigen Prozessführung:

- Ein Umschaltpunkt muss nicht erst aufwendig ermittelt werden.
- Es gibt eine einheitliche Führungsgröße für die Einspritz-, Kompressions- und Nachdruckphase.
- Subjektivität der Prozesseinrichtung ist deutlich geringer, weil nur wenige, intuitive Größen eingestellt werden müssen.
- Druckspitzen und -einbrüche werden durch die Regelung des Werkzeuginnendrucks vollständig vermieden.
- Ein stetiger Werkzeuginnendruckverlauf für den gesamten Füllvorgang erhöht die Bauteilqualität.
- Störeinflüsse können durch eine automatisierte Anpassung des Werkzeuginnendruckverlaufs ausgeglichen werden.
- Prozesswissen lässt sich mit geringem Versuchsaufwand auf neue Prozesse übertragen.

Bauteilbreite, die für das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren eine um 0,067 mm geringere Standardabweichung aufweist. Die Bauteilqualität ist somit ebenfalls verfahrensabhängig. Die höhere Reproduzierbarkeit hat das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren.

### Wie das Umschalten die Qualität beeinflusst

Um zu bestimmen, wie genau das Umschaltverfahren die Bauteilqualität beeinflusst, wird die Bauteillänge näher untersucht. Für dieses Qualitätsmerkmal weisen beide Umschaltverfahren eine vergleichbare Reproduzierbarkeit auf. Die Regressionsanalyse zeigt, in welchem Maß die Länge bei einer Veränderung der Maschineneinstellgrößen abweicht (**Bild 2**).

Dabei ist auffällig, dass der Einfluss der Einstellgrößen unterschiedlich stark ist: Bei einer Kühlzeitverlängerung von einer Sekunde wird für das schneckenwegabhängige Umschaltverfahren eine um 0,129 mm größere Bauteillänge gemessen, beim werkzeuginnendruckabhängigen Umschaltverfahren ist das Maß 0,209 mm länger.

Demgegenüber hat eine Veränderung der Werkzeugtemperatur eine gegensätzliche Wirkung auf die Bauteillänge. Bei einer Erhöhung der Werkzeugtemperatur nimmt die gemessene Bauteillänge für das schneckenwegabhängige Umschaltverfahren zu, wohingegen sie sich für das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren verringert. Die Folge ist, dass keine einheitliche Prozesseinrichtung und Nachjustierung auch bei der gleichen Kombination aus

Maschine, Material und Werkzeug möglich ist.

**Stetiger Verlauf beim werkzeuginnendruckabhängigen Umschalten**

Die Verfahrensabhängigkeit des Schmelzestands am Umschaltzeitpunkt lässt sich bei Betrachtung des Spritzdrucks am Umschaltzeitpunkt erkennen (Bild 3). Über den gesamten Versuchsraum ist der Schneckendruck für das schneckenwegabhängige Umschaltverfahren geringer. Bei hohen Einspritzgeschwindigkeiten, niedrigen Werkzeug- und Zylindertemperaturen und hohem Dosiervolumen ist der Schneckendruck jedoch höher. Der Werkzeuginnendruckverlauf zeigt deutlich, dass für das schneckenwegabhängige Umschaltverfahren eine Anpassung des Umschaltzeitpunkts notwendig wäre, wohingegen der Werkzeuginnendruckverlauf für das werkzeuginnendruckabhängige Umschaltverfahren einen stetigen Verlauf aufweist.

Umschaltverfahren	Gewicht [g]	Länge [mm]	Breite [mm]
Schneckenposition	0,117	0,426	0,179
Werkzeuginnendruck	0,121	0,423	0,112

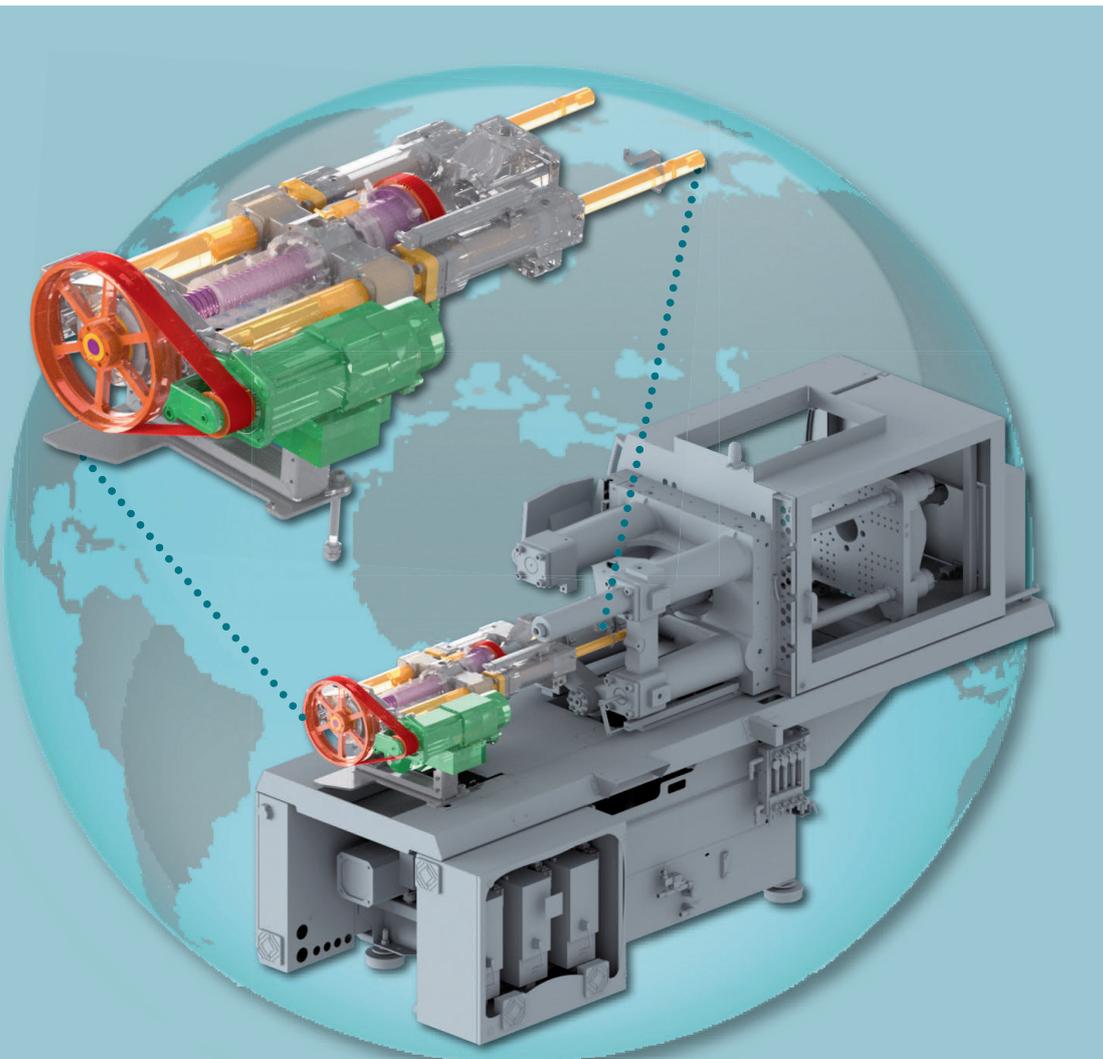
**Tabelle 2.** Die Standardabweichungen der drei Qualitätsmerkmale sind abhängig vom Umschaltverfahren (Quelle: IKV)

Die Spritzgießversuche verdeutlichen, dass für eine gleichbleibende Bauteilqualität eine einheitliche Prozesseinrichtung für unterschiedliche Umschaltverfahren nicht möglich ist. Die Parametervariation simuliert prozessseitige Veränderungen, die sich (verfahrensabhängig) auf die Bauteilqualität auswirken. Es sind bereits Verfahren verfügbar, die den Umschaltzeitpunkt und die Nachdruckhöhe zyklusweise anpassen, um die Folgen eines falschen Umschaltzeitpunkts durch prozessseitige Veränderungen zu vermeiden [6, 7]. Doch solange ein Umschaltzeitpunkt besteht, bleibt dieser eine Schwachstelle des Spritzgießprozesses. Am Umschaltzeitpunkt wird zwischen den Regelgrößen

Geschwindigkeit und Druck gewechselt, sodass der Zustand am Umschaltzeitpunkt durch den Wechsel nicht eindeutig definiert ist.

**Die Lösung, um den Bruch zwischen den Regelgrößen zu vermeiden**

In einem aktuellen Forschungsprojekt hat das IKV in Kooperation mit dem Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen eine Prozessführungsstrategie entwickelt, die den Umschaltvorgang zwischen verschiedenen Regelgrößen vollständig vermeidet. Die umschaltfreie Prozessregelung basiert auf einer kaskadierten Regelkreisstruktur mit einem modellprädik-



Spritzgiessautomaten

**BOY GOES HYBRID**



Für die Modellreihen  
BOY 60 E – BOY 125 E

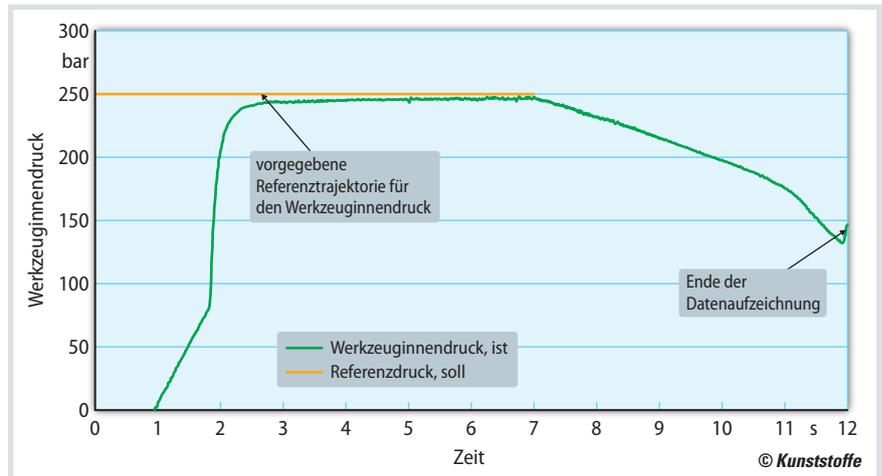


E-Drive

[www.dr-boy.de](http://www.dr-boy.de)

tiven Regelungsansatz (Bild 4) und soll einen robusten Spritzgießprozess bei konstanter Bauteilqualität ermöglichen [8].

Bei diesem neuartigen Ansatz wird für den gesamten Füllvorgang der Kavität ein beliebiger Werkzeuginnendruckverlauf vorgegeben, der auf einer Regelung der Schneckengeschwindigkeit beruht. Dadurch entfällt der Wechsel zwischen verschiedenen Regelgrößen, sodass nur ein einziger Regler eingesetzt wird. Zur Parametrisierung des Reglers werden physikalisch motivierte Grey-Box-Modelle in das Prädiktionsmodell implementiert. Dadurch ist es u. a. möglich, das Fließverhalten und das Abkühlverhalten der Kunststoffschmelze bei der Prozessrege-



**Bild 5.** Der Werkzeuginnendruckverlauf nähert sich stetig der Referenztrajektorie von 250 bar

(Quelle: IKV)

## Die Autoren

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

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

**Katharina Hornberg, M.Sc.**, ist seit 2019

wissenschaftliche Mitarbeiterin am IKV und Leiterin der Arbeitsgruppe Prozessregelung;

katharina.hornberg@ikv.rwth-aachen.de

## Dank

Das Forschungsvorhaben HO4776/44-1 „Phasenübergreifende Prozessführungskonzepte beim Spritzgießen unter Nutzung moderner Regelungsstrategien“ wird in Kooperation mit dem Institut für Regelungstechnik (IRT) der RWTH Aachen durchgeführt und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft e. V. (DFG) finanziell gefördert. Der Dank der Autoren gilt ferner der Arburg GmbH + Co KG, Loßburg, und der Sabic Deutschland GmbH & Co. KG, Düsseldorf, die Spritzgießmaschine und Material für die Versuche zur Verfügung gestellt haben.

## Service

### Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2020-03](http://www.kunststoffe.de/2020-03)

### English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)

lung zu berücksichtigen. Zusätzlich können Prozesswissen sowie Maschinen- und Werkzeugdaten genutzt werden. Dies verringert den Einrichtaufwand für neue Prozesse.

Für eine erfolgreiche praktische Anwendung ist es wichtig, dass ein vorgegebener Soll-Druckverlauf schnell und ohne Überschwingen erreicht wird. Dazu wurde die aufgebaute Regelkreisstruktur bereits in ersten Spritzgießversuchen getestet sowie eine geeignete Parametrierung des Reglers durchgeführt. Die Versuchsergebnisse lassen einen stetigen Werkzeuginnendruckverlauf bei einem gewählten Referenzdruck von 250 bar erkennen (Bild 5).

### Bessere Reproduzierbarkeit

Zu Beginn des Einspritzprozesses ist die Differenz zwischen Soll- und Istwert groß, sodass die Kavitätsfüllung mit der maximalen Einspritzgeschwindigkeit erfolgt. Diese kann beliebig gesetzt werden. Sobald die Werkzeugkavität gefüllt ist, steigt der Werkzeuginnendruck in der Kompressionsphase schnell an und die Einspritzgeschwindigkeit verringert sich, sodass sich der Werkzeuginnendruck an die Referenztrajektorie annähert.

Mit der entwickelten Prozessführungsstrategie lässt sich ein stetiger Werkzeuginnendruckverlauf für den gesamten Füllvorgang sicherstellen. Ein hohes Druckniveau kann über den modellprädiktiven Ansatz sehr schnell erzielt werden und führt zu kurzen Zykluszeiten. Da der Werkzeuginnendruck stark mit der Bauteilqualität korreliert, kann die Vorgabe

des Werkzeuginnendrucks die Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses verbessern, sodass Ausschuss vermieden wird. Störeinflüsse kann eine zyklische Anpassung des vorgegebenen Werkzeuginnendruckverlaufs automatisiert ausgleichen. Die Optimierung der Regelparameter sowie die Bestimmung des idealen Werkzeuginnendruckverlaufs sind Gegenstand aktueller Untersuchungen. Zusätzlich soll die Güte des Regelverfahrens mit den Ergebnissen der klassischen Prozessführung verglichen werden.

### Fazit

Störeinflüsse verschieben den optimalen Umschaltzeitpunkt während der Produktion, sodass dieser fortwährend angepasst werden muss. Untersuchungen zeigen, dass der Umschaltzeitpunkt eine Schwachstelle des Prozesses bildet. Aufgrund des Wechsels zwischen unterschiedlichen Regelgrößen ist der Zustand am Umschaltzeitpunkt nicht eindeutig definiert.

Ein neuartiges Prozessführungskonzept des IKV und des IRT Aachen vermeidet die Umschaltproblematik, indem der gesamte Füllvorgang der Kavität auf der Regelung des Werkzeuginnendruckverlaufs aufbaut. Dazu wird ein modellbasierter prädiktiver Regelansatz verwendet, bei dem Prozesswissen in Form von physikalisch motivierten Modellen berücksichtigt werden kann. Das Ziel der phasenübergreifenden Prozessregelung lautet, eine gleichbleibende Bauteilqualität sicherzustellen und gleichzeitig Ausschuss und Einrichtaufwand und damit die Kosten insgesamt zu verringern. ■