

Christopherus Bader und Simon Christian Zeller

# Die Entdeckung der Schmelzfront

Sensortechnik



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



Lüftungsteil aus dem Automobilbau. Ein Werkzeugwandtemperatur-Sensor überwacht am Ende des Fließwegs, ob das Teil vollständig gefüllt ist (Foto: Koyo Kasei)

# Die Entdeckung der Schmelzefront

**Sensortechnik.** Der Spritzgießprozess an sich kann mit etwas Abstand als eine zeitliche Abfolge definierter Schaltvorgänge betrachtet werden. Sowohl die Abläufe in der Maschinensteuerung als auch werkzeugbezogene Abläufe wie das Öffnen und Schließen von Verschlussdüsen fußen auf solchen Schaltvorgängen. Reaktions-schnelle Schaltsysteme verbannen instabile Prozesse und fehlerhafte Formteile aus dem Produktionsalltag.

**CHRISTOPHERUS BADER  
SIMON CHRISTIAN ZELLER**

Die Qualität einer Maschinensteuerung oder eines übergeordneten Steuer- oder Regelsystems wird letztendlich dadurch bemessen, wie schnell, wie robust und wie wiederholgenau ein Schaltvorgang durchgeführt wird. Die folgenden Beispiele zeigen das Verhalten unterschiedlicher Schaltverfahren auf und erläutern deren Einfluss auf die Fließeigenschaft der Schmelze, auf die

**ARTIKEL ALS PDF** unter [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de)  
Dokumenten-Nummer KU110424

Formteileigenschaften und die Prozessführung.

## Kurze und lange Reaktionszeiten

Die Trägheit von Schaltsignalen wirkt sich insbesondere während des Einspritzvorgangs auf die effektive Fließweglänge der Schmelze aus. Von dem Moment, in dem ein Schaltsignal generiert wird, bis es schließlich wirksam wird, vergeht je nach Schaltverfahren eine bestimmte Reaktionszeit. Um beispielsweise eine Verschlussdüse während des Einspritzvorgangs druckabhängig zu öffnen, wird die

Schaltswelle eines Werkzeuginnen-drucksignals z. B. auf 100 bar programmiert. Bei trägen, langsamen Schaltsystemen vergeht vergleichsweise viel Zeit, während sich die Schmelze noch weiter bewegt. Bei schnellen, dynamischen Schaltsystemen hingegen vergeht vergleichsweise wenig Zeit, sodass sich die Schmelze in der Kavität kaum weiterbewegt.

Um einen Prozess zu beherrschen, ist es unabdingbar, die Position der Schmelze immer und unter jeder Bedingung zu kennen, um die Lage der Bindenähte, den Zusammenfluss von Schmelzefronten und generell die Füllung des Teils beein-

flussen zu können. Aus diesem Grund empfiehlt es sich darauf zu achten, dass ein Schaltvorgang schnell und wiederholgenau reagiert. In marktgängigen Schaltsystemen kommen sowohl schnelle wie auch langsame Reaktionszeiten vor (Bild 1). Der Einfluss auf unterschiedliche Teilegeometrien zeigt sich daran, wie sich das gleiche Volumen der eingespritzten

Nachdruck grafisch dargestellt. Und nicht selten werden die verblüffend genauen und stabilen Umschaltwerte einer Spritzgießmaschine hergenommen. Vergessen wird dabei, dass das Füllen eines Spritzteils großen Schwankungen unterliegen kann, auch wenn die Maschine einen konstanten Prozess sugge-

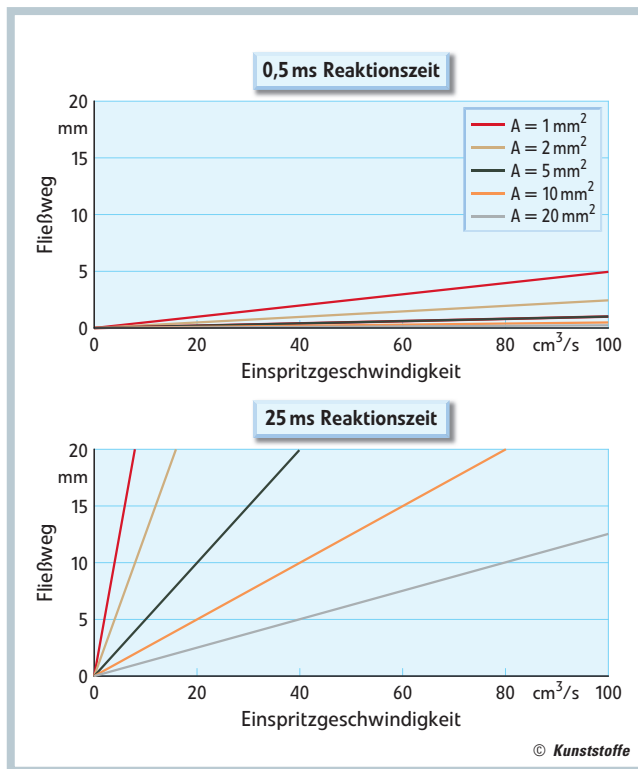
riert. Sichtbar wird dies am Beispiel eines Fahrzeug-Lüftungsteils (Titelbild) der japanischen Firma Koyo Kasei, bei dem ein Werkzeugwandtemperatur-Sensor die vollständige Füllung erkennt. Erreicht die Schmelze den Sensor am Ende des Fließwegs, wird automatisch auf Nachdruck umgeschaltet und ein Gutteil erkannt [1]. Wird die Sensorposition nicht erreicht und das Teil nicht voll eingespritzt, wird das Schlechtteil automatisch aussortiert.

Die heute gängigen Schaltverfahren

- wegabhängiges Schalten in Abhängigkeit der Schneckenposition,
- druckabhängiges Schalten in Abhängigkeit einer Werkzeuginnendruck-Schwelle [2],
- automatisches Schalten bei Erkennen eines Werkzeuginnendruck-Anstiegs (Schmelzefront-Erkennung),
- automatisches Schalten bei Erkennen eines Temperaturanstiegs (Schmelzefront-Erkennung) [4]

wirken sich sehr unterschiedlich auf den Prozess und dessen Stabilität aus. Hierbei unterscheiden sich die beiden ersten grundsätzlich von den automatischen Schaltverfahren, und zwar in mehrfacher Hinsicht. Sowohl ein wegabhängiges als auch ein druckabhängiges Schaltsignal muss immer auf einen bestimmten Betriebspunkt hin optimiert sowie, für eine bestimmte Maschineneinstellung und Materialauswahl, von Hand über eine Füllstudie gesucht werden. Ändern sich

**Bild 1. Fließweglänge für verschiedene Reaktionszeiten während des Einspritzvorgangs. Die Schmelze fließt, abhängig vom Querschnitt der Kavität und von der Trägheit des Schaltsystems, unterschiedlich weit** (Bilder 1 bis 8: Priamus)

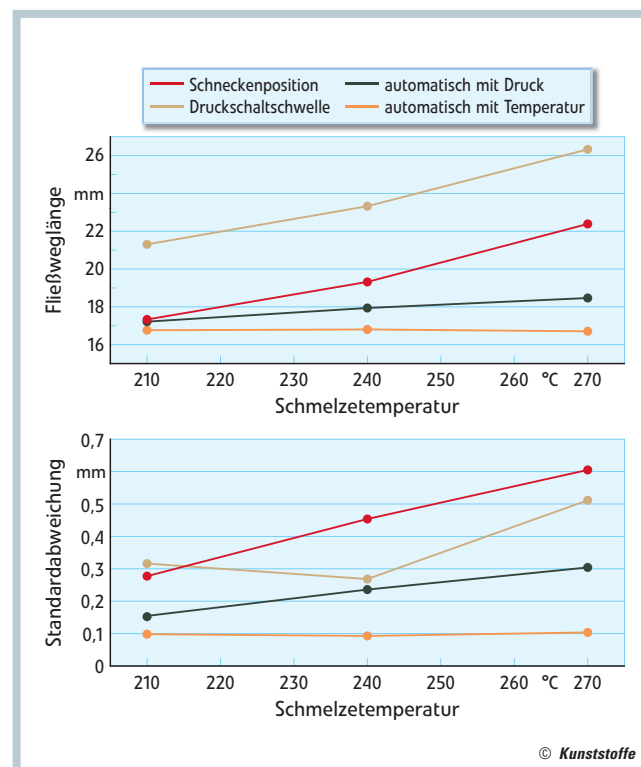


Schmelze auf unterschiedliche Teilequerschnitte auswirkt.

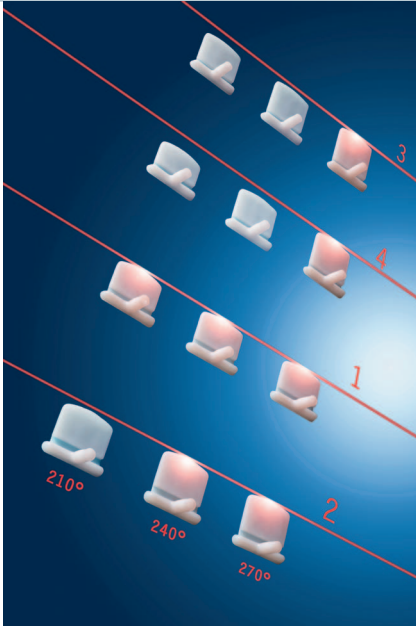
Während sich die Fließweglänge bei einem schnellen System mit 0,5 ms Reaktionszeit auch bei unterschiedlichen Einspritzgeschwindigkeiten kaum unterscheidet, fließt die Schmelze bei einem langsamen System mit 25 ms Reaktionszeit deutlich weiter. Je langsamer also ein Schaltsignal reagiert, desto weniger ist die Position der Schmelze bekannt und kontrollierbar. Die beiden Beispiele aus der Praxis zeigen, wie wichtig die Reaktionsgeschwindigkeit eines Schaltsystems für eine robuste und wiederholgenaue Kontrolle der Schmelzefront ist.

### Unterschiedliche Schaltverfahren

Es ist nicht nur die Trägheit, sondern auch die Art des Schaltverfahrens, die sich auf die Fließweglänge und auf die Prozessstabilität auswirken. Deshalb werden auf vielen Maschinensteuerungen seit vielen Jahren die Umschaltwerte auf



**Bild 2. Fließweglänge für vier Schaltverfahren bei unterschiedlichen Schmelzetemperaturen. Nur das automatische Verfahren mit der Werkzeugwandtemperatur bewirkt gleiche Fließweglängen, wie auch die Werte der Standardabweichung zeigen**



**Bild 3.** Die teilweise gefüllten Prüfstäbe mit den vier Umschaltverfahren im Vergleich (am wenigsten/meisten Schwankungen: Versuchsreihe 1/4). Nur die Teile mit der automatisch über das Temperatursignal ausgelösten Schaltung weisen dieselbe Fließweglänge auf. Die größten Unterschiede werden bei den Teilen gemessen, deren Füllvorgang über die Schneckenposition unterbrochen wurde

Maschineneinstellung oder Materialeigenschaften, muss die Optimierung nachgeführt werden.

Automatische Schaltverfahren dagegen passen sich den Prozessbedingungen an und liefern unabhängig von den Einstellungen ein genaues Schaltsignal. Nicht nur das Finden einer guten Grundeinstellung entfällt, sondern auch das mühsame Nachführen während des Prozesses. Viel weitreichender sind jedoch die Konsequenzen, wenn die Prozessbedingungen sich ändern, wie es in der Realität eben vorkommt.

In einer Vergleichsstudie (Maschine: 320A Alldrive 600-170, Hersteller: Arburg GmbH + Co KG; Material: Polystyrol Typ 495F, Hersteller: BASF SE) wurde die

Schmelzetemperatur über den größtmöglichen Verarbeitungsbereich variiert. Aufgrund des kleinen Einspritzvolumens des nur teilweise gefüllten Prüfstabs und des vergleichsweise stabilen Verhaltens der verwendeten elektrischen Spritzgießmaschine resultieren nur geringe Fließwegunterschiede (Bild 2) – diese würden sich bei größeren Formteilen und schlechteren Maschineneigenschaften sehr viel deutlicher ausprägen. Doch auch unter diesen „homöopathischen“ Spritzbedingungen wird deutlich, dass die beiden weg- und druckabhängigen Schaltverfahren nicht auf Prozessschwankungen reagieren können und zwangsläufig zu unterschiedlichen Fließweglängen führen.

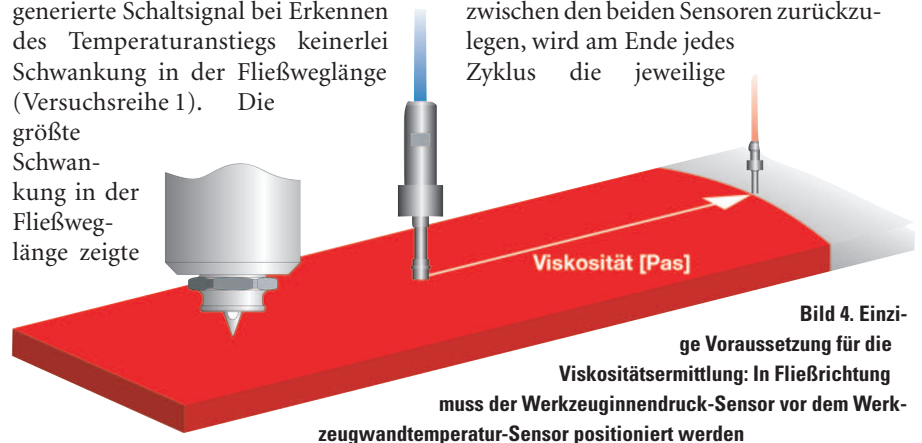
Die beiden automatischen Schaltverfahren hingegen bewirken keine Änderung der Fließweglänge, was dem Idealfall in der Produktion entspricht. Auch die geringere Standardabweichung spricht für die automatischen Schaltverfahren. Aus diesem Grund müssen Verarbeiter bei einem wegabhängigen Schaltsignal und beim Schalten mit einer Druckschwelle generell mit einer höheren Wahrscheinlichkeit mit nicht gefüllten Teilen rechnen. In derselben Versuchsreihe mit den teilgefüllten Prüfstäben (Bild 3) bewirkte nur das automatisch generierte Schaltsignal bei Erkennen des Temperaturanstiegs keinerlei Schwankung in der Fließweglänge (Versuchsreihe 1). Die größte Schwankung in der Fließweglänge zeigte

das schneckenpositionsabhängige Schaltsignal (Versuchsreihe 4).

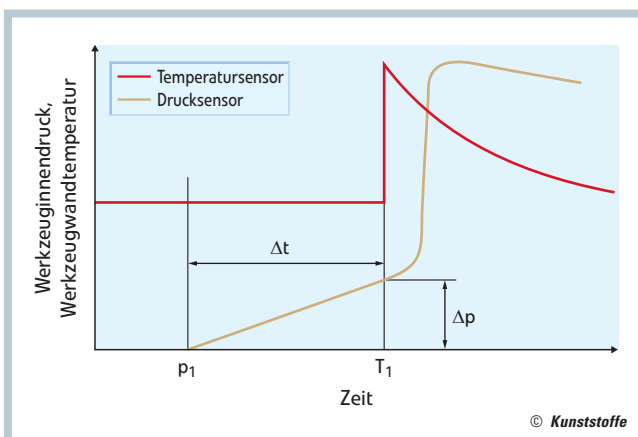
### Automatische Ermittlung von Viskositätswerten

Das automatische Erkennen der Schmelzefront anhand eines Druck- oder Temperatursignals bietet offensichtliche Vorteile bei der automatischen Umschaltung auf Nachdruck, beim Öffnen von Verschlussdüsen oder beim Öffnen und Schließen von Entlüftungskernen. Das Verfahren bietet jedoch weitaus mehr Möglichkeiten, um wichtige Prozesskennzahlen wie die Schergeschwindigkeit, die Schubspannung und daraus die Viskosität im Werkzeug zu ermitteln, zu überwachen und gegebenenfalls zu regeln. Die einzige Voraussetzung für dieses zum Patent angemeldete Verfahren ist, dass im Verlauf des Fließwegs zunächst ein Werkzeuginnendruck-Sensor und danach in Fließrichtung ein Werkzeugwandtemperatur-Sensor installiert wird (Bild 4).

Sobald die Schmelze den Drucksensor erreicht, erfolgt ein Druckanstieg  $p_1$ , der automatisch ermittelt wird. Erreicht die Schmelze den Temperatursensor, wird automatisch der Temperaturanstieg  $T_1$  ermittelt (Bild 5). Aus der Zeitdifferenz, die die Schmelze benötigt, um den Fließweg zwischen den beiden Sensoren zurückzulegen, wird am Ende jedes Zyklus die jeweilige



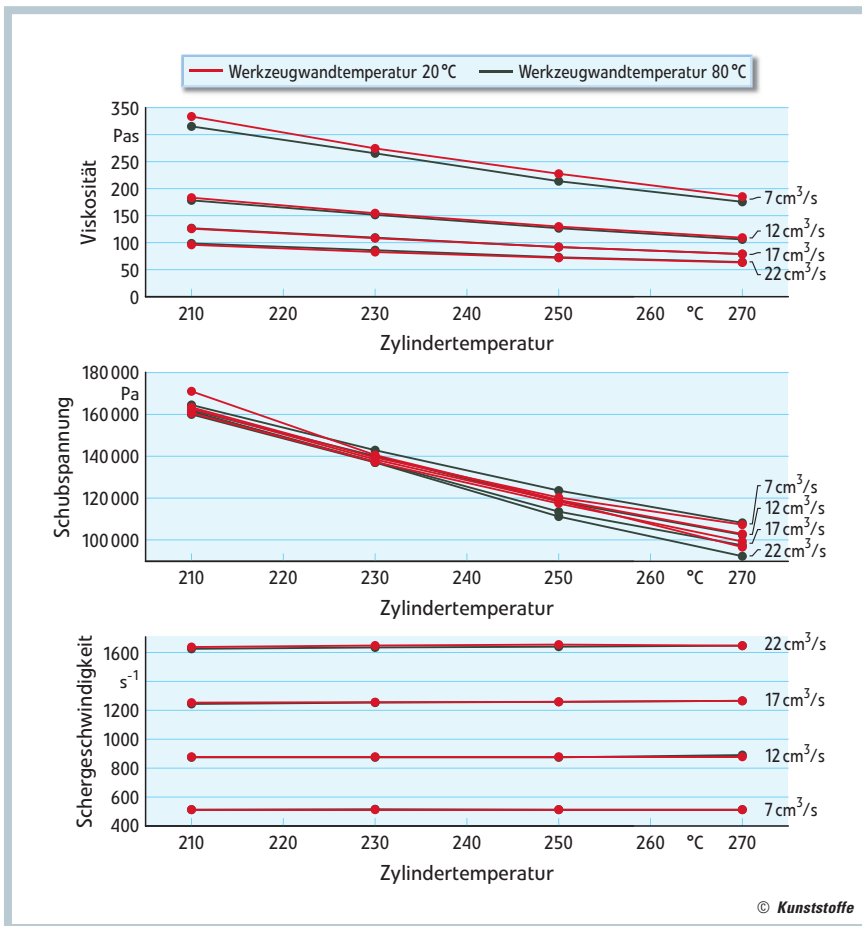
**Bild 4.** Einzige Voraussetzung für die Viskositätsermittlung: In Fließrichtung muss der Werkzeuginnendruck-Sensor vor dem Werkzeugwandtemperatur-Sensor positioniert werden



**Bild 5.** Über die Zeitdifferenz  $\Delta t$ , die die Schmelze benötigt, um die Strecke zwischen dem Druck- und dem Temperatursensor zu durchfließen, wird die Schergeschwindigkeit berechnet. Der zum Zeitpunkt  $T_1$  gemessene Druckwert wird zur Ermittlung der Schubspannung verwendet

Schergeschwindigkeit ermittelt. Genau in dem Moment, in dem die Schmelze den Temperatursensor erreicht, wird der entsprechende Druckwert ermittelt – und die Differenz zum Atmosphärendruck  $\Delta p$ , die zur Berechnung der Schubspannung benötigt wird. Da diese Werte automatisch ermittelt werden, sind sie unabhängig von der Sensorposition, womit die Handhabung denkbar einfach quasi per Knopfdruck erfolgt.

Hintergrund dieser Strategie ist nicht etwa der Ersatz von Labor-Rheometern, mit deren Hilfe Viskositäts-

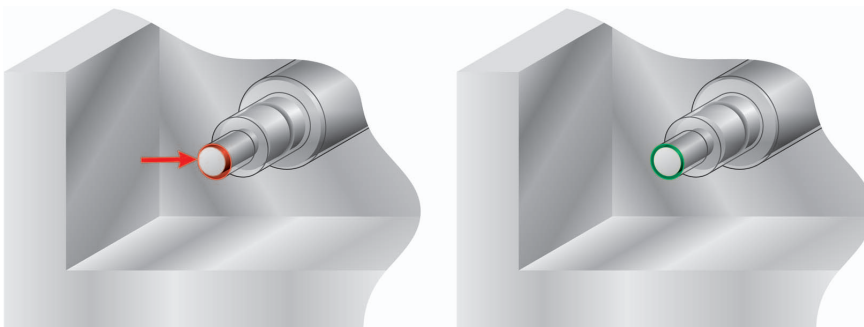


**Bild 6.** Die in einem Prüfstabwerkzeug ermittelten Viskositäten, Schubspannungen und Schergeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Schmelze- und Werkzeugtemperaturen. Offensichtlich und im Gegensatz zum Rheometer unterscheiden sich die im warmen und kalten Werkzeug ermittelten Schubspannungen deutlich

funktionen unter isothermen Bedingungen ermittelt werden. Ebenso ist es nicht das Ziel, zum Rheometer umgebaute Spritzgießmaschinen zu ersetzen, da beide Verfahren eben nicht die tatsächlichen Einflüsse auf das Fließverhalten in der Kavität widerspiegeln. Viel interessanter für den permanenten Einsatz in der Produktion ist die Frage, wie sich die Fließeigenschaften einer Schmelze bei unterschiedlichen Prozessbedingungen verhalten und gegebenenfalls beeinflussen lassen. Denn was nützt eine unter idealen Bedingungen

ermittelte Viskositätsfunktion, wenn sie mit den realen Bedingungen nicht vergleichbar ist? Man muss davon ausgehen, dass jedes Werkzeug auf Maschinen, die sich in Größe und Bauart unterscheiden, zum Einsatz kommt. Und selbst bei Maschinen derselben Baureihe bedeutet die gleiche Maschineneinstellung wohl kaum gleiche Fließbedingungen. Eine permanente Messung der Viskosität in der Kavität bietet sich deshalb an.

Während sich in einem Versuch unterschiedliche Schmelzetemperaturen kaum



**Bild 7.** Vor allem sehr kleine Werkzeuginnendruck-Sensoren laufen Gefahr, aufgrund der engen Toleranzen die Bohrung zu berühren und an Empfindlichkeit zu verlieren

## i Kontakt

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

auf die Schergeschwindigkeitswerte auswirkten, trat ein erkennbarer Einfluss der Werkzeugtemperaturen auf die Schubspannungen hervor (**Bild 6**). Die automatische Viskositätsmessung direkt im Spritzgießwerkzeug ist heute in allen Systemen der Priamus System Technologies AG mehrkanalig verfügbar.

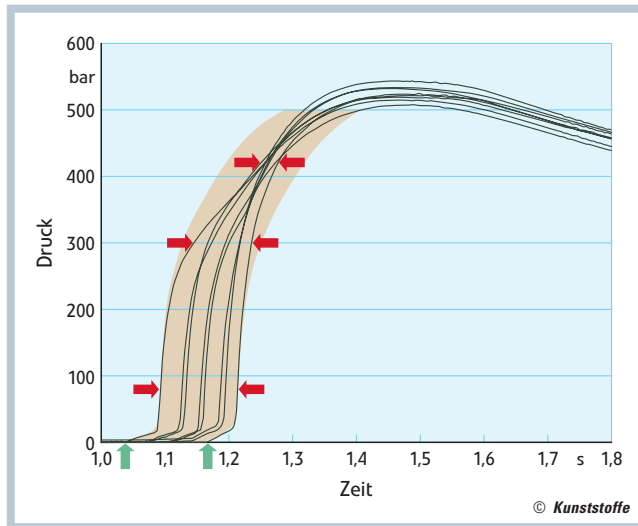
## Automatische Schmelzfronterkennung zur Prozessregelung

Die automatische Ermittlung der Schmelzfront mit Temperatursensoren wird seit nunmehr fast zehn Jahren in vielen hundert Anwendungen erfolgreich zur Balancierung von Heißkanalsystemen eingesetzt [3]. Ebenso werden Kaltkanalsysteme wie etwa beim Flüssigsilikon-Spritzgießen geregelt und balanciert, indem die Verzögerungszeiten zum Öffnen der Verschlussdüsen automatisch auf Basis der Schmelzfronterkennung Zyklus für Zyklus berechnet werden. Neu ist allerdings, dass diese automatischen Regel- und Balancierungsverfahren nun auch mit Werkzeuginnendruck-Sensoren über das automatische Erkennen des Druckanstiegs betrieben werden können. Dies ist insofern von Bedeutung, als sich Steuer- und Regelverfahren auf der Basis einer Druckschwelle aus den oben beschriebenen Gründen eher ungünstig auf den Prozess auswirken.

Einer der Gründe liegt darin, dass vor allem sehr kleine Drucksensoren dazu tendieren, die Bohrungswand zu berühren, was einen sogenannten Kraftnebenabschluss und damit einen Empfindlichkeitsverlust nach sich zieht (**Bild 7**). Vor allem bei Mehrkavitäten-Werkzeugen, bei denen in jedem Formnest ein Drucksensor zum Einsatz kommt, muss mit großen Messfehlern in Form von Druckschwankungen gerechnet werden. Wann immer sich Drucksignale überschneiden, deutet dies darauf hin, dass sich die Empfindlichkeit der Sensoren nach dem Einbau verändert hat und ein Messfehler vorliegt.

Ein Beispiel (**Bild 8**) zeigt die Druckverläufe in einem offensichtlich unbalancierten 8-fach-Werkzeug – die erste Kavität

**Bild 8. Die Zeitdifferenz der Druckanstiege in den acht Kavitäten zeigt, dass es sich um einen unbalancierten Prozess handelt. Aufgrund der Einbaufehler und der veränderten Sensorempfindlichkeiten reduziert sich diese Differenz mit steigendem Druck, sodass das Balancieren mithilfe eines Schwellwerts nicht sinnvoll ist. Die automatisch ermittelten Druckanstiege (grüne Pfeile) eliminieren diese Einbaufehler**



wird früher gefüllt als die übrigen. Das Regeln bzw. Ausbalancieren des Heißkanalsystems mit einer Druckschwelle gestaltet sich damit schwierig, weil sich der Abstand zwischen den Kurven aufgrund der Einbaufehler mit zunehmender Druckhöhe verringert. Im Schnittpunkt dieser Kurven wird sogar suggeriert, dass keine Fließunterschiede in den Kavitäten vorherrschen, was jedoch die zeitlich unterschiedlichen Druckanstiege widerlegen. Mit dem automatischen Erkennen des Druckanstiegs hingegen wird dieser Zustand einwandfrei erfasst und kann zum Ausbalancieren des Prozesses verwendet werden.

## Fazit

Die einfachen Versuchsreihen haben gezeigt, dass die bloße Wahl des Schaltverfahrens sowohl die Fließweglängen der Schmelze als auch die Robustheit und Re-

produzierengenauigkeit des Prozesses stark beeinflussen kann. Alltägliche Probleme wie sporadisch ungefüllte Spritzteile lassen sich so mit der automatischen Ermittlung der Schmelzefront über Druck- und Temperatursensoren verhindern oder zumindest sicher erkennen.

Fix eingestellte druck- oder wegabhängige Schaltschwellen hingegen wirken sich eher ungünstig auf das Prozessverhalten aus und erhöhen das Risiko von Prozessschwankungen. Mit der automatischen Ermittlung der Viskosität direkt im Spritzgießwerkzeug steht erstmals ein Instrument zur Verfügung, das die effektiven Schwankungen der Fließeigenschaften während des Einspritzvorgangs sichtbar macht. ■

## DANK

Der Dank der Autoren gilt  
 ■ dem Laborleiter der Fachhochschule Nordwestschweiz, Oskar Häfeli, für die Unterstützung bei

der Durchführung der Versuchsreihen,

- Prof. Clemens Dransfeld für die Bereitstellung einer Labormaschine und
- der Firma Koyo Kasei, Shizuoka-City/Japan, für das Bereitstellen von Messdaten und Prüfteilen.

## LITERATUR

- 1 Bader, C.: Die Werkzeugwandtemperatur als Basis zur Qualitätssicherung. In: Steinko, W. (Hrsg.): Optimierung von Spritzgießprozessen. Hanser, München 2008, S. 475
- 2 Bader, C.: Einrichten, Steuern und Regeln von Werkzeugen. In: Mennig, G. (Hrsg.): Werkzeugbau in der Kunststoffverarbeitung. Hanser, München 2008, S. 644
- 3 Bader, C.: Die Zeit ist reif. Kunststoffe 99 (2009) 6, S. 24
- 4 Priamus Patentschrift EP 1 381 502 B1

## DIE AUTOREN

DIPL.-ING. (FH) CHRISTOPHERUS BADER, geb. 1962, ist seit 2001 Geschäftsführer der Priamus System Technologies AG, Schaffhausen/Schweiz.  
 DR. SC. NAT. SIMON CHRISTIAN ZELLER, geb. 1978, leitet seit 2007 die Elektronikentwicklung bei Priamus.

## SUMMARY

### THE DISCOVERY OF THE MELT FRONT

SENSOR TECHNOLOGY. The injection molding process as such can be regarded as a temporal sequence of defined switching processes. Both the sequences in the machine controller and mold-related sequences such as the opening and closing of shut-off nozzles are based on such switching processes. High-speed switching systems banish instable processes and faulty molding from day-to-day production.

Read the complete article in our magazine

**Kunststoffe international** and on

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