

# Zeitschrift Kunststofftechnik Journal of Plastics Technology

archivierte, peer-rezensierte Internetzeitschrift des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik (WAK)  
archival, peer-reviewed online Journal of the Scientific Alliance of Polymer Technology  
www.kunststofftech.com; www.plasticseng.com

eingereicht/handed in: 14.09.2007

angenommen/accepted: 22.11.2007

**Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Walter Michaeli, Dipl.-Ing Andreas Schreiber,  
Dipl.-Ing. Christoph Lettowsky  
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen**

## **Optimierte Prozessführung beim Spritzgießen von Thermoplasten auf Basis von Prozess- größen**

*Am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen, wurde während der vergangenen Jahre ein System entwickelt, das eine Führung des Spritzgießprozesses auf Basis von Prozessgrößen vornimmt und den qualitätsbestimmenden Verlauf des Werkzeuginnendrucks direkt regelt. Während in der Einspritzphase ein vorgegebener Gradient des Werkzeuginnendrucks realisiert wird, erfolgt in der Nachdruckphase eine Online-Optimierung des Prozessverlaufs auf Basis des pvT-Verhaltens des verwendeten Kunststoffs, wodurch die Qualitätskonstanz der gefertigten Bauteile deutlich gesteigert werden kann.*

## **Optimised process control for the injection moulding of thermoplastics based on process variables**

*A system which controls the injection moulding process based on process variables has been developed at the Institute of Plastics Processing (IKV), Aachen, during the last years. It controls the quality determining course of the cavity pressure directly and realises a specified gradient of the cavity pressure in the injection phase. In the holding pressure phase it performs an online optimisation of the process based on the pvT-behaviour of the used plastic material. By this means, the quality constancy of the produced parts can be considerably increased.*

# Optimierte Prozessführung beim Spritzgießen von Thermoplasten auf Basis von Prozessgrößen

W. Michaeli, A. Schreiber, C. Lettowsky

Die konventionelle Regelung des Spritzgießprozesses basiert auf Maschinengrößen, die den Prozessverlauf nur unzureichend beschreiben. Am IKV, Aachen, wurde aus diesem Grund während der vergangenen Jahre ein System entwickelt, das eine Führung des Spritzgießprozesses auf Basis von Prozessgrößen vornimmt und den qualitätsbestimmenden Verlauf des Werkzeuginnendruckes direkt regelt. Während in der Einspritzphase ein vorgegebener Gradient des Werkzeuginnendruckes realisiert wird, erfolgt in der Nachdruckphase eine Online-Optimierung des Prozessverlaufs auf Basis des  $pV$ -Verhaltens des verwendeten Kunststoffes, wodurch die Qualitätskonstanz der gefertigten Bauteile deutlich gesteigert werden kann.

The conventional control of the injection moulding process is based on machine variables, which are not able to sufficiently characterise the course of the process. Hence, a system which controls the injection moulding process based on process variables has been developed at the IKV, Aachen, during the last years. It controls the quality determining course of the cavity pressure directly and realises a specified gradient of the cavity pressure in the injection phase. In the holding pressure phase it performs an online optimisation of the process based on the  $pV$ -behaviour of the used plastic material. By this means, the quality constancy of the produced parts can be considerably increased.

## 1 EINLEITUNG

Zur präzisen Fertigung komplexer und hochwertiger Formteile im Spritzgießverfahren werden hohe Anforderungen an die Gestaltung des Werkzeugs sowie an die Prozessführung gestellt. Die Nutzung des Potenzials moderner Werkzeuge zur Herstellung hochpräziser spritzgegossener Produkte setzt Strategien voraus, die eine Regelung des Prozesses auf Basis von Prozessgrößen erlauben, die am Ort der Formteilentstehung, der Werkzeugkavität, erfasst werden. Durch den Einsatz geeigneter Sensorik im Spritzgießwerkzeug ist es möglich, zuverlässige Informationen über das Prozessgeschehen zu erhalten und über regelungstechnische Maßnahmen einen optimalen Prozessverlauf zu realisieren. Für eine reproduzierbare Qualität der gefertigten Bauteile stellt eine stabile Prozessführung, die eine Kompensation von Störeinflüssen ermöglicht, eine grundlegende Voraussetzung dar. Das Ziel einer solchen Prozessführung liegt stets in der Forderung eines in jedem Produktionszyklus identisch ablaufenden Pro-

zesses, der durch verschiedene Prozessgrößen, insbesondere Druck und Temperatur der Schmelze in der Kavität, repräsentiert wird.

Innerhalb des Exzellenzclusters "Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer" an der RWTH Aachen verfolgt das Projekt "Selbstoptimierende Produktionssysteme" das Ziel, eine optimale Qualität in komplexen Produktionssystemen hergestellter Produkte zu gewährleisten. Unter anderem durch intelligente Strategien zur Prozesseinrichtung, -überwachung sowie -regelung wird beabsichtigt, einerseits die Prozessstabilität zu verbessern und zum anderen die Einrichtzeit zu verkürzen, den Prozess also in kürzester Zeit in einen stabilen Arbeitspunkt zu überführen. Die angestrebte optimierte und robuste Prozessführung besitzt die Aufgabe, unvermeidbare Störungen des Prozesses zu kompensieren und somit eine Erhöhung der Produktivität zu erreichen. Am Beispiel unterschiedlicher komplexer Produktionsprozesse, wie dem Spritzgießen von Thermoplasten, wird eine Prozess übergreifende Methodik entwickelt und implementiert, die diese optimierte Prozessführung und -regelung ermöglicht.

## 2 KONVENTIONELLE PROZESSFÜHRUNG

Die konventionelle und seit Jahrzehnten etablierte Prozessführung beim Spritzgießen basiert auf einer Regelung der SchneckenVorlaufgeschwindigkeit in der Einspritzphase sowie des Hydraulikdrucks im Einspritzzylinder (bei hydraulisch angetriebener Einspritzachse) oder der auf die Schnecke wirkenden Kraft (bei elektrisch angetriebener Einspritzachse) in der Nachdruckphase. Die Regelgrößen in beiden Phasen des Spritzgießzyklus repräsentieren Zustände oder Aktionen der Maschine und können somit als Maschinengrößen bezeichnet werden. Der Einfluss dieser Maschinengrößen auf den in der Werkzeugkavität ablaufenden Prozess der Formteilbildung ist aufgrund des Vorhandenseins verschiedener Störungen, die auf den Prozess einwirken können, nicht eindeutig zu definieren. Der Prozess wird somit durch den Verlauf der Maschinengrößen nur unzureichend beschrieben.

Bei der konventionellen Regelung der Einspritzphase auf Basis der Maschinengrößen SchneckenVorlaufgeschwindigkeit oder -position können reproduzierbare Vorgänge in der Kavität beispielsweise durch ein nicht exakt reproduzierbares Schließverhalten sowie den Verschleiß der Rückstromsperre beeinträchtigt werden. Diese Störungen können dazu führen, dass bei Betrachtung verschiedener Zyklen identische Schneckenbewegungen nicht zu identischen Volumenströmen im Angussystem sowie in der Werkzeugkavität führen und identische Schneckenpositionen nicht mit identischen Füllständen der Kavität korrelieren. Dosierschwankungen besitzen den gleichen Effekt. Das Auftreten der genannten Störungen führt somit zu unterschiedlichen Prozessabläufen durch voneinander abweichende Volumenstromprofile oder Umschaltunkte und beeinträchtigt damit die Reproduzierbarkeit.

In der Nachdruckphase, in der bei der konventionellen Prozessführung die Maschinengröße Hydraulikdruck im Einspritzzylinder oder auf die Schnecke wir-

kende Kraft geregelt wird, stellen insbesondere variable Druckverluste im Hydrauliksystem, Plastifizierzylinder und Angusssystem Störgrößen dar. Beispielsweise durch eine nicht exakt reproduzierbare Temperaturführung im Angussbereich des Werkzeugs oder im Plastifizieraggregat führt ein identischer Verlauf des Hydraulikdrucks in unterschiedlichen Zyklen nicht unbedingt zu einem identischen Verlauf des Schmelzedrucks in der Kavität, dem so genannten Werkzeuginnendruck.

### 3 DIE PROZESSGRÖÖE WERKZEUGINNENDRUCK

Die Eigenschaften spritzgegossener Formteile werden in großem Maße durch den Verlauf der Prozessgröße Werkzeuginnendruck in Einspritz- und Nachdruckphase definiert. Dieser korreliert mit zahlreichen Formteilmerkmalen wie Gewicht, Morphologie, Ausformungsgrad, Einfallstellen, Schwindung und Verzug [1, 2, 3].

Aufgrund dieser Korrelationen kann der Werkzeuginnendruck in verschiedenster Form zur Überwachung des Spritzgießprozesses herangezogen werden. Neben der Möglichkeit einer Toleranzbandüberwachung der Druckkurve kommt die Betrachtung von Kenngrößen zur Anwendung. Durch die Ermittlung von Größen wie z. B. dem Maximalwert des Werkzeuginnendrucks oder dem Integral in der Einspritz- und Nachdruckphase ist es zum einen möglich, die Konstanz des Prozesses zu überwachen und zum anderen, den Prozess im Detail zu analysieren und zu optimieren. Des Weiteren ist es möglich, durch die Verknüpfung verschiedener Kenngrößen mittels statistischer Methoden und der Betrachtung der sich ergebenden Formteilmerkmale Qualitätsmodelle zu entwickeln, die eine Vorhersage von Qualitätsmerkmalen anhand des gemessenen Werkzeuginnendrucks ermöglichen [4, 5].

Da die Vorgänge in der Kavität, wie oben beschrieben, durch die Regelung von Maschinengrößen nicht immer reproduzierbar beeinflusst werden können, bietet sich die direkte Regelung von Prozessgrößen an. Der Verlauf der Schmelztemperatur in der Kavität hängt von der Temperatur der Schmelze im Schneckenorraum, der Werkzeugwandtemperatur sowie von Geometrie und Material abhängigen Parametern ab. Aufgrund der großen Trägheit der Regelstrecke in Bezug auf Temperaturen lässt sich die Prozessgröße Schmelztemperatur in der Kavität nicht online im Zyklus regeln, muss aber zur exakten Beschreibung des Formteilbildungsprozesses beobachtet werden. Der Werkzeuginnendruck hingegen stellt eine Prozessgröße dar, die durch moderne Regelstrategien regelbar ist. Durch die direkte Regelung des Werkzeuginnendrucks, d. h. eine Online-Regelung während des jeweils aktuellen Spritzgießzyklus, und die reproduzierbare Gewährleistung eines festgelegten Werkzeuginnendruckverlaufs kann somit das Ziel einer konstanten Formteilqualität erreicht werden.

## 4 DIREKTE REGELUNG DES WERKZEUGINNENDRUCKS

### 4.1 Ansätze zur Werkzeuginnendruckregelung

Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Bedeutung des Werkzeuginnendrucks wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt, um diesen zu regeln. Die Entwicklung einer Möglichkeit zur direkten Regelung des Werkzeuginnendrucks im Zyklus scheiterte jedoch lange Zeit am Verhalten der Regelstrecke, das stark nicht-linear ist und eine Totzeit aufweist. Aus diesem Grund führt eine Regelung mittels konventioneller PID-Regler mit fest eingestellten Regelparametern nicht zu zufrieden stellenden Ergebnissen. Das zu regelnde System besteht aus der Strecke zwischen dem Hydraulik-Servoventil oder dem elektrischen Antrieb, das den Vorschub des Einspritzzylinders steuert, und dem Drucksensor im Werkzeug. Betrachtet man die in Bild 1 exemplarisch dargestellte Reaktion des Werkzeuginnendrucks auf einen rechteckförmigen Verlauf des Stellsignals am Hydraulikventil in der Einspritzphase, wird das nicht-lineare und totzeitbehaftete Systemverhalten deutlich. Für gleiche Sprunghöhen des Stellsignals ergeben sich abhängig vom Füllgrad der Kavität unterschiedlich hohe sowie zeitverzögerte Änderungen des Werkzeuginnendrucks.

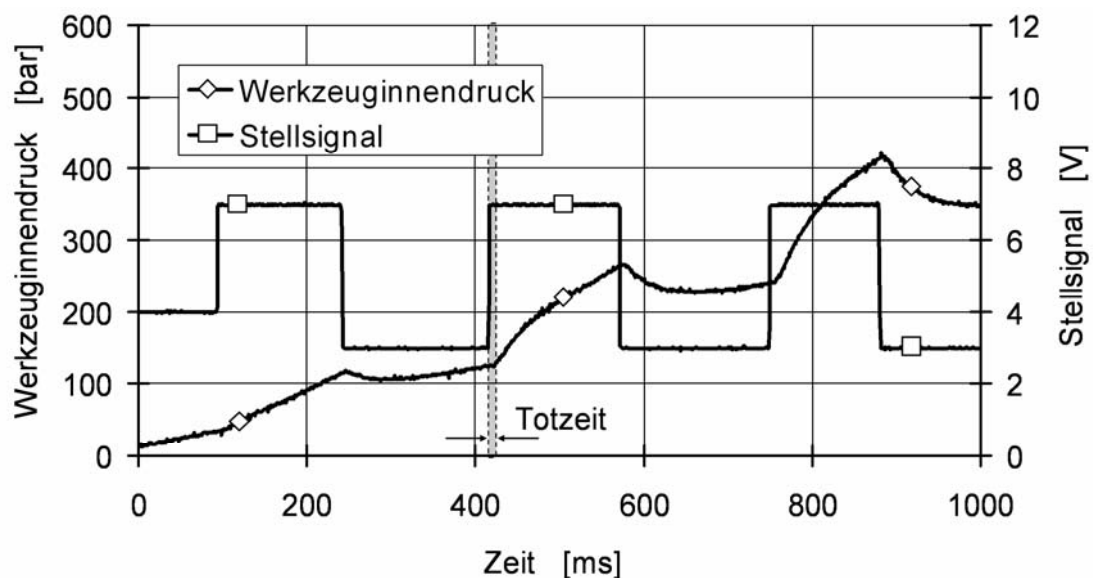


Bild 1: Reaktion des Werkzeuginnendrucks auf Sprünge des Stellsignals (Einspritzphase)

Eine direkte Regelung des Werkzeuginnendruckverlaufs war aufgrund der mangelnden Rechenleistung der zur Verfügung stehenden Rechner lange nicht möglich, sodass sich auf die Regelung von einigen Punkten der Werkzeuginnendruckkurve beschränkt wurde [6]. Bei einem anderen Ansatz wird in der Einspritzphase die Einspritzgeschwindigkeit von Zyklus zu Zyklus so lange geändert bis ein konstanter Druckanstieg vorliegt [7]. Ein weiterer Ansatz beein-

flusst u. a. den Werkzeuginnendruck indirekt über die Vorgabe von Maschinenparametern und regelt so zyklusübergreifend Prozesskenngrößen, die mit Qualitätsmerkmalen der Formteile korrelieren [8].

Zur direkten Regelung des Werkzeuginnendrucks ist der Einsatz gehobener Regelungsstrategien, welche die Nichtlinearität des Systems berücksichtigen können und die Fähigkeit besitzen, sich an geänderte Rahmenbedingungen anzupassen, notwendig [9]. Diese Anforderungen werden von Identifikationsmodellbasierten Reglern erfüllt, die ein Prozessmodell durch die Kenntnis von Eingangs- und Ausgangsgrößen des Prozesses ermitteln und die erforderlichen Reglerparameter entsprechend berechnen können. Ein solches modellbasiertes Regelungskonzept, ein "self tuning regulator", wurde beispielsweise in [10] zur Regelung des Werkzeuginnendrucks in Einspritz- und Nachdruckphase eingesetzt. Hierbei kommt ein parametrisches Prozessmodell zum Einsatz, dessen Parameter im Zyklus laufend angepasst werden.

Ein weiteres Regelungskonzept dieser Art, das neben der Berücksichtigung der Nichtlinearität des zu regelnden Systems in der Lage ist, die Totzeit zu berücksichtigen, stellt die "General Predictive Control" dar [11]. Aufbauend auf diesem Ansatz wurde während der vergangenen Jahre am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen, ein Konzept zur Online-Regelung des Werkzeuginnendrucks entwickelt und implementiert [12, 13]. Dieses Konzept basiert auf einer modellprädiktiven Regelung, die ein Künstliches Neuronales Netzwerk (KNN) als Prozessmodell verwendet.

## 4.2 Künstliche Neuronale Netze

Künstliche Neuronale Netze stellen eine nichtlineare Abbildung eines n-dimensionalen Raums auf einen m-dimensionalen Raum dar, wodurch es möglich ist, das Verhalten eines Systems allgemeingültiger als mit analytischen Methoden zu beschreiben. Sie können stetig differenzierbare, statische Funktionen beliebig genau approximieren sowie dynamisches Verhalten nachbilden und besitzen die Fähigkeit zur Generalisierung. Daher eignen sich KNN sehr gut für die Modellierung des Systemverhaltens bei der Werkzeuginnendruckregelung.

Zur Identifikation des Systemverhaltens werden dem Neuronalen Netz in einer Lernphase Datensätze mit realen Eingangs- und Ausgangsdaten des zu regelnden Systems zugeführt. An die Eingangsneuronen des Netzes werden die Werte der vergangenen Stellsignale des Hydraulikventils sowie die vergangenen Werte des Werkzeuginnendrucks angelegt. Die Ausgangsgröße des Netzes bildet der aus den Eingangsdaten vorhergesagte Werkzeuginnendruck für den aktuellen Zeitschritt. Als Lernverfahren wird im Rahmen der hier dargestellten Arbeiten der Backpropagation-Algorithmus [14] verwendet, der die Gewichte des KNN während der Lernphase so lange anpasst, bis die Ausgabe des Netzes beim Anlegen von Messdaten mit der realen Antwort des zu regelnden Systems übereinstimmt.

Mit Hilfe des auf ein spezifisches Systemverhalten angelernten neuronalen Prozessmodells berechnet der modellprädiktive Regler die optimale Stellsignalfolge für einen gewünschten zukünftigen Verlauf des Werkzeuginnendruckes. Zu diesem Zweck wird die Stellsignalfolge durch einen Optimierungsalgorithmus so lange variiert, bis der Fehler zwischen dem durch das Prozessmodell prädizierten und dem gewünschten Werkzeuginnendruckverlauf minimal ist. Die vereinfachte Struktur des Regelungskonzepts kann Bild 2 entnommen werden.

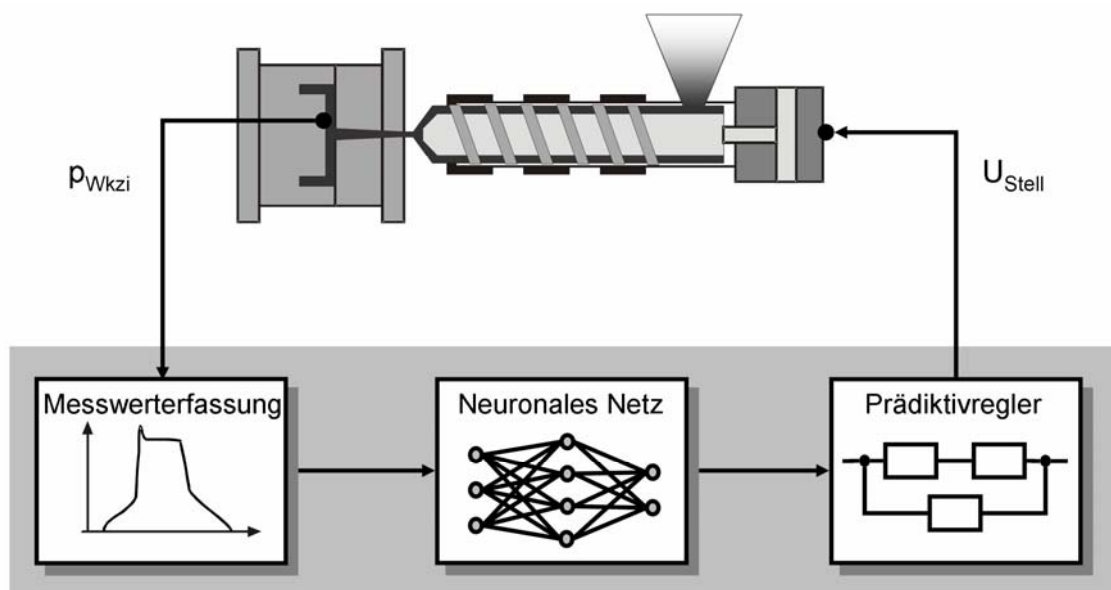


Bild 2: Modellprädiktive Regelung mit einem Neuronalem Netz als Prozessmodell

## 5 FESTLEGUNG VON SOLLWERTEN FÜR DEN REGLER

Unter Nutzung des vorgestellten Regelungskonzepts ist es möglich, in jedem Zyklus einen vorgegebenen Verlauf des Werkzeuginnendruckes sowohl in der Einspritz- als auch in der Nachdruckphase zu realisieren und damit eine bessere Reproduzierbarkeit des Prozesses zu erreichen, als es durch die Regelung von Maschinengrößen möglich ist. Aufgrund der Fähigkeit, die Prozessgröße Werkzeuginnendruck direkt zu regeln, bietet sich die Möglichkeit, den gewünschten Verlauf nach Kriterien auszuwählen, die für eine möglichst optimale Qualität der Bauteile sorgen. Die Kriterien lassen sich in Einspritz- und Nachdruckphase unterteilen.

## 5.1 Einspritzphase

Nach [7] ist in der Einspritzphase zur gleichmäßigen Füllung der Kavität mit dem Resultat gleichmäßig verteilter Randschichtorientierungen über der Fließlänge eine konstante mittlere Schergeschwindigkeit im Fließfrontbereich anzustreben, die bei konstanter Wanddicke einer konstanten Fließfrontgeschwindigkeit entspricht. Darüber hinaus wird eine Korrelation zwischen der konstanten mittleren Schergeschwindigkeit und einem konstanten Gradienten des Werkzeuginnendrucks hergeleitet. Aus diesem Grund kann ein wünschenswerter Verlauf in der Einspritzphase ein linearer Anstieg des Werkzeuginnendrucks sein. Auch in [15] wird das Ziel einer gleichmäßigen Füllung der Kavität durch die Realisierung einer konstanten Fließfrontgeschwindigkeit verfolgt, die allerdings nicht anhand des Werkzeuginnendruckverlaufs, sondern durch die Verwendung eines kapazitiven Sensors messtechnisch erfasst und geregelt wird.

Bild 3 verdeutlicht exemplarisch den Zusammenhang zwischen Fließfrontgeschwindigkeit und Werkzeuginnendruckverlauf anhand von Füllsimulationen einer zentral angespritzten Kreisscheibe mit konstanter Wanddicke. Bei Vorgabe eines konstanten Volumenstroms während der Füllphase nimmt die Fließfrontgeschwindigkeit aufgrund der kontinuierlichen Vergrößerung des Fließfrontquerschnitts über dem Fließweg ab, Bild 3a. Wird für die Füllung ein angenähert konstanter Gradient des Werkzeuginnendrucks vorgegeben, resultiert eine nahezu gleichmäßige Fließfrontgeschwindigkeit über dem Fließweg, Bild 3b. Die zugehörigen Verläufe des Werkzeuginnendrucks sind links im Bild dargestellt. Somit kann die Vorgabe eines konstanten Gradienten für die Regelung des Werkzeuginnendrucks in der Einspritzphase im Fall einfacher Formteilgeometrien für gleichmäßige Formteileigenschaften über dem Fließweg sorgen.

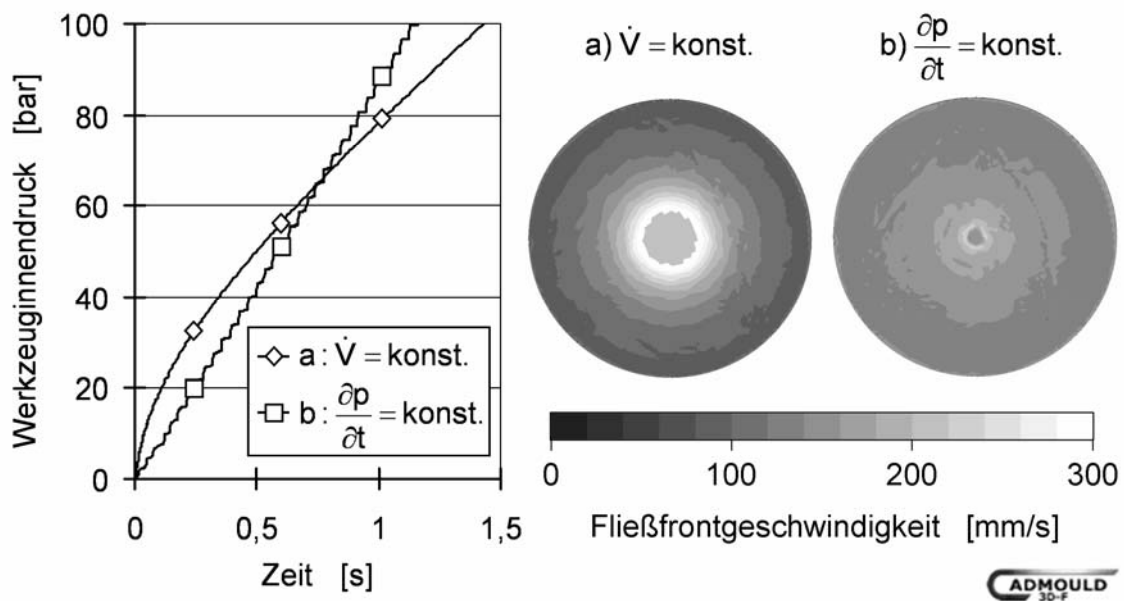


Bild 3: Zusammenhang zwischen Fließfrontgeschwindigkeit und Werkzeuginnendruckverlauf (simuliert)



## 5.2 Nachdruckphase

Für die Regelung der Nachdruckphase, die sich nach der volumetrischen Füllung der Kavität an die Einspritzphase anschließt, bietet sich eine Regelung auf Basis des Materialverhaltens des verwendeten Kunststoffes bezüglich Druck, spezifischem Volumen und Temperatur (pvT-Verhalten) an. Das Ziel dieser Optimierung der Nachdruckphase, der pvT-Optimierung, besteht in der Realisierung einer über alle Produktionszyklen konstanten volumetrischen Schwindung sowie eines konstanten Gewichts der gefertigten Bauteile, welches durch das Erreichen eines ebenso über alle Zyklen konstanten spezifischen Volumens des Kunststoffes bei Erreichen der 1-bar-Linie gewährleistet werden kann [16]. Darüber hinaus sollen zur Reduzierung von Orientierungen, Spannungen und Verzug Materialbewegungen in der Nachdruckphase minimiert und daher ein isochorer Prozessverlauf realisiert werden [17].

Im pvT-Diagramm, das in Bild 4 zu sehen ist, wird die Einspritzphase zwischen Punkt A und B bzw. B' abgebildet. Aufgrund der begrenzten Schließkraft sowie des begrenzten Einspritzdrucks der Spritzgießmaschine ist es gewöhnlich nicht möglich, unmittelbar – d. h. am Punkt B' – in einen isochoren Prozessverlauf umzuschalten, um die 1-bar-Linie beim gewünschten spezifischen Volumen zu erreichen. Stattdessen ist es notwendig, zunächst am Punkt B in einen isobaren Prozessverlauf überzugehen bis das gewünschte spezifische Volumen am Punkt C erreicht wird. Hier schließt sich ein isochorer Verlauf an, bis die 1-bar-Linie am Punkt D erreicht wird.

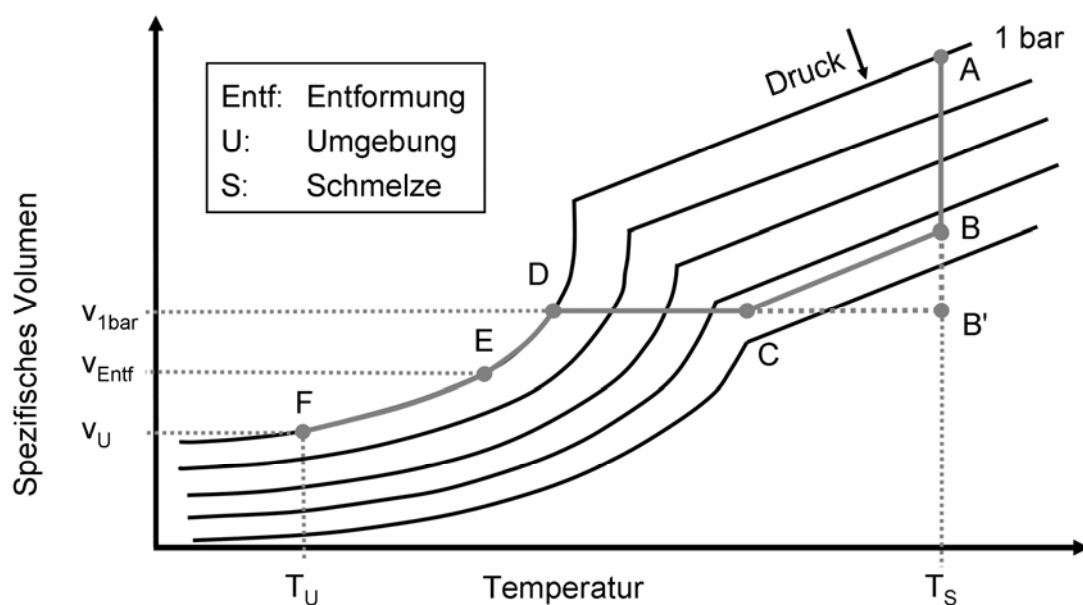


Bild 4: Idealisierter Prozessverlauf im pvT-Diagramm

## 6 OPTIMIERUNG DER NACHDRUCKPHASE AUF BASIS DES PVT-VERHALTENS

### 6.1 Vorgehen

Anders als bei bisher angewandten Konzepten zur Optimierung der Nachdruckphase, bei denen Zyklus übergreifend Maschineneinstellparameter variiert werden, um möglichst gute Formteileigenschaften, also einen möglichst optimalen Verlauf im pvT-Diagramm zu erreichen, wird der Werkzeuginnendruck mit der vorgestellten Methodik online geregelt und somit zu jedem Zeitpunkt der im aktuellen Prozesspunkt benötigte Druck berechnet und realisiert. Auf diese Weise können Störeinflüsse direkt im laufenden Zyklus ausgeglichen werden.

Während der Werkzeuginnendruck durch piezoelektrische Sensoren exakt und reproduzierbar gemessen werden kann, stellt die Messung der ebenfalls für die Durchführung der pvT-Optimierung notwendigen Prozessgröße "Schmelztemperatur in der Kavität" eine Herausforderung dar. Eine ausreichende Dynamik zur Erfassung der schnellen Abkühlvorgänge können lediglich Infrarotthermometer bieten, deren Einsatz in Produktionswerkzeugen sich jedoch aufgrund der umständlichen Kalibrierung und des Kostenaufwands nicht anbietet. Eine Alternative zur Messung der Schmelztemperatur in der Kavität bietet die Abkühlrechnung, mit Hilfe derer der zeitliche mittlere Temperaturverlauf der Kunststoffschmelze berechnet werden kann [16]. Wesentliche Parameter, die für die Durchführung der Abkühlrechnung notwendig sind und deren Schwankungen gleichzeitig Störgrößen für den Prozess darstellen, sind die Temperatur der in die Kavität eintretenden Schmelze sowie die Werkzeugwandtemperatur. Diese Temperaturen können beispielsweise mit einem im Schneckenorraum sowie einem unter der Kavitätswand montierten Temperatursensor erfasst werden.

In Untersuchungen wurde ein Vergleich zwischen der konventionellen Prozessführung in der Nachdruckphase, bei der Nachdruckhöhe und Nachdruckzeit maschinenseitig fest eingestellt werden und eine Regelung des Hydraulikdrucks stattfindet, sowie der direkten Regelung des Werkzeuginnendrucks unter Nutzung der pvT-Optimierung vorgenommen. Die Versuchsreihen wurden auf einem ARBURG Allrounder 470 S 1300-350, ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg, mit einem Polypropylen des Typs 579S, SABIC Deutschland GmbH & Co. KG, Düsseldorf, durchgeführt. Das verwendete Formteil ist in Bild 5 abgebildet.

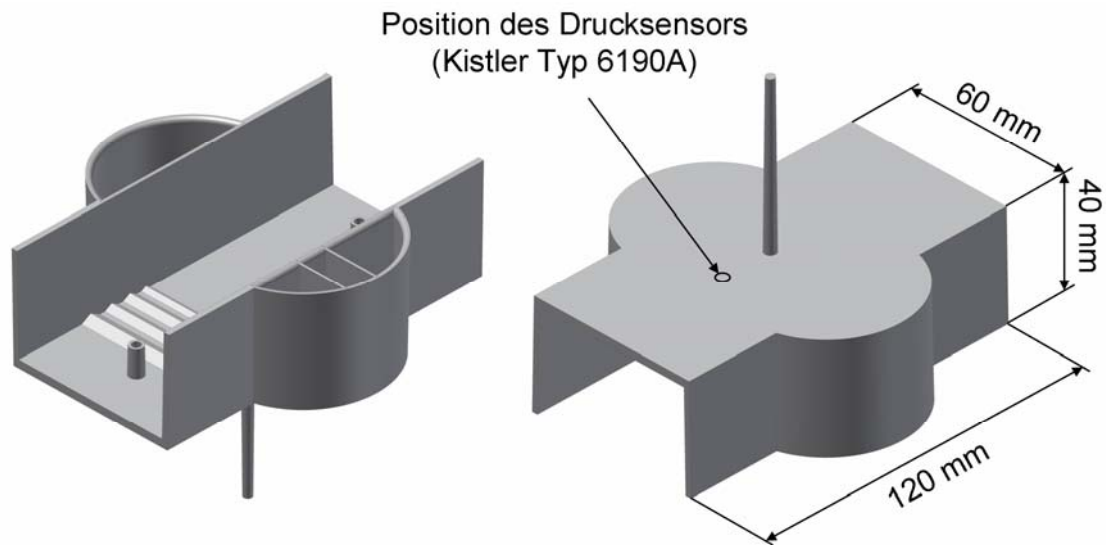


Bild 5: Für die Untersuchungen verwendetes Formteil

Durch die direkte Regelung des Werkzeuginnendrucks ist verglichen mit der Prozessführung auf Basis des Hydraulikdrucks eine bessere Reproduzierbarkeit der mit dem Werkzeuginnendruckverlauf korrelierenden Formteileigenschaften, z. B. des Formteilgewichts, zu erwarten (vgl. Kapitel 2). Die Nutzung der pvT-Optimierung erlaubt darüber hinaus eine automatische Anpassung der Sollkurve des Werkzeuginnendrucks in Abhängigkeit von Prozessstörungen, beispielsweise Schwankungen von Schmelze- oder Werkzeugtemperatur. Solche Schwankungen sind insbesondere beim Anfahren von Prozessen oder nach Produktionsunterbrechungen von Bedeutung, wenn noch keine stationären Temperaturverhältnisse vorliegen. Die Berücksichtigung der in diesem Fall veränderlichen Temperaturen bei der Festlegung des Werkzeuginnendruckverlaufs kann somit eine frühere Produktion von Gutteilen durch die Realisierung eines stets optimalen Prozessverlaufs im pvT-Diagramm erlauben.

## 6.2 Ergebnisse

Um die Einflüsse von Temperaturschwankungen auf die Qualitätskonstanz beurteilen zu können, wurden im Rahmen eines statistischen Versuchsplans sowohl die Werkzeugtemperatur (Vorlauftemperatur des Temperieraggregats) als auch die Schmelztemperatur (Temperatur der Zylinderwand an der Düse des Einspritzzylinders) um je 10 K in positiver und negativer Richtung um einen Zentralpunkt (50 °C / 240 °C) variiert und die Effekte auf das Formteilgewicht als ein messtechnisch leicht zu erfassendes Qualitätsmerkmal ausgewertet (vgl. Tabelle 1).

In Bild 6 sind die Mittelwerte der bei den verschiedenen Versuchseinstellungen gemessenen Formteilgewichte aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Formteilgewichte bei der pvT-optimierten Prozessführung unabhängig von der Versuchseinstellung relativ konstant sind, während bei der konventionellen Pro-

zessführung deutliche Gewichtsänderungen bei einer Änderung der Versuchseinstellung zu erkennen sind. Die Standardabweichungen der jeweils fünf an den einzelnen Versuchspunkten gemessenen Formteilgewichte sind ebenfalls im Diagramm aufgetragen. Bei der konventionellen Prozessführung beträgt die mittlere Standardabweichung 0,020 g, während die Standardabweichung bei der pvT-optimierten Prozessführung mit im Mittel 0,012 g um 40 % geringer ausfällt. Es zeigt sich die positive Auswirkung sowohl der direkten Regelung des Werkzeuginnendrucks auf die Qualitätskonstanz innerhalb eines Versuchspunkts als auch der pvT-Optimierung auf die Qualitätskonstanz zwischen verschiedenen Versuchspunkten.

|                            |                | Parameter                 | Dimen-<br>sion | niedrige<br>Stufe<br>- | Zentral-<br>punkt<br>0 | hohe<br>Stufe<br>+ |
|----------------------------|----------------|---------------------------|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| <b>Einfluss-<br/>größe</b> | x <sub>1</sub> | Werkzeug-<br>temperatur   | [°C]           | 40                     | 50                     | 60                 |
|                            | x <sub>2</sub> | Schmelze-<br>temperatur   | [°C]           | 230                    | 240                    | 250                |
|                            | x <sub>3</sub> | Art der<br>Prozessführung | [-]            | pvT-<br>optimiert      | -                      | konven-<br>tionell |
| <b>Antwort-<br/>größe</b>  | y <sub>1</sub> | Formteilgewicht           | [g]            | x                      | x                      | x                  |

Tabelle 1: Verzeichnis der Einfluss- und Antwortgrößen

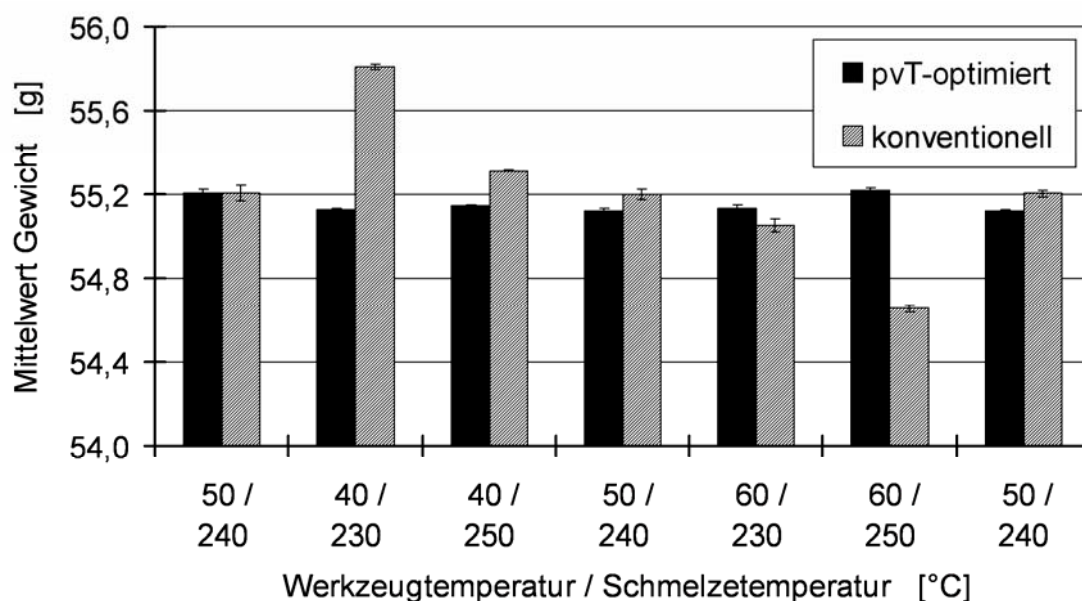


Bild 6: Mittelwerte der Formteilgewichte

Betrachtet man die in Bild 7 und Bild 8 dargestellten Effekte von Werkzeug- und Schmelztemperatur auf das Formteilgewicht, zeigt sich, dass im Fall der konventionellen Prozessführung eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur um 20 K zu einer Verringerung des Formteilgewichts um 0,708 g führt. Eine Erhöhung der Schmelztemperatur um 20 K führt zu einer Verringerung des Gewichts um 0,444 g. Die Gewichtsänderungen lassen sich in beiden Fällen dadurch begründen, dass bei erhöhter Werkzeug- oder Schmelztemperatur und gleichzeitig konstant gehaltener Nachdruckhöhe und -zeit die 1-bar-Linie erreicht wird, wenn die Schmelze noch eine höhere Temperatur und somit ein höheres spezifisches Volumen besitzt. Die in die Kavität eingebrachte Schmelzmasse ist dadurch geringer.

Bei einer Betrachtung der Veränderung des Formteilgewichts bei der pvT-optimierten Nachdruckführung zeigt sich, dass Änderungen sowohl von Werkzeug- als auch von Schmelztemperatur lediglich einen geringen Effekt besitzen. Eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur um 20 K führt zu einer Erhöhung des Formteilgewichts um lediglich 0,041 g, eine Erhöhung der Schmelztemperatur in gleicher Höhe führt zu einer Erhöhung des Gewichts um 0,054 g. Daraus ergibt sich, dass die Effekte der Temperaturen auf das Formteilgewicht bei der pvT-optimierten Prozessführung ungefähr eine Größenordnung unter denen bei der konventionellen Prozessführung liegen. Die aktive Anpassung des Nachdruckverlaufs an die geänderten Prozessbedingungen durch die pvT-Optimierung sorgt somit für eine deutlich gesteigerte Qualitätskonstanz der gefertigten Bauteile.

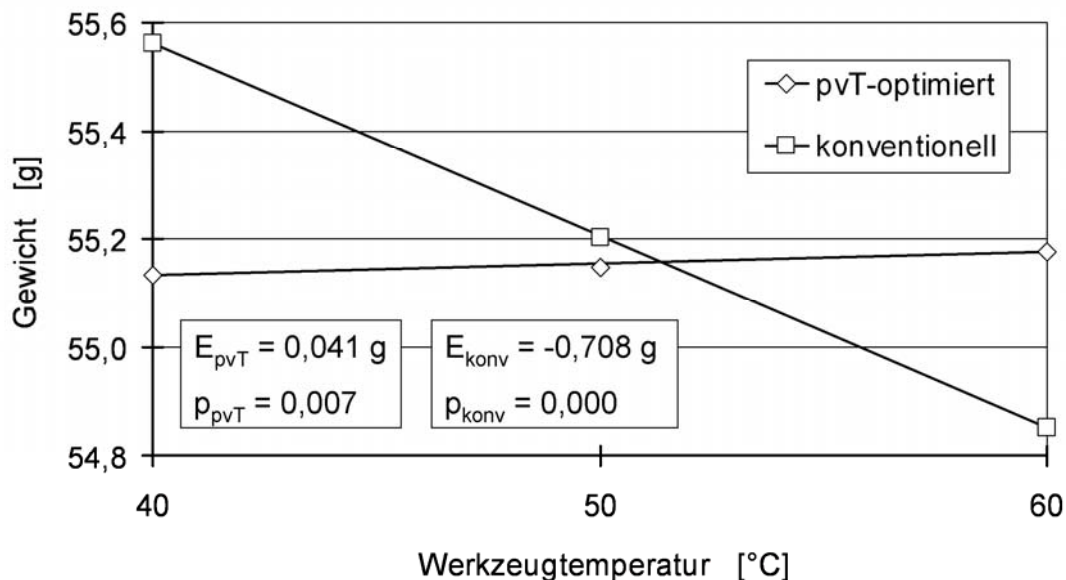


Bild 7: Effekte der Werkzeugtemperatur auf das Formteilgewicht

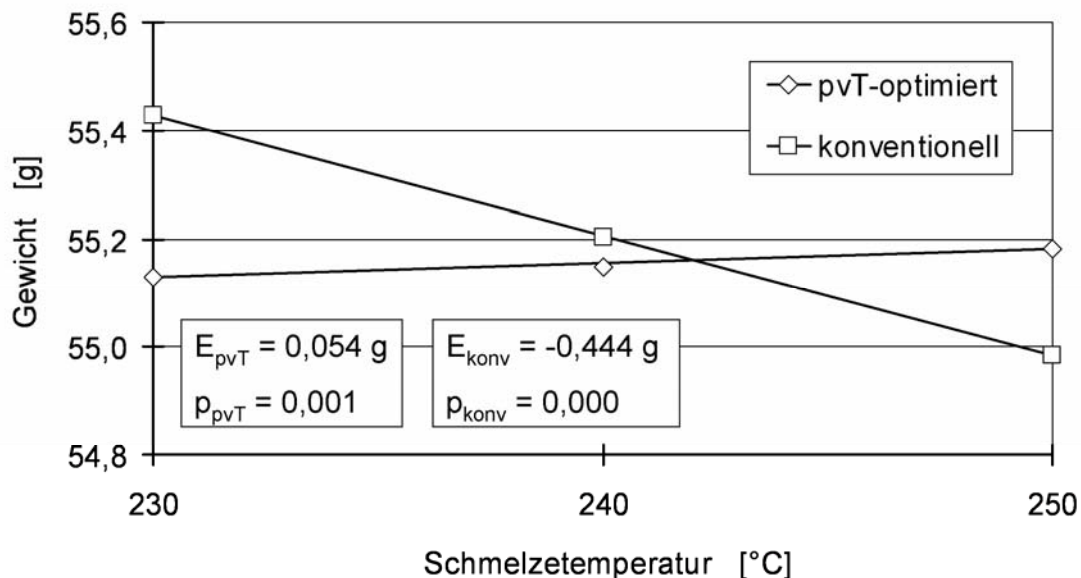


Bild 8: Effekte der Schmelztemperatur auf das Formteilmgewicht

## 7 FAZIT UND AUSBLICK

Die Regelung des Spritzgießprozesses auf Basis von Prozessgrößen bietet ein großes Potenzial zur Steigerung der Reproduzierbarkeit des Prozesses bei der Einwirkung von Störungen. Die pvT-Optimierung der Nachdruckphase ermöglicht einen Ausgleich von Störeinflüssen auf den Prozess durch eine aktive Anpassung des Druckverlaufs und ist in der Lage, den Einfluss von Schmelze- und Werkzeugtemperaturänderungen auf das Formteilmgewicht weitestgehend zu kompensieren. Die direkte Regelung des Werkzeuginnendruckes in Kombination mit der pvT-Optimierung der Nachdruckphase sorgt somit für eine gesteigerte Robustheit gegen durch Störeinflüsse verursachte Prozessschwankungen.

Im Rahmen des Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ an der RWTH Aachen wird zum Erreichen des Ziels einer prozessübergreifenden Strategie zur Prozessführung eine Weiterentwicklung der Werkzeuginnendruckregelung vorgenommen. Hierbei fließen einerseits Erkenntnisse aus den weiteren betrachteten Produktionsprozessen in die Regelung des Spritzgießprozesses ein, andererseits können Erkenntnisse aus der Werkzeuginnendruckregelung anderen Prozessen zugute kommen. Nächste Schritte stellen die Gewährleistung der Verwendbarkeit des Regelungssystems mit unterschiedlichen praxisnahen Formteilgeometrien sowie eine Optimierung der Regelalgorithmen dar, um eine hohe Regelgüte sowie eine schnelle Prozesseinrichtung bei einem Werkzeug- oder Maschinenwechsel zu gewährleisten.

## 8 DANK

Die durchgeführten Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG im Rahmen des Exzellenzclusters "Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer" gefördert. Der DFG und der Bundesregierung gilt hierfür unser besonderer Dank!

Für die Bereitstellung der für die Untersuchungen verwendeten Spritzgießmaschine sowie des Kunststoffmaterials danken wir herzlich den Unternehmen ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg, und SABIC Deutschland GmbH & Co KG, Düsseldorf.

## 9 LITERATUR

- [1] Stitz, S. Analyse der Formteilbildung beim Spritzgießen von Plastomeren als Grundlage für die Prozessführung  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1973
- [2] Sarholz, R. Spritzgießen – Verfahrensablauf, Verfahrensparameter, Prozessführung  
Carl Hanser Verlag, München 1979
- [3] Sarholz, R. Rechnerische Abschätzung des Spritzgießprozesses als Hilfsmittel zur Maschineneinstellung  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1980
- [4] Gierth, M. Methoden und Hilfsmittel zur prozeßnahen Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1992
- [5] Schnerr-Häselbarth, O. Automatisierung der Online-Qualitätsüberwachung beim Kunststoffspritzgießen  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 2000
- [6] Menges, G.; Hellmeyer, H.O.; Lixfeld, H.D. Regelung des Maximaldrucks im Spritzgießwerkzeug  
Kunststoffe 67 (1977) 4, S. 184-188
- [7] Lauterbach, M. Optimierung der Einspritzphase beim Spritzgießen durch automatisches Anpassen des Schnecken vorlaufgeschwindigkeitsprofils  
Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Diplomarbeit, 1985 – Betreuer: A. Matzke

- [8] Vaculik, R. Regelung der Formteilqualität beim Spritzgießen auf der Basis statistischer Prozeßmodelle  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1996
- [9] Föllinger, O. Nichtlineare Regelungen 1 und 2  
Oldenbourg-Verlag, München 1993
- [10] Gao, F.; Patterson, W.I.; Kamal, M.R. Cavity Pressure Dynamics and Self-tuning Control for Filling and Packing Phases of Thermoplastics Injection  
Polymer Engineering and Science 36 (1996) 9, S. 1272-1285
- [11] Clarke, D.W.; Mohtadi, C.; Tuffs, P.S. Generalized Predictive Control – Part I/II  
Automatica 23 (1987) 2, S. 137-160
- [12] Gruber, J. Prozessführung beim Thermoplastspritzgießen auf Basis des Werkzeuginnendruckes  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 2005
- [13] Michaeli, W.; Gruber, J. Prozessführung beim Spritzgießen – direkte Regelung des Werkzeuginnendruckes steigert die Reproduzierbarkeit  
Zeitschrift Kunststofftechnik 1 (2005) 1, S. 1-13
- [14] Rummelhart, D.E.; McClelland, J.L. Parallel Distribution Processing: Exploring in the Microstructure of Cognition  
Cambridge: MIT-Press, 1986
- [15] Chen X.; Gao, F. Profiling of Injection Velocity for Uniform Mold Filling  
Advances in Polymer Technology 25 (2006) 1, S. 13-21
- [16] Matzke, A. Prozeßrechnereinsatz beim Spritzgießen  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1985
- [17] N.N. Verfahren zum Steuern der Nachdruckphase beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe  
Patentschrift DE 3927995C2, Offenlegungstag: 13.9.1990

**Stichworte:**

Spritzgießen, Prozessgrößen, Regelung, Werkzeuginnendruck, Künstliche Neuronale Netze, Formteilqualität, Reproduzierbarkeit, pvT-Optimierung

**Keywords:**

injection moulding, process variables, control, cavity pressure, artificial neural networks, part quality, reproducibility, pvT optimisation



**Autor/author:**

Dipl.-Ing. Andreas Schreiber  
Dipl.-Ing. Christoph Lettowsky  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Walter Michaeli  
Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen  
Institut für Kunststoffverarbeitung  
Pontstraße 49  
52062 Aachen

**E-Mail-Adresse:**

[schreiber@ikv.rwth-aachen.de](mailto:schreiber@ikv.rwth-aachen.de)  
Webseite: [www.ikv.rwth-aachen.de](http://www.ikv.rwth-aachen.de)  
Tel.: +49(0)241/80-96626  
Fax: +49(0) 241/80-92262

**Herausgeber/Editor:**

Europa/Europe  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein,  
verantwortlich  
Lehrstuhl für Kunststofftechnik  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Am Weichselgarten 9  
91058 Erlangen  
Deutschland  
Phone: +49/(0)9131/85 - 29703  
Fax.: +49/(0)9131/85 - 29709  
E-Mail-Adresse: [ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de](mailto:ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de)

Amerika/The Americas  
Prof. Prof. h.c Dr. Tim A. Osswald,  
responsible  
Polymer Engineering Center, Director  
University of Wisconsin-Madison  
1513 University Avenue  
Madison, WI 53706  
USA  
Phone: +1/608 263 9538  
Fax.: +1/608 265 2316  
E-Mail-Adresse: [osswald@engr.wisc.edu](mailto:osswald@engr.wisc.edu)

**Verlag/Publisher:**

Carl-Hanser-Verlag  
Jürgen Harth  
Ltg. Online-Services & E-Commerce,  
Fachbuchanzeigen und Elektronische Lizenzen  
Kolbergerstrasse 22  
81679 Muenchen  
Tel.: 089/99 830 - 300  
Fax: 089/99 830 - 156  
E-mail-Adresse: [harth@hanser.de](mailto:harth@hanser.de)

**Beirat/Editorial Board:**

Professoren des Wissenschaftlichen  
Arbeitskreises Kunststofftechnik/  
Professors of the Scientific Alliance of  
Polymer Technology