

Gummispritzpresse · Heizzeitverkürzung · Druckregelung · Temperaturregelung

In diesem Beitrag werden Ergebnisse einer erfolgreichen Zusammenarbeit des mittelständischen Unternehmens LWB Steinl und dem Institut für Steuer- und Regelungstechnik der Universität der Bundeswehr München vorgestellt, das auch vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) im Rahmen des PRO INNO II – Programmes gefördert wurde.

Entwickelt wurde ein prozessgeregeltes Verfahren zum Spritzgießen großer Gummiformteile, das gegenüber dem bisher üblichen Injektionsprozeß folgende Möglichkeit bietet: Durch die exakt geregelte Umsetzung mechanischer Energie in Wärme kann die Temperatur der ausgespritzten Gummimasse so eingestellt werden, daß die mittlere Massetemperatur im Bereich der zuvor berechneten Vulkanisationstemperatur ist. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass durch dieses Verfahren sowohl die Vulkanisationszeit als auch die Zykluszeit erheblich verkürzt werden kann.

Cure Time Reduction – Opportunities and Limits of MIMO Control of a Rubber Injection Press

Rubber injection press · Cure time reduction · Pressure control · Temperature control

In this paper we present some results of a successful co-operation of a medium-sized injection press manufacturer (LWB Steinl) and the Control Engineering Institute of the Universität der Bundeswehr Munich. This co-operation has been supported by the Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) in the framework of the PRO INNO II – Program.

A new method for controlling the injection of rubber in large and thick walled moulded parts was developed. In contrast to standard injection technique it allows a precisely controlled conversion of mechanical energy into heat. The temperature of the injected material can be adjusted so that its averaged mass temperature reaches the desired cure temperature. Experimental data confirms that this method results in a substantial reduction of cure times and consequently of cycle times as well.

Bilder und Tabellen:
Mit freundlicher Genehmigung durch die Autoren

Heizzeitverkürzung – Möglichkeiten und Grenzen der MIMO-Regelung einer Gummispritzpresse

In diesem Beitrag werden Ergebnisse des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) im Rahmen des PRO INNO II – Programmes geförderten Projektes "Entwicklung einer Gummispritzpresse mit einem temperaturgeregelten ein- und zweistufigen Einspritzprozeß" vorgestellt. Dieses Projekt war ein Kooperationsprojekt zwischen der LWB Steinl GmbH in Landshut und dem Institut für Steuer- und Regelungstechnik der Universität der Bundeswehr München.

Ziel des Gesamtprojektes war die Entwicklung eines prozessgeregelten Verfahrens zum Spritzgießen großer Gummiformteile, sowie der Aufbau eines Prototyps einer entsprechenden Gummispritzpresse. Gegenüber dem bisher üblichen Injektionsprozeß bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, durch die exakt geregelte Umsetzung mechanischer Energie in Wärme die Temperatur der ausgespritzten Gummimasse so einzustellen, daß die mittlere Massetemperatur im Bereich der zuvor berechneten Vulkanisationstemperatur ist. Dadurch kann sowohl die Vulkanisationszeit als auch die Zykluszeit erheblich verkürzt werden.

Das Teilprojekt „Entwicklung einer digitalen Mehrgrößenregelung für Gummispritzpressen mit Hilfe moderner Rapid Control Prototyping Systeme“ der UniBwM hatte dabei zum Ziel eine modellbasierte Mehrgrößenregelung (Multi-Input/Multi-Output-Regelung) zu entwickeln, wobei die Geschwindigkeit des Spritzkolbens sowie Druck und Temperatur im Zylinder die zu regelnden Größen sind. Als Stellgröße steht neben der Spritzgeschwindigkeit und dem Druck in der Antriebshydraulik eine verstellbare Drossel zur Verfügung, mit der die Umsetzung von mechanischer Energie in Wärme beeinflusst werden kann.

Grundidee

Eine Analyse des gesamten Spritz- und Vulkanisationsprozesses zeigt, daß für eine signifikante Absenkung der Vulkanisations-

zeit dickwandiger Artikel ein zusätzlicher Temperatursprung von ca. 20 bis 50 °C in einem frühen Stadium des Spritzzyklus notwendig ist. Unter Berücksichtigung der typischen thermischen und rheologischen Gummieigenschaften erfordert dies einen Leistungseintrag von bis zu 20 kW. Da sich jedoch selbst hoch rußgefüllte Kautschukmischungen als schlechte thermische und mäßige elektrische Leiter erweisen, läßt sich dies dickwandigen Teilen nicht durch Wärmeleitung bzw. ohmsche oder dielektrische Erwärmung erreichen. Der effektivere Weg, diese Leistung in die Mischung einzubringen, ist die Dissipation mechanischer Energie im Inneren des Materials. Aus dem Energieerhaltungsgesetz läßt sich unabhängig von den rheologischen Mischungseigenschaften die maximal erreichbare Massentemperaturerhöhung unter adiabaten Bedingungen berechnen:

$$\Delta \bar{T} = \frac{\Delta p_i}{c_p \cdot \rho} \quad (1)$$

Dabei sind $\Delta \bar{T}$ eine über die Zeit und Kanalquerschnitt gemittelte Temperaturdifferenz und Δp_i der zeitlich gemittelte Druckabfall in einer Kanalströmung. Die einzigen

Autoren

F. Svaricek, V. Härtel, J. Gogolin, München, H. Degenbeck, T. Nieberl, G. Werner, Altdorf

Korrespondenz:
Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Svaricek
Institut für Steuer- und Regelungstechnik
Universität der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg
Tel.: 089-6004-2077
Fax: 089-6004-4565
E-mail: ferdinand.svaricek@unibw.de



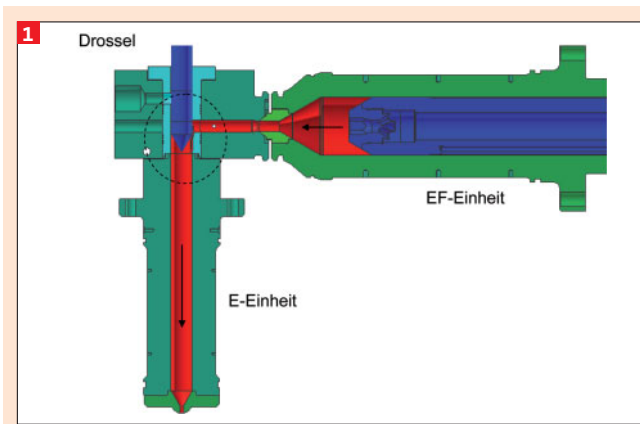
KGK RUBBERPOINT

Discover more interesting articles
and news on the subject!

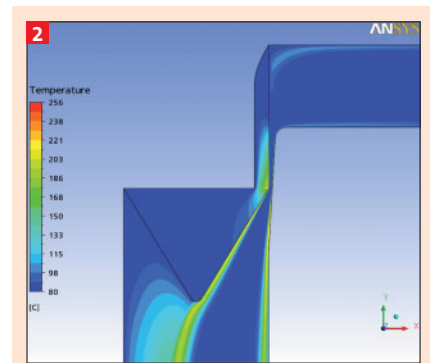
www.kgk-rubberpoint.de



Entdecken Sie weitere interessante
Artikel und News zum Thema!



1 Ausschnitt aus der CAD-Darstellung des EF-E Spritzaggregats von LWB mit einseitiger Drossel



2 Simulation der Temperaturverteilung in der Drossel

Materialkennzahlen, die den Temperaturanstieg bestimmen, sind die spezifische Wärmekapazität c_p und die Dichte der Mischung. Für die meisten Kautschukmischungen resultiert daraus unter adiabaten Bedingungen eine Temperaturerhöhung von 4 bis 5 K pro 100 bar [1]. Bei üblichen Volumenströmen von 50 bis 100 cm³/s bedeutet dies Drücke von 1500 bis 2000 bar.

Der adiabate Fall läßt sich recht einfach in Ausspritzversuchen realisieren; sie eignen sich daher gut zur praxisnahen Charakterisierung der thermischen Eigenschaften einer Mischung.

Der Einspritzvorgang in ein Formnest ist wesentlich komplexer und nähert sich erst bei sehr hohen Volumenströmen und kurzer Runnersystemen (d.h.: kurzer Verweilzeit) dem adiabaten Grenzfall an. Daher muß das für die Regelung des Spritzprozesses verwendete Modell neben der dissipativen Scherwärmung auch alle sonstigen Wärmequellen und -senken berücksichtigen, die Einfluss auf die Massetemperatur nehmen. Dadurch ergeben sich Korrekturterme der Form

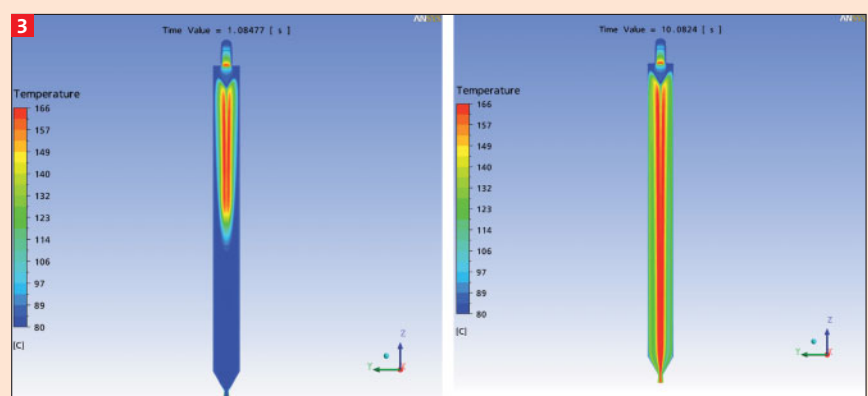
$$\Delta T = \bar{\alpha} \cdot A \cdot \bar{t}_v \cdot f_c (\bar{T}_i - T_w) \quad (2)$$

für den Wärmeaustausch im Aggregat und im Werkzeug [1],

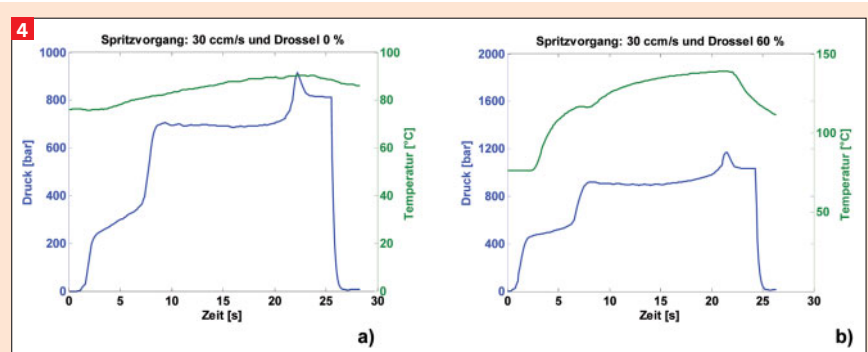
- mit $\bar{\alpha}$ = mittlerer Wärmeaustauschkoeffizient
- A = Wärmeaustauschfläche
- \bar{t}_v = mittlere Verweilzeit
- f_c = Korrekturfaktor (> 1 aufgrund höherer Randschichttemperaturen)
- T_v, T_w = Mischungs- und Wandtemperatur

Aufbau des Prototyps

Der Mischungstreifen wird von der Plastifizierschnecke eines LWB Spritzaggregates eingezogen und in die Spritzkammer der EF-



3 Temperaturverteilung aus einer Strömungssimulation der E-Einheit für den Durchsatz 40 cm³/s und Drosselstellung 80% mit einer optimierten Drossel: links Zustand nach 1 s, rechts nach 10 s

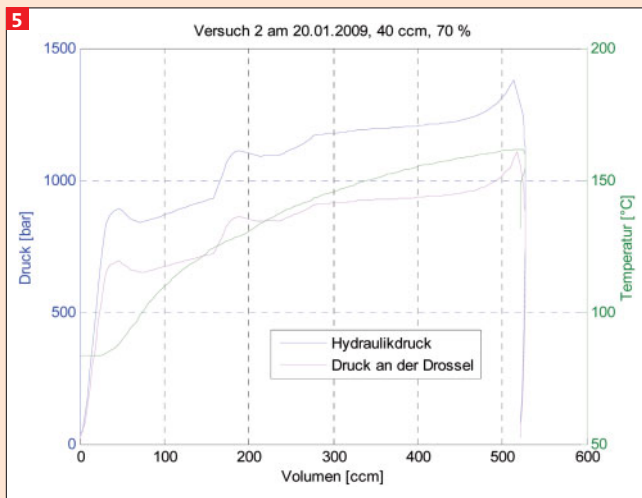


4 Typischer Verlauf von Druck und Temperatur an der Drossel für die Drosselstellungen 0 und 60%

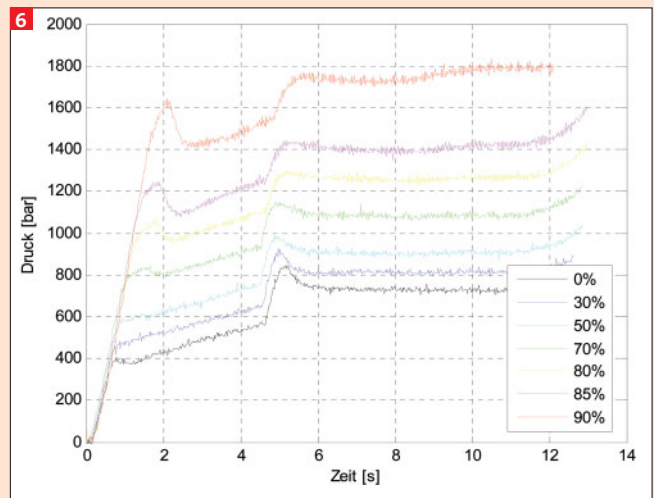
Einheit (Abb.1) gefördert. Wie bei konventionellen Spritzaggregaten wird die Materialtemperatur durch die Rotation der Schnecke und durch die Temperatur des Plastifizierzylinders erhöht. Nach dem Aufdosieren des eingestellten Volumens wird das Material von der EF-Einheit durch eine einstellbare Drossel in die nachgelagerte E-Einheit und in die Form eingespritzt. Das eingesetzte Drosselelement (Abb.1) variiert einen Spalt zwischen dem Kolben und der Wand der Kolbeneinheit. Dabei leitet eine wand-

haftende Strömung einen großen Teil der in der Drossel erwärmten Mischung entlang der Kolbenspitze in die Mitte des folgenden Fließkanals (Abb.2).

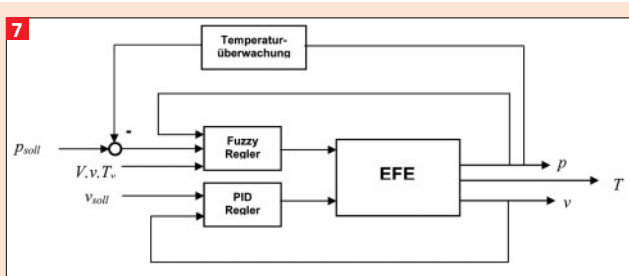
Mit der für diesen Einsatzfall speziell ausgelegten Geometrie wird im Gegensatz zu einer Runddüse das Maximum der Mischungstemperatur nicht an der Mischungstemperatur erreicht (Abb.2). Mit dem hier gezeigten System lassen sich sehr hohe Mischungstemperaturen realisieren, da der zweite



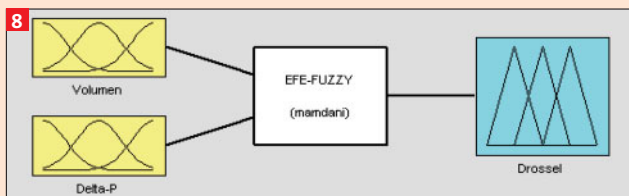
5 Drücke und Temperatur für eine Drosselstellung von 70 % bei einer Spritzgeschwindigkeit von 40 cm³/s



6 Verlauf des Antriebsdrucks der EF-Einheit für Drosselstellungen von 0 bis 90 % bei einer Spritzgeschwindigkeit von 40 cm³/s



7 Blockschaltbild der MIMO-Regelung



8 Struktur des Fuzzy-Reglers

Strömungskanal (E-Zylinder) nach jedem Einspritzzyklus restlos entleert wird und somit keine Gefahr besteht, den nächsten Spritzzyklus mit anverkrustetem Material zu verunreinigen.

Optimierung der Drossel

Im Verlauf umfangreicher Simulationsberechnungen und deren experimenteller Validierung konnte die Drosselgeometrie so verändert werden, dass eine relativ flache und symmetrische Massetemperaturverteilung erreicht wurde (Abb. 3). Für weitere Ergebnisse von Simulationen und Experimenten mit der Drossel wird auf [1, 2] verwiesen.

Experimentelle Untersuchungen ohne Regelung

Den thermischen Effekt der Drossel zeigt Abbildung 4. Hier ist der Druck in der Mi-

schung vor der Drossel für die Drosselstellungen 0 und 60 % für den Fall dargestellt, daß die Kolbengeschwindigkeit in beiden Versuchen gleich ist und die Mischung in Form eines Gummistranges ins Freie ausgespritzt wird. Bei der Drosselstellung 60 % (Abb. 4b) steigt der Druck in weniger als einer Sekunde auf etwa 400 bar. In den nächsten 3,5 Sekunden ist nur noch ein kleiner Druckanstieg zu erkennen. In dieser Zeit wird der E-Zylinder gefüllt. Der dann folgende Druckanstieg auf etwa 900 bar resultiert daraus, daß die Mischung durch eine kleine Düse am Ende des E-Zylinders ins Freie gedrückt wird. Dies führt insgesamt zu einer Erwärmung der Mischung von 80 auf etwa 140 Grad. Bei der geöffneten Drossel (Abb. 4a) ist nur ein Temperaturanstieg von etwa 10 Grad zu erkennen. In Abbildung 5 sind der hydraulische Antriebsdruck der EF-Einheit und der Druck in der Mischung vor der Drossel über dem ein-

gespritzten Volumen aufgetragen. Hier ist gut zu erkennen, daß der Verlauf des Drucks in der Mischung proportional zum hydraulischen Antriebsdruck der EF-Einheit ist.

Die Abhängigkeit des hydraulischen Drucks von der Drosselstellung bei einer konstanten Einspritzgeschwindigkeit von 40 cm³/s ist in Abbildung 6 dargestellt.

Bei der Drosselstellung 0 % (Drossel offen) sind etwa 700 bar Antriebsdruck notwendig, um die Mischung aus der Düse der E-Einheit ins Freie zu spritzen. Bei einer Drosselstellung von 90 % wird nach etwa 10 Sekunden der maximale Antriebsdruck von 1800 bar erreicht. Der Druckanstieg am Anfang ist durch das Hydrauliksystem bestimmt und offensichtlich unabhängig von der Drosselstellung. Das erste Überschwingen im Druck – der Elastizitätsspeak – nimmt erwartungsgemäß mit kleiner werdenden Drosselöffnungen deutlich zu. Entgegengesetzt verhält sich der zweite Elastizitätsspeak bei etwa 4,5 Sekunden, der durch die Austrittsdüse verursacht wird. Hier ist das Überschwingen für 0 % am größten und nimmt dann für kleinere Drosselöffnungen – also steigende Massentemperaturen – ab.

Regelungskonzept

Regelungsziel ist ein Druckverlauf p(t) vor der Drossel, der die Kautschukmasse zunächst durch einen hohen Energieeintrag rasch auf die gewünschte Temperatur bringt und diese während des gesamten Spritzvorgangs konstant hält. Die bisherige Regelung der Geschwindigkeit v des Spritzkolbens in der EF-Einheit wird beibehalten und der vom Prozessmodell vorgegebene Soll-Druck im EF-Zylinder wird mittels eines Fuzzy-Reglers über die Drossel geregelt.

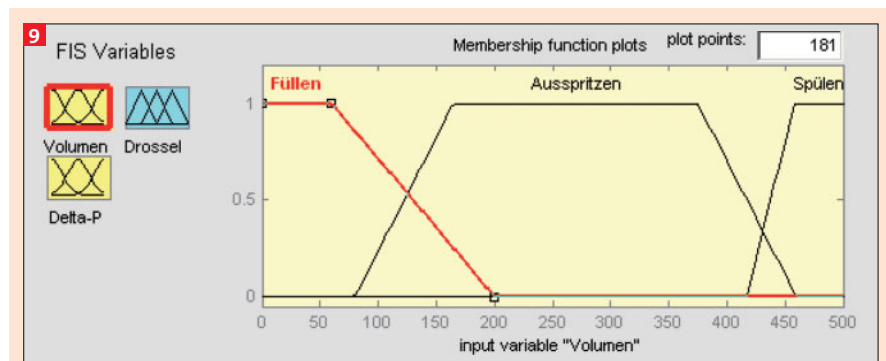
Zur Berechnung der für die wahre Temperaturdifferenz jeweils erforderlichen Einspritzleistung berücksichtigt der Regler neben der dissipierten Einspritzarbeit die mit CFD-Rechnungen für verschiedene Spritzgeschwindigkeiten und Systemtemperaturen ermittelten und experimentell verifizierten Kühlleistungen. Hierzu benötigt der Fuzzy-Regler als zusätzliche Eingangsgrößen das in den E-Zylinder eingespritzte Volumen V , die Spritzgeschwindigkeit sowie die Wandtemperaturen des Aggregates vor und hinter der Drossel sowie Druckverlust und Temperatur im Werkzeug.

Die Ausgangsgröße des Fuzzy-Reglers ist die Drosselstellung; gleichzeitig wird die gemessene Temperatur T hinter der Drossel überwacht und bei Überschreitung eines Grenzwertes durch einen Eingriff der Überwachung abgesenkt (Abb. 7).

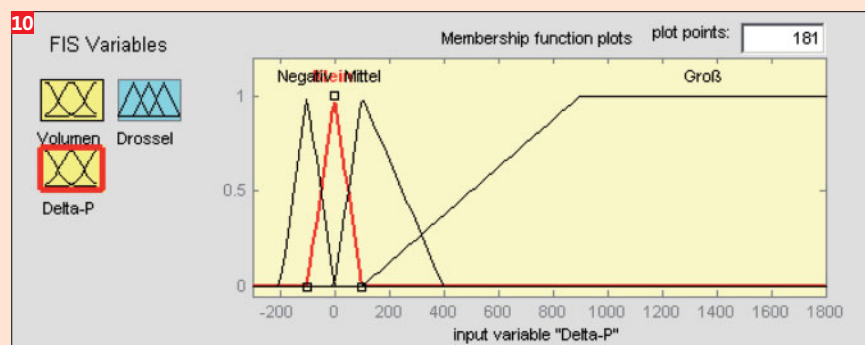
Für die Regelung des Druckes im EF-Zylinder mit Hilfe der Drossel wurden sowohl Versuche mit einem konventionellen PID- als auch mit dem Fuzzy-Regler durchgeführt. Wenn man die Reglerparameter sorgfältig optimiert, führt auch der PID-Regler zu guten Ergebnissen. Allerdings sprechen die folgenden Gründe für den Einsatz eines Fuzzy-Reglers: Der Zusammenhang zwischen Drosselstellung und Druck im EF-Zylinder ist besonders während der ersten Füllphase stark nichtlinear (Abb. 6) und nicht durch ein einfaches mathematisches Prozeßmodell zu beschreiben. Hier zeigte der Fuzzy-Regler im Gegensatz zum PID-Regler ein sehr robustes Verhalten. Darüber hinaus kann das während der Simulationen und experimentellen Versuchen gewonnene Prozeßwissen mittels der von Zadeh in den 1960er Jahre entwickelte Fuzzy-Logik [3] in eine Regelbasis mit WENN-DANN-Regeln umgesetzt werden. Mit Hilfe eines entsprechenden Inferenzmechanismus [4] kann der Fuzzy-Regler diese Regeln dann auswerten und eine geeignete Drosselstellung berechnen. Für eine ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile von Fuzzy- und konventionellen Regelungen wird auch auf [5] verwiesen. Zur Realisierung des Fuzzy-Reglers wurde die Fuzzy Control Toolbox von Matlab und ein Rapid Control Prototyping System der Firma dSPACE [6] eingesetzt.

Der Fuzzy-Regler

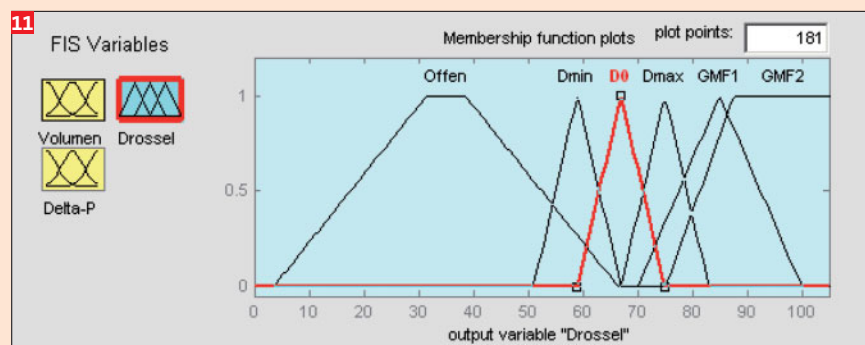
Der Fuzzy-Regler wird mit der Fuzzy-Toolbox von Matlab realisiert und benötigt als Eingangsgrößen das in den E-Zylinder eingespritzte Volumen sowie die Differenz zwischen Soll- und Istdruck. Mit Hilfe einer Mamdani-Inferenz wird aus diesen Eingangsgrößen die Stellgröße berechnet. Die



9 Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgröße Volumen



10 Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgröße Delta_P



11 Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsgröße Drosselstellung

für die verschiedenen Teilschritte verwendeten Operatoren können der Abbildung 8 entnommen werden.

Die für die Fuzzifizierung der Eingangsgröße Volumen verwendeten Zugehörigkeitsfunktionen sind trapezförmig und in Abbildung 9 dargestellt.

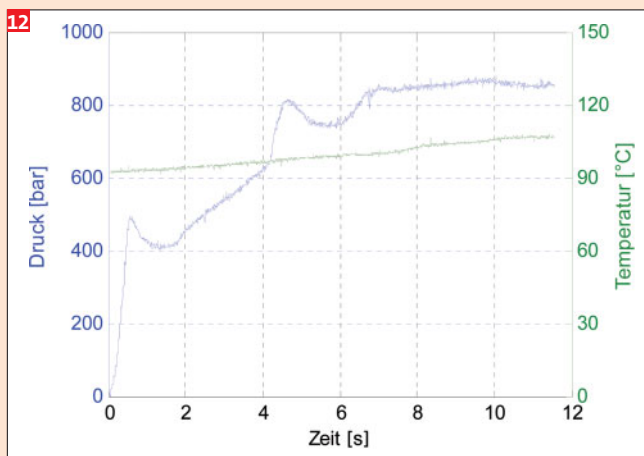
Mit diesen Zugehörigkeitsfunktionen wird der Spritzvorgang in drei Phasen unterteilt:

- Der E-Zylinder ist nach dem vorangegangenen Spritzzyklus komplett entleert und muß zunächst gefüllt werden. Die erste Zugehörigkeitsfunktion wird daher mit „Füllen“ bezeichnet.
- Nach dem Füllen des E-Zylinders tritt die Gummimischung aus der Maschinendüse des E-Zylinders aus. Dieser Phase wird die Zugehörigkeitsfunktion „Ausspritzen“ zugeordnet.

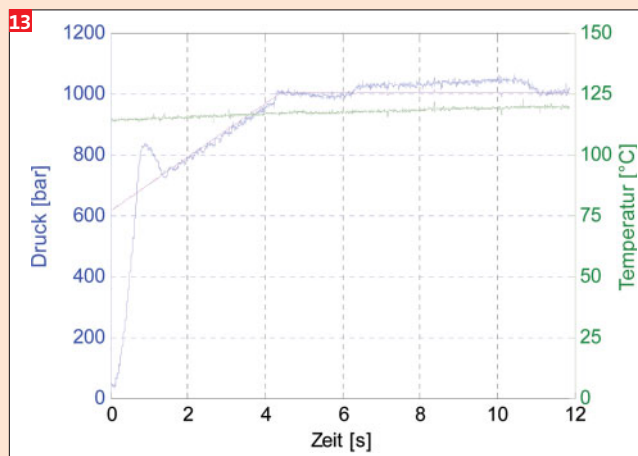
- In der letzten Phase wird die Drossel auf etwa 20% geöffnet. Der Strömungswiderstand ist nun sehr gering (Abb. 6), noch im Drosselbereich befindliche erwärmte Mischung wird durch kühle Mischung verdrängt und in den E-Zylinder gefördert. Da das eigentliche Drosselvolumen sehr gering ist (~ 1 ccm), und der Drosselbereich sehr effektiv temperiert wird, reichen 20-30 cm³ „kühler“ Mischung, um ein Anvulkanisieren oder gar Ausvulkanisieren sicher zu vermeiden. Diese Phase wird daher mit „Spülen“ bezeichnet.

Die gewählten Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzifizierung der Differenz von Soll- und Istdruck zeigen Abbildung 10.

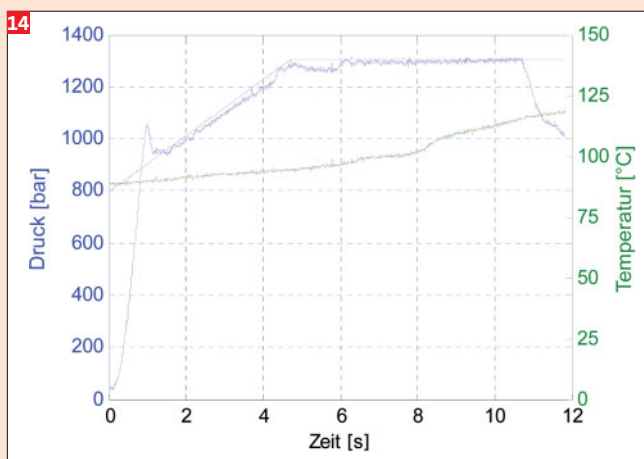
Die Ausgangsgröße des Fuzzy-Reglers ist die Drosselstellung in Prozent, wobei 0% voll geöffnet und 100% voll geschlossen



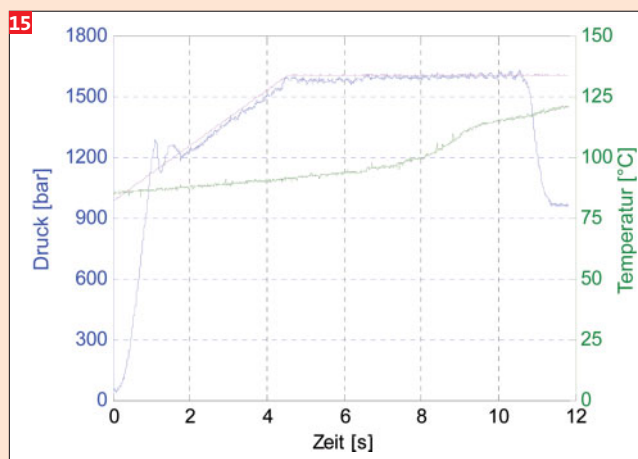
12 Druck- und Temperaturverlauf für 40 cm³/s und Drossel 0%



13 Druck- und Temperaturverlauf für 40 cm³/s und einem Solldruck von 1000 bar



14 Druck- und Temperaturverlauf für 40 cm³/s und einem Solldruck von 1300 bar



15 Druck- und Temperaturverlauf für 40 cm³/s und einem Solldruck von 1600 bar

bedeutet. Für die Defuzzifizierung der Ausgangsgröße werden die in Abbildung 11 dargestellten Zugehörigkeitsfunktionen verwendet.

Die Zugehörigkeitsfunktion Offen wird für die „Spülphase“ eingesetzt und die Funktionen GMF1 und GMF2 für die „Füllphase“. Für die Regelung in der „Ausstritzphase“ stehen die Zugehörigkeitsfunktionen Dmin, D0 und Dmax zur Verfügung. Die Regeln, die in der Ausstritzphase eingesetzt werden bilden das Verhalten eines Bedieners nach:

- Wenn Istdruck > Solldruck DANN öffne Drossel
- Wenn Istdruck < Solldruck DANN schließe Drossel
- Wenn Istdruck ~ Solldruck DANN verändere Drossel nicht

Durch die Funktionen Dmin, D0 und Dmax wird vorgegeben in welchen Bereichen die

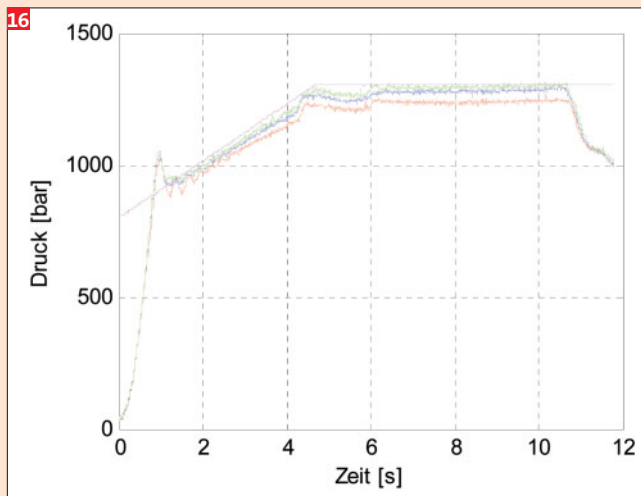
Drosselstellung variieren kann. Unzulässige Drosselstellungen können daher nicht auftreten. Je nach Arbeitsbereich (Solldruck, Kolbengeschwindigkeit) kann man diese Funktionen nach rechts oder links verschieben. Damit kann relativ einfach eine automatische Adaption realisiert werden.

Experimentelle Ergebnisse mit Regelung

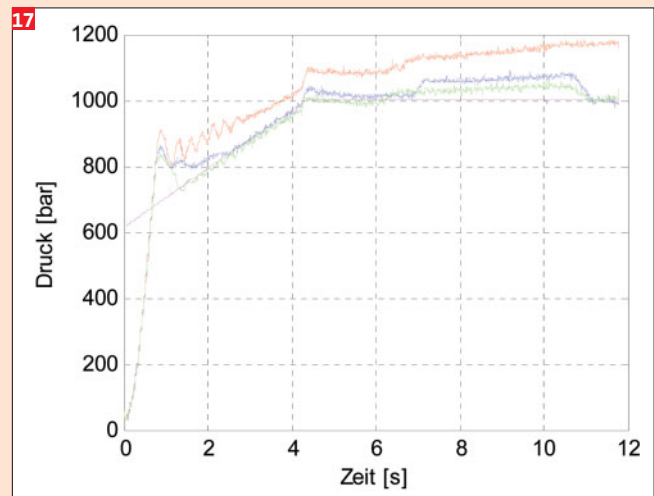
Bei den Experimenten konnte auf ein bereits existierendes Aggregat der Firma LWB zurückgegriffen werden, bei der eine Schneckenkolbeneinheit (EF) in Kombination mit einer zweiten Kolbeneinheit (E) eine vollständige Leerung der Maschine nach jedem Spritzzyklus garantiert. Ohne Gefahr, die nächste Maschinenfüllung mit an vulkanisiertem Material der vorherigen zu verunreinigen, können jetzt mit der Regelung reproduzierbar und langzeitstabil Temperaturerhöhungen bis an die Anvulkanisationsgrenze der jeweiligen Mischung realisiert werden.

Für die im weiteren gezeigten Messungen wurde ein dickwandiger Probekörper konzipiert, bei dem an drei verschiedenen Meßstellen im Werkzeug Temperaturen gemessen werden können. Bei dem Probekörper handelt es sich um einen Zylinder mit 80 mm Durchmesser und 100 mm Höhe und einem Volumen von etwa 525 cm³. Meßfühler messen die Temperaturen im Zentrum sowie jeweils 15 mm von der Stirn- bzw. Zylinderwand entfernt. Eine identische Meßfühleranordnung wird auch benutzt um die Temperaturen im Inneren nach der Entnahme aus dem Werkzeug während des Abkühlvorganges zu verfolgen.

Abbildung 12 zeigt Druck- und Temperaturverlauf für einen Spritzversuch in die zylindrische Form für 40 cm³/s und voll geöffnete Drossel. Der Temperaturverlauf zu Beginn des Füllvorganges wurde mit dem Sensor gemessen, der etwa 15 mm von der Zylinderwand entfernt ist. Die Mischung hat-



16 Adaptionsergebnisse für $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ und einem Solldruck von 1300 bar



17 Adaptionsergebnisse für $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ und einem Solldruck von 1000 bar

te vor dem Einspritzen eine Temperatur von 84 Grad. In der Form wurde nach einer Minute eine Temperatur von 112,5 Grad gemessen, so daß sich bei geöffneter Drossel ein Temperaturanstieg von 28,5 Grad ergab. Bezogen auf den maximalen gemessenen Antriebsdruck von etwa 850 bar ergibt sich ein Temperaturanstieg von 3,35 Grad pro 100 bar bezogen auf den durch Integration ermittelten mittleren Druck von 727 bar so folgt eine Temperaturerhöhung von 3,92 Grad /100 bar.

Die Ergebnisse eines Versuchs mit dem Fuzzy-Regler sind in Abbildung 13 dargestellt. Hier wurde der Solldruck in etwa 4 Sekunden von 600 auf 1000 bar erhöht und dann konstant gehalten. Der Istdruck folgt dem Solldruck nach etwa 1,5 Sekunden sehr gut. Die Mischung hatte vor dem Einspritzen eine Temperatur von 85 Grad. In der Form wurde nach einer Minute eine Temperatur von 122 Grad gemessen, so daß sich für 1030 bar ein Temperaturanstieg von 37 Grad ergab. Bezogen auf den mittleren Antriebsdruck von 942 bar ergibt sich ein Temperaturanstieg von 3,92 Grad pro 100 bar. Einen weiteren geregelten Versuch zeigt Abbildung 14. Hier wurde der Solldruck in etwa 4 Sekunden von 800 auf 1300 bar erhöht und dann konstant gehalten. Der Istdruck folgt auch hier dem Solldruck nach etwa 1,5 Sekunden sehr gut. Die Mischung hatte vor dem Einspritzen wiederum eine Temperatur von 85 Grad. In der Form wurde nach einer Minute eine Temperatur von 130 Grad gemessen, so daß sich für 1300 bar stationären Druckein Temperaturanstieg von 45 Grad ergab. Bezogen auf den mittleren Antriebsdruck von 1163 bar ergibt sich ein Temperaturanstieg von 3,86 Grad pro 100 bar.

Abschließend in Abbildung 15 ein Versuch mit einem Endsolldruck von 1600 bar. Der Istdruck folgt hier dem Solldruck nach etwa 2 Sekunden sehr gut. Die Mischung hatte vor dem Einspritzen eine Temperatur von 84 Grad. In der Form wurde nach einer Minute eine Temperatur von 138,2 Grad gemessen, so daß sich für 1600 bar ein Temperaturanstieg von 54,2 Grad ergab. Bezogen auf den gemittelten Antriebsdruck ergibt sich wiederum ein Temperaturanstieg von 3,80 Grad pro 100 bar. Die etwas niedrigeren Werte bei höheren Ausgangstemperaturen sind durch die höhere Kühlleistung im E-Bereich verursacht und werden im Prozeßmodell berücksichtigt.

Begleitende Simulationsrechnungen zeigten, daß bei entsprechender Vorwahl der Starttemperatur und der Einbeziehung des Temperaturverlaufs während der Abkühlphase eine vollständige Durchvulkanisation des Zylinders in weniger als 300 s möglich ist. Diese Simulationsergebnisse konnten in unseren experimentellen Untersuchungen bestätigt werden: in Vulkanisationsversuchen mit dem Regelsystem mit einer normal beschleunigten EPDM-Mischung wurden bei einer Werkzeugtemperatur von 165°C reproduzierbar Fülltemperaturen von 160°C erreicht und Heizzeiten von 200 s realisiert.

Automatische Adaption des Fuzzy-Reglers

Es ist bekannt [7], daß sich für Fuzzy-Regler häufig einfache Adaptionalgorithmen finden lassen. Der eingesetzte Fuzzy-Regler ist im Prinzip ein P-Regler mit einer variablen Verstärkung, die von den beiden Eingangsgrößen abhängig ist. Er enthält also keine integrierenden Anteile, die eine stationäre

Genauigkeit erzwingen. Über die Zugehörigkeitsfunktion D_0 in Abbildung 11 wird eingestellt, welche Drosselstellung bei einer Regelabweichung von Null ausgegeben wird. Die optimale Drosselstellung für stationäre Genauigkeit ist jetzt aber vom Solldruck, der Einspritzgeschwindigkeit und der Mischung abhängig (vgl. Abbildung 6). In Abhängigkeit vom stationären Druckfehler kann man die Zugehörigkeitsfunktionen D_{\min} , D_0 und D_{\max} in Abbildung 11 jetzt von Zyklus zu Zyklus mit einfachen Regeln adaptieren: Verschiebe die Zugehörigkeitsfunktionen nach links, wenn der Istdruck größer als der Solldruck ist und nach rechts im umgekehrten Fall. Stabilitätsprobleme können nicht auftreten, solange man darauf achtet, daß D_{\min} nicht kleiner Null bzw. D_{\max} nicht größer als 90 % bei z. B. $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ wird.

In Abbildung 16 sind Ergebnisse für den Fall dargestellt, daß der gewählte Drosselarbeitspunkt für den eingestellten Solldruck zu klein ist, die Drosselöffnung also zu groß ist. Nach 2 Adaptionsschritten wird eine gute stationäre Genauigkeit erreicht. Adaptionsergebnisse für den umgekehrten Fall zeigen Abbildung 17. Hier wurde der Drosselarbeitspunkt, der für einen Solldruck von 1500 bar gute Ergebnisse liefert, beibehalten und ein neuer Solldruck von 1000 bar vorgegeben. Auch hier ist nach zwei Adaptionsschritten schon ein guter Drosselarbeitspunkt gefunden.

Grenzen und Möglichkeiten

Bislang ließen sich alle untersuchten Mischungen auf Basis NR, EPDM; NBR und CR gut verarbeiten; das System hat aber möglicherweise Grenzen im Bereich extrem

scher- und wärmeempfindlicher Mischungen. Zudem hängt die Regelbarkeit vom Strömungswiderstand im Werkzeug ab: Wenn im Runnersystem des Werkzeugs von insgesamt verfügbaren 2000 bar schon 1800 bar abfallen, läßt sich durch eine vorgeschaltete regelbare Drossel nur wenig Einfluß auf die Endtemperatur erzielen, daher sollte das Runnersystem auf einen Druckabfall von 700 bis max. 1200 bar ausgelegt sein, um genügend Spielraum für die Regelung zu haben.

Abgesehen von solchen möglichen Einschränkungen, die auch für konventionelle Prozesse gelten, bietet der geregelte Prozeß eine Reihe neuer Möglichkeiten:

Allfällige Viskositätsschwankungen der Mischungen werden ausgeglichen und ändern den Energieeintrag und die Fülltemperatur nicht. Gleichzeitig sorgt die Temperaturüberwachung des Regelsystems für die Einhaltung der vorgegebenen Temperaturgrenzen. Im Falle einer drohenden Temperaturüberschreitung (Warngrenze) wird die Spritzgeschwindigkeit für einige Sekunden um 20% gedrosselt, um sicher unterhalb der

Eingriffsgrenze zu bleiben. Da die Masstemperatur unter sonst konstanten Bedingungen in weiten Grenzen von der Spritzgeschwindigkeit unabhängig ist, hat die kurzzeitige Rücknahme um 20% keine Auswirkung auf den Vulkanisationsprozess des Artikels und verzögert die Zykluszeit nur unmerklich. Erst bei Erreichen der Eingriffsgrenze wird die Drossel geöffnet und die Geschwindigkeit weiter reduziert.

Unsere Simulationen und Untersuchungen zeigen, daß sich unter den experimentell evaluierten Bedingungen mit einem entsprechenden Aggregat selbst Teile mit einem Volumen von mehreren Litern in weniger als 10 Minuten vulkanisieren lassen, und das mit einem äußerst gleichmäßigen Vulkanisationsgrad über das gesamte Volumen. Das eröffnet völlig neue Möglichkeiten für die kostengünstige Serienproduktion großvolumiger Teile.

In Zukunft ist es auch denkbar, das hier beschriebene System mit einem Vulkanisationsrechner zu koppeln und damit ein System zur Vulkanisationsregelung (Automatic Cure Control) zu erstellen, das abweichend

von herkömmlichen Vulkanisationsrechnern mit konstanter Zykluszeit arbeitet, da Schwankungen der Werkzeugtemperatur über die Eingangstemperatur der Masse anstatt über die Heizzeit ausgeglichen werden.

Literatur

- [1] V. Härtel, F. Svaricek, J. Gogolin and Th. Nieberl: A New Approach to High Performance Injection Moulding. International Rubber Molding Conference, Chicago, IL, April 8/9, 2008.
- [2] J. Gogolin, V. Härtel und F. Svaricek: Rheologische Auslegung eines Rapid Cure Systems: Numerische Simulation und Experimente. DKG-Fachtagung, Fulda, 17. Juni 2008.
- [3] L. A. Zadeh, Fuzzy Sets, Information and Control **8** (1965) 338.
- [4] T. Bertram, F. Svaricek, T. Bindel, R. Böhm, H. Kiendl, B.- M. Pfeiffer und M. Weber, Fuzzy Control, Automatisierungstechnik **42** (1994) 322.
- [5] T. Bertram und F. Svaricek: Fuzzy versus konventionelle Regelung eines inversen Pendels. GMA-Aussprachetag, 'Nichtlineare Regelung', Langen, Mai 1993, VDI-Berichte Nr. 1026, S. 329.
- [6] H. Hanselmann, Automatisierungstechnik **46** (1998) 113.
- [7] T. Bertram und F. Svaricek, GMA-Aussprachetag, Fuzzy Control, Langen, 1994, VDI-Berichte Nr. 1113, S. 439.