

# Vorausschauende Zylindertemperierung

## Modellprädiktive Regelung verkürzt den Aufheizvorgang und erhöht die Energieeffizienz

Das Aufheizen des Plastifizierzylinders einer Spritzgießmaschine soll möglichst wenig Zeit in Anspruch nehmen. Modellprädiktive Regelungsverfahren können dabei hilfreich sein, weil sie das Verhalten der Regelstrecke im Betrieb voraussagen. Dadurch reduzieren sich sowohl die Aufheizzeit als auch der Energiebedarf.

**P**ID-Regler werden heute in der Regel mit automatischen Lernalgorithmen, die ohne mathematisches Modell der zu regelnden Anlage auskommen, im Prozess optimiert. Für Verbesserungen des Aufheizvorgangs von Plastifizierungen, z. B. die Reduzierung der Aufheizzeit bei geringerem Energieverbrauch, ist in diesem Fall kein Spielraum mehr vorhanden. Deshalb wurden an der Versuchsanlage der Fachhochschule Rosenheim neue Regelungsverfahren entwickelt, getestet und verglichen. Als Versuchsanlage kommt eine horizontale Spritzgießmaschine (Typ: 80/380 EX, Hersteller: Krauss-Maffei Technologies GmbH, München) zum Einsatz. Die Spritzgießmaschine steht in einem geschlossenen Raum, in dem Temperatur und Luftfeuchtigkeit geregelt werden können. Dadurch werden äußere Einflüsse ausgeschlossen und die Verifizierung der entwickelten Regler findet immer unter vergleichbaren Bedingungen statt.

Der Plastifizierzylinder der Versuchsanlage besitzt einen Bohrungsdurchmesser von 30 mm (**Bild 1**). Die Abbildung zeigt die fünf Heizzonen, nummeriert von links

nach rechts mit 11, 04, 03, 02, 01. Die Thermofühler, die die Temperatursignale für die fünf PID-Regler liefern, sind als rote Kreise dargestellt und messen die Temperatur ca. 1 cm von der Zylinderinnenwand entfernt.

### Aufbau des Systems zur Reglerentwicklung

Zur Entwicklung eines Regelungssystems verfügt die Technikumsanlage über einen Industrie-PC (IPC) mit einem Echtzeitbetriebssystem. Die Maschinensteuerung ist an den IPC angebunden, sodass die Daten des Spritzgießprozesses erfasst und die Heizbänder des Plastifizierzylinders angesteuert werden können. Eine Anbindung der Steuerung des Prozessraums erlaubt den Zugriff auf Daten wie Umgebungstemperatur und Luftfeuchte. Eine Schnittstelle zwischen IPC und einer Entwicklungssoftware für Regler ermöglicht die Integration des erstellten Reglers im Echtzeitbetriebssystem (**Bild 2**).

Der Benchmark bildet den Stand des aktuell eingesetzten Reglers mit optimierten Reglerparametern ab. Für den

Reglervergleich wurden folgende Randbedingungen definiert: Das Aufheizen ist dann beendet, wenn alle Heizzonen den festgelegten Toleranzbereich von  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  der Solltemperatur einhalten und die Durchwärmzeit, die 20 K unterhalb der Solltemperatur startet, abgelaufen ist. Zu diesem Zeitpunkt ist das Aufheizen beendet und der Anfahrprozess kann beginnen. Ausschlaggebend für die Aufheizzeit von 2087 s (34 min und 47 s) ist Heizzone 4 (**Bild 3**).

### Modellbildung des Plastifizierzylinders

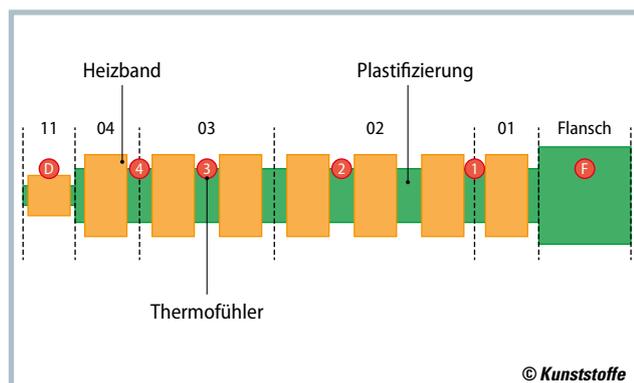
Bei rechnergestützten Reglerentwürfen ist ein Modell des zu regelnden Systems notwendig. Ein Modell beschreibt mathematisch den Zusammenhang zwischen einer Eingangsgröße und einer Ausgangsgröße, sodass man für ein gegebenes Eingangssignal das Ausgangssignal simulieren und das Verhalten von Reglern im Vorfeld analysieren kann.

Ein Modell mit einer Eingangsgröße und einer Ausgangsgröße wird Single-Input-Single-Output (SISO)-System genannt. Analog werden Modelle, bei denen mehrere Eingänge eine Auswirkung auf mehrere Ausgänge haben, als Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)-Systeme bezeichnet. **Bild 4** zeigt den Wirkungsplan des Plastifizierzylinders der Versuchsanlage. Das Modell des Plastifizierzylinders beschreibt das Verhalten der Einschaltdauer (ED) der Heizbänder auf die Temperatur der Heizzonen.

Die Kombination der fünf Eingänge mit den fünf Ausgängen ergibt 25 Verbindungen. Jede Verbindung entspricht einer mathematischen Gleichung. Das gesamte Modell setzt sich folglich aus »

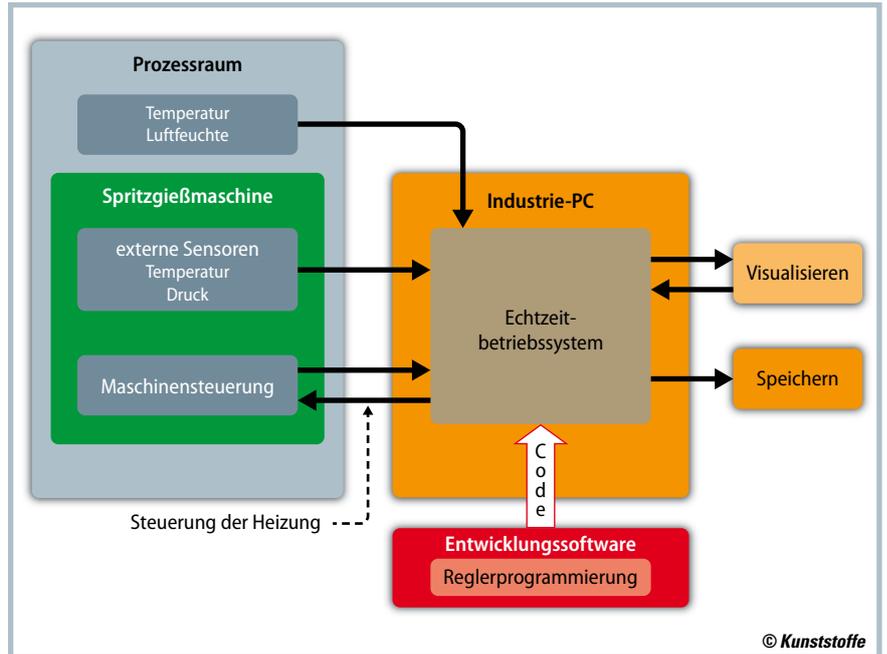
**Bild 1.** Zur Entwicklung des neuen Regelungssystems wird ein Plastifizierzylinder mit einer Bohrung von 30 mm und fünf Heizzonen verwendet. Die Thermofühler sind als rote Kreise dargestellt

(Quelle: HS Rosenheim)



25 sogenannten Übertragungsfunktionen zusammen. Aus zusätzlichen Versuchen ergab sich, dass die jeweils betrachtete Heizzone nur die benachbarten Heizzonen signifikant beeinflusst. Nicht relevante Übertragungsfunktionen werden deshalb durch Null ersetzt. Die Übertragungsfunktion beschreibt das Übertragungsverhalten der Einschaltdauer der jeweiligen Heizzone auf die Temperatur der Heizzone (**Bild 4 Mitte**). Jede Übertragungsfunktion entspricht mathematisch einer PT2-Strecke mit Totzeit. Diese hat ein proportionales Übertragungsverhalten mit einer Verzögerung zweiter Ordnung und Totzeit (**Bild 4 unten**).

Mithilfe einer Software zur Modellbildung können somit die Parameter der einzelnen Übertragungsfunktionen aus den gemessenen Ein- und Ausgangsdaten ermittelt werden. Die Software sucht



**Bild 2.** Durch die Anbindung eines Industrie-PCs an die Spritzgießmaschine können entwickelte Regler die Steuerung der Heizbänder ohne großen Aufwand übernehmen (Quelle: HS Rosenheim)

## Die Autoren

**Markus Zillmer, M.Sc.**, ist seit 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Rosenheim; markus.zillmer@fh-rosenheim.de

**Prof. Dipl.-Ing. Peter Karlinger** ist Leiter der Spritzgießtechnik und Reinraumtechnik an der Hochschule Rosenheim.

**Prof. Dr.-Ing. Peter Zentgraf, M.Sc.**, ist Leiter des Labors für Mess- und Regelungstechnik, Modellbildung und Simulation an der Hochschule Rosenheim.

**Günther Grimm** ist Leiter der Software- und Steuerungstechnik der KraussMaffei Technologies GmbH, München.

**Dipl.-Ing. (Univ.) Wilhelm Wolf** ist Software-Entwickler in der Software- und Steuerungstechnik bei KraussMaffei.

## Dank

Die Entwicklungen wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über den Projektträger Jülich (PTJ) unter der Nummer 03FH058PX2 und dem Projektkronym VerTemp finanziell gefördert. Dem BMBF und dem PTJ gilt der Dank der Autoren – ebenso allen Firmen und Personen, die diese Arbeit unterstützt haben.

## Service

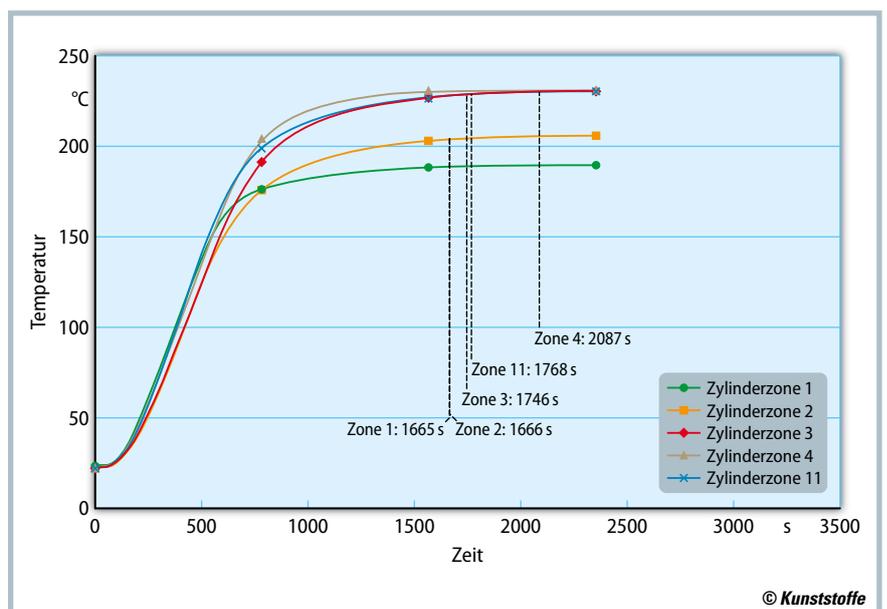
### Literatur & Digitalversion

- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/1484547](http://www.kunststoffe.de/1484547)

dabei die unbekannt Parameter der einzelnen Übertragungsfunktionen, sodass mithilfe der jeweiligen Eingangssignale das entsprechende Ausgangssignal mathematisch nachgebildet werden kann. Das Ergebnis ist die Übertragungsmatrix – das Modell des Plastifizierzylinders. Mit diesem Modell kann dann rechnergestützt ein neuer Regler entwickelt werden.

## Vorhersage der Regelgröße

Bei der modellbasierten prädiktiven Regelung (MPC) wird das erstellte Modell des Plastifizierzylinders nicht nur zum Entwurf und zur Einstellung des Reglers, sondern auch als Komponente zur Vorhersage des Verhaltens der Regelstrecke im Betrieb verwendet. Das heißt, ein MPC-Regler speichert die historischen Werte

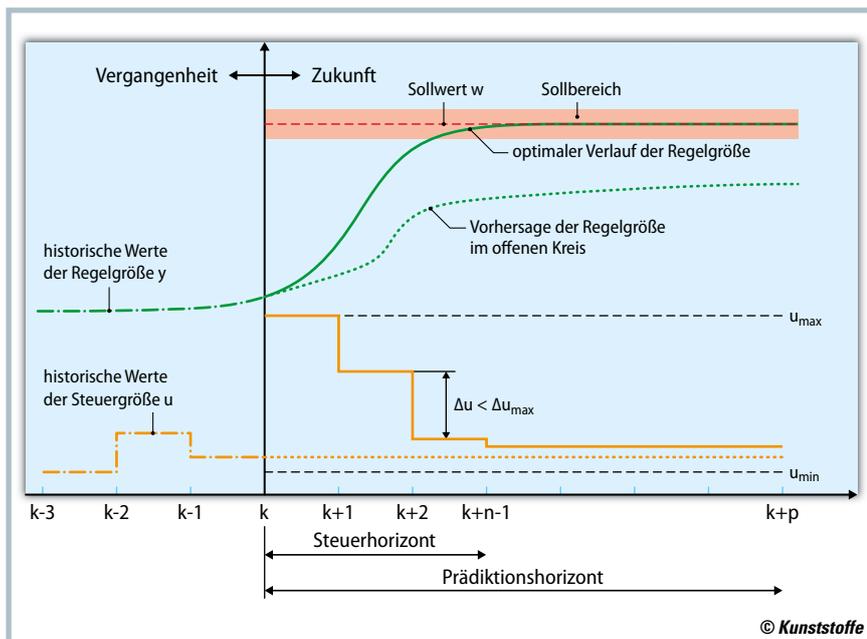


**Bild 3.** Als Benchmark wird der Stand des aktuell eingesetzten Reglers verwendet. Dargestellt ist der Verlauf der Temperaturen über die Zeit und die entsprechende Aufheizzeit der fünf Heizzonen (Quelle: HS Rosenheim)

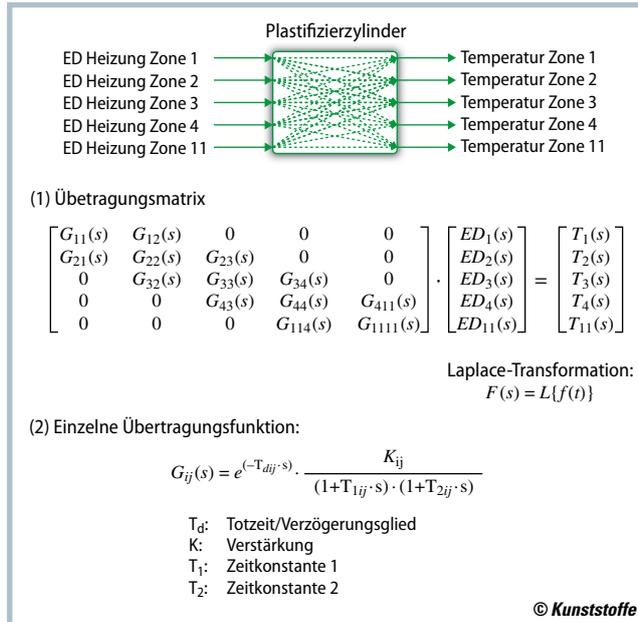
der Prozessvariablen. Mit dem Modell und den historischen Daten der Prozessvariablen berechnet der MPC-Regler bei unveränderter Steuergröße  $u$  eine Vorhersage der Regelgröße  $y$  („Vorhersage der Regelgröße im offenen Kreis“, **Bild 5**).

Darüber hinaus berechnet der MPC-Regler den optimalen Verlauf der Regelgröße. Die Berechnung erfolgt mithilfe eines Optimierungsverfahrens, das zum Beispiel mit der Funktionsweise eines Schachcomputers vergleichbar ist. Ein Schachcomputer berechnet unter Einhaltung der Spielregeln den optimalen Zug. Dies realisiert er durch Ausprobieren einer festgelegten Anzahl von zukünftigen Zügen und durch Analyse der resultierenden Auswirkungen. Danach vollzieht der Schachcomputer seinen Zug mit dem Ziel, den Gegner schnellstmöglich zu besiegen. Entsprechend berechnet der MPC-Regler eine optimale Steuergrößenfolge  $u$  für jede Heizzone mit dem Ziel, einen optimalen Verlauf der Regelgröße  $y$  zu erreichen. Dabei werden die Sollbereiche für die Steuer- und Regelgröße und die maximal erlaubte Steuergrößenänderung eingehalten.

In **Bild 5** wird angenommen, dass sich der Sollwert  $w$  in der Vergangenheit sprungförmig erhöht hat. Die festgelegte Abtastzeit  $\Delta k$  ist konstant. Der aktuelle Zeitschritt ist  $k$ . Auf der Abszisse ist die



**Bild 5.** Grundprinzip eines MPC-Reglers in Anlehnung an [1]. Der Prädiktionshorizont  $p$  beschreibt die Länge der Vorhersage des zukünftigen Verlaufs der Regelgröße im offenen Regelkreis. Der Steuerhorizont  $n$  gibt die Länge der Lösung der Optimierungsaufgabe für zukünftige Steuergrößenänderungen an. (Quelle: [1])



**Bild 4.** Oben: Der Wirkungsplan des Plastifizierzylinders der Versuchsanlage beschreibt das Verhalten der Einschaltdauer (ED) auf die Temperatur der Heizzonen. Mitte und unten: Die Übertragungsmatrix des Plastifizierzylinders (1) stellt das mathematische Modell des Plastifizierzylinders dar, dieses besteht aus einzelnen PT2-Übertragungsfunktionen mit Totzeit (2) (Quelle: HS Rosenheim)

Zeit aufgetragen. Die Ordinate teilt zum aktuellen Zeitpunkt  $k$  das Schema in Vergangenheit und Zukunft.

**Prädiktionshorizont und Steuerhorizont**

Der Prädiktionshorizont  $p$  beschreibt dabei die Länge der Vorhersage des zukünftigen Verlaufs der Regelgröße im offenen Regelkreis. Diese Vorhersage wird

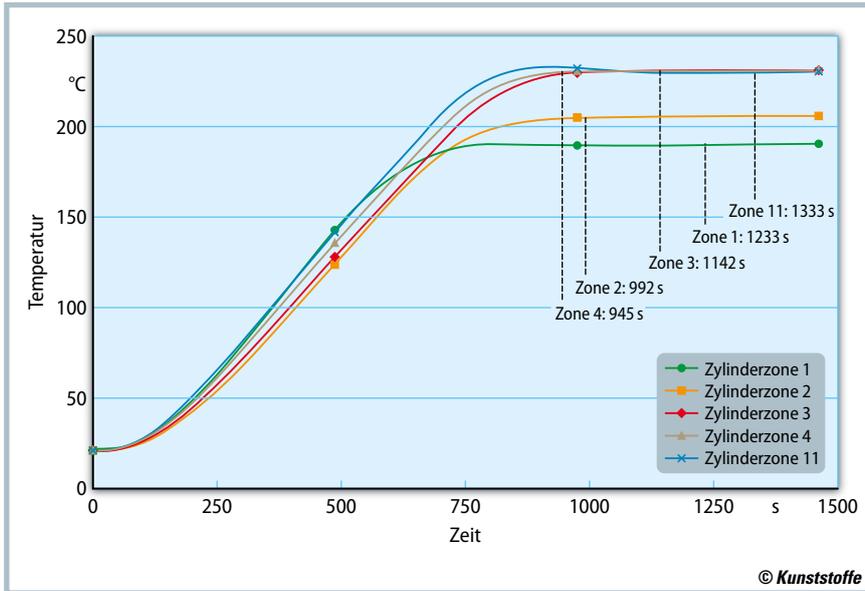
unter der Annahme berechnet, dass sich die Steuergröße nicht ändert. Im Zentrum dieser Vorhersage stehen das Prozessmodell und die gespeicherten Prozessvariablen.

Der Steuerhorizont  $n$  gibt die Länge der Lösung der Optimierungsaufgabe für zukünftige Steuergrößenänderungen an. Ziel des Optimierungsproblems ist, die über den Prädiktionshorizont vorhergesagten Regeldifferenzen zu minimieren. Dabei soll die Zielfunktion die Stellaktivität der Steuergröße und die Regeldifferenz minimieren. Zusätzlich können die bereits erwähnten Sollbereiche der Steuer- und Regelgröße als Nebenbedingungen in die Optimierungsaufgabe einfließen.

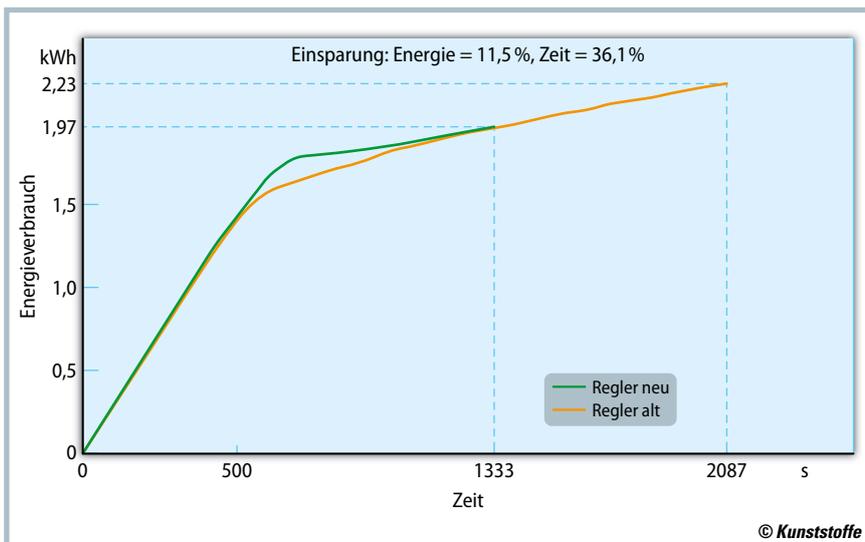
Gestellt wird vom MPC-Regler nur das erste Element der Steuergrößenfolgen. Nach jedem Abtastschritt wird das reale Verhalten des geschlossenen Regelkreises mit der berechneten Vorhersage des offenen Regelkreises verglichen. Daraufhin wird die Vorhersage korrigiert. Dem Unterschied zwischen Modell und Realität wird damit Rechnung getragen. Das heißt, je besser das Modell der Realität entspricht, desto weniger Korrekturen sind nötig.

**Validierung der Ergebnisse**

Das Ergebnis des entwickelten MPC-Reglers zeigen die Aufheizkurven (**Bild 6**). Nach 1333 s (22 min und 13 s) sind der Aufheizvorgang sowie die Durchwärmzeit »



**Bild 6.** Mit dem MPC-Regler sind der Aufheizvorgang sowie die Durchwärmzeit nach 1333 s abgeschlossen. Dies entspricht im Vergleich mit den PID-Reglern (siehe Bild 3) einer Zeitersparnis von 36,1% (Quelle: HS Rosenheim)



**Bild 7.** Der Energiebedarf des Aufheizvorgangs konnte trotz kürzerer Aufheizzeit des MPC-Reglers (Regler neu) deutlich gesenkt werden (Quelle: HS Rosenheim)

abgeschlossen. Mit den PID-Reglern wird eine Aufheizzeit von 2087 s benötigt. Dies entspricht einer Zeitersparnis von 36,1%

oder 12 min und 33 s gegenüber dem Aufheizvorgang mit den am Optimum arbeitenden PID-Reglern. Die Auswertung des

Energiebedarfs beim Aufheizen ergibt, dass der MPC-Regler gegenüber den PID-Reglern 11,5% Energie einspart (**Bild 7**).

Zur Validierung des entwickelten MPC-Regelverfahrens wurde ein neues Modell für eine größere Plastifiziereinheit mit einer Bohrung von 45 mm erstellt. Die Validierung führt zu dem Ergebnis, dass prozentual dieselben Einsparungen bei der Aufheizzeit und beim Energiebedarf erreicht werden. Hierdurch konnte das MPC-Regelverfahren für den Aufheizprozess der Plastifiziereinheit einer Spritzgießmaschine positiv validiert werden.

### Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verkürzung der Aufheizzeit und eine höhere Energieeffizienz nicht im Widerspruch zueinander stehen. Eine modellbasierte, prädiktive Regelung kann den Aufheizvorgang deutlich verkürzen und benötigt dabei weniger Energie als ein selbstoptimierender PID-Regler. Allerdings ist diese Methode kein Plug-and-play-System. Der kritische Punkt dieses Verfahrens ist die Modellierung des Aufheizvorgangs. Je genauer das Modell die Realität beschreibt, desto effizienter arbeitet der Regler.

Zum industriellen Einsatz eines MPC-Reglers für die Temperierung einer Plastifiziereinheit ist eine automatische Erstellung des Prozessmodells sowie laufende Optimierung der Parameter des integrierten Prozessmodells während des Betriebs der Spritzgießmaschine anzustreben. Dadurch kann im Betrieb auf Modellabweichungen reagiert werden. Ein zusätzlicher Vorteil ist die Möglichkeit zur Integration der Anfahr- und Produktionsphase in den MPC-Regler. Bekannte Schwankungen beim Anfahren und der Produktion könnten so schneller ausgeglichen werden. ■