

Phasenvereinende Werkzeuginnendruckregelung bei der Verarbeitung von PCR

Präzise Prozessführung mit InjectiX

Das Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) präsentierte auf der K 2022 in Zusammenarbeit mit einem Industriekonsortium und dem Institut für Regelungstechnik (IRT) eine innovative modellprädiktive Prozessregelung. Damit wird der Ausschuss verringert und eine erhöhte Prozessstabilität trotz schwankender Materialqualitäten bei Verarbeitung von Post-Consumer-Rezyklaten erreicht.

Die Stapelbox aus PCR fand bei den Messebesuchern großen Anklang.

© IKV



Das Prozessführungskonzept InjectiX des IKV und des IRT, ursprünglich entwickelt auf einer vollelektrischen Spritzgießmaschine, vereint die Einspritz- und Nachdruckphase. Auf der K 2022 wurde die Anwendbarkeit der Regelung für einen neuen Prozess mit neuer Maschine sowie unbekanntem Material und Werkzeug gezeigt. InjectiX wurde dabei auf eine servohydraulische Spritzgießmaschine (Typ: SmartPlus 120; Hersteller: Wittmann Battenfeld) übertragen. Dies gelang durch eine Anpassung der Regelkreisstruktur

Als Praxisbeispiel wurden zwei Polypropylen-PCR-Materialien (Post-Consumer-Rezyklate, Typ: Systalen, Hersteller: Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland) in verschiedenen Viskositätsstufen eingesetzt, um mit InjectiX (Tabelle 1) ein konstantes Qualitätsergebnis trotz Viskositätsschwankungen zu

erreichen. Zusätzlich wurden zwei verschiedene Farbmasterbatches auf Basis von 100% PCR (Typ: CirculenRecover; Hersteller: LyondellBasell) in Grün und Blau eingesetzt und mit unterschiedlichen Dosierungen dem PCR-PP beige-mischt. So ergeben sich allein dadurch bereits vier unterschiedliche praxisnahe Materialeinstellungen, die durch die Verwendung der intelligenten Prozessführung ausgeglichen werden sollen. Die Detektion der Änderungen im Prozess wird online über Kennzahlen erfasst, sodass eine Adaption während des aktuellen Zyklus automatisch erfolgt.

Als Demonstratorbauteil dient eine Stapelbox, wie sie zum Beispiel für die Lagerung von Verbindungselementen verwendet wird (Titelbild). Durch eine seitlich integrierte Steckverbindung können die Boxen nicht nur vertikal, sondern auch horizontal gestapelt bzw.

verbunden werden. Die Rippenstruktur ermöglicht die Integration von Trennwänden in der Breite einer Visitenkarte, um den Stauraum zu unterteilen. Das zugehörige Werkzeug (Werkzeugbau: Kroma International; Normalien: Hasco), ist zur Prozessüberwachung und -regelung mit zwei kombinierten Druck- und Temperatursensoren (Typ: 6190CA; Hersteller: Kistler) ausgestattet, die angussnah und angussfern platziert werden.

Phasenvereinende Regelung des Werkzeuginnendrucks

Im Kontext der Prozessführungsstrategie bedeutet „phasenvereinend“, dass während eines Spritzgießzyklus nur eine Regelgröße geregelt wird anstatt mehrerer (üblicherweise Schneckengeschwindigkeit und Schneckendruck). Hierdurch entfällt die Notwendigkeit, eine Um-

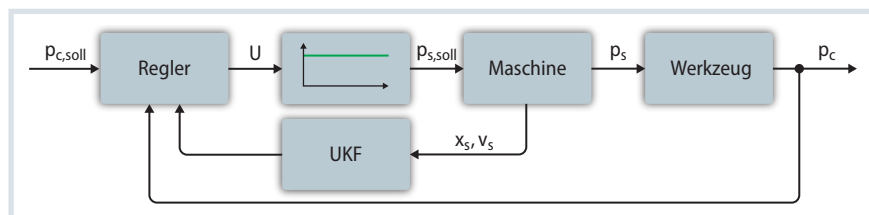


Bild 1. Die Prozessregelung besteht aus einer unterlagerten Geschwindigkeitsregelung und einer überlagerten Werkzeuginnendruckregelung. Quelle: IRT; Grafik: © Hanser

schaftbedingung zwischen verschiedenen Regelgrößen zu definieren, sodass der Einstellaufwand reduziert und Unstetigkeiten im Regelgrößenverlauf vermieden werden. Bei der vorgestellten phasenvereinenden Regelung wird der Werkzeuginnendruck mithilfe einer modellprädiktiven Regelung geregelt, da der Werkzeuginnendruck stark mit den Qualitätseigenschaften des Bauteils korreliert. Die modellprädiktive Regelung des Werkzeuginnendrucks kompensiert Störungen durch Materialschwankungen bzw. veränderliche Umgebungsbedingungen, sodass der Werkzeuginnendruck aktiv eingestellt werden kann.

In der eingesetzten Regelkreisstruktur (**Bild 1**) wird als Eingang ein Soll-Werkzeuginnendruck vorgegeben. Der Regler berechnet ein optimales Stellsignal, das in Form einer Steuerspannung U an die Steuerung der Spritzgießmaschine übergeben wird. In bisherigen Forschungsarbeiten mit elektrisch angetriebenen Spritzgießmaschinen konnte über die Steuerspannung eine Schneckengeschwindigkeit v_s eingestellt werden, die über einen maschinennahen Antriebs-

regler geregelt wurde [1]. An der hydraulisch angetriebenen Spritzgießmaschine repräsentiert die Steuerspannung den Sollwert für einen maschinennahen Schneckendruckregler.

Die Qualität im Blick

Um das Regelungskonzept aus den Forschungsarbeiten überführen zu können, musste eine modellprädiktive Regelung entwickelt werden, die den Schneckendruck p_s unter Berücksichtigung der Schneckengeschwindigkeit so einstellt, dass der gewünschte Werkzeuginnendruckverlauf p_c geregelt werden kann. Der Regler-Block (**Bild 1**) realisiert somit inhärent eine Geschwindigkeitsregelung und phasenvereinende Werkzeuginnendruckregelung. Für die Regelung werden Informationen über nicht-messbare Zustände benötigt, wie die Beschleunigung der Schnecke. Diese werden von einem sogenannten Unscented Kalman-Filter (UKF) zur Laufzeit geschätzt und an die Regelung übergeben [2].

Die Bauteilentnahme erfolgt per Greifer (Hersteller: AGS Automation Greifsys-

Info

Text

Katharina Hornberg, M.Sc., ist seit 2019 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) der RWTH Aachen und Leiterin der Arbeitsgruppe Prozessregelung;

katharina.hornberg@ikv.rwth-aachen.de

Marko Vukovic, M.Sc., ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungstechnik (IRT) der RWTH Aachen und Teil der Arbeitsgruppe Produktionssysteme.

Jonas Gerads, M.Sc., ist seit 2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IKV und Leiter der Arbeitsgruppe optische Komponenten.

Yannik Lockner, M.Sc., ist seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IKV und Leiter der Arbeitsgruppe intelligente Produktionssysteme und maschinelles Lernen.

Dr.-Ing. Christoph Zimmermann ist seit 2022 Leiter der Abteilung Spritzgießen am IKV.

Dipl.-Ing. Mauritius Schmitz, M.Sc., ist seit 2019 wissenschaftlicher Direktor für Digitalisierung am IKV.

Dr.-Ing. Sebastian Stemmler ist seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IRT und Leiter der Abteilung Industrie- und Produktionssysteme.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann ist Leiter des IKV und Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung an der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel ist Leiter des IRT.

Dank

Die Errichtung des Plastics Innovation Center 4.0 wird gefördert durch Mittel des Landes NRW und aus dem Europäischen Fond für Regionale Entwicklung (EFRE). Weiterhin gilt der Dank der Autoren allen Konsortialpartnern für die große Unterstützung bei der Umsetzung des Messeprojekts.

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

www.kunststoffe.de/onlinearchiv

English Version

Read the English version of the article in our magazine **Kunststoffe international** or at www.kunststoffe-international.com

Unternehmen	Rolle im Projekt	Internetadresse
AGS Automation Greifsysteme Schwobe GmbH, Bergisch Gladbach	Greifersystem	www.ags-automation.de
Datalogic S.r.l. Niederlassung Central Europe, Langen	Laserbeschriftung	www.datalogic.com
Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH, Köln	Materialhersteller Systalen (Rezyklat)	www.gruener-punkt.de
Hasco Hasenclever GmbH + Co KG, Lüdenscheid	Werkzeugnormalien	www.hasco.com
Industrif.ai	Benutzerschnittstelle	industrif.ai
Kistler Gruppe, Winterthur/Schweiz	WerkzeugsensorikQualitätsprüfzelle	www.kistler.com
Kroma International GmbH, Lahr	Werkzeugbau	www.kroma.de
Lenzkes Spanntechnik GmbH, Lüdenscheid	Spanntechnik	de.lenzkes.com
LyondellBasell, Kerpen	Materialhersteller Farbmasterbatch	www.lyondellbasell.com
Wittmann Battenfeld GmbH, Kottlingbrunn/Österreich	Maschinenhersteller, Automatisierung, Materialdosierung und -förderung	www.wittmann-group.com

Tabelle 1. Übersicht der Projektpartner und ihrer Funktion beim Messeprojekt Quelle: IKV

Bild 2. Die Prüfzelle ermöglicht die Erfassung von Qualitätsdaten mit direkter Datenbankanbindung. © IKV



teme Schwoppe) mit simultaner Angussabtrennung. Anschließend wird das Bauteil an eine Qualitätsprüfzelle (Hersteller: Kistler) mit zwei Messstationen übergeben (**Bild 2**).

In der ersten Station wird das Bauteilgewicht mit einer Präzisionswaage (Typ: XSR303SN; Hersteller: Mettler-Toledo) gewogen. Gleichzeitig überprüft eine Frontkamera die Breite des Bauteils, die vollständige Füllung sowie die Abformgenauigkeit des K-Messe-Logos auf der Innenseite. Während die Bauteilfüllung und die Abformung des K-Logos qualitativ (i. O./n. i. O.) erfasst werden, wird die Bauteilbreite in mm auf die dritte Dezimalstelle genau ausgegeben, als Basis für eine effektive Bewertung des Bauteilverzugs. Die Kantenerfassung auf einer 5 MP 8Bit Graustufenkamera erfolgt mittels vorgeschalteter Filteroperatoren und einer anschließend ausgeführten Bewertung mittels Liniensegmenten, die positionskorrigiert an die Kante gelegt werden. Eine zweite Kamera im horizontalen Versatz von 90° misst den RGB-Farbwert des Bauteils und das Auftreten von Bauteildefekten, wie Stippen oder White und Black Spots. Die ermittelten Qualitätsdaten werden über einen OPC-UA-Server an eine dokumentbasierte Datenbank (MongoDB) übertragen.

Nach der Qualitätsprüfung wird in der zweiten Station der Prüfzelle ein

beliebig anpassbarer QR-Code auf die Bauteile gelasert (Typ: UniQ; Hersteller: Datalogic). Der QR-Code dient beispielsweise dazu, Bauteile zurückzuverfolgen, Fertigungsaufträge zuzuordnen, der einfachen Identifikation bei anschließender Sichtprüfung und Lagerung oder als einfacher Datenspeicher zu den gemessenen Qualitätswerten aus der Messzelle.

Intuitive Darstellung komplexer Zusammenhänge

Die Qualitätsprüfzelle von Kistler wurde nach der Messe im Plastics Innovation Centers 4.0 des IKV in eine Fertigungszelle integriert und in die Forschung eingebunden, sodass die Kombination verschiedener Prüfmethode zum Qualitätsmanagement bereitsteht.

Material	Regelung	Mittelwert [g]	Standardabweichung [g]
Systalen PP-C15001 CirculenRecover grün	konventionell	114,14	1,23
	Injectix	114,32	0,73
Systalen PP-C14002 CirculenRecover grün	konventionell	113,01	0,31
	Injectix	112,88	0,24
Systalen PP-C15001 CirculenRecover blau	konventionell	114,03	0,43
	Injectix	113,96	0,64
Systalen PP-C14002 CirculenRecover blau	konventionell	112,81	0,43
	Injectix	112,82	0,26

Tabelle 2. Mittelwerte und Standardabweichungen nach verwendetem Material und Art der Prozessführung für die gesamte K-Messe.

Quelle: IKV

Eine Benutzerschnittstelle für InjectiX soll die Informationen verständlich aufbereiten, um Maschinenbedienern einen schnellen Zugang zur Methodik zu gewährleisten. Das Spin-off-Projekt „industrif.ai“ stellt dafür eine webbasierte Plattformlösung zur Verfügung, in die die Visualisierung des Regelungskonzepts und der Prozessdatenanalyse integriert wird. Ziel von industrif.ai ist die Unterstützung produktionsnaher Aufgaben. Hierzu wird das Potenzial maschineller Lernverfahren genutzt, die prozessnah am IKV entwickelt werden. So können sich Maschinenbediener auf der Plattform zum Beispiel Maschineneinstellparameter für einen robusten Prozess automatisch vorschlagen lassen.

Das Funktionsprinzip der phasenvereinenden Prozessführung mit InjectiX wird erklärt, indem die Einstellparameter von konventioneller Prozessführung und InjectiX einander gegenübergestellt werden, mit besonderem Fokus auf den Wegfall des Umschaltvorgangs. Dass Daten wie die Prozessgrößenverläufe von Einspritzgeschwindigkeit, Schneckendruck und Werkzeuginnendruck übersichtlich dargestellt werden, ermöglicht dem Maschinenführer eine einfache Interpretation. Eine visuelle Überlagerung mit den Kurvenverläufen der letzten drei oder auch mehr Zyklen ist möglich, um zyklische Schwankungen im Prozess interpretieren zu können.

Messdaten aus der Qualitätsprüfzelle

Weiterhin erfolgt eine detaillierte Darstellung der Messdaten aus der Qualitätsprüfzelle (**Bild 3**). Dazu gehört die Darstellung von Bauteilgewicht und Bauteilbreite als Regelkarte mit Angabe des Mittelwerts sowie der oberen und unteren Qualitätsgrenze. Die Bauteilfarbe

Fundiert und ausführlich

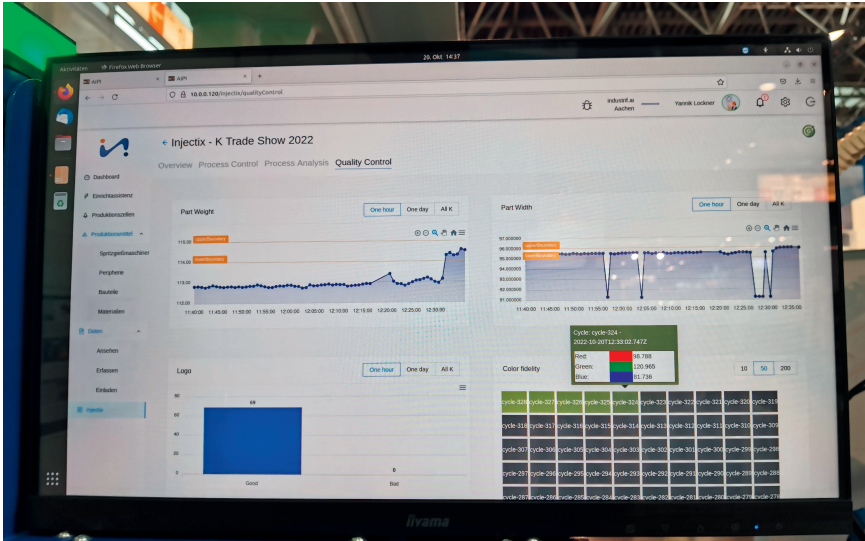


Bild 3. Darstellung der Qualitätsdaten im Prozess © industrifai

wird durch die ermittelten RGB-Werte dargestellt. In einem Auszug aus den Produktionsdaten der K-Messe für eine Materialcharge wird das Bauteilgewicht für den konventionellen Prozess und InjectiX über mehrere Produktionszyklen miteinander verglichen (**Bild 4**). Der Mittelwert des Bauteilgewichts liegt für beide Prozessführungsstrategien bei 112,94 g. Die Standardabweichung liegt mit 0,08 g für den konventionellen Prozess und 0,06 g für InjectiX auf einem ähnlichen Niveau, sodass beide Verfahren eine hohe Prozessstabilität innerhalb einer Materialcharge aufweisen.

Betrachtet man jedoch die Produktionsdaten über die gesamte Messedauer mit 2501 Zyklen, weist InjectiX eine höhere Robustheit gegenüber Prozessschwankungen auf (**Tabelle 2**). Die Stan-

dardabweichungen für drei der Materialkombinationen sind mit InjectiX um bis zu 40 % geringer.

Höhere Robustheit gegenüber Prozessschwankungen

Eine höhere Prozessschwankung ist jedoch für die Kombination von Systalen PP-C15001 mit CirculenRecover in Blau zu sehen. Die Datenanalyse zeigt, dass über einen längeren Zeitraum die Reglerparametrierung einer anderen Materialkombination verwendet wurde. Um solche manuellen Fehleinstellungen von InjectiX zu vermeiden, wird im aktuellen Forschungsprojekt zur Prozessregelung an einer Methodik gearbeitet, die eine automatisierte Regleradaption im Falle von Materialänderungen ermöglicht. ■

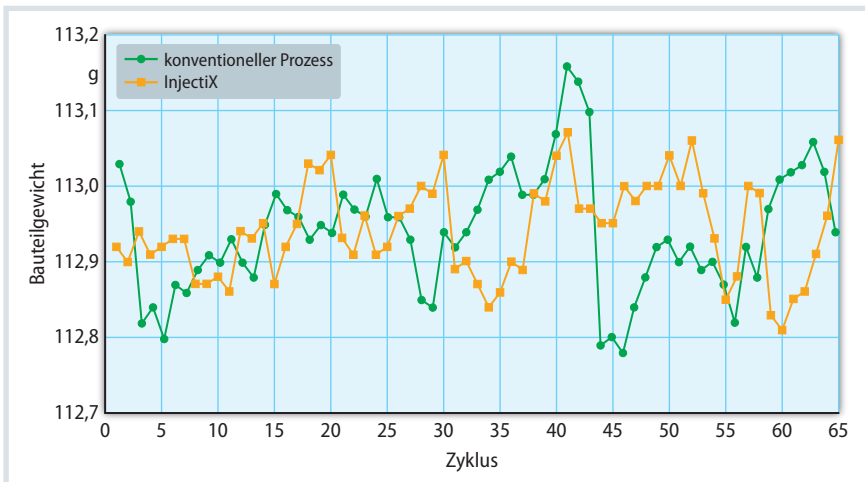


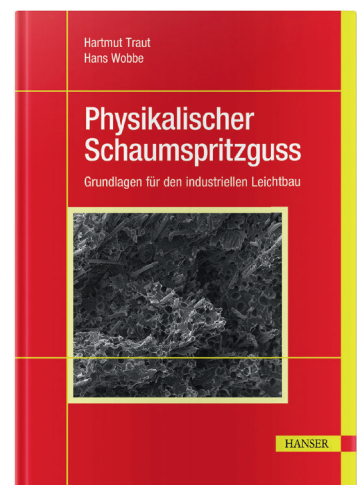
Bild 4. Die Auswertung veranschaulicht die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität am Beispiel des Bauteilgewichts (Systalen PP-C14002, CirculenRecover grün). Quelle: IKV; Grafik: © Hanser



ISBN 978-3-446-47023-1 | € 49,99



ISBN 978-3-446-46664-7 | € 99,99



ISBN 978-3-446-45406-4 | € 69,99