

SPECIAL: QUALITÄTSSICHERUNG

[FAHRZEUGBAU] [MEDIZINTECHNIK] [VERPACKUNG] [ELEKTRO&ELEKTRONIK] [BAU] [KONSUMGÜTER] [FREIZEIT&SPORT] [OPTIK]

Kautschukspritzgießen mit Qualitätserkennung

Automatische Prozessüberwachung mit iQ clamp control und maschinellem Lernen

Mit der zunehmenden Digitalisierung der Spritzgießprozesse rücken neue Prozessgrößen ins Visier. Mithilfe von Machine-Learning-Methoden erschließt Engel gemeinsam mit dem Polymer Competence Center Leoben und der Montanuniversität Leoben das Potenzial der Werkzeugatmung für die Qualitätssicherung im Kautschukspritzgießen. Unterstützt wurde dieses Forschungsprojekt von SKF Sealing Solutions Austria.



Das Sammeln und Interpretieren von Prozessdaten unterstützt die Produzenten sicherheitsrelevanter Kautschukprodukte dabei, eine konstant hohe Qualität zu garantieren © iStock

Technische Kautschukprodukte, wie Dichtungen, Dämpfer oder Verbindungselemente, sind in vielen Anwendungen kritisch für den ordnungsgemäßen und sicheren Betrieb von Anlagen, Geräten oder Fahrzeugen. Dennoch zwingen wirtschaftliche und ökologische Faktoren die Hersteller dazu, bei einem immer kleineren Ressourceneinsatz zunehmend mehr Funktionen in die Bautei-

le zu integrieren [1, 2]. Hier unterstützt das Sammeln und Interpretieren von Prozessdaten die Produzenten, weiterhin eine konstant hohe Qualität sicherzustellen [3–5].

Das Assistenzsystem iQ clamp control der Engel Austria GmbH stellt mit der Werkzeugatmung ein aussagekräftiges Signal zur Verfügung, das eine automatische Schließkraftoptimierung ermög-

licht. Auch die Überwachung des Produktionsprozesses und die manuelle Optimierung von qualitätsrelevanten Parametern, wie Umschaltzeitpunkt und Nachdruckzeit, werden erleichtert. Es wurde für die Verarbeitung von Thermoplasten entwickelt und findet dort bereits großen Einsatz [6, 7].

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung wurde das System für Elastomere evaluiert. Die chemische Vernetzung stellt eine Herausforderung für diese Anwendung dar. Ziel der Versuche der Projektpartner Engel, Polymer Competence Center Leoben (PCCL) und Montanuniversität Leoben (MUL) war es, kritische Prozessabweichungen bei der Herstellung von Kautschukformteilen anhand der Werkzeugatmungssignale in Echtzeit zu detektieren und so Schlechteile ohne zusätzlichen Qualitätskontrollschritt bereits im Herstellungsprozess auszuschleusen. Um Prozessabweichungen zu simulieren, wurde im laufenden Spritzgießprozess absichtlich die Werkzeugtemperatur erhöht, ohne die Vernetzungszeit anzupassen. Auf diese Weise wurde eine unzulässige Änderung der dynamisch-mechanischen Eigenschaften der Bauteile herbeigeführt, was der Produktion von Schlechteilen durch Prozessstörungen gleichzusetzen ist.

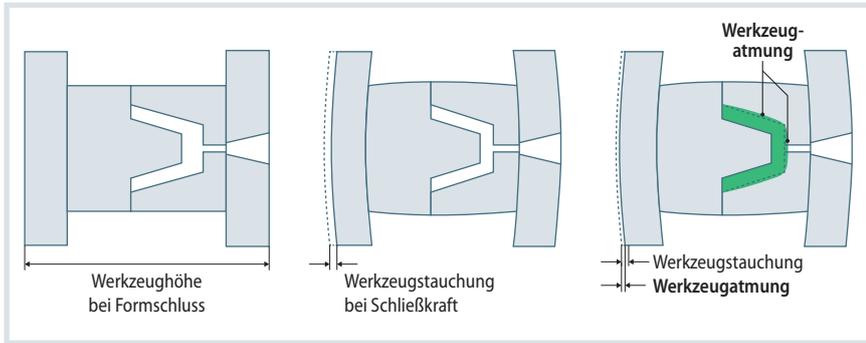


Bild 1. Werkzeugatmung: Das Werkzeug wird durch den Aufbau der Schließkraft gestaucht. Im Füllvorgang erzeugt das entstehende Formteil eine Auftriebskraft, die der Stauchung entgegenwirkt. Die Auftriebskraft ist proportional zum Werkzeuginnendruck und zur projizierten Fläche

Quelle: Engel; Grafik: © Hanser

Die Prozessüberwachung wird mithilfe von PCA-basierten Methoden (Principal Component Analysis, Hauptkomponentenanalyse) durchgeführt. Diese zählen zu den Machine-Learning-Methoden und sind in der Lage, eindeutige Korrelationen zwischen unterschiedlichen Prozesssignalen – z.B. der Werkzeugatmung (**Bild 1**) – zu nutzen und zu verdichten. Somit lässt sich die Fehleridentifikationsrate im Vergleich zu Standardmethoden deutlich verbessern, und temperaturbedingte Prozessstörungen im Werkzeugatmungssignal werden sichtbar.

Um die PCA und damit die Korrelation zwischen Prozess- und Qualitätsdaten im Produktionsprozess durchführen zu können, muss ein Trainingsdatenset aus den Prozessdaten von Gutteilen erstellt werden. Dieses Trainingsset, auf dessen Basis die spätere Inline-Fehleridentifikation basiert, wird experimentell ermittelt.

Trainingsset als Basis für die spätere Inline-Fehleridentifikation

Die Versuche wurden im Technikum von Engel auf einer Spritzgießmaschine des Typs e-victory 740/220 mit einer maximalen Schließkraft von 2200 kN durchgeführt. Für die Werkzeugtemperierung kamen Heizplatten mit elektrischen Heizelementen zum Einsatz, deren Sollwerte über die Steuerung der Spritzgießmaschine verändert werden konnten. Es wurde ein für industrielle Anwendungen typischer rußgefüllter Nitril-Butadien-Kautschuk (NBR, Hersteller: SKF Sealing Solutions Austria) zu Musterteilen verarbeitet. In Vorversuchen wurden für alle Prozessgrößen Einstellungen gefunden, die einen stabilen Formteil-Herstellungprozess sicherstel-

len (**Tabelle 1**). Die Heizzeit wurde dabei so gewählt, dass die Formteile zum Zeitpunkt der Entformung bei einer Werkzeugtemperatur von 160°C einen Vernetzungsgrad von 90% aufwiesen.

Die Einstellungen wurden über 20 Zyklen konstant gehalten, um nach einem kurzen Einschwingen in den Zyklen 5 bis 15 Trainingsdaten zu generieren. Es stellte sich eine konstante Temperatur von 163°C ein, die mit dem Werkzeugtemperatursensor gemessen wurde (**Bild 2**). Ab Zyklus 21 wurde der Sollwert der Heizelemente auf 180°C erhöht, wodurch die gemessene maximale Werkzeugtemperatur ebenfalls anstieg. Ab Zyklus 52 wurde die Regeltemperatur der Heizelemente wieder auf 160°C abgesenkt. Mit der Erhöhung des Sollwerts wurden unerwartete Temperaturabweichungen durch mögliche Fehlfunktionen der Heiz- oder Thermolemente simuliert. Auf dieser Basis ließen sich der Schwellwert für unzulässige Änderungen der Teilequalität sowie das Ansprechverhalten der Prozessmonitoringmethoden untersuchen.

Dynamisches Materialverhalten bestimmen

Die dynamisch-mechanischen Eigenschaften der Formteile werden mit einem elektrodynamischen Prüfsystem vom Typ Instron ElectroPuls E3000 (Hersteller: Illinois Tool Works) untersucht. Dabei wird eine Prüfmethode verwendet, die das charakteristische Materialverhalten im druckschwingenden Belastungsbereich ermitteln kann. Aus der Antwort des Materials auf die eingebrachte Belastung wird als Kennwert der Tangens des Verlustwinkels $\tan(\delta)$ bestimmt, der das Ver-

hältnis zwischen plastischem und elastischem Materialverhalten beschreibt. Er liefert damit aussagekräftige Informationen über den Vernetzungsgrad.

Die in den dynamischen Tests ermittelten $\tan(\delta)$ -Werte korrelieren im Versuchsverlauf wie erwartet mit der gemessenen Werkzeugtemperatur aus **Bild 2**. Ein Anstieg des $\tan(\delta)$ bedeutet eine Zunahme der plastischen Anteile, z.B. aufgrund einer geringeren Vernetzungsdichte unter den geänderten Vernetzungsbedingungen (**Bild 3a**).

Korrelation zwischen Werkzeugatmung und Forminnendruck

In der Trainingsphase (Zyklen 5 bis 15) ergibt sich für $\tan(\delta)$ ein Mittelwert von 0,209 mit einer Standardabweichung (σ) von 0,002. Davon ausgehend wird ein Toleranzbereich von $\pm 3\sigma$ definiert. Weist ein Formteil einen Wert außerhalb dieses Bereichs auf, so ist es als Schlechtteil zu betrachten. In der zeitlichen Abfolge der Versuchszyklen wird dieser Bereich ab Zyklus 23 verlassen und konsistent erst wieder mit Zyklus 58 erreicht. Die Aufgabe statistischer Prozessmonitoringsysteme – in diesem Fall PCA – ist es nun, im

Parameter	Sollwert
Zylindertemperatur [°C]	80
Schneckendrehzahl beim Dosieren [ms ⁻¹]	0,16
Staudruck [bar]	150
Einspritzvolumenstrom [cm ³ s ⁻¹]	10
Nachdruck [bar]	350
Nachdruckdauer [s]	35
Heizzeit [s]	300

Tabelle 1. In Vorversuchen wurden für alle Prozessgrößen Einstellungen gefunden, die einen stabilen Herstellungsprozess sicherstellen. Diese Parameter wurden in allen Experimenten konstant gehalten Quelle: PCCL

laufenden Prozess anhand der Prozessparameter zu erkennen, ob die Bauteilqualität innerhalb des zulässigen Prozessfensters liegt. Zur Bewertung der untersuchten Monitoringmethoden wurden die einzelnen Zyklen entsprechend der eingezeichneten Kontrollgrenzen als Gut- bzw. Schlechtteil markiert.

Zur Bestätigung, dass sich die Werkzeugatmung für die Fehlererkennung »

PCA-Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, PCA) ist eine Dimensionsreduktionsmethode, mit der die Fehlererkennungsrate beim Prozessmonitoring gesteigert werden kann. Gleichzeitig lässt sich damit auch die Komplexität verringern. Ihre besondere Eignung für industrielle Prozesse liegt in der Eigenschaft, lineare Abhängigkeiten zwischen Prozesssignalen eliminieren zu können. Genauere Einblicke in die Methodik und weitere Anwendungsberichte können bei Russell, Chiang et al., Yang, Chen et al. und weiteren gefunden werden [4, 10–13].

Die Autoren

DI Dr. mont. Thomas Hutterer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Polymer Competence Center Leoben (PCCL), Leoben/Österreich; thomas.hutterer@pccl.at

Assoz. Prof. DI Dr. mont. Gerald R. Berger-Weber ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Spritzgießen von Kunststoffen an der Montanuniversität Leoben; gerald.berger@unileoben.ac.at

DI Dr. mont. Roman C. Kerschbaumer ist Gruppenleiter Verarbeitungstechnologien im PCCL; roman.kerschbaumer@pccl.at

Univ.-Prof. DI Dr. mont. Walter Friesenbichler leitet den Lehrstuhl für Spritzgießen von Kunststoffen an der Montanuniversität Leoben; walter.friesenbichler@unileoben.ac.at

DI Alexander Klutz ist Entwicklungsingenieur in der Anwendungstechnik bei der Engel Austria GmbH Schwertberg/Österreich.

DI Thomas Leng ist Bereichsleiter Globale Anwendungstechnik bei Engel; thomas.leng@engel.at

DI Karlheinz Mayr ist Leiter Entwicklung in der Anwendungstechnik bei Engel; karlheinz.mayr@engel.at

Service

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

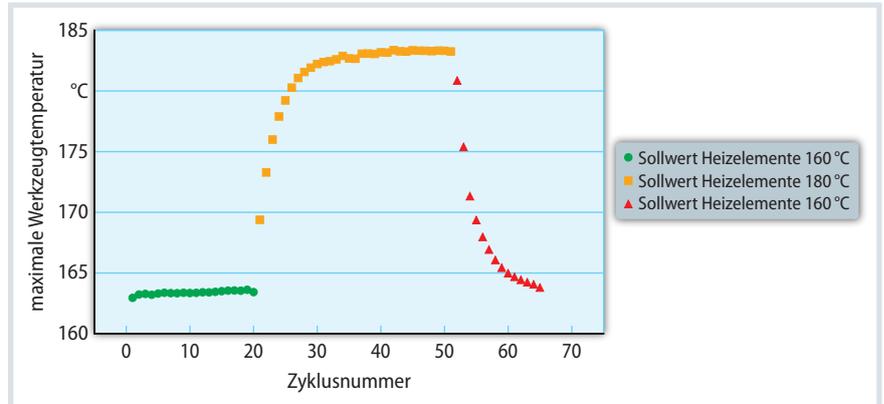


Bild 2. Die maximale Werkzeugtemperatur am Zyklusende folgt zeitnah den Sollwerten der Heizelemente Quelle: PCCL; Grafik: © Hanser

eignet, wurde in Praxisversuchen zunächst die Korrelation zwischen dem Atmungssignal und dem Werkzeuginnendruck untersucht (Bild 4). Auffallend ist, dass das Werkzeugatmungssignal erst bei annähernd gefüllter Form nennenswerte Ausschläge zeigt, während der Forminnendruck bereits ansteigt, sobald die Fließfront den Sensor erreicht (Bild 4a).

Dieses Verhalten ist zu erwarten, da in die Werkzeugatmung neben dem Druck auch die projizierte benetzte Fläche einfließt. Zum Umschaltzeitpunkt hingegen sind die Peaks beider Signale gleichermaßen ausgeprägt und lassen sich daher exakt auswerten. Werden die Peaks der beiden Signale für alle Zyklen übereinander aufgetragen (Bild 4b), so ist ein linearer Zusammenhang klar erkennbar.

Prozessmonitoring mit Hauptkomponentenanalyse

Um Prozesse mit mehreren Variablen zu überwachen, sind multivariate statistische Methoden geeignet [8, 9]. Für die Versuche wurde ein PCA-basierter Ansatz (Infokasten) gewählt, um Prozess- und damit Qualitätsschwankungen zuverlässig zu erkennen. Die erfassten Prozessvariablen mit Ausnahme der Werkzeugtemperatur werden nun mittels Hauptkomponentenanalyse verarbeitet und die SPE-Statistik (Squared Predictive Error) jedes Versuchszyklus berechnet (Bild 3b). Als Trainingsdaten wurden die Zyklen 5 bis 15 verwendet. Das PCA-Verfahren berechnet daraus eine gemeinsame einseitige Eingriffsgrenze. Liegt die SPE-Statistik eines Zyklus über dieser Grenze, so wird das Formteil als wahrscheinliches Schlechtteil identifiziert. Hier zeigt sich, dass die

gemeinsame Auswertung der Prozessvariablen die Änderung der Werkzeugtemperatur statistisch signifikant sichtbar macht, ohne sie direkt messen zu müssen. Die Änderung der Werkzeugtemperatur wird schnell erkannt, erst ab Zyklus 55 kehrt das System in den Normalbetrieb zurück.

Die Korrekturklassifikationsrate, d.h. die jeweils richtig zu Gut- oder Schlechtteilen zugeordneten Zyklen, liegt in diesen Versuchen bei 85 %. Die Unterscheidungsgrundlage liegt dabei im Verletzen der $\tan(\delta)$ -Eingriffsgrenzen. Die 15 % Falschklassifizierungen sind allesamt Zyklen, die nach PCA Schlechtteile wären, nach $\tan(\delta)$ jedoch Gutteile sind. Das Monitoringsystem wäre also übersensibel. Allerdings können hinter den falsch klassifizierten Schlechtteilen kritische Prozessabweichungen liegen, die das System richtig erkennt und die sich nicht auf das konkret untersuchte Qualitätsmerkmal $\tan(\delta)$ auswirken, jedoch andere Qualitätsmerkmale außer Toleranz bringen können.

Alle Falschklassifizierten sind mit hohen Markern (Bild 3) gekennzeichnet. So klassifiziert das Prozessmonitoringsystem (Bild 3a) die Zyklen 3 und 4 als Fehler, was auf eindeutig noch nicht stationäre Prozessbedingungen zu Versuchsbeginn zurückgeführt werden kann. Trotz der Rückkehr zu normalen Prozessbedingungen ab Zyklus 51 liegen die dynamischen Eigenschaften der Formteile erst verzögert wieder innerhalb der Kontrollgrenzen. Auffällig ist, dass die Zyklen 60 und 62 als Schlechtteile qualifiziert werden, obwohl sich die gemessene Werkzeugtemperatur bereits wieder im Bereich der Normalbedingungen bei 160°C befindet. Das Sys-

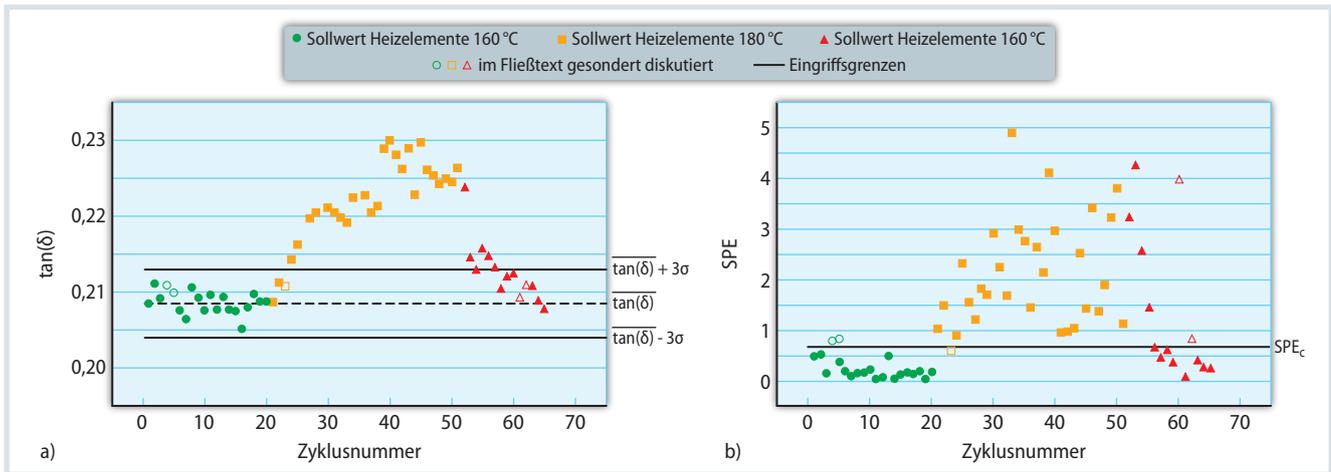


Bild 3. Die $\tan(\delta)$ -Werte der Elastomerteile werden stark von der Werkzeugtemperatur beeinflusst (links). Mit der SPE-Statistik können Änderungen der Prozessbedingungen, die potenziell zu Schlechteilen führen, erkannt werden (rechts) [9] Quelle: PCCL; Grafik: © Hanser

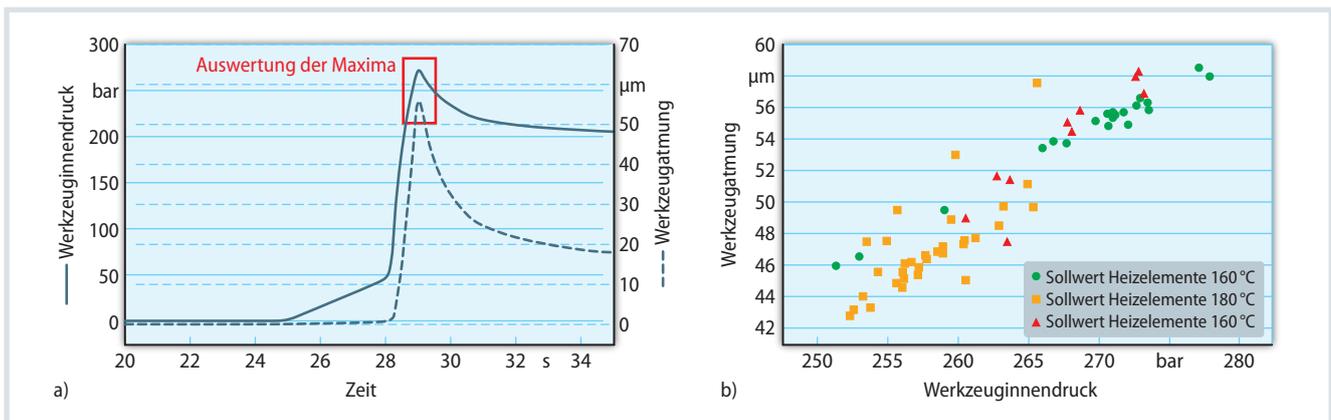


Bild 4. Die Werkzeugatmung spricht im Vergleich zum Werkzeuginnendruck verzögert an, erreicht aber dann gleichzeitig einen ausgeprägten Peak (links). Maxima der Werkzeugatmung und des Werkzeuginnendrucks sind stark positiv korreliert (rechts) Quelle: PCCL; Grafik: © Hanser

tem reagiert also auch auf andere Prozessstörungen. Ein Vergleich mit **Bild 3b** zeigt, dass eben diese beiden Zyklen höhere $\tan(\delta)$ -Werte aufweisen als benachbarte Zyklen.

Ähnliches ist bei Zyklus 23 zu beobachten, dessen $\tan(\delta)$ -Wert niedriger als jener der benachbarten Zyklen ist, und auch die SPE-Statistik liegt unterhalb der Eingriffsgrenze. Es scheint auch im Fall von Gutteilen laut $\tan(\delta)$ ein gewisser Zusammenhang zwischen SPE-Statistik und Bauteilqualität zu bestehen.

Generell zeigen die Beispiele, dass trotz starker Korrelation keines der ausgewerteten Prozesssignale in der Lage ist, den Vernetzungsprozess absolut zu repräsentieren. Alle in den Versuchen aufgezeichneten Variablen beschreiben Änderungen der physikalischen Eigenschaften des Kautschuks, besonders des Fließverhaltens. Stehen die Eigenschaften der chemischen Vernetzung jedoch nicht in einem linearen Verhältnis mit den physi-

kalischen, können die primär vom Vernetzungsgrad bestimmten Bauteileigenschaften nicht eindeutig vorhergesagt werden. Weisen alle Prozesssignale sowie auch das multivariate Monitoring auf geänderte Fließeigenschaften hin, selbst wenn der maßgeblich von der Vernetzungsreaktion bestimmte vorhergesagte $\tan(\delta)$ innerhalb der Eingriffsgrenzen liegt, sollte eine detaillierte Bauteilüberprüfung stattfinden. Erst dann kann bewertet werden, ob die unerwarteten Prozessschwankungen unkritisch sind oder doch zu fehlerhaften Bauteilen führen.

Fazit

Auf Basis des intelligenten Assistenzsystems iQ clamp control konnte mithilfe der Hauptkomponentenanalyse ein multivariates Prozessmonitoringsystem für das Kautschukspritzgießen aufgebaut werden, das Änderungen der Prozessbedingungen sofort erkennt und die entspre-

chenden Formteile als Schlechttteile klassifiziert. Die Vorteile dieses Systems liegen im geringen Trainingsaufwand und der Möglichkeit, gleichzeitig mehrere Prozessvariablen zu verarbeiten. Zusatzinformationen über die deutlich bessere Leistungsfähigkeit im Vergleich zu Standardmethoden können bei den Autoren angefragt werden.

Die Herausforderung beim Elastomerspritzgießen besteht darin, dass die meisten verfügbaren Prozesssignale stark mit den Fließeigenschaften des Materials korrelieren, jedoch nur gering mit der chemischen Reaktivität, was der prozesssignalbasierten Fehlererkennung noch Grenzen setzt. Das von Engel, PCCL und MUL entwickelte System zeigt Prozessschwankungen tendenziell auf, schon bevor sich diese in der Bauteilqualität niederschlagen. Damit eröffnet es ein großes Potenzial zur Optimierung von Serienprozessen in der kautschukverarbeitenden Industrie. ■