

# Rezyklate auf dem Prüfstand

## Analyse bei der Wareneingangskontrolle sorgt für Ausschussminimierung

Da der Werkstoff bereits einmal verarbeitet wurde und während seines Produktlebens bestimmten Einflüssen unterlag, weisen Rezyklate meist veränderte Eigenschaften im Vergleich zu Neumaterialien auf. Das führt häufig zu Problemen. Besonders bei schmelzedehnenden Prozessen wie Spritzstreckblasen, Blasformen, Folienblasen und Thermoformen ist eine rasche Wareneingangskontrolle der Rezyklateigenschaften wichtig. Das Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart (IKT) hat hierfür ein neues Prüfverfahren entwickelt.

**D**er verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen und Rohstoffen wird heutzutage immer wichtiger und birgt sehr große Herausforderungen, zum Beispiel bei der Entsorgung von Abfällen und deren Rückführung in den Kreislauf. Regelungen zur Entsorgung und Rückführung von Abfällen sind in Deutschland durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz von 1996 oder auf europäischer Ebene durch die EU Richtlinie 2008/89/EG (Abfallrahmenrichtlinie) gesetzlich festgehalten. Dadurch wird maßgeblich die Schonung der natürlichen Ressourcen, die Regelung zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen sowie die Trennung und Sortierung von Wertstoffen bezweckt. Kunststoffe, im Speziellen thermoplastische Kunststoffe, eignen sich hierfür besonders. [1]

In der Kunststofftechnik werden daher vermehrt Rezyklate in der Herstellung von Kunststoffprodukten eingesetzt. Im Jahr 2017 wurden in Deutschland rund 12,6 Mio. Tonnen Kunststoff aus Primär-

rohstoffen sowie 1,76 Mio. Tonnen aus Rezyklat verarbeitet. Kunststoffabfälle wurden dabei durch die Abfallwirtschaft nahezu vollständig verwertet. Im gleichen Jahr wurden 46% aller Kunststoffabfälle werkstofflich, 1% rohstofflich und 53% energetisch verwertet [2]. Die Recyclingquoten steigen jährlich und sollen im Jahr 2022 laut dem Bundesumweltministerium bei 63% stofflicher Verwertung liegen [3]. Kunststoffe haben dann nicht nur ein „kurzes Leben“, sondern durchlaufen mehrere Lebenszyklen in vielfältigen Anwendungen. Daher ist die Überprüfung der meist unbekanntesten Werkstoffeigenschaften von Rezyklaten vor der Verarbeitung und/oder Weiterverarbeitung unabdingbar.

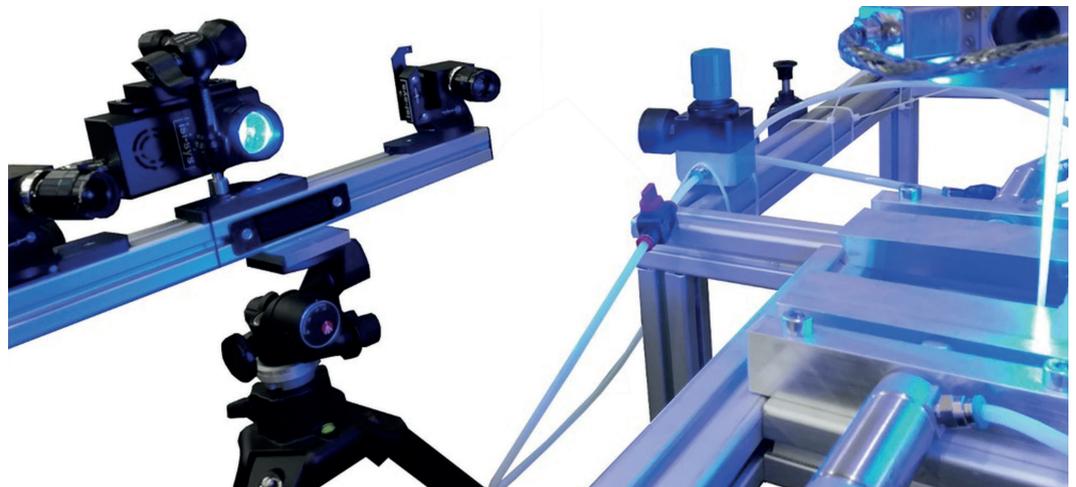
### *Einflussnahme des Recyclings auf die Werkstoffeigenschaften*

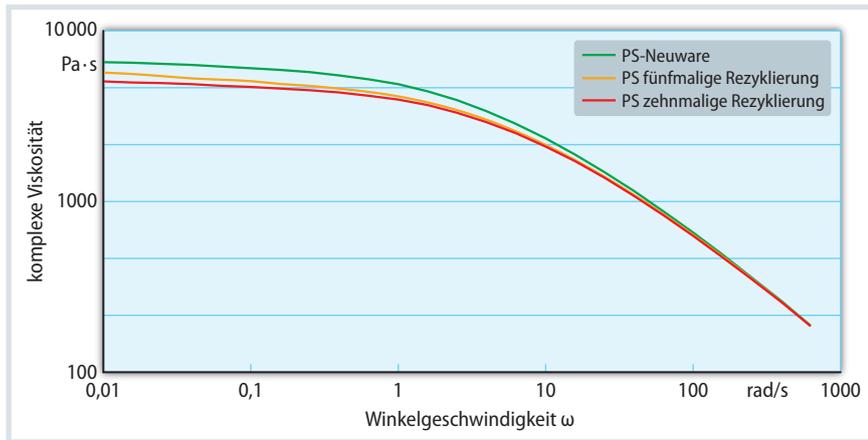
Die Verarbeitung von Rezyklaten birgt einige Herausforderungen und Schwierigkeiten. Zum einen durch die Form des

Rezyklates, wodurch es sehr oft zu einem veränderten Verarbeitungsprozess aufgrund von Schüttdichteänderung in Abhängigkeit von dem Mahlgutanteil kommen kann [4]. Zum anderen sind die Werkstoffeigenschaften nach vormaliger Verarbeitung und Gebrauch oft verändert. Letzteres wird durch Verunreinigungen oder Vermischungen der verschiedenen Kunststoffe während des Sortiervorgangs hervorgerufen, aber auch durch eine mögliche chemische, physikalische oder mechanische Alterung und den damit verbundenen Abbau der Polymerketten während des Gebrauchs [1,5]. Gründe für eine Verunreinigung oder einen Abbau sind dabei die stetig wachsende Menge an verarbeiteten Rezyklaten und die damit verbundene Durchmischung, die verschiedenen Lebenszyklen sowie Anwendungen (bspw. Einfärbung, Füllstoffe, Additive) und Einsatzgebiete (bspw. Medieneinfluss) der Kunststoffprodukte, welche letztendlich als gemischtes Rezyklat in den Verarbei-

**Bild 1.** Das neue Prüfverfahren zur Analyse der Schmelzedehnfähigkeit identifiziert frühzeitig die Rezyklateigenschaften

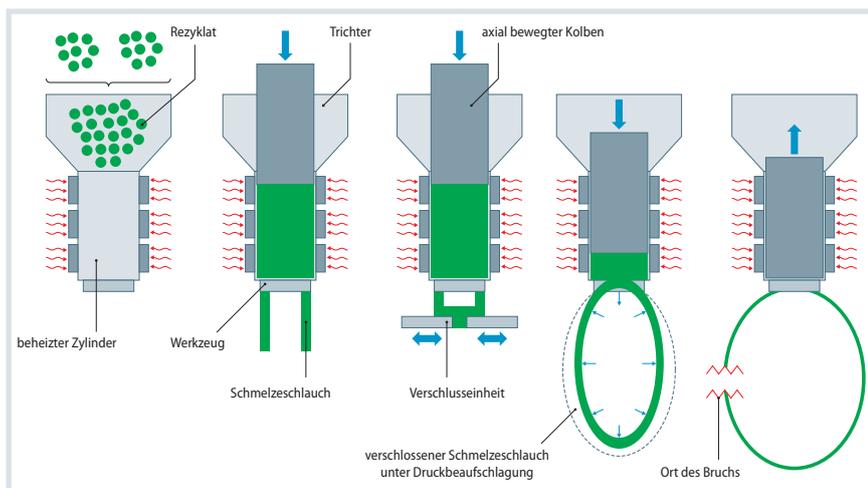
© IKT





**Bild 2.** Einflussnahme der Rezyklierzyklen auf die Scherviskosität von Polystyrol bei 220 °C

Quelle: IKT; Grafik: © Hanser



**Bild 3.** Schematischer Ablauf des neuartigen Prüfverfahrens zur Analyse der Schmelzedehnfähigkeit von Rezyklaten Quelle: IKT; Grafik: © Hanser

tungsprozess zurückgeführt werden [5]. Verdeutlich werden kann dies durch die Messung der Scherviskosität von Polystyrol (Typ: PS 165N, Ineos Styrolution, Frankfurt am Main) und PS-Rezyklaten am IKT mittels eines Rotationsrheometers (Typ: Discovery HR-2, TA Instruments; USA, New Castle). Das PS-Rezyklat wurde mittels eines Doppelschneckenextruders (Typ: ZSK 26, Coperion GmbH, Stuttgart) am IKT hergestellt. Dabei wurde es im Doppelschneckenextruder extrudiert, anschließend stranggranuliert, getrocknet und wieder dem Doppelschneckenextruder zugeführt. Die Änderung der Werkstoffeigenschaften des Rezyklates kann dadurch in Abhängigkeit von den Rezyklierdurchgängen im Vergleich zu Neumaterial betrachtet werden. Bei der Betrachtung der Kurven ist darauf zu achten, dass es sich um eine doppeltlogarithmische Auftragung handelt. Die Nullviskositäten ( $\omega \rightarrow 0$ ) sehen zwar ähnlich

aus, liegen aber mit 5082 Pa·s, 5719 Pa·s und 6612 Pa·s doch stark auseinander. Bei einer fünfmaligen bzw. zehnmahligen Rezyklierung wird daher eine Verringerung der Viskosität um 13,5% bzw. 23,1% im Vergleich zu PS-Neuware festgestellt (Bild 2). Durch die veränderte Viskosität ist nicht nur der Druckbedarf des Verarbeitungsprozesses verändert, sondern auch die mechanischen Eigenschaften des herzustellenden Bauteils.

Um Ausschuss zu minimieren oder gar zu verhindern, ist es somit unabdingbar, die werkstofflichen Eigenschaften der Rezyklate vor der Verarbeitung durch eine geeignete Wareneingangskontrolle zu überprüfen. Dazu existieren bereits etablierte Verfahren wie die Melt-Flow-Index-Messung, Zugversuche oder IR-Spektroskopie. Allerdings eignen sich die Tests nicht zur direkten Prüfung der Dehnfähigkeit der Schmelze von Rezyklaten. Die Dehnfähigkeit ist vor allem für

Verfahren, wie das Spritzstreckblasen, Folienblasen, Blasformen oder Thermoformen von großer Bedeutung.

### Neuartiges Prüfverfahren von Rezyklaten am IKT

Zur Bestimmung der Schmelzedehnfähigkeit von Rezyklaten ohne eine zusätzliche Herstellung eines Halbzeugs oder eines Prüfkörpers wurde ein neuartiges Prüfverfahren am IKT entwickelt und zur Patentierung beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht (Bild 3) [6]. Der große Vorteil des entwickelten Verfahrens liegt in der einfachen Handhabung des Versuchsablaufs, welcher ähnlich schnell wie eine Melt-Flow-Index-Messung abläuft. Weiterhin können reale sowie prozessnahe biaxiale Deformationen und Geschwindigkeiten geprüft werden.

Der Prüfablauf sieht dabei vor, dass das Rezyklat mittels eines Trichters einem Aufschmelzzyylinder zugeführt und dort aufgeschmolzen wird. Anschließend wird die Schmelze durch einen Kolben verdichtet und durch ein Pinolenwerkzeug zu einem Schmelzschlauch extrudiert. Der Schmelzschlauch wird nach dem Düsenaustritt verschlossen. Anschließend wird der verschlossene Schmelzschlauch mittels Druckluft bis zum Versagen aufgeblasen. Während des Aufblasens des Schmelzschlauchs werden Bilder zur Überwachung und Analyse des Aufblasverhaltens aufgenommen. Die Auswertung der Bilder und Bild- »

## Die Autoren

**M.Sc. Tobias Schaible** ist seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Verarbeitungstechnik des Instituts für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart;

tobias.schaible@ikt.uni-stuttgart.de

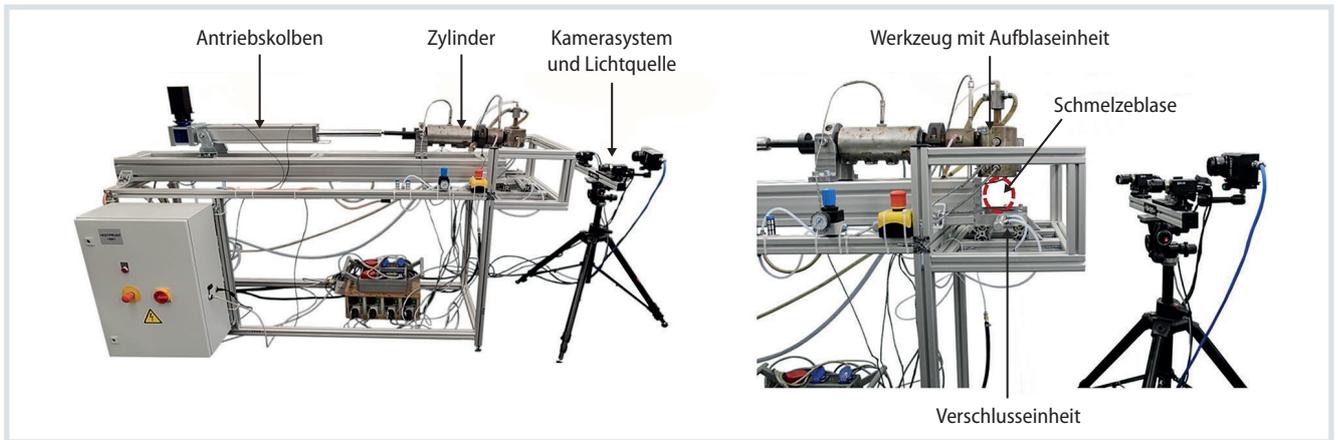
**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Bonten**

leitet seit 2010 das IKT der Universität Stuttgart

## Service

### Literatur & Digitalversion

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



**Bild 4.** Der Vorteil des neuen Prüfverfahrens liegt in der einfachen Handhabung des Versuchsablaufs. Quelle: IKT; Grafik: © Hanser

sequenzen findet durch eine bildtechnische Analyse über der Versuchszeit statt. Somit kann auf das biaxiale Deformationsvermögen und die Dehnfähigkeit der Rezyklatschmelze in Abhängigkeit von der Temperatur sowie dem angelegten Luftdruck und somit der Deformationsgeschwindigkeit rückgeschlossen werden.

Beim Prüfverfahren am IKT wird der Ablauf mittels eines Mikrocontrollers automatisiert durchgeführt. Zur Verdichtung und Förderung der Schmelze durch den Zylinder und das Werkzeug wird ein elektrischer Antriebskolben mit einer maximalen Kraft von 15 kN verwendet (**Bild 4**). Die Verschluss- und Aufblaseinheit wird durch pneumatische Wegeventile angesteuert. Durch die Ansteuerung wird der Schmelzeschlauch mittels pneumatischen Kolben verschlossen. Die Aufblasbedingungen können durch einen

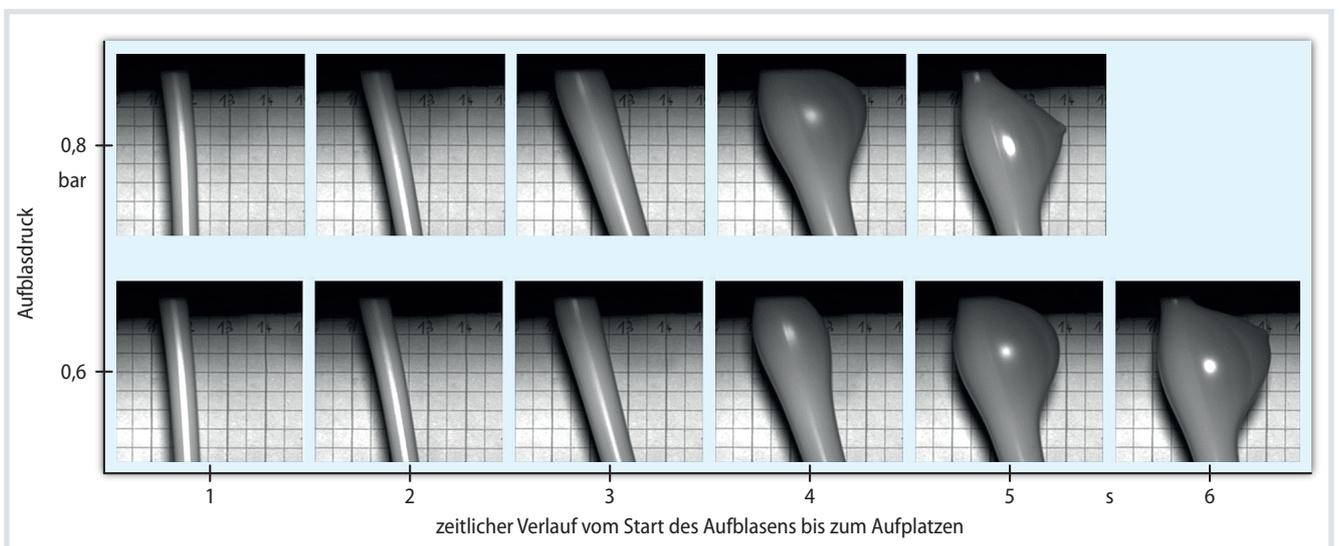
Druck- und Durchflussregler vor dem Versuch eingestellt werden. Ebenso können die fünf Temperaturzonen entlang des Zylinders und des Werkzeugs separat eingestellt und geregelt werden. Der resultierende Extrusionsdruck wird vor dem Werkzeug erfasst und mit aufgezeichnet.

Dadurch ist die Prozessführung deutlich verbessert und Unregelmäßigkeiten können schon vor der Messung erkannt werden. Weiterhin ist die Druckmessung direkt mit der Notabschaltung des Antriebskolbens gekoppelt, wodurch ein sicherer Betrieb des Prüfverfahrens gewährleistet ist. Durch den Messablauf können die Extrusionsgeschwindigkeit, Verschluss- und Aufblaszeit sowie die Zeitspanne der Kameraaufzeichnung des Versuchs optimal auf den Werkstoff eingestellt werden. Die Geometrie des extrudierten Schlauchs kann dabei durch ver-

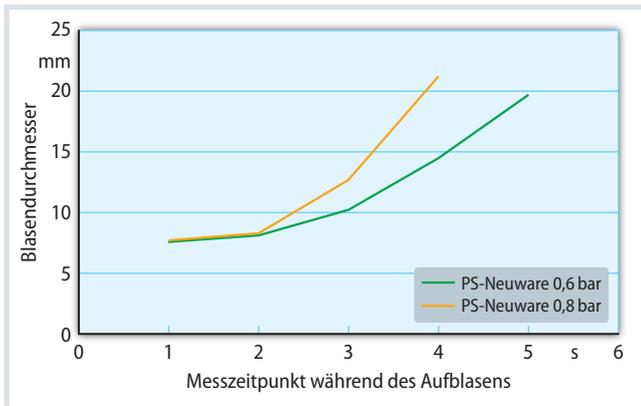
schiedene Drahtführungen und Düsen-einsätze im Pinolenwerkzeug verändert werden.

### *Messung der Schmelzedehnfähigkeit von Rezyklaten*

Zur Erfassung der Schmelzedehnfähigkeit wurde ein Werkzeugeinsatz mit einem Außendurchmesser von 6 mm und einem Innendurchmesser von 4 mm verwendet. Die zeitliche Entwicklung des so extrudierten Schmelzeschlauchs während des Aufblasens bis hin zum Versagen bzw. Aufplatzen wurde für PS-Neuware bei 240 °C und bei Aufblasdrücken von 0,6 bar sowie 0,8 bar analysiert. Der Druckunterschied wird ab dem dritten Zeitpunkt direkt in den Bildern zu den Zeitschritten der Auswertung während des Aufblasens sichtbar (**Bild 5**). Es ist zu erkennen, dass die Messung bei 0,6 bar

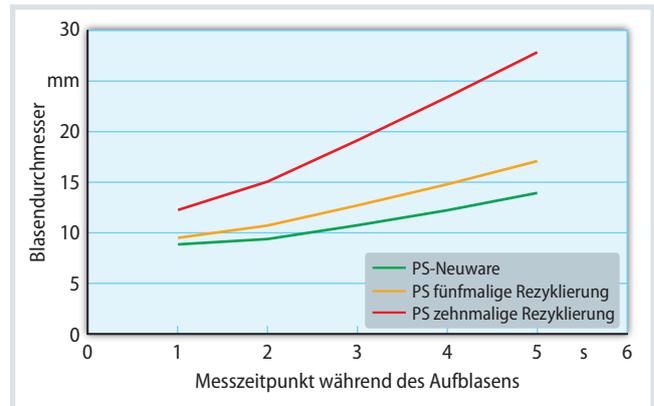


**Bild 5.** Zeitlicher Verlauf während des Aufblasens von PS-Neuware bei 240 °C. Quelle: IKT; Grafik: © Hanser



**Bild 6.** Analyse der Druckabhängigkeit von PS-Neuware bei 240 °C

Quelle: IKT; Grafik: © Hanser



**Bild 7.** Verhalten der Schmelzedehnung während des Aufblasens bei 0,6 bar und 220 °C

Quelle: IKT; Grafik: © Hanser

länger bis zum Versagen des Schmelzschlauchs andauert als bei 0,8 bar. Zur Quantifizierung wird der Durchmesser des Schmelzschlauchs in jedem Bild des zeitlichen Aufblasverlaufs an derselben Stelle ausgewertet. Die Stelle kann frei gewählt werden. Sie sollte jedoch immer denselben Abstand vom Austritt des Werkzeugs haben, damit die Versuche immer an derselben Stelle ausgewertet werden und dadurch vergleichbar sind. Der Vergleich der Aufblaskurven in Abhängigkeit zum Druck wird in einer Grafik dargestellt (**Bild 6**). Durch den höheren Aufblasdruck wird der Schmelzschlauch schneller aufgeblasen und versagt dadurch auch früher im Vergleich zum geringeren Aufblasdruck von 0,6 bar. Zum Zeitpunkt fünf bzw. sechs wurde das Bild für 0,8 bar bzw. 0,6 bar nicht ausgewertet, da dann der Schmelzschlauch bereits aufgeplatzt ist. Da die durchgeführten Messungen an Neumaterial dem erwarteten Verhalten entsprechen, kann davon ausgegangen werden, dass der Messablauf korrekt ist.

Die Versuche wurden bei gleichbleibenden Prozessparametern durchgeführt. Eindeutig ist der Zusammenhang zwischen der Viskositätsverringere-

ung (vgl. **Bild 2**) und der damit einhergehenden Verringerung des inneren Zusammenhalts der Polymerketten gegen eine äußere Kraft zu erkennen. Dies resultiert in einem stärkeren Wachstum des Durchmessers des Schmelzschlauchs gegenüber den Messungen an Neumaterial bzw. Referenzmaterial. Um gemessene Rezyklate einzuordnen und deren Einfluss auf die Dehnfähigkeit bewerten zu können, müssen diese immer mit anderen Rezyklatchargen oder Neuwerkstoffen desselben Kunststofftyps verglichen werden. Als Referenz zu einer Referenzmessung eignen sich Rezyklate oder Neuwerkstoffe einer Charge mit einer Produktion von Bauteilen ohne Prozess- oder Qualitätsprobleme. Solch ein Vergleich wurde für die PS-Neuware und dessen Rezyklat nach fünfmaliger und zehnmaliger Rezyklierung durchgeführt (**Bild 7**). Ähnlich wie in **Bild 2** ist der Einfluss der Rezyklierzyklen zu erkennen. Allerdings mit dem Unterschied, dass das Dehnverhalten analysiert wird.

Weicht somit die Messung des vorliegenden Rezyklats bzw. der Charge von einer Referenzkurve bzw. Sollkurve ab, kann davon ausgegangen werden, dass

es zu Prozessschwankungen aufgrund von veränderten Werkstoffeigenschaften kommen kann.

### Fazit und Ausblick

Mit dem entwickelten Prüfverfahren zur Analyse der Dehnfähigkeit von Rezyklatschmelzen lassen sich unterschiedliche Rezyklate im Sinne einer Wareneingangskontrolle für Verfahren wie Folienblasen, Streckblasen, Blasformen oder Thermoformen schnell und einfach prüfen. Durch Vergleiche mit einer „guten“ Referenzmessung kann die Eignung des Rezyklats unkompliziert überprüft werden. Im nächsten Schritt soll die Aussagefähigkeit der Ergebnisse mit dem neuen Prüfverfahren anhand von Blasform- und Thermoformversuchen mit verschiedenen Neuwerkstoffen und deren Rezyklaten weiter untersucht werden. Weiterhin soll die Wirkweise der digitalen Bildkorrelation zur Anwendung für den Versuchsaufbau weiter betrachtet werden. Hiermit soll der komplette Schmelzschlauch während des Aufblasens mittels eines Specklemusters auf Dehndeformationen und Dehngeschwindigkeiten hin untersucht werden. ■

**Kunststoffe**

[www.kunststoffe.de/umfrage](http://www.kunststoffe.de/umfrage)

Sagen Sie uns Ihre Meinung!



Unter allen Teilnehmern  
verlosen wir 10 E-Books

