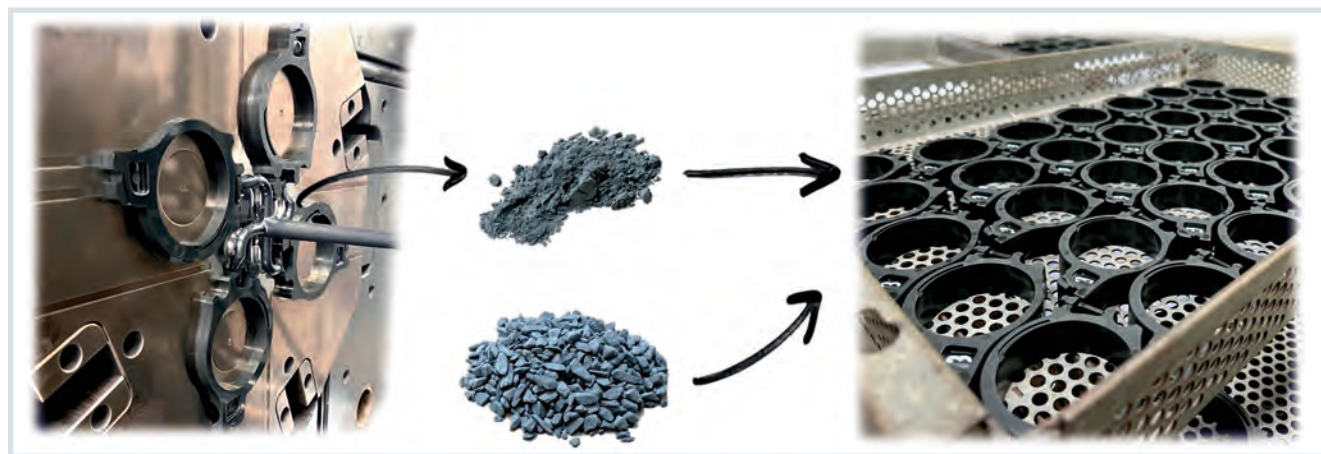


Direkte Rückführung von ausgehärteten Duroplasten als Füllstoff in den Spritzgießprozess

## Angussverwertung schont Ressourcen

Duroplastische Formmassen vernetzen irreversibel bei der Verarbeitung. Sowohl das Material aus den Angussverteilern als auch Anfahr- und Ausschussbauteile werden typischerweise als Abfall der thermischen Verwertung zugeführt. Die Granulierung und direkte Rückführung dieses Materials in den Spritzgießprozess steigert dank eines stofflichen Recyclings die Ressourceneffizienz, mindert jedoch die mechanischen Eigenschaften der Bauteile. Mit der vorliegenden Studie kann die notwendige Abwägung getroffen werden.



Kreislaufführung des Angussverlusts durch Zerkleinerung, Beimischung zu Neuware und direkte Rückführung. © Fraunhofer ICT

**D**uroplastische Formmassen haben aufgrund ihrer irreversiblen chemischen Vernetzung bei der Formgebung inhärente Nachteile gegenüber Thermoplasten. Dennoch sind sie mit ihren sehr guten thermomechanischen Eigenschaften, ihrer exzellenten Medienbeständigkeit und hohen Dimensionsstabilität für zahlreiche Anwendungen attraktiv. Hinzu kommt ein überaus lukrativer Preis. Im Forschungsprojekt „Lite<sub>2</sub>Duro“ untersucht das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) gemeinsam mit einem Konsortium aus Industrie und Forschung Strategien, die Ressourceneffizienz bei der Verarbeitung duroplastischer Formmassen durch eine direkte Rückführung von feinerzkleinerten ausgehärteten Bauteilen zu steigern.

Die grundsätzliche Strategie, ausgehärtete Formmassen als Füllstoffe einzusetzen, ist aus der Literatur bekannt. So wurde beispielsweise der Einsatz von Phenolharz als Füllstoff in Polypropylen (PP) untersucht [1, 2]. Andere Gruppen setzten ausgehärtetes Bulk Molding Compound (BMC) als Füllstoff in PP ein

[3, 4]. Beide Studien beziehen sich auf unverstärktes PP als Referenz und können demzufolge über signifikante Steigerungen der mechanischen Eigenschaften berichten.

In Arbeiten mit Duroplasten als Matrixmaterial werden die granulierten Füllstoffe in einem vorgeschalteten Compounding-Prozess mit der Neuware vermischt [5–8]. Alle Arbeiten haben gemeinsam, dass lediglich grundlegen-

de mechanische Kennwerte der mit Rezyklat gefüllten Kunststoffe betrachtet werden. In der hier präsentierten Studie werden zusätzlich betrachtet:

- die Verarbeitungseigenschaften im Spritzgießprozess,
- der Einfluss der Rezyklatbeigabe auf geometrische Eigenschaften eines Präzisionsbauteils und
- die Auswirkungen auf die Ökobilanz (LCA) der hergestellten Bauteile.

| Lebenszyklusphasen                         | Status quo<br>(g CO <sub>2</sub> -Äq./Stellring) | Neuentwicklung (8 Gew.-% Rezyklat)<br>(g CO <sub>2</sub> -Äq./Stellring) |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Rohmaterialbereitstellung                  | 104                                              | 96                                                                       |
| Produktion Fa. Baumgarten                  | 39                                               | 32                                                                       |
| Transport und Nutzung                      | 1101                                             | 1101                                                                     |
| End-of-Life (ohne Gutschrift)              | 53                                               | 46                                                                       |
| Gutschrift                                 | -29                                              | -26                                                                      |
| Summe                                      | 1268                                             | 1258                                                                     |
| Reduktion absolut (g CO <sub>2</sub> -Äq.) |                                                  | -11                                                                      |
| Reduktion relativ (%)                      |                                                  | -0,8 %                                                                   |

**Tabelle 1.** Ergebnisse der LCA-Studie entsprechend dem Treibhauspotenzial GWP 100.

Quelle: Fraunhofer ICT

Für die experimentellen Untersuchungen wurden zwei Phenolharz-Formmassen des Herstellers Vyncolit verwendet:

- Vyncolit X7530, ein PF-GF55, und
- Vyncolit X7320, ein PF-(MD+GF)80.

Die mechanische Grundcharakterisierung erfolgte im Technikumsmaßstab am Fraunhofer ICT anhand von Zugprüfkörpern. Im Anschluss daran wurden die Maßhaltigkeit sowie das mechanische Verhalten unter einer realitätsnahen komplexen Belastung an einem Ölpumpenstellring (Bild 1) unter Serienbedingungen bei der Baumgarten automotive technics GmbH, Burbach, untersucht.

### Aufbereitung und Spritzgießverarbeitung des Rezyklats

Um das Rezyklatmaterial zu gewinnen, wurden Bauteile und Angüsse aus den beiden Formmassen mithilfe eines Einschwingenbrechers und einer Schneidmühle zerkleinert. Dabei wurden zwei Größenklassen für das Rezyklat betrachtet:

- $d < 250 \mu\text{m}$  sowie
- $250 \mu\text{m} < d < 1000 \mu\text{m}$ .

Unmittelbar vor der Spritzgießverarbeitung wurde das Rezyklat batchweise in Gewichtsanteilen zwischen 4 und 20% zur Phenolharz-Neuware gemischt, durch Taumeln homogenisiert und in den Materialtrichter der Spritzgießmaschine gegeben.

Die Zugprüfkörper wurden mit einem 6-Kavitäten-Werkzeug auf einer Spritzgießmaschine mit 30 mm Schneckendurchmesser (Typ: Allrounder 320 C; Hersteller: Arburg) hergestellt. Der Ölpumpenstellring wurde auf Spritzgießmaschinen der Typen KM 80/390 und KM 150/750 (Hersteller: KraussMaffei) in 1-fach- und 4-fach-Werkzeugen gefertigt (Werkzeugkonzepte und -konstruktion: Baumgarten automotive technics). In allen Fällen erfolgte das Umschalten auf Nachdruck einspritzwegabhängig.

### Wirkungsabschätzung anhand des Treibhauspotenzials

Die Ökobilanz, auch als Lebenszyklusanalyse bzw. Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet, wurde in Anlehnung an die Normenreihe ISO 14040 ff. [9, 10] mithilfe der Software GaBi [11] und der Datenbank Gabi Professional erstellt. Die Studie bestimmt das mögliche Ressourcen- und



**Bild 1.** Ölpumpenstellring aus Vyncolit X7320. © Fraunhofer ICT

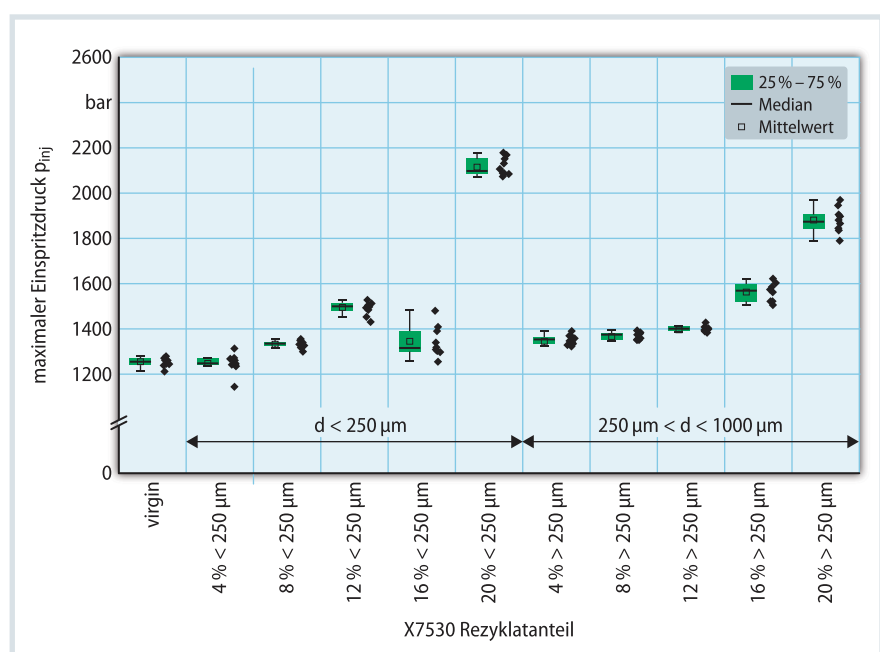
Treibhausgaseinsparpotenzial entlang des vollständigen Lebenszyklus des Ölpumpenstellrings, von der Herstellung, über die Nutzung, bis hin zur Entsorgung.

Um im Sinne der Ressourceneinsparung den effektiven Beitrag zur Kreislaufführung und Zirkularität auszuweisen, findet innerhalb der Auswertungsphase zusätzlich die sogenannte „Life Cycle Gap“-Analyse (LCGA) Anwendung [12]. Das Produktsystem sowie die Sachbilanz der LCA-Studie sind online abrufbar [13]. Die funktionelle Einheit bezieht sich hierbei auf einen Stellring für eine geregelte Pendelstellring-Ölpumpe im Pkw mit einer zu erwartenden Lebensdauer von zehn Jahren bzw. 200 000 km. Die Wirkungsabschätzung erfolgt anhand des Indikators Treibhauspotenzial (Global warming potential, GWP) über einen

Zeitraum von 100 Jahren, gemessen in Kilogramm Kohlenstoffdioxid-Äquivalente ( $\text{kg CO}_2\text{-Äq.}$ ), gemäß der Methode „Environmental Footprint 2.0“.

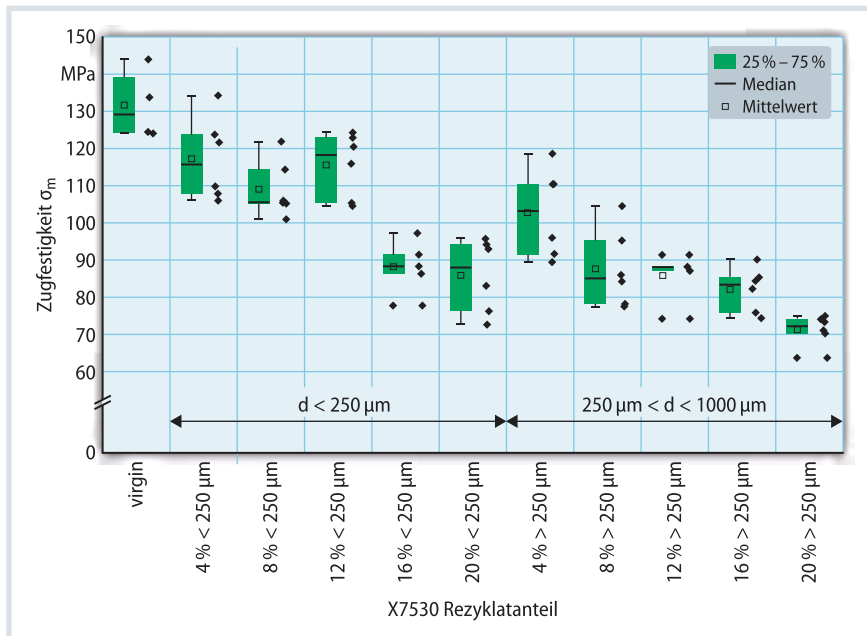
### Mechanische Bauteileigenschaften

Der Einfluss der Rezyklatbeigabe auf den Spritzgießprozess wird anhand des maximalen Einspritzdrucks in Abhängigkeit des Rezyklatanteils am Beispiel der Zugprüfkörperherstellung aus X7530 gezeigt (Bild 2). Für beide Größenklassen ist ein deutlicher Anstieg des Einspritzdrucks mit steigendem Rezyklatanteil erkennbar. Mit Ausnahme des höchsten Rezyklatanteils von 20 Gew.-% ist keine signifikante Abhängigkeit des Einspritzdrucks von der Rezyklatpartikelgröße erkennbar. »



**Bild 2.** Maximaler Einspritzdruck in Abhängigkeit des Rezyklatanteils für Vyncolit X7530.

Quelle: Fraunhofer ICT; Grafik: © Hanser



**Bild 3.** Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Rezyklatanteils für Vyncolit X7530.

Quelle: Fraunhofer ICT; Grafik: © Hanser

Die Zugfestigkeit der hergestellten Prüfkörper wird gemäß DIN EN ISO 527-2 [14] ermittelt (**Bild 3**). Es wird eine Abnahme der Zugfestigkeit um ca. 15 MPa bei Rezyklatanteilen zwischen 4 und 12 Gew.-% beobachtet. Zu höheren Rezyklatanteilen hin fällt die Festigkeitsabnahme stärker aus. Die Verwendung des Rezyklats mit einer Partikelgröße  $250 \mu m < d < 1000 \mu m$  bewirkt einen starken Festigkeitsabfall um 25 MPa bereits bei 4 Gew.-%. Für alle Größenklassen und Rezyklatanteile ist kein Einfluss auf die Streuung der Festigkeit erkennbar.

### Herausforderungen im Spritzgießprozess

Die Bruchflächen für X7530 Neuware sowie für Probekörper mit Rezyklatanteilen von 20 Gew.-% in beiden Größenklassen (**Bild 4**) wurden mikroskopisch analysiert. Einzelne Rezyklatpartikel sind auch bei stärkerer Vergrößerung kaum zu iden-

tifizieren. Der für Phenolharz-Formmassen typische Kernschicht-Deckschicht-Aufbau [15] ist bei  $d > 250 \mu m$  geringer ausgeprägt, generell wirkt die Bruchfläche zerklüfteter und unregelmäßiger.

Vergleichbare Ergebnisse wurden für die Formmasse X7320 ermittelt. Aufgrund der signifikant niedrigeren Festigkeit bei der Verwendung der größeren Rezyklatpartikel ( $250 \mu m < d < 1000 \mu m$ ) wurden die Spritzgießversuche für den Ölpumpenstellring nur mit der kleineren Größenklasse ( $d < 250 \mu m$ ) durchgeführt. Bei der Spritzgießverarbeitung zeigte sich mit steigendem Rezyklatanteil ebenfalls ein ansteigender Einspritzdruckbedarf. Bei unveränderten Spritzgießparametern erfolgte die Werkzeugfüllung bereits ab einem Rezyklatanteil von 4 Gew.-% nur noch während des Einspritzprofils, jedoch nicht mehr während der Nachdruckphase. Dies konnte durch eine Anpassung des Nachdrucks an den höheren Umschaltmassedruck kompensiert werden.

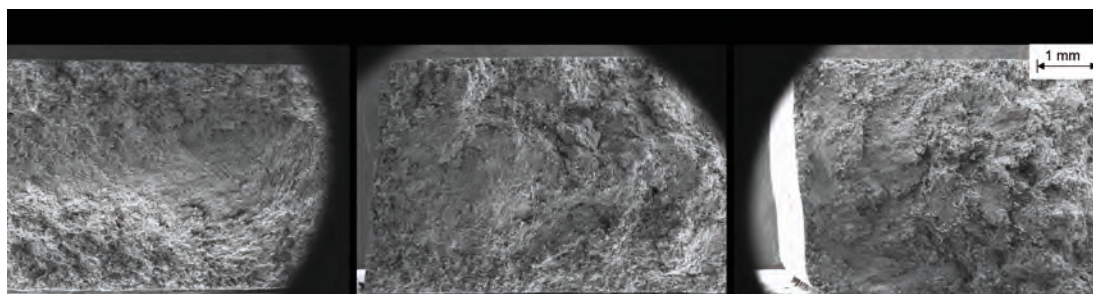
Als problematisch stellte sich jedoch ein Faktor heraus: die zunehmende Neigung zu einem Düsenverschluss in Form von sich aufbauenden Materialablagerungen auf der Innenseite der Maschinendüse. Dieses Phänomen trat bei den hohen Rezyklatanteilen  $> 12$  Gew.-% in immer kürzeren Intervallen von 10 bis 15 Zyklen auf und ließ sich auch durch zahlreiche Prozessparametervariationen (unter anderem Staudruck, Schnecken-drehzahl, Plastifizierungstemperatur, Werkzeugtemperatur und Einspritzprofil) nicht signifikant beeinflussen.

Die gemäß den Anforderungen des Serienbauteils ermittelte Bruchlast des Ölpumpenstellrings zeigt den von der Zugfestigkeit bekannten Zusammenhang der abnehmenden mechanischen Eigenschaften mit steigendem Rezyklatanteil. Tendenziell wird auch eine Zunahme der Messstreuung konstatiert. Mit einer mittleren Bruchlast von  $F = 1,6$  kN liegt die Materialcharge mit einem Rezyklatanteil von 4 Gew.-% noch leicht oberhalb der als i.O./n.i.O.-Grenze definierten Bruchlast von  $F = 1,5$  kN.

### Positiver Beitrag zur Kreislaufführung

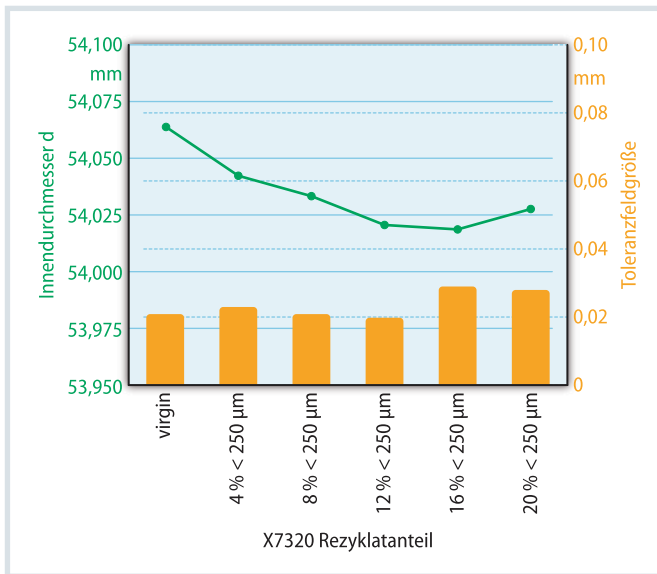
Im Gegensatz zu den Ergebnissen der mechanischen Charakterisierung lässt die Größe des Toleranzfelds keinen Einfluss des Rezyklatanteils erkennen (**Bild 5**). Für alle Rezyklatanteile wird eine Größe des Toleranzfelds von  $s < 0,03$  mm erreicht, was deutlich in der Spezifikation von  $s < 0,12$  mm liegt. Tendenziell ist mit zunehmendem Rezyklatanteil eine Abnahme des Durchmessers zu beobachten. Dies wird auf den höheren Werkzeuginnendruck zurückgeführt, der für eine vollständige Formfüllung bei Chargen mit einem hohen Rezyklatanteil erforderlich war [16].

Die Ergebnisse der LCA-Studie entsprechend dem Treibhauspotenzial GWP 100 zeigen, dass sich die Treibhausgas-



**Bild 4.** Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der Bruchflächen von Prüfkörpern aus Vyncolit X7530. © Fraunhofer ICT





**Bild 5.** Innendurchmesser und Toleranzfeldgröße des Ölpumpenstellrings in Abhängigkeit des Rezyklatanteils für Vyncolit X7320.

Quelle: Fraunhofer ICT;  
Grafik: © Hanser

schon Eigenschaften. Für die hier untersuchten anorganisch gefüllten Phenolharz-Formmassen liegt dieser Anteil bei ca. 8 Gew.-%. Er führt zu einem moderaten Verlust der mechanischen Eigenschaften (-15 MPa Zugfestigkeit), einer gleichbleibenden Maßhaltigkeit der Bauteile und einem um 100 bar erhöhten maximalen Einspritzdruck. Das Treibhauspotenzial GWP 100 wird um rund 1 % und die Lücke im Kreislauf um etwa 3 % reduziert. Perspektivisch wird die direkte Zerkleinerung und Kreislaufführung der Angüsse an der Spritzgießmaschine angestrebt. ■

## Info

### Text

**Robert Maertens, M.Sc.**, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Polymer Engineering des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie (ICT), Pfinztal; robert.maertens@ict.fraunhofer.de

**Michael Dieterle, M.Sc.**, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Umwelt Engineering am Fraunhofer ICT.

**Tayla Herrmann, B.Sc.**, ist studentische Hilfskraft in derselben Abteilung.

**Dipl.-Wirt.-Ing. Jan Hirz** ist Geschäftsführer der Baumgarten automotive technics GmbH, Burbach; j.hirz@bat-duro.com

**Dietmar Klaas** ist technischer Projektmanager bei Baumgarten automotive technics.

### Dank

Die Autoren widmen diese Veröffentlichung dem Andenken an ihren Kollegen und ehemaligen Institutsleiter des Fraunhofer ICT Prof. Dr. Peter Elsner und danken ihm damit für die große Unterstützung und freundschaftliche Begleitung. Die Arbeiten wurden im Rahmen des Projekts „Lite<sub>2</sub>Duro“ durchgeführt, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Technologietransfer-Programms Leichtbau aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wird (Förderkennzeichen 03LB3015C).

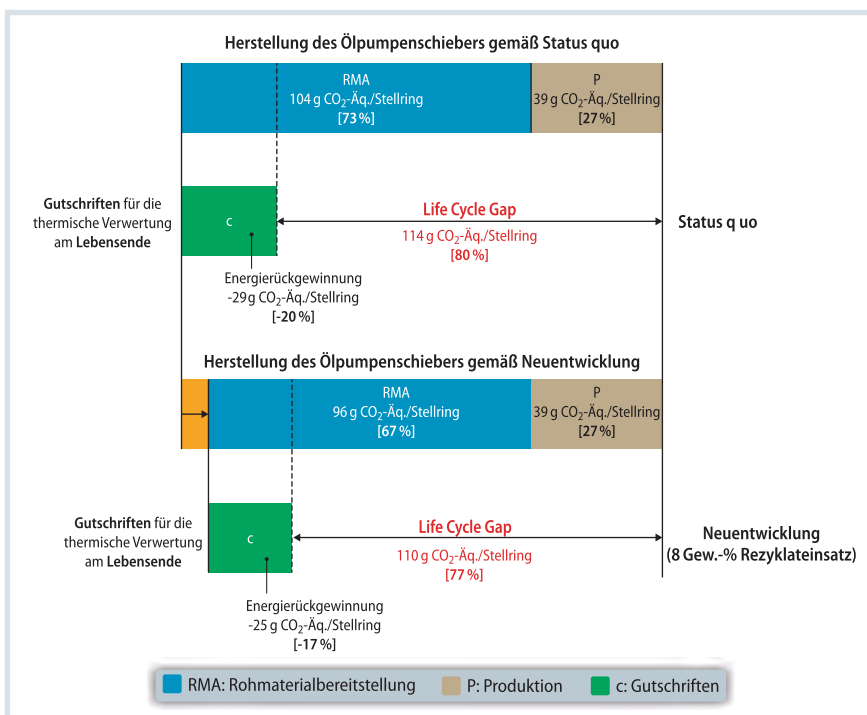
### Service

Weitere Infos zu den Projektpartnern Fraunhofer ICT und Baumgarten:

[www.ict.fraunhofer.de](http://www.ict.fraunhofer.de)  
[bat-duro.com](http://bat-duro.com)

### Literatur & Digitalversion

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



**Bild 6.** Ergebnis der „Life Cycle Gap“-Analyse. Durch den Einsatz von 8 Gew.-% Rezyklatmaterial wird die Lücke zur idealen Kreislaufführung um 3 %-Punkte reduziert. Quelle: Fraunhofer ICT; Grafik: © Hanser

emissionen durch das neu entwickelte Recyclingverfahren effektiv um rund 11 g CO<sub>2</sub>-Äq. je Stellring reduzieren lassen (Tabelle 1), was rund 1 % der Gesamtemissionen entspricht. Aus Sicht einer Kreislaufwirtschaft verdeutlichen die Ergebnisse der LCGA (Bild 6), dass sich die Lücke von ursprünglich 80 % auf 77 % verkleinern lässt. Damit leistet die Rückführung der ausgehärteten duroplastischen Formmassen aus Angussverteilern sowie aus Anfahr- und Ausschussbauteilen einen positiven Beitrag zur Kreislaufführung und Zirkularität im Sinne einer

Ressourceneinsparung. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse, dass weiterhin ein großes Potenzial für Verbesserungen besteht.

### Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass die Rückführung von ausgehärteten duroplastischen Formmassen als Füllstoff in den Spritzgießprozess möglich ist. Der realisierbare Rezyklatanteil ergibt sich in Abwägung zwischen Ressourceneinsparungen und dem Verlust an mechani-