



© stock.adobe.com/digitalstock

## Geschlossener Kreislauf?

*Etablierte und neuartige Technologien suchen ihren Markt und regulatorische Schützenhilfe*

Die Herausforderungen beim Kunststoffrecycling sind vielfältig, daher existieren bislang keine Verfahren, die ein umfassendes Kunststoffrecycling ermöglichen. Zukünftig wird der Anteil an recycelten Kunststoffen steigen, da verschiedene Verfahren entwickelt werden und der Verbraucher Lösungen fordert.

In der Kunststoffverarbeitung ist der Übergang von einer Linear- zu einer Kreislaufwirtschaft angesichts von Klimawandel, Umweltverschmutzung, Bevölkerungswachstum und Ressourcenabhängigkeit sowohl ökologisch als auch ökonomisch weltweit erforderlich. Laut dem Umweltbundesamt (UBA) fielen in Deutschland im Jahr 2016 insgesamt ca. 3,10 Mio. t Kunststoffverpackungen an. Dies entspricht einer Steigerung von 75 % im Vergleich zum Jahr 2000. Insbesondere die zunehmende weltweite Vermüllung der Ozeane und der Küstenbereiche lässt die Akzeptanz von Kunststoffverpackun-

gen bei den Verbrauchern sinken. Hierbei wird jedoch außer Acht gelassen, dass Alternativen, beispielsweise aus Glas oder Aluminium, oft nicht ökologisch sinnvoll sind, da deren Herstellung, Verarbeitung und Transport energieintensiv sind. Zudem ist die Vermüllung nicht das Resultat eines spezifischen Werkstoffs, sondern der Einstellung der Bevölkerung gegenüber der Umwelt.

In der meist emotionalen Diskussion wird auch vernachlässigt, dass Deutschland bereits heute über ein Verwertungskonzept für Kunststoffabfälle verfügt, das laut UBA 2016 ca. 1,5 Mio. t (49%) der Kunst-

stoffverpackungen recycelt bzw. thermisch verwertet. Dennoch muss mit dem neuen Verpackungsgesetz, das ab 1. Januar 2019 in Kraft tritt, die Recyclingquote für Wertstoffsammlungen bis 2022 auf 63 % gesteigert werden.

Betrachtet man allerdings die Verwertungsquote von Kunststoffabfällen in Europa, wird deutlich, dass in vielen europäischen Ländern bislang eine geeignete Infrastruktur und der Wille für ökologische sowie ökonomische Verwertungskonzepte fehlen. Laut PlasticsEurope sind 2016 in Europa (EU28+NO/CH) 27,1 Mio. t an Post-Consumer Kunststoffabfällen ange-

fallen. Davon wurden 41,6% thermisch verwertet, 31,1% recycelt und 27,3% deponiert. Insbesondere Malta, Griechenland, Bulgarien und Kroatien weisen hohe Deponierungsquoten von bis zu über 80% auf. Auch Frankreich, Portugal und Spanien sind mit Deponierungsquoten von über 25% keine Vorreiter in der Kunststoffabfallverwertung.

Allerdings besitzen alle Länder, mit Ausnahme von Malta, Recyclingquoten zwischen 20 und 45%. Die großen Unterschiede in den Deponierungsquoten sind somit maßgeblich auf unterschiedlich hohe thermische Verwertung der Kunststoffabfälle zurückzuführen. Unter Vernachlässigung der Deponierung ist die thermische Verwertung die derzeit vorherrschende Verwertungsform, da sie keine sortenähnlichen Stoffströme voraussetzt. Die Kunststoffabfälle werden ohne weitere Wiederverwertung verbrannt und daher wird lediglich die frei werdende Energie genutzt. Allerdings erfüllt dieser Ansatz nicht die Anforderungen einer stofflichen und nachhaltigen Kreislaufwirtschaft.

### Sortierung als erster Schritt

Für einen wirtschaftlichen Recyclingprozess werden sortenreine Kunststoffabfälle benötigt. Zur Sortierung kann beispielsweise die Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR) zum Einsatz kommen, bei der infrarotes Licht die Kunststoffabfälle auf einem Förderband bestrahlt. Die Moleküle des Kunststoffs werden bei bestimmten Wellenlängen, die der Resonanzfrequenz der Moleküle entsprechen, zu Schwingungen angeregt und absorbieren diese Wellenlängen. Das NIR-Spektrometer erfasst die übrigen Wellenlängen, die diffus reflektiert werden. Durch die Auswertung der Absorptionsbanden lässt sich jedes Spektrum einer Materialklasse zuordnen. Nach der Zuordnung erfolgt die direkte Sortierung der Abfälle durch Ausblasen der einzelnen Kunststoffabfälle. Reinheiten von 80 bis 98% werden durchsatzabhängig erreicht.

Eine zusätzliche Spektroskopie im visuellen Frequenzbereich ermöglicht zudem die farbliche Tren-

nung der Kunststoffabfälle. Bei Bedarf erfolgt die Identifizierung der Form und Größe mithilfe von Farbzeilenkameras. Allerdings stellen Lamine aus unterschiedlichen Kunststofftypen, wie beispielsweise Lebensmittelverpackungen, Probleme bei der Trennung durch NIR-Sensoren dar, da diese je nach Lage anders bzw. falsch zugeordnet werden. Auch mit Sleeves etikettierte Flaschen können aufgrund der Materialkombination problematisch sein. Darüber hinaus erweist sich aufgrund der hohen Absorption die Charakterisierung von schwarz eingefärbten Produkten als äußerst schwie-

rig. Für diese Anwendung hat die Steinert GmbH, Köln, eine spezielle Hyperspektral-Kamera entwickelt, die auf der Mittel-Infrarot-Spektroskopie (MIRS) basiert. Schwarz eingefärbte Kunststoffe mit einem Grafitgehalt von bis zu 1% werden sicher identifiziert (Bild 1).

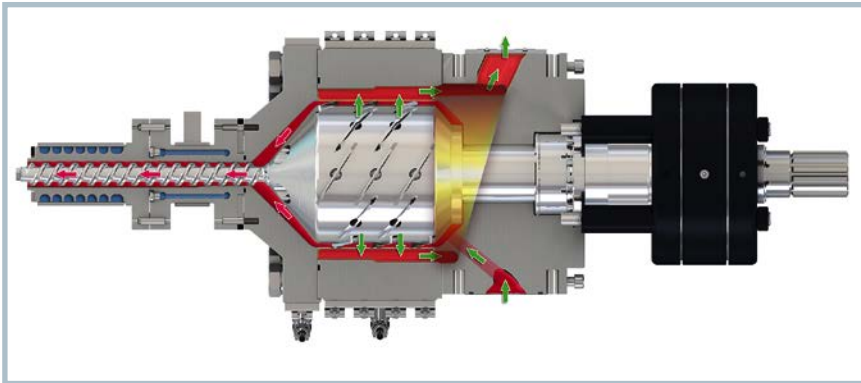
### Werkstoffliche Verwertung

Der vorherrschende Recyclingansatz für Kunststoffabfälle ist die werkstoffliche Verwertung. Nach der Zerkleinerung, Sortierung und Reinigung wird der Altkunststoff aufgeschmolzen und re- »



**Bild 1.** Der UniSort BlackEye ermöglicht die Sortierung von schwarz eingefärbten Kunststoffen

(© Steiner)



**Bild 2.** Die Verunreinigungen werden von der Oberfläche des Filterkorbs abgeschabt und mit einer Austragschnecke aus der Maschine gefördert (© Nordson Kreyenborg)

granuliert, um anschließend erneut zu Produkten und Halbzeugen verarbeitet zu werden. Jedoch ist hierbei problematisch, dass eine Verschlechterung der Kunststoffqualität eintritt, wenn das granuliert Material nicht sortenrein vorliegt. Da bei jeder Form der werkstofflichen Verwertung die Makromoleküle durch das erneute Aufschmelzen thermisch geschädigt werden, führt dies u. a. zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Aus Gründen inhomogener Schüttdichten, hoher Restfeuchtegehalten durch die vorgeschaltete Reinigung sowie verbliebener Verunreinigungen ist die Regranulierung der Materialien herausfordernd. Hierfür haben die Maschinenhersteller viele Detaillösungen entwickelt, die sich in ihrer Funktion ähneln.

Zunächst muss bei der Regranulierung im Extruder ein prozesssicherer Einzug der

Kunststoffabfälle sichergestellt werden. Hierzu werden die Materialien zerkleinert, vermischt und vorverdichtet. Dies kann mittels rotierender Messer im Schneidbehälter erfolgen. Gleichzeitig wird das Material erwärmt und somit vorgetrocknet. Im Anschluss folgen in der Regel die Plastifizierung und die Homogenisierung der Schmelze. Integrierte Filter, die im Hinblick auf Druckverlust und Standzeit an die Anforderungen angepasst sind, führen kontinuierlich Verunreinigungen ab. Bei Bedarf sind moderne Filtersysteme für Verunreinigungsgrade von > 15 % bei mehreren Tonnen Durchsatz ausgelegt. Rotationsfilter oder Hubkolbenfilter mit integrierter Selbstreinigung ermöglichen Produktionsprozesse ohne Unterbrechungen.

Einen anderen Weg geht die Nordson Kreyenborg GmbH, Münster. Die verunreinigte Schmelze durchströmt den Schmelzefilter vom Typ BKG HiCon R-Ty-

pe250 von innen nach außen (**Bild 2**). Die Filtration wird mithilfe von Mikro-Bohrungen erreicht. Die Verunreinigungen werden abgeschieden und mithilfe einer rotierenden Messerwelle von der Oberfläche des Filterkorbs abgeschabt und anschließend mit einer gekühlten Austragschnecke aus der Maschine gefördert. Neben organischen und anorganischen Verunreinigungen müssen auch flüchtige Bestandteile wie Restfeuchtigkeit, Gerüche und niedermolekulare Bestandteile reduziert werden, um hochwertige Rezyklate herzustellen. Dies erfolgt in der Regel über ein- oder mehrstufige Entgasungszonen.

Insbesondere der Geruch von Post-Consumer-Abfällen aus dem Gelben Sack (Duales System) beeinträchtigt die späteren Einsatzmöglichkeiten der Rezyklate. Deshalb beschäftigt sich das Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, Freising, mit der Charakterisierung und Verbesserung des Geruchs in Kunststoffen und Rezyklaten. Es sollen zielgerichtete Methoden zur Entfernung geruchsaktiver Kontaminationen entwickelt werden, indem die zugrundeliegenden chemischen Strukturen der Störgerüche aufgeklärt werden. Neben der Geruchsminimierung ist auch die gezielte Einstellung der Materialeigenschaften der Rezyklate für den späteren Einzug unumgänglich.

Optional kann zur Einarbeitung von verschiedensten Füll- und Verstärkungstoffen die Kunststoffschmelze im Anschluss an den Einschnuckenextruder direkt in einen Doppelschnuckenextruder geführt werden, der eine höhere Mischwirkung aufweist. Die Erema Group GmbH, Ansfelden (Österreich), hat dafür eine In-line-Compoundieranlage entwickelt, mit deren Hilfe sich die Materialeigenschaften der Rezyklate gezielt einstellen lassen (**Bild 3**). Hierbei ist auf eine schonende Verarbeitung zu achten, da die thermische Schädigung bei der wiederholten Verarbeitung zu einer Reduktion des Molekulargewichts führt. Schlussendlich ist die Qualität des Rezyklats jedoch von den Eigenschaften des Ausgangsmaterials abhängig. Nur bei sehr hoher Sortenreinheit ist die Herstellung hochwertiger Compounds möglich.

Kompatibilisatoren können die Kompatibilität verschiedener Kunststofftypen steigern, allerdings muss berücksichtigt werden, dass oft hohe Anteile solcher Ad-



**Bild 3.** Durch die Inline-Compoundierung der Rezyklate werden die Materialeigenschaften gezielt eingestellt

(© Erema)

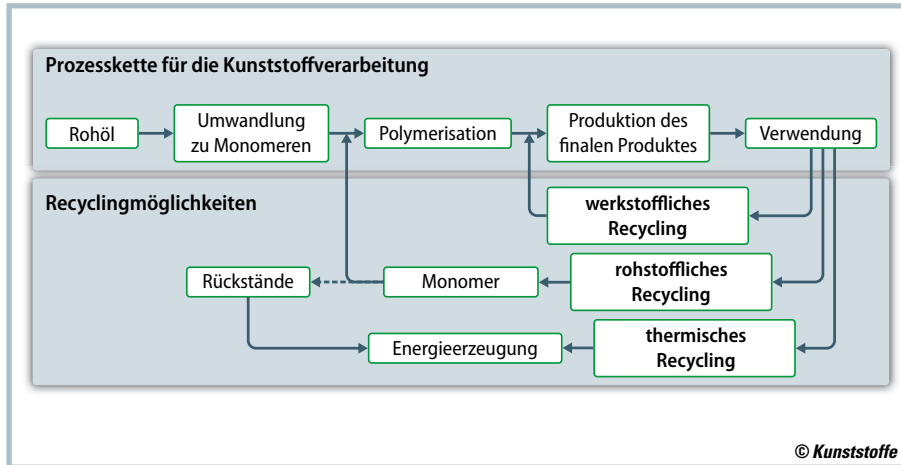
ditiv benötigt werden und ihr Einsatz deshalb teuer ist. Zudem muss für den wirksamen Einsatz der Kompatibilisatoren die Zusammensetzung des Recyclingmaterials weitgehend bekannt sein. Einen weiteren Aspekt, der insbesondere für die spätere Anwendung relevant ist, stellt die Einfärbung der Materialien im Aufbereitungsprozess dar. Für Rezyklate in hellen Farben ist eine farbliche Vorsortierung der Kunststoffabfälle notwendig;

ansonsten lassen sich Compounds nur in dunklen Farben einfärben.

### **Rohstoffliches Recycling**

Als Alternative zum werkstofflichen Recycling steht das rohstoffliche Recycling zur Verfügung, bei dem die Makromoleküle in Einzelteile bis hin zu Monomeren aufgespalten werden (**Bild 4**). Die Monomere lassen sich direkt bzw. nach einer Auf-

bereitung wieder zur Kunststoffsynthese einsetzen, ohne dass störende Verunreinigungen oder reduzierte Kettenlängen die Produktqualität beeinträchtigen. Die thermische Aufspaltung führt jedoch nicht bei allen Polymertypen zu direkten Ausgangsstoffen für eine erneute Polymerisation. So ergibt die thermische Zersetzung von Polyethylen, Polypropylen und Polyester nur unspezifische Produkte wie Wachse, Leichtöl und Gase, die »



**Bild 4.** Das rohstoffliche Recycling beginnt mit der erneuten Polymerisation und erzielt somit Eigenschaften wie bei Neuware (Quelle: M. Adamy)

sich nicht für eine erneute Polymerisation eignen. Polystyrol (PS) und auch Polymethylmethacrylat (PMMA) dagegen gehören zu den Kunststofftypen, die sich bei höheren Temperaturen wieder in ihre Monomere aufspalten lassen und so für eine erneute Polymerisation geeignet sind.

Laut PlasticsEurope werden derzeit nur weniger als 5% der Kunststoffverpackungen in Deutschland rohstofflich recycelt, da derartige Verfahren aufwendig sind. Dennoch wird in einem öffentlich geförderten Gemeinschaftsprojekt die gesamte Prozesskette beim rohstofflichen Recycling am Beispiel von Polystyrol analysiert. Involviert sind hierbei die Ineos Styrolution Group GmbH, Frankfurt am Main, die Neue Materialien Bayreuth GmbH, Bayreuth, sowie zwei Forschungsinstitute der RWTH Aachen: das Institut für Aufbereitung und Recycling (I.A.R) und das Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV).

Die vorsortierten und zerkleinerten Polystyrol-Abfälle werden in einem Doppelschneckenextruder bei hohen Temperaturen (400–450 °C) und bei hohen

Scherenergieeinträgen thermisch und mechanisch stark beansprucht, sodass die zerkleinerten Polystyrol-Abfälle in Monomere und Oligomere thermisch aufgespalten werden. Monomere, Oligomere und weitere flüchtige Spaltprodukte werden über eine mehrstufige Entgasung abgeführt und kondensiert. Mittels fraktionierter Destillation sollen die Styrolmonomere aus dem Kondensat abgetrennt werden. Sie können anschließend direkt im Produktionsprozess eingesetzt und zu neuem Polystyrol verarbeitet werden. Oligomere und andere Spaltprodukte werden in einem Steamcracker weiter aufgespalten, sodass auch aus diesem Material noch weitere Ausgangsstoffe für die Kunststoffherstellung gewonnen werden, etwa Ethen, Propen oder Benzol.

### Lösemittelbasiertes Recycling

Andere Wege geht die APK AG, Merseburg. In einem lösemittelbasierten, physikalischen Aufbereitungsprozess sollen aus gemischten Kunststoffabfällen sortenreine Rezyklate mit Eigenschaften hergestellt werden, die vergleichbar zur Neuware sind. Hierbei ist der Einsatz sowohl von Post-Industrial-Abfällen als auch von stark verschmutzten Post-Consumer-Abfällen möglich. Die zerkleinerten Multilayer-Verpackungsabfälle werden zunächst in ein Lösemittelbad gefördert. Dort wird eine Komponente der Multilayerfolie in Lösung gebracht, die zweite Komponente verbleibt als festes Material in der Lösung. Dadurch erfolgt die Separation dieser Materialkomponenten. Es folgt eine Fest-Flüssig-Abscheidung und die Entfer-

nung des Lösungsmittels, das wiederverwendbar ist. Am Ende des Prozesses liegen die Bestandteile der Multilayer-Folie zwar sortenrein vor, allerdings steigt die Anzahl notwendiger Trennstufen mit der Anzahl der Zielkunststoffe. Die APK plant, im Herbst eine Anlage mit einer Jahreskapazität von 8000 t in Betrieb zu nehmen, um im Industriemaßstab Multilayerfolien in ihre Bestandteile aufzutrennen und hochwertige Rezyklate herzustellen.

### Besser thermisch verwerten als deponieren

Bislang existiert kein Kunststoffrecyclingverfahren, das eine umfassende Wiederverwertung ermöglicht, da Kunststoffprodukte individuell abgestimmt und daher vielfältig sind. Um das Recycling von Kunststoffverpackungen zu vereinfachen, sollte ein recyclinggerechtes Verpackungsdesign genutzt werden. Hierzu zählt die Vermeidung von PVC oder anderen chlorhaltigen Materialien und der Einsatz von recycelbaren und weitverbreiteten Materialien wie PE-LD, PE-HD, PP und PET. Darüber hinaus sollten Verbundmaterialien vermieden und Mono-Materialien eingesetzt werden.

Wo der Einsatz von Mono-Materialien nicht möglich ist, kommt es dem Recyclingprozess zugute, wenn das Hauptmaterial der Verpackung für die NIR-Spektroskopie erkennbar ist und eine einfache Auftrennung der einzelnen Lagen durchgeführt werden kann. Beispielsweise zerlegt die 2011 gegründete Saperatec GmbH, Bielefeld, Mehrschichtverbundmaterialien durch den Einsatz von speziellen Trennflüssigkeiten. Der Anteil des werkstofflichen Recycling lässt sich weiter erhöhen, wenn definierte Recycling-Materialströme vorliegen, daran angepasste Recyclingverfahren zur Verfügung stehen und die Gesetzgebung ein recyclinggerechtes Verpackungsdesign vorgibt. Allerdings muss hinterfragt werden, ob die dann noch verbleibenden gemischten Kunststoffabfälle mit hohem wirtschaftlichem Aufwand stofflich oder besser doch thermisch verwertet werden sollen. Denn bislang basiert der wesentliche Teil der Energieerzeugung auf der Verbrennung fossiler Rohstoffe. Hierfür sollte man die nicht wirtschaftlich recycelbaren Kunststoffabfälle nutzen anstatt diese erdölbasierten Energieträger erneut zu vergraben. ■

## Der Autor

**Maximilian Adamy, M.Sc.**, arbeitet auf dem Forschungsgebiet der Compoundierung und der reaktiven Extrusion.

## Service

### Digitalversion

» Ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/6795741](http://www.kunststoffe.de/6795741)