



Blick auf eine Kunststoff-Pyrolyseanlage im Carbon Cycle Lab am KIT. Hier findet begleitende Forschung zur Verfahrensentwicklung mit dem Ziel der industriellen Anwendung statt. Foto: KIT/Markus Breig

Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Chemisches Recycling für mehr Kreislauf

Das chemische Recycling von Kunststoffabfällen nimmt in Deutschland Fahrt auf. Es soll mechanisches Recycling ergänzen und dazu beitragen, die Kreislaufwirtschaft bei Kunststoffen voranzubringen. Die Bundesregierung hat zudem angekündigt, diese Art des Recyclings in die Abfallhierarchie einzugliedern.

TEXT: Dieter Stapf

Von den fast 500 Mio. t Kunststoffen, die weltweit jährlich hergestellt werden, werden weniger als 10 % recycelt. Ein großer Teil der stetig steigenden Produktionsmengen basiert auf fossilen Ressourcen und verursacht daher zunehmende Treibhausgas-Emissionen und andere negative Umwelteinwirkungen. Selbst in Deutschland mit seinem hoch entwickelten Abfallmanagementsystem liegt der aus Rezyklat hergestellte Anteil der Kunststoffe schon seit vielen Jahren weitgehend konstant bei gerade 16 %. Und die meisten Prognosen gehen von einer Verdopplung der heutigen weltweiten Kunststoffproduktion bis spätestens 2050 oder 2060 aus.

Neben der Abfallvermeidung und der Wiederverwendung der Kunststoffprodukte ist Recycling als Teil einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft der effizienteste Weg, um diese Probleme anzugehen: die Abhängigkeit von Rohstoffimporten als auch der Energiebedarf würden gegenüber der heutigen linearen Wirtschaftsweise sinken. Auch CO₂-Emissionen aus der Verbrennung sowie der Aufwand, das CO₂ aufzufangen, würden vermieden.

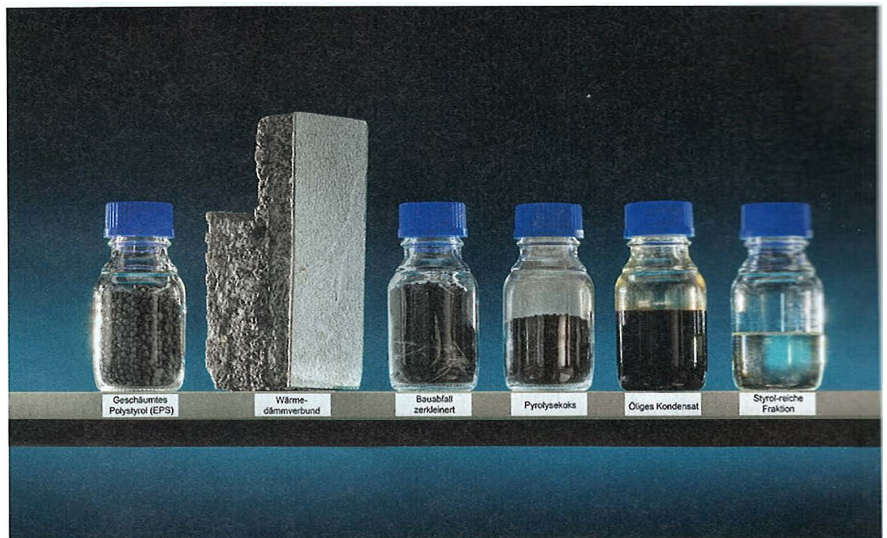
Die EU geht wichtige Schritte in Richtung mehr Recycling. Sie beschließt zunehmend verpflichtende Rezyklatanteile für große kunststoffhaltige Produktströmen wie Verpackungen, Automobile oder im Bausektor.

Zwei Beispiele: Die neue EU-Richtlinie für Verpackungen und Verpackungsabfälle legt eine Rezyklateinsatzquote von 30 % für 2030 fest, für neue Pkw wird eine gestaffelte Steigerung auf 25 % innerhalb von zehn Jahren diskutiert.

Mangel an Rezyklaten

Hersteller von Kunststoffen und Kunststoffprodukten sowie deren Verbände beklagen einen zunehmenden Mangel an hochwertigen Rezyklaten. Mit dem etablierten mechanischen Recycling, also dem Sammeln der Abfälle, Sortieren der Reinkunststoffe und wieder Einschmelzen, sind die Bedarfe nicht zu decken.

Hierfür gibt es Gründe: Das Abfallaufkommen ist nur etwa halb so hoch wie die produzierte Kunststoffmenge, da viele Produkte langlebig sind. Nur bei sehr sauberen, kurzlebigen und gut sortierbaren Kunststoffprodukten, also besonders den



Eine Mischabfall-Prozesskette: Aus „nicht-rezyklierbaren“ Abfällen lassen sich schrittweise Grundstoffe für neue Kunststoffe herstellen. Hier werden ausgediente Wärmedämmverbundsysteme zerkleinert, abtrennbare Mineralik wird entfernt und die Kunststofffraktion fast vollständig zu einem öligen Kondensat umgewandelt, das überwiegend aus Styrol besteht. Das daraus gewonnene Styrol ist der Grundbaustein des Polystyrols, das als neuer Schaumstoff eingesetzt wird. Foto: KIT/Markus Breig

Chemie ergänzt Physik

Als Ergänzung zum mechanischen Recycling wird daher chemisches Recycling benötigt: Dabei werden besonders aus Mischkunststoffabfällen Grundstoffe gewonnen, aus denen Kunststoffe in Neuenwarequalität hergestellt werden können. Zudem werden dabei die Kreisläufe von Schad- und Störstoffen entfrachtet. Bei chemischen Recyclingverfahren werden drei Varianten unterschieden:

1. Die lösemittelbasierte Solvolyse ist bei möglichst sortenreinen depolymerisierbaren Kunststoffen wie PET und Polyurethan anwendbar.
2. Die Pyrolyse ist ein universell anwendbares thermochemisches Verfahren, das Polymere – und dabei auch Verbundwerkstoffe oder Mischkunststoffe – bei höheren Temperaturen spaltet.
3. Die für alle Kunststoffabfallarten geeignete Gasifizierung, also die Herstellung von Synthesegas durch teilweise Oxidation bei sehr hohen Temperaturen.

Bei jeder dieser drei Varianten gibt es unterschiedliche Technologien. Allen ist gemein, dass Polymere in kleine Moleküle zerlegt und dabei Störstoffe und Nebenprodukte abgetrennt werden, sodass wieder Rohstoffe für die Chemieindustrie entstehen, die fossile Rohstoffe ersetzen.

Aktuell im Fokus: Pyrolyse

Pyrolyseverfahren zielen besonders darauf ab, flüssige Einsatzstoffe für

Verpackungen, gelingt das Herstellen hochwertiger Rezyklate direkt.

Daher basiert das Kunststoffrecycling in Deutschland derzeit auf vier wesentlichen Quellen mit ähnlichen Anteilen: aus getrennt gesammelten Getränkeflaschen aus Polyethylenterephthalat (PET), Produktionsrückständen, die direkt recycelt werden, gesammelten Industrie- und Gewerbeverpackungen sowie den von den Haushalten gesammelten Verpackungen.

Ein Großteil der Kunststoffprodukte sind jedoch Verbundmaterialien oder hoch funktionalisierte Kunststoffprodukte und fallen nach langer Lebensdauer als vermischte Abfälle an, manche davon gar nicht schmelzbar, sodass sie nicht einfach mechanisch recycelt werden können. Zudem kommt es mit wachsenden mechanischen Rezyklatanteilen aufgrund der Verunreinigungen und Polymerdegradation schrittweise zum Downcycling.

Steamcracker bereitzustellen, also für Anlagen, in denen Chemieunternehmen Kohlenwasserstoffmischungen wie das Leichtbenzin Naphtha in Gegenwart von Wasserdampf in kurzkettige Kohlenwasserstoffe umwandeln. Diese sind vor allem Monomere für die Kunststoffproduktion.

Das Hauptprodukt der thermischen Kunststoffpyrolyse ist Pyrolyseöl. Ausbeute und chemische Zusammensetzung hängen von der Kunststoffmischung und vom jeweiligen Verfahren ab. Möglichst viel davon in Steamcrackerqualität zu erzeugen, ist die Herausforderung der Verfahrensentwicklung.

Aktuell verarbeiten in Deutschland drei Pyrolyseanlagen mit unterschiedlichen Verfahren kontinuierlich und im industriellen Maßstab mechanisch nicht rezyklierbare Kunststoffe zu Rohstoffen für die Chemieindustrie:

1. Altreifen bei Pyrum in Dillingen, Saarland. Hier wird das schwarze Pigment Carbon Black zurückgewonnen sowie das Pyrolyseöl.
2. Polyolefinreiche Mischkunststoffabfälle bei Arcus Greencycling Technologies im Chemiepark Hoechst bei Frankfurt am Main. Das Verkaufsprodukt ist Pyrolyseöl.
3. Auch bei Carboliq in Enningerloh im Münsterland werden polyolefinreiche Mischkunststoffe verölt.

Und es geht weiter: Das niederländische Chemieunternehmen LyondellBasell aus Rotterdam errichtet im Chemiepark Weseling im Süden von Köln die aktuell größte chemische Recyclinganlage in Deutschland. Mischkunststoffabfälle reich an Polyolefinen sollen dort erstmals mittels katalytischer Pyrolyse effizient in die Steamcracker im Chemiepark integriert werden.

Der Einsatz geeigneter Katalysatoren soll für eine höhere Monomerausbeute schon bei der Pyrolyse sorgen. Das Unternehmen will dort jährlich rund 50 000 t Pyrolyseprodukte für die Steamcracker erzeugen.

Eine weitere großskalige Investition in ein anderes Pyrolyseverfahren hat Pruvia im Industriepark Gendorf in Oberbayern angekündigt (VDI energie + umwelt 2 (2025), Nr. 5/6, S. 13-15).

Solvolyse wurde in Deutschland bisher nur in kleinerem Maßstab verwirklicht. Ein Beispiel: Das Unternehmen Rampf aus Grafenberg, Baden-Württemberg, arbeitet an seinem Standort in Pirmasens,

Rheinland-Pfalz, Produktionsrückstände aus der Polyurethanherstellung. Das Unternehmen setzte die zurückgewonnenen Polyole wieder für die Herstellung neuer Polyurethane ein.

Pyrolyseöle

Auch Kunststoffpyrolyseöle niedrigerer Qualität, beispielsweise bei geringerem Polyolefinanteil im Abfall, können zurück in den Kreislauf geführt werden. Am niederschwelligsten ist der Einsatz von Kunststoffpyrolyseölen in den industriellen Synthesegasanlagen als Substitut für einen Teil der mehr als 1 Mio. t fossilen Schweröls, die dort in Deutschland jährlich eingesetzt werden.

Innovationen mit Schwung

Nach einem langen Stillstand bei den Innovationen zum chemischen Recycling mit dem Ende der letzten Ölkrise kommt es seit etwa zehn Jahren, getrieben durch die Suche nach nachhaltiger Wirtschaftsweise, weltweit zu Investitionen in chemische Recyclinganlagen zunehmender Größe bis in den kommerziellen Maßstab. Deutschland ist bei Forschung und Entwicklung von Recyclingtechnologien im internationalen Vergleich besonders aktiv.

Die Notwendigkeit und Vorteilhaftigkeit von chemischem Recycling zur Errei-

chung der Klima- und Umweltziele wird in zahlreichen wissenschaftlichen Studien aufgezeigt.

Trotz der Bedeutung der kunststoffverarbeitenden und chemischen Industrie für die deutsche Wirtschaftsleistung waren Investitionen in chemisches Recycling im Vergleich zu anderen Ländern wie in den Niederlanden und Spanien bisher jedoch geringer. Größtes Hemmnis waren die unklaren wirtschaftlichen und regulatorischen Randbedingungen. Einerseits wird Kapital über einen längeren Zeitraum benötigt, um die komplexe Verfahrensentwicklung in größere Maßstäbe voranzutreiben, in denen ein späterer wirtschaftlicher Betrieb möglich wird. Andererseits werden die gesetzlichen Regelungen und Genehmigungsprozesse besonders in Deutschland als hinderlich für Technologieinnovationen gesehen.

Es gibt vier wichtige Voraussetzungen für das Etablieren des chemischen Recyclings als Teil der Kreislaufwirtschaft:

1. Das Anerkennen der Massenbilanzierung, um in industriellen Wertschöpfungsketten das rezyklierte Produkt dem verwerteten Kunststoffabfall richtig zuzuordnen zu können.
2. Das Anrechnen des chemischen Recyclings auf alle Rezyklatquoten.
3. Das Ende der Abfalleigenschaft für stofflich genutzte Produkte des chemischen Recyclings.
4. Weitere Technologieentwicklungen bis zur großskaligen Demonstration des chemischen Recyclings für Mischkunststoffabfälle mit hoher Produktausbeute und Effizienz.

Hierzu hat sich der Nationale Begleitkreis Chemisches Recycling (NBKCR) im November 2022 gebildet. In ihm betreiben Stakeholder aus Wirtschaft, Verwaltung, Wissenschaft und Gesellschaft Informationsaustausch und Dialog mit dem Ziel der Konsensbildung. Auch die neue Bundesregierung will das chemische Recycling in die Abfallhierarchie einordnen und hat das als Ziel in ihren Koalitionsvertrag aufgenommen.

Prof. Dr.-Ing.

Dieter Stapf

Leiter des Instituts für Technische Chemie (ITC) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

dieter.stapf@kit.edu