

# Zirkuläre Wertschöpfung

Werkstoffliches und chemisches  
Recycling von Kunststoffabfällen



Januar 2021

# Was ist zirkuläre Wertschöpfung?

Die zirkuläre Wertschöpfung berücksichtigt die gesamte Wertschöpfungskette, in der Materialien und Produkte so lang wie möglich genutzt, geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden. Auf diese Weise wird der Lebenszyklus der Produkte verlängert. In der Praxis bedeutet dies, dass die zirkuläre Wertschöpfung

- Abfälle durch eine entsprechende Gestaltung von Materialien, Produkten, Systemen und Geschäftsmodellen bestmöglich verwertet oder vermieden,
- Stoffstrommanagement und Energiesysteme auf nachhaltige Weise integriert,
- Klima- und Umweltbelastungen ganzheitlich minimiert.

## Fokus: Chemisches Recycling

Die Europäische Kommission hat im Januar 2018 die erste Kunststoffstrategie veröffentlicht. In Deutschland werden seit Jahren gleichbleibend knapp 50 % der Kunststoffabfälle recycelt, darunter ein großer Anteil der im Vergleich zum Post-Consumer-Bereich relativ sortenreinen Produktionsabfälle. Deutschland befindet sich hierbei unter den europaweit mit Abstand führenden Nationen.

### Werkstoffliches Recycling von Kunststoffen

Die Verwertungsrate der Kunststoffabfälle liegt in Deutschland derzeit bei 99 %, wobei 47 % der Abfälle (bezogen auf den Input der Sortieranlagen) werkstofflich verwertet werden [Lindner, Schmitt 2018]; der Großteil wird energetisch genutzt. Die werkstoffliche Verwertung der Kunststoffabfälle steht vor einer Vielzahl von Herausforderungen, für die Lösungen erarbeitet werden müssen:

- **Abfallqualität** – Stark vermischte oder stark verunreinigte Abfallfraktionen oder auch Abfälle aus Verbundmaterialien lassen sich häufig nur schwer oder gar nicht durch Aufbereitung und Sortierung werkstofflich recyceln.
- **Logistik** – Probleme durch unterschiedliche Sammlungswege, hohe Sortierkosten und Qualitätseinbußen bei den Sekundärmaterialien.
- **Zielkonflikt innovativer Werkstoffe** – Technische Kunststoffe und Verbundprodukte, die u. a. Energieeffizienz, Leichtbau, Wärmedämmung sowie E-Mobilität und damit Klimaschutz und Energiewende voranbringen sollen, sind aufgrund der gewünschten und notwendigen Materialeigenschaften häufig so beschaffen, dass sie sich nicht vollständig werkstofflich recyceln lassen.
- **Komplexer Aufbau** – Multikomponenten-Kunststoffe haben aus technischen Gründen einen komplexen Aufbau, z. B. zur Erhöhung der Produktlebensdauer bei Lebensmitteln oder zur Verbesserung der Hygiene, und sind nach ihrem Gebrauch

oft verunreinigt, sodass sie sich dem werkstofflichen Recycling entziehen.

- **Additive** – Um die gewünschten Werkstoff- und Materialeigenschaften, z. B. Biogbarkeit, Dehnbarkeit, Haptik, Farbe oder Brandschutz, zu erfüllen, werden Kunststoffen bei der Herstellung und Verarbeitung Zusatzstoffe beigefügt. Diese Additive können ein hochwertiges werkstoffliches Recycling erschweren.
- **Recyclat-Einsatz** – Bei der Halbzeugherstellung aus Polymerrecyclat verkürzen sich die Molekülketten, sodass sich die Werkstoffeigenschaften gegenüber dem Neumaterial ändern.

### Abfall wird zu Rohstoff

Eine Alternative bieten das chemische Recycling und seine verschiedenen Varianten. Sie ergänzen das werkstoffliche Recycling, ohne es zu verdrängen. Das chemische Recycling der Abfallströme kann eine höherwertige Verwertung gemäß der Abfallhierarchie ermöglichen und dazu beitragen, den Anteil an energetisch verwerteten Kunststoffabfällen zu reduzieren.

Im Gegensatz zum werkstofflichen Recycling wandelt das chemische Recycling die Altkunststoffe in neue chemische Zwischenprodukte um:

- In thermochemischen Verfahren, z. B. Pyrolyse und Vergasung, werden Polymer(gemische) zu chemischem Rohstoff umgewandelt.
- Solvolytische Verfahren setzen bei niedriger Temperatur die Polymere zu Monomeren um.

Die unterschiedlichen Verfahren können auch kombiniert werden; die Begriffe werden in Bild 1 definiert.

Bei der Depolymerisation durch **solvolytische** chemische Trennverfahren werden die Monomere aus geeigneten Polymeren zurückgewonnen und können wieder zu Neuware hoher Qualität verarbeitet werden. Diese Verfahren werden bisher in speziellen Fällen

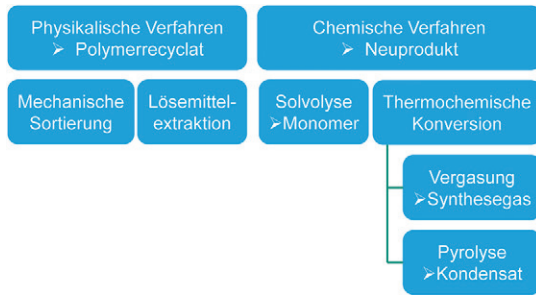


Bild 1. Übersicht der physikalischen und chemischen Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle und deren Hauptprodukte (Quelle: KIT)

eingesetzt – vorwiegend bei quasi in Reinform vorliegenden Produktionsabfällen der Kunststoffproduzenten oder -verarbeiter. Technologische Herausforderungen sind Verunreinigungen des Einsatzstoffs und der hohe prozessspezifische Trenaufwand.

**Pyrolyse und Vergasung** sind Stofftrennprozesse für organische und mineralische Anteile von gemischten Kunststoffabfällen. Bei der **Vergasung** werden durch Teilverbrennung des Abfallgemischs – meist durch Sauerstoffzugabe – hohe Temperaturen erzeugt, bei denen ein möglichst vollständiger Zerfall zu den stabilen Komponenten des thermodynamischen Gleichgewichts erfolgt. Als Zielprodukt entsteht im Gegensatz zur vollständigen Verbrennung der wichtige Chemierohstoff Synthesegas mit den Hauptkomponenten Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff.

Bei der **Pyrolyse** (Bild 2) werden kunststoffhaltige Abfälle zu Kohlenwasserstoffgemischen verflüssigt. Hierzu zählen auch katalytische oder hydrierende Pyrolyse (Verölung). Neben dem Pyrolyseöl entstehen in Abhängigkeit vom Abfalleinsatzstoff und den Reaktionsbedingungen immer auch Pyrolysegase sowie ein koks- und mineralhaltiger Feststoff. Pyrolyseöl und gegebenenfalls Pyrolysegas sind die Zielprodukte; das

Erreichen der geforderten Produkteigenschaften stellt eine technologische Herausforderung dar.

Die Zwischenprodukte des chemischen Recyclings können entweder direkt zu Kunststoffen verarbeitet werden (Polymerisation der entstandenen Monomere) oder ersetzen fossile Primär-Rohstoffe in der Monomersynthese oder anderen Wertschöpfungsketten. Dies führt zu Produkten mit Neuwarenqualität und trägt zudem zur Schadstoffentfrachtung in der zirkulären Wirtschaft bei.

Vorteile des Recyclings gegenüber fossilen Primär-Ressourcen ergeben sich bei gleichem Zielprodukt immer dann, wenn die Effizienz höher ist oder der Verbrauch bzw. die Emissionen geringer sind, z. B. hinsichtlich des Ressourcen- und Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen. Von großer Bedeutung für den Erfolg sind zuverlässige Technologien und wirtschaftliche Wertschöpfungsketten vom Abfall bis zum Neuprodukt. Das chemische Recycling bietet somit eine zusätzliche Möglichkeit, die gesetzlichen Recyclingvorgaben des deutschen und des europäischen Abfallrechts zu erreichen und dadurch die Kreislaufwirtschaft weiter voranzubringen.

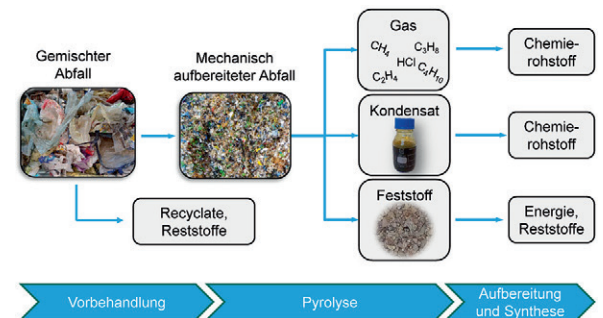


Bild 2. Wertschöpfungskette des kombinierten mechanisch-chemischen Recyclings am Beispiel der Pyrolyse (Quelle: KIT)

## Umsetzung in die Praxis

Nach der ersten und zweiten Ölkrise wurde chemisches Recycling basierend auf umfassendem Technologie- und operativem Wissen – insbesondere in Deutschland – großtechnisch erprobt. Damals wurde die stoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen verfolgt, um fossile Rohstoffe zu sparen. Wirtschaftlich hat sich das chemische Recycling damals nicht durchgesetzt, eine weitere Optimierung ist nicht erfolgt. Grund waren die zulässigen alternativen Entsorgungswege wie Verbrennung oder Abfallexport, die kostengünstiger waren. Klimarelevanz stand nicht im Fokus.

Das chemische Recycling gewinnt aktuell wieder zunehmend an Bedeutung. Chemieunternehmen, Unternehmen der Abfallwirtschaft, Technologieentwickler und Wissenschaft haben gemeinsam eine Reihe von

Projekten gestartet, um zunächst insbesondere polyolefinhaltige Abfälle wieder zu Rohstoffen der Polymerproduktion umzuwandeln und damit den Einsatz fossiler Rohstoffe zu reduzieren.

Im Fokus stehen heute möglichst sortenreine Abfälle, die mit lösemittelbasierten Verfahren chemisch zerlegt werden können, sowie die Pyrolyse von gemischten Abfällen, oft im kleineren, dezentralen Maßstab. Die Übertragung auf komplexere gemischte Abfälle, technische Kunststoffprodukte und größere Anlagen steht noch aus. Die technologische Reife der chemischen Recyclingverfahren und die Skalierbarkeit der Anlagen sind noch unzureichend. Eine Vielzahl verfahrens- und ingenieurtechnischer Fragestellungen

sind zu bearbeiten, um Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit im relevanten Maßstab sicherzustellen. Hierbei entstehen neue Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle.

Darüber hinaus müssen neue Wege der Kreislaufwirtschaft faktenbasiert vorausgedacht und bewertet werden, um politischen und wirtschaftlichen Entscheidern sowie der Gesellschaft die notwendige Transparenz

## Zahlen, Daten, Fakten

Die Europäische Union fordert in ihrer ersten Kunststoffstrategie von ihren Mitgliedsstaaten beispielsweise eine Recyclingquote von Kunststoffabfällen von 55 % bis zum Jahr 2030 [COM 2018]. Hierfür müssen innerhalb der EU zusätzliche Recyclingkapazitäten für ca. 10 Mio. t/a geschaffen und die entsprechenden Sammelsysteme implementiert werden.

Das deutsche Verpackungsgesetz verlangt zusätzlich die werkstoffliche Verwertung von 63 % der Kunststoffverpackungen bis zum Jahr 2022. Dies wird aktuell weit unterschritten.

Kunststoffproduktion und Abfallaufkommen (Bild 3) wachsen stetig, die Recyclingquote in Deutschland ist konstant. Das heutige Kunststoffabfallaufkommen wird stark von kurzlebigen Gütern, besonders den Verpackungen mit einem hohen Anteil an Polyolefinen dominiert. Es wird in Zukunft überproportional wachsen, da Kunststoffe, die in langlebigeren Gütern

für nachhaltige Entscheidungen an die Hand zu geben und die Rahmenbedingungen zielführend anzupassen.

Das chemische Recycling kann sich so zu einem weiteren Baustein für eine funktionierende nachhaltige Kreislaufwirtschaft entwickeln, indem es dem etablierten werkstofflichen Recycling komplementär an die Seite gestellt wird.

eingebraucht werden, das Abfallaufkommen zusätzlich erhöhen. Hier dominieren technische Kunststoffe und finden oftmals Verbundprodukte Anwendung. Auch für diese künftigen Abfälle aus dem Mobilitäts- oder Baubereich müssen Recyclingkonzepte und -kapazitäten entwickelt werden. Ökodesignansätze oder die Verwendung leichter rückgewinnbarer Kunststoffarten wirken sich hierauf zunächst nicht aus, sondern beeinflussen besonders den Verpackungsbereich.

[ Mt/a ]	EU 28+2*	Deutschland**
Kunststoffproduktion	61,8	19,9
Kunststoffverbrauch	51,2	12,6
Kunststoffabfälle (Post consumer)	29,1	5,2
- Deponie	7,2	< 0,1
- Energetische Verwertung	12,4	3,2
- Recycling	9,4 (in EU: 7,6)	2,9 (in D: 2,3)

Bild 3. Kunststoffproduktion und Abfallaufkommen

\* [Lindner et al 2019]

\*\* [Lindner, Schmitt 2018]

## Was tut der VDI?

Der VDI betrachtet das Thema „Zirkuläre Wertschöpfung“ mit Stakeholdern aus unterschiedlichen Branchen und aus unterschiedlichen Perspektiven, um daraus Informationen für VDI-Mitglieder, Experten und Interessierte aus Gesellschaft, Medien, Industrie, Politik zur Verfügung zu stellen. Mit VDI-Richtlinien stellt der VDI konkrete technische Handlungsempfehlungen für den Experten in der Praxis bereit. Ein breiter Wissenstransfer erfolgt über Fachtagungen und Kongresse sowie über regionale Veranstaltungen der Bezirksvereine und Landesverbände des VDI.

Zentrale Informationen stehen unter [www.vdi.de/zirkulaere-wertschoepfung](http://www.vdi.de/zirkulaere-wertschoepfung) bereit.

## Literatur

COM 2018: A European Strategy for Plastics in a Circular Economy, Brussels 16.1.2018, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1516265440535&uri=COM:2018:28:FIN>

Lindner, C. et al.: Circular Economy of Plastics 2018 EU-28+2, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff (2019)

Lindner, C.; Schmitt, J.: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017, Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff (2018)

## Kontakt

VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Schäfer VDI

VDI-Koordinator Zirkuläre Wertschöpfung

Tel. +49 211 6214-254

[schaefer@vdi.de](mailto:schaefer@vdi.de)

[www.vdi.de/zirkulaere-wertschoepfung](http://www.vdi.de/zirkulaere-wertschoepfung)

