

Was tut sich beim chemischen Recycling?

Überblick über die verschiedenen Verfahren und Anbieter

Das chemische Recycling galt lange als unfertige Ergänzung zu etablierten werkstofflichen Verfahren. Mittlerweile befinden sich allerdings einige Technologien auf dem Sprung in den großindustriellen Einsatz: ein Überblick über die verschiedenen Verfahren und Anbieter.



© Adobe Stock, SIVAK_Photo

In der Europäischen Union (EU) entstehen pro Jahr etwa 30 Mio. t Kunststoffabfälle, von denen ungefähr 29 Mio. t wieder gesammelt werden. Insgesamt werden 32 % der gesammelten Post-Consumer-Kunststoffe wiederverwertet. Der deutlich größere Anteil landet hingegen in Müllverbrennungsanlagen oder auf Deponien. Die EU hat mit dem „Green Deal“ eine ehrgeizige Industriestrategie vorgelegt – bis 2050 soll die EU klimaneutral sein –, die u. a. die Errichtung einer sauberen Kreislaufwirtschaft vorsieht. Beispielsweise sollen alle Verpackungen auf dem EU-Markt wiederverwendbar oder recycelbar werden. Bereits für das Jahr 2030 ist eine Recyclingquote von 70 % für alle Verpackungsmaterialien vorgesehen. Um diese neuen Ziele zu erreichen, sind tiefgreifende Maßnahmen und erhebliche

Investitionen erforderlich. Neben dem konventionellen werkstofflichen Recycling rückt auch ein breites Spektrum chemischer Recyclingtechnologien in den Fokus (**Bild 1**).

Da die Sammel- und Recyclingsysteme noch nicht kosteneffizient sind und die Qualität der Rezyklate oft noch nicht ausreicht, um neue Kunststoffe im großen Maßstab zu ersetzen, hat das derzeitige werkstoffliche Recycling klare Grenzen. Chemische Recyclingtechnologien stellen alternative Wege für den Umgang mit Abfällen von Endverbrauchern dar. Sie sind in der Lage, Abfallströme zu verarbeiten, die sich werkstofflich nicht recyceln lassen (**Bild 2**) und bieten somit die Möglichkeit, Kunststoffabfälle wiederzuverwerten, die bisher nur zur Energierückgewinnung genutzt oder deponiert

werden konnten. Das betrifft z. B. gemischte Abfallströme und stark kontaminierte oder mehrschichtige Materialien. Da sich die Technologien noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, stehen die Anbieter vor der Herausforderung, ihr Potenzial unter Beweis zu stellen.

Das Warten auf ein Startsignal

Viele Unternehmen haben bereits Technologien für chemisches Recycling in kleinem Maßstab entwickelt und zum Teil schon umgesetzt. Die geänderten politischen Rahmenbedingungen und Selbstverpflichtungen der großen Polymer- und Produkthersteller fördern eine schnellere Entwicklung. Mehrere Unternehmen haben vor Kurzem den Bau von großtechnischen Anlagen angekündigt, von denen

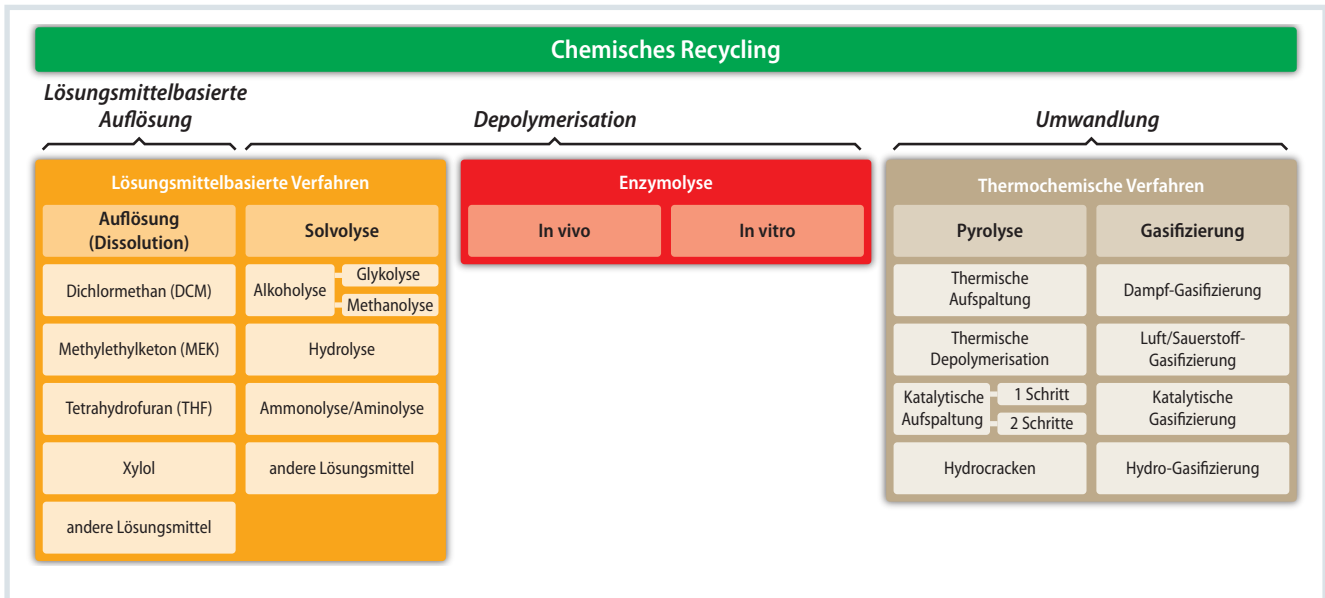


Bild 1. Überblick über die verschiedenen Methoden zum chemischen Recycling von Kunststoffabfällen: Für alle Ansätze stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung Quelle: nova-Institut; Grafik: © Hanser

einige bereits 2021 in Betrieb genommen werden sollen. Eine Reihe dieser Projekte basiert auf Kooperationen und Joint Ventures, z.B. zwischen Kunststoffherstellern und Abfallentsorgern, aus denen sich Technologie- und Lieferkettensynergien ergeben sollen. Zwar zeichnet sich der gesamte Sektor durch eine große Innovationsdynamik und erhebliches Investitionsinteresse aus, jedoch herrscht große Unsicherheit wegen der fehlenden gesetzlichen Regelungen. In Europa wartet der Chemierecyclingsektor auf klare politische Rahmenbedingungen als Startsignal. Nächste entscheidende Schritte in diese Richtung sind seitens der Politik zu erwarten, was die Dynamik im Recyclingsektor deutlich erhöhen wird. Demnach soll auf europäischer Ebene mehr Klarheit über die Anrechnung von Recyclingquoten für die unterschiedlichen Verfahren

geschaffen werden. Eine entsprechende Bewertung soll nach bisherigen Informationen aus Brüssel auf Grundlage von Ökobilanzen getroffen werden. Die Treibhausgasreduktion muss dann gegenüber fossilen Polymeren einen bisher noch nicht festgelegten Mindestwert erreichen.

Die verfügbaren Technologien

An welchen Chemischen Recyclingverfahren gegenwärtig gearbeitet wird und wie weit diese bereits sind, hat das nova-Institut in einem Marktbericht untersucht. Dieser schlüsselt ebenfalls auf, welche Unternehmen an den verschiedenen Technologien arbeiten [1]. Den bisher entwickelten chemischen Recyclingverfahren liegen drei grundlegend verschiedene Mechanismen zugrunde: die

lösungsmittelbasierte Auflösung, die Depolymerisation und die Umwandlung.

Auflösung: Selektive Trennung von Thermoplasten

Durch die **Auflösung (Dissolution)** können Kontaminationen aus Kunststoffen entfernt werden, ohne die Molekularstruktur des Polymers zu verändern. Abhängig von der zugrunde liegenden Definition bzw. dem Klassifikationssystem »

Im Profil

Das **nova-Institut** ist ein privates und unabhängiges Forschungsinstitut, das 1994 gegründet wurde. Es bietet Forschung und Beratung mit Schwerpunkt auf dem Transformationsprozess der chemischen und stofflichen Industrie hin zu erneuerbarem Kohlenstoff durch Substitution von fossilem Kohlenstoff durch Biomasse, direkte CO₂-Nutzung und Recycling. Die über 40 Mitarbeiter des Instituts beschäftigen sich mit den Themen erneuerbare Rohstoffe, Technologien und Märkte, Wirtschaft und Politik, Nachhaltigkeit, Kommunikation und Strategieentwicklung. Ein besonderer Schwerpunkt sind Ökobilanzen für erneuerbare Chemikalien und Kunststoffe und für das chemische Recycling.

» www.nova-institute.eu

Technologie		Input (Rohstoff)
Lösungsmittelbasiert	Auflösung	PE, PP, PS, PVC, PLA
	Solvolyse	PA, PC, PET, POM, PUR, CA, PBAT, PBS, PHA, PLA
Thermochemisch	Pyrolyse	Breites Spektrum an Polymeren wie PE, PP, PET, PUR, PS, PMMA, PHA, PLA , Elastomere und Bioabfall
	Gasifizierung	Potenziell alle Arten von Kunststoffabfällen, Elastomere, Bioabfall
Biochemisch	Enzymolyse	PET, PUR, (PA, PE, PS), CA, PHA, PLA

Tabelle 1. Zusammenfassung der verfügbaren Recyclingtechnologien und deren Inputs: Biobasierte Polymere sind fett hervorgehoben, bio-basierte Drop-in-Polymere sind nicht speziell gekennzeichnet. Sie können auf die gleiche Weise behandelt werden wie ihre fossilen Pendanten. Polymere in Klammern weisen auf bestimmte Einschränkungen für den Prozess hin Quelle: nova-Institut

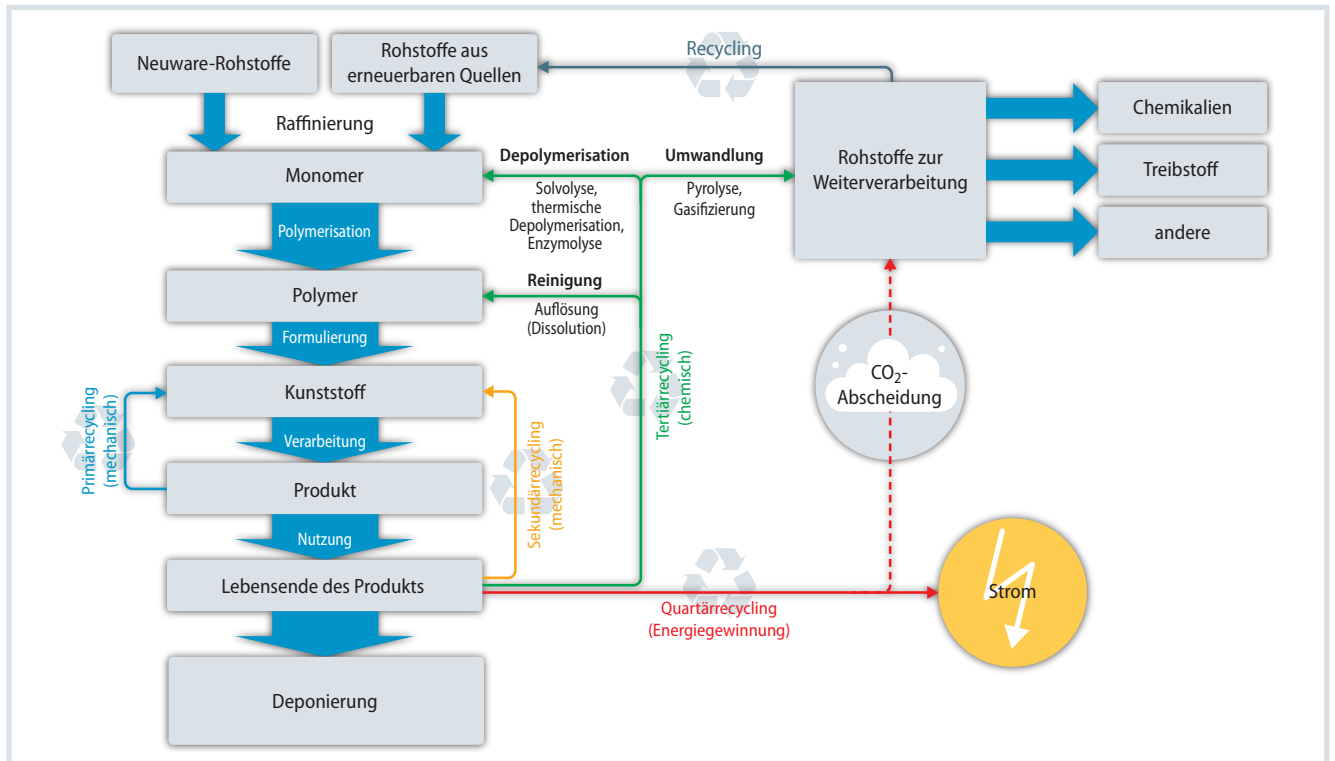


Bild 2. Für die Aufbereitung von Kunststoffen existieren verschiedene Recyclingverfahren. Die Erzeugnisse der Verfahren können auf verschiedenen Ebenen der Kunststoffproduktion als Rohstoffe verwendet werden Quelle: nova-Institut; Grafik: © Hanser

ist es deshalb umstritten, ob es sich dabei um ein chemisches, physikalisches oder mechanisches Recyclingverfahren handelt. Die Methode basiert auf dem selektiven Auflösen und der Trennung eines Zielpolymers von Kunststoffen in einem geeigneten Lösungsmittel. Anschließend werden nicht gelöste Bestandteile, z.B. Additive oder farbgebende Substanzen, entfernt und das Zielpolymer aus dem Lösungsmittel ausgefällt. Der Mechanismus der Auflösung ist auf Thermoplaste beschränkt und lässt sich sowohl auf fossile als auch auf biobasierte Polymere anwenden (**Tabelle 1**). Das nova-Institut hat weltweit sechs Unternehmen identifiziert (**Tabelle 2**), die Technologien mit Kapazitäten von bis zu 8000 t/a anbieten [1]. Höhere Kapazitäten sind in naher Zukunft zu erwarten. Das Unternehmen PureCycle Technologies plant beispielsweise noch in diesem Jahr eine kommerzielle Anlage in Ohio in den USA mit einer Kapazität von 48000 t/a in Betrieb zu nehmen. Die eingesetzte Technologie kann Polypropylen-Abfälle (PP) verarbeiten und umfasst Dekontaminierungs- und Desodorierungsverfahren. Sie werden von der Procter & Gamble Company entwickelt und durch die Partnerschaft mit PureCycle weiterentwickelt.

Depolymerisation: Aufspaltung und Resynthese

Im Gegensatz zur Auflösung wird bei der **Depolymerisation** das Polymer in seine Bausteine, also in Monomere, Dimere oder Oligomere, aufgespalten. Nach der Aufspaltung müssen die Bausteine oft von Kunststoffkomponenten wie Additive, farbgebende Substanzen oder andere Nicht-Zielpolymere getrennt werden, bevor neue Polymere durch Polymerisation synthetisiert werden können. Im Allgemeinen kann die Depolymerisation sowohl durch Wärmeenergie, als thermische Depolymerisation bezeichnet, als auch durch Kombination von Wärmeenergie und Chemikalien, die Solvolyse, oder Enzymen, die Enzymolyse, eingeleitet werden.

Mit der **Solvolyse** lassen sich eine ganze Reihe an fossil- und biobasierten Polymeren verarbeiten (**Tabelle 1**). Für dieses Verfahren identifizierte das nova-Institut weltweit 14 Unternehmen (**Tabelle 2**), die entsprechende Technologien mit Kapazitäten von bis zu 10800 t/a anbieten [1]. Hervorzuheben ist ein europäisches Konsortium mit dem Projektnamen PURSmart, welches sich aus internationalen Partnern zusammensetzt. Darunter befinden sich Ayming, Covestro, Ecoinnovazio-

ne, die Universität Gent, die KU Leuven, Recticel, Redwave, die Universität von Castilla-La Mancha (UCLM) und WeylChem InnoTec. Im Projekt werden Wege für den Übergang vom linearen Lebenszyklus von Polyurethan-Produkten (PUR) zu einem zirkulären Wirtschaftsmodell gesucht, welches sich über die gesamte Wertschöpfungskette der PUR-Wiederaufbereitung erstreckt. Für den Teil der Chemolyse-Technologie sind Covestro, die KU Leuven und die UCLM involviert. Das Verfahren erreichte bisher eine Ausbeute von 98 % Polyether-Polyol mit einer Reinheit von 97 %.

Im Vergleich zu allen anderen Verfahren befindet sich die **Enzymolyse** in einem sehr frühen Entwicklungsstadium, was sich auch daran zeigt, dass bisher nur ein Unternehmen eine entsprechende Technologie anbietet (**Tabelle 2**). Theoretisch kann in dem Verfahren eine Reihe von fossil- und biobasierten Polymeren verarbeitet werden. Für einige Polymere wie z.B. Polyamid (PA), Polyethylen (PE) und Polystyrol (PS) sind jedoch gewisse Limitationen bezüglich der Durchführbarkeit zu erwarten (**Tabelle 1**). Das französische Unternehmen Carbios plant zurzeit den Bau einer Demonstrationsanlage mit einer Kapazität von 50000 bis 100000 t/a. Vorteile der Enzymolyse sind relativ milde

Land	Technologie					Gesamt
	Auflösung	Solvolyse	Pyrolyse	Gasifizierung	Enzymolyse	
Australien	-	-	3	-	-	3
Belgien	-	1	-	-	-	1
Deutschland	2	-	3	-	-	5
Europa (Konsortium)	-	1	1	-	-	2
Finnland	-	-	3	-	-	3
Frankreich	-	1	-	-	1	2
Indien	-	-	2	-	-	2
Italien	-	2	1	-	-	3
Japan	-	-	1	-	-	1
Kanada	1	1	3	2	-	7
Luxemburg	-	-	1	-	-	1
Niederlande	1	2	4	-	-	7
Norwegen	-	-	1	-	-	1
Österreich	-	-	1	-	-	1
Polen	-	-	1	-	-	1
Schweden	-	-	1	-	-	1
Schweiz	-	2	-	-	-	2
Spanien	-	-	1	1	-	2
Thailand	-	-	1	-	-	1
Tschechien	-	-	1	-	-	1
Ungarn	-	-	1	-	-	1
USA	1	4	11	4	-	20
Vereinigtes Königreich	1	-	3	1	-	5
Gesamt	6	14	44	8	1	73

Tabelle 2. Anzahl der Anbieter chemischer Recyclingtechnologien, aufgeschlüsselt nach Ländern: Besonders in Nordamerika und Europa arbeiten viele Unternehmen daran Quelle: nova-Institut

Reaktionsbedingungen (z.B. Atmosphärendruck, Raumtemperatur) und das Potenzial der Feinabstimmung durch Enzym- und Metabolic-Engineering.

Umwandlung: Ausgangsmaterialien für Kunststoffe und Chemikalien

Die **Umwandlung** von Kunststoffabfällen erfolgt durch thermochemische Verfahren wie Pyrolyse oder Vergasung. Bei diesen Methoden werden Polymere aufgespalten und in einfachere Moleküle umgewandelt. Die dabei entstehenden Moleküle unterscheiden sich chemisch von den Polymerbausteinen, die aus einer Depolymerisation entstehen. Bei den gewonnenen Substanzen handelt es sich häufig um Flüssigkeiten oder Gase, die als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Kunststoffen, Chemikalien und Brennstoffen verwendet werden können [2], wobei jedoch weitere vorgelagerte Verarbeitungs-

schritte (Raffinierung) erforderlich sein können.

Die **Pyrolyse** lässt sich auf eine ganze Reihe an fossil- und biobasierten Polymeren anwenden (Tabelle 1). Im Vergleich zu den lösungsmittelbasierten Verfahren ist eine erhöhte Heterogenität des Abfalls inklusive Kontaminationen durch Bioabfälle weniger problematisch. Das nova-Institut hat weltweit 44 Unternehmen identifiziert (Tabelle 2), die entsprechende Technologien mit Kapazitäten von bis zu 38000 t/a anbieten [1]. Das in dem Verfahren gewonnene Pyrolyseöl benötigt weitere Bearbeitungsschritte, um es für die Produktion von Polymeren verwenden zu können. Im Rahmen des ChemCycling-Projekts planen etwa BASF und das Pyrolyse-Start-up Quantafuel, kommerzielle Produkte aus chemisch recycelten Kunststoffen herzustellen.

Im Vergleich zur Pyrolyse kann die **Gasifizierung** ein noch breiteres Spektrum an Kunststoffabfällen verarbeiten, inklusive

erhöhter Kontaminationen durch Bioabfälle (Tabelle 1). Weltweit hat das nova-Institut acht Unternehmen ermittelt (Tabelle 2), die diese Technologien mit Kapazitäten von bis zu 100000 t/a anbieten [1]. Neben der Herstellung von Synthesegas stehen ebenfalls Technologien zur Verfügung, die die Gasifizierung an einen Gasfermentationsprozess koppeln, um aus dem produzierten Synthesegas Ethanol oder andere Chemikalien zu synthetisieren.

Weder mit werkstofflichem noch mit chemischem Recycling allein ist der Aufbau einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft möglich. Die Kombination der Methoden besitzt allerdings das Potenzial, die gesamte Kunststoffindustrie, einschließlich der Abfallwirtschaft, in Richtung einer vollständigen Kreislaufwirtschaft umzugestalten. Die verfügbaren Technologien bieten ein breites Spektrum an Möglichkeiten, um alle Abfallströme zu verarbeiten. Die in der EU-Kunststoffstrategie festgelegten Ziele sind ohne die Einführung weiterer Recyclingtechnologien nicht erreichbar. Daher kommt eine moderne, nachhaltige Kunststoffindustrie, die sich in eine Kreislaufwirtschaft einfügt, ohne chemisches Recycling nicht aus. ■

Die Autoren

Dr. Lars Krause ist seit 2020 für die Abteilung Technologie und Märkte des nova-Instituts tätig und zuständig für die Themen Chemisches Recycling und erneuerbarer Kohlenstoff; lars.krause@nova-institut.de
Michael Carus gründete 1994 mit anderen Wissenschaftlern das nova-Institut und ist seitdem Geschäftsführer. 2020 initiierte Carus die Renewable Carbon Initiative (RCI; renewable-carbon-initiative.com). Sie hat sich dem Ersatz von fossilen Kohlenstoffquellen durch erneuerbare verschrieben.

Service

Literatur & Digitalversion

➤ Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/onlinearchiv

English Version

➤ Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com