

## **POSITIONSPAPIER**

# **RECYCLINGTECHNOLOGIEN FÜR KUNSTSTOFFE**



## **POSITIONSPAPIER**

# **RECYCLINGTECHNOLOGIEN FÜR KUNSTSTOFFE**

In unseren Positionspapieren greifen wir Themen auf, die Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft aktuell beschäftigen. Als Forschende möchten wir Stellung beziehen und in emotionalen Debatten zur Versachlichung beitragen. Gleichzeitig möchten wir aufzeigen, ob und wie wir einen Beitrag zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen leisten können. Unsere Positionspapiere erarbeiten die Mitarbeitenden im Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastics Economy CCPE gemeinsam – hinter einem Positionspapier steht ein Meinungsbildungsprozess unter Einbeziehung mehrerer Institute. Das vorliegende Positionspapier Recyclingtechnologien für Kunststoffe wurde von den Fraunhofer Instituten UMSICHT, ICT und IVV erarbeitet.

### **Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastics Economy CCPE**

Der Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastics Economy CCPE (Fraunhofer CCPE) vereint die Kompetenzen von sechs Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft und kooperiert eng mit Partnern aus der Wirtschaft. Gemeinsam arbeiten wir an systemischen, technischen und sozialen Innovationen und haben dabei den gesamten Lebenszyklus von Kunststoffprodukten im Blick.

Unter Federführung des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT haben sich folgende Forschungseinrichtungen zusammengeschlossen: das Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, das Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV und das Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF.

### **Sprechen sie uns an**

#### **Zum Positionspapier Recyclingtechnologien für Kunststoffe**

Dr. Alexander Hofmann  
+49 9661 8155-435  
alexander.hofmann@umsicht.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT  
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg  
An der Maxhütte 1  
92237 Sulzbach-Rosenberg

#### **Zum Fraunhofer CCPE**

Dr. Hartmut Pflaum  
+49 208 8598-1171  
hartmut.pflaum@umsicht.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT  
Osterfelder Straße 3  
46047 Oberhausen

Bitte zitieren Sie das Positionspapier folgendermaßen:

Hofmann, A.; Franke, M.; Betsch, F.; Rieger, T.; Seiler, E.; Mäurer, A.: Recyclingtechnologien für Kunststoffe - Positionspapier, Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastics Economy CCPE (Hrsg.), Oberhausen / Sulzbach-Rosenberg, September 2021

© Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastics Economy CCPE

Stand des Dokuments: September 2021

## HINTERGRUND

Ohne Kunststoffe wären viele Errungenschaften unserer modernen Gesellschaft nicht vorstellbar. Sie machen unsere Lebensmittel länger haltbar (luftdicht), aufgrund ihres geringen Gewichts sparen sie als Transportverpackung von Gütern und als Fahrzeugkomponenten Kraftstoff und somit CO<sub>2</sub> ein, oder sie ermöglichen in der Anwendung als faserverstärkte Verbundmaterialien in Rotoren von Windanlagen die Erzeugung CO<sub>2</sub>-neutraler Energie.

Bei der Herstellung von Kunststoffen werden fossile Ressourcen und Energie verbraucht, 4 bis 6 % der heutigen Erdölförderung werden für Kunststoffe benötigt [PlasticsEurope-2017]. Dieser Anteil soll sich bis 2050 auf 20 % erhöhen [Roman-Ramirez-2019]. Entlang der Produktionskette entstehen beträchtliche CO<sub>2</sub>-Emissionen, und am Ende des Produktlebensweges stellen die Menge sowie die vielfältigen Arten und Zusammensetzungen von Kunststoffen eine Herausforderung für das Recycling dar. Bei unsachgemäßer Entsorgung schädigen sie zudem die Ökosysteme, z.B. als Mikroplastik im Ozean [UMSICHT-2018].

Im Jahr 2019 wurden in Deutschland ca. 12,1 Mio. t Kunststoffe verbraucht, 6,23 Mio. t fielen als Post-Consumer oder Post-Industrieller Abfall an. Von diesen 6,23 Mio. t wurden 2,93 Mio. t (46,6 %) als Input in Recyclinganlagen verwertet. Deren Ausschuss sowie die restlichen 3,31 Mio. t (52,8 %) wurden energetisch verwertet, also in Müllverbrennungsanlagen oder als Ersatzbrennstoff verwendet [Conversio Market-2019].

Im Vergleich zum werkstofflichen Anteil von 2,92 Mio. t wurden 2019 lediglich 0,01 Mio. t rohstofflich (z.B. durch chemisches Recycling) verwertet, was einem Anteil von 0,2 % entspricht. Dies stellt den geringsten Anteil an rohstofflicher Verwertung der letzten 15 Jahre dar. In den Jahren 2007 bis 2019 wurden jeweils zwischen 0,05 Mio. t und 0,07 Mio. t rohstofflich verwertet.

Bei der energetischen Verwertung, z.B. in Form der Verbrennung, wird der in den Kunststoffen gebundene Kohlenstoff in Form von Wärme und CO<sub>2</sub> freigesetzt. Der durchschnittliche Brennstoffnutzungsgrad, d.h. der Anteil des in nutzbaren Strom und Wärme wandelbaren Energiegehalts des Abfalls, liegt im derzeitigen Verwertungsweg der MVA und EBS-HKW im bundesweiten Durchschnitt lediglich bei ca. 45 % (MVA) bis 52 % (EBS-HKW) [Flamme et al.-2018].

Beim werkstofflichen und chemischen Recycling werden aus benutzten Kunststoffen neue Kunststoffe hergestellt. Der Kohlenstoff bleibt damit im Nutzungskreislauf. Damit das Recycling von Kunststoffen einen positiven Klimaschutzeffekt hat, darf der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Recyclings bilanziell nicht größer sein als der summierte CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aus der Primärgewinnung von Erdöl und der Verbrennung am Ende des Produktlebensweges.

## BETRACHTUNGSRAHMEN

Das vorliegende Positionspapier geht auf in der Entwicklung befindliche werk- und rohstoffliche (chemische) Aufbereitungstechnologien für Kunststoffe ein, insbesondere diejenigen Verfahren, die im Forschungsfokus des Fraunhofer Cluster of Excellence Circular Plastic Economy (Fraunhofer CCPE) liegen. Nicht eingegangen wird auf mechanische Recyclingtechnologien, die bereits dem Stand der Technik entsprechen.

Recyclingverfahren sind nur ein Lösungsbaustein für den Wandel von einer linearen zu einer zirkulären Kunststoffwirtschaft. Im Fraunhofer CCPE werden Ansätze entlang des gesamten Lebenszyklus des Kunststoffs untersucht, u.a. in den Bereichen Design für Recycling, Entwicklung von zirkulären (Bio-)Polymeren, Erforschung von Additiven für die Verbesserung von Rezyklaten, Kunststoffsubstitution und -vermeidung, Transport und Logistik bis hin zu zirkulären Geschäftsmodellen und Systembetrachtungen [Fraunhofer CCPE-2020].

## FRAGESTELLUNGEN UND POSITIONEN

### ÜBERBLICK: WIE LASSEN SICH KUNSTSTOFFE RECYCELN?

Für das Recycling von Kunststoffabfällen existieren eine Reihe von Verfahren und Prozessen. Sie lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

Beim **werkstofflichen Recycling** bleibt die chemische Struktur des Kunststoffes erhalten [Janz-2020]. Es handelt sich dabei um etablierte Verfahren, die als Stand der Technik gelten [Ragaert-2017]. Post-Consumer oder Post-Industrielle Kunststoffabfälle werden dabei in mechanischen oder physikalischen Sortier-, Wasch- und Mahlprozessen aufbereitet. Durch Umschmelzen (Extrusion und Schmelzefiltration) werden aus Altkunststoffen Rezyklate erzeugt. Die werkstofflichen Eigenschaften wie auch die Zusammensetzung des Kunststoffes bleiben dabei weitgehend erhalten. Durch die Zugabe (Compoundierung) von Additiven, zum Beispiel Stabilisatoren, Pigmente, Flammschutzmittel oder Fließverbesserer, lassen sich die Eigenschaften des Rezyklats anpassen. [Martens-2016]

- Werkstoffliche Verfahren nach dem Stand der Technik sind für sortenreine Kunststofffraktionen (Thermoplaste) die beste Wahl.
- Mit zunehmender Heterogenität, Verschmutzung oder Kontamination von Kunststoffabfällen kommt das werkstoffliche Recycling an seine Grenzen. Füll-, Stör- und Schadstoffe (z.B. Glas,  $\text{CaCO}_3$ , Pigmente, Flammschutzmittel) können in Sortier-, Wasch- und Extrusionsanlagen oft nicht (vollständig) ausgeschleust werden. Bestimmte Kunststoffsorten (z.B. Duroplaste, Multilayer-Kunststoffe, faserverstärkte Kunststoffe) sind werkstofflich kaum verwertbar.

Anders als beim werkstofflichen Recycling verändern **chemische Recyclingverfahren** die Struktur der Polymerketten in den Altkunststoffen. Sie werden in kleinere Moleküle oder Monomere aufgespalten. Bei den Depolymerisationsverfahren handelt es sich zumeist um lösemittelbasierte Prozesse (Solvolyse) oder um thermochemische Prozesse (z.B. Pyrolyse). [Lech-2020]

Für nahezu alle Kunststoffe gibt es technisch machbare, rohstoffliche Recyclingverfahren, allerdings sind erst wenige Verfahren industriell umgesetzt. Ökonomische und ökologische Gesamtbewertungen stehen noch aus. Diese sind für einzelne Verfahren wie auch Verfahrenskombinationen dringend erforderlich.

- Um eine Steigerung der Kreislaufführung von Kunststoffen zu erreichen, ist eine Ergänzung der werkstofflichen Verfahren durch alternative Ansätze und Kombinationen aus werkstofflichen und chemischen Verfahren erforderlich.

### WELCHE ALTERNATIVEN RECYCLINGVERFAHREN WERDEN DERZEIT ERFORSCHT?

Im Folgenden wird auf Verfahren zur lösungsmittelbasierten Polymerrückgewinnung und zur Depolymerisation (chemisches Recycling) von Kunststoffabfällen detaillierter eingegangen.

Im Bereich der alternativen **werkstofflichen Verfahren** wird der Einsatz von Lösungsmitteln für die Reinigung und Auftrennung von Kunststoffabfällen untersucht [r+Impuls-2020], [IVV-2020]. Im Gegensatz zur Solvolyse ist es mit diesen Verfahren möglich, vollständige Polymere zurückzugewinnen. Insofern zählen sie ebenfalls zu den werkstofflichen Recyclingverfahren. Die Eigenschaften der gewonnenen Polymere bleiben dabei weitgehend erhalten, weil die Einzelkunststoffe »im Ganzen« voneinander gelöst und dabei Stör- und Schadstoffe abgetrennt werden [Schlummer-2020], [Schlummer-2018], [Mäurer-2009]. Die Verfahren zielen vornehmlich auf typische Verpackungsmaterialien aus Mischkunststoffen, u.a. Multilayerfolien aus Polyethylen (PE) und Polyamid (PA) oder Polypropylen (PP) und Polyethylenterephthalat (PET). Das Ausgangspolymer kann in nahezu ursprünglichem Zustand zurückgewonnen werden.

Beim **chemischen Recycling** wird zwischen Solvolyse und thermochemischen Verfahren unterschieden. Unter **Solvolyse** werden Einzelverfahren wie z.B. Alkohololyse, Glykolyse oder Hydrolyse zusammengefasst. Die Solvolyse eignet sich insbesondere für Polyadditions- und Polykondensationspolymere (z. B. PET, PA, PLA, PUR). Der Einsatzstoff wird unter Zugabe eines Lösungsmittels, eines Depolymerisationsreagenz', eines Katalysators und Wärme in Monomere, Monomerderivate und Oligomere aufgespalten. Diese Rezyklate bilden Ausgangsstoffe für neue Polymersysteme [Simòn-2018]. Die Verfahren sind wirtschaftlich für sortenreine Polykondensationskunststoffe. Die bei der Solvolyse erzeugten Monomere eignen sich direkt zur erneuten Polymersynthese. Bei sehr starken Verunreinigungen des Einsatzmaterials gelangt die Solvolyse an ihre Grenzen. Die Handhabung der Lösungsmittel ist aufwändig [Hohenhorst-2013], [IN4climate-2020].

Zu den thermochemischen Konversionsverfahren zählen Pyrolyse- und Vergasungsverfahren.

Die **Pyrolyse** bzw. das katalytische Cracken (Pyrolyse unter Zugabe von Katalysatoren) erfolgt bei über 300 °C unter Sauerstoffabschluss. Aus Mischkunststoffen werden kurzkettige Kohlenwasserstoffe als Öl sowie Gase (z.B. CO, CH<sub>4</sub> oder H<sub>2</sub>) und Feststoffe (Karbonisat) als Produkte erzeugt. Das Öl kann direkt in petrochemische Verarbeitungsketten oder andere Syntheseprozesse eingespeist und zu neuen Kunststoffen oder anderen chemischen Erzeugnissen verarbeitet werden [IN4climate-2020], [Crippa-2019]. Gas und Feststoffe können bisher nur energetisch, zum Beispiel für die Deckung des Eigenenergiebedarfs des Prozesses, verwendet werden. Eine rohstoffliche Verwendung der Gasphase würde weitere Aufbereitungsschritte erfordern.

Die Pyrolyse ist bezogen auf das Einsatzmaterial sehr flexibel. Die Rückgewinnung von anorganischen Komponenten wie Metallen [Gagendta-2020] oder Fasern, die z.B. in carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) oder anderen Verbundmaterialien enthalten sind, ist möglich [CFK Valley-2020]. Eine Nachbehandlung der Pyrolyseprodukte ist notwendig: je inhomogener das Einsatzmaterial ist, desto breiter ist das Spektrum an chemischen Komponenten. Dies führt zu zusätzlichem Aufwand, um Chemikalien in ausreichender Reinheit zu extrahieren [IN4climate-2020] [UMSICHT-2020].

Im Unterschied zur Pyrolyse wird die **Vergasung** unter Zugabe von z.B. Sauerstoff oder Wasserdampf bei Temperaturen zwischen 700 und 1600 °C und einem Druck zwischen 10 und 90 bar durchgeführt. Die Kunststoffe werden in der Vergasungsreaktion in chemische Grundbausteine wie CO, H<sub>2</sub> aber auch CH<sub>4</sub> zerlegt. Diese chemischen Grundbausteine können in petrochemischen Verarbeitungsketten aber auch in andere Syntheseprozesse eingespeist werden. Vergasungsprozesse von Kunststoffenabfällen haben hohe energetische und verfahrenstechnische Anforderungen, die nur in Großanlagen realisierbar sind. Dies wiederum erfordert große Feedstockmengen an einem Standort, verbunden mit hohen Transportkosten und nachteiligen ökologischen Auswirkungen. Die Reinigung des Produktgases ist besonders wichtig, da die Folgeprozesse überwiegend katalytisch und daher sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen sind.

## WIE IST DER ENTWICKLUNGSSTAND CHEMISCHER RECYCLINGTECHNOLOGIEN?

Getrieben durch eine steigende Nachfrage der Polymerchemie nach recyclingbasierten Grundstoffen gibt es zahlreiche Entwicklungsprojekte im Bereich des chemischen Recyclings sowohl seitens der Wissenschaft als auch der Wirtschaft. Sie reichen von Labor- und Pilotanlagen bis hin zu einzelnen kommerziellen Projekten. Hinsichtlich Reife- und Wirkungsgraden, Anlagengrößen und Wirtschaftlichkeit gibt es nur unvollständige Informationen.

Eine eigene Marktanalyse (siehe Abb. 1) zeigt, dass vor allem Großunternehmen aus der Polymerherstellung wie auch der chemischen Industrie strategische Investitionen im Bereich des chemischen Recyclings tätigen. Dazu zählen Konzerne wie SABIC, BASF, Indorama, Eastman Chemicals, Covestro oder LyondellBasell [ClosedLoopPartners-2020].

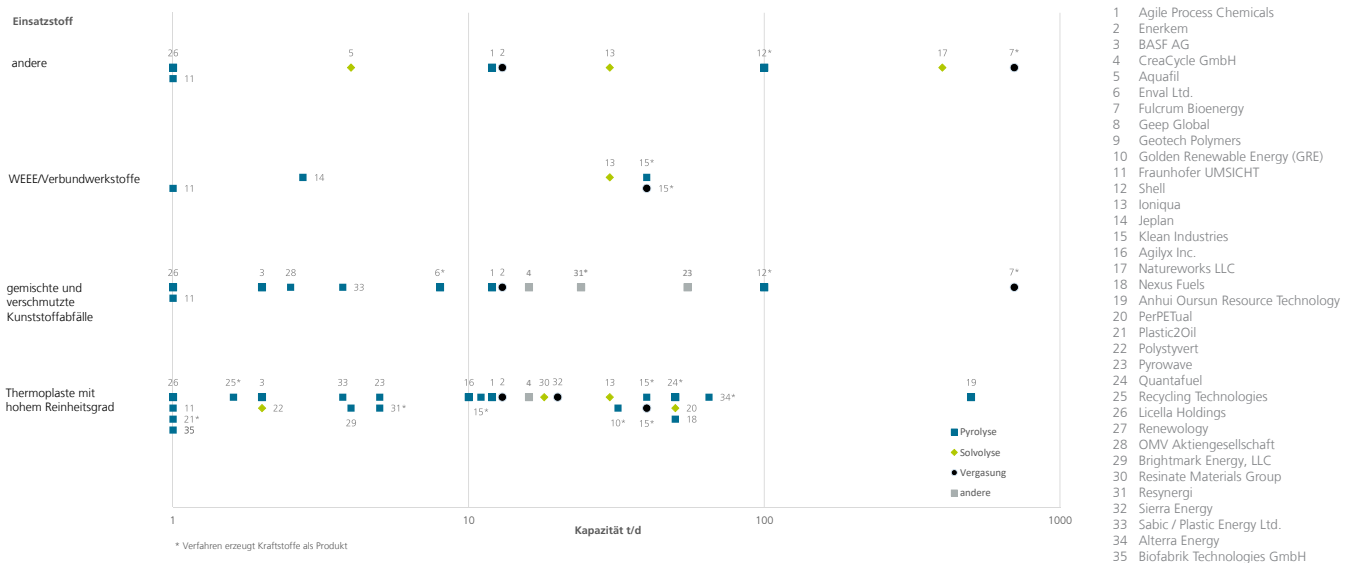


Abb. 1: Übersicht aktueller Initiativen zur Demonstration und Kommerzialisierung von chemischen Recyclingverfahren. Dargestellt sind Vorhaben ab einem TRL 7 mit Einsatzstoffen und Kapazität (teilw. geschätzt).

Quelle: Eigene Recherchen, ClosedLoopPartners-2020, IN4climate-2020

Vor allem die Pyrolyse, das katalytische Cracken und die chemische Depolymerisation (Solvolyse) stehen im Fokus der gegenwärtigen Technologieentwicklungen. Die Pyrolyse- und katalytischen Cracktechnologien sind bzgl. der Breite an Einsatzstoffen am weitesten entwickelt. Die chemische Depolymerisation ist derzeit für PET oder andere Additions- oder Kondensationspolymere mit einem hohen Technology Readiness Level (TRL) verfügbar [Lech-2020].

Es ist zu erwarten, dass der Anteil der am Markt verfügbaren Verfahren und damit der Anteil der chemisch recycelten Kunststoffabfälle in den kommenden Jahren steigt. Trotz spezifischer Stärken ist keines der Verfahren alleine dazu geeignet, die große Bandbreite an (heterogenen) Kunststoffabfällen zu verwerten und hochwertige Rezyklate, Monomere oder Basischemikalien wieder in den Kreislauf zurückzuführen. Es gilt, für die unterschiedlichen Inputströme das effektivste Verfahren bzw. die effektivste Verfahrenskombination auszuwählen.

## WAS KÖNNEN NEUARTIGE RECYCLINGVERFAHREN INSGESAMT LEISTEN?

Chemische und neuartige werkstoffliche Verfahren erlauben ein **hochwertiges Recycling** von Kunststoffabfällen. Möglich wird eine **verbesserte Qualität des Rezyklats** bis hin zur Erzeugung von Polymeren in Neuware-Qualität. Damit einher geht ein breiteres Anwendungsspektrum, auch im Bereich höherwertiger Produkte (z.B. hochqualitativer Oberflächen, Medizinprodukte, Spielzeuge, Lebensmittelverpackungen etc.) und potenziell höhere Recyclingquoten.

Chemische Recyclingverfahren sind in der Lage, eine **große Bandbreite** an Kunststoffen und Kunststoffgemischen zu verwerten, u.a. Polyolefine, Polystyrol, PET, PA, PC, ABS-Kunststoffe, verschiedene Duromere (z.B. Phenolharze, Epoxidharze), gemischte und/oder kontaminierte Kunststoffabfälle wie Siedlungsabfälle oder Multilayerverpackungen, Schredderleichtfraktionen aus der Automobilbranche, Altreifen, WEEE (engl.: waste electrical and electronic equipment), Abfälle aus dem Bausektor, Verbundwerkstoffe wie glas- oder carbonfaserverstärkte Kunststoffe oder auch biobasierte Kunststoffe wie PLA.

Bei entsprechender Prozessführung ist aufgrund der Depolymerisation grundsätzlich eine **Ausschleusung von Schad- und Störstoffen** möglich, z.B. lassen sich halogenierte, persistent-organische Flammhemmer wie bromierte Diphenylether (deca-DBE), die in Altfahrzeug- und Elektroaltgerätekunststoffen vorkommen, abscheiden [Hense-2015]. Entsprechende Verfahren zur Aufreinigung der Produkte aus dem Chemischen Recycling müssen noch optimiert und in einen stabilen Dauerbetrieb überführt werden.

Insgesamt können neuartige Recyclingtechnologien dazu beitragen, dass die Deponierung oder thermische Verwertung von bisher nicht recyclingfähigen Kunststoffen vermieden wird. Durch technische Weiterentwicklungen lässt sich zukünftig der Aufwand für die Vorbehandlung (Sortieren, Waschen) noch senken. Darüber hinaus kann eine Kreislaufführung von Kunststoffen die Abhängigkeit von Rohölimporten und Abfall-Exporte vermindern.

## WELCHE RAHMENBEDINGUNGEN SIND FÜR CHEMISCHE RECYCLINGVERFAHREN ERFORDERLICH?

Akzeptanz und Marktdurchdringung des chemischen Recyclings sind hauptsächlich abhängig von regulatorischen, ökonomischen und ökologischen Faktoren, aber auch vom beschriebenen technischen Entwicklungsbedarf und Nachweis eines großtechnischen Dauerbetriebs.

Das Recycling von Kunststoffen ist **gesetzlich stark reguliert**. Sowohl seitens der EU als auch in Deutschland werden die Quotenvorgaben stetig angehoben.<sup>1</sup> Die EU Abfallrahmenrichtlinie und entsprechend das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz sowie die EU Verpackungsrichtlinie räumen dem Recycling durch mechanische und chemische Verfahren einen Vorrang gegenüber der energetischen Verwertung ein. Im deutschen Verpackungsgesetz (VerpackG) wird dagegen für systembeteiligungspflichtige Kunststoffverpackungen eine Verwertungsquote (Summe aus stofflicher und energetischer Verwertung) sowie eine separate Quote nur für die werkstoffliche Verwertung definiert. Letztere beträgt mindestens 58,5 % (aktuell) bzw. 63 % (ab 2022). Die Definition der werkstofflichen Verwertung im VerpackG schließt nach Rechtsauffassung des BMU das chemische Recycling aus, das damit hinsichtlich der Quote mit der energetischen Verwertung gleichgesetzt wird. Darüber hinaus fehlt es bislang allgemein an einer Legal-Definition für den Begriff »Chemisches Recycling«.

- Da chemische Recyclingverfahren ebenfalls in der Lage sind, Sekundärrohstoffe für die Kunststoffproduktion bereitzustellen, sollte die aktuelle werkstoffliche Verwertungsquote im VerpackG durch eine technologieoffene Recyclingquote ersetzt werden. Dies würde technische Innovationen im Recycling von Verpackungen fördern und alternativen Verfahren den Marktzugang ermöglichen.

Die **Wirtschaftlichkeit** chemischer Recyclingverfahren lässt sich aktuell nicht abschließend bewerten. Neben dem technischen Aufwand hängt diese stark von der Art des eingesetzten Altkunststoffs, der Art des neuen Produkts sowie weiteren ökologischen, ökonomischen und regulatorischen Randbedingungen ab. Ein niedriger Ölpreis hemmt beispielsweise die Anstrengungen, fossile Rohstoffe durch Sekundärrohstoffe zu substituieren. Dies hat in der Vergangenheit dazu geführt, dass Recyclinganlagen unwirtschaftlich wurden [Material Economics-2019]. Mit der geplanten Einführung von Rezyklatquoten für verschiedene Anwendungsbereiche von Kunststoffen ließe sich die Nachfrage nach Kunststoffrezyklaten vom Ölpreis entkoppeln und damit stabilisieren.

Die grundsätzliche technische Machbarkeit von chemischen Recyclingverfahren wurde gezeigt. Die im Betrieb befindlichen Anlagen für das chemische Recycling befinden sich größtenteils im vorkommerziellen Pilot- oder Demonstrationsbetrieb. Belastbare Fakten zu Investitions- und Betriebskosten, Produktmengen und -qualitäten, deren Absatzstrukturen und erlösbaren Preisen sind nicht

---

<sup>1</sup> Mit dem EU-Kreislaufwirtschaftspaket wurden umfangreiche Änderungen des europäischen Abfallrechts angestoßen, die auch den Bereich der Kunststoffabfälle betreffen. Die Abfallrahmenrichtlinie (ARRL) sieht steigende Recyclingquoten für Siedlungsabfälle (55 % bis 2025, 60 % bis 2030 und 65 % bis 2035) vor. Die Recyclingquotenvorgabe für Kunststoffabfälle wurde in der europäischen Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle (94/62/EG) deutlich angehoben (50 % bis 2025 bzw. 55 % bis 2030). Darüber hinaus setzt Deutschland die Vorgaben mit dem Verpackungsgesetz (VerpackG) noch ambitionierter um und fordert seit 2019 eine Recyclingquote für Kunststoffverpackungen von 58,5 % und bereits ab 2022 von 63 %

vorhanden.

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit von Recyclingverfahren sind u.a. die Mengenverfügbarkeiten an Einsatzstoffen. Allein eine anteilige Umstellung der deutschen Kunststoffproduktion von etwa 18 Millionen t/a [PlasticsEurope-2017] auf recycelte Basischemikalien, die aus Sekundärrohstoffquellen stammen, würde eine Umsteuerung von Abfallströmen erfordern, die bisher der energetischen Verwertung zugeführt werden. Damit das chemische Recycling eine sinnvolle Ergänzung zum werkstofflichen Recycling sein kann, muss ein entsprechendes Stoffstrommanagement etabliert sein, z.B. um Reste aus der werkstofflichen Verwertung den chemischen Verfahren zuzuführen (Prozesskaskaden).

Die Nachfrageseite nach Kunststoffen aus dem chemischen Recycling kann als gut eingestuft werden. Sowohl seitens der chemischen Industrie, Konsumgüterherstellern als auch der Automobilindustrie besteht Interesse am Einsatz von chemisch recycelten Produkten, sofern die Qualität von Neuware erreicht wird [Endres-2020].

- Vorbehalte gegenüber Kunststoffzyklats sind häufig durch das Fehlen verlässlicher und umfassender Qualitätsstandards begründet. Bestehende und neue Normen sollten in Hinblick auf chemische Recyclingverfahren angepasst und erweitert werden.

Auf den Aspekt der **ökologischen Nachhaltigkeit** von chemischen Recyclingverfahren wird im Folgenden eingegangen.

## KANN CHEMISCHES RECYCLING EINEN BEITRAG ZUM UMWELT- UND KLIMASCHUTZ LEISTEN?

Chemische Recyclingverfahren erlauben grundsätzlich eine gezielte **Schadstoffausschleusung** aus dem zu recycelnden Material, allerdings besteht hier noch Forschungsbedarf für die industrielle Anwendung. Schadstoffhaltige Aufbereitungsrückstände müssen kontrolliert entsorgt werden. Sofern im Prozess zusätzliche Chemikalien (z.B. Lösungsmittel) eingesetzt werden, müssen diese ebenfalls recycelt oder fachgerecht entsorgt werden.

Die in Deutschland verwendeten Kunststoffe verursachen **THG-Emissionen** von circa 30 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr aus der Herstellung und 9 Mio. t CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung der Kunststoffabfälle (zum Vergleich: In Deutschland wurden 2019 insgesamt 810 Mio. t Treibhausgase freigesetzt) [Umweltbundesamt-2021]. Mit einem werkstofflichen oder chemischen Recycling wird der Kunststoff im Kreislauf gehalten. Verbrennung und Deponierung werden vermieden. Einerseits wird so die Menge neuer Kunststoffe auf Erdölbasis gesenkt (**Substitutionseffekt**), andererseits bleibt der Kohlenstoff im Produkt gebunden (**Kohlenstoffsенke**) und gelangt nicht als CO<sub>2</sub> in die Umwelt.

Zu beachten ist hierbei, dass beim konventionellen werkstofflichen Recycling zwangsläufig eine Degradation der Materialeigenschaften der Kunststoffe stattfindet (Downcycling). Mit jeder weiteren Kreislaufführung verschlechtert sich zudem die Qualität des Rezyklats [Martens-2016]. Dies führt dazu, dass Neuware-Kunststoffe ohne zusätzliche Behandlung nicht immer 1:1 ersetzt werden können. Die Funktion der Kohlenstoffsенke bleibt (zumindest für den Lebenszykluszeitraum) nur dann erhalten, wenn aus dem Rezyklats ein langlebiges Kunststoffprodukt entsteht.

Eine häufig geäußerte Fragestellung im Bereich chemischer, insbesondere thermochemischer Recyclingverfahren wie Pyrolyse oder Vergasung, ist die nach der **Energie- und Ökobilanzierung**.

Hierzu ist festzuhalten, dass eine vergleichende Gesamtenergie- bzw. Ökobilanzierung von chemischen mit werkstofflichen Verfahren im Realbetrieb bisher nicht existiert. Branchenspezifische Szenarioanalysen (z.B. für den Chemiesektor) schätzen die CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale in Folge einer Integration von u.a. chemischen Recyclingverfahren zwar positiv ein, jedoch wird dabei auch immer



die Abhängigkeit vom Emissionsfaktor des zugrunde liegenden Energiemixes betont [Bazzanella-2017] [Accenture-2017] [Material Economics-2019]. Modellberechnungen sehen außerdem einen Vorteil von chemischen Recyclingverfahren im Vergleich mit der Verbrennung in MVA hinsichtlich der Klimaeffekte, wenn es gelingt, dass bislang verbrannte Kunststoffe, stofflich verwertet werden [Meys-2020].

- Eine gesamtökologische, vergleichende Betrachtung von spezifischen Recyclingverfahren oder Verfahrenskombinationen für spezifische Altkunststoffe muss noch erbracht werden.
- Eine teilweise Substitution von erdölbasierten Basischemikalien für die Kunststoffindustrie durch chemische Rezyklate bspw. auf Basis von Kunststoffabfällen erscheint technologisch möglich.

## **FORSCHUNGSAGENDA RECYCLINGTECHNOLOGIEN**

Innovative Recyclingtechnologien können dazu beitragen, die Kunststoffkreislaufwirtschaft zu verbessern. Vor allem die rohstofflichen / chemischen Verfahren könnten ein ergänzender Baustein für höherwertiges Kunststoff-Recycling sein, allerdings besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Im Folgenden wird eine aus Sicht des Fraunhofer CCPE sinnvolle Forschungsagenda für erweiterte Recyclingverfahren skizziert:

### **1. Analyse von kunststoffhaltigen Abfällen**

Für heterogene Kunststoffabfälle ist es notwendig, mehr Daten über deren Zusammensetzung zu erfassen, vor allem hinsichtlich der enthaltenen Polymere, Additive und Kontaminationen. Auf dieser Grundlage kann dann das bestmögliche Behandlungsverfahren ausgewählt werden. Vor allem schnellere, genauere und automatisierte Sensorik und Analytik sind hier im wissenschaftlichen Fokus. Außerdem sollte die Digitalisierung der abfallwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten vorangetrieben werden.

### **2. Transparenz über ökonomische und ökologische Auswirkungen durch Langzeitbetrieb**

Eine belastbare Bewertung von Recyclingverfahren erfordert den Langzeitbetrieb entsprechender Anlagen im Demonstrationsmaßstab. Der Bau und Betrieb entsprechender Demonstratoren sollte gefördert werden. Diese können dann aussagekräftige und vergleichbare Daten für Massen-, Energie- und Kohlenstoffbilanzen sowie technische, wirtschaftliche und ökologische Bewertungen liefern.

### **3. Dynamische Bewertungsmodelle für die Abfallbehandlung**

Aufbauend auf den Primäranalysen und anhand spezifischer Kriterien kann bewertet werden, welche Recyclingtechnologie für welche Abfälle unter welchen Rahmenbedingungen am besten geeignet ist, z.B. anhand Stoffstromgröße, Heterogenität, Kontaminationen, lokalen Faktoren, Wirtschaftlichkeit, Ökobilanz etc. Ein dynamisches Bewertungsmodell erlaubt dann die Anpassung an unterschiedliche Zielszenarien (z.B. »höchstmögliche Produktqualität«, »energetische Verwertung minimieren«, »minimale CO<sub>2</sub>-Emissionen« etc.) und veränderte Randbedingungen (z.B. Rezyklatnachfrage, Energiekosten, Mengenverfügbarkeiten).

### **4. Kopplung von Recyclingtechnologien**

Eine Recyclingtechnologie alleine ist nicht in der Lage, den gesamten Kunststoffabfall nachhaltig im Kreis zu führen. Auf Grundlage von Daten und Bewertungsmodellen (Schritte 1-3) ist es daher sinnvoll, mehrere Recyclingtechnologien zu integrierten Systemen zu koppeln. So steht die bestmögliche Verfahrenskombination für den jeweiligen Einsatzstoff oder Gemischtabfälle zur Verfügung.

### 5. Automatisierte, KI-basierte gestufte Recyclingverfahren

Mit Hilfe teilautonomer, KI-basierte Systeme wird die Art der Vorbehandlung gesteuert und entschieden, welche Einzelfractionen über werkstoffliches, lösungsmittelbasiertes oder chemisches Recycling verwertet werden. Ausschüsse der jeweiligen Verfahren werden dem nächst robusteren, bzw. weniger effizienten Verfahren zugegeben. Mit automatisierten Verfahrenskaskaden kann so die maximale Energie- und Rohstoffeffizienz erreicht und die optimale Verfahrenskombination identifiziert werden.

### 6. Optimierung der Produkte aus dem Recycling

Sowohl im werkstofflichen als auch im chemischen Recycling sind Forschung und Entwicklung nötig, um die Qualitäten der Recyclingprodukte zu verbessern. Einerseits sind hier (neue) Rezyklatstandards und Qualitätskontrollen maßgeblich, zum anderen ist der Austausch mit der Industrie notwendig, um bestimmte, anwendungsspezifische Materialeigenschaften zu erreichen. Forschungsbedarf besteht auch im Bereich der Aufbereitung von Zwischenprodukten (z.B. Pyrolyseölen) für die Weiterverarbeitung bis zum Neukunststoff.

Im Fraunhofer CCPE werden die Kompetenzen verschiedener Fraunhofer-Institute in einem gemeinsamen Forschungsprogramm verknüpft, von der Polymerentwicklung, den Recyclingtechnologien, der Bewertung dieser Recyclingtechnologien, dem Wiedereinsatz der Rezyklate bis zur Entwicklung maßgeschneiderte Businessmodelle.

## Fraunhofer Kompetenzlandschaft Recyclingtechnologien

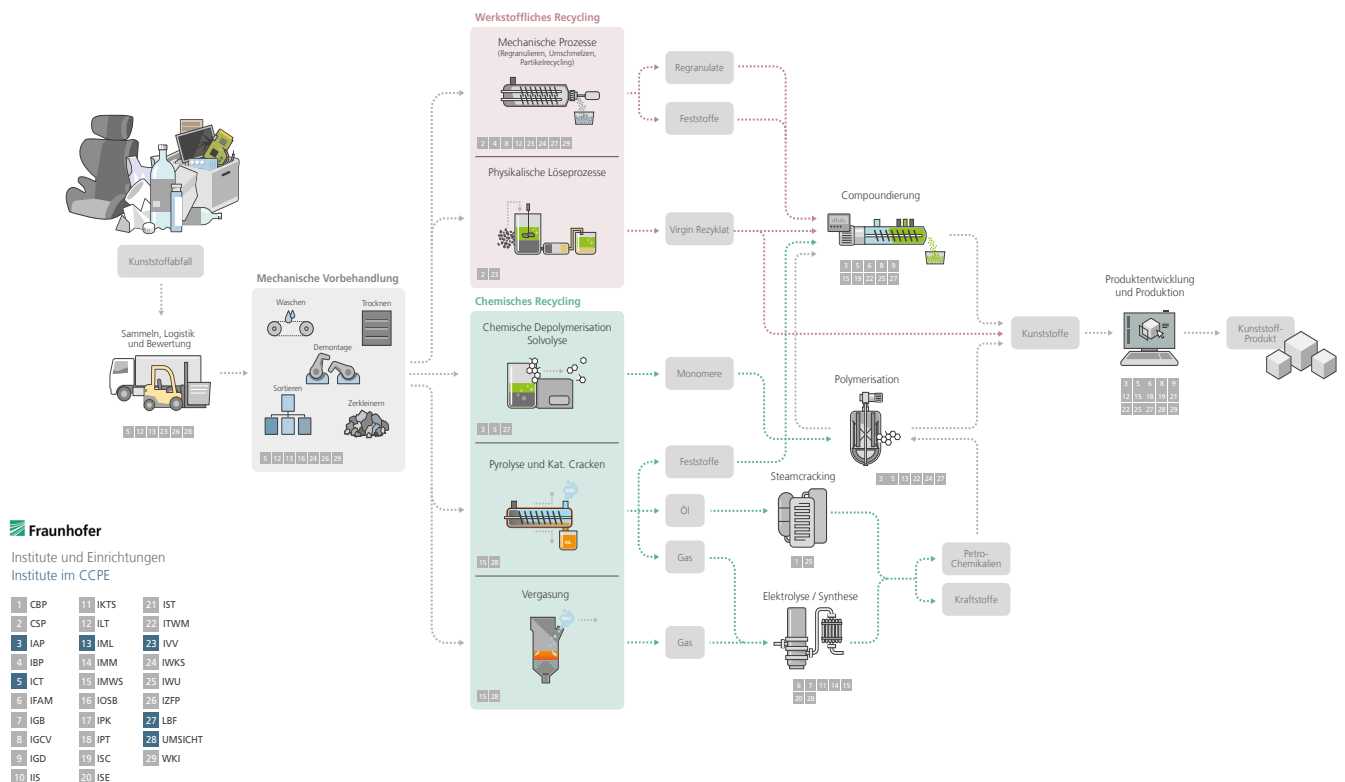


Abb. 2: Fraunhofer Kompetenzlandschaft Recyclingtechnologien

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Aryan-2021] Aryan V.; Maga D.; Hiebel M.; Majgaonkar P.; Hanich R.; (2021):  
Valorisation of PLA Waste: A Comparative LCA of Various Chemical Recycling Technologies.  
In: Resources Conservation and Recycling | submitted
- [Bazzanella-2017] Bazzanella, A. M., Ausfelder, F. (2017):  
Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Technology Study.  
Dechema e.V.; Frankfurt am Main. ISBN 978-3-89746-196-2
- [BASF-2021] Zirkularität beim Recycling von Matratzen,  
<https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/circularity-recycling-of-mattresses.html>,  
abgerufen am 08.02.2021.
- [CFK-2021] CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG, Available:  
<https://www.cfk-recycling.de/index.php?id=5>, 2021
- [ClosedLoopPartners-2020] ClosedLoopPartners-2020 (2020): ACCELERATING CIRCULAR SUPPLY CHAINS FOR PLASTICS.  
[https://www.closedlooppartners.com/wp-content/uploads/2021/01/CLP\\_Circular\\_Supply\\_Chains\\_for\\_Plastics\\_Updated.pdf](https://www.closedlooppartners.com/wp-content/uploads/2021/01/CLP_Circular_Supply_Chains_for_Plastics_Updated.pdf) (closedlooppartners.com)
- [Covestro-2019] S. P. Mechnig (2019) Recycling von Polyurethan-Kunststoffen verbessern,  
<https://www.covestro.com/press/recycling-von-polyurethan-kunststoffen-verbessern/>,  
abgerufen am 08.02.2021.
- [Crespo-2018] A. Crespo, R. Hanich (2018) Recycling foam from post-consumer waste: challenges and opportunities for sustainable development, UTECH Europe.
- [Crippa-2019] Crippa, M. et al. (2019): A circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions. European Commission, 2019, ISBN 978-92-79-98429-7
- [Conversio Market-2019] Conversio Market & Strategy GmbH (2019): Kurzfassung Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019 (2020) Zuletzt geprüft am: 27.01.2021.  
[https://www.plasticseurope.org/download\\_file/force/4020/319](https://www.plasticseurope.org/download_file/force/4020/319)
- [Dechema-2017] DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (2017): Technology Study  
Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry.  
[https://dechema.de/dechema\\_media/Downloads/Positionspapiere/Technology\\_study\\_Low\\_carbon\\_energy\\_and\\_feedstock\\_for\\_the\\_European\\_chemical\\_industry.pdf](https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf)
- [Elser-2017] Elser, B., Ulbrich, M. (2017): Taking the European chemical industry into the circular economy. Executive summary. o. O.: Accenture [https://www.accenture.com/\\_acnmedia/PDF-45/Accenture-CEFIC-Report-Exec-Summary.pdf#zoom=50](https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-45/Accenture-CEFIC-Report-Exec-Summary.pdf#zoom=50)
- [Endres-2020] Endres, H.-J.; Shamsuyeva, M. (2020): Standards und Qualität von Kunststoff-Rezyklaten - eine Bestandsaufnahme. In: online. plastverarbeiter  
<https://www.plastverarbeiter.de/100024/kreislaufwirtschaft-braucht-bessere-standards/>

- [Flamme-2018] Flamme, S., et al. (2018): Energieerzeugung aus Abfällen: Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. Umweltbundesamt,[Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen,2018>.
- [Fraunhofer CCPE-2020] Fraunhofer Cluster Circular Plastics Economy CCPE (2020): Cluster Circular Plastics Economy CCPE. Zuletzt geprüft am: 27.01.2021. <https://ccpe.fraunhofer.de/>
- [Hahnenkamp-2017] Hahnenkamp, N. J.; Tuminski, R. J. (2017): Untersuchung zur optimierten stofflichen Verwertung von Sperrmüll – insbesondere Matratzen, Teppiche/Teppichböden und Kunststoffe – aus Haushaltungen unter Berücksichtigung der gemeinsamen Behandlung mit gewerblichen Sperrmüllanteilen, AZ: 31221 DBU.
- [Hanich-2018] Hanich, R.; Werth, M. (2018): Chemical recycling of post-consumer mattresses polyurethane waste – challenges and opportunities for sustainable development, Urbanrec Networking Event, Grafenberg.
- [Hanich-2019] Hanich, R. (2019): Chemical recycling of post-consumer mattress materials, 49. IUPAC World Congress 2019, Proceedings,, 2. Sustainable Chemistry, Materials and Resources for the City of the 2050s, p. 2706-2707.
- [Hense-2015] Hense, P.; Reh, K.; Franke, M.; Aigner, J.; Hornung, A., & Contin, A. (2015): PYROLYSIS OF WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT (WEEE) FOR RECOVERING METALS AND ENERGY: PREVIOUS ACHIEVEMENTS AND CURRENT APPROACHES. In: Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ). Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/profile/Peter\\_Hense/publication/282710376\\_Pyrolysis\\_of\\_waste\\_electrical\\_and\\_electronic\\_equipment\\_WEEE\\_for\\_recovering\\_metals\\_and\\_energy\\_Previous\\_achievements\\_and\\_current\\_approaches/links/57e386ad08ae0e3158a72cd1/Pyrolysis-of-waste-electrical-and-electronic-equipment-WEEE-for-recovering-metals-and-energy-Previous-achievements-and-current-approaches.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Peter_Hense/publication/282710376_Pyrolysis_of_waste_electrical_and_electronic_equipment_WEEE_for_recovering_metals_and_energy_Previous_achievements_and_current_approaches/links/57e386ad08ae0e3158a72cd1/Pyrolysis-of-waste-electrical-and-electronic-equipment-WEEE-for-recovering-metals-and-energy-Previous-achievements-and-current-approaches.pdf).
- [Hohenhorst-2013] Hohenhorst, M.; Kugler M.; Fehrenbacher, U.; Schäfer, K.; Giesker, C.; (2013): Process for producing a polyurethane block foam. DE102013106364B4. 2013. <https://patentimages.storage.googleapis.com/81/2a/54/20c8f7756b83ed/DE102013106364B4.pdf>
- [ICT-2020] Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (2020). Zuletzt geprüft am: 27.01.2021. <https://www.ict.fraunhofer.de/>
- [IN4climate-2020] IN4climate.NRW (Hrsg.) (2020): Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy. Gelsenkirchen.
- [IVV- 2020] Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV (2020): Kunststoff-Recycling - CreaSolv® Prozess: Zuletzt geprüft am: 27.01.2021. <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/kunststoff-recycling.html#creasolv>
- [Janz-2020] Janz, A.: Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen – eine Alternative zur werkstofflichen Verwertung? In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker, Alexander Gosten (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 17; Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. Berlin, 2020. [https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA17/2020\\_EaA\\_065-070\\_Janz.pdf](https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA17/2020_EaA_065-070_Janz.pdf)

- [Lechleitner-2020] Lechleitner, A.; Schwabl, D.; Schubert, T.; Bauer, M.; Lehner, M. (2020): Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. In: Wasser- und Abfall 72 (1-2), S. 47–60. DOI: 10.1007/s00506-019-00628-w.
- [Martens-2016] Martens, H.; Goldmann, D. (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02786-5>.
- [Material Economics-2019] Material Economics Sverige AB (2019): Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry. [https://materialeconomics.com/material-economics-industrial-transformation-2050.pdf?cms\\_fileid=303ee49891120acc9ea3d13bbd498d13](https://materialeconomics.com/material-economics-industrial-transformation-2050.pdf?cms_fileid=303ee49891120acc9ea3d13bbd498d13)
- [Mäurer-2009] Mäurer, A.; Schlummer, M.; Arends, D. (2009): Hochwertige Rezyklate. In: Recycling-Magazin, 2009, 64, 30-31
- [Majgaonkar-2021] Majgaonkar, P.; Hanich, R.; Malz, F.; Brüll, R. (2021): Chemical Recycling of Post-Consumer PLA Waste for Sustainable Production of Ethyl Lactate, 2021, Chem. Eng. Technol. | submitted
- [Meys-2020] Meys, R.; Frick, F.; Westhues, S.; Sternberg, A.; Klankermayer, J.; Bardow, A. (2020): Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling. In: Resources, Conservation & Recycling, 162, 105010.
- [Plasticseurope-2017] Plastic Europe (2017) Plastic - the Facts 2017 An analysis of European plastics production, demand and waste data
- [Plasticseurope-2019] PlasticsEurope Deutschland e. V., <https://www.plasticseurope.org/de/newsroom/neuigkeiten/wirtschaftliche-situation-der-kunststoff-ferzeuger-2019-und-ausblick-2020>, abgerufen am 25.02.2021
- [Plastikticker-2012] Plastikticker, [https://plasticker.de/Kunststoff\\_News\\_17622\\_H+S\\_Anlagentechnik\\_Weltweit\\_erste\\_industrielle\\_Anlage\\_zur\\_Weichschaum\\_Umwandlung](https://plasticker.de/Kunststoff_News_17622_H+S_Anlagentechnik_Weltweit_erste_industrielle_Anlage_zur_Weichschaum_Umwandlung), zuletzt geprüft 08.02.2021.
- [Ragaert-2017] Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. (2017): Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. In: Waste Management, 69, pp.24-58.
- [Roman-Ramirez-2019] Román-Ramírez, Luis A.; Mckeown, Paul; Jones, Matthew D.; Wood, Joseph (2019): in ACS Catal. 9 (1), pp. 409–416
- [r+Impuls-2020] r+Impuls (2020): Circular Packaging. Zuletzt geprüft am: 27.01.2021. <https://www.r-plus-impuls.de/rplus-de/verbundprojekte/projekte/circular-packaging.php>
- [Schlummer-2020] Schlummer, M.; Fell, T.; Mäurer, A.; Altnau, G.; (2020): Die Rolle der Chemie beim Recycling. In: Kunststoffe, 06, S. 51-54
- [Schlummer-2018] Schlummer, M.; Wolff, F.; (2018): Wirtschaftliches Potenzial vorhanden. In: ReSource, 31 (2), S. 23-29

- [Simòn-2018] Simòn, D.; Borreguero, A. M.; de Lucas, A.; Rodríguez, J. F.; (2018): Recycling of polyurethanes from laboratory to industry, a journey towards the sustainability. In: Waste Management, 76 (6), S. 147-171
- [Skokova-2018] Skokova, M. (2018): Recycling of end-of-life mattresses into polyol for rigid PU foam applications, UTECH 2018, H&S Anlagentechnik.  
<https://www.kunststoff-magazin.de/zerkleinerung-recycling/recyclingtechnik--post-consumer-matratzen-recyclen.htm>, abgerufen am 08.02.2021.
- [UMSICHT-2020] Fraunhofer UMSICHT, gagenda+ – eine innovative Prozesskette zur Gewinnung von High-tech-Metallen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten, Zuletzt geprüft am: 27.01.2020: <https://gagenda.de/>, 2020.
- [UMSICHT-2020] Fraunhofer UMSICHT Institutsteil Sulzbach-Rosenberg (2020): Chemisches Recycling von Kunststoffen. Zuletzt geprüft am: 27.01.2021. <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/unsere-loesungen/chemisches-recycling.html>
- [UMSICHT-2018] Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (2018): Position des Fraunhofer UMSICHT zu Mikroplastik: Zuletzt geprüft am: 27.01.2020. <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/strategische-forschungslinien/positionen-diskurs/mikroplastik.html>
- [Umwelbundesamt-2021] Umweltbundesamt (2021): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Zuletzt geprüft am 12.05.2021. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>
- [Umweltrat-2020] Sachverständigenrat für Umweltfragen (2020): Kreislaufwirtschaft: Von der Rhetorik zur Praxis. [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/2016\\_2020/2020\\_Umweltgutachten\\_Kap\\_03\\_Kreislaufwirtschaft.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Kap_03_Kreislaufwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=8)
- [Unilever-2021] Unilever (2021): Our solution for recycling plastic sachets takes another step forward: Zuletzt geprüft am: 27.01.2021. <https://www.unilever.com/news/news-and-features/Feature-article/2018/our-solution-for-recycling-plastic-sachets-takes-another-step-forward.html>