

DISKUSSIONSPAPIER

Forschungspolitische Empfehlungen zum chemischen Kunststoffrecycling – neue Verfahren und Konzepte

Executive Summary

Im Kontext des Klimawandels steht die chemische Industrie vor einer ihrer größten Herausforderungen: Der Umstellung ihrer Rohstoffbasis auf Treibhausneutralität. Eine Option für die Diversifizierung der Rohstoffbasis ist das chemische Recycling von Kunststoffen in Kombination mit dem Einsatz von synthetischen Kohlenwasserstoffen unter Nutzung von Kohlendioxid und „grünem“ Wasserstoff.

Die Experten der beteiligten Organisationen DECHEMA, Plastics Europe Deutschland und des VCI haben Forschungs- und Entwicklungsbedarf an der Schnittstelle von P2X-Sektorenkopplungs-Wasserstofftechnologien und dem chemischen Kunststoffrecycling identifiziert und geben mit diesem Diskussionspapier Anregungen für die Initiierung von Forschungsprogrammen der Bundesministerien und Aktivitäten der beteiligten Organisationen und ihrer Mitglieder:

- Das **Potential zum Ausbau des mechanischen und chemischen Kunststoffrecyclings ist beachtlich**. Dabei besteht zwischen dem mechanischen und dem chemischen Recycling eine **Komplementarität der Verwertungswege**. Chemische Recyclingverfahren ergänzen das mechanische Recycling insbesondere für Wertstoffströme, die dort nicht ökologisch und ökonomisch sinnvoll verarbeitet werden können. Von besonderer Bedeutung für das jeweilige chemische Kunststoffrecyclingverfahren ist die vorhergehende Aufbereitung der Abfallströme.
- **Mechanische und chemische Recyclingverfahren** sollten in Abhängigkeit von den Abfallqualitäten ggf. **in Kaskaden** angewendet werden, um das Recycling insgesamt zu optimieren und dabei eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Auch die verschiedenen chemischen Recyclingverfahren können sich ergänzen. Deren effektives synergistisches Zusammenwirken bedarf Kriterien, die noch weiter ausgearbeitet werden müssen. Dafür muss das chemische Kunststoffrecycling in Ergänzung zum mechanischen technologisch weiterentwickelt und die regulativ-politische Rahmenbedingungen adäquat gestaltet werden.
- **Wichtig für die Realisierung großtechnischer Anwendungen** von Pyrolyse- und Vergasungsverfahren **sind die Produktoptimierung und die Skalierung**.
- Es ist zu beachten, dass auch für die Aufarbeitung der Produkte der Kunststoffpyrolyse und damit für die Nutzbarmachung von auf diesem Wege recyceltem Kohlenstoff **Wasserstoff** benötigt wird. Dieser zusätzliche Wasserstoffbedarf muss in der Technologienentwicklung adäquat berücksichtigt werden.
- Im chemischen Recycling ist die **Etablierung von Demonstrationsanlagen** notwendig. Wichtig für den Aufbau zentraler Verfahren des chemischen Recyclings ist die kosteneffiziente logistische Einbindung der Ver- und Entsorgung in einen Chemiestandort.

- **Lebenszyklusbewertungen** (LCA) sind wichtig für die Begleitung der Technologieentwicklung, aber nur eingeschränkt geeignet für die Information auf der Ebene von politischen oder unternehmerischen Entscheidungen. Sie können nur zur Entscheidungsunterstützung dienen.
- **Regulatorische Rahmenbedingungen** sind oft entscheidend für die Etablierung alternativer technologischer Optionen. Insbesondere die adäquate Berücksichtigung des chemischen Recyclings im Abfallrecht ist für die Chemieindustrie eine Grundvoraussetzung.
- **Forschungs- und Förderungsbedarf** hinsichtlich der Wasserstoffnutzung für den Einsatz in chemischen Recyclingprozessen bestehen insbesondere hinsichtlich des Wasserstoffeinsatzes in der Pyrolyse, der Hydrierungen, der Reaktionsführung und der effizienten Kopplung der Abfallverwertungs- mit der chemischen Industrie. Hierbei ist ein starker Fokus auf das Thema Nachbehandlung der Pyrolyseprodukte zur anschließenden Weiterverarbeitung in chemischen Produktionsprozessen zu legen. Grundsätzlich ist eine System- und Technologieoffenheit in der Wertschöpfungskette anzustreben, d. h. die Verfahren zum chemischen Recycling sollten als sich ergänzende Verfahren in einer mechanisch/chemischen Verfahrenskaskade konzipiert werden.
- **Weitere Herausforderungen** liegen in der Erhöhung der technologischen Reife, im Scale-up, in den Investments in Demonstrationsvorhaben und Reallaboren, im Aufbau von Infrastrukturen wie Wasserstoff-Pipelines und in der Kostenreduktion für die Erzeugung und anschließender Nutzungsmöglichkeit von grünem Wasserstoff, in der Zertifizierung des Recyclinganteils im Pyrolyseprodukt und in der Akzeptanz von chemischen Recyclingtechnologien.
- **Zentrale Entwicklungskriterien für Technologien** zum chemischen Recycling werden beschrieben. Dazu gehören auch Wege zur Minimierung des Anteils von Heteroatomen. An der Basis der Technologieentwicklung zum chemischen Recycling bleibt **Grundlagenforschung** wichtig, wie z.B. nicht zuletzt grundlegende Untersuchungen zur Energiebilanz des Kohlenstoffkreislaufs.

Darüber hinaus werden **Empfehlungen zu übergreifenden Fragestellungen** hinsichtlich der Abfallströme, des Marktes und der Nutzung & Bedarf von hergestelltem Rezyklat abgeleitet.

Forschungspolitische Empfehlungen zum chemischen Kunststoffrecycling – neue Verfahren und Konzepte

Im Kontext des Klimawandels steht die chemische Industrie vor einer ihrer größten Herausforderungen: Der Umstellung ihrer Rohstoffbasis, die derzeit durch den Einsatz fossiler Rohstoffe und Energieträger dominiert wird, auf Treibhausneutralität.

Neben der Nutzung alternativer Rohstoffe, z. B. aus biogenen Quellen, wird auch der Einsatz von synthetischen Kohlenwasserstoffen aus der Umsetzung von Kohlendioxid mit aus regenerativem Strom elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff diskutiert. Diese Verfahren zur Wasserstofferzeugung sowie die zur Umsetzung von Kohlendioxid sind jedoch vergleichsweise aufwändig und benötigen beträchtliche Strommengen aus erneuerbaren Energien. Eine weitere ergänzende Option für die Diversifizierung der Rohstoffbasis ist das chemische Recycling von Kunststoffen. Für das chemische Recycling kommen u. a. auch solche Verfahren zum Einsatz, bei welchen zunächst eine (thermo)chemische Umwandlung des Abfallmaterials in chemische Grundbausteine erfolgt. Im Fall von Kunststoffabfällen bzw. organikreichen Abfällen wird chemisches Recycling im Allgemeinen mittels Pyrolyse, Hydrierung, Vergasung, Solvolyse oder auch Depolymerisation erreicht. Ohne chemische Recycling-Verfahren wird eine „Circular Economy“ nicht realisiert werden können.

Durch die Umstellung der chemischen Industrie von fossilen Rohstoffen auf die Nutzung von Abfällen sowie nachwachsenden und alternativen Rohstoffen entsteht ggf. zusätzlicher Wasserstoffbedarf. Abfälle aus Kunststoffen und Rohstoffe aus Biomasse sind teilweise bereits oxidiert, ihre Umwandlung in für chemische Prozesse „passende“ Stoffe und Gemische erfordert daher in vielen Fällen eine Hydrierung, d. h. zusätzlichen Wasserstoff.

Die Experten der beteiligten Organisationen haben thematische Lücken an der Schnittstelle von P2X-Sektorenkopplungs-Wasserstofftechnologien und dem chemischen Kunststoffrecycling festgestellt. Hier soll Wasserstoff für die Aufarbeitung und Konditionierung – z. B. nicht vollständig oxidiertes Produkt der Pyrolyse für die Raffinerie-/Chemieindustrie – genutzt werden.

Die Organisationen BKV GmbH, DECHEMA e.V., PED und VCI sprechen sich für eine intensivere Förderung von Forschung und Entwicklung (FuE) zum chemischen Kunststoffrecycling im Zusammenhang mit den Nutzungsoptionen von grünem Wasserstoff durch die Bundesressorts aus. Durch die Umstellung der chemischen Industrie von fossilen Rohstoffen auf die Nutzung von Abfällen sowie nachwachsenden und alternativen Rohstoffen entsteht zusätzlicher Wasserstoffbedarf. Dieser rührt aus der Aufarbeitung von Kunststoffabfällen und Materialien aus Biomasse her, deren Umwandlung in für chemische Prozesse „passende“ Stoffe und Gemische in vielen Fällen eine Hydrierung, d. h. zusätzlichen Wasserstoff erfordert. Dieser Bedarf ist aber deutlich geringer als der Wasserstoffbedarf für die Erzeugung und Bereitstellung der entsprechenden Rohstoffe aus CO₂ und H₂.

Die Empfehlungen dieses Diskussionspapiers sind Ergebnis einer breit abgestützten Fachdiskussion mit den Experten der beteiligten Organisationen von Januar 2021 und einem anschließenden Dialog. Dabei wurden folgende **zentrale technologische Fragen** beleuchtet:

- Welche Verfahren für chemisches Kunststoffrecycling – Pyrolyse-, Vergasungs-, Hydrierungs-, Depolymerisations-, oder lösemittelbasierte Verfahren – werden in der Chemieindustrie als entwicklungsfähig, marktfähig und nachhaltig erachtet?
- Für welche Verfahren ist Know-how hinsichtlich Technologie, Praxiserfahrung, Ökonomie etc. vorhanden und wo sollte es auf- und ausgebaut werden? Wie ist der Entwicklungsstand (Technology Readiness Level – TRL), welche Neu-Entwicklungen sind zu erwarten? Sind Scale-up-Fähigkeit und TRL-Entwicklungsfähigkeit vorhanden? Welche Verfahren sind für welche Kunststoffabfallströme geeignet? Wo besteht besonderer Forschungsbedarf?
- Welche Abfallvorbehandlung und -konditionierung ist für das jeweilige chemische Recyclingverfahren notwendig? Welche Aufbereitungsverfahren für die Produkte des chemischen Recyclings werden seitens der Chemieindustrie benötigt und auf welche Plattformchemikalien/Wertschöpfungsketten ist abzielen? Wo ist die Schadstoffsene in diesen Verfahren? Welche Ausbeute- und Recyclingraten und somit welche ökologischen Vorteile ergeben sich in diesen Verfahren?
- Welche Recyclingverfahren eignen sich unter welchen Voraussetzungen nicht nur für vermischte und verschmutzte, sondern auch für Verbundwerkstoffe? In welcher Weise lassen sich verschiedene Recyclingverfahren kombinieren?
- Welche Wertschöpfungsketten existieren für Nebenprodukte (z. B. aus anorganischen Füllstoffen und Verstärkungsstoffen) und welche Aufarbeitungstechnologien werden dafür benötigt?
- Welche Nutzungsoptionen von grünem Wasserstoff im chemischen Recycling von Kunststoffabfällen bestehen – u. a. Hydrierung oder Aufarbeitung und Konditionierung der Produkte aus den jeweiligen chemischen Verfahren?

Parallel dazu werden folgende **übergreifende Fragestellungen** berücksichtigt:

- Welche Abfallströme und Abfallarten eignen sich für die chemischen Recyclingverfahren? Sind diese in entsprechender Menge, Qualität und Preis verfügbar? Welche Marktkonkurrenzen zum chemischen Recycling bestehen bei energetischen Verwertungsverfahren, hinsichtlich des Exports, der Andienung an Müllheizkraftwerke, an EBS-Kraftwerke, oder bei mechanischen Recyclingverfahren und welche Marktsynergien ergeben sich? Wie kann eine innereuropäische Verbringung sichergestellt werden, damit ein freier Warenverkehr im EU-Binnenmarkt für definierte Stoffströme und Behandlungsanlagen sichergestellt ist? Ist ferner sichergestellt, dass organikreiche Abfallfraktionen anstelle einer Deponierung in Europa tatsächlich einer Verwertung zugeführt werden? Welche Standardisierung gibt es bereits für die Qualitätssicherung der eingesetzten Abfälle, wie müssen diese auf die Verfahren angepasst werden?
- Wie ist ökobilanziell die Substitution bisher genutzter Rohstoffe durch Abfälle oder nachwachsende oder alternative Rohstoffe in Anlagen der chemischen Industrie zu bewerten? Welche Standardisierung, Normen und Zertifizierungsverfahren gibt es bereits für die Qualitätssicherung der eingesetzten Abfälle, wie müssen diese auf die Verfahren angepasst werden?
- Wie ist der zukünftige Bedarf an Produkten aus chemischem Recycling festzustellen und einzuordnen? Wie wäre die Einbindung der Produkte des chemischen Recyclings in die aktuelle

Chemie-/Raffinerieinfrastruktur zu erreichen und technologisch und ökonomisch zu bewerten?

- Wie müsste die Entwicklung der (regulatorischen, ökonomischen) Bedingungen für das chemische Kunststoffrecycling aussehen, um einen Einsatz und eine Umsetzung der Technologien in größeren Kapazitäten zu erreichen?
- Wie kann die Forschungsförderung die Entwicklung von Verfahren zum chemischen Kunststoffrecycling unterstützen? Wie kann eine engere Verzahnung der Abfallwirtschaft und der chemischen Industrie gelingen? Wie müssen politische Rahmenbedingungen bei der Transformation zu einer klimafreundlichen Wirtschaft gesetzt werden, damit die gesamte Wertschöpfungskette eingebunden wird und alle einen Vorteil darin sehen?

Dieses Diskussionspapier will Anregungen geben für

1. die Initiierung von Forschungsprogrammen der Bundesministerien;
2. laufende oder geplante Aktivitäten der beteiligten Organisationen und ihrer Mitglieder.

Inhalt

Forschungspolitische Empfehlungen zum chemischen Kunststoffrecycling – neue Verfahren und Konzepte	1
Executive Summary.....	1
Forschungspolitische Empfehlungen zum chemischen Kunststoffrecycling – neue Verfahren und Konzepte	3
1. Technologien des chemischen Recyclings	6
1.1. Abfallströme für das chemische Recycling: Verfügbarkeit, Marktkonkurrenzen, Vorbehandlung und Aufarbeitung	6
1.2. Verfahren für das chemische Recycling: Pyrolyse, Vergasung, Solvolyse und Depolymerisation – Technologiereife, Scale-up, Bewertung	8
1.3. Chemisches Recycling als Quelle für Plattformchemikalien – die Rolle des Wasser-stoffs .12	
1.4. Demonstrationsanlagen zum chemischen Recycling	14
2. Übergreifende Fragestellungen: Bewertungen, Abfallströme, Markt, Nutzung & Bedarf	14
2.1. Life Cycle Assessment (LCA) der Nutzungspfade	14
2.2. Regulatorische und ökonomische Bedingungen	15
3. Empfehlungen	17
3.1. Ableitung von Empfehlungen zu den technologischen Kernfragen in der Abfallkette	17
3.2. Ableitung von Empfehlungen zu übergreifenden Fragestellungen hinsichtlich der Abfallströme, des Marktes und der Nutzung & des Bedarfs an hergestelltem Rezyklat	20
Mitwirkende Autoren	22

1. Technologien des chemischen Recyclings

Vom Abfall zum Sekundärrohstoff: Die Schließung von Kreisläufen ist eine wichtige Option, um Ressourcen zu schonen und Nachhaltigkeitsziele zu verwirklichen. Eine wichtige Rolle spielt dabei der Kohlenstoffkreislauf. Bisher basieren kohlenstoffhaltige Produkte zum großen Teil auf fossilen Rohstoffen, und ein nicht unerheblicher Teil wird am Ende seiner Lebensdauer energetisch verwertet. Dabei wird CO₂ in die Atmosphäre entlassen, wo es zur Klimaerwärmung beiträgt. An die Stelle dieser linearen Kohlenstoffführung sollen zukünftig Kreisläufe treten, bei denen ein Produkt am Ende seiner Nutzungsdauer stofflich recycelt und zu neuen Produkten verarbeitet wird.

Im Folgenden wird ein Überblick der Verfahren zum chemischen Recycling, zur Abfallbehandlung und Aufarbeitung und zur Hydrierung gegeben, der einen Ausblick auf künftige Technologieentwicklungen und den Förderbedarf einschließt. Das chemische Kunststoffrecycling ist dabei eine Option für mögliche Kohlenstoff-Kreisläufe, welche von der „einfachen“ Wiederverwendung von Produkten bis zur stofflichen Kohlendioxidnutzung (Carbon Capture and Utilization CCU) reichen (Abb. 1).

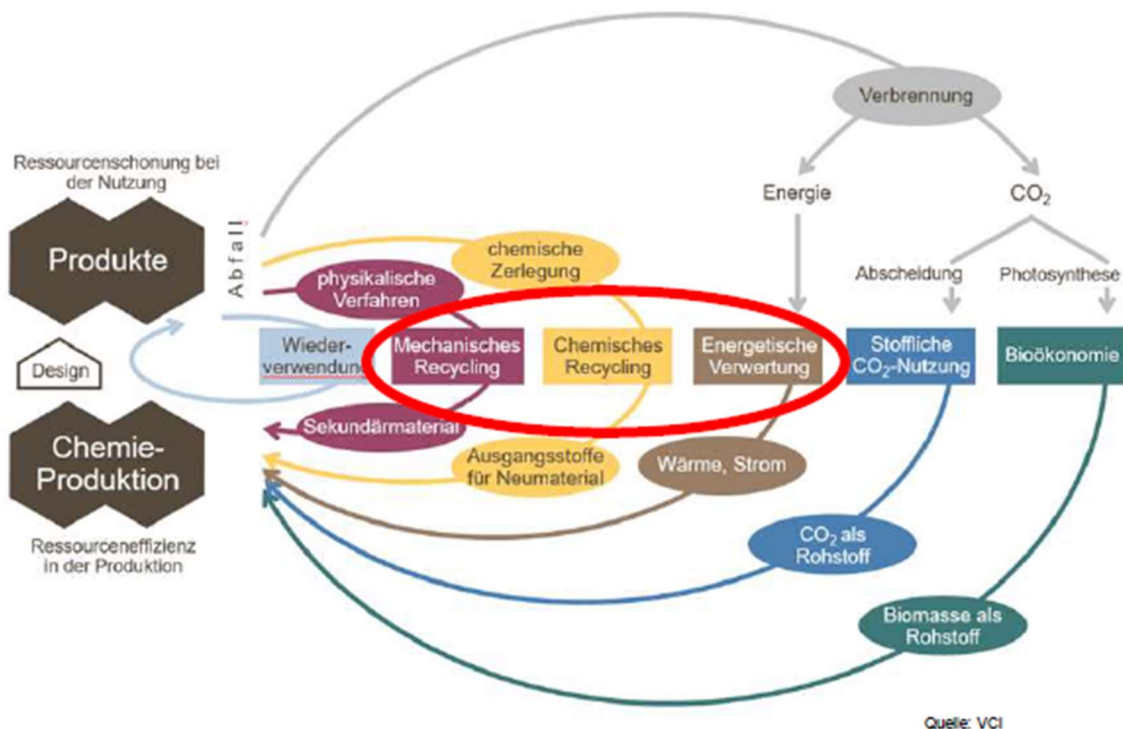


Abb. 1: Mögliche Kohlenstoff-Kreisläufe und Kreisläufe des Recyclings

1.1. Abfallströme für das chemische Recycling: Verfügbarkeit, Marktkonkurrenzen, Vorbehandlung und Aufarbeitung

Es besteht ein besonderer Bedarf für das Recycling von C-haltigen Restabfällen, die heute – unter Freisetzung des Kohlenstoffs als CO₂, – energetisch genutzt werden. **Das Potential zum Ausbau des mechanischen und chemischen Kunststoffrecyclings ist enorm:** Grundsätzlich kommen hierfür diejenigen Mengen vermischter und verschmutzter Kunststoffabfälle in Betracht, welche

derzeit der energetischen Verwertung zugeführt werden. Dies macht im Kunststoffbereich mehr als die Hälfte der kunststoffhaltigen Endverbraucherabfälle aus. Zusätzlich bietet das chemische Recycling eine Möglichkeit, hochgefüllte, additivierte und komplexe Kunststoffprodukte einer stofflichen Verwertung zuzuführen.

Zwischen dem mechanischen und dem chemischen Recycling besteht eine **Komplementarität der Verwertungswege** (Abb. 2.):

Case: Recycling of Light Weight Packaging Waste Comparison of Recovery Routes

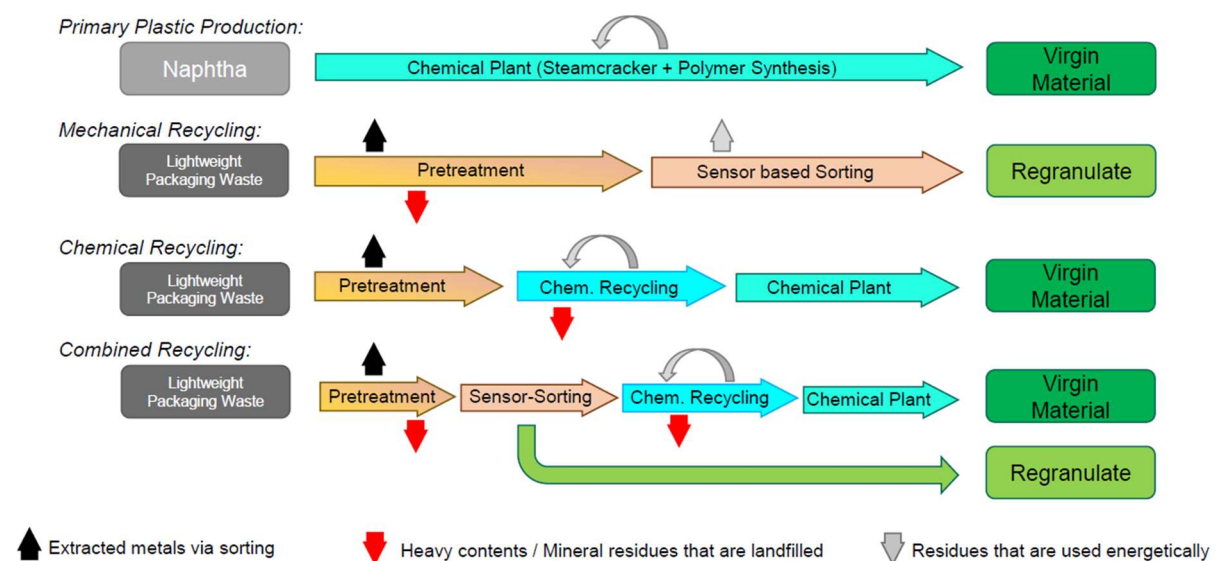


Abb. 2: Zusammenspiel von mechanischer Aufbereitung und chemischen Recyclingverfahren am Beispiel der Recyclingrouten für Leichtverpackungen; Quelle: Stapf, KIT/Institut für technische Chemie (ITC)

Das chemische Recycling kann neue, bisher nur schwer zugängliche Quellen von Kunststoffabfällen für die alternative Gewinnung von Kohlenstoff-basierten Rohstoffen erschließen. Eine besonders aussichtsreiche Technologie für Kunststoff-Abfallströme der Mischkunststoff-Weichfraktion (kleinstückige Folien) aus der Sortierung von Hausmüll und Gewerbeabfall und Leichtverpackungen (LVP) ist die Pyrolyse. Die Abfallströme, für die ein besonderer Behandlungsbedarf besteht und für deren abfalltechnische Prozessierung sich Pyrolyseverfahren besonders anbieten, sind durch folgende Kriterien gekennzeichnet:

- Kunststoffabfälle, die (unter den aktuellen Gegebenheiten) nicht oder nicht ökologisch und ökonomisch sinnvoll mechanisch recycelt werden können
- Kunststoffabfälle, die aufgrund Ihrer Eigenschaften (Materialverbunde, nicht-Schmelzbarkeit, Verunreinigung, Kleinteiligkeit, Eigenschaftsverlust durch Kettenabbau während der Lebensdauer oder durch vorher durchlaufene Zyklen an mechanischem Recycling etc.) nicht mechanisch rezykliert werden können (Pyrolyse als Alternative zur energetischen Verwertung).

Von besonderer Bedeutung für das jeweilige chemische Kunststoffrecyclingverfahren ist die vorhergehende **Aufbereitung** der Abfallströme; hier bestehen für die nachfolgende Verwertung Optimierungsmöglichkeiten zum Beispiel durch zusätzliche Zerkleinerung, Sieben, Sichten und/oder

durch Verdichten.

Mechanische und **chemische Recyclingverfahren** sollten in Abhängigkeit von den Abfallqualitäten ggf. **in Kaskaden** angewendet werden, um das Recycling insgesamt zu optimieren und dabei eine möglichst hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Die Unternehmen der Recyclingwirtschaft sehen mittelfristig ein realisierbares Potential für chemische Recyclingverfahren von über 1 Million Tonnen Kunststoffabfälle aus Endverbrauchersammlungen pro Jahr in Deutschland.¹ Ziel der kombinierten Nutzung von mechanischen mit ergänzenden chemischen Verfahren sind aus der technischen und ökologischen Perspektive

- zum einen eine sinnvollere und ökologisch nachhaltige Nutzung der existierenden Materialflüsse,
- zum anderen eine maximale Ausdehnung des Kohlenstoff-Kreislaufs über die chemischen Wertschöpfungsketten, die eine möglichst vollständige Rückführung allen anfallenden Kohlenstoffs, in wiederholten Zyklen in unterschiedlichen Produkten erlaubt.²

Ebenfalls zu berücksichtigen ist die wirtschaftliche Perspektive, aus der über eine ergänzende Nutzung der Recyclingtechnologien

- wirtschaftlich tragfähige Lösungen für die Abfall- und Recyclingfragen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Recyclingindustrie gefunden und
- weitere Rohstoffquellen für die Chemie- und Kunststoffindustrie mit weiter geschlossenen Produktkreisläufen ermöglicht werden können.³

Hierfür ist es notwendig, das **chemische Kunststoffrecycling in Ergänzung zum mechanischen Kunststoffrecycling technologisch weiterzuentwickeln** und die regulativ-politischen Rahmenbedingungen adäquat zu gestalten (siehe unten).

1.2. Verfahren für das chemische Recycling: Pyrolyse, Vergasung, Solvolyse und Depolymerisation – Technologiereife, Scale-up, Bewertung

Die technischen Verfahren zu Kunststoff-Recycling lassen sich grundsätzlich einteilen in mechanische, physikalische und chemische Verfahren (Abb. 3). Chemische Verfahren unterscheidet man in solvolytische und thermochemische Verfahren; letztere lassen sich wiederum aufteilen in die Vergasung (in kleinste chemische Moleküle) und in die Pyrolyse bzw. analoge Technologien (z. B. Verölung in höhermolekulare Kondensate, Feststoffe und Gase), aus welchen sich chemische Grundstoffe herstellen lassen. Die Pyrolyse und analoge Technologien können thermisch, katalytisch unter inerten oder hydrierenden Bedingungen erfolgen.

¹ Köhne/ Ephan, Fachgespräch von BKV, DECHEMA, PED und VCI zum „Chemisches Kunststoffrecycling – neue Verfahren und Konzepte“, 14. Januar 2021

² Ist eine Wiederverwertung über das Recycling ökologisch und ökonomisch nicht sinnvoll, kann die chemische Nutzung von Kohlenstoff als CO₂ erfolgen (s. dazu Abb. 1).

³ Im Rahmen der „Roadmap Chemie 2050“ wird für den Pfad einer treibhausgasneutralen Chemieproduktion von einer anwachsenden Rohstoffmenge aus dem chemischen Recycling heraus von bis zu 1,2 Mio. t/a, aus einer Gesamtabfallmenge von 2,4 Mio. t/a, im Jahr 2050 ausgegangen.

Chemische Recyclingverfahren ergänzen das mechanische Recycling insbesondere für Wertstoffströme, die dort nicht ökologisch und ökonomisch sinnvoll verarbeitet werden können.

Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle

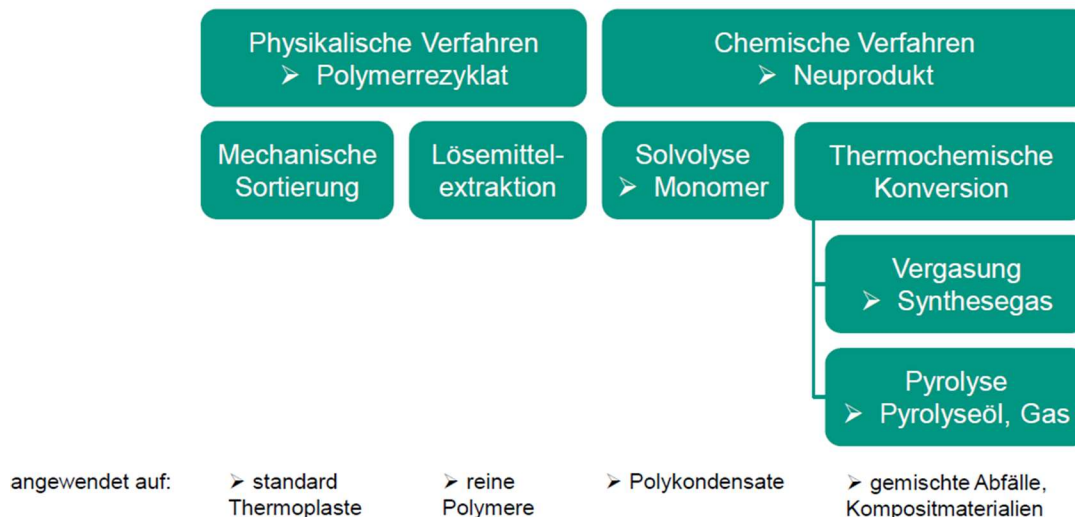


Abb. 3: Zusammenspiel von mechanischer Aufbereitung chemischer Recyclingverfahren; Quelle KIT

Für das Recycling von „Reinkunststoffen“ hoher Qualität und geringen Zuschlagsstoffe eignen sich insbesondere mechanisch-physikalische Verfahren. **In speziellen Fällen können auch Solvolyse- und Depolymerisationsverfahren in Frage kommen**, so beispielsweise für bestimmte Abfallfraktionen, welche häufig polyesterbasierte Systeme enthalten, wie etwa Abfälle aus PET, PBT, Polyacrylate, Polyacetalen, PA oder PUR usw. Je nach Polymer kann unter anderem das lösungsmittelbasierte Depolymerisieren, die Glykolyse, die Methanolyse oder die Hydrolyse bzw. die Lösung in NaOH erfolgen. Solvolytische Verfahren spalten das Polymer in kleinste Moleküleinheiten bzw. in Monomere. Die Grundbausteine, d. h. Monomere oder Reaktionsprodukte (z. B. Bis(hydroxyethyl)terephthalat - BHET, Dimthylterephthalat - DMT bei PET, Polyole bei PUR), werden aus dem Reaktionsaustrag isoliert und für die nachfolgende Nutzung und Verwertung spezifikationsgerecht gereinigt. **Auch die verschiedenen chemischen Recyclingverfahren können sich ergänzen**, insbesondere bei der Aufarbeitung von Abfallstoffströmen mit Polymergemischen, z. B. PET/PE-Verbundverpackungen.

Je nach solvolytischem oder depolymerisierendem Verfahren sind unterschiedliche Anforderungen an den abfallbasierenden Rohstoff zu stellen, um wirtschaftliche und ökologisch sinnvolle Ausbeuten beim chemischen Recycling zu erreichen. Etabliert sind Solvolyse-Verfahren vornehmlich für das chemische Recycling von Polyester-Abfällen; hier werden Wiedergewinnungsquoten von über 90 % reiner Monomere bezogen auf das im Inputstrom enthaltenen PET/Polyester erreicht. Grundsätzlich kann die gleiche chemische Recyclingtechnologie für alle Polymere der Polyester-Familie zum Einsatz kommen. Somit ist für **die Entwicklung auch von solvolytischen Verfahren die Anpassung an die Reinheit des Inputstroms, abhängig von der Herkunft des Restabfalls, eine wichtige Fragestellung.**

Wichtig für die energetische (Gesamt-)Effizienz und die Nachhaltigkeit solvolytischer Prozesse sind eine möglichst kontinuierliche Prozessführung und eine energieeffiziente Einstellung der Reaktionsparameter sowie eine hohe Ausbeute und der entsprechende Gesamtumsatz.

Thermochemische Verfahren eignen sich vor allem für das Recycling von gemischten Kunststoffabfällen niedriger Qualität oder komplexer Zusammensetzungen mit hohem Kohlenwasserstoffanteil. Die Produktverteilung der aus Pyrolyseverfahren entstehenden Öle und Gase und deren Qualität ist sehr stark abhängig von der eingesetzten Abfall-Mischung und der eingesetzten Technologie. Bei der Pyrolyse verschiedener Kunststoffmischungen lassen sich Kondensatanteile von über 50 Massen-% und Gasanteile von rund einem Drittel bei der thermischen Pyrolyse realisieren. Für die Wirtschaftlichkeit künftiger großtechnischer Anlagen ist die Einstellung des Kondensat- bzw. des Gasanteils im Pyrolyseprodukt in Abhängigkeit von den Standortbedingungen ein wichtiger Faktor; insbesondere für die Frage, ob Pyrolyseverfahren zentral (inkl. Gasnutzung) oder dezentral (Fokus auf Pyrolyseöl) in die bestehenden Wertschöpfungsketten der Raffinerie- und Chemieindustrie eingepasst werden sollten, sind Untersuchungen zur Optimierung der pyrolytischen Verfahren und der Pyrolyseprodukte wichtig, um eine bestmögliche Weiternutzung der daraus entstehenden Stoffe zu ermöglichen. Neben der Herstellung der wiederverwertbaren Kondensate und der Gasfraktionen ermöglicht das thermochemische Pyrolyseverfahren auch das Ausschleusen von eventuell im Abfall vorhanden kritischen Substanzen in der festen Reststofffraktion.

Eine wichtige zukünftige großtechnische Anwendung der **Pyrolyse** aus der Perspektive einer Treibhausgas (THG)-neutralen Chemieindustrie ist die Bereitstellung von Rohstoffen für die weitere Aufarbeitung und Produktion in der Chemieindustrie, welche über den Steamcracker bzw. auch alternative Wege wie einer Vergasung erfolgen kann. Großtechnisch erfolgskritische Faktoren sind die Dekontamination und die Abtrennung von Heteroatomen sowohl für die Herstellungsverfahren von Synthesegas als auch von Pyrolyseöl aus Kunststoffabfällen. Um das Wasserstoff- zu Kohlenstoffverhältnis wie benötigt einzustellen und die Rückgewinnung besonders von Halogenen zu ermöglichen, wird zusätzlich Wasserstoff benötigt. Durch das Pyrolyseverfahren werden zudem eventuelle Störstoffe aus der jeweiligen Abfallfraktion ausgeschleust. Dies ist ein wesentlicher Beitrag zur positiven Umweltbilanz. Wichtiges Forschungsfeld ist hierbei die Spezifikation der genauen Input-Anforderungen der nachfolgenden Wertschöpfungsstufen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Komponentenspektrum eines aus Kunststoffabfällen gewonnenen Pyrolyseöls sich deutlich von dem der erdölbasierten Route unterscheiden kann.

Für den robusten Betrieb der Vergasungs-/Pyrolyse-Prozesse mit Feedstock aus der Abfallaufbereitung sind diese adäquat mit besonderer Aufmerksamkeit zu konfektionieren, um Verkokung und Korrosion in den Anlagenteilen zu vermeiden und die Haltbarkeit etwaig verwendeter Katalysatoren zu garantieren (Vermeidung/Ausschleusung von Katalysatorgiften). Insbesondere gilt es darum, Heteroatome vor der weiteren Verarbeitung z. B. im Steamcracker abzutrennen. Dazu zählen z. B. Halogene, Silizium oder Metalle, die als Additive bzw. Katalysatoren bei der Kunststoffherstellung und Compoundierung zugesetzt werden und somit im Abfallrohstoff vorkommen können. Alle Verfahren des chemischen Recyclings müssen trotz Vorsortierung verfahrenstechnisch flexibel sein, sodass bei sich ändernden Zusammensetzungen der Einsatzstoffe immer noch Zwischenprodukte mit gleichbleibender, spezifikationsgemäßer Qualität erreichbar sind.

Neben den beschriebenen Pyrolyseverfahren, deren Produkte wie Pyrolyseöle und Pyrolysegase in weiteren chemischen Stufen wie z. B. in einem Cracker wieder zu neuen chemischen Ausgangsmolekülen für die Kunststoffproduktion verarbeitet werden, gibt es noch weitere pyrolytische Verfahren, welche mit niedrigeren Temperaturen und katalytischen Prozessen aus bestimmten technischen Kunststoffsorten hochwertige Monomere und chemische Bausteine recyceln. Auch in diesen Verfahren beeinflussen die Qualität der Kunststoffabfalls die Rezyklerausbeute und die Art der Zielmoleküle.

Die höchste Flexibilität aller Verfahren in Bezug auf den Abfall-Einsatzstoff weisen **Vergasungsprozesse** auf. Dabei wird Synthesegas z. B. für die Methanolsynthese in Großanlagen erzeugt. Der **Wasserstoffbedarf** ist entsprechend höher als im Falle der Pyrolyseprozessapplikationen und der Kapitaleinsatz für diese großen zentralen Einheiten ist besonders hoch. Hier kommt es dementsprechend besonders auf einen Technologiereifegrad (TRL) auf Basis von Vorentwicklungen hinsichtlich der Prozesseffizienz und der Reinigung des Synthesegases an.

Für die Überführung in die nächsten Produktionsstufen zur Herstellung von chemischen Grundbausteinen ist das **Wasserstoff-/Kohlenstoff-Verhältnis** wichtig. So wird beispielsweise für die Methanolsynthese nach einer mehrstufigen Synthesegasaufbereitung ein Wasserstoff-/Kohlenmonoxid-Verhältnis von 2:1 angestrebt.

Wichtig für die Realisierung großtechnischer Anwendungen von Pyrolyse- und Vergasungsverfahren sind die Produktoptimierung und die Skalierung. Dies gilt insbesondere für die Weiterentwicklung der thermochemischen Konversion und der Produktaufbereitung, da die Gesamteffizienz und -verfügbarkeit des Verfahrens vom am wenigsten ausgereiften Prozessschritt bestimmt wird (s. Abb. 4).

Beispielprozesse: Technologiereife

Technology Readiness Level (TRL)



Technologie	Vorbehandlung Einsatzstoff	Konversion	Produkt-aufbereitung	Produkt-verwendung
Vergasung	9	8	7	Methanol-Synthese
Pyrolyse	9	5 - 6	3	Steamcracker

- TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie
- TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
- TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung
- TRL 7: Prototypsystem im Einsatz
- TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
- TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

Chemisches Recycling bisher nur in Einzelfällen mit ausgewählten Einsatzstoffen

KIT, 2019: „BKV-Studie“ Thermal Processes for Feedstock Recycling of Plastics Waste, <http://www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html>

Abb. 4: Technologiereife der einzelnen Prozessschritte chemischer Recyclingverfahren; Quelle KIT

Fazit: Das chemische Recycling ermöglicht die stoffliche Nutzung einer breiten Palette kohlenstoffreicher (polymerhaltiger) Abfallströme. Die Substitution fossiler Monomerquellen kann einen

zentralen Beitrag für eine nachhaltige zirkuläre Polymerwirtschaft leisten. Für eine nachhaltige, möglichst quantitative Schließung des Kohlenstoffkreislaufs unter ökologischen und ökonomischen Kriterien ist ein synergistisches Zusammenwirken von mechanischem und chemischem Recycling unabdingbar. Offene Punkte für eine umfassende Umsetzung des chemischen Recyclings sind

- die **Definition und Kommunikation der Anforderungen an zu trennende und zu verarbeitende Wertstoffströme** innerhalb der Wertschöpfungskette an die Abfallwirtschaft und an bzw. innerhalb der Chemieindustrie;
- eine adäquate Diskussion der in der Chemieindustrie **tatsächlich benötigten Reinheitsanforderungen** an r-Monomere (recycelte Polymergrundbausteine), die Untersuchung von Zuschlags- und Verstärkungsstoffen im Hinblick auf das chemische Recycling und die Diskussion welche Zuschlagsstoffe ein chemisches Recycling fördern,
- die offene Frage, wie gut einzelne Verfahren hinsichtlich schwankender Abfallqualitäten reagieren können, um eine geforderte **Spezifikation der Zwischenprodukte** zu erreichen,
- die **Analyse und Optimierung anfallender Gase und anorganischer Bestandteile**, um eine Weiterverwendung zu ermöglichen und
- die **optimale Skalierung und Einbindung von Recyclingverfahrens in stoffliche Wertschöpfungsketten**.

Die Anerkennung der Produkte aus chemischen Recyclingverfahren als Recycling im abfallrechtlichen Sinne und in Verbindung hiermit als anerkannter Beitrag zur Erfüllung aller relevanter Recyclingquoten, unabhängig vom Abfallstrom, gehört zu den zentralen Forderungen an die regulativen Rahmenbedingungen (s. Kap. 2.2.)⁴, denn es ergeben sich erhebliche Synergien sowohl zwischen dem mechanischen und dem chemischen Recycling als auch zwischen den unterschiedlichen chemischen Recyclingverfahren.⁵ Voraussetzung für die Anerkennung sind die Verfügbarkeit von Stoffstromanalysen (Massen-, Energie-, Treibhausgasbilanzen, etc.) und ganzheitliche Bewertungen. Nationale, das Recycling hinsichtlich der Quotenanrechenbarkeit für spezifische Abfallströme einschränkende Sonderwege, wie beispielsweise im deutschen Verpackungsgesetz, sind mit Blick auf die notwendige Technologieoffenheit kritisch zu bewerten.

1.3. Chemisches Recycling als Quelle für Plattformchemikalien – die Rolle des Wasserstoffs

Die Zukunft des Wasserstoffs in der Welt der Technologiepolitik ist bunt (zur Farbenlehre von Wasserstoff, s. Abb. 5). Die **Nutzung von Wasserstoff** ist ein wichtiger Weg für die Integration erneuerbarer (elektrischer) Energien in die Industriesektoren wie zum Beispiel der Chemieindustrie. Um zusätzlichen Wasserstoff alternativ für die Energieversorgung und für chemische

⁴ Grundsätzlich umfasst der Begriff des Recyclings auch die chemische Verwertung (s. Kreislaufwirtschaftsgesetz): Die Quoten des Verpackungsgesetzes zur stofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen stellen auf eine Werkstoffliche Verwertung ab.

⁵ Volk, R., et al: Techno-economic Assessment and Comparison of Different Plastic Recycling Pathways – a German Case Study, in Journal of Industrial Ecology, 2021, 1-20; <https://doi.org/10.1111/jiec.13145>

Syntheseprozesse nutzen zu können, sind unterschiedliche technologische Optionen weiterzuentwickeln. Insbesondere, weil die Verfügbarkeit von sogenanntem „grünen Wasserstoff“ begrenzt ist, muss für die Entwicklung von Technologien zur Wasserstoffnutzung Technologieoffenheit bestehen. Leitendes Kriterium für die Auswahl von Technologien sollte die Verminderung von CO₂-Emissions-Äquivalenten sein.

Grüner Wasserstoff	Türkiser Wasserstoff	Blauer Wasserstoff	Grauer Wasserstoff
Elektrolyse von Wasser zu H ₂ und O ₂	Methanpyrolyse von (fossilem) Methan zu H ₂ und Kohlenstoff, Langfristige Nutzung des Kohlenstoffs	Steam Reforming oder partielle Oxidation fossiler Brennstoffe	Steam reforming oder partielle Oxidation fossiler Brennstoffe
Verwendung von EE-Strom (grüner Strom)	Verwendung von EE-Strom zur Wärmebereitstellung	Abscheidung des entstehenden CO ₂ und CCS (Carbon Capture and Storage)	Freisetzung des CO ₂ in die Atmosphäre

Abb. 5: Zur „Farbenlehre“ des Wasserstoffs (Quelle BASF)

Auch für die **Aufarbeitung der Produkte der Kunststoffpyrolyse** und damit für die Nutzbarmachung von *auf diesem Wege* recyceltem Kohlenstoff – im Steamcracker wird Wasserstoff benötigt; dies würde nicht gelten für solvolytische Verfahrensoptionen im chemischen Recycling. Pyrolyseöle aus Kunststoffen enthalten, je nach eingesetztem Kunststoff, unterschiedliche Anteile an Paraffinen, Aromaten, Sauerstoff- und Stickstoffverbindungen sowie Halogene: Für den Einsatz im Steamcracker und für die anschließende Weiterverarbeitung in den chemischen Syntheseprozessen ist eine nahezu vollständige Abtrennung der Heteroatome, eine Hydrierung der Doppelbindungen und eine Aromatenhydrierung notwendig.

Zur Einstellung des Wasserstoff-zu-Kohlenstoff-Verhältnisses wird bei biogenen oder abfallbasierten Einsatzstoffen gegenüber fossilen Rohstoffen Zusatzwasserstoff benötigt. Dies gilt besonders für die Synthesegasherstellung durch Vergasung für die Methanol- oder Ammoniakherstellung, aber in geringerem Maße auch für die Aufarbeitung von Pyrolyseprodukten aus Altkunststoffen selbst.

Der Wasserstoffverbrauch hängt in hohem Maße von der Ausgestaltung des Gesamtprozesses ab.⁶ Es gibt verschiedene Punkte, die den Wasserstoffverbrauch beeinflussen:

- Unterschiedliche Kunststoffe haben bei der Aufarbeitung einen unterschiedlichen Wasserstoffbedarf wegen der erforderlichen Nachbearbeitung (Hydrocracken, thermisches Cracken). Auch Kunststoffe mit mehr Heteroatomen haben einen höheren Wasserstoffverbrauch; ebenso – wenn auch in geringerer Quantität – auch Kunststoffe aus Biomasse je nach Ausgangsstoff und gewünschtem Produkt.
- Ungesättigte Kunststoffe und solche mit hohem Aromatenanteil wie zum Beispiel Polymere des Styrols, haben einen hohen Wasserstoffverbrauch.

⁶ Der Wasserstoffbedarf kann beispielsweise in einem Fenster von 5 bis > 50 kg Wasserstoff/ Tonne Naphtha liegen.

- ◆ Pyrolysetechnologie: Es gibt Pyrolyseverfahren, die zu hohe Aromatengehalte erzeugen.
- ◆ Reaktortechnologie: Je nach Reaktor muss die Hydrierung im Wasserstoffüberschuss gefahren werden, so dass selbst bei Rückführung mit Verlusten zu rechnen ist.

1.4. Demonstrationsanlagen zum chemischen Recycling

Gerade im Bereich des chemischen Recyclings ist zum Aufbau der Schnittstellenkompetenzen über die verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette des Recyclings und über die Branchengrenzen hinweg die **Etablierung von Demonstrationsanlagen** notwendig, deren Ergebnisse die genannte ganzheitliche Bewertung und Entscheidungsfindung ermöglichen. Dabei können ggf. vorhandene Technologien und das gegebene Know-how weitgehend genutzt werden.

Wichtig für den Aufbau zentraler Verfahren des chemischen Recyclings ist die **kosteneffiziente logistische Einbindung der Ver- und Entsorgung in einen Chemiestandort** und die gemeinsame Nutzung von vorhandenen oder aufzubauenden (Forschungs-)Infrastrukturen. Dabei sollte auch identifiziert werden, an welcher Stelle in der Wertschöpfungskette chemische Recyclinganlagen optimal integrierbar sind. Hier gibt es möglicherweise Unterschiede in Bezug auf Abfallarten (post industrial vs. post consumer) und auf das jeweilige Recyclingverfahren der daraus resultierenden Abfallfraktionen.

2. Übergreifende Fragestellungen: Bewertungen, Abfallströme, Markt, Nutzung & Bedarf

2.1. Life Cycle Assessment (LCA) der Nutzungspfade

Die Erstellung von Ökobilanzen und Lebenszyklus-Bewertungen (LCA) erscheint auf den ersten Blick einfach – erfordert im Detail jedoch die Einbindung komplexer Randbedingungen, Kriterien und Untersuchungsverfahren. Insbesondere stehen nur begrenzte Daten (mit Unsicherheiten) zur Verfügung, die aus früheren Pilotverfahren und Forschungsprojekten stammen; auch können wegen des Fehlens realer Vorbilder keine Daten aus Vergleichsprozessen herangezogen werden.

Bei der Erstellung von Ökobilanzen ist die Frage der Systemgrenzen und der gewählten Allokation entscheidend insbesondere wie unten dargestellt im Zusammenhang mit Systemerweiterungen (zum Beispiel physisch oder monetär) sowie anderer berücksichtigter Umweltindikatoren. Aufgrund dieser zahlreichen Probleme wurden Ökobilanzen im Kunststoffrecycling bisher oft in Form von „Produktökobilanzen“ durchgeführt.

Trotz dieser erheblichen Lücken und Unsicherheiten lassen sich durch Produktökobilanzen aber durchaus die grundsätzlichen Haupteinflussfaktoren in der Recyclingkette abschätzen und den Einfluss unterschiedlicher mögliche Produkte (ggf. über Gutschriften) darstellen. Darüber kann gezeigt werden, welche Faktoren in der Energie und Massebilanz einen Einfluss auf den Recyclingprozess haben.

Grundsätzlich ist zwischen „Attributional“ und „Consequential“ LCAs zu unterscheiden. (Attributional) LCAs berücksichtigen nicht, dass Güter nur begrenzt verfügbar sind. „Attributional“ LCA rechnen mit „Durchschnittswerten“, Opportunitätskosten spielen keine Rolle. Consequential LCAs versuchen, die tatsächlichen Werte abzubilden (Marginaleffekte), indem keine Durchschnittswerte/-prozesse gewählt werden; hierbei entstehen allerdings erhebliche Datenprobleme, zudem sind umfassende Systemkenntnisse erforderlich. Consequential LCAs sind zu bevorzugen, wenn Entscheidungen getroffen werden sollen.

Die Unternehmen in der Kunststoffabfall-Wertschöpfungskette stehen vor der Aufgabe, eine möglichst optimale technische Recyclingkaskade für die jeweiligen Abfallströme auszuwählen. Doch inwieweit LCAs diese Auswahl erleichtern können, steht infrage. Zum jetzigen Zeitpunkt lässt sich sagen, dass Attributional LCAs zur vergleichenden Bewertung der Verfahren kaum geeignet sind. Consequential LCAs können helfen, Bewertungen unter Verwendung verschiedener Umweltindikatoren, die nicht verrechenbar nach ISO 14040ff. sind, vorzunehmen.

Eine LCA zur Bewertung von Kunststoffrecyclingprozessen in existierenden Wertschöpfungsketten der Abfallaufbereitung könnte gegebenenfalls über die Auswahl eines geeigneten „Leitindikators“ gestaltet werden, mit dem der Beitrag zur Erreichung eines konkreten Umweltziels, wie zum Beispiel die THG-Emissionen, bewertet werden kann. Eine andere Möglichkeit wäre die Nutzung aggregierter Kennzahlen über die analoge Orientierung an der ISO 14040 ff.⁷ oder der Ökoeffizienzanalyse etc. Hierbei ist die Frage der konkreten Zielstellung wichtig, und es ist eine Entscheidung zu treffen, ob Produkte, Branchen oder technische Systeme beurteilt werden sollen.⁸

Die Schlussfolgerungen für die Bewertung der Ökobilanzen von Verfahrensoptionen zum Kunststoffrecycling lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Ergebnisse von Ökobilanzen hängen im hohen Maße vom konkreten Vorgehen und der gewählten chemischen Verfahrenstechnologien ab. Darüber hinaus gilt: Je komplexer, je länger der betrachtete Zeitraum und je unterschiedlicher die erzeugten Produkte sind, desto stärker können die Ergebnisse variieren.
- LCAs sind nur eingeschränkt geeignet für die Information auf der Ebene von politischen oder unternehmerischen Entscheidungen. Sie können **nur zur Entscheidungsunterstützung** dienen: Wichtiger als die eigentlichen Ergebnisse ist es zu verstehen, *wie* diese zustande kommen und was die *Einflussfaktoren* sind.

2.2. Regulatorische und ökonomische Bedingungen

Die Kunststoffabfallmengen haben sich in den letzten 25 Jahren, bei gleichbleibender Menge der post-industrial Abfälle, in der Summe in Deutschland verdoppelt.⁹ Dies begründet (Kap. 1.1.) die

⁷ In Diskussion gebracht wird auch der Eco-Indikator 99 zur schadensorientierten Wirkungsabschätzung von Umwelteinflüssen über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes dient über eine aggregierte Kennzahl für die Umweltwirkung eines Produktes.

⁸ Natürlich darf auch der Adressat der Ergebnisse insbesondere hinsichtlich der Komplexität der Darstellung nicht aus den Augen verloren werden.

⁹ Conversio-Studie: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019

Notwendigkeit, ergänzende technische Verfahrensoptionen im Bereich des Kunststoffrecyclings zu etablieren.

Chemische Verfahren sind als Ergänzung zu mechanischen Verfahren zu sehen. Denn, wie in der technologischen Analyse gezeigt, ist das mechanische Recycling durch die Materialeigenschaften der Abfallfraktionen (soweit nicht sortenrein und sauber) in seinen Anwendungsmöglichkeiten begrenzt. Dies liegt nicht zuletzt an den Anforderungen an die Produktqualitäten (Marktakzeptanz) und an den begrenzten Einsatzmöglichkeiten des jeweiligen Rezyklats (soweit Neuware nicht 1:1 ersetzt wird). Basis für die Abgrenzung zur energetischen Verwertung (siehe Abb. 1 zu den Kreisläufen des Kohlenstoffs) müssen LCA/ Ökobilanzen sowie Massenbilanzen sein (s. Kap. 2.1.).

Es bedarf einer Auswahl von vielfältigen Verfahrensoptionen, um die existierende Materialvielfalt an Kunststoffen am Abfallmarkt wieder als Rohstoff in eine zirkulären Kreislaufwirtschaft zu bringen. Dies gilt insbesondere für diejenigen Abfälle und Stoffströme, die heute (noch) energetisch verwertet werden. Technologische Möglichkeiten und regulatorische und ökonomische Rahmenbedingungen der Recyclingverfahren müssen für die Realisierung einer Kreislaufwirtschaft zusammengedacht werden. Die positive Entscheidung für eine Anwendung von chemischen Recyclingverfahren hat dabei folgende wichtige **Voraussetzungen**:

- eine Bestätigung der ökologischen Tragfähigkeit und Effizienz durch LCA/ Ökobilanzen (siehe dazu a. Kap. 2.1.) und die allgemeine gesellschaftliche, politische und wirtschaftswettbewerbliche Akzeptanz des „Massenbilanzansatzes“;¹⁰
- wirtschaftlich akzeptable technologische Reife und adäquate Scale-up-Möglichkeit der Verfahrenstechnologien zum chemischen Recycling;
- etablierte und eingespielte Infrastrukturen in den Wertschöpfungsketten zu den jeweiligen Abfallströmen (Sammlung, Trennung, Aufbereitung und Logistik) und
- eine Anrechenbarkeit der Produkte chemischer Recyclingverfahren in den relevanten gesetzlichen Regelungen als Recycling im abfallrechtlichen Sinne und die hiermit verbundene Anrechenbarkeit auf alle relevanten Recyclingquoten.

Insbesondere die **adäquate Berücksichtigung des chemischen Recyclings im Abfallrecht** ist für die Chemieindustrie eine Grundvoraussetzung. Im EU-Abfallrecht wird das Recycling bereits technologieoffen betrachtet. So erfüllen mechanische und chemische Recycling-Verfahren gleichermaßen die Anforderungen der Recycling-Definition gemäß Art. 6 EU-Abfallrahmenrichtlinie.¹¹ Die Auch EU-Verpackungsrichtlinie¹² greift gemäß Artikel 3 Nummer 2c direkt auf diese Definition zurück. Diese Technologieoffenheit muss bei den anstehenden abfallrechtlichen Novellierungen auf EU-Ebene erhalten bleiben und auch im legislativen Rahmen der EU insgesamt berücksichtigt werden. Bleibender Diskussionspunkt ist die Anerkennung des chemischen Recyclings in der deutschen Gesetzgebung, speziell für Verpackungen. Hier sollten sowohl mechanische als auch chemische Recyclingverfahren – analog zur EU – in der Gesetzgebung und Regulierung (inklusive

¹⁰ Zur Massenbilanz siehe beispielsweise „View Paper “Mass balance approach to accelerate the use of plastic waste feedstocks in chemical processes”, CEFIC/ Plastics Europe, Feb. 2021

¹¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A02008L0098-20180705>

¹² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:01994L0062-20180704>

der Anrechnung auf die Recyclingquoten) technologieoffen als Recycling im abfallrechtlichen Sinne anerkannt werden. Ferner besteht zur Unterstützung eines reibungslosen Recyclings innerhalb der EU Klärungs- bzw. Umsetzungsbedarf hinsichtlich folgender **zentraler Aspekte im Abfallrecht**:

- EU-weite Harmonisierung des Vollzugs der Abfall-Ende-Eigenschaften;
- Optimierung des Vollzugs der Abfallverbringungsverordnung: Keine unnötigen Behinderungen des Transports von Abfällen und Sekundärrohstoffen über Staatsgrenzen.

Die Chancen und Herausforderungen des chemischen Kunststoffrecyclings müssen auf allen relevanten Ebenen (Politik, Industrie, Wissenschaft) objektiv und ergebnisoffen diskutiert werden.

2.3. Forschungsförderung

Das Thema Kunststoffrecycling und insbesondere das chemische Kunststoffrecycling hat wichtige Berührungspunkte zu dem aktuell politisch ebenfalls hochaktuellen Thema der Treibhausgasneutralität der Grundstoffindustrie und ihrer Partner in den Wertschöpfungsketten. Wichtige Stichworte dazu sind Power-to X, Sektorenkopplung, Rohstoffwandel/Wechsel der Rohstoffbasis und Wasserstofftechnologien.

Voraussetzung für einige Verfahren des chemischen Recyclings ist es, möglichst erneuerbaren Wasserstoff für die Aufarbeitung und Konditionierung, z. B. nicht vollständig oxidiertes Produkte der Pyrolyse für die Raffinerie-/Chemieindustrie zu nutzen (siehe Kap. 1.3.).

Dabei werden Anknüpfungspunkte für eine Förderung in der Fördermaßnahme „Wasserstoffrepublik Deutschland“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) sowie über die „Technologieoffensive Wasserstoff“ des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi) und die „Nationale Wasserstoff-Strategie“ (NWS) der Bundesregierung gesehen.

3. Empfehlungen

Die oben skizzierten Analysen werden im Folgenden zu Empfehlungen zu „Technologischen Kernfragen der Sekundärrohstoffkette“ (Kap. 3.1.) und zu „Übergreifenden Fragestellungen: Sekundärrohstoffströme, Markt, Nutzung und Bedarf“ (Kap. 3.2.) verdichtet

3.1. Ableitung von Empfehlungen zu den technologischen Kernfragen in der Abfallkette

Der Know-how-Aufbau für die verschiedenen technologischen Optionen des Kunststoffrecyclings inklusive einer Praxiserfahrung und einer wirtschaftlichen Belastbarkeit ist zentral. Zu berücksichtigen ist der jeweilige technologische Entwicklungsstand bestehender Verfahren, die Aussicht von Neu-Entwicklungen und die Scale-up- und TRL-Entwicklungsfähigkeit. Sowohl die jeweiligen technologischen Optionen als auch ihrer Produkte müssen dabei möglichst nahtlos in die aktuelle Chemie- und Raffinerieinfrastruktur integrierbar sein (drop-in Lösungen).

Forschungs- und Förderungsbedarf hinsichtlich der Wasserstoffnutzung für den Einsatz in chemischen Recyclingprozessen bestehen insbesondere hinsichtlich

- des Wasserstoffeinsatzes in der Pyrolyse
- der Hydrierung von z. B. Pyrolyseölen, Kunststoffen
- der Anreicherung bzw. der Gleichgewichtseinstellung von Synthesegas aus der Vergasung von Kunststoffabfällen,
- der effizienten Kopplung der Abfallverwertungs- mit der chemischen Industrie zum Ausbau der zirkulären Kunststoffwirtschaft.

Die **Herausforderungen** liegen

- in der Erhöhung der technologischen Reife
- im Scale-up
- in den Investments in Demonstrationsvorhaben und Reallaboren
- im Aufbau von Infrastrukturen wie Wasserstoff-Pipelines und in der Kostenreduktion für die Erzeugung und anschließender Nutzungsmöglichkeit von grünem Wasserstoff
- in der Zertifizierung des Recyclinganteils im Pyrolyseprodukt und
- in der Akzeptanz von chemischen Recyclingtechnologien.

Zentrale Entwicklungskriterien für Technologien zum chemischen Recycling sind eine hohe Adaptivität und die Robustheit der Verfahren, da Rohstoffquellen verarbeitet werden, die – im Vergleich beispielsweise zu den hoch homogenen Rohstoffquellen Erdöl oder Erdgas – sehr heterogen in Stoffstruktur und -zusammensetzung sind. Eine entsprechende Vorbehandlung durch vorgeschaltete mechanische Abfallaufbereitungsschritte und eine Anpassung der Vorbehandlung sind dabei ganzheitlich mit zu optimieren.

Wichtige Forschungs- und Entwicklungslinien sind Wege zur Minimierung des Anteils von Heteroatomen insbesondere von Halogenen. Für den robusten Betrieb der Vergasungs- und Pyrolyse-Prozesse mit (partiell) zirkulärem Feedstock ist daher das Konfektionieren der zirkulären Stoffströme relevant und bedarf der besonderen Aufmerksamkeit, um Verkokung und Korrosion in den Anlagenteilen zu vermeiden und die Haltbarkeit etwaig verwendeter Katalysatoren zu garantieren (Vermeidung / Ausschleusen von Katalysatorgiften).

Grundsätzlich ist eine Systemoffenheit in der Wertschöpfungskette anzustreben, d. h. die Verfahren zum chemischen Recycling sollten als **sich ergänzende Verfahren in einer mechanisch/chemischen Verfahrenskaskade** konzipiert werden. Die vorausgehende mechanische Sortierung und Aufbereitung müssen dabei den Spezifikationen des nachfolgenden chemischen Verfahrensschritts angepasst werden. Das Kriterienset für die Abfallkonditionierung und das Fenster der Parametereinstellung für die Verfahrensauslegung solvolytischer und thermochemischer Prozesse ist zu definieren. Dazu muss der Einfluss von Störkomponenten und deren ggf. schwankende Zusammensetzung auf das jeweilige Verfahren sowie mögliche Gegenmaßnahme bekannt sein. Dabei stellt die Behandlung von halogen- und ggf. auch stickstoffhaltigen Kunststoffen in thermochemischen Verfahren sowie die anschließende Aufreinigung der Pyrolyseprodukte eine große Herausforderung dar. Weiterhin sind die Metallgehalte der Inputströme relevant. Dies gilt

insbesondere mit Blick auf die katalytischen Verfahren des chemischen Recyclings, die je nach Auslegung sehr spezifische Anforderungen an die Zusammensetzung des Inputstroms haben. Eine bislang eher vernachlässigte **Schnittstelle** der unterschiedlichen Verfahren ist die zwischen den thermochemischen und den solvolytischen Verfahren im Monomer-Recycling.

Die Scale up-Fähigkeit der einzelnen Verfahren und der Verfahrenskaskade ist unbedingte Voraussetzung für die industrielle Umsetzung. Für die Forschungsförderung heißt dies, einen **Fokus auf Demonstrations- und Pilotanlagen** zu legen; auch Möglichkeiten zur Realisierung von „Reallaboren“ sollten geprüft werden. Demonstrations- und Pilotvorhaben werden insbesondere benötigt für die Abstimmung der Nahtstellen zwischen den verschiedenen Stufen in der Abfallkette, Reallabore dagegen für die Anpassung der regulativen Rahmenbedingungen zum chemischen Recycling, in dem die notwendigen Rahmenbedingungen bei Bedarf im geschützten Raum eines „Reallabors“ erprobt und aufbauend darauf ggfs. optimiert werden können (siehe Kap. 2.2.).

An der Basis der Technologieentwicklung zum chemischen Recycling bleibt **Grundlagenforschung** wichtig. Dies betrifft **das Verständnis der Vorgänge in den thermochemischen Prozessen und die Ableitung digitaler Modelle** für die Weiterentwicklung sämtlicher Verfahrensoptionen. Grundlegender Bedarf besteht in einer genauen Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Abfallzusammensetzung, den Kunststofftypen und deren Zusammensetzung und den daraus resultierenden **Pyrolyseprodukten** in Abhängigkeit von der Reaktionsführung sowie der chemischen Weiterverarbeitung. Der Kondensationsprozess des Pyrolysegases sollte mit der Zielrichtung auf eine robuste Verfahrensgestaltung für unterschiedliche Input- und Outputströme umfassender erforscht werden. Ebenso sind viele katalytische Pyrolyseverfahren noch nicht grundlegend in Bezug auf die Vielfalt der Kunststoffsorten erforscht.

Ein weiteres wichtiges Forschungsfeld ist die **Spezifikation der Anforderungskorridore der nachfolgenden Wertschöpfungsstufen**.

Zudem ist ein starker Fokus auf das Thema **Nachbehandlung der Pyrolyseprodukte** zur anschließenden Weiterverarbeitung in chemischen Produktionsprozessen zu legen. Angeregt wird eine breite Analyse der möglichen Pyrolyseprodukte im Hinblick auf anschließende physikalische und chemische Nachbehandlungsschritte mit dem Ziel, gegebenenfalls durch zusätzliche Nachbehandlung weitere Monomere als potenzielle Bausteine der Polymersynthese zugänglich zu machen oder auch anorganische Reststoffe zu nutzen, so dass neue Produkte in der Wertschöpfungskette adressiert werden können. Ebenso bleibt es ein Ziel der chemischen Industrie, die bestehende Infrastruktur der Polymerindustrie weiter nutzen zu können und die Menge von Abfallrezyklierten drop-in Molekülen weiter auszubauen.

Darüber hinaus sollte zwischen den Beteiligten in den Wertschöpfungsketten diskutiert werden, inwieweit „**standardisierte**“ „**Abfallbibliotheken**“ für FuE-Projekte entwickelt und zur Verfügung gestellt werden sollten, damit die Wirksamkeit von Verfahren auf verschiedenen Stufen entlang der Aufbereitungskette demonstriert und verglichen werden kann.

Auch sollten grundlegende **Untersuchungen zur Energiebilanz des Kohlenstoffkreislaufs** über die Bereitstellung der Monomere, die Polymerisation und die anschließenden Recyclingschritte angestellt werden, insbesondere hinsichtlich der Energiebilanz der Monomere vor der Polymerisation und Pyrolyse.

Im Sinne der effizienten Reduktion der THG-Emissionen sind durch ganzheitliche Bewertung

diejenigen Abfallströme und Verfahren zu identifizieren, bei denen der **Wasserstoffeinsatz** ökologisch und ökonomisch am vorteilhaftesten ist.

Ebenso in den Bereich der grundlegenden Untersuchungen gehört die **Schnittstelle zu neuen Rohstoffquellen** wie zum Beispiel Biogas, das Wiederverwerten von CO₂ und die Kombination verschiedener Technologien (z. B. elektrochemischer Technologien unter Verwendung erneuerbarer Energie), die gegebenenfalls in der Wertschöpfungskette mit Verfahren des chemischen Recyclings kombiniert werden können.

Des Weiteren muss die **Einordnung der Pyrolyseanlagen** in der Wertschöpfungskette der Chemie aus Sicht der Chemieindustrie und ihrer Partner definiert werden. Zu klären ist, wie die Anlagenkonzepte gestaltet werden können, sodass eine optimierte Einpassung der Anlagen in bestehende zentrale Strukturen oder auch neu aufzubauende dezentrale Strukturen ermöglicht werden kann. Für den Aufbau dezentraler Strukturen ist die Entwicklung kleinerer Anlagen beispielsweise über modulare Reaktortechnologie ggf. in Verbindung mit anderen Recyclingtechnologien sinnvoll – unter anderem wird hierbei auch eine Verbindung mit solvolytischen Verfahren beispielsweise zur Verringerung von PVC und PET-Anteilen angeregt.

Darüber hinaus sind weitere **Fragen** wie die optimierte Produktgestaltung und die Frage, wie geistiges Eigentum gewahrt werden kann, wenn Informationen über Inhaltsstoffe an die Kreislaufwertstoffpartner bis hin zum Abfallverwerter geteilt werden, **in Bezug auf die ökologische und ökonomische Effizienz** von chemischen Recyclingverfahren zu beantworten.

3.2. Ableitung von Empfehlungen zu übergreifenden Fragestellungen hinsichtlich der Abfallströme, des Marktes und der Nutzung & des Bedarfs an hergestelltem Rezyklat

Empfehlungen zu übergreifenden Fragestellungen müssen insbesondere die Bedarfe der Abfallwirtschaft hinsichtlich der zu recycelnden Abfallströme und die Bedarfe der in der Wertschöpfungskette nachfolgenden Chemieindustrie berücksichtigen. Dabei wird angeregt, die schwierige **Analyse des „Abfallmarktes“** im Hinblick auf die Anforderungen der derzeit entstehenden Branche der chemischen Recycler und der nachgelagerten Wertschöpfung über neu auszubildende Netzwerke und/oder eine Überblicks-Plattform zu befördern.

Gegenüber der Politik muss die notwendige **Komplementarität der mechanischen und chemischen Verfahren** noch deutlicher dargestellt werden. Entscheidend für die aktuelle Diskussion ist die Erarbeitung von breit aufgestellten **Lebenszyklusbewertungen** (LCA), die eine genügende Detailtiefe aufweisen; dabei ist eine adäquate Bewertung des Inputstroms in die Recyclingverfahren notwendig. Die Auswertung der LCA muss sich an der Minimierung der Gesamtbelastung und Gesamtaufwendungen (Energieeffizienz im Vergleich der verschiedenen Verfahren und Prozesse bzw. Optionen der Kunststoffverwendung bzw. -vermeidung) orientieren. Wenn LCA zur Bewertung von technologischen Pfaden verwendet werden, sollten sie aufgrund der beschriebenen Kriterien- und Kontextabhängigkeiten deutlich die Vorgehensweisen und Methodiken sowie die zentralen Einflussfaktoren auf die LCA-Resultate darstellen.

Eine weitere wichtige politische Botschaft ist die Notwendigkeit, in ausreichender Menge auf Wasserstoff aus regenerativ erzeugtem Strom („grüner Wasserstoff“) für die Aufarbeitung der Produkte aus chemischen Recyclingverfahren zugreifen zu können. Dieser muss verlässlich und zu

wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen verfügbar sein.

Die Prozesse des chemischen Recyclings werden ähnlich wie Raffinerieprozesse typischerweise mehrere Produkte gleichzeitig liefern (Kuppelproduktion), sodass als unabdingbare Voraussetzung für die wirtschaftliche Einführung des chemischen Recyclings heute die Möglichkeiten geschaffen werden müssen, den **Nachweis der Recyclingquote** technisch oder bilanziell im Rahmen einer Massenbilanz führen zu können, damit die Menge des hergestellten validierten Rezyklats umgesetzten Rezyklats auf die gewünschten Produkte angerechnet werden kann.

Mitwirkende Autoren

An diesem Papier haben über die Gremien der beteiligten Organisationen mitgewirkt bzw. waren von den Organisationen beteiligt:

Ulrich Schlotter/BKV GmbH

Dr. Florian Ausfelder/DECHEMA e. V.

Katja Wendler/DECHEMA e. V.

Dr. Ingo Sartorius/PlasticsEurope Deutschland e. V.

Dr. Martin Reuter/VCI e. V.

Arne Köhne/Remondis Recycling, Kap. 1.1. Abfallströme für das chemische Recycling: Verfügbarkeit, Marktkonkurrenzen, Vorbehandlung und Aufarbeitung

Prof. Dr. Dieter Stapf/KIT, Carsten Eichert/RITTEC Umwelttechnik GmbH, Lüneburg und Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl, TU Braunschweig – ICTV, 1.2. Pyrolyseverfahren, Vergasungsverfahren, Solvolysearten, TRL, scale-up

Dr.-Ing. Daniel Köpke/BASF, Dr. Patrick Glöckner/Evonik, Kap. 1.3. Chemisches Recycling als Quelle für Plattformchemikalien – die Rolle des Wasserstoffs

Dr. Christoph Mühlhaus/Chemiecluster Mitteldeutschland, Kap. 1.4. Demonstrationsanlagen zum Chemischen Recycling

Michael Ritthoff/Wuppertal Institut, Kap. 2.1. LCA der Nutzungspfade, mögliche Merit-Order der Nutzung

Prof. Dr. Winfried Golla/VCI und Dr. Ingo Sartorius/PlasticsEurope Deutschland, Kap. 2.2. Regulatorische und ökonomische Bedingungen

Dr. Florian Ausfelder/DECHEMA, Kap. 2.3. Forschungsförderung

Wir danken darüber hinaus den zahlreichen Experten, die im Rahmen der Fachdiskussionen über ihre Expertise zur inhaltlichen Ausgestaltung dieser Empfehlungen beigetragen haben.

Ansprechpartner bei VCI, PED, BKV

Dr. Martin Reuter, Verband der Chemischen Industrie e.V., Forschungs- und Innovationspolitik,
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt, Tel.: +49 (69) 2556-1584, E-Mail: reuter@vci.de;

Dr. Ingo Sartorius, PlasticsEurope Deutschland e.V., Mainzer Landstr. 55, 60329 Frankfurt,
Tel.: +49 (69) 2556-1309, E-Mail: ingo.sartorius@plasticseurope.org;

Ulrich Schlotter, BKV GmbH, Mainzer Landstr. 55, 60329 Frankfurt, Tel.: +49 (69) 2556-1922,
E-Mail: Ulrich.Schlotter@bkv-gmbh.de.

Website: www.vci.de; Twitter: @chemieverband

Registernummer des EU-Transparenzregisters: 15423437054-40.

Der VCI ist in der „öffentlichen Liste über die Registrierung von Verbänden und deren Vertretern“ des Deutschen Bundestags registriert.

Der VCI vertritt die wirtschaftspolitischen Interessen von rund 1.700 deutschen Chemieunternehmen und deutschen Tochterunternehmen ausländischer Konzerne gegenüber Politik, Behörden, anderen Bereichen der Wirtschaft, der Wissenschaft und den Medien. Der VCI steht für mehr als 90 Prozent der deutschen Chemie. 2019 setzte die Branche 193 Milliarden Euro um und beschäftigte rund 464.800 Mitarbeiter.

Ansprechpartner in der DECHEMA

Dr. Florian Ausfelder, florian.ausfelder@dechema.de; DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main

Katja Wendler, katja.wendler@dechema.de; DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main