VERBAND KOMMUNALER UNTERNEHMEN e.V.

POSITIONSPAPIER

Bewertung der Möglichkeiten des „Chemischen Recyclings" von gemischten Kunststoffabfällen insbesondere aus Haushaltungen

Berlin, 10. Dezember 2025

Der Verband kommunaler Unternehmen e. V. (VKU) vertritt über 1.600 Stadtwerke und kommunalwirtschaftliche Unternehmen in den Bereichen Energie, Wasser/Abwasser, Abfallwirtschaft sowie Telekommunikation. Mit rund 319.000 Beschäftigten wurden 2023 Umsatzerlöse von über 213 Milliarden Euro erwirtschaftet und mehr als 19 Milliarden Euro investiert. Im Endkundensegment haben die VKU-Mitgliedsunternehmen signifikante Marktanteile in zentralen Ver- und Entsorgungsbereichen: Strom 66 Prozent, Gas 65 Prozent, Wärme 72 Prozent, Trinkwasser 88 Prozent, Abwasser 50 Prozent. Die kommunale Abfallwirtschaft hat seit 1990 rund 90 Prozent ihrer CO2-Emissionen eingespart – damit ist sie der Hidden Champion des Klimaschutzes. Immer mehr Mitgliedsunternehmen engagieren sich im Breitbandausbau und investieren pro Jahr über 1 Milliarde Euro. Zahlen Daten Fakten 2025

Wir halten Deutschland am Laufen – denn Zukunft wird vor Ort gemacht: Unser Beitrag für heute und morgen: #Daseinsvorsorge. Unsere Positionen: https://www.vku.de/vku-positionen/

Interessenvertretung:
Der VKU ist registrierter Interessenvertreter und wird im Lobbyregister des Bundes unter der Registernummer: R000098 geführt. Der VKU betreibt Interessenvertretung auf der Grundlage des „Verhaltenskodex für Interessenvertreterinnen und Interessenvertreter im Rahmen des Lobbyregistergesetzes".

Verband kommunaler Unternehmen e.V. · Invalidenstraße 91 · 10115 Berlin
Fon +49 30 58580-0 · Fax +49 30 58580-100 · info@vku.de · www.vku.de

DIE KOMMUNALEN UNTERNEHMEN

Positionen des VKU zum „Chemischen Recycling“ in Kürze

Position 1. Es gibt keine überzeugenden Demonstrationen, dass Verfahren des „chemischen Recyclings“ geeignet wären, das Recycling von in **Haus- und Geschäftsmüll** enthaltenen gemischten Kunststoffabfällen ökoeffizient zu erreichen. Sie können deshalb für diese Abfallarten nicht als „Recycling“-Verfahren im Sinne der Abfallhierarchie eingestuft werden.

Position 2. Für **sortenreine, chemisch homogene Kunststoffabfälle**, z. B. Produktions- und Verarbeitungsreste derselben Polymergruppe, kann eine (spezifisch zugeschnittene) Solvolyse eine ökoeffiziente Aufbereitungstechnik darstellen. **Gemischte Kunststoffabfälle und Sortierreste** können durch Pyrolyse teilweise in ein Synthesegas umgewandelt werden; die Ökoeffizienz lässt dabei mit zunehmender Heterogenität der Abfälle nach.

Position 3. Wenn die Reaktionsprodukte der Solvolyse oder die Bestandteile des Synthesegases oder der Ölphase der Pyrolyse (Sekundärrohstoffe) Neumaterial in Produkten ersetzen, handelt es sich um **Recycling**. Im Falle der Wiederverwertung (im ursprünglichen Produktionsprozess) kann dann ohne Weiteres von **hochwertigem Recycling** die Rede sein. Die simple Verdünnung von Schadstoffen usw. ist dabei auszuschließen. In allen anderen Konstellationen muss die Hochwertigkeit im Einzelfall geprüft und bewertet werden.

Position 4. Das chemische Recycling sollte nur dann erfolgen, wenn es – gegenüber dem mechanischen Recycling, der Verbrennung und anderen Verfahren – die ökoeffizientere, nachhaltigere Lösung ist oder die anderen Verfahren das benötigte Sekundärmaterial nicht mit den erforderlichen Eigenschaften liefern.

Position 5. Im **Kreislaufwirtschaftsgesetz** sollten die Begriffe **Wiederverwertung und Weiterverwertung** als präzisierende Unterkategorien des Recyclings aufgenommen werden. Diese Differenzierung würde eine genauere Bewertung der Hochwertigkeit von Recyclingverfahren ermöglichen. Für die praktische Anwendung müssten konkrete, messbare Kriterien der Hochwertigkeit je nach Abfallstrom entwickelt und in Rechtsverordnungen erlassen werden.

Wiederverwertung kann grundsätzlich als hochwertiges Recycling gelten, sofern die Anforderungen an den Umwelt- und Gesundheitsschutz, die Besten Verfügbaren Techniken usw. eingehalten werden, effektiv eine hohe Substitution an Primärstoffen (z. B. 50 % des fossilen Kohlenstoffs[i]) erreicht wird und die Sekundärstoffe bei demselben Einsatzzweck qualitativ dem Neumaterial entsprechen. Für die **Weiterverwertung** sollten Bewertungskriterien erarbeitet werden, die mindestens folgende Aspekte berücksichtigen:

- Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten („Upcycling“ vs. „Downcycling“)
- Kreislauffähigkeit der daraus hergestellten Produkte
- Energie- und Ressourcenaufwand des Verfahrens
- Leistungsfähigkeit des Verfahrens
- Substitutionserfolg.

1 Einleitung

1.1 Anlass

Insbesondere im Rahmen der Fortentwicklung der Abfall- und Kreislaufwirtschaft, der Schließung der Kohlekraftwerke und somit Wegfall dieser Abfallmitverbrennungskapazitäten, aufgrund steigender gesetzlich geforderter Recyclingquoten, der begrenzten Möglichkeiten mechanischer Sortier- und Recyclingverfahren, dem hohen Aufkommen an gemischten Kunststoffabfällen, dem Rohstoffbedarf der chemischen Industrie sowie der Forderungen nach der Reduzierung der thermischen Abfallbehandlung wird in den vergangenen Jahren das sog. „chemische Recycling“ von gemischten Kunststoffabfällen nun immer intensiver propagiert, erforscht und entwickelt.

Im Jahr 2020 erkannte das Bundesumweltministerium zwar zumindest die Möglichkeit einer interessanten Entwicklung im Hinblick auf die Verwertung bislang energetisch verwerteter Kunststoffabfälle durch ein „ökologisch und ökonomisch sinnvolles chemisches Recycling“, jedoch nicht in Bezug auf Verpackungsabfälle.[ii] Kurz darauf hatte die damalige Koalition dann im Koalitionsvertrag 2021[iii] vereinbart, auch das chemische Recycling als zulässige Option aufzunehmen, dies ist jedoch nicht geschehen.

Die Regierungskoalition 2025 hat in ihrem Koalitionsvertrag dann festgelegt:

> *„… die Kreislaufwirtschaft und das chemische Recycling von Kunststoffen [werden wir] unterstützen. … Wir reformieren § 21 Verpackungsgesetz und setzen die EU-Verpackungsverordnung praktikabel um. Das chemische Recycling fügen wir in die bestehende Abfallhierarchie ein. Wir stärken Strategien zur Abfallvermeidung, zum Rezyklateinsatz und Shared Economy.“*
>
> *(CDU, CSU, SPD 2025)*[iv]

1.2 Rechtslage

Die Akteurinnen und Akteure der deutschen Wirtschaft, einschließlich Staat, Haushaltungen und privaten wie kommunalen Entsorgungsunternehmen, sind verpflichtet,

> *„die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen“.*
>
> *(§ 1 Abs. 1 KrWG)*[v]

Abfälle zur Verwertung sind generell getrennt zu sammeln und entsprechend der Abfallhierarchie der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder der Verwertung zuzuführen.[vi] Die Pflicht zur getrennten Sammlung und Verwertung gilt insbes. auch für die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger und grundsätzlich auch in Bezug auf Kunststoffabfälle aus privaten Haushaltungen.[vii]

Im Verpackungsgesetz ist die Möglichkeit der erweiterten Wertstoffsammlung über Verpackungen hinaus, auch für Kunststoffe, verankert:

> *„Durch eine gemeinsame haushaltsnahe Sammlung von Verpackungsabfällen und weiteren stoffgleichen Haushaltsabfällen sollen zusätzliche Wertstoffe für ein hochwertiges Recycling gewonnen werden."*
> *(§ 1 Abs. 2 VerpackG)*[viii]

1.3 Gegenstand

Deshalb besteht Bedarf an einer Bewertung und Positionierung des VKU zur Frage der Hochwertigkeit des „chemischen Recyclings" in Bezug auf gemischt erfasste Kunststoffabfälle, die aus Haushaltungen oder, bei Mitbenutzung der Tonnen, aus Gewerbebetrieben stammen. Aufgrund der entsprechenden öffentlichen Diskussionen und zahlreicher Anfragen an den VKU wird außerdem die Möglichkeit des „chemischen Recyclings" von gemischten Kunststoffen im bzw. aus dem Restabfall betrachtet.

Inwiefern die Verbrennung in Verbindung mit der Abscheidung und Nutzung des CO_2 aus dem Rauchgas (CCU) als chemisches Recycling oder (anteilig) als erneuerbare Kohlenstoffquelle betrachtet werden kann,[ix, x, xi] wann das Ende der Abfalleigenschaft dieses (zukünftig mglw.) abgeschiedenen CO_2 eintritt[xii] usw. soll hier nicht diskutiert werden.

2 Definitionen des Begriffes „Recycling"

Das **Kreislaufwirtschaftsgesetz** definiert „Recycling" im Sinne des Gesetzes als

> *„jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke <u>aufbereitet</u> werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind."*
> (§ 3 Abs. 25 KrWG)[xiii]

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz macht in der Definition klar, dass der **abfallrechtliche** Begriff „Recycling" endet, <u>bevor</u> die (sekundären) Erzeugnisse, Materialien oder Stoffe dem Produktionsprozess zugeführt werden.

In der öffentlichen, gesellschaftspolitischen Diskussion wird der Begriff „Recycling" manchmal noch weiter gefasst, indem der tatsächliche Wiedereinsatz der aufbereiteten sekundären Erzeugnisse, Materialien oder Stoffe in der Produktion einbezogen wird.[xiv] Dem wird hier nicht gefolgt.

Die „Wiederverwendung" (s. u.) ist rechtlich keine Variante des Recyclings, denn schon die „Vorbereitung zur Wiederverwendung" wird in der Abfallhierarchie als separate, höherrangige Stufe aufgeführt (§ 6 Abs. 1 KrWG)[xv]. Wiederverwendung, Recycling und Verfüllung zählen gemeinsam zur „stofflichen Verwertung" (§ 3 Abs. 23a KrWG)[xvi].

Makroökonomisch ist Recycling nach einigen Wirtschaftslexika ein „Materialkostenintensiver Wirtschaftsbereich, der die Bereiche Recycling von Schrott und Recycling von nicht metallischen Altmaterialien und Reststoffen enthält." (Gabler Wirtschaftslexikon 2018, Definition b)[xvii] Diese Betrachtungsweise fasst die Recyclingtätigkeiten unabhängig vom Material zusammen. Diesem Ansatz folgt seit 2008 auch die NACE-Klassifikation der Wirtschaftszweige[xviii] mit ihrem Kapitel 38 „Sammlung, Behandlung und Beseitigung von Abfällen; Rückgewinnung", während zuvor die einzelnen Recyclingtätigkeiten nach Material den einzelnen Wirtschaftszweigen zugeordnet waren.

Ingenieurtechnisch werden – nach der Art der Aufbereitung und dem Zweck des Wiedereinsatzes – 4 Formen des Recyclings unterschieden: Wiederverwendung, Weiterverwendung, Wiederverwertung und Weiterverwertung. Die Definitionen und einige Anwendungsbeispiele sind in Abbildung 1 wiedergegeben. Anwendung finden diese 4 Recyclingformen in sämtlichen Wirtschaftsbereichen, etwa im zirkulären Bauen[xix] und in der Medizintechnik[xx].

Recycling	**Verwendung**: unter Beibehaltung der Produktgestalt	**Verwertung**: unter Auflösung der Produktgestalt
Wieder: zu demselben Zweck	a) ***Wieder*verwendung***:* Wiederholter Einsatz eines Rückstandes für den ursprünglichen Verwendungszweck (z. B. Reparatur von Elektrogeräten, Mehrwegverpackungen)	c) ***Wieder*verwertung***:* Herstellung von Sekundärstoffen zum Wiedereinsatz in dem Produktionsprozess, dem sie entstammen (z. B. Altglasscherben zur erneuten Herstellung von Behälterglas)
Weiter: zu einem anderen Zweck	b) ***Weiter*verwendung***:* Rückstandseinsatz für andere Zwecke (z. B. Mehrwegflasche als Blumenvase)	d) ***Weiter*verwertung**: Herstellung von Sekundärstoffen zum Einsatz in einem Produktionsprozess, den sie noch nicht durchlaufen haben (z. B. Granulat aus Altreifen zur Produktion von Bodenbelägen)

Abb. 1: Die 4 Arten des Recyclings: Wiederverwendung, Weiterverwendung, Wiederverwertung und Weiterverwertung

Darstellung verändert und ergänzt nach Gabler Wirtschaftslexikon 2018[xxi], in Anlehnung an VDI 2243[xxii] und VDI 3459 Blatt 1[xxiii]

Häufig werden auch die sog. „R-Prinzipien" zur Einordnung von Maßnahmen zur Abfallvermeidung und Abfallbewirtschaftung herangezogen. Da diese Prinzipien nicht im deutschen Recht verankert sind und ihre Anzahl und Differenzierung sehr unterschiedlich gehandhabt wird,[xxiv] werden sie hier nicht betrachtet.

3 Charakter und Definition „chemisches Recycling“

Die rechtliche Recycling-Definition nach § 3 Abs. 25 KrWG[xxv] schließt keinerlei technisches Aufbereitungsverfahren aus, sondern macht dies davon abhängig, ob die Aufbereitung zu einem Zweck des erneuten Einsatzes in der Produktion erfolgt, außer der Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind. Wenn also ein entsprechender Zweck verfolgt wird, dann fallen mechanische/werkstoffliche und chemische/rohstoffliche Wieder-/Weiterverwertung unter das „Recycling“ nach KrWG. Ausnahme ist die (Vorbereitung zur) Wiederverwendung. Dennoch ist „rohstoffliche“ oder „chemische“ Verwertung nicht zur Anrechnung auf die Verwertungsquote nach Verpackungsgesetz zugelassen.

3.1 Werkstoffliches Recycling / mechanische Aufbereitung, Behandlung, Vorbehandlung

Der Begriff „rohstoffliches“ Recycling wird üblicherweise zur Abgrenzung vom „werkstofflichen“ Recycling verwendet (UBA 2020), das nach üblichem Verständnis „überwiegend mittels mechanischer Verfahren“ (Nabu, o. D.)[xxvi] erfolgt. Eine mechanische Behandlung kann dabei sowohl zur Auflösung der Produktgestalt führen (Zerkleinerung…) oder diese erhalten (Siebung…).

Auch „werkstoffliches Recycling“ ist jedoch kein allgemeiner Begriff aus dem Abfallrecht. Lediglich im Verpackungsgesetz wird für die Zwecke des Mengenstromnachweises bei der Verpackungsentsorgung die „werkstoffliche Verwertung“ definiert:

> *„Grundlage des Mengenstromnachweises sind die an einem System beteiligten Mengen an Verpackungen sowie vollständig dokumentierte Angaben über die erfassten und über die der Vorbereitung zur Wiederverwendung, dem Recycling, der werkstofflichen oder der energetischen Verwertung zugeführten Mengen.“*
> *(§ 17 Abs. 1 Satz 2 VerpackG)*[xxvii]

Dabei wird auch im Verpackungsgesetz implizit „werkstoffliches Recycling“ weitgehend mit „mechanischer Aufbereitung“ gleichgesetzt, da das Sekundärmaterial „stoffgleich“ zum ersetzten Neumaterial sein muss:

> *„Werkstoffliche Verwertung ist die Verwertung durch Verfahren, bei denen stoffgleiches Neumaterial ersetzt wird oder das Material für eine weitere stoffliche Nutzung verfügbar bleibt.“*
> *(§ 3 Abs. 19 VerpackG)*[xxviii]

Auch die Erwärmung und anschließende Umformung von Thermoplasten, selbst wenn sie ohne mechanische Aufbereitung stattfinden sollte, fällt zweifellos unter das werkstoffliche Recycling.

Während die Ausweitung des Kunststoffrecyclings angestrebt wird, können in Kunststoffabfällen enthaltene Additive und moderne Entwicklungen wie die Anwendung von „Recycling-Additiven“ dieses auch erschweren. (Lahl & Zeschmar-Lahl, 2024,[xxix] 2025[xxx])

3.2 Chemisches Recycling / rohstoffliches Recycling

Der Begriff „chemisches Recycling“ ist bislang im Abfallrecht nicht definiert.

Das Umweltbundesamt (2020) definiert:

> *„Chemisches oder rohstoffliches Recycling bezeichnet die Umwandlung der Kunststoffpolymere in ihre Monomere bzw. chemischen Grundbausteine oder Basischemikalien, also die Depolymerisation, mittels thermochemischer bzw. chemischer Prozesse. […] Als mögliche chemische Recyclingtechniken kommen Pyrolyse, Vergasung oder Verflüssigung (z. B. Verölung oder Solvolyse) in Betracht.“*
> *(UBA 2020, S. 8)*[xxxi]

Dabei wird „chemisches“ Recycling mit dem ebenfalls weit verbreiteten Begriff „rohstoffliches“ Recycling gleichgesetzt, der gleichfalls nicht im Abfallrecht definiert ist.

Die Diskussion um das chemische Recycling führt das Umweltbundesamt in expliziter Abgrenzung zu einer „direkten thermischen bzw. energetischen Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen, Ersatzbrennstoffkraftwerken oder Zementwerken“ (UBA 2020, S. 9)[xxxii]

Die „energetische Verwertung“ und die „Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff […] bestimmt sind“, sind rechtlich vom Begriff „Recycling“ explizit ausgeschlossen (§ 3 Abs. 25 KrWG),[xxxiii] nicht jedoch z. B. der Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel in Hochöfen.[xxxiv] Historisch beschrieb der Begriff „energetische Verwertung“ dabei die Verbrennung. Dies geht schon aus den nach wie vor geltenden Bezeichnungen des Verwertungsverfahrens R 1 „Hauptverwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung“ (Anlage 2 KrWG)[xxxv] und des Beseitigungsverfahrens D 10 „Verbrennung an Land“ (Anlage 1 KrWG)[xxxvi] hervor.

Die Einstufung als Verwertungsverfahren R 3 nach Anlage 2 KrWG lautet „Recycling und Rückgewinnung organischer Stoffe, die nicht als Lösemittel verwendet werden (einschließlich der Kompostierung und sonstiger biologischer Umwandlungsverfahren)“. Mit Fußnote 2 zu dieser Anlage wird ausdrücklich festgelegt:

> *„Dies schließt Vergasung und Pyrolyse unter Verwendung der Bestandteile als Chemikalien ein.“*
> (Anlage 2 KrWG, Fußnote 2)[xxxvii]

Die Verflüssigung wird hierbei nicht konkret benannt, umfasst aber oft eine Pyrolyse.

Den Einsatz von Kunststoffabfällen als Zuschlagstoffe in der Zementproduktion schließt das Umweltbundesamt aus dem rohstofflichen Recycling aus, „da hierbei keine neuen Einsatzstoffe für die Kunststoffherstellung bereitgestellt werden können“ (UBA 2020, S. 8f.).[xxxviii]

Plastics Europe schreibt ähnlich wie das Umweltbundesamt:

> *„Chemisches Recycling beinhaltet verschiedene Recyclingverfahren wie Pyrolyse, Solvolyse oder Depolymerisation, bei denen Kunststoffabfälle in ihre chemischen Bestandteile wie Oligomere und Monomere zerlegt werden, um sie dann erneut als*

Rohstoff für die Produktion neuer Kunststoffe zu nutzen."
(Plastics Europe, ohne Datum)[xxxix]

Die Zerlegung der Kunststoffpolymere bedeutet zwangsläufig die Auflösung der Produktgestalt und sogar des Stoffes, sodass es sich beim chemischen Recycling technisch um Verwertungsverfahren handelt. Ob Wieder- oder Weiterverwertung, hängt dann vom Einsatzgebiet der Sekundärmaterialien ab.

Dieses Positionspapier verwendet im Weiteren den Begriff „**chemisches Recycling**" in folgendem Sinne:

> ***Chemisches*** *oder* ***rohstoffliches Recycling*** *bezeichnet technische Verfahren, durch die Kunststoffabfälle unter Umwandlung der Kunststoffpolymere in kürzere Polymere, ihre Monomere bzw. chemischen Grundbausteine, Bruchstücke oder Basischemikalien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck (Wiederverwertung) oder für andere Zwecke (Weiterverwertung) aufbereitet werden, nicht aber die Verbrennung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.*

Diese Definition entspricht auch dem Verständnis des projektbegleitenden Expertenkreises und von Quicker & Seitz (2024)[xl], der geltenden Rechtslage, des UBA sowie der Umwelt- und der meisten Wirtschaftsverbände (s. o.).

4 Prinzipien und Technologien des chemischen Recyclings

Die Depolymerisationsverfahren werden in thermochemische und (andere) chemische Verfahren unterteilt, die teilweise auch miteinander kombiniert werden können.

Hier werden nur die wichtigsten Verfahrenstypen betrachtet. Neuere Entwicklungen wie Plasmalyse oder hydrothermale Verfahren können im Detail anderweitig nachgeschlagen werden.[xli] Auch in einer jüngeren Analyse im Auftrag des BMUKN/UBA „wurde das thermochemische Kunststoffrecycling auf Basis der Prozesse Verölung/Verflüssigung, Pyrolyse und Gasifizierung untersucht."[xlii]

4.1 Solvolyse (Chemolyse)

In der Solvolyse wird die Zielsubstanz (hier: Kunststoffabfall) in einem Lösungsmittel aufgelöst und reagiert chemisch mit diesem Lösungsmittel, wobei die Zielsubstanz aufgespalten wird und an die beiden „Bruchstücke" Teile des Lösungsmittels angedockt werden. Je nach dem verwendeten Solvens wird die Chemolyse auch spezifischer bei Einsatz von Wasser als Lösungsmittel/Reagenz als Hydrolyse, bei Einsatz von Alkohol als Alkoholyse usw. bezeichnet.[xliii]

In der Branche Abfall-/Kreislaufwirtschaft wird die Solvolyse oft als „Chemolyse" bezeichnet, synonym dazu als „chemisches Recycling", was aber der Oberbegriff ist, s. o.

4.2 Katalyse

„Katalyse […] bezeichnet die Änderung der Kinetik einer chemischen Reaktion mittels eines Katalysators mit dem Ziel, sie überhaupt erst in Gang zu bringen, sie zu beschleunigen oder die Selektivität in eine favorisierte Richtung zu lenken.“[xliv] Der Katalysator ist dabei kein Reaktionspartner.

Das Ziel der Katalyse kann unterschiedlich sein, von der Beseitigung eines Gefahrenpotenzials bis zur Produktion neuer Stoffe.

Voraussetzung für eine effektive Katalyse ist der Kontakt zwischen den Ausgangsstoffen und dem Katalysator. Sie kann also umso effektiver und schneller ablaufen, je größer die Reaktionsoberfläche ist. Das erfordert entweder möglichst kleine Partikeldurchmesser oder kurzkettige Ausgangsstoffe.

4.3 Thermolyse

4.3.1 Abgrenzung Verbrennung / Alternative thermische Verfahren

Die Verbrennung erfolgt unter hoher Sauerstoffzufuhr und führt zur vollständigen Oxidation der Polymere. Dabei entsteht hauptsächlich Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Die Verbrennung ist eine stark exotherme Reaktion unter Energiefreisetzung als Strahlung (Flamme) und Wärme.

Die thermochemischen Verfahren jenseits der Verbrennung, d. h. die Depolymerisation bei hohen Temperaturen ohne Sauerstoffsättigung (Thermolyse), werden zu den alternativen thermischen Abfallbehandlungsverfahren gezählt.[xlv] Oder andersherum: Die Verbrennung ist ebenfalls ein thermochemisches Verfahren. Sie kann aber zumindest so lange nicht als (chemisches) Recycling eingestuft werden, wie die entstehenden Reaktionsprodukte nicht stofflich in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt werden.[xlvi]

Je nach Ausgangsstoffen und Zielsetzung können die Prozessparameter Temperatur und Sauerstoffzufuhr so gewählt werden, dass im Grunde fließende Übergänge zwischen den Verfahrenstypen und Zusammensetzungen des entstehenden Gases möglich sind.

Neben der Abfallentsorgung ist es Ziel der Thermolyse, bestimmte Fraktionen der eingesetzten Abfälle in ein Prozessgas („Syngas“) als Ausgangsstoff für weitere chemische Prozesse zu erzeugen sowie die Abgasmenge (im Vergleich zur Verbrennung) zu reduzieren.

Bei der Pyrolyse entstehen gasförmige, flüssige und feste Reaktionsprodukte, bei der Vergasung feste und gasförmige. [xlvii]

Abb. 2 gibt einen Überblick über einige Betriebsparameter thermochemischer Prozesse zur Abfallbehandlung.

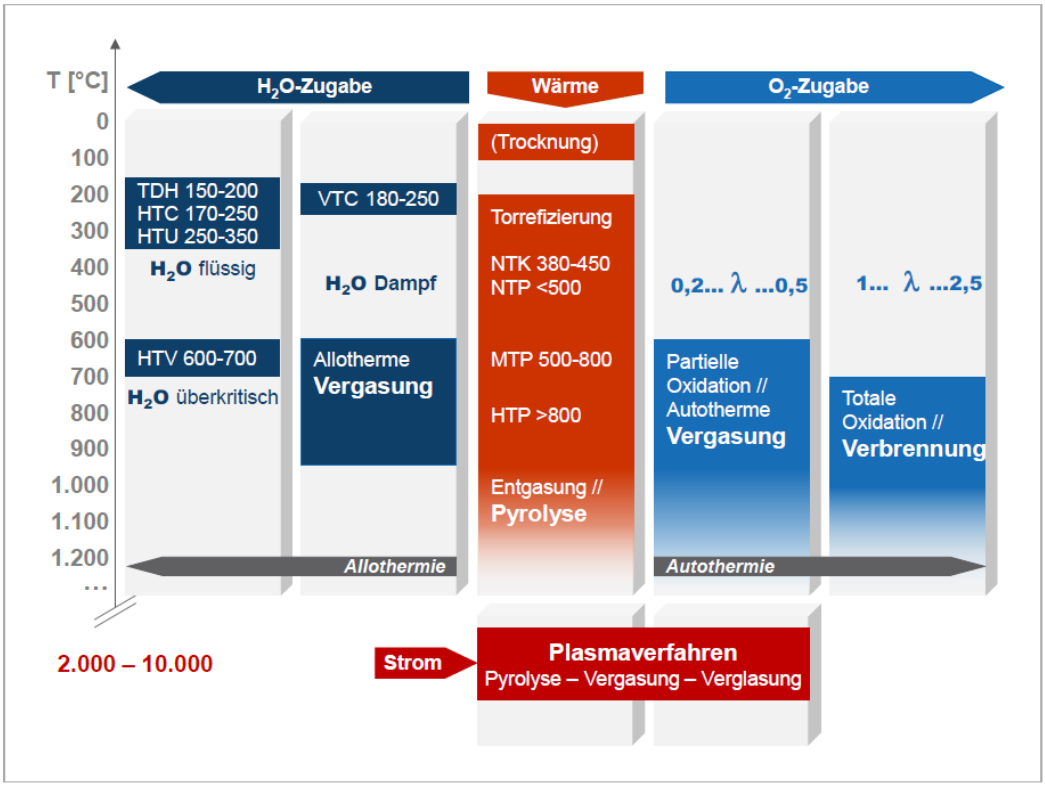

Abb. 2: Thermochemische Prozesse im Überblick. Aus: Quicker et al. (2017), Abkürzungen siehe dort[xlviii]

4.3.2 Pyrolyse / Verölung

Die Pyrolyse ist eine häufig eingesetzte Variante der Thermolyse bei relativ hohen Temperaturen und ohne Zufuhr von Luft, Sauerstoff oder anderen Reaktionspartnern, also eine wärmeinduzierte Zersetzung. Es kann dabei auch ein Unterdruck („Vakuum“) angelegt und die Pyrolyse mit anderen Verfahren kombiniert werden, z. B. Mikrowellen, Katalysatoren oder Plasma.[xlix] Der Sauerstoffmangel verhindert die Verbrennung der Ausgangsstoffe. Grundsätzlich entstehen bei der Kondensation des Pyrolysegases eine wässrige und eine ölige Phase, bei denen letztere das gewünschte Zielprodukt ist. Bei der Verölung ist die Minimierung der Gasentstehung ein weiteres wesentliches Ziel.

4.3.3 Gasifizierung (Vergasung)

Obwohl „Gasifizierung“ chemisch-physikalisch gesehen ein Synonym für „Thermolyse“ allgemein ist,[l] wird diese Bezeichnung in der Abfallbehandlung häufig in Abgrenzung zur Pyrolyse für Verfahren verwendet, die bei höheren Temperaturen unter (unterstöchiometrischer) Luft-/Sauerstoffzufuhr stattfinden (s. a. Abb. 1). Die Abfälle werden unter Wärmezufuhr mit einem Reaktionspartner in Kontakt gebracht. Es entsteht ein Gasgemisch aus Methan (CH_4), Wasserstoff (H_2), Kohlenstoffmonoxid (CO) und (wenig) CO_2.[li] Die Zusammensetzung des Gases ist ebenfalls stark von der Abfallzusammensetzung, der Wärmezufuhr, dem Druck und dem Reaktionspartner abhängig.[lii]

Exkurs: Biochemisches Recycling

In Forschungsarbeiten wurden Kunststoff-abbauende Mikroorganismen aus Umweltproben isoliert, z. B. *Streptomyces* spec., die zur Umwandlung von PET in der Lage sind, an der Universität Nottingham.[liii] Falls eine solche Umwandlung ausreichend schnell und mit ausreichender Ausbeute an erwünschten Reaktionsprodukten in Bioreaktoren durchgeführt werden kann, ist auch ein anschließendes Recycling denkbar. Je nach Ablauf des Prozesses kann er auch als biochemische oder biologische Katalyse bezeichnet werden.

5 Vor- und Nachteile, Potenziale, Bewertung

5.1 Nachhaltigkeit als Bewertungsprinzip

Ausgehend von der in der Abfallhierarchie festgelegten Rangfolge der Maßnahmen zur Abfallvermeidung und Abfallbewirtschaftung[liv]

> *„soll […] diejenige Maßnahme Vorrang haben, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet.“*
> *(§ 6 Abs. 2 KrWG)*[lv]

Nachhaltigkeit ist ein von den Vereinten Nationen 1992 vereinbartes weltweites Handlungsprinzip bei der Nutzung von Ressourcen. Durch Nachhaltigkeit „soll eine dauerhafte Bedürfnisbefriedigung gewährleistet werden, indem die natürliche Regenerationsfähigkeit der beteiligten Systeme bewahrt wird, vor allem von Lebewesen und Ökosystemen.“[lvi] Unter „Ressourcen“ sind dabei nicht nur stoffliche, sondern alle materiellen und immateriellen Güter zu verstehen, einschließlich Arbeitskraft, Zeit und kulturellen Werten. [lvii]

Die Vereinten Nationen haben für die globale nachhaltige Entwicklung (bis 2030) 17 Ziele sowie zahlreiche Indikatoren der Zielerreichung festgelegt. Abfallaufkommen und Abfallbewirtschaftung fallen dabei unter das Ziel 12 „Nachhaltiger Konsum und Produktion“.

Für die Nachhaltigkeitsziele wurde auch eine spezielle Fassung zur Anwendung auf kommunaler Ebene in Deutschland erarbeitet. Als Indikatoren für das Ziel 12 werden dabei u. a. das Aufkommen an Haushaltsabfällen (ohne Elektroaltgeräte) sowie die Recyclingquote für Siedlungsabfälle benannt.[lviii]

Abb.: Die 17 Ziele für Nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen[lix]

„Das Handlungsprinzip der Nachhaltigkeit ist ein Zielkonflikt, ein veränderlicher bestmöglicher Zustand, in dem es nicht möglich ist, die Ziel-Eigenschaft Ressourcennutzung zu verbessern, ohne zugleich die andere Eigenschaft des Ressourcen-Erhalts verschlechtern zu müssen.“[lx]

Der VKU bewertet die Abfallbewirtschaftungsoptionen grundsätzlich nach dem Prinzip der Nachhaltigkeit. Das bedeutet insbesondere, dass allein die Frage, ob und wie viel Material in einem sog. oder tatsächlichen Kreislauf geführt wird oder werden kann, oder die Tatsache, wie viele Kunststoffbestandteile in einem Abfallgemisch enthalten sind, jeweils eines von vielen Bewertungskriterien ist. Auch alle anderen relevanten Nachhaltigkeitsziele, insbes. der Umwelt- und Gesundheitsschutz und die ökonomische Nachhaltigkeit, sei es betriebswirtschaftlich, gebührenwirtschaftlich oder volkswirtschaftlich, sind bei der Bewertung heranzuziehen. Die Erfüllung rechtlich vorgegebener oder freiwilliger Erfassungs-, Sortier-, Recycling- oder Wiedereinsatzquoten allein sagt noch nicht viel über die Nachhaltigkeit dieses Stoffstrommanagements aus.

5.2 Ausmaß des chemischen Recyclings gemischter Kunststoffabfälle und Datenlage

Die Studie „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen“ (Lindner et al., 2024) kommt zu dem Ergebnis, dass 19 % der Einsatzstoffe der in Deutschland hergestellten/verarbeiteten Kunststoffe keine fossilen Primärkunststoffe sind, sondern aus Abfällen und Nebenprodukten stammen.[lxi] Weltweit beträgt diese Quote weniger als 10 %.[lxii] Die Bedeutung des chemischen Recyclings in Deutschland wird mit < 0,01 Mio. t/a angegeben (Lindner et al., 2024,[lxiii] Cieplik, 2025,[lxiv], Lindner, 2025[lxv]).

Die Datenlage für einen Vergleich der Eignung und Effizienz der Verfahren des chemischen Recyclings ist begrenzt. Nach der Analyse von mehr als 80 Verfahren zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen lagen im Jahr 2018 lediglich von 4 Verfahren ausreichend Daten vor, um „eine weitere Bewertung“ vorzunehmen. Eine Kostenanalyse für die Verwertung von Sortierresten der Dualen Systeme war dennoch nicht möglich.[lxvi] Bis heute gibt es z. B. auch keine öffentlich verfügbaren Daten in der EU zum Ersatz von Neumaterialien durch das chemische Recycling, ermittelt am Schnittpunkt nach der chemischen Konversion.[lxvii]

In Europa weist das Fraunhofer CCPE mit Stand Oktober 2025 nur 18 in Betrieb befindliche Anlagen zum chemischen Recycling mit einer Gesamtkapazität von 289.000 Mg/a aus, davon über 90 % Pyrolyse und keine Gasifizierung. In weiteren 65 Projekten sind demnach 2,8 Mio. Mg Kapazität geplant.[lxviii]

5.3 Restabfälle (gemischte Siedlungsabfälle, Haus- und Geschäftsmüll)

Ein Sachstandsbericht im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes kam im Jahr 2017 (Informationsbasis 2014) zu der Schlussfolgerung, dass „alternative thermische Verfahren nur unter den im Folgenden gelisteten besonderen Umständen bzw. Anforderungen [zur Behandlung von **Restabfällen**] betriebs- und wirtschaftlich überlebensfähig sind:

- Einhaltung gesetzlicher Vorgaben (z. B. Schmelzverfahren, Japan)
- Erzielung besonderer Produkteigenschaften (z. B. verglaste Schlacke, niedrigste Schadstoffgehalte)
- Behandlung von Sonderfraktionen (z. B. hoch toxische oder Chlor-haltige Stoffe, Fraktionen mit sehr geringen Heizwerten wie kontaminierte Böden)
- Vorschaltanlagen (z. B. an Kraft-, Zement-, Kalkwerk) zur Substitution fossiler Brennstoffe.

Eine Studie von KIT & Conversio hat gezeigt, dass bei der Pyrolyse von Hausmüll 11,3 von ca. 53 t/h Einsatzstoffen, davon 32,5 t/h Hausmüll, in das Syngas überführt wurden. Die Kosten betrugen 228 EUR/t Hausmüll.[lxix]

Die Verbrennung bildet somit weiterhin den Stand der Technik zur Behandlung von gemischten Restabfällen. Keines der sogenannten alternativen Verfahren kann unter vergleichbaren Rahmenbedingungen eine ähnliche Leistungsfähigkeit und Flexibilität nachweisen. Alternative thermische Verfahren, die in wirtschaftlicher und gleichzeitig ökologischer Hinsicht mit den Maßstäben der Abfallverbrennung konkurrieren können, sind nicht verfügbar.“[lxx]

Die stoffliche Verwertung von gemischten Siedlungsabfällen ist durch das „chemische Recycling“, also die Kombination von Verfahren der Depolymerisation mit anschließender Synthese chemischer Produkte aus dem Rauchgas, nicht möglich. Selbst wenn man berücksichtigt, dass fossile und biogene Kohlenwasserstoffe zusammen in ein Synthesegas umgewandelt und verwertet werden könnten, sind alle derartigen Versuche bis jetzt (großtechnisch) gescheitert. Weltweit ist keine derartige in Betrieb befindliche großtechnische Anwendung bekannt.[lxxi]

5.4 Gemischte Kunststoffabfälle

Im folgenden Abschnitt werden die thermochemischen Verfahren mit Blick auf das Recycling von – mehr oder weniger – gemischten Kunststoffabfällen bewertet.

Bei diesen Gemischen handelt es sich in der Regel um gemeinsam „getrennt“ gesammelte Kunststoffabfälle wie Leichtverpackungen (LVP, „Gelbe Tonne“), Wertstofftonneninhalt, Gewerbeabfallgemische, Schredderleichtfraktionen aus der Aufbereitung von Elektroaltgeräten oder Altfahrzeugen.

Doch auch aus Restabfällen können in Vorbehandlungsanlagen Kunststoffanteile aussortiert werden. Wie weit es sich dabei um Gemische handelt, ist von der eingesetzten Sortierverfahren und -technik abhängig; so könnte eine Aussortierung auch nur auf großstückige Polyolefinabfälle, PVC-Abfälle oder/und anderes ausgerichtet sein.

Bei all diesen Kunststoffabfallgemischen setzt das „chemische Recycling“ in unterschiedlichem Ausmaß die Trennung der Kunststoffe voneinander sowie von den anderen miterfassten Wert-, Stör-, Gefahr- und Schadstoffen voraus. Auch wenn thermolytische Verfahren alle Kunststoffe aufspalten, bestimmen die eingesetzten Abfälle sowohl die Qualität der Produkte als auch die Menge und Eigenschaften der Reststoffe.[lxxii]

Die Abtrennung von Wert-, Stör-, Gefahr- und Schadstoffen ist mit Blick auf gefährliche Stoffe (§ 9 Abs. 2 KrWG) und teilweise auch sonst rechtlich explizit gefordert, so müssen Elektroaltgeräte immer vor der weiteren Verwertung oder Beseitigung einer Erstbehandlung zugeführt werden:[lxxiii, lxxiv, lxxv]

> *„Erstbehandlung ist nach § 3 Nummer 24 [ElektroG] die erste Behandlung von EAG, bei der die EAG entweder zur Wiederverwendung vorbereitet oder von Schadstoffen entfrachtet und Wertstoffe aus den EAG separiert werden, einschließlich hierauf bezogener Vorbereitungshandlungen.“*
> (LAGA 2024)[lxxvi]

Detaillierte Übersichten über die Verfahrensentwickler, Verfahrensprinzipien und in Betrieb befindlichen Anlagen stehen an anderer Stelle zur Verfügung. Demnach hat die Anzahl der Verfahren, Firmen und Standorte deutlich zugenommen. Es handelt sich dabei jedoch ausschließlich um Pyrolyse- oder Solvolyse-Verfahren, die auch unter Einsatz von Katalysatoren durchgeführt werden können. Mikrowellen- und Plasmaverfahren und selbst die Vergasung kommen nur in einzelnen Fällen und nur in Kombination mit der Pyrolyse zum Einsatz.[lxxvii]

5.5 Verfahren des chemischen Recyclings

5.5.1 Solvolyse

Die Solvolyse wird an das zu spaltende Polymer angepasst und kommt deshalb bei spezifischen Monofraktionen an Kunststoffabfällen zum Einsatz. „Da bei der Solvolyse das Polymer Schritt für Schritt in Bestandteile abgebaut wird, wird diese Technologie fast ausschließlich bei den Polymeren angewendet, die durch Polykondensation entstehen und Heteroatome (z. B. N oder O) in der Hauptkette beinhalten. […] Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Polyamide (PA), Polyurethane (PU) und Polyethylenterephthalat (PET).“[lxxviii]

Eignung für bestimmte sortenreine/homogene Kunststoffabfälle:	sehr gut
Praxisrelevanz:	zunehmend
Eignung für heterogene Kunststoffabfälle:	nicht geeignet
Eignung für Sortierreste:	nicht geeignet
Praxisrelevanz:	keine

5.5.2 Katalytische Pyrolyse

Bislang spielt das Verfahrensprinzip der katalytischen Pyrolyse (vereinfacht „Katalyse“) in der großtechnischen Praxis für das Recycling gemischter Kunststoffabfälle keine wesentliche Rolle. Es ist für die Verwertung von Polyolefin-Gemischen (PE, PP) mit geringen Verunreinigungen z. B. an Papier oder PET sehr gut geeignet und kann dabei bis zu 85 % Ausbeute an Kohlenwasserstoffen erreichen.[lxxix] Am großtechnischen Einsatz von Katalysatoren zur Umwandlung von (gemischten) Kunststoffabfällen in kurzkettige Polymere oder Monomere, die als Sekundärrohstoffe dienen können, wird intensiv geforscht.[lxxx]

Eignung für bestimmte sortenreine/homogene Kunststoffabfälle:	sehr gut
Praxisrelevanz:	zunehmend
Eignung für heterogene Kunststoffabfälle:	gering
Eignung für Sortierreste:	gering
Praxisrelevanz:	keine

5.5.3 Thermische Pyrolyse

Verfahren der thermischen Pyrolyse (vereinfacht „Pyrolyse“) können bei der Verwertung von gut geeigneten, wenig gemischten und ggf. gründlich aufbereiteten Abfällen eine Ausbeute an Kohlenwasserstoffen von bis zu 70 % erreichen, die Verölung bis zu 80 %. In Bezug auf die Verwendung in Produkten liegen die Ausbeuten eher bei 45 – 50 %, unter Verwendung von Nebenprodukten bei höchsten 60 %. Die Zusammensetzung des Pyrolysegases und der Öle ist stark von den Ausgangsstoffen (behandelten Kunststoffabfällen) abhängig. Insbesondere die Öle und die Feststoffrückstände enthalten unter Umständen relevante Mengen an Schadstoffen.[lxxxi, lxxxii; lxxxiii, lxxxiv] Die Feststoffe bilden 10 – 30 % der Reaktionsprodukte und bestehen zu etwa der Hälfte aus „Pyrolysekoks“ sowie mineralischen und metallischen Bestandteilen.[lxxxv] Das Maximum an bis zu 90 % Ausbeute ist dabei nur möglich, wenn chemisch sortenreine Kunststoffgemische, z. B. ausschließlich die Polyolefine PE und PP, verarbeitet werden.

Eignung für sortenreine/homogene Kunststoffabfälle:	sehr gut
Praxisrelevanz:	gering
Eignung für heterogene Kunststoffabfälle:	mittel
Eignung für Sortierreste:	mittel
Praxisrelevanz:	zunehmend

5.5.4 Gasifizierung

Der Einsatz der Gasifizierung (Vergasung) für das „chemische Recycling“ von Kunststoffabfällen ist sehr selten und wird z. B. von Maisels et al. (2021) nicht weiter betrachtet.[lxxxvi] Sie führen als einziges Beispiel weltweit die Anlage von Showa Denko in Kawasaki/Japan auf.[lxxxvii] Laut Pressemeldungen erreichte die Anlage (in 19 Jahren Betrieb) bis Anfang 2022 einen Gesamtdurchsatz von 1 Mio. Mg Kunststoffabfällen.[lxxxviii] Zum Einsatz kommt ein Gemisch von PE, PP und PS.[lxxxix]

Zur Verarbeitung von heterogenen Kunststoffabfällen würden aufgrund der Korngröße Festbett- oder Wirbelschichtanlagen zum Einsatz kommen. In zweistufigen Verfahren kann das Pyrolyseöl anschließend gasifiziert werden.

In der Petrochemie mit fossilen Primäreinsatzstoffen erfolgt die Gasifizierung von pulverförmiger Kohle, Koks, Bitumen usw. seit langem erfolgreich in großen Flugstromanlagen bei hohen Temperaturen.

Früher in Deutschland betriebene Anlagen zur Gasifizierung von Kunststoffabfällen wurden stillgelegt. Die Herausforderungen liegen demnach vor allem in der Gasreinigung, dem anschließend erforderlichen Syntheseaufwand und der Wirtschaftlichkeit.[xc]

Eignung für bestimmte sortenreine/homogene Kunststoffabfälle:	sehr gut
Praxisrelevanz:	gering
Eignung für heterogene Kunststoffabfälle:	mittel
Eignung für Sortierreste:	gering
Praxisrelevanz:	keine

5.6 Zusammenfassende Bewertung

Das Umweltbundesamt schreibt zur Bewertung des „chemischen Recyclings“ insgesamt:

> *„Chemisches Recycling wird als eine Alternative oder Ergänzung zur werkstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen als eine andere Form des stofflichen Recyclings diskutiert, dem sowohl die Möglichkeit der Ausschleusung von Schadstoffen als auch das Potenzial des Einsatzes schwierig werkstofflich recycelbarer oder stark verschmutzter Abfälle zugesprochen wird. Noch sind die Techniken des chemischen Recyclings nicht etabliert und seine Stellung innerhalb der Kreislaufwirtschaft noch nicht endgültig festgelegt.“*
>
> *(UBA, o. D.)*[xci]

Quicker & Seitz (2024) konstatieren zur Umweltrelevanz der heute verfügbaren Verfahren:

> *Die Nutzenkorbmethode zeigt, dass chemische Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle dem mechanischen Recycling hinsichtlich Energieverbrauch und THG-Emissionen deutlich und der Verwertung im Zementwerk moderat unterlegen sind. Im Vergleich mit MVA und EBS-Kraftwerk zeigen die chemischen Recyclingrouten Vorteile bezüglich der Treibhausgasemissionen.“*
>
> (Quicker & Seitz, 2024[xcii], 2025[xciii])

Die Unterschiede in Energieaufwand und Treibhausgasemissionen zwischen den verschiedenen Routen des chemischen Recyclings sind dabei gering und ähnlich zur Primärproduktion:

> *„… der kumulierte Energieverbrauch (KEV) [lag] zwischen 5 und 6,5 kWh/kg HVC und die freigesetzten Treibhausgasemissionen (THG) bei 1,5-2 kg $CO_{2\text{-}EQ}$/kg HVC und damit auf dem Niveau der Primärherstellung von HVC aus Naphtha.“*
>
> (Quicker & Seitz, 2024[xciv], 2025[xcv])
>
> HVC… High Value Chemicals

Im Jahr 2001 kam das Österreichisch Forschungsinstitut für Chemie und Technik zu der Schlussfolgerung, dass die stoffliche Verwertung (einschließlich des chemischen Recyclings) trotz allem „auch bei optimistischer Einschätzung der Zukunft … kurzfristig nur für wenige ausgewählte Materialien und auch mittel- bis langfristig nur für einen Teil der Kunststoffe aus EAG sinnvoll durchführbar sein“ wird (Novak, 2001).[xcvi]

Das Ausmaß des chemischen Recyclings ist bis jetzt äußerst gering.

Für die Verwertung von nicht hochwertig recycelbaren Kunststoffbestandteilen in Hausmüll ist das chemische Recycling weder ökonomisch noch ökologisch noch technisch sinnvoll.

Mit Verweis auf den bis jetzt zweifelhaften Umweltnutzen wird eine staatliche finanzielle Unterstützung in Bezug auf das chemische Recycling z. B. durch Umweltverbände teilweise generell abgelehnt.[xcvii, xcviii] Zugleich besteht die Sorge, dass chemisches Recycling zu Lock-in-Effekten führen, also ökologisch tatsächlich vorteilhafte Lösungen behindern könnte, sowie die Forderung, dem mechanischen Recycling grundsätzlich Vorrang einzuräumen.[xcix, c]

Nur sehr wenige Verfahren des chemischen Recyclings erreichen einen Technologiereifegrad (Technology Readiness Level, TRL) von > 7.[ci] Unter Einschluss aller der eigentlichen chemischen Behandlung vor- und nachgelagerten Prozessschritte, insbes. der anschließenden Gas- und Ölaufbereitung, erreicht das am häufigsten angewandte Verfahren, die Pyrolyse, nur TRL 3.[cii] (Die Skala der TRL reicht von 1 bis 9, wobei 9 mit „Nachweis des erfolgreichen Einsatzes des qualifizierten Systems in der Praxis“ beschrieben werden kann. Ausführlich siehe DIN EN 16603-11:2020-02.)[ciii]

6 Positionen des VKU zum „Chemischen Recycling“

Position 1. Es gibt keine überzeugenden Demonstrationen, dass Verfahren des „chemischen Recyclings“ geeignet wären, das Recycling von in **Haus- und Geschäftsmüll** enthaltenen gemischten Kunststoffabfällen ökoeffizient zu erreichen. Sie können deshalb für diese Abfallarten nicht als „Recycling“-Verfahren im Sinne der Abfallhierarchie eingestuft werden.

Position 2. Für **sortenreine, chemisch homogene Kunststoffabfälle**, z. B. Produktions- und Verarbeitungsreste derselben Polymergruppe, kann eine (spezifisch zugeschnittene) Solvolyse eine ökoeffiziente Aufbereitungstechnik darstellen. **Gemischte Kunststoffabfälle und Sortierreste** können durch Pyrolyse teilweise in ein Synthesegas umgewandelt werden; die Ökoeffizienz lässt dabei mit zunehmender Heterogenität der Abfälle nach.

Position 3. Wenn die Reaktionsprodukte der Solvolyse oder die Bestandteile des Synthesegases oder der Ölphase der Pyrolyse (Sekundärrohstoffe) letztlich Neumaterial in Produkten ersetzen, handelt es sich um **Recycling**. Nur im Falle der Wiederverwertung (im ursprünglichen Produktionsprozess) kann dann jedoch ohne Weiteres von **hochwertigem Recycling** die Rede sein. Die simple Verdünnung von Schadstoffen usw. ist dabei auszuschließen. In allen anderen Konstellationen muss die Hochwertigkeit im Einzelfall geprüft und bewertet werden.

Position 4. Das chemische Recycling sollte nur dann erfolgen, wenn es – gegenüber dem mechanischen Recycling, der Verbrennung und anderen Verfahren – die ökoeffizientere, nachhaltigere Lösung ist oder die anderen Verfahren das benötigte Sekundärmaterial nicht mit den erforderlichen Eigenschaften liefern.

Position 5. Im **Kreislaufwirtschaftsgesetz** sollten die Begriffe **Wiederverwertung und Weiterverwertung** als präzisierende Unterkategorien des Recyclings aufgenommen werden. Diese Differenzierung würde eine genauere Bewertung der Hochwertigkeit von Recyclingverfahren ermöglichen.

Anmerkung zu Wiederverwendung und Weiterverwendung: Die in der Tabelle oben dargestellten Begriffe „Wiederverwendung" und „Weiterverwendung" (unter Beibehaltung der Produktgestalt) fallen nach geltendem Recht nicht unter „Recycling" im Sinne des § 3 Abs. 25 KrWG, sondern unter die höherrangige Stufe „Vorbereitung zur Wiederverwendung" gemäß § 6 Abs. 1 Nr. 2 KrWG. Die Empfehlung in Position 4 bezieht sich daher ausschließlich auf die Verwertungsformen **Wiederverwertung** und **Weiterverwertung** (unter Auflösung der Produktgestalt), die beide dem Recycling zuzuordnen sind.

Zur rechtlichen Einordnung: Die vorgeschlagene Untergliederung der Recycling-Stufe der Abfallhierarchie stellt eine nationale Konkretisierung dar, die mit Artikel 4 der EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG[civ] vereinbar sein sollte, da EU-Richtlinien den Mitgliedstaaten bei der Umsetzung grundsätzlich einen gewissen Spielraum lassen (Art. 288 Abs. 3 AEUV). Eine solche Präzisierung innerhalb der bestehenden Recycling-Stufe würde die fünfstufige

Abfallhierarchie (Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung, Beseitigung) nicht verändern, sondern lediglich die dritte Stufe differenzierter ausgestalten. Allerdings wäre vor einer gesetzlichen Umsetzung eine vertiefte juristische Prüfung der EU-Rechtskonformität durch Fachgutachten erforderlich, insbesondere hinsichtlich der Frage, ob eine solche Untergliederung mit dem Gleichbehandlungsgrundsatz vereinbar ist, sofern damit unterschiedliche rechtliche Behandlungen (z. B. bei Quotenberechnungen) verbunden werden.

Kriterien für Hochwertigkeit (Vorschlag):

Für die praktische Anwendung müssten konkrete, messbare Kriterien der Hochwertigkeit je nach Abfallstrom entwickelt werden. Als Ansatz wird vorgeschlagen:

Wiederverwertung kann grundsätzlich als hochwertiges Recycling gelten, sofern die Anforderungen an den Umwelt- und Gesundheitsschutz, die Besten Verfügbaren Techniken usw. eingehalten werden, effektiv eine hohe Substitution an Primärstoffen (z. B. 50 % des fossilen Kohlenstoffs[cv]) erreicht wird und die Sekundärstoffe bei demselben Einsatzzweck qualitativ dem Neumaterial entsprechen. Dies gilt insbesondere dann, wenn keine Qualitätsverschlechterung gegenüber dem ursprünglichen Material eintritt (Vermeidung von Downcycling).

Für die **Weiterverwertung** sollten Bewertungskriterien erarbeitet werden, die mindestens folgende Aspekte berücksichtigen:

- Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten („Upcycling“ vs. „Downcycling“)
- Kreislauffähigkeit der daraus hergestellten Produkte
- Energie- und Ressourcenaufwand des Verfahrens
- Leistungsfähigkeit des Verfahrens
- Substitutionserfolg.

Diese Kriterien müssten durch weitere Forschung operationalisiert und in entsprechenden Rechtsverordnungen konkretisiert werden.

Praktische Umsetzung: Die Aufnahme dieser Begriffe ins KrWG würde es den zuständigen Behörden ermöglichen, bei der Genehmigung und Überwachung von Recyclinganlagen differenzierter zwischen verschiedenen Verfahren zu unterscheiden. Insbesondere bei der Anrechnung auf Recyclingquoten (z. B. im Verpackungsgesetz) könnte damit eine sachgerechtere Bewertung erfolgen. Die Wirtschaft erhielte klarere Vorgaben, welche Verfahren als hochwertiges Recycling anerkannt werden.

Die Definition des „chemischen" oder „werkstofflichen" Recyclings im Abfallrecht erübrigt sich dann bzw. ist sogar kontraproduktiv, da sie z. B. keine Aussage darüber trifft, ob das „stoffgleiche Neumaterial" in hochwertigen oder in geringwertigen Produkten ersetzt wird („Upcycling" vs. „Downcycling").

Kontakt:

Dr. Martin J. Gehring
Senior-Fachgebietsleiter Abfallbehandlung, Klima- und Ressourcenschutz

Verband kommunaler Unternehmen e. V. (VKU)
Abt. Abfallwirtschaft und Stadtsauberkeit VKS
Invalidenstraße 91
10115 Berlin

E gehring@vku.de
T +49 30 58580-162
M +49 170 8580-162
https://www.vku.de

Dieses Positionspapier wurde unter punktueller Nutzung von Künstlicher Intelligenz erstellt.

[i] Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft (2025): Europa nach 2030. Die Entwicklung der Abfallwirtschaft zum industriellen Standortfaktor. Positionspapier des Arbeitskreises EU-Denkfabrik der DGAW, *Müll und Abfall*, **05/2025**, 277-296.

[ii] Janz, Al. (2000): Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen – eine Alternative zur werkstofflichen Verwertung? *Müll und Abfall*, **05/2000**, 242-244.

[iii] SPD, Bündnis 90/Die Grünen & FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025, S. 34. URL: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, Zugriff am 04.11.2024

[iv] CDU, CSU, SPD (2025): Verantwortung für Deutschland. Koalitionsvertrag für die 21. Legislaturperiode des Deutschen Bundestags. URL: https://www.koalitionsvertrag2025.de/sites/www.koalitionsvertrag2025.de/files/koav_2025.pdf, S. 6 Z. 183, Zugriff 03.11.2025

[v] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 1 Abs. 1

[vi] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 20 9 Abs. 1

[vii] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 20 Abs. 1, 2

[viii] Verpackungsgesetz vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 25. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 294) geändert worden ist, § 1 Abs. 2

[ix] Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft (2025): Europa nach 2030. Die Entwicklung der Abfallwirtschaft zum industriellen Standortfaktor. Positionspapier des Arbeitskreises EU-Denkfabrik der DGAW, *Müll und Abfall*, **05/2025**, 277-296.

[x] Nelles, M., Backes, R., Cyffka, A. G., Kornatz, P., und V. Lenz (2025): Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe – Kohlenstoffquelle, Bioenergie & negative Emissionen. *Müll und Abfall*, **04/2025**, 180-189.

[xi] Dornack, Chr. (2025): CCS und Kreislaufwirtschaft – Chance oder Widerspruch? *Müll und Abfall*, **12/2024**, 669.

[xii] Büsch, M., Franßen, Gr., Treder, M., und R. Reitz (2025): Abfallrechtliche Bewertung von abgeschiedenem CO2 aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen. *Müll und Abfall*, **01/2025**, 12-18.

[xiii] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 3 Abs. 25

[xiv] Gabler Wirtschaftslexikon Online: Recycling, Definition a). URL: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/recycling-44989/version-268290, Stand 19.02.2018 - 15:58, Zugriff am 18.10.2024

[xv] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 6 Abs. 1

[xvi] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 3 Abs. 23a KrWG

[xvii] Gabler Wirtschaftslexikon Online: Recycling, Definition b). URL: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/recycling-44989/version-268290, Stand 19.02.2018 - 15:58, Zugriff am 03.11.2025

[xviii] Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne (NACE) Revision 2), die mit der Verordnung (Europäische Gemeinschaft (EG)) Nummer 1893/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 2006 (Amtsblatt Europäische Gemeinschaft Nummer L 393 Seite 1) veröffentlicht wurde

[xix] Peitsch, L. (23.04.2025): Was ist zirkuläres Bauen? Recycling und andere Begriffe erklärt. Deutsches Architektenblatt Online, Glossar. URL: https://www.dabonline.de/architektur/zirkulaeres-bauen-recycling-begriffe/, Zugriff 03.11.2025

[xx] BIOVOX (o. D.): Recycled Medical Grade - Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe. URL: https://www.biovox.systems/recycled-medical-grade/, Zugriff 03.11.2025

[xxi] Gabler Wirtschaftslexikon Online: Recycling, Definition b). URL: https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/recycling-44989/version-268290, Stand 19.02.2018 - 15:58, Zugriff am 03.11.2025

[xxii] VDI-Richtlinie 2243 „Recyclingorientierte Produktentwicklung", 2002-07

[xxiii] VDI-Richtlinie 3459 Blatt 1 „Terminologie in der Energie- und Abfallwirtschaft – Grundlagen, 2017-11

[xxiv] z. B.: 5 R-Prinzipien (Zero Waste München; URL: https://zerowaste-muenchen.de/2020/11/05/die-5-rs-das-zero-waste-prinzip/), 6 R-Prinzipien (Informationszentrum Mobilfunk; URL: https://www.informations-zentrum-mobilfunk.de/2023/07/25/die-6-r-in-der-kreislaufwirtschaft-sechs-richtige-fuer-nachhaltigkeit/), 7 R-Prinzipien (McDonough & Braungart, 2009, Cradle to cradle : remaking the way we make things. Vintage), 8 R-Prinzipien (FKuR Kunststoff GmbH; URL: https://fkur.com/wissen/kreislaufwirtschaft-rezyklate-biokunststoffebeispiele-vorteile-nutzen/), 9 R-Prinzipien (United Nations Environmental Programme, 2019; URL: https://www.unep.org/circularity), 10 R-Prinzipien (Potting et al., 2017, Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain, PBL), alle Webseiten Zugriff 20.11.2025. Die Liste mit 9 bzw. 10 R-Prinzipien sind insofern identisch, als die Stufe R0 = Refuse, also der Konsumverzicht, mitgezählt wird oder nicht.

[xxv] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 3 Abs. 25

[xxvi] NABU (o. D.): Chemisches Recycling von Kunststoffen. Potenziale, Risiken und viele offene Fragen. URL: https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html, Zugriff 18.10.2024

[xxvii] Verpackungsgesetz vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 25. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 294) geändert worden ist

[xxviii] Verpackungsgesetz vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 25. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 294) geändert worden ist

[xxix] Lahl, U., und B. Zeschmar-Lahl (2025): Kunststoffrecycling und gefährliche Stoffe - RiskCycle. *Müll und Abfall*, **04/2024**, 195-204.

[xxx] Lahl, U., und B. Zeschmar-Lahl (2025): Der neue Markt an Recycling-Additiven – Handlungsbedarf für den Gesetzgeber. *Müll und Abfall*, **07/2025**, 376-382.

[xxxi] Vogel, J., Krüger, Fr., und M. Fabian (2020): Chemisches Recycling. Hintergrund. Hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf, S. 8, Zugriff am 05.06.2020

[xxxii] Vogel, J., Krüger, Fr., und M. Fabian (2020): Chemisches Recycling. Hintergrund. Hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf, S. 8, Zugriff am 05.06.2020

[xxxiii] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 3 Abs. 25

[xxxiv] Bundestags-Drucksache 17/6052 v. 06.06.2011, S. 75

[xxxv] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, Anlage 2

[xxxvi] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, Anlage 1

[xxxvii] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, Anlage 2

[xxxviii] Vogel, J., Krüger, Fr., und M. Fabian (2020): Chemisches Recycling. Hintergrund. Hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf, S. 8, Zugriff am 05.06.2020

[xxxix] Plastics Europe (o.J.): Chemisches Recycling – Alle Fragen auf einen Blick. URL: https://plasticseurope.org/de/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft/recycling/chemisches-recycling/, Zugriff 18.10.2024

[xl] Quicker, P., und M. Seitz (2024): Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings. UBA-Texte 154/2024, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Zugriff am 03.11.2025,), siehe S. 13 und Abbildung 9

[xli] Quicker, P., Neuerburg, F., Noël, Y., Huras, A., Eyssen, R. G., Seifert, H., Vehlow, J., und K. Thomé-Kozmiensky (2017): Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. UBA-Texte 17/2017, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Zugriff am 10.01.2024

[xlii] Quicker, P., und M. Seitz (2024): Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings. UBA-Texte 154/2024, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Zugriff am 03.11.2025

[xliii] Wikipedia: Solvolyse. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Solvolyse, zuletzt geändert am 14. Juni 2022 um 20.01 Uhr, Zugriff 11.01.2024

[xliv] Wikipedia: Katalyse. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Katalyse, zuletzt geändert 27.09.2023 um 07.51 Uhr, Zugriff am 10.01.2024

[xlv] European Commission Joint Research Centre (2019): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, Kapitel 2.3.4, S. 57ff., URL: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC118637_WI_Bref_2019_published_0.pdf, Zugriff am 04.11.2024

[xlvi] Maisels, A., Hiller, A., und F.-G. Simon (2021): Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven^. Chemie Ingenieur Technik 2021, 93, Nr. 11, 1742-1750, doi: 10.1002/cite.202100115, URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100115, Zugriff am 04.11.2024

[xlvii] European Commission Joint Research Centre (2019): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, Kapitel 2.3.4, S. 57ff., URL: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-01/JRC118637_WI_Bref_2019_published_0.pdf, Zugriff am 04.11.2024

[xlviii] Quicker, P., Neuerburg, F., Noël, Y., Huras, A., Eyssen, R. G., Seifert, H., Vehlow, J., und K. Thomé-Kozmiensky (2017): Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. UBA-Texte 17/2017, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, S. 15, Zugriff am 10.01.2024

[xlix] Maisels, A., Hiller, A., und F.-G. Simon (2021): Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven. Chemie Ingenieur Technik 2021, 93, Nr. 11, 1742-1750, doi: 10.1002/cite.202100115, URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100115, Zugriff am 04.11.2024. Siehe dort Zusatzmaterialien, Tabelle S1

[l] Wikipedia: Vergasung. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Vergasen, zuletzt geändert am 13. September 2018 um 19.04 Uhr, Zugriff am 10.01.2024

[li] Roymaplast (o. D.): Chemisches Recycling von Polypropylen. URL: http://roymaplast.com/de/reciclaje-quimico-del-polipropileno/, Zugriff am 10.01.2024

[lii] Quicker, P., Neuerburg, F., Noël, Y., Huras, A., Eyssen, R. G., Seifert, H., Vehlow, J., und K. Thomé-Kozmiensky (2017): Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. UBA-Texte 17/2017, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, S. 19f., Zugriff am 10.01.2024

[liii] Lee, Kwon Jun (2021): *Isolation and identification of plastic degrading microorganism.* MSc(Res) thesis, University of Nottingham, URL: https://eprints.nottingham.ac.uk/66097/, Zugriff am 10.01.2024

[liv] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 6 Abs. 1

[lv] Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist, § 6 Abs. 2

[lvi] Wikipedia (2025): Nachhaltigkeit. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Nachhaltigkeit, Stand 12.11.2025, 22.37 Uhr, Zugriff 19.11.2025

[lvii] Wikipedia (2025): Ressource. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Ressource, Stand 11.03.2025, 18.54 Uhr, Zugriff 19.11.2025

[lviii] Bertelsmann Stiftung u.a. (Hrsg.) (2025): SDG-Indikatoren für Kommunen. 4. Auflage, Stand Dez. 2024, URL: file:///C:/Users/Gehring/Desktop/SDG-Indikatoren_f_Kommunen_4Auflage_2025-08-12.pdf, Zugriff 19.11.2025

[lix] Von UNDP (United Nations Development Programme) - https://unric.org/https://unric.org/de/17ziele/gdrive: SDG Icons German Eigenes Werk mittels: gdrive: SDG Material_DE_Ohne UN-Emblem.zip -> SDG_Poster_DE_No UN Emblem.pdf, Gemeinfrei, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=125994232. Wikipedia (2025): Nachhaltigkeit. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Nachhaltigkeit, Stand 12.11.2025, 22.37 Uhr, Zugriff 19.11.2025

[lx] Wikipedia (2025): Nachhaltigkeit. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Nachhaltigkeit, Stand 12.11.2025, 22.37 Uhr, Zugriff 19.11.2025

[lxi] Lindner, Chr., Schmitt, J., Hein, J., und E. Fischer (2024): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Studie der Conversio im Auftrag der BKV und anderer, Kurzfassung. URL: https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv/studien/Kurzfassung%20Stoffstrombild%202023.pdf, Zugriff am 03.11.2025

[lxii] o.N. (2024): So viel Kunststoff produziert die Welt. NEWS und Infografik der Woche, Daten Plastics Europe, Grafik Statista, 03.12.2024, URL: https://www.kunststoffe.de/a/news/so-viel-kunststoff-produziert-die-welt-6336006, Zugriff 03.11.2025

[lxiii] Lindner, Chr., Schmitt, J., Hein, J., und E. Fischer (2024): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Studie der Conversio im Auftrag der BKV und anderer, Kurzfassung. URL: https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv/studien/Kurzfassung%20Stoffstrombild%202023.pdf, Zugriff am 03.11.2025

[lxiv] Cieplik, St. (2025): Kunststoffe im Kreislauf. Kunststoffabfälle und deren Verwertung in Deutschland. Müll und Abfall, 08/2025, 440-447.

[lxv] Lindner, Chr. (2025): Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. In: Wiemer, Kl., Kern, M., Raussen, Th. (Hrsg.): Bioabfall- und stoffspezifische Verwertung VII, Witzenhausen: Witzenhausen-Institut, Tab. 1, S. 312.

[lxvi] Schlotter, U. (2019): Chemisches Recycling, kann das bei der Verwertung von Kunststoffen helfen? *Müll und Abfall*, **05/2019**, 249-253.

[lxvii] Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft (2025): Europa nach 2030. Die Entwicklung der Abfallwirtschaft zum industriellen Standortfaktor. Positionspapier des Arbeitskreises EU-Denkfabrik der DGAW, *Müll und Abfall*, **05/2025**, 277-296.

[lxviii] Fraunhofer URL: https://www.ccpe.fraunhofer.de/de/aktuelles/pressemitteilungen/2025/chemisches-recycling-in-europa-karte.html, Zugriff am 09.12.2025
[lxix] Schlotter, U. (2019): Chemisches Recycling, kann das bei der Verwertung von Kunststoffen helfen? *Müll und Abfall*, **05/2019**, 249-253.

[lxx] Quicker, P., Neuerburg, F., Noël, Y., Huras, A., Eyssen, R. G., Seifert, H., Vehlow, J., und K. Thomé-Kozmiensky (2017): Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. UBA-Texte 17/2017, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, S. 6, Zugriff am 10.01.2024

[lxxi] Maisels, A., Hiller, A., und F.-G. Simon (2021): Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven. Chemie Ingenieur Technik 2021, 93, Nr. 11, 1742-1750, doi: 10.1002/cite.202100115, URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100115, Zugriff am 04.11.2024. Siehe dort Zusatzmaterialien, Tabellen S1 und S2

[lxxii] Quicker, P., und M. Seitz (2024): Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings. UBA-Texte 154/2024, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Zugriff am 03.11.2025

[lxxiii] Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Behandlungsverordnung vom 21. Juni 2021 (BGBl. I S. 1841).

[lxxiv] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2024): Mitteilung der LAGA 31 A „Umsetzung des ‚Elektro- und Elektronikgerätegesetzes' und der ‚Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Behandlungsverordnung'. Anforderungen an die Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten", Stand 08.05.2024, URL: https://www.laga-online.de/documents/laga-m31a_1721829137.pdf, Zugriff am 04.11.2024

[lxxv] Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1739), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2240) geändert worden ist

[lxxvi] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2024): Mitteilung der LAGA 31 A „Umsetzung des ‚Elektro- und Elektronikgerätegesetzes' und der ‚Elektro- und Elektronik-Altgeräte-Behandlungsverordnung'. Anforderungen an die Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten", Stand 08.05.2024, URL: https://www.laga-online.de/documents/laga-m31a_1721829137.pdf, Zugriff am 04.11.2024

[lxxvii] Maisels, A., Hiller, A., und F.-G. Simon (2021): Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven. Chemie Ingenieur Technik 2021, 93, Nr. 11, 1742-1750, doi: 10.1002/cite.202100115, URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100115, Zugriff am 04.11.2024. Siehe dort Zusatzmaterialien, Tabellen S1 und S2

[lxxviii] Maisels, A., Hiller, A., und F.-G. Simon (2021): Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven. Chemie Ingenieur Technik 2021, 93, Nr. 11, 1742-1750, doi: 10.1002/cite.202100115, URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100115, Zugriff am 04.11.2024

[lxxix] Nertsch, N., Vogt, J., Straczewski, Gr., Mannebach, G., Fraaije, V., Tavakkol, S., Mihan, Sh., und D. Stapf (2023): Chemical Recycling of Polyolefinic Waste to Light Olefins by Catalytic Pyrolysis. Chemie Ingenieur Technik 2023, https://doi.org/10.1002/cite.202300078, Zugriff am 09.12.2025

[lxxx] Chemisches Recycling: Gehört Katalysatoren die Zukunft? 320grad.de, 09.01.2024, URL: https://320grad.de/2024/01/09/chemisches-recycling-gehoert-katalysatoren-die-zukunft/, Zugriff am 10.01.2024

[lxxxi] Quicker, P., Neuerburg, F., Noël, Y., Huras, A., Eyssen, R. G., Seifert, H., Vehlow, J., und K. Thomé-Kozmiensky (2017): Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. UBA-Texte 17/2017, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, S. 16ff., Zugriff am 10.01.2024

[lxxxii] Quicker, P., und M. Seitz (2024): Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings. UBA-Texte 154/2024, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Zugriff am 03.11.2025

[lxxxiii] Zeller, M., Leibold, H., Netsch, N., Richter, Fr., und D. Stapf (2021): Chemisches Recycling kunststoffhaltiger Abfälle - Das Potenzial der Pyrolyse. URL: https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2023/06/Stapf_Proceeding_BAEK21.pdf, Zugriff 03.11.2025

[lxxxiv] Zeller, M., Netsch, N., Richter, Fr., Leibold, H., und D. Stapf (2021): Chemical Recycling of Mixed Plastic Wastes by Pyrolysis – Pilot Scale Investigations. *Chem. Ing. Tech.*, **93 No. 11**, 1763-1770, DOI: 10.1002/cite.202100102

[lxxxv] Zeller, M., Leibold, H., Netsch, N., Richter, Fr., und D. Stapf (2021): Chemisches Recycling kunststoffhaltiger Abfälle - Das Potenzial der Pyrolyse. URL: https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2023/06/Stapf_Proceeding_BAEK21.pdf, Zugriff 03.11.2025

[lxxxvi] Maisels, A., Hiller, A., und F.-G. Simon (2021): Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven. Chemie Ingenieur Technik 2021, 93, Nr. 11, 1742-1750, doi: 10.1002/cite.202100115, URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100115, Zugriff am 04.11.2024.

[lxxxvii] Maisels, A., Hiller, A., und F.-G. Simon (2021): Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven. Chemie Ingenieur Technik 2021, 93, Nr. 11, 1742-1750, doi: 10.1002/cite.202100115, URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100115, Zugriff am 04.11.2024. Siehe dort Zusatzmaterialien, Tabelle S1

[lxxxviii] Resonac, 09.02.2022: Showa Denko Achieves Recycling of 1 Million Tons of Used Plastics in Total. URL: https://www.resonac.com/news/2022/02/09/2219.html, Zugriff am 09.12.2025

[lxxxix] Maisels, A., Hiller, A., und F.-G. Simon (2021): Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven. Chemie Ingenieur Technik 2021, 93, Nr. 11, 1742-1750, doi: 10.1002/cite.202100115, URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100115, Zugriff am 04.11.2024. Siehe dort Zusatzmaterialien, Tabelle S1

[xc] Quicker, P., Neuerburg, F., Noël, Y., Huras, A., Eyssen, R. G., Seifert, H., Vehlow, J., und K. Thomé-Kozmiensky (2017): Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. UBA-Texte 17/2017, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, S. 58ff., Zugriff am 10.01.2024

[xci] Umweltbundesamt (o. D.): Chemisches Recycling. URL: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chemisches-recycling, Zugriff am 10.01.2024

[xcii] Quicker, P., und M. Seitz (2024): Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings. UBA-Texte 154/2024, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Zugriff am 03.11.2025.

[xciii] Quicker, P., und M. Seitz (2025): Bilanzierung und Bewertung des thermochemischen Recyclings von Kunststoffabfällen. *Müll und Abfall*, **02/2025**, 80-85.

[xciv] Quicker, P., und M. Seitz (2024): Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings. UBA-Texte 154/2024, hrsg. vom Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Zugriff am 03.11.2025.

[xcv] Quicker, P., und M. Seitz (2025): Bilanzierung und Bewertung des thermochemischen Recyclings von Kunststoffabfällen. *Müll und Abfall*, **02/2025**, 80-85.

[xcvi] Novak, E. (2001): Verwertungsmöglichkeiten für ausgewählte Fraktionen aus der Demontage von Elektroaltgeräten – Kunststoffe. URL: https://www.bmluk.gv.at/dam/jcr:7816f45a-9b96-4199-a4cc-4922a1d315a4/EAG_Kunststoffe.pdf, Zugriff 03.11.2025

[xcvii] Zero Waste Europe (2024): Fifty years: chemical recycling's fading promise. Industry Landscape Overview, URL: https://zerowasteeurope.eu/wp-content/uploads/2024/11/ZWE_Nov24_FiftyYearsChemicalRecycling_FullOverview.pdf, Zugriff 03.11.225

[xcviii] Roth, S. (2021): Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen. Warum die Risiken die Chancen überwiegen. *Müll und Abfall*, **04/2021**, 208-213.

[xcix] WWF Deutschland (ohne Jahr): WWF-Position „Chemisches Recycling". URL: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Plastik/WWF-Positionspaper-Chemisches-Recycling.pdf, Zugriff 07.11.2025

[c] Naturschutzbund Deutschland (Nabu) (2025): Verfahren des chemischen Recyclings. URL: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/abfallpolitik/250521-nabu-chemisches-recycling-verfahren.pdf, Zugriff 07.11.2025

[ci] Franke, M., Rieger, T., Hofmann, A., Fehn, Th. (2025): Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen – Aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen. In: Wiemer, Kl., Kern, M., Raussen, Th. (Hrsg.): Bioabfall- und stoffspezifische Verwertung VII, Witzenhausen: Witzenhausen-Institut, 341-352.

[cii] Schlotter, U. (2019): Chemisches Recycling, kann das bei der Verwertung von Kunststoffen helfen? *Müll und Abfall*, **05/2019**, 249-253.

[ciii] DIN EN 16603-11:2020-02: Raumfahrttechnik - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien (ISO 16290:2013, modifiziert); Deutsche Fassung EN 16603-11:2019

[civ] RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinie. ABl. EU L 312 vom 22.11.2008, S. 3, zuletzt geändert durch RICHTLINIE (EU) 2025/1892 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 10. September 2025, ABl. EU L 1892 vom 26.09.2025, S. 1

[cv] Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft (2025): Europa nach 2030. Die Entwicklung der Abfallwirtschaft zum industriellen Standortfaktor. Positionspapier des Arbeitskreises EU-Denkfabrik der DGAW, *Müll und Abfall*, **05/2025**, 277-296.