



CHEMISCHES KUNSTSTOFFRECYCLING – POTENZIALE UND ENTWICKLUNGS- PERSPEKTIVEN

Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und
kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW

Diskussionspapier der Arbeitsgruppe
Circular Economy

Dieses Dokument wird von folgenden Unternehmen und Institutionen getragen:



Eine Initiative der NRW-Landesregierung

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



IN4climate.NRW lebt von der Diskussion und den verschiedenen Standpunkten der beteiligten Unternehmen und Organisationen. IN4climate.NRW versteht sich nicht als Verband, der die Interessen seiner Mitglieder aktiv in der Politik vertritt. Die Initiative stellt eine Plattform zum Meinungsaustausch und Diskurs dar. In diesem Umfeld entstehen Papiere und Ausarbeitungen, die von einzelnen Mitgliedern erarbeitet, diskutiert und ausformuliert werden. Andere Mitglieder können sich in einem strukturierten Prozess den Ergebnissen oder Diskussionsbeiträgen explizit anschließen und das Dokument mittragen. Alle IN4climate.NRW-Mitglieder, die die entstandenen Ergebnisse mittragen, werden transparent aufgeführt. Dies erlaubt aber keine Aussage zur Positionierung anderer nicht aufgeführter IN4climate.NRW-Mitglieder. Die Geschäftsstelle von IN4climate.NRW stellt Transparenz und Beteiligungsmöglichkeiten sicher.

Autoren: Dr. Stephan Ramesohl (Wuppertal Institut), Laura Vetter (Wuppertal Institut),
Raoul Meys (RWTH Aachen), Sören Steger (Wuppertal Institut)

Beiträge von: Dr. Philipp Bendix (Wuppertal Institut), Dr. Bernd Kaletta (Lanxess),
Dr. Georg Kobiela (Wuppertal Institut), Julia Koop (Rain Carbon),
Dr. Ulrich Seifert (Fraunhofer UMSICHT), Dr. Christoph Sievering (Covestro),
Ph.D. Balint Simon (RWTH Aachen)

Bibliographische Angaben

Herausgeber: IN4climate.NRW GmbH
Veröffentlicht: Juli 2020
Koordination: Dr. Lukas John, Iris Rieth (IN4climate.NRW)
Kontakt: lukas.john@in4climate.nrw, iris.rieth@in4climate.nrw

Bitte zitieren als: IN4climate.NRW (Hrsg.) 2020: Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy. Gelsenkirchen.

UNSERE KERNBOTSCHAFTEN

Die Pyrolyse ist als Verwertungsrouten für gemischte Kunststoffabfälle ein zukunftsweisendes Verfahren, das einen Beitrag für die klimagerechte Gestaltung der chemischen Industrie leisten kann.

- Die technischen Grundlagen der Kunststoff-Pyrolyse sind vorhanden.
- In NRW sind Einsatzstoffe für das chemische Recycling verfügbar.
- Für das chemische Recycling zeichnet sich eine klimapolitisch sinnvolle Perspektive ab.
- Es besteht Entwicklungsbedarf speziell zum Recycling von gemischten Kunststoffabfällen.

Mit dem Diskussionspapier werden folgende vertiefende Untersuchungen zur weiteren Entwicklung des Verfahrens gefordert:

- Eine **vertiefte Technologiebewertung** mit der Auswertung bisheriger Entwicklungsarbeiten und der gezielteren Beschreibung reaktionstechnischer Kenngrößen, um einen spezifischen Entwicklungsbedarf abzuleiten.
- Die **Analyse der politischen und marktlichen Rahmenbedingungen**, auch vor dem Hintergrund der absehbaren Trends und Akzeptanz.
- Eine vertiefte **Szenarioanalyse künftiger Kunststoffabfallströme**, um langfristige Investitionen anzureizen und das zukünftige Potenzial des chemischen Recyclings abschätzen zu können.
- Die vertiefte **ökologische und ökonomische Bewertung der Pyrolyseprodukte** sowohl für die heutige Situation als auch perspektivisch für 2030 und 2050.
- Die Erarbeitung einer **strategischen Roadmap „Chemisches Kunststoffrecycling NRW“**.
- Die Durchführung einer **Folgestudie in Kooperation von Industrie und Wissenschaft** mit dem Ziel der Ausarbeitung und Bewertung der strategischen Perspektive einer Demonstrationsanlage zum thermochemischen Recycling von Kunststoffabfällen in NRW als Beitrag zum ökologischen Strukturwandel des Landes.

INHALT

1.	HINTERGRUND, AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	5
2.	EINGRENZUNG, ARBEITSHYPOTHESEN UND UNTERSUCHUNGSANSATZ	7
3.	TECHNOLOGIEÜBERSICHT	9
3.1	Begriffsdefinitionen.....	9
3.2	Arbeitsbegriff Pyrolyse und Überblicksdarstellung „chemisches Recycling“	12
4.	ABSCHÄTZUNG VON STAND DER TECHNIK UND GRUNDSÄTZLICHER MACHBARKEIT	13
4.1	Literaturübersicht zum Stand der Forschung und Entwicklung von Pyrolysetechnologien...	13
4.1.1	Literaturübersicht aus wissenschaftlichen Übersichtsartikeln.....	13
4.1.2	Übersicht der Industrieinitiativen zur Demonstration und Kommerzialisierung von Pyrolyse- technologien	17
4.2	Kernaussagen aus der Literatur	20
5.	ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG VON CHEMISCHEM RECYCLING	23
5.1	Ökologische Bewertung der Verwertung von Kunststoffabfällen	24
5.1.1	Allgemeine Methodik zur ökologischen Bewertung von Verwertungstechnologien	24
5.1.2	Ziel und Untersuchungsrahmen der ökologischen Bewertung	25
5.1.3	Funktionelle Einheit.....	26
5.2	Indikative Verfahrensbewertung und Schlussfolgerungen	30
5.2.1	Überblicksartige Darstellung der Ergebnisse, Kernaussagen und Schlussfolgerungen	30
5.2.2	Offene Fragen und weiterer Untersuchungsbedarf	31
6.	ABSCHÄTZUNG DER MASSENSTRÖME IN NRW	32
6.1	Abschätzung des Aufkommens an Kunststoffabfällen und ihre Verwertung in NRW (potenzieller Input für chemisches Recycling).....	32
6.2	Perspektiven für das chemische Recycling	34
7.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUM WEITEREN UNTERSUCHUNGS- BEDARF	38
7.1	Zusammenfassung.....	38
7.2	Schlussfolgerungen.....	39
8.	LITERATURVERZEICHNIS	41
9.	ANHANG	46
9.1	Übersicht der Klassifizierung nach TRL.....	46
9.2	Verfahrensmerkmale thermochemischer Verfahren.....	46
9.3	Vor- und Nachteile der Verfahren des chemischen Kunststoffrecyclings	47
9.4	Kunststoffanteil nach Abfallschlüsselnummern.....	48

1. HINTERGRUND, AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Im Rahmen des Pariser Klimaschutzabkommens haben sich nationale und internationale Akteure das Ziel gesetzt, die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Dies bedeutet im Kern eine Defossilisierung von Wirtschaft und Gesellschaft bis zur Mitte des Jahrhunderts und eine weitgehende Umstellung der Energieversorgung auf CO₂-freie, erneuerbare Energiequellen.

In ihrer Klimaschutzverantwortung stehen die chemische Industrie und die Kunststoffindustrie vor der besonderen Herausforderung, dass zur Zeit fossile Energieträger wie Erdöl und Erdgas nicht nur als Brennstoffe zum Einsatz kommen, sondern auch die wesentliche Kohlenstoffquelle für die werkstoffliche Nutzung sind (sog. nicht-energetischer Verbrauch). Die doppelte Aufgabe ist damit zum einen die energie- und prozessbedingten Treibhausgasemissionen zu senken und zum anderen auf eine klimaschonende Rohstoffbasis und -nutzung umzusteigen.

Abbildung 1 illustriert die heutige Situation, in der die Kunststoffherstellung auf petrochemischen Rohstoffen basiert, die aus der Verarbeitung von Erdöl in Raffinerien stammen. Diese Raffinerien sind dabei in der Hauptsache auf die Versorgung des Verkehrs mit Kraftstoffen ausgerichtet (zu kleineren Anteilen auch als Brennstoffe, z. B. im Wärmemarkt). Im Zuge von effektiven Klimaschutzstrategien müssen diese fossilen Rohstoffgrundlagen schrittweise zurückgezogen und alternative regenerative Energiequellen für den Verkehrssektor erschlossen werden. In Zukunft werden Raffinerien und Unternehmen der Erdölchemie ihre Bedeutung als Rohstoffgrundlage für die Kunststoffindustrie verlieren – in der Konsequenz müssen alternative Kohlenstoff-Inputs als Ressource erschlossen werden.

Angesichts der global sehr begrenzten Potenziale von nachhaltig bereitgestellter Biomasse bieten sich hierfür vor allem zwei Strategieoptionen an (vgl. Abbildung 1):

- Die verstärkte Kreislaufführung und Wiedernutzung des in Kunststoffprodukten gebundenen Kohlenstoffs durch verstärktes Recycling (werkstofflich und chemisch).
- Perspektivisch die industrielle Synthese von Kohlenwasserstoffen auf Basis von regenerativem Wasserstoff und klimaneutralen CO₂-Quellen (z. B. durch „Direct Air Capture“-Verfahren oder Kreislaufführung von CO₂) bzw. unvermeidbare CO₂-Emissionen aus industriellen Prozessen.

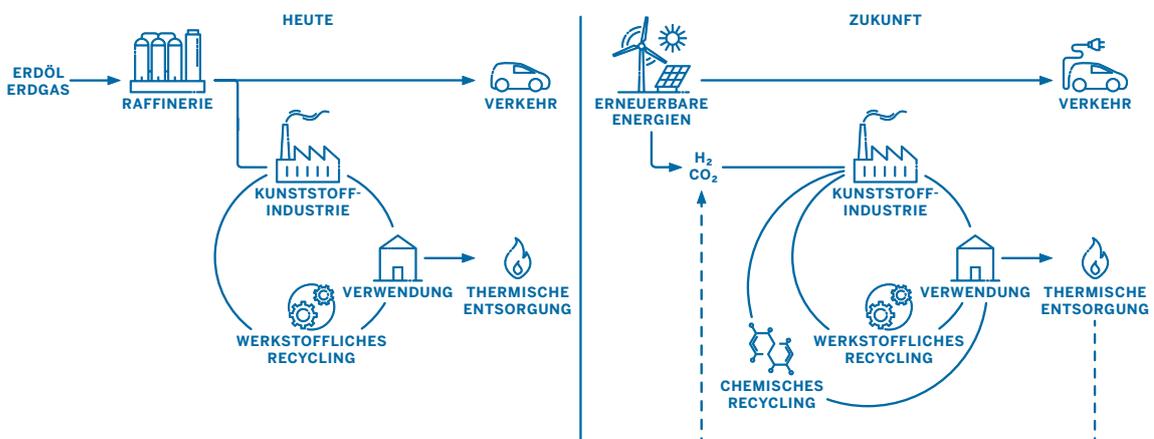


Abbildung 1: Illustrierte Darstellung der Kohlenstoffkreisläufe im Kunststoffsystem.

Das Diskussionspapier der AG Circular Economy setzt an dieser ersten Strategieoption eines zukünftigen Kohlenstoffrecyclings an. Aktuell werden kleinere Anteile des nach der Nutzungsphase anfallenden Kunststoffs schon durch werkstoffliches Recycling zurückgewonnen, der überwiegende Anteil wird heute jedoch thermisch verwertet (vgl. Kapitel 6.1). In Zukunft gilt es, die thermische Verwertung zurückzufahren und auf technisch unvermeidbare Verluste zu reduzieren, die Anteile der werkstofflichen Wiedernutzung deutlich zu erhöhen und zusätzliche ökologisch-sinnvolle Kreislaufoptionen zu erschließen. Verfahren des chemischen Recyclings bieten hier eine bislang unerschlossene Option.

Die Arbeit der AG Circular Economy versteht sich dabei als erste, vorbereitende Konzeptphase zur Erkundung und Eingrenzung möglicher Handlungsoptionen des chemischen Recyclings, die in einer möglichen Folgephase inhaltlich und methodisch detailliert werden können. Im Kontext der Initiative IN4climate.NRW können damit die Grundlagen für konkrete, industriegetragene Entwicklungsprojekte geschaffen werden. Am Ende einer erfolgreichen Entwicklungsarbeit könnte dann mittel- bis langfristig die Demonstration und der Aufbau eines Clusters „Zirkuläre Kunststoffindustrie NRW (Arbeitstitel)“ stehen.

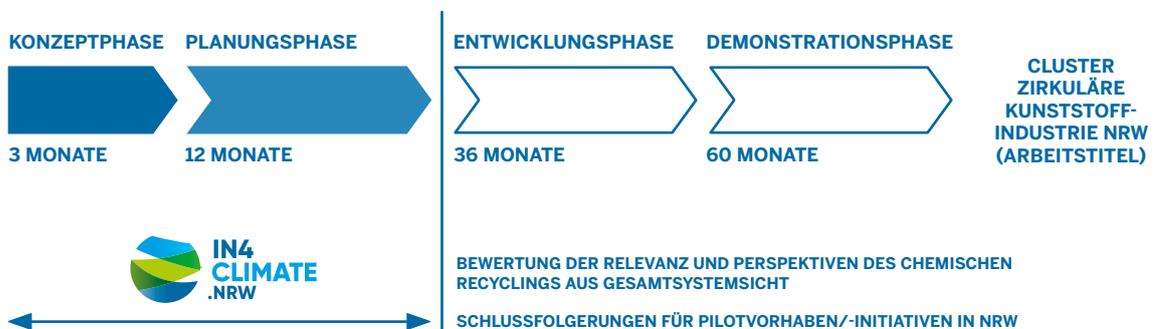


Abbildung 2: Einordnung und Kontext der Konzeptphase der AG Circular Economy.

Es ist daher das Ziel dieses Diskussionspapiers,

- die Potenziale und Entwicklungsperspektiven für das chemische Recycling von Kunststoffabfällen als Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW zu skizzieren,
- wesentliche Technologierouten und -optionen zu beschreiben und den Stand der Technik einzuschätzen (Kapitel 3 und Kapitel 4),
- erste ökologische Wirkungen und Vorteile abzuschätzen (Kapitel 5),
- mögliche Massenströme, Mengengerüste und Marktbedingungen zu skizzieren (Kapitel 6),
- offene Fragen und weiteren Untersuchungsbedarf zu identifizieren, die Grundlage und Rahmen für weitergehende Arbeiten bieten (Kapitel 7).

Bezugsrahmen der Untersuchung ist dabei ein ganzheitliches Verständnis der Veränderungen in Energie- und Industriesystemen und deren Konsequenzen für die ökologisch-ökonomische Bewertung von Handlungsoptionen.

2. EINGRENZUNG, ARBEITSHYPOTHESEN UND UNTERSUCHUNGSANSATZ

Für das Recycling von Kunststoffabfällen stehen verschiedene Konzepte und Verfahren zur Verfügung, deren Anwendbarkeit und effektive Beiträge zum Klima- und Ressourcenschutz stark von der Qualität und stofflichen Zusammensetzung der Abfallströme abhängen (vgl. Kapitel 3.1).

Das Diskussionspapier untersucht in NRW bislang unerschlossene Verfahrensrouten für das chemische Recycling von gemischten Kunststoffabfällen (vgl. Übersicht in Kapitel 3.1). Die Diskussion fokussiert sich dabei auf die spezifische Fragestellung, ob und inwieweit die (Weiter-)Entwicklung von Pyrolysetechnologien das Potenzial zur ökologisch sinnvollen Verwertung von gemischten Kunststoffabfällen und zur Kreislaufführung des im Kunststoff gebundenen Kohlenstoffs bietet.

Dieser Eingrenzung liegen folgende Arbeitshypothesen zugrunde:

- Um einen möglichst hohen Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz zu erreichen, sollte versucht werden, in Recyclingverfahren die stoffliche Zusammensetzung und Polymerstrukturen und dadurch den ökonomisch-energetischen Wert der Kunststoffe so gut wie möglich zu erhalten, sowie den Energieaufwand für die Kreislaufführung (Sortierung, Zerlegung und Synthese) der eingesetzten Verbindungen minimal zu halten.
- Für viele Kunststoffarten, wie z. B. Thermoplaste, ist daher das werkstoffliche Recycling anzustreben. Die Voraussetzung ist allerdings eine entsprechende Homogenität und Reinheit der Sortier- und Aufbereitungsprozesse (z. B. bei Pfandsysteme für PET-Flaschen). Maßnahmen zum Produkt- und Verpackungsdesign, Optimierung von Trennverhalten und Sammellogistik und neue Sortier- und Aufbereitungstechnologien werden dabei den Anteil der werkstofflich recycelbaren Kunststoffe perspektivisch erhöhen.
- Für spezifische Kunststoffarten und -qualitäten bieten bei sortenreiner Erfassung (z. B. durch die jeweiligen Hersteller) die Verfahren zur Depolymerisation ebenfalls Möglichkeiten des Recyclings auf hohem stofflichem Niveau.
- Für große Teile der Abfallströme ist die sortenreine Erfassung bzw. Aufbereitung derzeit jedoch nicht gegeben und auch in Zukunft werden substantielle Mengen von gemischten Kunststoffabfällen anfallen.
- Zurzeit werden diese Mengen thermisch genutzt (Ersatzbrennstoff bzw. Müllverbrennung), wodurch der im Stoff gebundene Kohlenstoff verloren geht. Verfahren zur Vergasung bieten grundsätzlich eine weitere Option zur Behandlung von gemischten Abfällen, allerdings enthält das Synthesegas nur noch die grundlegenden Bausteine H₂ und CO, was eine spätere stoffliche Nutzung wieder sehr aufwendig macht.
- Pyrolyseverfahren können dagegen je nach Verfahrensart und Fahrweise ein breiteres Produktspektrum mit längererkettigen Verbindungen erzeugen, die für eine stoffliche Nutzung in nachgelagerten Chemieprozessen vorteilhaft sind.

Die Untersuchung konzentriert sich daher auf die **Potenziale von Pyrolysetechnologien zur Verwertung von gemischten Kunststoffabfällen**, die nicht für höherwertiges werkstoffliches oder chemisches Recycling (Depolymerisation) geeignet sind (vgl. Abbildung 3). Die unterschiedlichen herstellerbezogenen Ansätze und Initiativen zur Kreislaufführung von spezifischen Produktgruppen werden daher in die vorliegende Analyse nicht mit einbezogen, aber durch den eher breit gewählten Ansatz der Pyrolyse ergänzt.

In dem gewählten Themenfeld wird Untersuchungsbedarf gesehen, da bisherige Ansätze zur Pyrolyse in den meisten Fällen auf die Produktion von Feedstocks für den petrochemischen Verbund mit Crackern ausgerichtet sind (vgl. Kapitel 4.1) und deshalb tendenziell anfällig für Störstoffe und Verunreinigungen sind. Es wird in diesem Diskussionspapier angenommen, dass adaptierte (und ggf. noch zu entwickelnde) Technologiekonfigurationen höhere Toleranzen gegenüber (anorganischen) Verunreinigungen der gemischten Kunststoffabfälle aufweisen und ein attraktives Produktspektrum für chemische Prozesse bereitstellen können. Ähnliche Perspektiven bieten sich für die Verwertung von technischen Kunststoffen, deren Eignung allerdings aufgrund der großen Materialvielfalt und sehr spezifischen Zusammensetzung (Additive etc.) jeweils gesondert zu betrachten ist. Der Referenzpunkt für die ökologische Bewertung (vgl. Kapitel 5) ist dabei die Substitutionsbeziehung zur thermischen Verwertung als Ersatzbrennstoff (EBS) oder Müllverbrennung (MVA).

Im Kontext der oben skizzierten veränderten Systemumgebung und Dekarbonisierung des Energiesystems (insbes. Ausbau der CO₂-freien Stromerzeugung) wird in der Tendenz von rückläufigen CO₂-Gutschriften der thermischen Entsorgung von Kunststoffen ausgegangen.

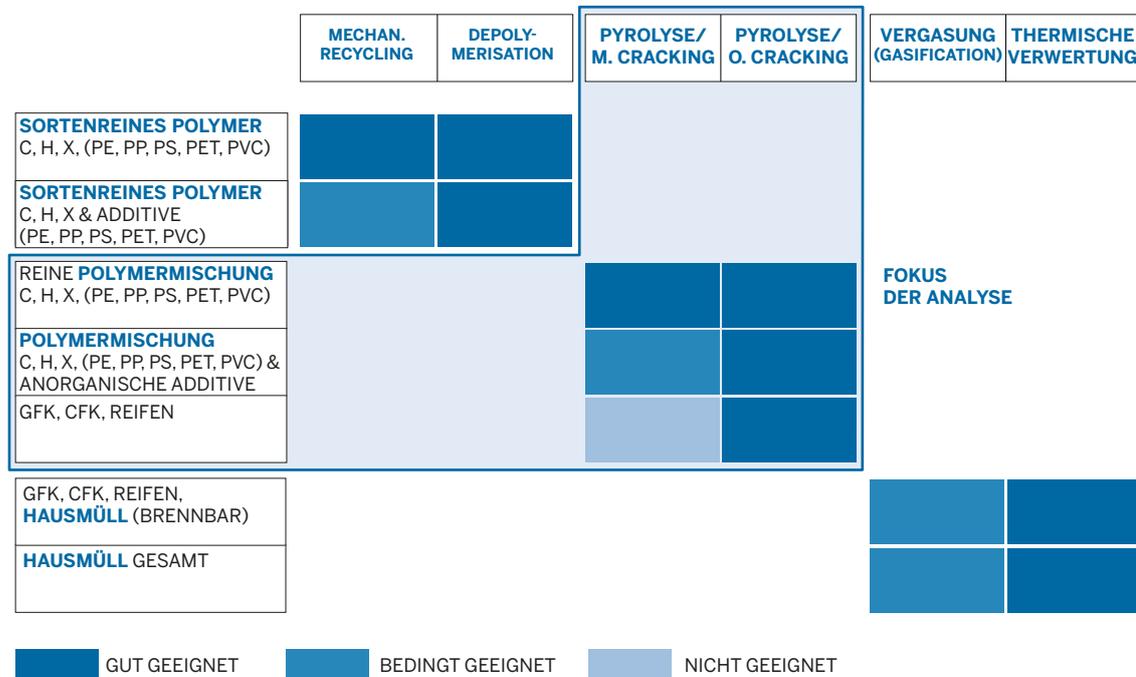


Abbildung 3: Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands – Pyrolyse gemischter Kunststoffabfälle als Fokus der Analyse.

3. TECHNOLOGIEÜBERSICHT

In den vorangegangenen Kapiteln wurde deutlich, dass unterschiedliche Optionen und Verfahrensrouten für die Verwertung von Kunststoffabfällen existieren. In diesem Kapitel wird eine Technologieübersicht des chemischen Recyclings vorgestellt und damit die Arbeitsgrundlage für das vorliegende Diskussionspapier gelegt. Die Pyrolyse als die zentral betrachtete Technologie dieser Untersuchung steht dabei im Fokus.

Folgende Eckpunkte und Leitfragen sind dabei zu klären:

- Wie lässt sich die Pyrolysetechnologie im Kontext des chemischen Recyclings einordnen?
- Welche Technologien werden im Rahmen des chemischen Recyclings diskutiert? Wie lassen sich diese definieren bzw. welche Arbeitsbegriffe/Terminologie werden/wird im Diskussionspapier verwendet?
- Wonach lassen sich Pyrolyseprozesse klassifizieren?

In Kapitel 3.1 werden grundlegende Begriffsdefinitionen diskutiert und in Kapitel 3.2 eine grafisch aufbereitete Zusammenfassung und Übersicht über das Themengebiet des chemischen Recyclings, insbesondere der Pyrolyse, gegeben.

3.1 Begriffsdefinitionen

Gemeinsames Merkmal der in diesem Diskussionspapier betrachteten Verfahren ist die **thermische Zersetzung (thermochemische Konversion)** höhermolekularer Substanzen zu niedermolekularen Reaktionsprodukten bei erhöhter Temperatur. Ausgenommen sind damit Verfahren, die zur vollständigen Oxidation (Verbrennung) des Ausgangsmaterials führen.

In der Literatur werden verschiedene Fachbegriffe für Verfahren verwendet, die gleiche Verfahrensmerkmale (näher beschrieben in Anhang 9.2) beinhalten und sich daher verfahrenstechnisch überlappen oder identisch sind.

Auch werden in der Literatur Begriffe z. T. unterschiedlich definiert und verwendet, sodass sie sich teilweise widersprechen. Diese Problematik wird u. a. auch in dem von der EU in Auftrag gegebenen Bericht „A circular economy for plastics: insights from research and innovation to inform policy and funding decisions“ von Crippa et al. (2019) beschrieben.

Eine Begriffsklärung und -definition ist daher als gemeinsame Arbeitsgrundlage entscheidend. Aus diesem Grund werden im Folgenden ausgewählte Begriffe, die im Kontext des chemischen Recyclings Verwendung finden, näher erläutert bzw. definiert.

Dies ist besonders relevant, wenn durch die Wahl des Begriffs gleichzeitig im regulatorischen Rahmen die „Anrechenbarkeit“ oder „Nicht-Anrechenbarkeit“ auf Recyclingquoten festgelegt wird.

- **Chemisches Recycling** ist die Gesamtheit von Verfahren, die einerseits mehr als nur mechanische oder physikalische Vorgänge zur Aufbereitung des Ausgangsstoffs nutzen, die aber andererseits nicht zur vollständigen chemischen Umsetzung (Verbrennung) mit Luftsauerstoff führen.
- **Tertiäres Recycling** ist ein (bislang wenig geläufiges) Synonym für chemisches Recycling.
- **Feedstock Recycling/rohstoffliches Recycling** ist ein Verfahren, welches den Ausgangsstoff zu chemischen Einsatzstoffen (z. B. für eine Synthese) umwandelt. Darunter fallen auch die nachfolgend betrachteten thermochemischen Verfahren.

- **Depolymerisation** ist die Aufspaltung eines Polymers in seine Monomere bzw. in Oligomere, d. h. kurz-kettige Polymereinheiten.
 - **Chemische Depolymerisation** ist Depolymerisation durch „chemischen Angriff“, z. B. in Form der Hydrolyse.
 - **Solvolyse** ist ein Spezialfall der chemischen Depolymerisation, (in der Literatur aber oft auch synonym verwendet), der im Fall von Polykondensaten (z. B. Polyester, Polyamide) anwendbar ist, und zwar insbesondere in Form der Hydrolyse (Bindungsspaltung mit Wasser als Reaktant). Es können unterschiedliche Lösungsmittel zum Einsatz kommen. Dahingehend lässt sich die Solvolyse weiter unterteilen in Glycolyse, Methanolyse, Hydrolyse und Aminolyse.
 - **Chemolyse** ist, den Wortbestandteilen nach, die Aufspaltung (Lyse) einer Verbindung durch chemische Einwirkung/dem Wortlaut nach sehr allgemein. In der Literatur wird der Begriff meist äquivalent zur Solvolyse genutzt.
 - **Thermische Depolymerisation** beschreibt eine Depolymerisation durch Energiezufuhr bei erhöhter Temperatur. Eingesetzt wird sie derzeit bei PMMA und in Grenzen bei Polystyrol. Es handelt sich dann um eine Variante der Pyrolyse.

Definition thermochemischer Verfahren für die Verwertung von Kunststoffabfällen

Der Begriff des „Verfahrens“ ist selbst mehrdeutig: Er kann einerseits für die Anwendung bestimmter verfahrenstechnischer Prinzipien stehen (Temperatur, Hilfsstoffe, Zielprodukte der Zersetzung, wie im Anhang unter 9.2 näher erläutert), aber andererseits auch als Bezeichnung für eine definierte Kombination von Prozessschritten und Apparaten unter bestimmten Prozessbedingungen gemeint sein (wie z. B. das Haber-Bosch-Verfahren zur Ammoniaksynthese).

Diese Doppeldeutigkeit erklärt auch, dass in der Literatur zum selben Verfahrensbegriff teilweise unterschiedliche Zuordnungen zu finden sind.

Technische Verfahrensbezeichnungen konkretisieren einzelne Verfahrensmerkmale:

- **Pyrolyse:** allothermes (unter Energiezufuhr) Verfahren unter Sauerstoff- und Luftausschluss.
- **Katalytisches Cracken:** allothermes, katalytisches Verfahren.
- **Hydrocracking:** allothermes, katalytisches Verfahren unter Zugabe von Wasserstoff.
- **Vergasung:** autothermes Verfahren (ohne Energiezufuhr) durch partielle Oxidation, bei dem ein zusätzlicher gasförmiger Reaktant eingesetzt wird.
- **Reforming:** Je nach Anwendungszusammenhang unterschiedliche Verfahren, mit denen die „chemische Umformung“ gemeint ist. Als Ausgangsstoff wird in der Regel eine flüssige Kohlenwasserstofffraktion (Naphtha oder Pyrolyseöl) eingesetzt.

Bezugnehmend auf Lechleitner et al. (2019) lassen sich die genannten thermochemischen Verfahren weiter charakterisieren:

- **Pyrolyse:** thermochemischer Prozess, mit dem Polymere bei Temperaturen von über 300 Grad Celsius aufgespalten werden, unter Entstehung eines breiten Produktspektrums. Dies geschieht über einen radikalischen Kettenspaltungsmechanismus. Je nach Prozessbedingungen entstehen Pyrolysegas, synthetisches Rohöl/Pyrolyseöl und Pyrolysewachse, die durch destillative und veredelnde Schritte zu höherwertigen Chemikalien weiterverarbeitet werden können, bspw. zu Monomereinheiten für die Polymerchemie oder Grundchemikalien und Treibstoffen. Diese Aufbereitungsschritte können in den Prozess integriert oder in einer konventionellen Raffinerie nachgelagert sein.

- **Katalytisches Cracken:** thermochemischer Prozess. Im Vergleich zur Pyrolyse wird hier zusätzlich ein Katalysator eingesetzt. Dieser setzt die Aktivierungsenergie der Kettenspaltungsreaktion herab und beeinflusst das Produktspektrum. Im Vergleich zur rein thermischen Degradation werden mehr verzweigte, ringförmige und aromatische Verbindungen gebildet. Heteroatome wie Stickstoff, Sauerstoff oder Schwefel können sich problematisch auf den Prozess auswirken, da diese als Katalysatorgifte wirken können.
- **Hydrocracken:** thermochemischer Prozess. Im Vergleich zur Pyrolyse zusätzlich unter Zugabe von Wasserstoff bei Partialdrücken von 2 bis 15 MPa, oft in der Anwesenheit eines bifunktionellen Katalysators. Durch die Verfügbarkeit von Wasserstoff werden hauptsächlich gesättigte und weniger ungesättigte und aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen gebildet. Der Prozess kann auch zweistufig mit vorgeschalteter Pyrolyse und nachgeschalteter Hydrierung durchgeführt werden. Dies bietet den Vorteil, dass Heteroatome, Störstoffe und Koks in einem Zwischenschritt nach der Pyrolyse entfernt werden können, wodurch der Katalysator geschont wird.
- **Vergasung:** Partielle Oxidation mittels Luft, Sauerstoff, Dampf oder Mischungen von Kohlenwasserstoffen, üblicherweise bei Temperaturen zwischen 700 und 1.600 Grad Celsius und Drücken zwischen 10 und 90 bar. Das Produktgas enthält je nach Prozessbedingungen und Einsatzstoffen CO, H₂, aber auch CH₄ und höhere Kohlenwasserstoffe, ggf. mit Heteroatomen. Die Reaktion verläuft autotherm, d. h. durch die exotherme Teilreaktionen, bei denen Energie frei wird, werden die Teilreaktionen gespeist, die unter Energieaufnahme ablaufen. Dadurch benötigt der Prozess keine äußere Energiezufuhr. Die Gasreinigung im Folgeschritt ist wichtig, da die Folgeprozesse in der Wertschöpfungskette überwiegend katalytisch und daher empfindlich gegenüber Verunreinigungen sind.
- **Katalytisches Reforming von Naphtha/Pyrolyseöl:** Das Verfahren hat die Umwandlung zu aromatischen Verbindungen zum Ziel. Dabei laufen vier Reaktionen ab: Dehydrierung von Cycloalkanen zu Aromaten, Dehydrozyklisierung von Paraffinen zu Aromaten, Isomerisierung und Hydrocracking von Alkanen zu verzweigten bzw. kurzkettigen Alkanen (Speight 2010).

Abgrenzung Cracking vs. Pyrolyse

Der Begriff „Cracking“ wird vorwiegend in der Petrochemie verwendet und dort gegenüber dem Begriff „Pyrolyse“ bevorzugt. Rein verfahrenstechnisch betrachtet sind in beiden Fällen allotherme Verfahren unter Sauerstoffausschluss gemeint, mit dem gemeinsamen Ziel, Polymerketten in kürzere Kohlenwasserstoffbestandteile zu zerteilen. Die Verfahren lassen sich dahingehend nicht unterscheiden. Gleiches gilt für die folgende begriffliche Auflistung:

- Thermal Cracking
- Thermische Zersetzung
- Pyrolytisches Cracking
- Thermolyse

Eine tabellarische Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren des chemischen Kunststoffrecyclings findet sich im Anhang 9.3.

3.2 Arbeitsbegriff Pyrolyse und Überblicksdarstellung „chemisches Recycling“

Im folgenden Diskussionspapier wird der Arbeitsbegriff Pyrolyse entsprechend der in Kapitel 3.1 diskutierten Begriffe und Definitionen verwendet. Eine grafische Einordnung und Übersicht über die in Kapitel 3.1 definierten Begriffe bietet Abbildung 4 mit der Darstellung der verschiedenen Kreisläufe für Plastik in einer Kreislaufwirtschaft. Diese legt als Klassifizierungsmerkmal für den jeweiligen Recyclingpfad die Art der Veränderung der Polymerstruktur zugrunde. Die Pyrolyse lässt sich dahingehend (sowie anhand der in Kapitel 3.1 getroffenen Definitionen) sowohl unter Feedstock-Recycling als auch im Spezialfall unter Depolymerisation (vgl. Thermische Depolymerisation) einordnen.

GESCHLOSSENE KREISLÄUFE

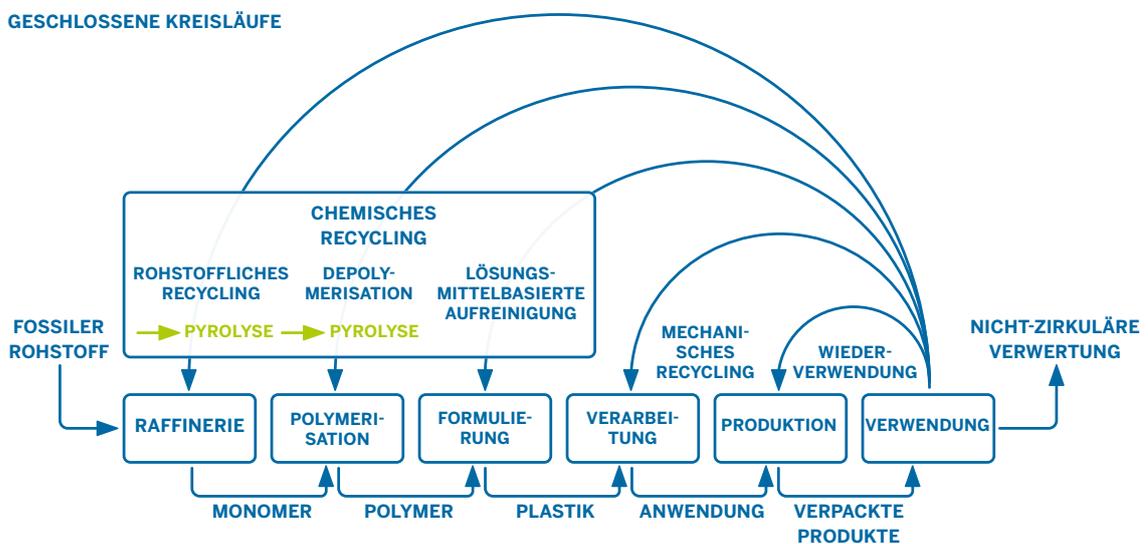


Abbildung 4: Überblick über verschiedene Kreisläufe für Plastik in einer Kreislaufwirtschaft. Abgeändert nach Crippa et al. 2019¹

¹ „Da die lösungsmittelbasierte Reinigung die Zusammensetzung des Polymers selbst nicht verändert, wird argumentiert, dass sie eher als mechanisches als chemisches Recycling oder als separate Klasse anzusehen ist (siehe auch ISO 15270:2008). Dieser Bericht nimmt keine Stellung dazu, welche Option bevorzugt werden sollte. Die hier angewandte Logik ist, dass Chemikalien, die in der lösungsmittelbasierten Reinigung verwendet werden, um die Formulierung des Kunststoffes zu ändern (durch Entfernen von Additiven und Extrahieren des Basispolymers/der Basispolymere), als eine von mehreren chemischen Recyclingtechniken beschrieben werden können. Beachten Sie, dass diese Positionierung der lösungsmittelbasierten Reinigung für praktische Zwecke erfolgt ist und keine Empfehlung für eine standardisierte Terminologie darstellt.“ (Crippa et al. 2019)

4. ABSCHÄTZUNG VON STAND DER TECHNIK UND GRUNDSÄTZLICHER MACHBARKEIT

In diesem Kapitel werden bisherige Aktivitäten und der Stand der Technik für Pyrolyseverfahren beschrieben, um Aussagen darüber zu treffen, inwiefern eine Anwendung der Technologie für die Kreislaufführung gemischter Kunststoffabfälle als Beitrag für eine Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie realisierbar erscheint. Dabei werden folgende Eckpunkte und Leitfragen untersucht:

- Welcher Entwicklungsstand zu Pyrolyseverfahren zur Kunststoffverwertung lässt sich aus der Literatur ableiten?
- Welche Erfahrungen und Ergebnisse liegen bislang vor, welche offenen Fragen werden diskutiert bzw. ergeben sich daraus?
- Was sind nächste Entwicklungsaufgaben und -schritte?

Kapitel 4.1 bietet eine Übersicht über den Stand der Entwicklung der Pyrolysetechnologie. Dabei werden in Kapitel 4.1.1 Ergebnisse der Auswertung wissenschaftlicher Übersichtsartikel dargestellt und in Kapitel 4.1.2 aktuelle Industrieprojekte beschrieben. In Kapitel 4.2 werden auf dieser Grundlage einige zentrale Ergebnisse und Erkenntnisse zum Entwicklungsstand des Kunststoffrecyclings durch Pyrolyse diskutiert.

4.1 Literaturübersicht zum Stand der Forschung und Entwicklung von Pyrolysetechnologien

Um den Stand der Forschung und Entwicklung der Pyrolyse-Technologie zur Verwertung von gemischten Kunststoffabfällen abzuschätzen, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Es wurden zum einen wissenschaftliche Übersichtsartikel in Kapitel 4.1.1 und zum anderen Quellen zu aktuellen Industrieinitiativen in Kapitel 4.1.2 ausgewertet. Um einen Vergleich mit großtechnischen Verfahren der Abfallverwertung zu ermöglichen, wurden in Kapitel 4.1.1 auch Vergasungsverfahren mitbetrachtet. Die Ergebnisse beider Recherchen wurden in Abbildung 5 grafisch dargestellt.

4.1.1 Literaturübersicht aus wissenschaftlichen Übersichtsartikeln

Es wurden sechs Übersichtsartikel (Lopez et al. 2017; Lopez et al. 2018; Singh et al. 2017; Stapf et al. 2018; Thunman et al. 2019; Anuar Sharuddin et al. 2016) zu thermochemischen Verfahren zur Verwertung von kunststoffhaltigen Abfällen gefunden und für die Ausarbeitung eines Überblicks herangezogen.

Diese beinhalten insgesamt 174 Referenzen, die Prozesse beschreiben, die sich nach Technologie, Technologischem Reifegrad² (TRL) und Input-Strom unterteilen lassen. In Abbildung 5 sind diese in einer Überblicksgrafik dargestellt. Dabei wurden Verfahren im Labormaßstab (TRL <6) zusammengefasst abgebildet. Verfahren, die bereits Demonstrations- oder Kommerzialisierungsreife aufweisen, sind zudem in Tabelle 1 zusammengefasst.

² Da lediglich in einer Veröffentlichung der Technologische Reifegrad explizit angegeben ist, wurde dieser für die anderen anhand des Durchsatzes abgeschätzt. (TRL 4: <4kg/h; TRL 5: ab 4kg/h; TRL 6 ab 10 kg/h; TRL 7 ab 60 kg/h; TRL 8 ab 400 kg/h). Eine Übersicht der Klassifizierung nach TRL findet sich im Anhang 9.1.

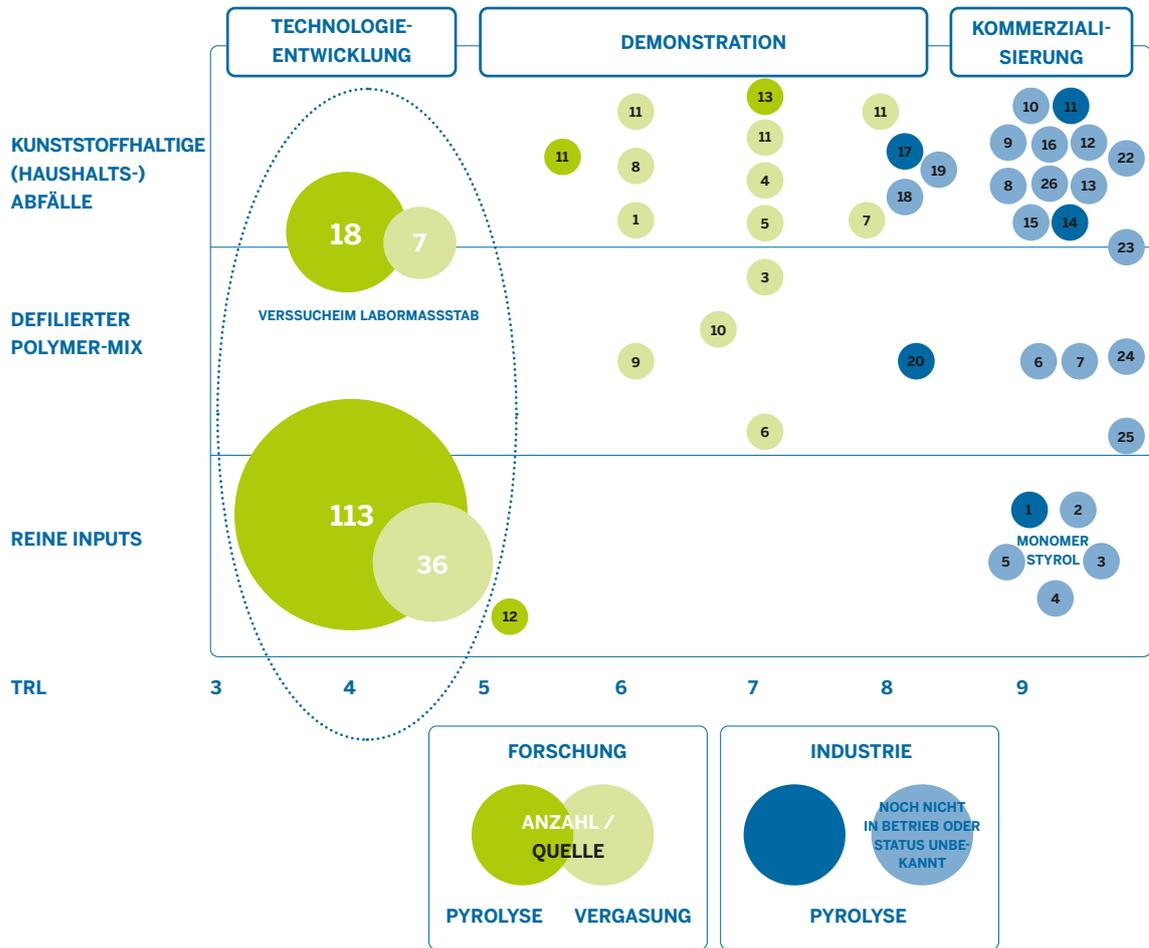


Abbildung 5: Überblick ausgewählter Ergebnisse der Literaturrecherche. Die Quellen zu den verweisenden Nummern finden sich für Forschungsergebnisse in Tabelle 1, zu Industrieprojekten in Tabelle 2.

Tabelle 1: Literaturreferenzen zu Prozessen aus den Übersichtsartikeln mit TRL ≥6 (* TRL abgeschätzt, vgl. oben).

Nr.	Quelle	TRL	Durchsatz [kg/h]	Prozess	Reaktor-konfiguration	Input	Produkte
1	Wilk, V./Hofbauer, H. (2013 b)	6*	7,5 - 16,6	Vergasung	Zweibett-Wirbelschicht	gemischte Kunststoffabfälle	Monomer-Rückgewinnung
2	Tukker, A. et al. (1999)	7 - 8*	200 - 400	k. A.	Zweibett-Wirbelschicht	PVC und Harze	HCl und Brenngas
3	Maric, J. et al. (2018)	7 - 8	370	Vergasung	Zweibett-Wirbelschicht	Automobil-Shredderabfälle	Monomer-Rückgewinnung
4	Arena, U./Di Gregorio, F. (2014)	7*	100	Vergasung	Wirbelschicht	gemischte Kunststoffabfälle (hauptsächlich PE)	k. A.
5	Arena, U. et al. (2010)	7*	100	Vergasung	Wirbelschicht	gemischte Kunststoffabfälle	k. A.
6	Arena, U./Di Gregorio, F. (2016)	7*	100	Vergasung	Wirbelschicht	Biomasse	k. A.
7	Lee, J. W. et al. (2013)	7*	80	Vergasung	Pilot-scale moving-grate	gemischte Kunststoffabfälle	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ für Stromgewinnung
8	Wilk, V./Hofbauer, H. (2013 a)	6*	15	Co-Vergasung	Zweibett-Wirbelschicht	Holzpellets / Kunststoffe aus MSW	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄
9	Kern, S. J. et al. (2013)	6*	15	Co-Vergasung	Zweibett-Wirbelschicht	Braunkohle / PE	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₅
10	Ponzio, A. et al. (2006)	6 - 7*	60	Co-Vergasung	Updraft	Polyolefin-Abfälle / Biomasse	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₆
11	Stapf, D. (2018)	6 - 9	k. A.	Vergasung	Festbett, Wirbelschicht, Flugstrom	kunststoffhaltige Haushaltsabfälle	Synthese-Gas für Methanolsynthese
		5 - 6	k. A.	Pyrolyse	k. A.		Pyrolysoil für Steam-Cracker
12	Miskolczi, N. et al. (2009)	5*	9	Pyrolyse	horizontaler Rohrreaktor	HDPE / PE	Pyrolyse-Öl, -Gas, -Wachs, -Koks
13	iCAREPLAST (2019)	7	>100	Pyrolyse (katalytisch)	k. A.	gemischte Kunststoffabfälle	Pyrolyse-Öl (Aromaten), Koks, flüssiges CO ₂

Ergebnisse der Literaturlauswertung von Forschungsarbeiten

Die Auswertung zeigt, dass sich der Stand der Forschung auf den Labormaßstab konzentriert und überwiegend Reinstoffe als Einsatzmaterial betrachtet wurden.

Von 133 Pyrolyseverfahren werden lediglich zwei Prozesse im Pilotmaßstab beschrieben. Die restlichen 131 liegen im Labormaßstab. Die Vergasung im Vergleich dazu ist bereits etwas weiterentwickelt, großskalige Prozesse existieren allerdings auch begrenzt. Aus den betrachteten Quellen zur Vergasung stehen zehn Prozesse mit einer Technologischen Reife TRL ≥ 6 41 Prozessen im Labormaßstab gegenüber.

Darüber hinaus werden in 150 von 174 Quellen Reinstoffe als Ausgangsmaterial eingesetzt (Pyrolyse und Vergasung zusammen betrachtet). In vielen werden definierte Kunststoffgemische und nur in wenigen verunreinigte gemischte Kunststoffabfälle betrachtet. In Tabelle 1 sind die Ausgangsmaterialien für die großskaligen Prozesse aufgelistet.

Aus dem Überblick über den technologischen Reifegrad der Pyrolysetechnologie lässt sich daher ableiten, dass noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Anwendungsfeld des chemischen Recyclings von gemischten Kunststoffabfällen besteht.

Bestätigt wird dieses Ergebnis von Stapf et al. (2018) und Lopez et al. (2017), die auf den Entwicklungsbedarf bei den Pyrolyseverfahren (und Vergasungsverfahren) verweisen.

Diese Forschungslücke zu schließen und einen Prozess zur kosten- und energieeffizienten Verwertung der heutigen nicht recycelbaren Kunststoffe und Verbundwerkstoffe zu realisieren, hat sich das 2018 gestartete EU-Projekt iCAREPLAST (Integrated Catalytic Recycling of Plastic Residues Into Added-Value Chemicals) zum Ziel gesetzt. Es ist veranschlagt mit einer Laufzeit von 48 Monaten und einer Förderungshöhe von 6,51 Millionen Euro unter Beteiligung von zehn Partnern aus fünf europäischen Ländern. Die Projektleitung hat die spanische Forschungseinrichtung Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas übernommen. Es handelt sich dabei um einen integrierten Prozess aus katalytischer Pyrolyse, katalytischer Nachbehandlung (Alkylierung und Hydrotreatment) und einem Membrantrennverfahren. Vorgesaltet sind eine Abfallsortierung und Vorbehandlung. Hergestellt werden Benzol, Toluol und Xylol (BTX) sowie weitere Alkyaromaten und flüssiges CO₂. Die Anlage soll eine Kapazität von mehr als 100 Kilogramm Kunststoff/h (~900 t/a, TRL-7) haben (iCAREPLAST 2019).

4.1.2 Übersicht der Industrieinitiativen zur Demonstration und Kommerzialisierung von Pyrolysetechnologien

In Tabelle 2 sind Rechercheergebnisse zu aktuellen Kommerzialisierungsansätzen von Pyrolysetechnologien für die Verwertung von Kunststoffabfällen zusammengefasst. Im unteren Tabellenabschnitt sind über die Pyrolyse hinaus auch Depolymerisationsverfahren vorgestellt.

Für eine gute Übersichtlichkeit wurden die Industrieinitiativen aus Tabelle 2 gemeinsam mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.1.1 in der oben gezeigten Übersichtsgrafik, Abbildung 5, dargestellt. Aus der Zusammenstellung lässt sich ableiten, dass es eine Reihe von Aktivitäten sowie großes Interesse in der Industrie zum chemischen Recycling gibt. Einigen Unternehmen ist es offensichtlich bereits gelungen, die rohstoffliche Verwertung von Kunststoffen mittels Pyrolysetechnologie zu kommerzialisieren und viele stehen kurz davor.

Die Konzerne Plastic Energy und Pyrum Innovation sind mit ihren Pyrolyseverfahren zur Verwertung von kunststoffhaltigen Abfällen bereits am Markt. Diese liegen, soweit aus den bisherigen Rechercheergebnissen ersichtlich, im Bereich über 10.000 Tonnen pro Jahr. Aus der Literatur sind wenige Informationen über die Anforderungen an den Inputstrom abzuleiten, inwieweit es sich um eine Mischung verschiedener Kunststoffsorten handelt oder wie hoch der Grad der Verunreinigung durch bestimmte Störstoffe sein darf. Neben diesen zwei größeren Anlagen betreibt der OMV Konzern eine Pyrolyseanlage für Polyolefine im Pilotmaßstab. Diese ist an die Raffinerie Schwechat angeschlossen. Die BASF hat einen Prototyp für unsortierte, gemischte und verunreinigte Kunststoffe entwickelt, der bereits in Betrieb ist.

Daneben gibt es eine Vielzahl an Industrieinitiativen, die eine Kommerzialisierung durchaus großer Anlagen angekündigt haben. Die größten Projekte werden angestrebt von dem Joint Venture aus Gas Technology Institute (Illinois), CRI Catalysts und Shell mit einer Kapazität von 700.000 Tonnen pro Jahr, gefolgt von Plastic Energy mit 200.000 Tonnen pro Jahr und Brightmark Energy mit 100.000 Tonnen pro Jahr. Quantafuel ist bereits in der Konstruktion einer Anlage mit einer Kapazität von 18.000 Tonnen pro Jahr. BASF hat zuletzt 20 Millionen Euro in das norwegische Unternehmen investiert, um gemeinsam das chemische Recycling von gemischten Kunststoffabfällen voranzutreiben (Stark 2019).

Für das chemische Recycling von Polystyrol zu seinem Monomer Styrol besitzt Agilyx, eigenen Angaben zufolge, die weltweit erste gewerbliche Pyrolyseanlage, in Tigard, Oregon (Agilyx 2018). Das Unternehmen plant zusätzlich in den nächsten Monaten drei neue Anlagen zu eröffnen (Tullo 2019). Außerdem hat es seine Technologie an drei Firmen in den Vereinigten Staaten verkauft (Agilyx 2019a). Darunter auch an den Polystyrol-Hersteller INEOS Styrolution.

Viele der genannten Initiativen basieren auf einem Joint Venture von Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette (Rohstofflieferanten sowie Abnehmern der Produkte) und die Anpassung der Produkte an deren spezifische Anforderungen.

Die genannten sowie weitere Industrieinitiativen und nähere Informationen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Aus der Zusammenstellung lässt sich ableiten, dass es offensichtlich eine Reihe von Aktivitäten und substanzielles Interesse in der Industrie zum chemischen Recycling gibt und eine verstärkte Entwicklung in den nächsten Jahren zu erwarten ist.

Tabelle 2: Übersicht aktueller und geplanter Industrieeinitiativen zur Demonstration und Kommerzialisierung von Pyrolysetechnologien und Depolymerisation.

Nr.	Unternehmen	Anlage			Kapazität	Input	Produkt(e)	Abnehmer	Referenz
		Verfahren, Prozess	Standort	Inbetriebnahme					
1	Agilyx Joint Venture mit Americas Styrenics (AmSty)	Pyrolyse von PS	Tigard, Oregon, US	April 2018	3.650 t/a	PS	Styrol	Styrol- und Polystyrolhersteller AmSty und INEOS Styrolution zur Verarbeitung für die Herstellung von Konsumgütern	Agilyx 2018; Agilyx 2019
2	INEOS Styrolution (mit Agilyx Technologie)	Pyrolyse von PS	Channahon, Illinois, US	in Planung, keine nähere Angabe	36.500 t/a	PS	Styrol	INEOS Styrolution selbst PS-Hersteller	Tullo 2019
3	Agilyx Joint Venture mit Americas Styrenics (AmSty)	Pyrolyse von PS	Western US	in Planung, keine nähere Angabe	18.000 t/a	PS	Styrol	Styrol- und Polystyrolhersteller AmSty und INEOS Styrolution zur Verarbeitung für die Herstellung von Konsumgütern	Tullo 2019
4	Trinseo and INEOS Styrolution (mit Agilyx Technologie)	Pyrolyse von PS	Europa	in Planung, keine nähere Angabe	18.000 t/a	PS	Styrol	INEOS Styrolution und Trinseo (luxemburgischer Chemiekonzern) selbst PS-Hersteller	Tullo 2019; Kunststoff-Web 2019; Trinseo 2019
5	INEOS Styrolution mit Indaver	Pyrolyse von PS	Mechelen, Belgien	in Planung, keine nähere Angabe	k. A.	PS	Styrol	Partnerschaft mit Lebensmittelverpackungsgruppe Sirap	Kunststoff-Web 2019; William and Burridge 2019
6	BlueAlp	Pyrolyse, Blue-AlpTM Technology	k. A.	k. A.	20.000 t/a	Polyolefine	k. A.	k. A.	BlueAlp 2019; Petrogas 2019
7	Clariter	Pyrolyse	k. A.	k. A.	10.000 t/a	PE, PP, PS	k. A.	k. A.	Clariter-global clean-tech group 2019
8	Illinois-based Gas Technology Institute/ CRI Catalyst/Shell	Hydropyrolyse	k. A.	k. A.	700.000 t/a	Siedlungsabfall, Biomasse, Kunststoffabfälle	k. A.	k. A.	IH2 Technology; Shell 2019a
9	Brightmark Energy	Pyrolyse	Ashley, Indiana, US	in Konstruktion	100.000 t/a	Kunststoffabfälle, gemischte Kunststoffreste aus dem Recycling	Diesel, Naphtha, industrielles Wachs	Diesel and Naphthan BP	Brightmarkenergy 2019
10	Quantafuel	katalytische Pyrolyse und Aufreinigung	Skive, Dänemark	geplant für viertes Quartal 2019	18 000 t/a	nicht genauer erläutert (Kunststoff von lokalen Lieferanten; fast alle Arten an Plastikmüll)	Pyrolyseöl aufgereinigt, Asche	BASF (20 Millionen € investment in Quantafuel)	Stark 2019; Quantafuel 2019; William and Burridge 2019
11	Plastic Energy	Pyrolyse; patentiertes Verfahren Thermal Anaerobic Conversion (TAC)	2 Industrieanlagen: Sevilla und Almeria, Spanien	seit 2014 und 2017	k. A. (kommerzialisiert)	nicht recycelbare End of Life Plastics (ELP) aus Haushaltsabfällen	Pyrolyseöl (Produktname TACOIL)	Spanischer Ölkonzern Repsol	Plastic Energy 2019a; Plastic Energy 2019b; Messenger 2018
			10 Anlagen in Planung in Asien and Europa (mitunter eine mit SABIC in den Niederlanden; mit Petronas in Malaysia)	in den nächsten Jahren 2020-2023	200 000 t/a ab 2020	nicht recycelbare End of Life Plastics (ELP) aus Haushaltsabfällen	Pyrolyseöl (Produktname TACOIL)	SABIC für PE und PP Produktion	Tullo 2019; Lechleitner 2019; William and Burridge 2019
12	Vadxx	Pyrolyse	k. A.	k. A.	20.000 t/a	Kunststoffabfälle	k. A.	k. A.	VADXX 2019
13	Recycling Technologies	Pyrolyse, RT7000	k. A.	k. A.	9.000 t/a	Kunststoffabfälle	k. A.	k. A.	The RT7000/ Recycling Technologies 2018
14	Pyrum Innovations AG	Thermolyse	Deutschland (Kaiserslautern und München) und weltweit	in Betrieb	Pyrumkoks; -öl; -gas; (~2.500 t/a; ~3.700 t/a; ~900 t/a)	Altrefien (Kunststoffabfälle, CFK, Mineralien, Bitumen, Biomasse, Verpackungen (Tetra Pak) etc.)	k. A.	k. A.	Pyrum 2017
15	Licella Holdings Ltd	katalytische hydrothermale Umsetzung, Cat-HTRTM	k. A.	k. A.	k. A. (kommerzielle Anlage)	Kunststoffabfälle (Biomasse, Altöl)	k. A.	k. A.	Licella 2019a

Nr.	Unternehmen	Anlage			Kapazität	Input	Produkt(e)	Abnehmer	Referenz
		Verfahren, Prozess	Standort	Inbetriebnahme					
16	Klean Industries	Pyrolyse (auch Vergasung)	k. A.	k. A.	k. A. (kommerzielle Anlage)	Kunststoffabfälle	k. A.	k. A.	Klean Industries 2019
17	BASF, ChemCycling-Projekt	Pyrolyse	Betriebsstätten in Deutschland, Belgien	Ende 2018	Prototypen, noch keine Marktreife	unsortierte, gemischte, verunreinigte Kunststoffabfälle	Pyrolyseöl; Zusatz „Cycled“ in der Bezeichnung	Vier Pilot-Produkte mit Partnern aus Automobil-, (Lebensmittel-) Verpackungsindustrie, Elektrik	K-Zeitung 2019; BASF 2019; Ecoloop 2018
18	Arcus Greencycling (Kooperation KIT)	vermutlich Pyrolyse, ARCUS 5.0 SERIES	Industriepark Höchst, Frankfurt	k. A.	Prototyp 2.200 t/a - 7000 t/a	Plastikabfälle PE, PP, PS, ABS, PVC, PET etc.	k. A.	k. A.	Arcus o.J.
19	LyondellBasell (Kooperation KIT)	katalytische Pyrolyse, MoReTec	Ferrara, Italien	in Konstruktion	k. A. (kleine Pilotanlage)	Verarbeitung von Post-Consumer-Kunststoffabfällen	Pyrolyseöl	k. A.	LyondellBasell 2019
20	OMV Konzern, Raffinerie Schwechat	Pyrolyse in Lösungsmittel, ReOil®	Österreich	in Betrieb seit 2018	800 t/a (Pilotanlage)	Polyolefine	k. A.	Borealis	OMV 2018; Schubert et al. 2019; William and Burridge 2019
21	Fuenix Joint Venture mit Plasma Power	k. A., Ecogy® process	Weert, Dänemark	letztes Quartal 2019	k. A. (Pilotanlage)	(unklar)	Pyrolyseöl	Chemiekonzern Dow für Polymerproduktion am Standort Terneuzen, Niederlande	Fuenix 2019; Plasma Power o.J.; Tullo 2019
22	DEMONT	DeFuel	k. A.	k. A.	k. A.	Kunststoffabfälle	k. A.	k. A.	Demont 2019
23	Cassandra Oil	katalytische Pyrolyse	k. A.	k. A.	k. A. (kommerzielle Anlage)	Reifen, Kunststoffabfall ohne PVC	k. A.	k. A.	Cassandra Oil 2019
24	GreenMantra	katalytische Pyrolyse	k. A.	k. A.	k. A.	Polyolefine	k. A.	k. A.	Home - GreenMantra 2019
25	Handerek Technologies	Hydrocracking	k. A.	k. A.	k. A.	Polyolefine, PS	k. A.	k. A.	Handerek Technologies
26	Neste mit a) Remondis und b) Ravago	Thermochemical process	k. A.	Absicht/Planung ohne Zeitplan	200.000 t/a	k. A.	Pyrolyseöl	k. A., aber Düsseldorf gewählt als globale Drehscheibe zur Belieferung der Chemie- und Kunststoffindustrie mit recycelten Kunststoffen	William and Burridge 2019
27	Carbios	Depolymerisation mit einem modifizierten Enzym	Nähe Lyon, Frankreich	in Konstruktion	k. A. (Demonstrationsanlage)	PET-haltige Multi-layer-Kunststoffe	Terephthalsäure (PTA) und Ethylen	Konsortium mit Nestlé Waters, Pespico, L'Oreal und Suntory	Tullo 2019; William and Burridge 2019
28	Loop Industry	Depolymerisation via Hydrolyse	Spartanburg, South Carolina, US 3 weitere Anlagen, Ort nicht angegeben	in Konstruktion bis 2023	k. A. (kommerzialisiert)	PET	Monomere: Dimethylterephthalat, Monoethylenglykol	u. a. L'OCCITANE, Danone, Joint Venture mit Polyesterhersteller Indorama	Tullo 2019; Loopindustries 2019
29	DuPont Teijin Films	Depolymerisation, LuxCR™	k. A.	k. A.	k. A.	PET	k. A.	k. A.	Dupont 2019
30	gr3n	Depolymerisation (Mikrowellen), DEMETO Technologie	k. A.	2021	k. A. (industrielle Anlage)	PET	k. A.	k. A.	gr3n recycling 2019
31	BP	Depolymerisation	Naperville, Illinois, US	Absicht Investition 25 Millionen \$, Bau geplant für Ende 2020	Pilotanlage	PET	k. A.	k. A.	William and Burridge 2019
32	EASTMAN	Depolymerisation (Methanolyse)	US	in Planung	k. A. (Kommerzialisierung)	Polyester	k. A.	k. A.	Eastman 2019

4.2 Kernaussagen aus der Literatur

Im Folgenden werden einige Kernaussagen aus der in Kapitel 4.1 zusammengestellten Literatur zu zentralen Aspekten und Erfolgsfaktoren und Herausforderungen von Pyrolyseverfahren zusammengefasst. Soweit nicht anders angegeben, wurden sie Lechleitner et al. (2019) entnommen.

A. Empfindlichkeit der Prozesse gegenüber Störstoffen

- Je nach Verfahren ist ein unterschiedlicher Reinheitsgrad nötig bzw. Verunreinigungsgrad möglich.
- Das chemische Recycling hat im Vergleich zum mechanischen geringere Reinheitsansprüche.
- Bei der Vergasung lassen sich Siedlungsabfälle ohne jegliche Vorbehandlung umsetzen.
- Auch bei solvolytischen Verfahren ist der Einsatz stark heterogener Stoffe und Verbundwerkstoffe möglich.
- Laut Agilyx (2019) ist ihr Verfahren zur Pyrolyse von Polystyrol unempfindlich gegenüber Verunreinigungen.
- Generell ist bei thermochemischen Prozessen die Zusammensetzung der Ausgangsstoffe bestimmend für die Produktqualität. Bei dem Einsatz von Katalysatoren ist die Bewertung von potenziellen Katalysatorgiften und ggf. die Entfernung bestimmter Fraktionen durch zusätzliche Sortierschritte nötig.
- Durch die Prozessführung (Abkühlgeschwindigkeit) lässt sich das Entstehen von Störstoffen und/oder korrosiven Stoffen, z. B. HCl, auch in gewissem Maße steuern.

B. Einsatzstoffe und deren Eignung

- Vor allem Verpackungsabfälle mit großem Anteil an Polyolefinen (da keine Heteroatome) eignen sich in gemischten Abfallfraktionen sehr gut als Einsatzstoffe. Diese fallen zudem aufgrund ihrer Nutzung als Einwegverpackungen in großen Mengen an und sind gut sortierbar.
- Dagegen können Kunststoffe, die in ihrer Polymerstruktur Heteroatome wie Chlor, Sauerstoff, Stickstoff oder Schwefel enthalten, problematisch für den Prozess sein und die Produktqualität mindern. Ihre Abbauprodukte können als Katalysatorgifte fungieren und/oder korrosiv wirken und damit die Anlage schädigen. In zusätzlichen Prozessschritten (bspw. Entchlorschritt) können Störstoffe ausgeschieden werden.
Beispiele:
PVC – Bildung von Salzsäure (korrosiv)
PET – Bildung von Terephthalsäure, die durch Ausfällung auch das Potenzial der Anlagenverblockung birgt.

C. Mögliche Produkte und Produktqualität

- Der thermische Abbau von
 - PS, PMMA, (PVC) führt zu hoher Monomer-Rückgewinnung (Lopez et al. 2017).
 - PET, PUR ist beim Abbau koksbildend.
 - PE, PP verläuft über einen radikalischen Kettenabbaumechanismus und erzeugt eine relativ breite Produktverteilung. Je nach Prozessbedingungen entsteht ein Spektrum aus kürzer- oder länger-kettigen, verzweigten oder unverzweigten, aromatischen oder aliphatischen Kohlenwasserstoffverbindungen (Stapf et al. 2018; Lopez et al. 2017).
- Die in gemischten kunststoffhaltigen Haushaltsabfällen vorhandenen biogenen Reststoffe (Lignocellulose, Proteine, Lipide) zeigen Kunststoffen gegenüber ein völlig anderes Abbauverhalten (Stapf et al. 2018).

- Die unterschiedlichen Bestandteile gemischter Abfälle beeinflussen sich in ihrem Abbau gegenseitig und interagieren stark (Stapf et al. 2018; Wilk/Hofbauer 2013b).
- Die Produktverteilung kann durch geeignete Betriebsbedingungen (Temperatur, Aufheizrate, Verweilzeit) begrenzt gesteuert werden (Lopez et al. 2017).
- Prinzipiell gilt: je höher die Temperatur, desto niedermolekularer sind die Produkte (leichtes Pyrolyseöl, Gas).
- Das Pyrolyseöl lässt sich in konventionellen Erdölraffinerien weiterverarbeiten und wieder in Grundstoffe zur Kunststoffproduktion überführen, ohne dass ein Qualitätsverlust stattfindet.
- Da es sich bei den entstehenden Substanzen um chemische Grundbausteine handelt, bieten sich vielseitige Möglichkeiten des Einsatzes und der Weiterverarbeitung in der Bandbreite der gesamten Petrochemie.
- Durch die Wahl eines Katalysators können im Vergleich zum rein thermischen Abbau gezielter verzweigte, ringförmige und aromatische Verbindungen gebildet werden, die je nach Verwertung höherwertiger sind.
- Rein technisch können Pyrolyseverfahren so selektiv geführt werden, dass ein Anteil von über 95 Prozent an Flüssigprodukten generiert wird.
- Die Anbindung an die passende Infrastruktur zur Weiterverarbeitung ist für die Vermarktung entscheidend. Schon im Planungsstadium sollte dies für eine wirtschaftliche Produktion berücksichtigt werden.

D. Ökologische Bewertung

- Pyrolyseverfahren sind eine Option zur Schließung von Kohlenstoffkreisläufen. Aufgrund des hohen Energiebedarfs ist ein Beitrag zu einer zukünftigen Klimaneutralität allerdings nur in Verbindung mit dem Ausbau und der Verfügbarkeit von Erneuerbaren Energien zu realisieren.
- Bei vielen Industrieinitiativen wird eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Beispielsweise entwickelt die Technische Universität Braunschweig für das iCAREPLAST-Projekt eine Methodik zur Bewertung der Lebenszyklus-Umweltauswirkungen von sekundären chemischen Rohstoffen aus dem Recycling kunststoffhaltiger Produkte (iCAREPLAST 2019). Auch BASF möchte ihren Ansatz einer ökologischen Bewertung unterziehen (Factsheet BASF).

E. Verfahrenstechnische Herausforderungen und Reaktorkonfigurationen

- Kunststoffe besitzen eine geringe Wärmeleitfähigkeit und die Schmelze ist sehr zähflüssig.
- Die Einstellung von Produktspezifikationen in-situ im Reaktor wie auch durch Nachbehandlungen ist eine Herausforderung (Stapf et al. 2018).
- Die „Beherrschung der Verschmutzungs- und Verklebungsneigung der Zwischenprodukte im Reaktor bzw. bei der Kondensation“ ist eine weitere Schwierigkeit (Stapf et al. 2018).
- Großskalig können Wanderbett, Drehrohr- oder Wirbelschichtreaktoren zum Einsatz kommen (Stapf et al. 2018). Beispiele für den Einsatz von Drehrohröfen sind der Berliner Prozess für Kunststoffe aus Elektro- und Elektronikabfällen und das Hamburger Verfahren für Wirbelschichtreaktoren.

F. Hemmnisse für Skalierung und Kommerzialisierung

Bereits Ende des letzten Jahrhunderts wurden erste Ansätze zur Kommerzialisierung von Pyrolysetechnologien für das rohstoffliche Kunststoffrecycling unternommen, aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit jedoch in der Regel wiedereingestellt. Die von Lechleitner (2019) formulierten einsatzlogistischen, prozesstechnischen sowie produktseitigen Hürden sind in der folgenden Auflistung zusammengefasst.

- Fehlende Einsatzverfügbarkeit in geforderter Qualität
- Variabilität der Einsatzstoffe
- Aufwendige Vorbehandlung und Sortierung
- Handhabung der Kunststoffschmelze
- Verminderung des Wärmeeintrages durch Verkokung und Anlagerungen an den Wärmeübertrager-Oberflächen
- Verblockungen durch Wachse und hochmolekulare Zwischenprodukte
- Verblockungen durch Calciumchlorid und anorganische Zuschlagsstoffe
- Aufwendige Reinigung durch Verkokungen und Verblockungen
- Produkte minderer Qualität durch breites Produktspektrum und instabile, chemische Verbindungen
- Produkte minderer Qualität durch Verunreinigungen und Heteroatome
- Geringe Ausbeuten
- Anlagentechnische Schwierigkeiten bei der Maßstabsvergrößerung

Der Stand der technischen Entwicklung der einzelnen in die Betrachtung einbezogenen Verfahren macht deutlich, dass erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig ist, um nennenswerte Beiträge zur stofflichen Verwertung von Kunststoffen oder anderen heizwertreichen Materialien zu realisieren.

Entscheidend für eine solche Entwicklung ist die Klärung regulatorischer Fragen zu der Zurechenbarkeit zu Recyclingraten, auch im Falle der petrochemischen Weiterverarbeitung. Weiterhin ist die Frage zu beantworten, wie eine kontinuierliche Verfügbarkeit von Kunststoffströmen in entsprechender Menge und Qualität sicherzustellen ist. Dies beinhaltet einen nötigen Sortier- und Vorbehandlungsaufwand zur Erreichung der geforderten Reinheit, der berücksichtigt werden muss (Lechleitner et al. 2019; Factsheet BASF).

5. ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG VON CHEMISCHEM RECYCLING

Durch die im vorherigen Kapitel 4 beschriebenen Verfahren zum chemischen Recycling können Kunststoffabfälle in ihre Rohmaterialien (z. B. chemische Ausgangsstoffe wie flüssige Kohlenwasserstoffe zum Einsatz in Steam Crackern) zerlegt und recycelt werden. Auf diese Weise kann die fossilbasierte Chemikalienproduktion sowie die Verbrennung des Kunststoffes am Ende des Lebenszyklus verhindert werden. Deshalb wird erwartet, dass chemische Recyclingverfahren sowohl den Bedarf an fossilen Ressourcen als auch Treibhausgasemissionen reduzieren. Durch den Ersatz von mechanischem durch chemisches Recycling könnten zusätzlich Leistungseinbußen, so genanntes „Downcycling“, der mechanisch hergestellten Rezyklate verhindert werden. Die durch das Downcycling entstandenen Rezyklate können in vielen Fällen letztendlich nach ihrer zusätzlichen Verwendung nur verbrannt werden, wodurch zusätzliche Treibhausgasemissionen entstehen.

Durch die erwarteten ökologischen Vorteile erscheint chemisches Recycling intuitiv sinnvoll, vor allem unter dem Gesichtspunkt der Klimaneutralität, welche in der nachfolgenden Analyse im Zentrum steht. Allerdings werden besonders in der wissenschaftlichen Literatur die Vor- und Nachteile einer Kunststoff-Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen, aber auch durch chemisches Recycling, intensiv und kontrovers diskutiert. Zum Beispiel zeigen Geyer et al. (2016), dass es per se keine Umweltvorteile eines geschlossenen gegenüber einem offenen Recyclingsystems gibt. Demnach kann nicht von vornherein angenommen werden, dass die Verwertung von Kunststoffabfall in geschlossenen Kreisläufen automatisch ökologisch vorteilhaft gegenüber anderen Verwertungswegen ist. Beim Recycling von PET wurde z. B. von Shen et al. (2010) gezeigt, dass das mechanische Recycling von PET zu Textilfasern (offenes Recyclingsystem) im Vergleich zum chemischen Recycling zu den chemischen Ausgangsstoffen (geschlossenes Recyclingsystem) umweltfreundlicher ist, obwohl die recycelten PET-Fasern am Ende ihrer Lebensdauer verbrannt werden müssen. Des Weiteren haben vorangegangene Studien aufgezeigt (Lazarevic et al. 2010), dass je nach Systembedingungen auch die Verbrennung von hochkalorischen Kunststoffabfällen in Zementwerken zu einer größeren Reduktion von Treibhausgasemissionen führen kann als die meisten chemischen Recyclingtechnologien. Die Reduktion resultiert hauptsächlich aus der Substitution fossiler Brennstoffe wie Kohle durch den Kunststoffabfall. Auf Basis der Literaturquellen wird deutlich, dass die intuitiven ökologischen Vorteile von chemischem Recycling nicht garantiert werden können. Ob ökologische Vorteile durch chemische Recyclingverfahren erreicht werden können, muss deshalb im **Einzelfall und im Kontext der jeweiligen Systembedingungen** (Energiebereitstellung, alternative Optionen, Entwicklungstrends, etc.) im relevanten Zeitverlauf (dynamisch) untersucht werden.

Zu diesem Zweck wird in diesem Kapitel die allgemeine Methodik zur ökologischen Bewertung (Ökobilanz, engl. „Life Cycle Assessment“) von Verwertungsmöglichkeiten von Kunststoffabfällen dargestellt und angewendet. Dabei werden, neben dem chemischen Recycling auch andere Verwertungstechnologien für Kunststoffabfälle miteinbezogen.

Auf Basis der methodischen Grundlagen der Ökobilanz werden im Anschluss indikative Verfahrensbewertungen der in Kapitel 6 identifizierten Kunststoffabfallströme durchgeführt. Auf diese Weise können erste Aussagen und Schlussfolgerungen über das ökologische Potenzial für das chemische Recycling, konkret die Pyrolyse, von Kunststoffabfällen als Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW getroffen werden.

5.1 Ökologische Bewertung der Verwertung von Kunststoffabfällen

5.1.1 Allgemeine Methodik zur ökologischen Bewertung von Verwertungstechnologien

Ursprünglich wurden Verwertungstechnologien von Kunststoffabfällen dazu verwendet, die Deponierung von Kunststoffabfall zu vermeiden und dadurch die Menge an anfallendem Müll zu reduzieren. In NRW ist die Deponierung von Kunststoffabfällen verboten, weshalb dieser hauptsächlich energetisch verwertet wird. Durch die Einführung einer neuen Verwertungstechnologie wird daher nicht die Deponierung des Kunststoffabfalls, sondern eine bereits angewendete Verwertungstechnologie (z. B. die energetische Verwertung) substituiert (siehe Abbildung 6).

Im Gegensatz zur Deponierung produzieren bereits angewendete Verwertungstechnologien in den meisten Fällen bereits ein wertvolles Produkt, das ursprünglich ebenfalls ein Primärprodukt (hier Primärprodukt 1) substituiert hat. Wird die bereits angewendete Verwertungstechnologie substituiert, muss das ursprüngliche Produkt wiederum auf anderen Wegen bereitgestellt werden.

Stellt eine neue Verwertungstechnologie ein anderes wertvolles Produkt (hier Primärprodukt 2) her, werden durch die Einführung dieser Technologie die Produktion eines äquivalenten Primärproduktes und die produktionsbedingten Umweltauswirkungen vermieden.

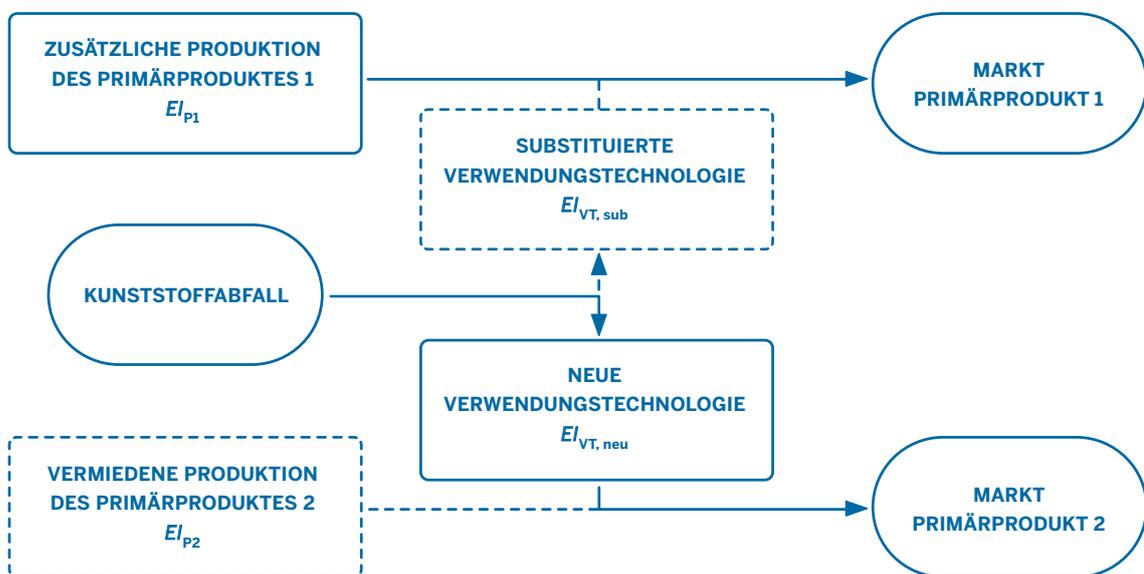


Abbildung 6: Effekte der Einführung einer neuen Verwertungstechnologie.

In der Realität kann es dazu kommen, dass diese Substitutionseffekte nicht 1:1 auftreten, weil sich z. B. durch Marktreaktionen weitere Verdrängungseffekte ergeben. In der hier vorliegenden Analyse werden diese komplexen – marktgetriebenen Substitutionseffekte allerdings nicht berücksichtigt.

Um die Umweltauswirkungen der Einführung einer neuen Verwertungstechnologie zu bewerten, müssen vier Faktoren mit einbezogen werden: die neue Verwertungstechnologie vermeidet (1) die Umweltauswirkungen des Primärproduktes 2 (EI_{P2}) sowie (2) der substituierten Verwertungstechnologie ($EI_{VT,sub}$). Allerdings führt die Einführung auch zu einer Erhöhung der Umweltauswirkungen des bilanzierten Systems durch (3) die neue Verwertungstechnologie selbst ($EI_{VT,neu}$) sowie (4) der zusätzlichen Produktion

des Primärproduktes 1 der vermiedenen Verwertungstechnologie (EI_{P1}). Eine neue Verwertungstechnologie resultiert also genau dann in einer Reduktion der Umweltauswirkungen, wenn

$$\frac{\text{Reduktion}}{(EI_{P2} + EI_{VT, sub})} - \frac{\text{Erhöhung}}{(EI_{VT, neu} + EI_{P1})} > 0$$

gilt. In anderen Worten ausgedrückt, führt die Einführung einer neuen Verwertungstechnologie aufgrund ihrer komplexen Auswirkungen nicht zwangsläufig zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen. Andererseits gilt aufgrund der komplexen Auswirkungen auch, dass bestehende Systeme nicht als per se ökologisch vorteilhafter angesehen werden können.

Die Frage nach der Bewertung von Verwertungstechnologien für Kunststoffabfälle sollte deshalb ergebnisoffen im Rahmen einer systematischen Ökobilanz geführt werden, damit solche Technologien identifiziert werden, die Umweltauswirkungen, insbesondere die Treibhausgasemissionen, reduzieren.

5.1.2 Ziel und Untersuchungsrahmen der ökologischen Bewertung

Es ist das Ziel der vorliegenden ökologischen Bewertung richtungsweisende Aussagen zu erarbeiten, die das Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen durch die Einführung einer Pyrolyse in NRW abschätzen. Der Fokus liegt dabei auf Kunststoffabfällen die aktuell in den Müllverbrennungsanlagen verwertet werden (vgl. Kap. 6). Diese Kunststoffabfälle sind voraussichtlich für die werkstoffliche Verwertung (mechanisches Recycling) in naher Zukunft nicht relevant und führen aufgrund ihrer zu hohen Heizwerte zusätzlich zu Problemen in den Müllverbrennungsanlagen. Die Müllverbrennungsanlage kann deshalb im ersten Schritt als Bezugsgröße und als zu substituierende Verwertungstechnologie definiert werden. Da die Pyrolyseverfahren allerdings nicht mit klassischem Hausmüll betrieben werden können, wird angenommen, dass sortierter und gemischter Kunststoffmüll in den jeweiligen Verwertungstechnologien entsorgt wird.

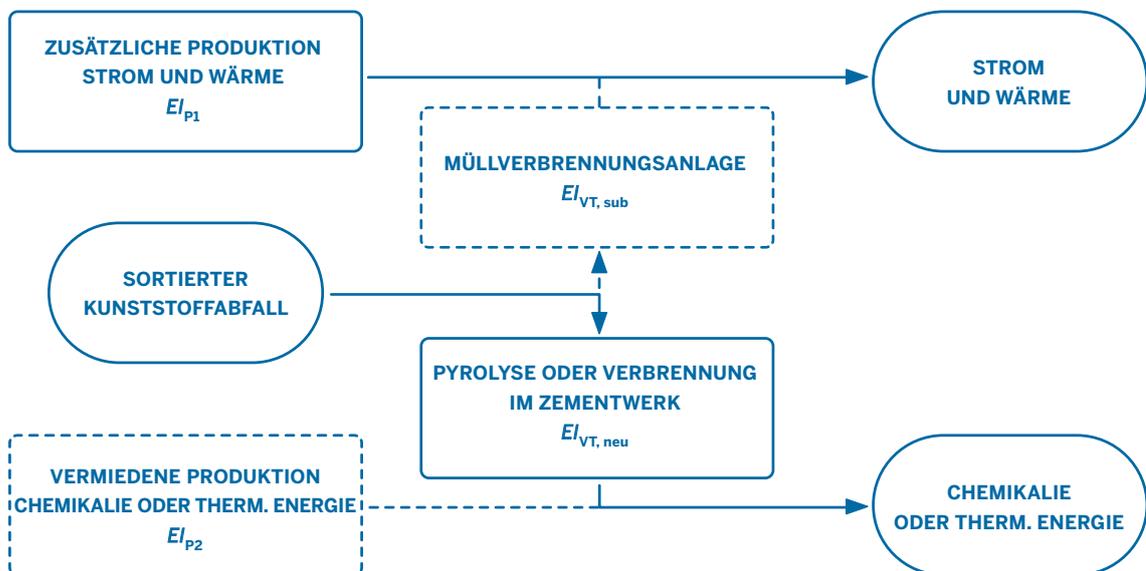


Abbildung 7: Ziel und Untersuchungsrahmen der ökologischen Bewertung.

Für die vorliegende Potenzialanalyse wird der Untersuchungsrahmen als ein Vergleich zwischen der Müllverbrennung und der Pyrolyse definiert. Auf diese Weise kann die Frage beantwortet werden, welches Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen die Pyrolyse im Vergleich zur aktuellen Verwertungstechnologie, der Müllverbrennung, besitzt. Zusätzlich wird der Untersuchungsrahmen auf weitere Verwertungstechnologien als Alternative zur Pyrolyse erweitert. Dadurch kann zusätzlich die Frage beantwortet

werden, welche Verwertungsmöglichkeit generell das größte ökologische Reduktionspotenzial für den analysierten Kunststoffabfall darstellt.

Für die zu analysierenden Kunststoffabfälle, die aktuell in der Müllverbrennung entsorgt werden, sind (werk-)stoffliche Recyclingverfahren aktuell ausgeschlossen, da der Müll zu verunreinigt ist. Neben der Verwertung in Müllverbrennungsanlagen werden Kunststoffabfälle zudem bereits in Zementwerken als Sekundärrohstoff (sog. Ersatzbrennstoff EBS) eingesetzt. Da der angestrebte Müllstrom grundsätzlich in Zementwerken mitverbrannt werden kann, wird der Untersuchungsrahmen deshalb um die Mitverbrennung in Zementanlagen erweitert.

Zusätzlich zu den substituierten Verwertungstechnologien, spielen die Rahmenbedingungen bei der ökologischen Bewertung eine große Rolle. Insbesondere das Energiesystem und die Bereitstellung von Strom werden sich in Zukunft maßgeblich ändern. Besonderen Einfluss hat diese Änderung auf die vermiedenen Treibhausgasemissionen durch die Produkte Strom oder thermische Energie der Müllverbrennungsanlagen oder der Mitverbrennung im Zementwerk. Deshalb wird die ökologische Bewertung zusätzlich durch ein Szenario zur Energiebereitstellung im Jahr 2050 ergänzt, in denen diese in beiden Fällen größtenteils auf der Verwendung von regenerativen Energiequellen (z. B. Wind und Biomasse) basiert.

5.1.3 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit in einer Ökobilanz quantifiziert die Funktion des untersuchten Systems und dient als Basis für den Vergleich von Produktsystemen. Für den konkreten Fall wird die funktionelle Einheit als die Behandlung von einem Kilogramm Kunststoffabfall definiert.

Frühere Ökobilanzstudien (Lazarevic et al. 2010) haben gezeigt, dass die Zusammensetzung von Kunststoffabfällen die Schlussfolgerungen stark beeinflussen. Die Zusammensetzung der Kunststoffabfälle muss daher in die funktionale Einheit mit einbezogen werden, um sicherzustellen, dass alle Verwertungstechnologien denselben Typ von Kunststoffabfall verwenden und damit vergleichbar sind.

Die Pyrolyseverfahren sind aktuell technisch nicht dazu geeignet, Hausmüll oder Leichtverpackungsabfall ohne vorherige Sortierung zu verarbeiten, weshalb in der Analyse sortierter Abfall angenommen wird. Zur Gewinnung sortierten Kunststoffabfalls gibt es in Deutschland zirka 90 spezialisierte Sortieranlagen (ITAD 2015), die aktuell Kunststoffe aus dem gelben Sack oder dem Hausmüll sortieren. Für die Klassierung von Kunststoffen kommt eine sensorgestützte, automatische Sortierung zum Einsatz. Wichtigste Methode ist dafür die Nah-Infrarot-Spektrometrie, die eine differenzierte Erkennung von Kunststoffen ermöglicht (Christiani 2017). Klar zuzuordnende und sortierte Kunststofffraktionen, z. B. PE-Folien, werden in den meisten Fällen mechanisch recycelt, während nicht klar zuzuordnende Kunststoffabfälle in der Fraktion „Mischkunststoffe“ (MKS) enden. Diese MKS-Fraktion wird aktuell zum größten Teil thermisch verwertet und in der vorliegenden Studie als Input angenommen.

Die Zusammensetzung der MKS-Fraktion kann z. B. anhand der Spezifikationen des Grünen Punktes abgeschätzt werden. Nach diesen Spezifikationen verbleibt ein maximaler Störstoffanteil von zehn Prozent, der sich zu großen Teilen aus Papier, Pappe, metallischen und sonstigen Störstoffen zusammensetzt (Duales System Deutschland 2019). Der Polymeranteil in der MKS-Fraktion kann in erster Näherung anhand der Zusammensetzung der Produktionsmengen für Verpackungen abgeschätzt werden (Conversio 2018). Tabelle 3 fasst die Zusammensetzung der MKS zusammen.

Tabelle 3: Zusammensetzung des MKS für die vorliegende Analyse (Conversio 2018).

Bestandteil	PE (LD/HD)	PET	PS	PP	PVC	Reststoffe
Prozent	48 %	16 %	3 %	19 %	4 %	10 %

Systemgrenzen und Sachbilanz

Die Systemgrenzen der einzelnen Verwertungstechnologien sind in Abbildung 8 dargestellt.

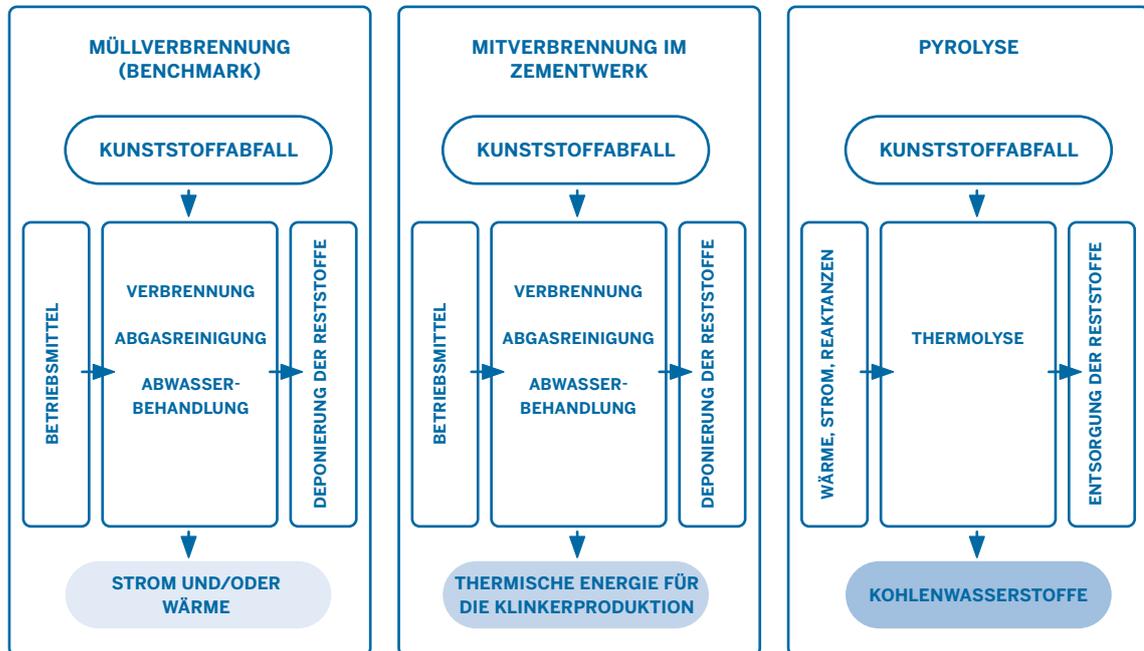


Abbildung 8: Systemgrenzen für die Bewertung der Reduktionspotenziale der Pyrolyse/Thermolyse.

Definition und Annahmen zur Müllverbrennung und Mitverbrennung im Zementwerk

Für die Verwertung des Kunststoffabfalls in Müllverbrennungsanlagen wird ein Modell aus kommerziellen Ökobilanzdatenbanken verwendet (Doka 2013), das den aktuellen Stand der Technik für Müllverbrennungsanlagen abbildet. Die Systemgrenze für die Müllverbrennungsanlagen enthält die Verbrennung selbst, die Abgasreinigung sowie die Abwasserbehandlung. Außerdem werden alle Umweltauswirkungen für die Bereitstellung der Betriebsmittel (z. B. Natronlauge) sowie die Entsorgung der Reststoffe auf einer Deponie miteinbezogen.

Zur Berechnung aller Elementarflüsse der Müllverbrennung benötigt das Modell als Input die elementare Zusammensetzung des Kunststoffabfalls. Basierend auf den Transferkoeffizienten für jedes stoffliche Element (z. B. elementarer Kohlenstoff C) werden die Elementarflüsse in die Luft, den Boden oder das Wasser berechnet. Für jedes Element wird zusätzlich der Bedarf an Betriebsmitteln, wie z. B. Waschmittel oder Erdgas und Reststoffen basierend auf Messdaten von Schweizer Müllverbrennungsanlagen berechnet. Die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung der Betriebsmittel sowie der Entsorgung der Reststoffe stammen aus kommerziellen Ökobilanzdatenbanken (Swiss Centre for Life Cycle Inventories 2017 und thinkstep AG 2017).

Im Mittel besitzen Müllverbrennungsanlagen einen Wirkungsgrad von 41 Prozent und eine Stromkennzahl von 0,35 (Eriksson et al. 2009). Die Reduktion der Treibhausgasemission durch die Bereitstellung von Strom basieren auf dem aktuellen Strommix in Deutschland sowie einer Annahme für den zukünftigen Strommix im Jahr 2050 (thinkstep AG 2017). Im Fall der Wärmeproduktion wird angenommen, dass die Treibhausgasemissionen der Fernwärmeerzeugung substituiert werden. Die heutige Fernwärme wurde auf Basis der Verbrennung von 44 Prozent Erdgas und 56 Prozent anderer Quellen, z. B. Biomasse, Öl und Braunkohle, modelliert (Connolly et al. 2014). Für das Jahr 2050 wird die Fernwärmebereitstellung ausschließlich auf Basis biogener Ressourcen modelliert. Alle Datensätze für vermiedene Treibhausgasemissionen der Strom- und Wärmeerzeugung stammen aus LCA-Datenbanken, mit Ausnahme der Biomasse zur Wärmeerzeugung, die aus Gerssen-Gondelach et al. (2014) übernommen wurde.

Für die Mitverbrennung im Zementwerk wird angenommen, dass die Abgasreinigungsanlagen identisch zu denen der Müllverbrennungsanlagen sind. Dies kann als erste Annahme gerechtfertigt sein, da sowohl die Müllverbrennungsanlagen als auch Zementwerke, die Kunststoffabfall mitverbrennen, dem Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) unterliegen und deshalb dieselben maximalen Emissionswerte einhalten müssen. Allerdings war dies zumindest im Jahr 2015 noch nicht der Fall, da zu diesem Zeitpunkt nahezu alle Zementwerke mittels Ausnahmegenehmigungen nicht dem BImSchV genügten. Seitdem wurden in weiteren Zementwerken in Deutschland SCR-Anlagen zur Verminderung von NO_x-Emissionen installiert.³ Inwiefern alle Zementwerke mittlerweile nachgerüstet wurden verlangt weiterer Überprüfung (Schönberger & Waltisberg 2014, Orosz 2018). Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen der Mitverbrennung in Zementwerken wird in der vorliegenden Arbeit der optimistische Fall angenommen und das gleiche Modell wie für die Müllverbrennungsanlagen verwendet.

Bei der Mitverbrennung in Zementwerken wird angenommen, dass Braunkohle in Höhe des Energiegehaltes (Heizwert) des analysierten Kunststoffabfalls substituiert wird. Die Umweltauswirkungen der Braunkohlebereitstellung wird aus Ökobilanzdatenbanken bereitgestellt (Swiss Centre for Life Cycle Inventories 2017). Die vermiedenen Umweltauswirkungen der Verbrennung von Braunkohle im Zementwerk werden analog zu dem bereits vorgestellten Modell berechnet, welches die elementare Zusammensetzung der Brennstoffe (oder eines Abfalls) benötigt.

Um den in Zukunft vermiedenen Brennstoff bei der Mitverbrennung in Zementwerken zu identifizieren, muss eine Annahme über die zukünftige Brennstoffzusammensetzung von Zementwerken getroffen werden. Die International Energy Agency (IEA 2018) prognostiziert, dass in Europa der in der Zementindustrie eingesetzte Brennstoff Kohle bis zum Jahr 2030 auf etwa 20 bis 22 Prozent gesunken sein wird. Entsprechend lässt sich eine weitere Reduktion des Anteils von Kohle im Brennstoffmix bis zum Jahr 2050 annehmen. Um den Einfluss der Substitution des Brennstoffes im Zementwerk durch Kunststoffabfall darzustellen, werden für 2050 drei Szenarien betrachtet: Die Substitution der Braunkohle durch Erdgas, Heizöl sowie Biomasse, z. B. Altholzpellets.

Definition und Annahmen zur Pyrolyse

Die Systemgrenzen der Pyrolyse beinhalten den Prozess der Pyrolyse selbst, sowie die Bereitstellung aller zur Durchführung benötigten Energien (Strom und Wärme) und anderer Hilfsstoffe. Außerdem müssen eventuell anfallende Reststoffe entsorgt werden.

Aufgrund des Entwicklungsstandes sind Daten zur Pyrolyse noch nicht in einschlägigen Ökobilanzdatenbanken als Standard hinterlegt, sondern müssen für die Untersuchung anhand von wissenschaftlicher Literatur modelliert werden. Für die vorliegende Ökobilanz werden Daten nach Perugini et al. (2005) verwendet (vgl. Tabelle 4). Die beiden von Perugini et al. (2005) aufgezeigten Pyrolysetechnologien basieren auf Verfahren der Veba Öl AG und BP.

Die von Perugini et al. (2005) verwendeten Prozessdaten wurden vor langer Zeit erarbeitet, sodass heutige Anlagen oder Verfahrensvarianten aufgrund von Energieeffizienzsteigerungen ggf. andere Werte aufweisen. Da die beiden Verfahren allerdings stark unterschiedliche Energiebedarfe aufweisen, ermöglichen die Datensätze einen Eindruck über die Spannbreite der Pyrolyseverfahren und die daraus resultierenden Potenziale für Treibhausgaseinsparungen. In zukünftigen Projekten muss sichergestellt werden, dass die Daten für die Pyrolyse aktualisiert werden.

In der Anlagenkonzeption von BP wird der gesammelte und sortierte Mischkunststoff zuerst zerkleinert und Störstoffe abgeschieden. Der aufbereitete Mischkunststoff wird anschließend in einen Blasen-Wirbelschichtreaktor pyrolysiert. Dazu wird der Abfall aufgeschmolzen und in einer Sandschicht thermisch gecrackt. Die gasförmigen Kohlenwasserstoffe verlassen im Anschluss in der Wirbelschicht den Reaktor und

³ Die SCR-Technik zur NO_x-Minderung erfordert jedoch zirka fünf kWh/t Klinker zusätzlich (von 2010 bis 2014 belief sich der elektrische Energiebedarf auf zirka 110 kWh/t Zement) (Schönberger & Waltisberg 2014).

werden in einem Zyklon gereinigt. Das austretende Gas wird anschließend in einem zweistufigen Prozess teilweise zu einem flüssigen Kohlenwasserstoffprodukt kondensiert. Die flüssigen Kohlenwasserstoffe können direkt in einem Steamcracker zu petrochemischen Produkten verarbeitet werden. Gasförmige Kohlenwasserstoffe können energetisch zur Beheizung der Pyrolyse verwendet werden.

Tabelle 4: Ausschnitt aus den Prozessdaten der Pyrolysetechnologien nach Perugini et al. (2005).

	Fluss	Einheit	Pyrolyse (BP)	Pyrolyse (Veba)
Kunststoffabfall	Mischkunststoffe	in kg	1,00	1,00
Inputs	Thermische Energie	in MJ	0,131	4,732
	Strom	in kWh	0,059	0,960
	Wasserstoff	in kg	0,002	0,011
Outputs	Flüssige Kohlenwasserstoffe	in kg	0,713	0,822
	Gasförmige Kohlenwasserstoffe	in kg	0,147	0,090

Das von der Veba Öl AG entwickelte Verfahren umfasst eine Pyrolyse zur Verarbeitung von MKS und geht auf eine Publikation von Dijkema und Stougie (1994) zurück. Nach der Depolymerisierung der MKS erfolgt ein Verarbeitungsschritt, der aus einer alkalischen Wäsche und einer Wasserstoffbehandlung besteht. Auf diese Weise wird ein synthetisches Erdölsubstitut produziert. Laut Perugini et al. (2005) kann das synthetische Erdölsubstitut in jeder Raffinerie verarbeitet werden. Bei der Wäsche und Wasserstoffbehandlung fallen zusätzlich gasförmige Kohlenwasserstoffe an, die wiederum energetisch genutzt werden können.

Für die produzierten flüssigen Kohlenwasserstoffe wird angenommen, dass sie Naphtha auf einer 1:1-Massenbasis substituieren. Bei den gasförmigen Kohlenwasserstoffen wird LPG als substituiertes Produkt angenommen. Die Treibhausgasemissionen für alle Energien, Hilfsstoffe sowie die vermiedene Naphtha-Produktion werden kommerziellen Ökobilanzdatenbanken entnommen (Swiss Centre for Life Cycle Inventories 2017, thinkstep AG 2017). Für beide Verfahren wird zusätzlich angenommen, dass alle Reststoffe in einer Müllverbrennungsanlage entsorgt werden.

5.2 Indikative Verfahrensbewertung und Schlussfolgerungen

5.2.1 Überblicksartige Darstellung der Ergebnisse, Kernaussagen und Schlussfolgerungen

Auf Basis von Abschnitt 5.1 wird eine erste, indikative Verfahrensbewertung durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Überblick dargestellt und erste Aussagen zum ökologischen Reduktionspotenzial der verschiedenen Verwertungstechnologien abgeleitet (siehe Abbildung 9).

Die Ergebnisse werden für den in Abschnitt 5.1.2 definierten Ziel- und Untersuchungsrahmen und für die Treibhausgasemissionen in Kilogramm CO₂-Äquivalent angegeben. Positive Werte zeigen, dass die alternative Verwertungstechnologie Treibhausgasemissionen im Vergleich zu Müllverbrennungsanlagen reduzieren kann. Negative Werte (blau) zeigen, dass die alternative Verwertungstechnologie keine Vorteile aufweist und der Kunststoffabfall in diesem Fall weiterhin in der Müllverbrennungsanlage verwertet werden sollte. Ist kein Wert angegeben, wurde der Vergleich für das spezifische Jahr nicht durchgeführt.

	Pyrolyse (BP)	Pyrolyse (Veba)	Zementwerk MKS statt Kohle	Zementwerk MKS statt Öl	Zementwerk MKS statt Erdgas	Zementwerk MKS statt Biomasse
2020	1,44	0,55	1,96	–	–	–
2050	2,48	1,78	–	2,26	1,35	-0,10

Abbildung 9: Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in Kilogramm CO₂-Äquivalent im Vergleich mit der Müllverbrennungsanlage.

Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen:

1. Für die Verwertungstechnologie Pyrolyse sollten zunächst die Müllmengen verwendet werden, die gegenwärtig in Müllverbrennungsanlagen verbrannt werden. Für diesen Fall hat die Pyrolyse schon heute ein robustes Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen von 0,55 bis 1,44 Kilogramm CO₂-Äquivalenten Emissionen je Kilogramm verwertetem Müll.
2. Die Ergebnisse für die Pyrolyse verdeutlichen auch, dass die Energieeffizienz einen großen Einfluss auf das Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen hat. Das Veba-Verfahren hat heute im Vergleich zum BP-Verfahren ein um 62 Prozent geringeres Einsparpotenzial. Dieser Unterschied basiert hauptsächlich auf dem thermischen Energiebedarf des Veba-Verfahrens im Vergleich zum BP-Verfahren, welcher 36-fach höher ist. Diese Differenz ist vorrangig darauf zurückzuführen, dass im BP-Verfahren nicht die kondensierten, gasförmigen Kohlenwasserstoffe, die als Nebenprodukt entstehen, als Brennstoff zur Beheizung des Reaktors verwendet werden. Für zukünftige Arbeiten ist in der Verfahrenssynthese also besonders auf die Energieeffizienz der Pyrolyse zu achten.
3. Die Reduktionspotenziale durch die Verwertungstechnologie Pyrolyse werden sich perspektivisch mit sinkenden Treibhausgasemissionen des Energiesystems verbessern. Diese Verbesserung kann auf den erhöhten Anteil an Erneuerbaren Energien für die Bereitstellung von Strom und Fernwärme erklärt werden, woraus eine geringere Gutschrift für die Müllverbrennung resultiert.

4. Hochkalorischer Müll, auch Mischkunststoffe mit hohem Polyolefin-Anteil wie in der vorliegenden Studie, sollte unter derzeitigen Rahmenbedingungen in Zementwerken verbrannt werden solange Kohle durch den Mischkunststoff substituiert werden kann. Unter heutigen Rahmenbedingungen hat die Verwertung im Zementwerk und die Substitution von Kohle ein um 27 Prozent (BP-Verfahren) bzw. 72 Prozent (Vebe Verfahren) höheres Einsparpotenzial für Treibhausgasemissionen als die Pyrolyse.
5. Zukünftig muss darauf geachtet werden, dass Kunststoffabfall nicht die alternativen Brennstoffe Öl, Erdgas oder Biomasse, die geringere Treibhausgasemissionen verursachen, als Brennstoff im Zementwerk substituiert. Die Ergebnisse im Vergleich mit anderen Brennstoffen verdeutlichen, dass Mischkunststoff nicht als Substitut für Biomasse verwendet werden sollte (-0,1 Kilogramm CO₂-Äquivalente). Im Gegensatz zur Biomasse sollte Mischkunststoff aber in Zementwerken statt in Müllverbrennungsanlagen verbrannt werden, wenn dort Öl (Reduktion von 2,26 Kilogramm CO₂-Äquivalenten in 2050) oder Erdgas (Reduktion von 1,35 Kilogramm CO₂-Äquivalenten in 2050) als Brennstoff substituiert wird. Allerdings erscheinen energieeffiziente Pyrolyseverfahren ökologisch vorteilhaft gegenüber der Verwertung im Zementwerk, da sie höhere Reduktionen der Treibhausgasemissionen aufweisen können.

5.2.2 Offene Fragen und weiterer Untersuchungsbedarf

Die in diesem Diskussionspapier durchgeführte Abschätzung der möglichen ökologischen Wirkung und insbesondere der Potenziale zur Minderung der Treibhausgasemissionen liefert erste Richtungsansagen. Für eine weiterführende Bewertung sind weitere Analyseschritte erforderlich, die u. a. folgende Punkte adressieren sollten:

1. Um eine ISO-konforme ökologische Bewertung von chemischem Recycling im Vergleich mit alternativen Verwertungstechnologien durchzuführen, ist zusätzlich ein unabhängiges „Critical Review“ notwendig. Dieses Critical Review kann im Zuge eines Folgeprojektes durchgeführt werden.
2. Eine Aktualisierung der stark veralteten Datengrundlage für Pyrolysetechnologien ist unabdingbar, um die Ergebnisse der Ökobilanz robuster gegenüber Unsicherheiten in den unterliegenden Daten zu machen, ist unabdingbar.
3. Die Analyse möglicher Kunststoffabfälle als Rohstoff für die Pyrolyse sollte auf weitere mögliche Stoffströme erweitert werden. Auf diese Weise kann ein ganzheitliches Bild über das Potenzial der Pyrolyse zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ermöglicht werden. Dies könnte u. a. auch gemischte Kunststoffabfälle und Stoffgruppen jenseits der Verpackungen im gelben Sack oder dem Hausmüll umfassen, z. B. Polycarbonate, Polyurethane und/oder Nylon.
4. Die Analyse sollte zusätzlich um ein Modell der chemischen Industrie erweitert werden. Dieses Modell sollte ebenfalls die Produktion der substituierten Chemikalien in Abhängigkeit zu den sich wandelnden Rahmenbedingungen der Chemieindustrie abbilden. In der zukünftigen chemischen Industrie werden ebenfalls Maßnahmen (z. B. Wasserstoff aus der Elektrolyse mit erneuerbarem Strom oder die Nutzung von CO₂ als Rohstoff) wirksam, welche die Umweltauswirkung der Chemieprodukte maßgeblich ändern werden. Damit werden sich die Umweltauswirkungen der durch die Pyrolyse substituierten chemischen Produkte ebenfalls ändern.
5. Die Ergebnisse der Mitverbrennung im Zementwerk zeigen zusätzlich, dass in letzter Instanz nur eine gesamtsystemische Modellierung aller Grundstoffindustrien (Chemie, Raffinerie, Stahl, Zement, Energie, u. a.), die Reduktion der Treibhausgasemissionen durch die Pyrolyse darstellen kann. Diese gesamtsystemische Modellierung ermöglicht es, alle Wechselwirkungen und Trade-Offs (von dem substituierten Brennstoff im Zementwerk bis hin zur zukünftigen Chemikalienproduktion) abzubilden und damit die Reduktionen der Treibhausgasemissionen ganzheitlich zu bewerten.

6. ABSCHÄTZUNG DER MASSENSTRÖME IN NRW

6.1 Abschätzung des Aufkommens an Kunststoffabfällen und ihre Verwertung in NRW (potenzieller Input für chemisches Recycling)

Grundlage der Modellierung der Kunststoffabfälle sind die an den Abfallbehandlungsanlagen durch das Statistische Landesamt NRW erfassten Abfallmengen. Die Abfallstatistik gliedert sich in ihrer Struktur nach den Abfallarten entsprechend der Abfallschlüsselnummern gemäß der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) sowie den Ein- und Ausgängen der verschiedenen Behandlungsanlagen. Auf Nachfrage wurde vom Statistischen Landesamt NRW die Abfallstatistik Nordrhein-Westfalens in einer tiefgegliederten, sechsstufigen Abfallschlüssel-Nomenklatur zur Verfügung gestellt. Damit ist eine sehr detaillierte herkunftsbezogene Zuordnung der Abfallmengen in NRW zu den jeweiligen Behandlungsanlagen möglich (vgl. Abb. 10, Abb. 11 und Abb. 12).

Die Verwertungs- und Behandlungswege der Abfallstatistik unterscheiden die ausgehenden Abfälle üblicherweise zwischen „Beseitigung“, „Verwertung“ und „an Sonstige“. Während Abfälle zur „Verwertung“ in weiteren Anlagen stofflich oder energetisch verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung dauerhaft der Kreislaufwirtschaft entzogen. Bei Abfällen „an Sonstige“ handelt es sich bereits um Sekundärrohstoffe, die an Direktverwerter oder andere Branchen geliefert werden. Mit der Kategorie der „Verwertung“ besteht somit das Problem, dass bestimmte Abfallmengen mehrfach als Ein- und Ausgang an verschiedenen Abfallbehandlungsanlagen gezählt werden können.

Für die Abfallstatistik des Landes NRW ist zudem die Unterscheidung nach erfassten Abfällen in NRW und erfassten Abfällen in anderen Bundesländern von Interesse, um abschätzen zu können, wie hoch der in NRW entstehende Anteil an der hier behandelten Abfallmenge ist. Zusätzlich können auch die Abfallimporte aus anderen Ländern nach der entsprechenden tiefgegliederten Abfallschlüsselung ermittelt werden. Im Sankey-Diagramm (Abb. 11) sind die ausländischen (Kunststoff-)Abfallimporte allerdings nur als Summe dargestellt.

Ermittlung der Kunststoffanteile an den Abfallströmen

Die Bestimmung der Kunststoffanteile an den untersuchten Abfallkategorien erfolgte unter Rückgriff auf Werte der Abfallanalysedatenbank ABANDA des Landes NRW sowie externer Literatur aus verschiedenen wissenschaftlichen Projekten und Sortiersversuchen. Die Angaben über den Kunststoffgehalt je Abfallschlüsselnummer wurde dem Abschlussbericht des UBA-Projektes „Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität – ReSek“ (Steger et al. 2018) entnommen und sind als Anhang 9.4 ergänzt.

Die Stoffstrombilanzierung anhand der Abfallbilanz erlaubt nur die Erfassung an Reststoffen, die einen Status als Abfall erlangt haben. Dies sind üblicherweise Post-Consumer-Abfälle. Produktionsreste, die entweder direkt in die Weiterverarbeitung zurückgeführt werden oder auf Grund ihrer hohen Sortenreinheit direkt von Verarbeitern und/oder Compoundern aufgekauft werden, sind im Mengengerüst der Abfallstatistik nicht enthalten und müssen zusätzlich geschätzt werden. Die Annahmen, dass der Anteil der Post-Produktionsabfälle, der Kunststoffproduktion und -verarbeitung, die ohne einen Abfallstatus wieder recycelt wird, in etwa der Größenordnung entspricht, die man aus der Abfallstatistik ermitteln kann, wurde aus ReSek (Steger et al. 2018) übernommen. Der Anteil des internen Recyclings in der Verarbeitung wurde prozentual aus den Daten des „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017“ (Conversio 2018) entnommen und auf die Mengen in NRW übertragen.

Zusätzlich gibt es eine funktionierende Kreislaufführung für einzelne Pfandsysteme für Güter auf Kunststoffbasis. Dies sind zunächst Mehrweg-PET-Flaschen-Sammelsysteme aber auch Initiativen wie REWINDO für gebrauchte PVC-Fenster oder Sammelsysteme für gebrauchte landwirtschaftliche Kunststofffolien. Während die Kunststoffmengen im Pfandsystem von PET-Flaschen anhand einer prozentualen Angabe aus

einer älteren Conversio-Studie (zuvor unter dem Namen Consultic) geschätzt wurde, ist bei Systemen wie z. B. REWINDO noch unklar, ob die Mengengrößen schon anderweitig mitgezählt sind.

Über diese verschiedenen Auswertungsschritte (Abfallstatistik des Landes NRW und dem Kunststoffanteil der einzelnen Abfallschlüsselnummern, der Abschätzung der verschiedenen Post-Produktion-Reststoffe) ergibt sich für das Land NRW im Jahr 2017 eine Kunststoffabfallmenge von 2,4 Millionen Tonnen, die zur Verwertung oder Beseitigung zur Verfügung stehen (Abb. 10). In dieser Menge sind die Kunststoffmengen aus PET-Pfandsystemen (0,12 Millionen Tonnen) und internen Recycling (0,08 Millionen Tonnen) nicht enthalten, da diese auf Grund ihrer Sortenreinheit direkt in die stoffliche Verwertung gehen.

Art der Behandlung

Für NRW liegen keine eigenständigen Informationen, Daten oder Studien vor, die eine spezifische Ableitung der unterschiedlichen Verwertungswege und des Rezyklateinsatzes in verschiedenen Branchen erlauben würden. Gleichzeitig ist das Land NRW als ein bevölkerungsreiches, großes Flächenland mit sowohl ländlich geprägten Regionen als auch sehr urbanen Zentren ein Abbild der Bundesrepublik Deutschland, dass die Annahme plausibel erscheinen lässt, dass die Übertragung von prozentualen Anteilen für Gesamtdeutschland, wie sie aus der Conversio-Studie (2018) und Steger et al. (2018) entnommen werden können, eine richtungssichere Abschätzung der Kunststoff-Stoffströme für NRW ermöglichen.

Maßgeblich für die Abschätzung des Mengengerüsts in NRW sind daher die Daten der Studie „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017“ (Conversio 2018), die gerade mit Blick auf die stoffliche Verwertung und ihrer nachgelagerten Schritte (wie Rezyklatherstellung, Verluste, Exporte, Rezyklateinsatz in verschiedenen Branchen) die prozentuale Verteilungen liefern, die auf die Menge an Kunststoffabfällen, die in NRW stofflich verwertet werden, angewandt wurde.

Welche Anteile aus den verschiedenen Kunststoffabfallfraktionen deponiert, energetisch bzw. stofflich verwertet werden, wurde für die Post-Consumer-Abfälle und Importe aus den Verhältnissen für Deutschland ebenfalls aus der Conversio-Studie übernommen. Allerdings sind die kunststoffrelevanten Anfallorte in der Conversio-Studie (2018, S. 81) nicht 1:1 identisch mit den kunststoffrelevanten Abfallschlüsselnummern aus der Abfallstatistik. Daher mussten einige der Anfallorte mit entsprechender Gewichtung zu AVV-Gruppen zusammengefasst werden.

Wie aus dem Sankey-Diagramm ersichtlich, werden Kunststoffabfälle zu einem großen Teil energetisch verwertet. So wird der Restmüll der Haushalte oder hausmüllähnliche Gewerbeabfälle zu fast 100 Prozent energetisch verwertet. Selbst gewerbliche Verpackungen werden noch zu 60 Prozent verbrannt und nicht stofflich verwertet. Die energetische Verwertung findet entweder direkt als Mitverbrennung in der Müllverbrennungsanlage (MVA) statt oder als vorbehandelte Ersatzbrennstoffe (EBS), die entweder in EBS-Kraftwerken oder z. B. in der Zementindustrie eingesetzt werden. Für die Zurechnung, welche Menge an Kunststoffabfällen in einer MVA oder als EBS energetisch verwertet wird, wurde das Verhältnis von 40/60 (EBS/MVA) aus ReSek (Steger et al. 2018) übernommen. Dieses Verhältnis unterscheidet sich nur geringfügig von der Conversio-Studie.

Von den 2,4 Millionen Tonnen an angefallenen Kunststoffabfällen in NRW im Jahr 2017 wurden nach Schätzung eine Million Tonnen direkt in der MVA energetisch verwertet und 1,4 Millionen Tonnen einer gewissen Vorbehandlung, wie z. B. einer Zerkleinerung, Säuberung und Sortierung (und ggf. weiteren Behandlungsschritte) unterzogen. Die Deponierung war mit 20.000 Tonnen zu vernachlässigen. Von den 1,4 Millionen Tonnen wurden wiederum nur 0,5 Millionen Tonnen wirklich einer stofflichen Verwertung zugeführt. Der Rest (knapp 0,9 Millionen Tonnen) wurde ebenfalls energetisch verwertet, aufgrund ihrer größeren Homogenität gegenüber den Mischabfällen überwiegend als Ersatzbrennstoffe (0,68 Millionen Tonnen).

Zusammen mit den Kunststoffabfällen aus dem internen Recycling der Kunststoffverarbeitung und -produktion sowie den Abfällen aus dem Getränkeflaschenpfand-System (überwiegend PET), standen zirka 0,7 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle in NRW für eine stoffliche Verwertung zur Verfügung. Ein sehr kleiner Anteil (zirka 10.000 Tonnen) dieser 0,7 Millionen Tonnen wurde einer rohstofflichen Verwertung, also einem chemischen Recycling, zugeführt. Der überwiegende Anteil (0,69 Millionen Tonnen) wurde werkstofflich verwertet.

Die Aufteilung zwischen inländischer Rezyklatherstellung und Exporten zur werkstofflichen Verwertung wurde anteilig aus dem Stoffstrombild Kunststoffe Deutschland (Conversio 2018) übernommen. Da innerdeutsche Im- und Exporte zwischen einzelnen Bundesländern für die Außenhandelsbilanz Deutschlands keine Relevanz haben, ist unklar, ob die Im- und Exporte auf Länderebene, die sowohl die innerdeutschen Lieferverflechtungen als auch die internationalen Handelsbeziehungen abbilden, nicht höher sein könnten. Die innerdeutschen Warenflüsse sind jedoch nur sehr schwer zu ermitteln, sodass hier mangels besserer Daten die Im- und Exportanteile Deutschlands auch für das Land NRW angewandt wurden.

Aus den 0,69 Millionen Tonnen Kunststoffabfällen, die in NRW zur werkstofflichen Verwertung zur Verfügung standen, wurden nach Berücksichtigung der Im- und Exporte nach unseren Schätzungen 0,55 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle zur Rezyklatherstellung in NRW verwendet. Die dabei auftretenden Aufbereitungsverluste von 90.000 Tonnen wurden anschließend ebenfalls einer energetischen Verwertung zugeführt, so dass am Ende 0,46 Millionen Tonnen Kunststoffrezyklat für die Herstellung neuer Kunststoffprodukte zur Verfügung standen. Zusammen mit den 30.000 Tonnen Rezyklateinsatz aus eigenen Kunststoffabfällen bei den Recyclern wurde somit knapp 0,5 Millionen Tonnen Rezyklat in der Kunststoffverarbeitung NRW eingesetzt.

Zu knapp 37 Prozent wurde das Rezyklat für Produkte des Bausektors verwendet, vor allem für Fenster und Straßenbauprodukte, wie Absperrungen oder Leitzylinder, aber auch Abwasser- und Drainagerohre. Ein weiteres relevantes Einsatzgebiet für Kunststoffrezyklat sind landwirtschaftliche Produkte, wie Blumenkübel oder Regentonnen. Auch der Bereich der Verpackungen, und da besonders für Getränkeflaschen oder Versandfolien und Paletten, ist ein wichtiges Einsatzgebiet für Kunststoffrezyklat. Bis auf Getränkeflaschen, die in einem weitgehend geschlossenen System geführt werden, sind die meisten Anwendungsgebiete für Kunststoffrezyklat immer noch dadurch gekennzeichnet, dass Farbreinheit oder sensorische Qualitätsmerkmale wenig bis keine Rolle spielen und es mehr auf die reine Materialeigenschaft ankommt.

6.2 Perspektiven für das chemische Recycling

Wie aufgezeigt, spielt das chemische Recycling bis heute in der Verwertung von Kunststoffabfällen in NRW (aber auch bundesweit) kaum eine Rolle. Lediglich 10.000 Tonnen von insgesamt rund 2,4 Millionen Tonnen Kunststoffabfällen in NRW wurden 2017 rohstofflich verwertet. Gleichzeitig ist die Menge an energetisch verwerteten Kunststoffabfällen mit knapp 1,9 Millionen Tonnen äußerst hoch (Abb. 11).

Gleichzeitig ist die geringe Recyclingquote bei Kunststoffen derzeit ein intensiv diskutiertes Thema. Gesetzlichen Regelungen, wie z. B. das Verpackungsgesetz, haben das Ziel, den Recyclinganteil bei Verpackungen deutlich zu erhöhen und somit den Anteil, der für eine (werk-)stoffliche Verwertung zur Verfügung steht, zu erweitern. Diese wird vor allem über eine bessere Sortierung angestrebt und würde damit in erster Linie zu Lasten des Stoffstromes gehen, der bisher als Ersatzbrennstoff dient.

Die hochverschmutzten und heterogenen Abfälle, die aktuell in der MVA energetisch verwertet werden, sind aller Voraussicht nach auch in Zukunft für die (werk-)stoffliche Verwertung eher uninteressant. Gleichzeitig haben viele MVA-Betreiber Probleme mit dem hohen Anteil an hochkalorischem Kunststoffabfällen in der Mitverbrennungsfraction der MVA und müssen diese hochkalorischen Fraktionen erst behandeln und mit niedrigkalorischen Abfällen vermischen oder wässern, um sie in der MVA mitverbrennen zu können. Daher wäre vermutlich ein chemisches Recycling dieser mengenmäßig relevanten, aber stark verschmutzten und heterogenen Abfallfraktionen aus abfallwirtschaftlicher Sicht begrüßenswert, da dieses vermutlich ohne Kannibalisierungsverluste mit dem Ziel einer höheren werkstofflichen Verwertung aus dem Abfallstrom, der derzeit noch als EBS eingesetzt wird, zu erreichen scheint.

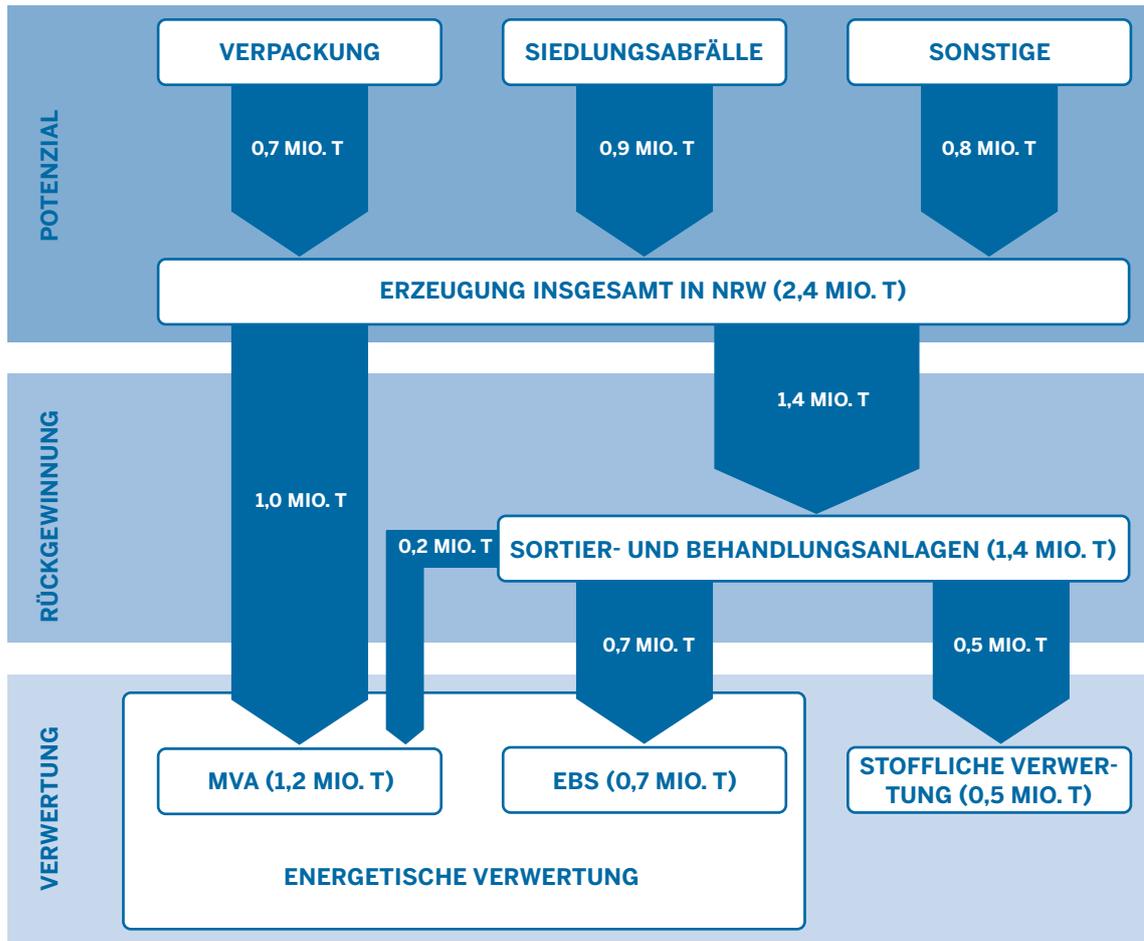


Abbildung 10: Vereinfachte Darstellung der Stoffströme bei Kunststoffabfällen in NRW (2017, eigene Berechnungen Wuppertal Institut).

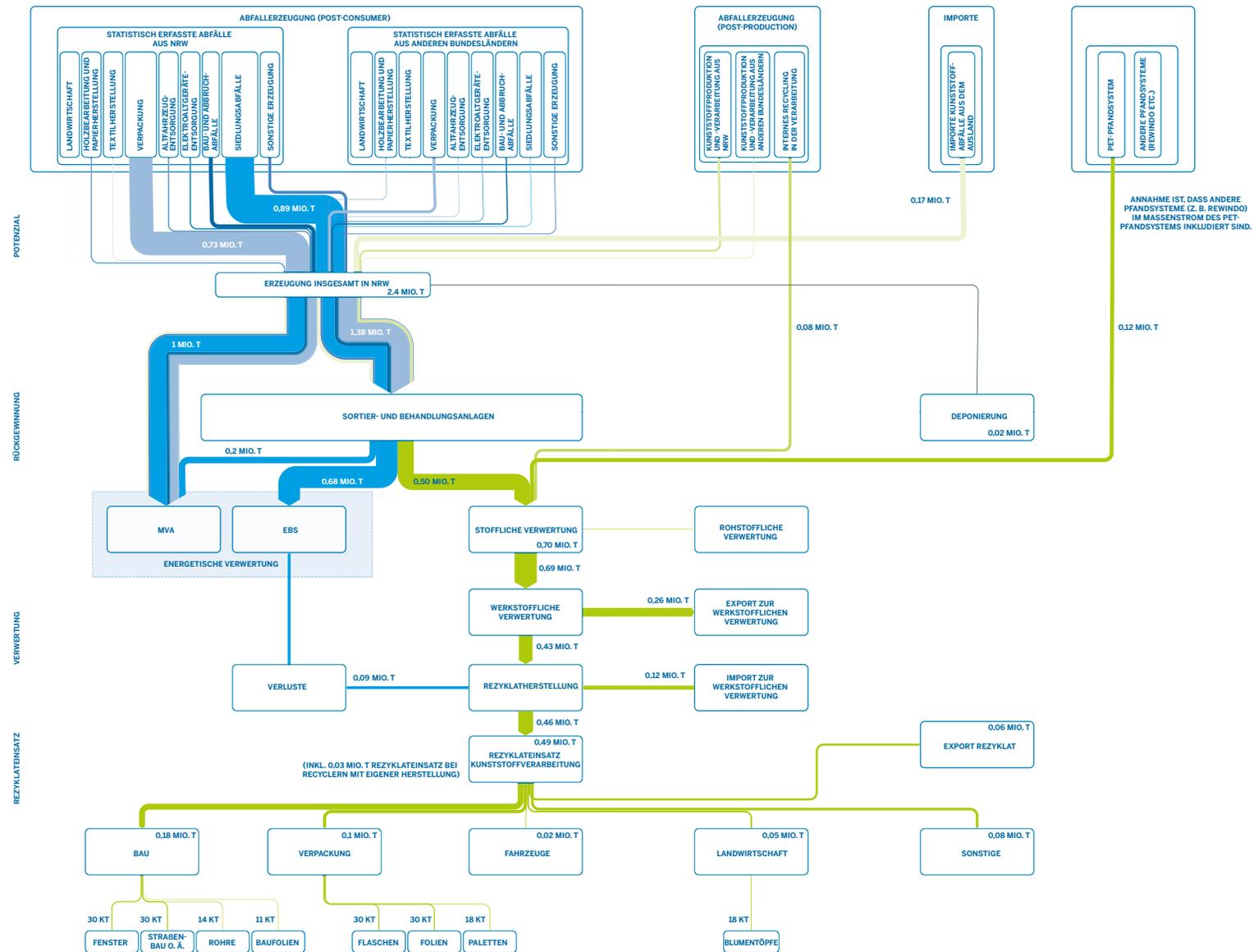


Abbildung 11: Darstellung der Stoffströme bei Kunststoffabfällen in NRW (2017, eigene Berechnungen Wuppertal Institut).

Abbildung 12: Übersicht der Mengengerüste und Stoffströme bei Kunststoffabfällen in NRW (2017, eigene Berechnungen Wuppertal Institut).

Alle Zahlen in Tonnen

Statistisch erfasste Abfälle (Anteil Kunststoffe)	Aus NRW	Aus anderen Bundesländern	Aus dem Ausland	Total	Davon Recycling (inländische Quellen)	Davon energetische Verwertung (inländische Quellen)	Davon Deponierung (inländische Quellen)	Davon MVA (thermische Behandlung)	Input Sortier- und Behandlungsanlagen	Davon Input Vorbereitung stoffliche Verwertung	Davon EBS	
Landwirtschaft	666	12	0	678	274	394	10	236	432	274	158	
Holzverarbeitung/Papierherstellung	35.358	14.181	2.663	52.202	13.082	36.006	451	21.604	27.484	13.082	14.402	
Textil	18.563	371	392	19.326	5.000	13.762	172	8.257	10.505	5.000	5.505	
Sonstige Erzeugung	89.959	21.430	3.802	115.191	29.415	80.960	1.014	48.576	61.799	29.415	32.384	
Verpackung	727.689	86.087	86.283	900.059	407.284	405.699	792	243.420	569.564	407.284	162.280	
Altfahrzeuge	40.385	9.754	14.346	64.485	12.334	36.465	1.341	21.879	26.920	12.334	14.586	
Elektro	36.134	16.109	13.075	65.318	10.999	41.244	0	24.747	27.496	10.999	16.498	
Bau und Abbruch	123.137	36.474	11.518	171.129	45.465	110.599	3.547	66.359	89.705	45.465	44.240	
Siedlungsabfälle	890.816	13.660	28.261	932.737	30.066	862.509	11.901	517.506	375.069	30.066	345.004	
Kunststoffproduktion/Verarbeitung über Abfallstatistik	69.114	14.756	5.999	89.869	83.870	0	0	0	83.870	83.870	0	
	166.339	2.410.994			61.495	103.686	1.158	166.339	62.212	102.970	61.495	41.474
				Importe	699.283	1.691.325	20.386	2.410.994	1.014.795	1.375.813	699.283	676.530
				Total								

Untenstehende Tabelle abgeleitet aus Converso (2018):

Stoffliche Verwertung insgesamt	704.788
Davon rohstoffliche Verwertung	12.236
Daraus werkstoffliche Verwertung	692.552
Davon Export	266.558
Davon Rezyklatherstellung in NRW	425.994
Rezyklatherstellung NRW	425.994
Davon Verluste (Einsatz als EBS)	89.683
Zusätzlich Rezyklatimport	124.560
Rezyklateinsatz in NRW (incl. 33k Eigenrezyklat)	493.879
Davon Export	64.771
Davon Bau	184.285
Davon Verpackung	97.005
Davon Fahrzeuge	18.720
Davon Landwirtschaft	48.138
Davon Sonstiges	80.959

Stoffliche Verwertung

Input Vorbereitung stoffliche Verwertung	699.283
Davon brennbare Sortierabfälle für MVA	199.995
Stoffliche Verwertung	499.288
Zusätzlich PET-Pfandsystem	120.000
Zusätzlich Internes Recycling Kunststoffverarbeitung	85.500
Stoffliche Verwertung insgesamt	704.788

7. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUM WEITEREN UNTERSUCHUNGSBEDARF

7.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit der AG Circular Economy konnten wesentliche Grundlagen für die Bewertung und Ausgestaltung von Verfahrensrouten des chemischen Recyclings von gemischten Kunststoffabfällen diskutiert und zusammengetragen werden. Die wichtigen Ergebnisse sind dabei:

Die technischen Grundlagen der Kunststoff-Pyrolyse sind vorhanden

Der Überblick der aktuellen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Verwertung von Kunststoffabfällen durch thermochemische Verfahren zeigt eine breite Basis von Arbeiten zur Vergasung und Pyrolyse. Es sind dabei zunehmend auch industrielle Pyrolyseinitiativen mit teilweise schon kommerziellen Ambitionen zu beobachten. Es kann damit von einer grundsätzlichen technischen Machbarkeit der Kunststoffpyrolyse ausgegangen werden.

Es besteht F&E-Bedarf speziell zum chemischen Recycling von gemischten Kunststoffabfällen

Die Arbeitshypothese wurde bestätigt. Die strategisch relevante Option der Verwertung von gemischten und verunreinigten Abfällen durch Pyrolyse ist noch nicht kommerziell verfügbar. Es besteht weiterer Entwicklungsbedarf, insbesondere im Stadium der industriellen Entwicklung und Demonstration (TRL 5-9).

In NRW sind Einsatzstoffe für das chemische Recycling verfügbar

Signifikante Mengen von gemischten Kunststoffabfällen werden derzeit in NRW noch nicht werkstofflich oder rohstofflich genutzt. Die derzeitig abgeschätzten Mengenströme von bis zu zwei Millionen Tonnen pro Jahr lassen erwarten, dass kommerzielle Anlagen in typischer Größenordnung auszulasten sind, auch wenn sich die Gesamtmenge und Struktur der Kunststoffabfälle in Zukunft verändern wird. Eine Ausweitung des Einzugsbereichs an angrenzende Bundesländer bzw. Benelux würde die Rohstoffbasis zusätzlich absichern.

Für das chemische Recycling zeichnet sich eine klimapolitisch sinnvolle Perspektive ab

Die Methoden zur ökologischen Bewertung sind vorhanden und können robuste Aussagen liefern. Die unterschiedlichen Technologien müssen im Vergleich zu konkurrierenden Verwertungsrouten und im Kontext sich langfristig verändernder Systembedingungen bewertet werden. In der Tendenz verbessern sich durch die Dekarbonisierung des Energiesystems die Perspektiven für die Pyrolyse. Die Substitutionsbeziehung zur Vermeidung von Braunkohleeinsatz in der Zementindustrie ist für die Gesamtbetrachtung von zentraler Bedeutung und muss im Kontext des gesamtindustriellen Strukturwandels vertieft analysiert werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Annahmen und Erwartungen an die positive Perspektive des chemischen Recyclings als Begründung für eine weitere Untersuchung und Erschließung von Pyrolyseverfahren als Verwertungsrouten für Kunststoffabfälle im Kern bestätigt wurden. Es sind keine grundsätzlichen Ausschlusskriterien (show stopper) erkennbar.

7.2 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Arbeiten im Rahmen dieses Diskussionspapiers konnten die ursprünglichen Annahmen und Motivation der Betrachtung bestätigen. Es wird damit die Schlussfolgerung gezogen, dass es gerechtfertigt und lohnenswert ist, die offenen Fragen und zusätzliche Aspekte in einer vertiefenden Folgeuntersuchung zu adressieren.

Hierfür werden folgende Punkte als relevant gesehen (vgl. Abbildung 13):

Vertiefte Technologiebewertung

- Detailliertere technische Analyse und Bewertung der Verfahren und Entwicklungsarbeiten (z. B. durch umfangreichere Literaturlauswertungen, Experteninterviews, Anlagenbesichtigungen etc.)
- Auswahl und Beschreibung von möglichen prototypischen Anlagenkonfigurationen für Kunststoffpyrolyse (im Sinne eines „Zielprozesses“)
- Abschätzung der relevanten technischen und ökonomischen Kenngrößen von pilot-, demo- und markt-reifen Anlagen auf Basis von Vergleichswerten aus der Literatur und eigenen Rechnungen
- Identifikation und Beschreibung der möglichen Produkte, Fahrweisen und Ausbeuten (Basis für Analyse der ökonomischen Werthaltigkeit)
- Ableitung und Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Szenarioanalyse künftiger Kunststoffabfallströme

- Detaillierung des Kunststoffanteils und der gewichteten Stoffmischung in einzelnen Teilströmen (Literaturrecherchen, ggf. Auswertung von Sortierversuchen etc.)
- Bestimmung von politisch/sozio-ökonomischen Einflussfaktoren und Randbedingungen und Abschätzung der künftigen Verfügbarkeit von Kunststoffabfällen (z. B. in Abhängigkeit von Regulierung von Verpackungen, zukünftigen Konsumentenverhalten, technischen Fortschritt der Sortier-/Aufbereitungstechnik etc.)
- Abschätzung der Kosten und raum-zeitlichen Verfügbarkeit (Logistik, etc.)

Ausweitung und Vertiefung der ökologischen Bewertung (LCA)

- Spezifizierung der Substitutions- und Konkurrenzbeziehungen
- Dynamisierung der Systemparameter (Szenarioanalysen 2030-2050)

Analyse und Bewertung der Nutzungspfade der Pyrolyseprodukte

- Technische Bewertung der möglichen Anlagenkonfigurationen und darstellbaren Produktmixe der Pyrolyse
- Identifikation der potenziellen Absatzrouten in der Grundstoffchemie (inkl. Logistik)
- Ökonomische Bewertung

Analyse der politischen und marktlichen Rahmenbedingungen

- Zusammenstellung der relevanten Regulierungen und Marktbedingungen
- Abschätzung und Bewertung absehbarer Entwicklungen und möglicher Trends (z. B. mit Blick auf Circular-Economy-Initiativen der EU)
- Diskussion von Akzeptanz und Anrechenbarkeit von Optionen des chemischen Recyclings

Erarbeitung einer strategischen Roadmap „Chemisches Kunststoffrecycling NRW“

- Ableitung Entwicklungs- und Handlungsbedarf
- Definition Maßnahmen- und Zeitplan zur Umsetzung von Entwicklungs- und Pilotprojekten in NRW

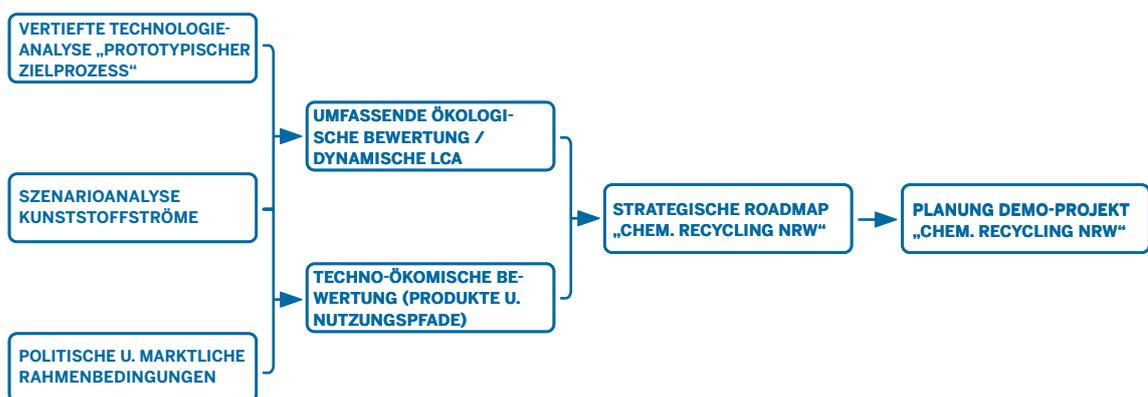


Abbildung 13: Übersicht der Kernelemente der vorgeschlagenen Folgestudie.

Es wird vorgeschlagen, eine Folgestudie in Kooperation von Industrie und Wissenschaft durchzuführen, z. B. im Rahmen der Initiative IN4climate.NRW. Das übergeordnete Ziel wäre dabei, die Ausarbeitung und Bewertung der strategischen Perspektive einer Demonstrationsanlage zum thermo-chemischen Recycling von Kunststoffabfällen in NRW als Beitrag zum ökologischen Strukturwandel des Landes.

Dieser nächste Schritt geht hinsichtlich Bearbeitungstiefe, Qualitätsanforderungen und Aufwand deutlich über den Rahmen dieses Diskussionspapiers hinaus und setzt somit eine entsprechende Finanzierung voraus.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- 4R Sustainability Inc. (2011): Conversion technology: A complement to plastic recycling. Abgerufen von: <https://plastics.americanchemistry.com/Plastics-to-Oil/>.
- Agilyx (2019): Driving Innovations To Make Plastics a Renewable Resource. Abgerufen von: www.agilyx.com/.
- Agilyx (2018): Agilyx opens the world's first commercial waste polystyrene-to-styrene oil chemical recycling plant. Abgerufen von: www.agilyx.com/application/files/6015/2510/8377/agilyx_opens_tigard_plant.pdf.
- Arcus (o.J.): Arcus Greencycling. Abgerufen von: www.arcus-greencycling.com/#loesung.
- Arena, U./Di Gregorio, F. (2014): Energy generation by air gasification of two industrial plastic wastes in a pilot scale fluidized bed reactor. *Energy* 68735–743. doi:10.1016/j.energy.2014.01.084 doi:10.1016/j.energy.2014.01.084.
- Arena, U./Di Gregorio, F. (2016): Fluidized bed gasification of industrial solid recovered fuels. *Waste Management* 5086–92. doi:10.1016/j.wasman.2016.02.011.
- Arena, U./Zaccariello, L./Mastellone, M. L. (2010): Fluidized bed gasification of waste-derived fuels. *Waste Management, IWWG Task Group on "Thermal Treatments"* 30(7)1212–1219. doi:10.1016/j.wasman.2010.01.038.
- BASF (2019): Chemical recycling of plastic waste. Abgerufen von: www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/chemcycling.html.
- Bhaskar, T./Bhavya, B./Singh, R./Naik, D. V./Kumar, A./Goyal, H. B. (2011): Chapter 3 - Thermochemical Conversion of Biomass to Biofuels. In: A. Pandey/C. Larroche/S. C. Ricke/C.-G. Dussap/E. Gnansounou (Hrsg.), *Biofuels*. Amsterdam: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-385099-7.00003-6.
- Brightmarkenergy (2019): About Us. Abgerufen von: www.brightmarkenergy.com/plasticsrenewal.
- Castrovinci, A./Lavaselli, M./Camino, G. (2008): 9 - Recycling and disposal of flame retarded materials. In: A. R. Horrocks/D. Price (Hrsg.), *Advances in Fire Retardant Materials*, Woodhead Publishing Series in Textiles. Woodhead Publishing. doi:10.1533/9781845694701.1.213.
- Christiani, J. (2017): Prüfung und Testierung der Recyclingfähigkeit. Anforderungs- und Bewertungskatalog des Institutes cyclos-HTP zur EU-weiten Zertifizierung. Aachen: Institut cyclos-HTP. Abgerufen von: http://cyclos-htp.de/fileadmin/user_upload/Anforderungs-_und_Bewertungskatalog_Version_3.5_Stand_03.08.2017.pdf.
- Connolly, D./Lund, H./Mathiesen, B. V./Werner, S./Möller, B./Persson, U. et al. (2014): Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. *Energy Policy* 65 475–489. doi:10.1016/j.enpol.2013.10.035.
- Conversio (2018): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017. Abgerufen von: http://www.bvse.de/images/news/Kunststoff/2018/181011_Kurzfassung_Stoffstrombild_2017.pdf.
- Crippa, M./De Wilde, B./Koopmans, R./Leysens, J./Muncke, J./Ritschko A-C./Van Doorselaer, K./Velis, C./Wagner, M. (2019): A circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions (M. De Smet & M. Linder, Eds.). European Commission, Brussels, Belgium. Abgerufen von: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/269031>.

- Dijkem, G. P. J./Stougie, L. (1994): Environment and economic analysis of the Veba Oel option for the processing of mixed plastic waste. Interduct: AL Delft, The Netherlands.
- Doka, G. (2013): Updates to Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services - part II: waste incineration. Doka Life Cycle Assessments. Abgerufen von: <https://doka.ch/ecoinventMSWIupdateLCI2013.pdf>, 19.02.2020.
- Duales System Deutschland Grüner Punkt (2019): Spezifikationen der dualen Systeme. Abgerufen von: <https://www.gruener-punkt.de/de/download.html>.
- Ecoloop (2018): Ecoloop Certificate. Abgerufen unter: www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/chemcycling.html.
- Eriksson, O./Finnveden, G. (2009): Plastic waste as a fuel – CO₂-neutral or not? *Energy & Environmental Science* 2(9)907–914. doi:10.1039/B908135F.
- Fuenix (2019): Let no plastic go waste. Abgerufen von: <https://fuenix.com>.
- Garforth, A. A./Ali, S./Hernández-Martínez, J./Akah, A. (2004): Feedstock recycling of polymer wastes. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 8(6)419–425. doi:10.1016/j.cossms.2005.04.003.
- Gerssen-Gondelach, S. J./Saygin, D./Wicke, B./Patel, M. K./Faaij, A. P. C. (2014): Competing uses of biomass: Assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40964–998. doi:10.1016/j.rser.2014.07.197.
- Geyer, R./Kuczynski, B./Zink, T./Henderson, A. (2016): Common Misconceptions about Recycling. *Journal of Industrial Ecology* 20(5)1010–1017. doi:10.1111/jiec.12355.
- iCAREPLAST (2019): iCAREPLAST: Integrated Catalytic Recycling of Plastic Residues Into Added-Value Chemicals. Abgerufen von: www.icareplast.eu/.
- IEA (2018): Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Paris Cedex, France: International Energy Agency and Cement Sustainability Initiative. Abgerufen von: www.iea.org/news/cement-technology-roadmap-plots-path-to-cutting-co2-emissions-24-by-2050.
- ITAD (2015): Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland. Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH: Alzenau, DE.
- K-Zeitung (2019): Kunststoffabfall als Rohstoff für Neues. K-Zeitung online. Abgerufen von: www.k-zeitung.de/kunststoffabfall-als-rohstoff-fuer-neues/?utm_source=newsl.
- Kern, S. J./Pfeifer, C./Hofbauer, H. (2013): Cogasification of Polyethylene and Lignite in a Dual Fluidized Bed Gasifier. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52(11)4360–4371. doi:10.1021/ie303453e.
- Kunststoff-Web (2019): INEOS Styrolution: Anlagen für das chemische Recycling. Kunststoff-Web. Abgerufen von: www.kunststoffweb.de/branchen-news/ineos_styrolution_anlagen_fuer_das_chemische_recycling_t242907.
- Lazarevic, D./Aoustin, E./Buclet, N./Brandt, N. (2010): Plastic waste management in the context of a European recycling society: Comparing results and uncertainties in a life cycle perspective. *Resources, Conservation and Recycling* 55(2)246–259. doi:10.1016/j.resconrec.2010.09.014.
- Lechleitner, A./Schwabl, D./Schubert, T./Bauer, M./Lehner, M. (2019): Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 72(1–2)47–60. doi:10.1007/s00506-019-00628-w.

- Lee, J. W./Yu, T. U./Lee, J. W./Moon, J. H./Jeong, H. J./Park, S. S./Yang, W./Lee, U. D. (2013): Gasification of Mixed Plastic Wastes in a Moving-Grate Gasifier and Application of the Producer Gas to a Power Generation Engine. *Energy & Fuels* 27(4)2092–2098. doi:10.1021/ef301758z.
- Loopindustries (2019): Our innovative technology decouples plastic from fossil fuels. Abgerufen von: www.loopindustries.com/en/tech.
- Lopez, G./Artetxe, M./Amutio, M./Alvarez, J./Bilbao, J./Olazar, M. (2018): Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82576–596. doi:10.1016/j.rser.2017.09.032.
- Lopez, G./Artetxe, M./Amutio, M./Bilbao, J./Olazar, M. (2017): Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73346–368. doi:10.1016/j.rser.2017.01.142.
- LyondellBasell (2019): LyondellBasell Announces Construction of New Small-Scale Molecular Recycling Facility. Abgerufen von: www.lyondellbasell.com/en/news-events/products--technology-news/lyondell-basell-announces-construction-of-new-small-scale-molecular-recycling-facility/.
- Maric, J./Berdugo Vilches, T./Thunman, H./Gyllenhammar, M./Seemann, M. (2018): Valorization of Automobile Shredder Residue Using Indirect Gasification. *Energy & Fuels* 32(12)12795–12804. doi:10.1021/acs.energyfuels.8b02526.
- Messenger B. (2018) Plastic Energy Limited Expands on Two Existing Commercial Scale Recycling Plants in Spain. Abgerufen von: <https://waste-management-world.com/a/plastic-energy-limited-expands-on-two-existing-commercial-scale-recycling-plants-in-spain>.
- Messenger B. (2018): Plastic Energy Limited Expands on Two Existing Commercial Scale Recycling Plants in Spain. Abgerufen von: <https://waste-management-world.com/a/plastic-energy-limited-expands-on-two-existing-commercial-scale-recycling-plants-in-spain>.
- Miskolczi, N./Angyal, A./Bartha, L./Valkai, I. (2009): Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. *Fuel Processing Technology* 90(7)1032–1040. doi:10.1016/j.fuproc.2009.04.019.
- OMV (2018): ReOil: Aus Kunststoff wieder Öl gewinnen. Abgerufen von: [/www.omv.com/de/blog/reoil-aus-kunststoff-wieder-oel-gewinnen](http://www.omv.com/de/blog/reoil-aus-kunststoff-wieder-oel-gewinnen).
- Orosz, M. (2018): Eine mächtige Branche. correctiv.org. Abgerufen von: <https://correctiv.org/aktuelles/klimawandel/2018/04/11/eine-maechtige-branche/>.
- Perugini, F./Mastellone, M. L./Arena, U. (2005): A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. *Environmental Progress* 24(2)137–154. doi:10.1002/ep.10078.
- Plasma Power (o.J.): Plasma Power. Abgerufen von: www.plasmapower.eu.
- Plastic Energy (2019a): PRESS RELEASE: PLASTIC ENERGY™ TO BUILD FIVE CHEMICAL RECYCLING PLANTS IN INDONESIA. Abgerufen von: <https://plasticenergy.com/press-release-plastic-energy-to-build-five-chemical-recycling-plants-in-indonesia/>.
- Plastic Energy (2019b): OurTechnology. Abgerufen von: <https://plasticenergy.com/technology/>.
- Ponzio, A./Kalisz, S./Blasiak, W. (2006): Effect of operating conditions on tar and gas composition in high temperature air/steam gasification (HTAG) of plastic containing waste. *Fuel Processing Technology* 87(3)223–233. doi:10.1016/j.fuproc.2005.08.002.

- Pyrum (2017): Creating new products out of your waste. Kurzbroschüre. Abgerufen von: www.pyrum.net/fileadmin/redakteur_upload/Pyrum_Kurzbroschuere_2017.pdf?v=1506531948.
- Quantafuel (2019): Technological Uniqueness. Abgerufen von: <https://quantafuel.com/background-of-technology/>.
- Quicker, P./Neuerburg, F./Noël, Y./Huras, A./Eyssen, R. G./Seifert, H./Vehlow, J./Thomé-Kozmiensky, K. (2017): Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. No. 17/2017. Abfall/Ressourcen. Umweltbundesamt. Abgerufen von: www.umweltbundesamt.de/publikationen/sachstand-zu-den-alternativen-verfahren-fuer-die.
- Rahimi, A./García, J. M. (2017): Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry* 1(6)1–11. doi:10.1038/s41570-017-0046.
- Scheirs, J./Kaminsky, W. (Hrsg.). (2006): Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics. John Wiley & Sons: Chichester, UK.
- Schönberger, H./Waltisberg, J. (2014): Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken auf die Abgasemission. *Energie aus Abfall – Band 11*, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH: Neuruppin, DE.
- Schubert, T./Lehner, M./Karner, T./Hofer, W./Lechleitner, A. (2019): Influence of reaction pressure on co-pyrolysis of LDPE and a heavy petroleum fraction. *Fuel Processing Technology* 193204–211. doi:10.1016/j.fuproc.2019.05.016.
- Sharuddin, S. D. A./Abnisa, F./Wan Daud, W. M. A./Aroua, M. K. (2016): A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management* 115308–326. doi:10.1016/j.enconman.2016.02.037.
- Shen, L./Worrell, E./Patel, M. K. (2010): Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and Recycling* 55(1)34–52. doi:10.1016/j.resconrec.2010.06.014.
- Singh, N./Hui, D./Singh, R./Ahuja, I. P. S./Feo, L./Fraternali, F. (2017): Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering* 115409–422. doi:10.1016/j.compositesb.2016.09.013.
- Speight, J. G. (2010): *The Refinery of the Future*. Elsevier: Amsterdam, NL.
- Stapf, D. (2018): Thermische Verfahren zur rohstofflichen Verwertung kunststoffhaltiger Abfälle. VCI-Fachausschuss Forschungs- und Bildungspolitik, FuE zur Kreislaufwirtschaft und zum Recycling chemischer Rohstoffe, Frankfurt. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH: Neuruppin, DE.
- Stapf, D./Seifert, H./Wexler, M. (2019): Thermische Verfahren zur rohstofflichen Verwertung kunststoffhaltiger Abfälle. In: A. Gosten (Hrsg.), *Energie aus Abfall*, Band 16. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin.
- Stark, A. (2019): Kunststoff-Recycling - BASF investiert 20 Millionen Euro in chemisches Kunststoff-Recycling. *Process Vogel*. Abgerufen von: www.process.vogel.de/basf-investiert-20-millionen-euro-in-chemisches-kunststoff-recycling-a-872191/.
- Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2017): *ecoinvent Data V. 3.5*.
- thinkstep AG (2017): *Software-System and Database for Life Cycle Engineering*. Leinfelden-Echterdingen, Germany.
- Thunman, H./Berdugo Vilches, T./Seemann, M./Maric, J./Vela, I. C./Pissot, S./Nguyen, H. N. T. (2019): Circular use of plastics - transformation of existing petrochemical clusters into thermochemical recycling plants with 100% plastics recovery. *Sustainable Materials and Technologies* 22e00124. doi:10.1016/j.susmat.2019.e00124.

- Trinseo (2019): “Trinseo Plant to Process 50 Tons of Post-Consumer Polystyrene Feedstock per Day” via PackagingNews. Trinseo News. Abgerufen von: <https://www.trinseo.com>.
- Tukker, A. (2002): Plastics waste feedstock recycling, chemical recycling and incineration. Rapra Technology Ltd., Shawbury, U.K.
- Tukker, A./Groot, H. de/Simons, L./Wiegersma, S. (1999): Chemical Recycling of Plastics Waste (PVC and other resins). No. STB-99-55 Final. Delft, Netherlands: TNO Centre for Strategy, Technology and Policy for the European Commission, DG III). Abgerufen von: https://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pvc/chem_recycle.pdf.
- Tullo, A. H. (2019): Plastic has a problem/is chemical recycling the solution? Chemical & Engineering News 97(39). Abgerufen von: <https://cen.acs.org/environment/recycling/Plastic-problem-chemical-recycling-solution/97/i39>.
- Wilk, V./Hofbauer, H. (2013 a): Co-gasification of Plastics and Biomass in a Dual Fluidized-Bed Steam Gasifier: Possible Interactions of Fuels. Energy & Fuels 27(6)3261–3273. doi:10.1021/ef400349k.
- Wilk, V./Hofbauer, H. (2013 b): Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier. Fuel 107787–799. doi:10.1016/j.fuel.2013.01.068.
- Williams, D./Burridge, E. (2019, Dezember): Chemical Recycling: Racing to Close the Loop. Abgerufen von: www.chemanager-online.com/en/topics/economy-business/chemical-recycling-racing-close-loop.
- Von Blazekovic, J. (2019): Plastikmüll – Kann chemisches Recycling die Lücke schließen? Frankfurter Allgemeine Zeitung. Abgerufen von: www.faz.net/aktuell/wirtschaft/plastikmuell-kann-chemisches-recycling-der-umwelt-helfen-16284592.html.

9. ANHANG

9.1 Übersicht der Klassifizierung nach TRL (Technology Readiness Level)

Grobklassifizierung	Feinklassifizierung
Grundlagenforschung	TRL 1 – Grundlegende Prinzipien beobachtet und beschrieben, potenzielle Anwendungen denkbar
Technologieentwicklung	TRL 2 – Beschreibung eines Technologiekonzepts und/oder einer Anwendung
	TRL 3 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis einzelner Elemente einer Anwendung/Technologie
	TRL 4 – Grundsätzlicher Funktionsnachweis Technologie/Anwendung im Labor
Demonstration	TRL 5 – Funktionsnachweis in anwendungsrelevanter Umgebung
	TRL 6 – Verifikation mittels Demonstrator in anwendungsrelevanter Umgebung
	TRL 7 – Prototypentest in Betriebsumgebung
	TRL 8 – Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit in Betriebsumgebung
Kommerzialisierung	TRL 9 – Erfolgreicher kommerzieller Start

Abbildung Anhang 1: Übersicht der Klassifizierung nach TRL.

9.2 Verfahrensmerkmale thermochemischer Verfahren

- **Quelle der zugeführten Energie:** autotherm (interne Energiebereitstellung durch exotherme Teilreaktionen, insbesondere durch partielle Oxidation), allotherm (Energiezufuhr von außen)
- **Art der Energiezufuhr bei allothermen Verfahren:** indirekte Wärmeübertragung (durch beheizte Wände oder heiße Hilfsmedien), mechanische Energie (Reibungswärme), elektrischer Lichtbogen
- **Zielprodukte der Zersetzung:** z. B. Monomere, Oligomere, niedermolekulare C-H-Bruchstücke, Synthesegas (CO, H₂)
- **Zusätzliche Reaktanden:** Wasserdampf (-> z. B. Reforming), Sauerstoff (-> Partialoxidation), Kohlendioxid (-> CO-Bildung)
- **Hilfsstoffe:** Katalysatoren, Fluidisierungshilfsstoffe (z. B. Öl, Sand), Inertgas
- **Temperatur** der Zersetzungsreaktion
- **Verweilzeit** der Substanzen und Produkte im Hochtemperaturbereich (z. B. schnelle bis langsame Pyrolyse, Verkokung)
- **Aufheizrate**

- **Phasenzustand und Strömungsführung** (z. B. Festbett, Wirbelbett, zirkulierende Wirbelschicht, Flugstromreaktor, Flüssigphasenreaktor)
- **Flash:** „Flash“ steht einerseits für die Entspannungsverdampfung überhitzter Flüssigkeiten, wird andererseits aber auch allgemein für sehr schnell ablaufende Prozesse verwendet, wie z. B. im Begriff „flash point“ („Flammpunkt“, die niedrigste Temperatur, bei der sich an der Oberfläche einer brennbaren Flüssigkeit ein Dampf-Luft-Gemisch bildet, welches nach externer Entzündung eine schnelle Flammenausbreitung zeigt). Bezeichnungen spezieller Verfahren, die auch namensrechtlich geschützt sein können, enthalten u. U. weitere Hinweise auf die Verfahrensbedingungen. Beispiele: „Ablative Flash-Pyrolyse“ (Ablation: Materialabtrag durch Erhitzen, Flash: (hier) Entspannungsverdampfung), „katalytische Depolymerisation“. Andere Bezeichnungen spezieller Verfahren sind diesbezüglich neutral (z. B. „Hamburger Verfahren“).

9.3 Vor- und Nachteile der Verfahren des chemischen Kunststoffrecyclings

In Tabelle 5 sind verschiedenen Technologien des chemischen Recyclings gegenübergestellt und deren Vor- und Nachteile skizziert.

Tabelle 5: Vor- und Nachteile der Verfahren des chemischen Kunststoffrecyclings (Quelle: Lechleitner et al. 2019).

	Vorteile	Nachteile
Solvolyse	Sehr selektiv gegenüber speziellen Polymeren Monomere direkt zur erneuten Kunststoffsynthese	Lösungsmittelabtrennung und -handhabung aufwändig
Pyrolyse	Breite Anwendbarkeit der Produkte Wenig empfindlich gegenüber Heteroatomen (kein Katalysator) Hoher Energiegehalt der Produkte Einfaches Anlagendesign	Wenig selektiv -> breites Produktspektrum Produktverarbeitung aufwendig Chemisch gebundene Heteroatome je nach Anwendung problematisch Energieeinbringung für endotherme Reaktionen Verkokungsneigung
Thermokatalytisches Cracken	Breite Anwendbarkeit der Produkte Produktspektrum teilweise steuerbar Geringer Wärmebedarf durch Katalysator	Katalysator empfindlich gegenüber speziellen Heteroatomen Katalysatorabtrennung prozesstechnisch aufwendig Verkokungsneigung
Hydrocracking	Geringe Koksbildung durch Wasserstoff Stabilere, gesättigte Produkte Geringerer thermischer Energiebedarf durch exotherme Hydrierung	Energiebedarf zur Wasserstoffbereitstellung Komplexe Anlagetechnik
Gasifizierung	Wenig Einsatzaufbereitung notwendig Vielfältig einsetzbares Produktgas	Niedermolekulare Produkte Oxygenierung und dadurch reduzierter Wert der Produkte

9.4 Kunststoffanteil nach Abfallschlüsselnummern

Tabelle Anhang 1: Kunststoffanteil nach Abfallschlüsselnummern (Quelle: Steger et al. 2018).

Alle Abfallarten, die im Europäischen Abfallverzeichnis (EAV) als gefährlich eingestuft sind, werden durch einen Stern (*) hinter der Abfallschlüsselnummer gekennzeichnet.

ASN	Bezeichnung	Kunststoff-Gehalt	Quelle
020104	Kunststoffabfälle (ohne Verpackungen)	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
030305	De-inking-Schlämme aus dem Papierrecycling	5,00%	B+T Group (2015), Trumpf et al. (2007), IPA (2015)
030307	mechanisch abgetrennte Abfälle aus der Auflösung von Papier- und Pappabfällen	25,00%	Flamme (2002)
030308	Abfälle aus dem Sortieren von Papier und Pappe für das Recycling	25,00%	Flamme (2002)
030310	Faserabfälle, Faser-, Füller- und Überzugsschlämme aus der mechanischen Abtrennung	5,00%	B+T Group (2015), Trumpf et al. (2007), IPA (2015)
040209	Abfälle aus Verbundmaterialien (imprägnierte Textilien, Elastomer, Plastomer)	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
040221	Abfälle aus unbehandelten Textilfasern	66,00%	Wagner et al. (2012)
040222	Abfälle aus verarbeiteten Textilfasern	66,00%	Wagner et al. (2012)
070213	Kunststoffabfälle	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
080111 *	Farb- und Lackabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten	33,00%	IPA (2015)
080112	Farb- und Lackabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 11 fallen	55,00%	IPA (2015)
080115 *	wässrige Schlämme, die Farben oder Lacke mit organischen Lösemitteln oder anderen gefährlichen Stoffen enthalten	5,00%	IPA (2015)
080116	wässrige Schlämme, die Farben oder Lacke enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 15 fallen	5,00%	IPA (2015)
080117 *	Abfälle aus der Farb- oder Lackentfernung, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten	50,00%	Wagner et al. (2012)
080118	Abfälle aus der Farb- oder Lackentfernung mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 17 fallen	50,00%	Wagner et al. (2012)
080121 *	Farb- oder Lackentfernerabfälle	50,00%	Wagner et al. (2012)
080409 *	Klebstoff- und Dichtmassenabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten	33,00%	IPA (2015)
080410	Klebstoff- und Dichtmassenabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 04 09 fallen	55,00%	IPA (2015)
080413 *	wässrige Schlämme, die Klebstoffe oder Dichtmassen mit organischen Lösemitteln oder anderen gefährlichen Stoffen enthalten	5,00%	IPA (2015)

ASN	Bezeichnung	Kunststoff-Gehalt	Quelle
080414	wässrige Schlämme, die Klebstoffe oder Dichtmassen enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 04 13 fallen	5,00%	IPA (2015)
090110	Einwegkameras ohne Batterien	92,00%	Wagner et al. (2012)
090111 *	Einwegkameras mit Batterien, die unter 16 06 01, 16 06 02 oder 16 06 03 fallen	80,00%	Wagner et al. (2012)
090112	Einwegkameras mit Batterien mit Ausnahme derjenigen, die unter 09 01 11 fallen	80,00%	Wagner et al. (2012)
120105	Kunststoffspäne und -drehspäne	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
150102	Verpackungen aus Kunststoff	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
150105	Verbundverpackungen	21,00%	FKN (2015)
15010600	gemischte Verpackungen nicht differenzierbar	23,90%	Dehne (2015), Hoffmann et al. (2011)
15010601	Leichtverpackungen (LVP)	44,40%	u.e.c. Berlin e.A., Hoffmann et al. (2011)
150109	Verpackungen aus Textilien	50,00%	Wagner et al. (2012)
150110 *	Verpackungen, die Rückstände gefährlicher Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	23,90%	Dehne (2015), Hoffmann et al. (2011)
150202 *	Aufsaug- und Filtermaterialien (einschließlich Ölfilter a. n. g.), Wischtücher und Schutzkleidung, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	50,00%	Wagner et al. (2012)
150203	Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung mit Ausnahme derjenigen, die unter 15 02 02 fallen	50,00%	Wagner et al. (2012)
160103	Altreifen	27,00%	VCS (2003)
160104 *	Altfahrzeuge	20,00%	Schäfer (2004), VKE (2003),
160106	Altfahrzeuge, die weder Flüssigkeiten noch andere gefährliche Bestandteile enthalten	20,00%	Schäfer (2004), VKE (2003),
160119	Kunststoffe	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
16012200	Bauteile a.n.g.	50,00%	Wagner et al. (2012)
16012202	nicht metallische Bauteile	50,00%	Wagner et al. (2012)
160209 *	Transformatoren und Kondensatoren, die PCB enthalten	25,00%	FGU (2009)
160210 *	gebrauchte Geräte, die PCB enthalten oder damit verunreinigt sind, mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 09 fallen	20,00%	VKE (2003), Wagner et al. (2012), BDE, LfU Bayern (2001)

ASN	Bezeichnung	Kunststoff-Gehalt	Quelle
160211 *	gebrauchte Geräte, die teil- und vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten	20,00%	VKE (2003), Wagner et al. (2012), BDE, LfU Bayern (2001)
160212 *	gebrauchte Geräte, die freies Asbest enthalten	20,00%	VKE (2003), Wagner et al. (2012), BDE, LfU Bayern (2001)
160213 *	gefährliche Bestandteile 22) enthaltende gebrauchte Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 09 bis 16 02 12 fallen	20,00%	VKE (2003), Wagner et al. (2012), BDE, LfU Bayern (2001)
160214	gebrauchte Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 09 bis 16 02 13 fallen	20,00%	VKE (2003), Wagner et al. (2012), BDE, LfU Bayern (2001)
160215 *	aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bestandteile	20,00%	VKE (2003), Wagner et al. (2012), BDE, LfU Bayern (2001)
16021500*	aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bestandteile nicht differenzierbar	20,00%	VKE (2003), Wagner et al. (2012), BDE, LfU Bayern (2001)
16021501*	Quecksilberhaltige Abfälle	10,00%	IPA (2015)
16021502*	Leiterplatten	7,00%	VKE (2003)
16021503*	Tonerkassetten	90,00%	Wagner et al. (2012)
16021504*	Kunststoffe, die bromierte Flammschutzmittel enthalten	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
16021509*	Externe elektrische Leitungen	50,00%	Kettler
160216	aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 15 fallen	50,00%	Wagner et al. (2012)
16021601	Externe elektrische Leitungen (einschließlich Kabel)	50,00%	Kettler
160601 *	Bleibatterien	10,00%	IPA (2015), GRS (2009)
160602 *	Ni-Cd-Batterien	5,00%	IPA (2015), GRS (2009)
160603 *	Quecksilber enthaltende Batterien	10,00%	IPA (2015), GRS (2009)
160604	Alkalibatterien (außer 16 06 03)	10,00%	IPA (2015), GRS (2009)
160605	andere Batterien und Akkumulatoren	5,00%	IPA (2015), GRS (2009)
170203	Kunststoff	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
170204 *	Glas, Kunststoff und Holz, die gefährliche Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	5,90%	Wagner et al. (2012)
170410 *	Kabel, die Öl, Kohlenteer oder andere gefährliche Stoffe enthalten	43,10%	Schäfer (2004)
170411	Kabel mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 04 10 fallen	43,10%	Schäfer (2004)
170603 *	anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen besteht oder solche Stoffe enthält	10,00%	IPA (2015)

ASN	Bezeichnung	Kunststoff-Gehalt	Quelle
170604	Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01 und 17 06 03 fällt	10,00%	IPA (2015)
170901 *	Bau- und Abbruchabfälle, die Quecksilber enthalten	5,10%	Görisch (2007)
170902 *	Bau- und Abbruchabfälle, die PCB enthalten (z. B. PCB-haltige Dichtungsmassen, PCB-haltige Bodenbeläge auf Harzbasis, PCB-haltige Isolierverglasungen, PCB-haltige Kondensatoren)	5,10%	Görisch (2007)
170903 *	sonstige Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich gemischte Abfälle), die gefährliche Stoffe enthalten	5,10%	Görisch (2007)
170904	gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen	5,10%	Görisch (2007)
180103 *	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden	24,00%	IPA (2015), Wagner et al. (2012)
180104	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (z. B. Wund- und Gipsverbände, Wäsche, Einwegkleidung, Windeln)	34,30%	IPA (2015), Wagner et al. (2012)
180202 *	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden	24,00%	IPA (2015), Wagner et al. (2012)
180203	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden	24,00%	IPA (2015), Wagner et al. (2012)
190209 *	feste brennbare Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	34,00%	IPA (2015)
19029950	Produkte	25,00%	Wagner et al. (2012)
190501	nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen	30,00%	u.e.c. Berlin e.A.
191003 *	Schredderleichtfraktionen und Staub, die gefährliche Stoffe enthalten	52,50%	Reinhardt (2004), Wagner et al. (2012)
191004	Schredderleichtfraktionen und Staub mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 10 03 fallen	52,50%	Reinhardt (2004), Wagner et al. (2012)
191204	Kunststoff und Gummi	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
191208	Textilien	66,00%	Wagner et al. (2012)
191210	brennbare Abfälle (Brennstoffe aus Abfällen)	42,00%	u.e.c. Berlin e.A.
191211 *	sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen, die gefährliche Stoffe enthalten	8,00%	u.e.c. Berlin e.A.
191212	sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 12 11 fallen	8,00%	u.e.c. Berlin e.A.

ASN	Bezeichnung	Kunststoff-Gehalt	Quelle
200110	Bekleidung	40,00%	Wagner et al. (2012)
200111	Textilien	66,00%	Wagner et al. (2012)
200121 *	Leuchtstoffröhren und andere quecksilberhaltige Abfälle	16,70%	Obermoser et al. (2008)
200123 *	gebrauchte Geräte, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten	23,00%	Wagner et al. (2012)
200133 *	Batterien und Akkumulatoren, die unter 16 06 01, 16 06 02 oder 16 06 03 fallen, sowie gemischte Batterien und Akkumulatoren, die solche Batterien enthalten	10,00%	IPA (2015), GRS (2009)
200134	Batterien und Akkumulatoren mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 33 fallen	10,00%	IPA (2015), GRS (2009)
200135 *	gebrauchte elektrische und elektronische Geräte, die gefährliche Bauteile 66) enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 21 und 20 01 23 fallen	20,00%	VKE (2003), Wagner et al. (2012), BDE, LfU Bayern (2001)
200136	gebrauchte elektrische und elektronische Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 21, 20 01 23 und 20 01 35 fallen	20,00%	VKE (2003), Wagner et al. (2012), BDE, LfU Bayern (2001)
200139	Kunststoffe	100,00%	u.e.c. Berlin e.A.
20030100	gemischte Siedlungsabfälle nicht differenzierbar	17,15%	Hoffmann et al. (2011), u.e.c. Berlin e.A.
20030101	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt	15,00%	u.e.c. Berlin e.A., Wagner et al. (2012), Hoffmann et al. (2011)
20030102	Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt	23,90%	Dehne (2015), Hoffmann et al. (2011)
20030104	Abfälle aus der Biotonne	1,00%	Hoffmann et al. (2011), u.e.c. Berlin e.A.
200302	Marktabfälle	8,10%	Beyer et al. (2004)
200307	Sperrmüll	17,80%	Hoffmann et al. (2011), u.e.c. Berlin e.A., Hauer (2008), Baur (2003), Wagner et al. (2012)



Kontakt: IN4climate.NRW
Munscheidstraße 14
45886 Gelsenkirchen
+49 209 40 85 99-0
post@in4climate.nrw
www.in4climate.nrw