

Hintergrund

# Chemisches Recycling



# Inhaltsverzeichnis

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Zusammenfassung</b>                                              | <b>3</b>  |
| <b>Summary</b>                                                      | <b>4</b>  |
| <b>1. Einleitung</b>                                                | <b>5</b>  |
| <b>2. Begriff des „Chemischen Recyclings“</b>                       | <b>7</b>  |
| <b>3. Gesetzliche Aspekte</b>                                       | <b>9</b>  |
| 3.1 Abfall                                                          | 9         |
| 3.2 Kreislaufwirtschaft                                             | 10        |
| 3.3 Gefahrstoffe                                                    | 11        |
| 3.4 Standardisierung und Normung                                    | 11        |
| 3.5 Weitere Vorschriften                                            | 11        |
| <b>4. Die Verfahren im Detail</b>                                   | <b>12</b> |
| 4.1 Thermolyse/Thermische Depolymerisation                          | 12        |
| 4.1.1 Pyrolyse                                                      | 13        |
| 4.1.2 Verölung                                                      | 15        |
| 4.1.3 Hydrothermale Depolymerisation                                | 16        |
| 4.1.4 Gasifizierung                                                 | 16        |
| 4.2 Solvolyse/Chemische Depolymerisation                            | 17        |
| <b>5. Pyrolyse – Probleme, Ökobilanzen, Kritik</b>                  | <b>19</b> |
| 5.1 Kunststoffe im Pyrolyseprozess                                  | 19        |
| 5.2 Produktqualität und Schadstoffe                                 | 19        |
| 5.2.1 Technische Qualität des Pyrolyseöls                           | 19        |
| 5.2.2 Toxikologie                                                   | 23        |
| 5.2.3 Bewertung der Verfahren in Bezug auf Wasser                   | 24        |
| 5.3 Eignung von Inputströmen für die Pyrolyse                       | 24        |
| 5.3.1 Thermoplastische „Post-Consumer“-Abfälle                      | 24        |
| 5.3.2 Konkurrenz zum werkstofflichen/mechanischen Recycling         | 25        |
| 5.3.3 Reifenpyrolyse                                                | 25        |
| 5.4 Vergleichende ökologische Bewertung des „chemischen Recyclings“ | 26        |
| 5.4.1 Vorhandene Ökobilanzen zur Pyrolyse                           | 26        |
| 5.4.2 Notwendigkeit einer unabhängigen Bewertung                    | 28        |
| 5.4.3 Bewertung der Pyrolyse mit der Nutzenkorbmethode              | 28        |
| <b>6. Der Massenbilanzansatz für das „Chemische Recycling“</b>      | <b>30</b> |
| <b>7. Zukunft des „Chemischen Recyclings“</b>                       | <b>33</b> |
| <b>8. Forderungen des BUND</b>                                      | <b>35</b> |
| <b>Literatur</b>                                                    | <b>36</b> |

# Zusammenfassung zum Hintergrundpapier

Kunststoffe sind aus unserem täglichen Leben, aus unseren technischen Produkten und industriellen Prozessen praktisch nicht mehr wegzudenken. Dennoch stellen sie, sowohl in der Herstellung als auch in der Nutzungsphase und in besonderem Maße als Kunststoffabfälle, die Welt vor erhebliche Herausforderungen. In Zukunft wird es darum gehen, viele Kunststoffanwendungen möglichst zu vermeiden und die restlichen Kunststoffmaterialien bestmöglich im Kreislauf zu führen. Das traditionelle mechanische Recycling, das nach wie vor eine hohe Daseinsberechtigung hat, stößt dabei an seine Grenzen. Durch ineffiziente Sammlung, ungeeignetes Produktdesign und eine Vielzahl an Additiven und Schadstoffen eignen sich viele Kunststoffprodukte nicht für das werkstoffliche Recycling und werden daher in Deutschland zu einem erheblichen Teil verbrannt.

In diesem Kontext gewinnt das „chemische Recycling“ zunehmend an Bedeutung. Es wird beworben mit dem Potenzial, größere Anteile am Kunststoffabfall stofflich zu verwerten, Neuware-Qualität herzustellen, Schadstoffe auszuschleusen sowie Treibhausgas-Emissionen zu senken. Die (petro-)chemische Industrie strebt das sogenannte „chemische Recycling“ nicht zuletzt auch aus der Notwendigkeit an, alternative, nicht-fossile Rohstoffquellen für ihre Produkte zu erschließen und ihre Infrastruktur zu erhalten. Diese Verfahren sind nicht neu, sie existieren seit den 1970er Jahren. Technische Hürden sowie ökonomische Unzulänglichkeiten verhinderten eine Umsetzung im industriellen Maßstab.

In diesem Hintergrund wird das „chemische Recycling“ definiert, die gesetzlichen Aspekte einschließlich der Einordnung in die Abfallhierarchie aufgezeigt und die Verfahren des „chemischen Recyclings“; Pyrolyse, Gasifizierung, Verölung und Solvolyse, im Detail beschrieben. Aufgrund der Datenlage wird besonders ausführlich die Pyrolyse sowie ihre Probleme hinsichtlich Produktqualität, Toxikologie und Schadstoffen, die neu entstehen können, beschrieben.

Der Input, der für die Pyrolyse geeignet ist, ist begrenzt, und es kann eine Konkurrenz zum werkstofflichen/mechanischen Recycling entstehen.

Bisher existieren keine unabhängigen Ökobilanzen, die vorliegenden eignen sich nicht für eine fundierte abschließende Bewertung. Einige Studien zeigen, dass werkstoffliches/mechanisches Recycling hinsichtlich des Klimawandels deutlich günstiger abschneidet als die Pyrolyse. Pyrolyse wurde bislang nicht mit Vermeidung, Mehrweg oder anderen Recyclingmethoden verglichen, sondern ausschließlich als bessere Alternative zur Kunststoffverbrennung dargestellt. Die dafür verrechneten hohen Gutschriften sind fragwürdig.

Die Massenbilanzierung spielt eine große Rolle, da Pyrolyseöle verschmutzt sind und stark mit fossilen Ausgangsstoffen verdünnt werden müssen. Die verschiedenen Methoden werden vorgestellt und bewertet.

Die Zukunft und Grenzen des „chemischen Recyclings“ werden diskutiert und der BUND stellt abschließend folgende Forderungen:

1. Kunststoffproduktion deutlich reduzieren
2. Vermeidung, Wiederverwendung und mechanisches Recycling priorisieren
3. „Chemisches Recycling“ in der Abfallhierarchie nachrangig einordnen
4. Schadstoffe minimieren
5. nur transparente und unabhängige Ökobilanzen zulassen
6. ausschließlich Verfahren mit geringstmöglichem fossilem Input akzeptieren
7. intransparente, nicht wahrheitsgemäße Massenbilanzierung ablehnen
8. Ausbau des „chemischen Recyclings“ nur bei klarem Umweltvorteil fördern

## Summary

Plastics have become an integral part of our daily lives, our technical products and industrial processes. Nevertheless, they pose considerable challenges for the world, both in their production and during their use, and especially as plastic waste. In the future, the aim will be to avoid many plastic applications as far as possible and to keep the remaining plastic materials circulating in the best possible way. Traditional mechanical recycling, which still has a high reason for existence, is reaching its limits. Due to inefficient collection, unsuitable product design and a multitude of additives and pollutants, many plastic products are not suitable for mechanical recycling and are therefore largely incinerated in Germany.

In this context, 'chemical recycling' is becoming increasingly important. It is promoted for its potential to recycle larger proportions of plastic waste, produce virgin-quality material, remove pollutants and reduce greenhouse gas emissions. The petrochemical industry is pursuing so-called 'chemical recycling' not least because of the need to tap into alternative, non-fossil raw material sources for its products and to maintain its infrastructure. These processes are not new; they have been around since the 1970s. Technical hurdles and economic shortcomings prevented their implementation on an industrial scale.

In this background paper, the term 'chemical recycling' is defined, the legal aspects are outlined, including its classification in the waste hierarchy, and the processes of 'chemical recycling', pyrolysis, gasification, oilification and solvolysis are described in detail. Based on the available data, pyrolysis and its problems with regard to product quality, toxicology and pollutants that may arise are described in particular detail. The input suitable for pyrolysis is limited, and therefore competition with mechanical recycling may arise.

To date, there are no independent life cycle assessments, and those that do exist are not suitable for a well-founded final evaluation. Some studies show that mechanical recycling

is significantly more favourable than pyrolysis in terms of climate change. Pyrolysis has not yet been compared with avoidance, reuse or other recycling methods, but has been presented exclusively as a better alternative to plastic incineration. The high credits calculated for this are questionable.

Mass balancing plays an important role, as pyrolysis oils are highly contaminated and must be heavily diluted with fossil feedstocks. The various methods are presented and evaluated.

The future and limitations of 'chemical' recycling are discussed, and in conclusion, BUND makes the following demands:

1. Significantly reduce plastic production
2. Prioritise avoidance, reuse and mechanical recycling
3. Give 'chemical recycling' a lower priority in the waste hierarchy
4. Minimise pollutants
5. Only allow transparent and independent life cycle assessments
6. Only accept processes with the lowest possible fossil input
7. Reject non-transparent, untruthful mass balancing
8. Only promote the expansion of 'chemical recycling' if there is a clear environmental benefit

# 1. Einleitung

Ohne unseren Umgang mit Stoffen und damit auch unsere Wirtschaftsweise und Lebensstile spürbar zu verändern, werden die Ziele der internationalen Vereinbarungen zum Klimaschutz und zum Erhalt der Biodiversität nicht erreichbar sein. Wir brauchen eine neue Stoffpolitik, die sich sowohl mit Risiken und Chancen von Chemikalien als auch mit der Menge der Stoffströme von der Rohstoffextraktion bis hin zum Abfall befasst. Die Kreislaufwirtschaft und das Recycling spielen eine bedeutende Rolle bei der Bewältigung der Klima-, Arten- und Ressourcenkrise. Dennoch ist Recycling nur die dritte Stufe der Abfallhierarchie – Vermeidung und Wiederverwendung sind wesentlich effizienter im Hinblick auf Energie- und Ressourcennutzung und bergen unausgeschöpfte Suffizienzpotentiale.

Wenn sich an den bisherigen politischen Randbedingungen nichts Wesentliches ändert, verdreifacht sich die jährliche Kunststoffproduktion fast bis 2060 (OECD 2022). Steigerungen der Produktion sind nicht umweltverträglich – im Gegensatz dazu braucht es ehrgeizige, rechtsverbindliche Ziele zur Senkung. Die Mengen insgesamt, die Zahl der Standardkunststoffe sowie auch die darin enthaltenen Chemikalien und Ersatzstoffe sollten auf ein verträgliches Maß reduziert werden (Vergleich: BUND-Hintergrund „Plastik – Radikales Umdenken nötig“). Weltweit fallen schon heute jährlich etwa 350 Million t Kunststoffabfälle an. In Deutschland waren es im Jahr 2023 5,91 Million t, von denen 37,9 % werkstofflich recycelt wurden. 61,1 % entfielen auf die energetische Verwertung als Ersatzbrennstoff oder in Müllverbrennungsanlagen; rohstofflich (v.a. „chemisch“) recycelt wurden lediglich 0,5 %. (Conversio 2024).

Verfahren des „advanced Recyclings“, insbesondere das in diesem Papier zu thematisierende „chemische Recycling“, gewinnen in der aktuellen Diskussion zunehmend an Bedeutung. Man wirbt mit dem Potenzial, größere Anteile am Kunststoffabfall stofflich zu verwerten und Neuware-Qualität herzustellen. Es ließen sich Schadstoffe aus dem Kunststoffkreislauf ausschleusen, und durch die Einführung des „chemischen Recyclings“ würden die Treibhausgas-Emissionen

gesenkt. Die (petro-)chemische Industrie strebt das „chemische Recycling“ nicht zuletzt auch aus der Notwendigkeit an, alternative, nicht-fossile Rohstoffquellen für ihre Produkte zu erschließen.

Höhere Recyclingraten sind wichtig, um die Primärressourcen-Nutzung zu reduzieren, jedoch hat das Kunststoffrecycling Grenzen. Es ist komplex und mit kritischen Herausforderungen verbunden, die überwunden werden müssen, um die Recyclingquoten signifikant zu erhöhen.

Aus der Erfahrung mit dem werkstofflichen Recycling zählen zu diesen Herausforderungen die **Chemie der Kunststoffe**, der häufig hohe **Verschmutzungsgrad** der zu verwertenden Kunststoffabfälle sowie das Fehlen von **recyclinggerechtem Design** bei Kunststoffteilen.

**Kunststoffchemie:** Auf dem Markt befinden sich unzählige Kunststoffsorten, von beispielsweise Standardkunststoffen wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) über verschiedenste technische Kunststoffe wie beispielsweise Polyamide und Polyester bis hin zu Hochleistungskunststoffen, Elastomere und Duroplasten.

Neuware aus Kunststoffen besteht nicht nur aus dem Polymer, sondern beinhaltet eine Vielzahl von Zusatzstoffen (Weichmacher, Flammschutzmittel, Antioxidantien und UV-Stabilisatoren, Gleitmittel, Farbstoffe, Antistatika, Biozide, Füllstoffe sowie Verstärkungsmaterial).

Neben diesen bewusst zugegebenen Substanzen (intentionally added substances „IAS“) finden sich in Produkten und auch in Kunststoffabfällen sogenannte „NIAS“, die ohne Absicht in das Produkt gelangt sind und durch Verunreinigungen, Reaktions- und Abbauprodukte bei der Herstellung und Verwendung entstanden sein können. Auch rein physikalisch sind dem Recycling aufgrund von Alterungsvorgängen der Polymere und unvermeidlichen Materialverlusten Grenzen gesetzt.

**Verschmutzungsgrad:** Vielfach wird gefordert, „Post-Consumer“-Abfälle zu recyceln, die jedoch stark verschmutzt (z.B. mit Papier, Metallen, Verpackungsinhalten) aus den Sammlungen kommen.

**Teiledesign:** Viele Kunststoffprodukte sind so konstruiert, dass sie nicht oder kaum recyclingfähig sind, da sie als Verbundmaterialien aus Mehrschichtfolien oder anderen untrennbar miteinander verbundenen Komponenten bestehen.

Auch falsche oder unvollständige Sortierung, unzureichende Kennzeichnung, fehlende Sammelinfrastrukturen und technische Grenzen tragen dazu bei, dass ein Großteil des in Deutschland verbrauchten Kunststoffs nicht recycelt wird.

Die chemische Industrie wirbt damit, dass durch „chemisches Recycling“ viele dieser Probleme gelöst werden können. Dies ist aber nur in wenigen einzelnen Aspekten tatsächlich der Fall, wie in diesem Papier aufgezeigt wird.

## 2. Begriff des „Chemischen Recyclings“

Recycling von Kunststoffen bedeutet im ursprünglichen Sinn, aus Kunststoffabfall wieder eine Kunststoffanwendung zu produzieren.

Werden Kunststoffe nach ihrer Produktions- oder Nutzungsphase lediglich aufgeschmolzen und dann wieder verarbeitet, spricht man von **werkstofflich/mechanischem Recycling**, Bild 1 (Schlummer et al. 2020). Das Polymer an sich bleibt dabei praktisch unverändert. Beim lösemittelbasierten Recycling unterzieht man das Polymer einem Reinigungsschritt, bei dem die Molekülketten ebenfalls erhalten bleiben. Mit dieser Methode können im Kunststoffcompound enthaltene Verunreinigungen und Additive über die gelöste Phase abgetrennt werden. Die beiden vorgenannten Methoden kann man auch mit dem Überbegriff „physikalisches Recycling“ bezeichnen. Sie gelten ebenso als werkstoffliches/mechanisches Recycling.

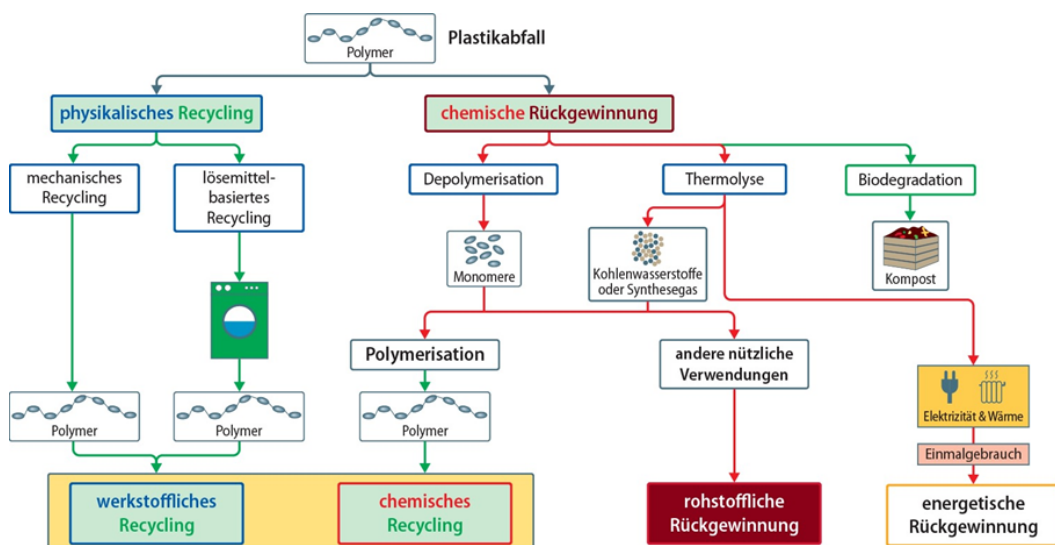
Bei den weiteren Methoden, hier als „chemische Rückgewinnung“ gekennzeichnet, bleibt das Polymer als solches nicht erhalten. Die in dieser Skizze dargestellte **Depolymerisation** besagt, dass der Kunststoff in seine Monomere zerlegt wird, welche dann wieder polymerisiert werden können. Exakter spricht man hier auch von „chemischer Depolymerisation“ oder „**Solvolyse**“.

Hier können Schadstoffe prinzipiell ausgeschleust werden.

Bei der **Thermolyse** (auch „thermische Depolymerisation“) wird das Polymer noch weiter zerlegt; bei den entstehenden Substanzen handelt es sich um feste und flüssige Kohlenwasserstoffe oder Gase. Man unterscheidet hier die Verfahren der Pyrolyse, Verölung und Gasifizierung.

Sowohl die Solvolyse als auch die Verfahren der Thermolyse werden als „**chemisches Recycling**“ bezeichnet. Aus den bei diesen Prozessen gewonnenen Substanzen können durch Polymerisation neue Kunststoffe entstehen. Alternativ ist auch eine rohstoffliche Rückgewinnung in Form anderer chemischer Produkte möglich. Bei der Thermolyse kann zudem entstehende Energie genutzt werden, was als energetische Rückgewinnung gewertet wird.

Die **Biodegradation** ist auch eine Form der chemischen Rückgewinnung, wenngleich beim Kompostieren bioabbaubarer Kunststoffe im Wesentlichen nur Kohlendioxid und Wasser entstehen, sowie Mikroplastik-Partikel (BUND 2025, BUND 2022, Nageler-Petritz 2023).



**Bild 1:** Vergleich unterschiedlicher Behandlungsmethoden von Kunststoffabfällen (Schlummer et al. 2020)

In Expert/innenkreisen hat man sich im Rahmen einer umfassenden deutschen Studie auf folgende **Definition des „chemischen Recyclings“** verständigt (Quicker & Seitz 2024):

„Das „chemische Recycling“ von Kunststoffen bezeichnet Prozessketten, in denen Polymere ganz oder teilweise in ihre Bestandteile zerlegt und diese anschließend stofflich, zur Erzeugung neuer Polymere oder anderer Stoffe, verwendet und – abgesehen von Nebenprodukten oder Reststoffen – nicht energetisch genutzt werden.“

Die dem „chemischen Recycling“ zugrundeliegenden Verfahren sind nicht neu; sie existieren seit den 1970er Jahren (Allen et al. 2024, Hoffmann 2020), und bereits seit den Achtzigern wird an der rohstofflichen Verwertung von Altkunststoff geforscht. Technische Hürden sowie hohe Kosten verhinderten jedoch eine Umsetzung im industriellen Maßstab, so dass zahlreiche Anlagen nur kurze Zeit betrieben und schließlich unter erheblichen Verlusten stillgelegt wurden (Worzewski 2020).

Derzeit sind in Deutschland und Europa die Kapazitäten für das „chemische Recycling“ noch vergleichsweise gering. In (Quicker & Seitz 2024) wurden Unternehmen identifiziert, die „zumindest angeben, dass die jeweilige Technologie zum „chemischen Recycling“ von Kunststoffen geeignet wäre“ (Stand 2021). Für das Pyrolyse-Verfahren sind 99 Unternehmen gelistet, für die Gasifizierung 28 und für die Verölung 17. „Chemisches Recycling“ mittels Solvolyse wird von 18 Firmen angeboten, für weitere Technologien (hydrothermale Verflüssigung/hydrothermal liquefaction HTL und Plasmabasiertes „chemisches Recycling“) stehen 12 Unternehmen. Diese Verfahren haben jedoch nur Nischen- bzw. Forschungsrelevanz und spielen daher in diesem Hintergrund keine Rolle.

Heute mischen sich unter euphorische Prognosen (siehe Kapitel 7) auch Berichte über den Rückzug von Global Playern aus dem „chemischen Recycling“, sei es grundsätzlich oder aber aus bereits geplanten Standorten.

### 3. Gesetzliche Aspekte

Das „chemische Recycling“ steht am Beginn seiner Entwicklung und daher ist es weder in Deutschland, der EU noch global in Gesetzen geregelt. Es taucht in der Diskussion über Abfallhierarchie, Recyclingdefinitionen und Rezyklatquoten auf und ist eng verknüpft mit der Anerkennung von Massenbilanzverfahren. Im Rahmen der Verpackungs- und Abfallgesetzgebung werden Produkte und Prozesse des „chemischen Recyclings“ zunehmend relevant, wobei diese unter Beobachtung im Rahmen von REACH (eine EU-Chemikalienverordnung) und Produktsicherheitsvorgaben stehen.

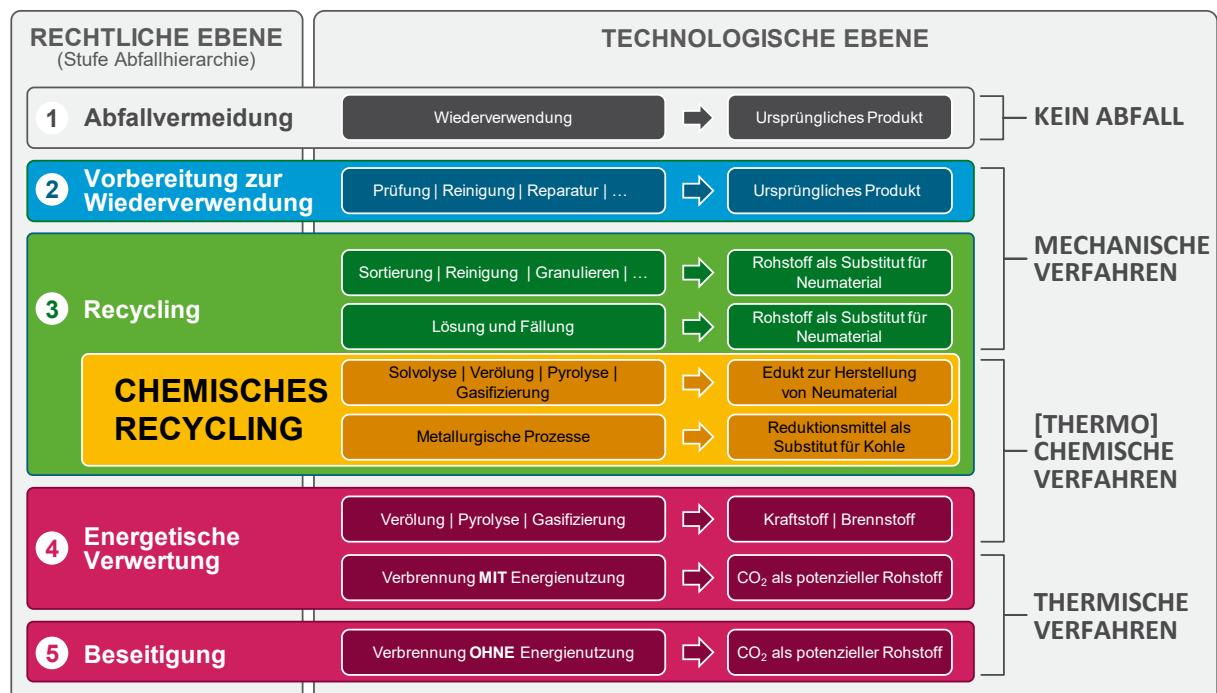
#### 3.1 Abfall

Die Ausgangsprodukte für jegliches Recycling sind zunächst schlichtweg Abfall, sei es aus Produktionsabfällen, getrennten Sammlungen oder aber aus haushaltsnahen Quellen; letzteres bezeichnet als „Post-Consumer“-Abfall.

Die **EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG** (AbfRRL) enthält die etablierte Abfallhierarchie, also die Rangfolge von Maßnahmen zur Abfallvermeidung und -bewirtschaftung. Aktuell ist

noch zu klären, in welche Kategorie das „chemische Recycling“ einzuordnen ist. Dies ist u.a. Ziel des CDU-SPD-Koalitionsvertrages von 2025 (CDU & SPD 2025). Eine beispielhafte Darstellung wurde in (Quicker & Seitz 2024) erarbeitet, Bild 2. Dieses Schaubild zeigt, wie sich das „chemische Recycling“ rechtlich-technisch entsprechend der europäischen Abfallhierarchie und auch hinsichtlich einer technischen Ebene einordnen lässt. Werden Produkte aus Verölung, Pyrolyse oder Gasifizierung zur Herstellung von Kraft- oder Brennstoffen verwendet, so wird dies hier nicht als Recycling, sondern als energetische Verwertung gewertet.

Das „chemische Recycling“ sollte aus Sicht des BUND in der Abfallhierarchie hinter Vermeidung, Wiederverwendung und werkstofflichem Recycling an vierter Stelle eingefügt werden. Es ist dem werkstofflichen Recycling nicht gleichzusetzen, da es sowohl energetisch als auch in Bezug auf Ressourcenschonung und CO<sub>2</sub>-Emissionen nachteilig ist (Quicker & Seitz 2024).



**Bild 2:** Rechtlich-technische Einordnung der Verwertung von Kunststoffabfällen mit Verortung des „chemischen Recyclings“ (Quicker & Seitz 2024)

3.2 Kreislaufwirtschaft

Im **nationalen Kreislaufwirtschaftsgesetz** KrWG § 3, (wortgleich zur europäischen Abfallrahmenrichtlinie) wird Recycling definiert als „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden“. Dabei sind die energetische Verwertung sowie die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Kraft- oder Brennstoff bestimmt sind, ausgeschlossen.

Da der weitaus größte Teil des Recyclings Kunststoffverpackungen betrifft – bei „Post-Consumer“-Abfall sind es knapp 60 % (Vogel 2025) –, werden nachfolgend vor allem rechtliche Aspekte aus dem Verpackungssektor betrachtet. Im Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (Europäische Kommission 2020) sowie in der 2024 beschlossenen europäischen Verpackungsverordnung (Packaging and Packaging Waste Regulation PPWR) wurde das Ziel festgelegt, dass bis 2030 alle Verpackungen in wirtschaftlich tragfähiger Weise recyclingfähig sein sollen.

Das **Verpackungsgesetz** von 2019 (VerpackG) setzt die europäische **Verpackungsrichtlinie 94/62/EG** in deutsches Recht um. Zusammen mit der **Änderungsrichtlinie EU 2018/852** gibt es konkrete Recyclingquoten vor.

Das VerpackG sieht seit 2025 einen Rezyklatanteil für PET-Einweg-Getränkeflaschen von mindestens 25 Prozent vor; für sämtliche Kunststoff-

Einweg-Getränkeflaschen gilt ab 2030 ein Mindestanteil von 30 %, diese werden bei weitem überschritten.

2025 ist die **EU-Verpackungsordnung PPWR** (Packaging and Packaging Waste Regulation) in Kraft getreten, deren Recyclingvorgaben für „Post-Consumer“-Kunststoffabfälle nun gelten, siehe Tabelle 1.

Lebensmittelkontaktmaterialien, die recycelten Kunststoff enthalten, müssen die Anforderungen der **Verordnungen (EU) 2022/1616** sowie **(EG) 1935/2004** erfüllen. Die (EU) 2022/1616 legt Anforderungen an die Sicherheit, Rückverfolgbarkeit und Genehmigung von Recyclingverfahren fest, um sicherzustellen, dass recycelte Kunststoffe in Lebensmittelkontaktmaterialien gesundheitlich unbedenklich sind. Während z.B. das werkstoffliche Recycling von PET hier bereits eine etablierte Technologie darstellt, gilt das „chemische Recycling“ als „novel technology“, die zunächst unter Realbedingungen von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) zu prüfen ist.

**Einwegkunststoffrichtlinie und Massenbilanzierung**

Die **Einwegkunststoffrichtlinie** (SUPD; Single-Use Plastics Directive **(EU) 2019/904**), hat zum Ziel, Einwegkunststoff zu reduzieren und die Kreislaufwirtschaft zu fördern. Ausgangspunkt dieser Richtlinie waren die Kunststoffverschmutzungen an den europäischen Küsten – doch

|         | PET* | Nicht-PET** | Einweg-Getränkeflaschen | Andere Verpackungen |
|---------|------|-------------|-------------------------|---------------------|
| Ab 2030 | 30   | 10          | 30                      | 35                  |
| Ab 2040 | 50   | 25          | 65                      | 65                  |

**Tabelle 1:** Mindestrezyklatanteile in % für Verpackungen aus der Verwertung von „Post-Consumer“-Kunststoffabfällen nach europäischer Verpackungsverordnung (PPWR)

\*PET: kontaktempfindliche Verpackungen mit Polyethylenterephthalat (PET) als Hauptbestandteil, ausgenommen Einweggetränkeflaschen  
\*\* Nicht-PET: kontaktempfindliche Verpackungen aus anderen Kunststoffmaterialien als PET, ausgenommen Einweggetränkeflaschen

inzwischen verfolgt die Richtlinie deutlich weitergehende Themen aus dem Bereich Einwegkunststoff. Die im Text verzeichneten Recyclingquoten bleiben bis 2030 in Kraft; spätere Regulierungen werden durch die PPWR erfolgen.

Die SUPD selbst regelt das „chemische Recycling“ nicht direkt. Durchführungsrechtsakte, die die SUPD ergänzen bzw. aktualisieren, führten 2025 jedoch erstmals die Methode der Massenbilanzierung für die Kalkulation des Recyclinganteils bei „chemischem Recycling“ ein. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Bilanzverfahren des „Fuel Use Exempt“ sowie „Dual Use“, die in Kapitel 6 näher erläutert sind.

Dieser neue Durchführungsrechtsakt zur Massenbilanzierung stellt die Grundlage dar, auf die sich andere Gesetze beziehen werden. Es wird damit ein Präzedenzfall geschaffen, aufgrund dessen in zukünftiger Rechtsprechung die Massenbilanzierung in der dort beschriebenen Form als allgemein akzeptiert angesehen werden kann. Diese Art der Nachverfolgung wird in Zukunft wahrscheinlich nicht nur Verpackungen, sondern auch weitere Produkte und Sektoren betreffen.

### 3.3 Gefahrstoffe

Da durch die Verfahren des „chemischen Recyclings“ zum Teil Gefahrstoffe aus Abfällen weiterverarbeitet werden, jedoch auch neue Gefahrstoffe entstehen, hat die entsprechende Gesetzgebung eine besondere Relevanz. Nachfolgend sind exemplarisch ausgewählte Vorschriften dargestellt.

#### Persistent Organic Pollutants (POP)

Persistente organische Schadstoffe (POPs) sind organische Verbindungen, die in chemischen Recyclingprozessen entstehen können. Sie werden sehr langsam abgebaut und können sich in der Umwelt, in Lebewesen und in der Nahrungskette anreichern. Vielfache schädliche Auswirkungen sind inzwischen dokumentiert.

Die **EU-POP-Verordnung (EU 2019/1021)** enthält klare Anforderungen an Recycling und Abfallmanagement im Zusammenhang mit persistenten organischen Schadstoffen. Dieser Gesetzestext ist insbesondere bei der Betrachtung von Pyrolyseölen aus dem „chemischen Recycling“ relevant, siehe Kapitel 5.2.2.

Laut der Europäischen Chemikalienagentur ist „chemisches Recycling“ ein sich entwickelndes Verfahren mit komplexen Ausgangsstoffen (ECHA 2021). Daher ist im Rahmen von REACH die Sicherheitsbewertung von Zwischen- und Endprodukten zwingend – was auch die Frage von POP-Verunreinigungen einschließt. Konkret müssen im „chemischen Recycling“ letztlich nicht-recycelte oder neu entstandene Substanzen gemäß REACH geprüft werden – einschließlich etwaiger Kontaminanten oder Rückstände. Damit erkennt ECHA an, dass im „chemischen Recycling“ neuartige Kontaminationserscheinungen auftreten können, einschließlich potenzieller POP-Kontaminationen.

### 3.4 Standardisierung und Normung

Die globalen Wirtschaftsunternehmen haben ein erhebliches Interesse daran, das „chemische Recycling“ in der Wertschöpfungskette von Kunststoffen zu etablieren. Entsprechende Normentwürfe sind schon weit fortgeschritten, wie z.B. die ISO/DIS 15270-4 „Plastics – Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste – part 4: chemical recycling“.

Da beispielsweise die Europäische Kommission in ihren Richtlinien grundlegende Anforderungen festlegen kann, die auf europäische bzw. internationale Normen verweisen, können diese Standards die zukünftige rechtliche Grundlage für das Wirtschaften im Bereich des „chemischen Recyclings“ bedeuten.

### 3.5 Weitere Vorschriften

Auch bei der EU-Plastikstrategie, Chemikalienstrategie, Textilienstrategie, Kreislaufwirtschaftsstrategie sowie der deutschen Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie und den globalen Plastikabkommen spielt das „chemische Recycling“ eine Rolle, die an dieser Stelle nicht ausgeführt wird.

Die neue Ökodesign-Verordnung (ESPR) bezieht Materialkreisläufe stärker ein, die Erweiterte Herstellerverantwortung (EPR) könnte „chemisches Recycling“ indirekt in Zukunft fördern oder fordern, z.B. über Produktdesign-Anforderungen.

## 4. Die Verfahren im Detail

Nachfolgend werden die wichtigsten Verfahren des „chemischen Recyclings“ vorgestellt. Am stärksten im Fokus der Diskussion sind die Verfahren der **Pyrolyse**. Grund dafür ist, dass diese aus Sicht vieler Stakeholder die Probleme lösen soll, die die enormen Mengen an Verpackungsabfällen bereiten. Zudem kann das Pyrolyseöl in den chemischen Anlagen prinzipiell als Naphtha-Ersatz dienen, ohne dass die Infrastruktur kostenintensiv umgebaut werden muss. Daher steht die Pyrolyse auch im Rahmen dieses Hintergrundpapiers thematisch im Vordergrund.

### 4.1 Thermolyse/Thermische Depolymerisation

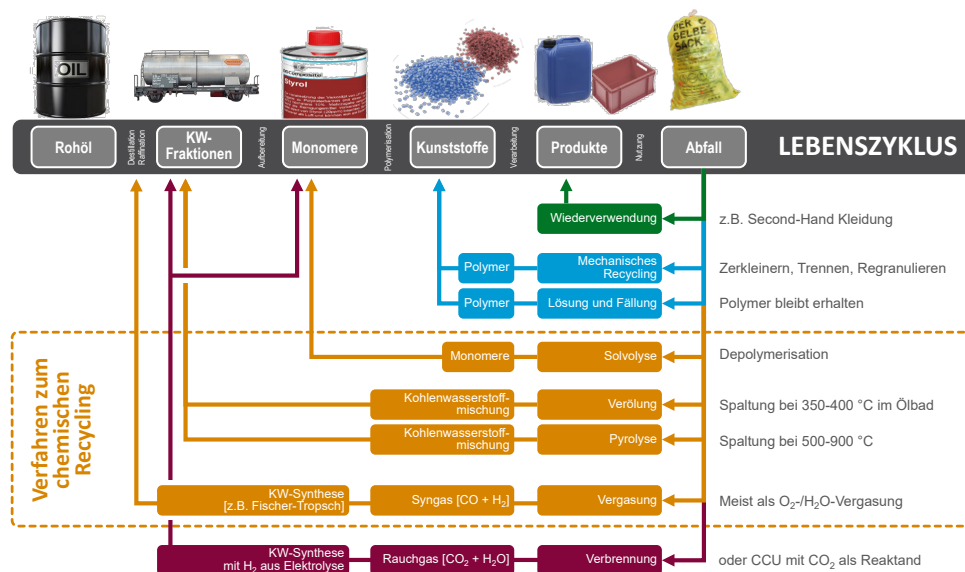
Die bekanntesten Verfahren der Thermischen Depolymerisation sind Pyrolyse und Gasifizierung. Die weiteren Methoden Verölung und hydrothermale Depolymerisation arbeiten unter zusätzlicher Zuhilfenahme weiterer chemischer Substanzen und können somit auch als thermochemische Depolymerisation bezeichnet werden.

**Pyrolyse und Verölung** erzeugen im wesentlichen Öle, die zu Chemierohstoffen weiterverarbeitet werden sollen. Weitere Produkte wie Gase und schwersiedende Rückstände, z.B. Wachse,

lassen sich zudem durch geeignete Verfahren veredeln. Als Abfallprodukte entstehen Abgase, Teer, Koks und Asche, die teilweise noch thermisch genutzt werden können.

Die **Gasifizierung** findet bei vergleichsweise höheren Temperaturen statt, wobei das Polymer in eine Gasmischung aufgespalten wird, die man als Synthesegas (Syngas) bezeichnet.

Bild 3 veranschaulicht, welchem Schritt der Wertschöpfungskette die Produkte dieser thermochemischen Konversionsverfahren zugeführt werden: Es entstehen Kohlenwasserstoffmischungen (Pyrolyse, Verölung), die, nach Weiterverarbeitung im Steamcracker (Spaltanlage für Herstellung von Chemie- und Kunststoffgrundbausteinen mit hohem Energieverbrauch), vor allem als Ausgangsprodukte für Monomere für die Kunststoffindustrie dienen. Aus der im Gasifizierungsverfahren resultierenden Gasmischung (Syngas) werden entsprechende Kohlenwasserstoffe oder Monomere durch Synthese hergestellt.



**Bild 3:** Thermochemische Konversionsverfahren des „chemischen Recyclings“ mit Prozesskette der Aufbereitung und Nachbehandlung (Quicker & Seitz 2024)

#### 4.1.1 Pyrolyse

Bei der Pyrolyse werden Kunststoffe bei Temperaturen von  $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis ca.  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , häufig um  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , in inerte (reaktionsträger) Atmosphäre depolymerisiert. Daraus resultiert eine breite Verteilung fester, flüssiger und gasförmiger Produkte – je nach Eingangsmaterial, Prozessbedingungen und spezifischer Technologie.

##### Prozess

Die nachfolgende Schemazeichnung stellt den Prozess der Pyrolyse exemplarisch anhand einer Anlage im Labormaßstab dar (Zeller et al. 2021). Unter Stickstoff werden hier die vorbehandelten Abfälle sowie Additive und Quarzsand als Trägermaterial zugegeben. Im Pyrolysereaktor wird die Masse erhitzt und zersetzt, wobei die Feststoffe wie Koks mit dem Sand abgeschieden werden. Die entstehenden Gase werden Kondensations-einheiten zugeführt, woraus Öle und Wachse für die chemische Industrie resultieren. Das Pyrolysegas wird aufgefangen und kann rohstofflich oder ggfs. auch zur Beheizung der Anlage verwertet werden.

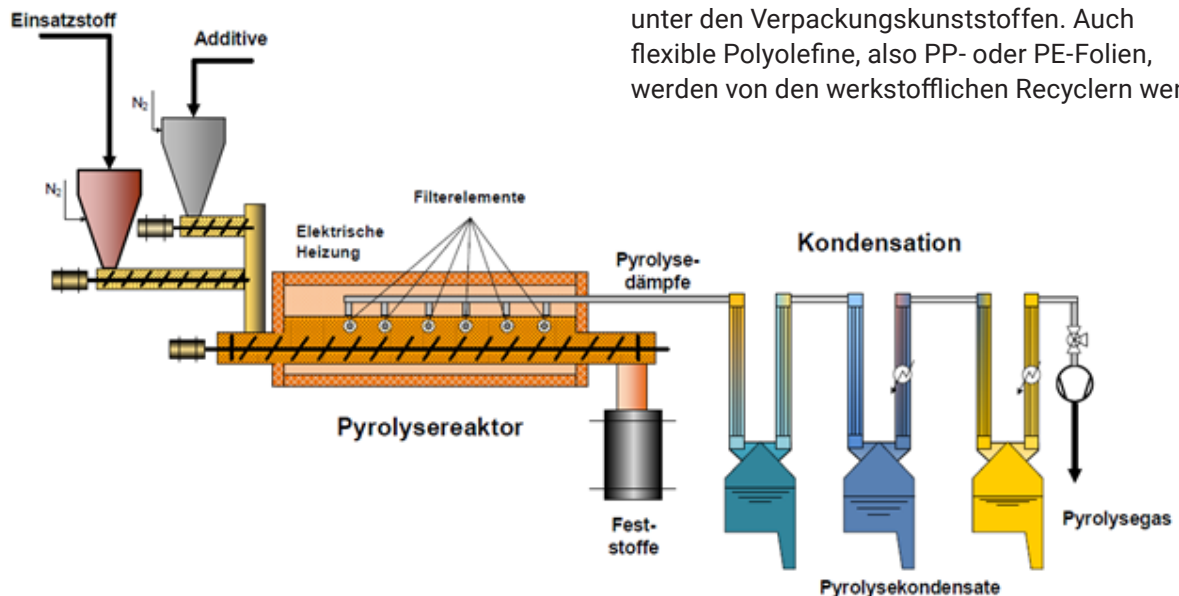
##### Produkt

Das **Pyrolyseöl**, eine Mischung flüssiger Kohlenwasserstoffe, ist das Produkt, das prinzipiell zu Polymeren weiterverarbeitet werden kann. Analog zu dem fossilen Naphtha, das eine

Fraktion der herkömmlichen Rohöldestillation darstellt, soll das Pyrolyseöl im **Steamcracker** unter Wasserdampfbzusatz in kürzerkettige Kohlenwasserstoffe wie Ethen oder Propen gespalten werden, die dann als Ausgangssubstanzen für die Polymerproduktion dienen. Allerdings ist das Pyrolyseöl anders zusammengesetzt als herkömmliches Naphtha; es ist eine Mischung sehr vieler Substanzen. Neben den erwünschten Spaltprodukten der Polymere werden während der Pyrolyse durch Radikalreaktion viele chemische Verbindungen neu gebildet. Daraus und auch durch Verunreinigungen aus dem ursprünglichen Abfallstrom ist die Weiterverarbeitung erschwert, und es resultieren toxikologische Probleme (Rollinson 2023). Diese Sachverhalte werden in Kapitel 5 ausführlich erläutert.

##### Eingangsmaterialien

Für die Pyrolyse eignen sich thermoplastische Kunststoffabfälle, und zwar vor allem die **Polyolefine**, PE und PP. Aus Rohstoffperspektive ist einer der Vorteile der Pyrolyse, dass in diesem Prozess Mischungen aus Polyethylen und Polypropylen in unterschiedlichen Anteilen verwertet werden können. Diese sogenannten **Mischpolyolefine (MPO)** sind aufgrund ihrer gegenseitigen Unverträglichkeit nur bedingt für ein hochwertiges – mechanisches Recycling geeignet; entsprechende Abfälle werden häufig verbrannt. MPOs finden sich in großer Menge unter den Verpackungskunststoffen. Auch flexible Polyolefine, also PP- oder PE-Folien, werden von den werkstofflichen Recyclern wenig



**Bild 4:** Pyrolyse-Anlage im Labormaßstab: Trog-schnecken-Pyrolysereaktor mit Aufgabesystem, Heißgasfiltration und gestufter Kondensation der Pyrolysedämpfe (öliges und wässriges Kondensat) (Zeller et al. 2021)

nachgefragt. Dies liegt vor allem an den hohen Verunreinigungen im „Post-Consumer“-Segment sowie an der Sortierproblematik von Folien in herkömmlichen Aufbereitungsprozessen (Gendell & Lahme 2022). Auch **Mischkunststoffe (MKS)**, die neben Polyolefinen vor allem noch PET (Polyethylenterephthalat) und PS (Polystyrol) enthalten, werden in der Pyrolyse erprobt.

Als weitere Abfallfraktionen für die Pyrolyse kommen **Polystyrol**, beispielsweise aus geschäumten Dämmplatten oder Kühlschranksisolierungen, sowie **PMMA** (Polymethylmethacrylat) in Frage. Auch für **Altreifen** gibt es Methoden zum Recycling mittels Pyrolyse (Maga et al. 2023).

Thermoplastische Kunststoffe mit Heteroatomen wie PA, PET und PU(R) sind der Pyrolyse nicht oder nur bedingt zugänglich. Auch Multi-Material-Filme mit Barrierschichten (d.h. Anteilen von PA, EVOH, PET) können nicht mittels herkömmlicher Pyrolyse recycelt werden. Extrem kritisch sind chlorhaltige Kunststoffe wie beispielsweise Polyvinylchlorid, das sich beispielsweise in Fensterprofilen oder Bodenbelägen findet.

In der Regel erfordert auch der Pyrolyseprozess, abweichend von der häufig kommunizierten Meinung, saubere Abfallströme. Der Einfluss von Verunreinigungen ist häufig ähnlich wie beim werkstofflichem Recycling (Gendell & Lahme 2022). Die dargestellte Infobox zeigt beispielhaft Anforderungen an ein Eingangsmaterial für die Pyrolyse.

Unter einem „**Modellrohstoff**“ für die Pyrolyse lässt sich beispielsweise folgendes Ausgangsmaterial verstehen (Gendell & Lahme 2022)

- Minimum 85 % PE oder PP
  - Maximaler Feuchtegehalt: 7 %
  - Maximaler Gehalt an Verunreinigungen: 15 %.
- Innerhalb dessen gelten folgende spezifische Obergrenzen:
- PVC / PVDC (Polyvinylchlorid/ Polyvinylidenchlorid): 1 %
  - PET / EVOH (Ethylen-Vinyl-Copolymer)/PA: 5 %
  - PS: 7 %
  - Metall/Glas/Schmutz/Feinanteile: 7 %
  - Papier/organische Reste: 10 %.

### Industrielle Umsetzung

Die nachfolgende Tabelle gibt Auskunft über Unternehmen, die das Verfahren der Pyrolyse kommerziell durchführen. Für die Firmen Arcus und Quantafuel sind in (Quicker & Seitz 2024) Verfahrenssteckbriefe hinterlegt.

Neben diesen Beispielen gibt es jedoch auch ambitionierte Projekte, die inzwischen eingestellt wurden, wie z.B. die Pläne von Shell, jährlich 1 Million t Kunststoffabfall mit Hilfe der Pyrolyse zu verwerten (Euwid 2024).

| Unternehmen                               | Standort                | Kapazität                                   | Input                                            | Maßgeblicher Output |
|-------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Arcus</b><br>(arcus-green-cycling.com) | Frankfurt-Hoechst, D    | 4.000 jato*<br>(Pilotanlage)                | Misch-Polyolefine (MPO-Flex), auch ABS, PET, PVC | Pyrolyseöl          |
| <b>Quantafuel</b><br>(carboliq.com)       | Skive, DK               | 20.000 jato*                                | Mischkunststoffe                                 | Pyrolyseöl          |
| <b>Pyrum</b><br>(pyrum.net)               | 3 Werke in Dillingen, D | (Reifen-durchsatz):<br>18.500 t<br>jährlich | LKW- und PKW-Reifen                              | Carbon Black        |

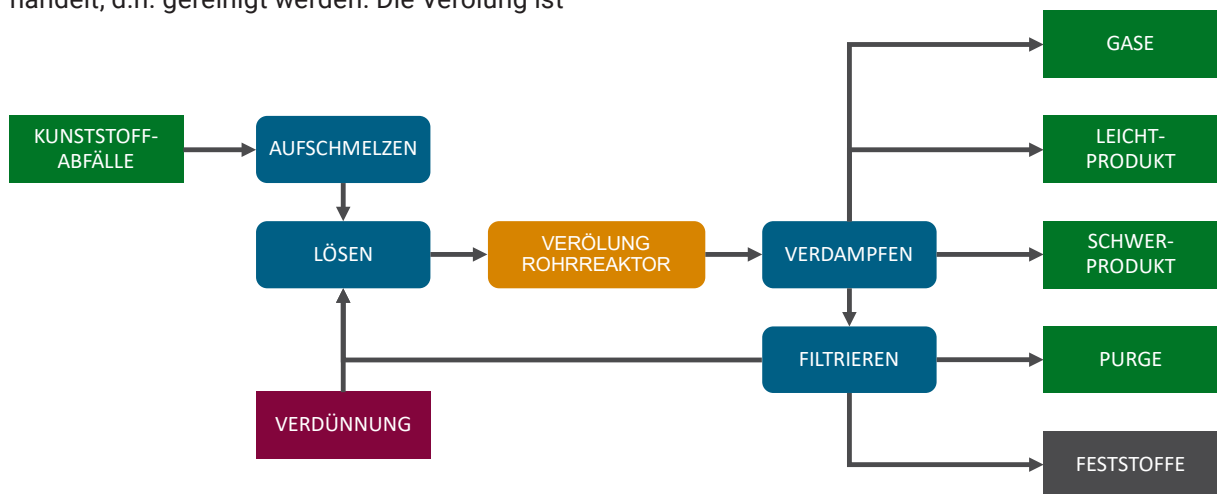
**Tabelle 2:** Ausgewählte Unternehmen (nach Quicker & Seitz 2024), die „chemisches Recycling“ mittels Pyrolyse durchführen, sowie Reifenrecycling. Angaben über Kapazitäten aus den jeweiligen Internetauftritten; \* jato = Tausend Tonnen jährlich.

#### 4.1.2 Verölung

Bei der **Verölung** wird unter Zuhilfenahme eines Startöls („Verdünnung“) gearbeitet. Die Kunststoffabfälle werden direkt thermisch oder katalytisch, bei Temperaturen zwischen 250 und 420 °C und damit unter vergleichsweise niedrigem Energieaufwand, in einem Reaktor zersetzt. Hauptprodukt ist ein flüssiges Kohlenwasserstoffgemisch, welches eine Vielzahl unterschiedlicher chemischer Verbindungen enthält. Weitere Produkte der Verölung sind Gas, Koks und ein wässriger Rest. Aufgrund von Verunreinigungen müssen alle produzierten Substanzen nachbehandelt, d.h. gereinigt werden. Die Verölung ist

relativ tolerant gegenüber den Einsatzstoffen, sofern ihre Zusammensetzung bekannt ist und der Prozess entsprechend auf diese ausgerichtet werden kann.

In Laborversuchen zur Verölung an verschiedenen Abfallfraktionen zeigte sich ein großer Einfluss der Art des Abfallstroms. Während aus realen Mischkunststoff (MKS)-Fraktionen Ölanteile von knapp 60 % im Produktspektrum resultierten, lag dieser Wert für Kühlgeräte-Abfall („Elektroschrott“) unter 30 % (Quicker & Seitz 2024).



**Bild 5:** Schema der Verölung von Kunststoffabfällen (Quicker & Seitz 2024)

#### Industrielle Umsetzung

Die nachfolgende Tabelle gibt Auskunft über Unternehmen, die das Verfahren der Verölung kommerziell durchführen. Für die genannten Firmen sind in (Quicker & Seitz 2024) Verfahrenssteckbriefe hinterlegt.

| Unternehmen                                 | Standort                                          | Kapazität                                        | Input                                                               |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>PlasticEnergy</b><br>(plasticenergy.com) | Liefert Anlagen;<br>mehrere Standorte<br>weltweit | diverse Anlagen mit je<br>mindestens 25.000 jato | (bei Sabic, Geleen-<br>Niederlande): Post-<br>Consumer-Sortierreste |
| <b>OMV</b><br>(omv.com)                     | Schwechat, AT                                     | 16.000 jato                                      | Verpackungskunststoffe:<br>Polyolefine, Polystyrol                  |
| <b>Carboliq</b><br>(carboliq.com)           | Ennigerloh, D                                     | 25.000 jato                                      | Mischkunststoffe, auch<br>mit PA und PET                            |

**Tabelle 3:** Ausgewählte Unternehmen (nach Quicker & Seitz 2024), die „chemisches Recycling“ mittels Verölung durchführen  
Angaben über Kapazitäten aus den jeweiligen Internetauftritten

#### 4.1.3 Hydrothermale Depolymerisation

Bei der hydrothermalen Depolymerisation werden Kunststoffabfälle unter Zusatz von überkritischem Wasser und einem Katalysator zu ähnlichen Produkten wie in der Pyrolyse gespalten – Naphtha, leichtes Öl, industrielle Wachse und Bitumen. Diesem Reaktionsprinzip sind womöglich mehr polymere Reststoffe zugänglich als der Pyrolyse.

#### Industrielle Umsetzung

Das britische Unternehmen Mura und der US-Chemiekonzern Dow planten für 2025 eine Anlage mit 20.000 t/a in Nordengland (Mura 2025), kamen jedoch nicht voran (Höhne 2024). Ein im sächsischen Böhlen anvisierter Unternehmensstandort – wurde 2025 verworfen (Storck 2025).

#### 4.1.4 Gasifizierung

Allgemein findet die **Gasifizierung** bei höheren Temperaturen als die Pyrolyse statt, in der Regel bei 700 bis 1.500 °C, wobei der aufbereitete Polymerabfall unter partieller Oxidation (wenig Sauerstoff) in eine gasförmige Mischung von Kohlendioxid  $\text{CO}_2$ , Kohlenmonoxid  $\text{CO}$ , Wasserstoff  $\text{H}_2$ , Methan  $\text{CH}_4$ , Wasser und andere leichte Kohlenwasserstoffe aufgespalten wird. Diese Mischung bezeichnet man als Synthesegas oder auch **Syngas**.

Anders als in vielen anderen Teilen der Welt spielt die Gasifizierung von Abfällen in Japan aufgrund dessen spezieller energiepolitischer Situation bereits seit Jahrzehnten eine große Rolle. Die Gasifizierung von Kunststoffen wird derzeit – und bereits seit ca. 20 Jahren – japanweit offenbar nur in einer Anlage betrieben, und zwar von Showa Denko in Kawasaki City (KPR – Kawasaki Plastics Recycling). Im Januar 2022 hatte die Anlage insgesamt 1 Million t Kunststoffabfall verwertet.

Das zugrundeliegende **EUP-Verfahren** verwendet unter Zugabe von Sauerstoff und Dampf zwei druckbetriebene Gasifizierer, der erste („Ebaras fluidized bed gasification“) bei 600 – 800 °C, der zweite bei 1.300 – 1.500 °C (**Ube-Prozess**), Bild 6. Dadurch ist das Verfahren tolerant gegenüber verschiedenen Kunststoffsorten und auch Verunreinigungen. Aufgrund der sehr hohen Temperaturen entsteht, anders als bei der

Pyrolyse, kein Dioxin. Die entstehenden Gase **Wasserstoff und CO** werden bei Showa Denko v.a. zu **Ammoniak** weiterverarbeitet. Die Schlacke kann in der Industrie (z.B. Zement) weiterverwertet werden (Ebara o.J.).

#### Studien zur Gasifizierung

Publizierte Erfahrungen zur Gasifizierung sind rar. Eine vergleichende Ökobilanz der Gasifizierung polymerer Abfälle ist in (Shan et al. 2023) im Vergleich zum werkstofflichen Recycling dargestellt. In mehreren Kategorien ist letzteres deutlich überlegen: Das Treibhauspotenzial (GWP, global warming potential) beträgt bei der Gasifizierung das Dreifache, und dies auch nur aufgrund der Tatsache, dass vom Prozess selbst 0,7 kWh pro kg Kunststoffabfall-Input an Energie wiederverwendet werden können. Bei der Bodenversauerung liegt die Gasifizierung um den Faktor 3,33 höher. In der Kategorie Wassermangel (WCP, water scarcity potential), hat die Gasifizierung sogar einen zehnfach höheren Einfluss als beim werkstofflichen Recycling.

In (Quicker & Seitz 2024) wurde zur Bewertung der Gasifizierung auf historisches Material aus dem Betrieb der einzigen in Deutschland jemals existenten Anlage zum Kunststoffrecycling, der SVZ Schwarze Pumpe, zurückgegriffen. Daraus und mit Hilfe einer Marktrecherche wurde ein eigenes Bewertungskonzept zur Gasifizierung von Kunststoffabfällen entwickelt.

Laut allgemeiner Einschätzung ist die Gasifizierung sehr energieintensiv und nur in sehr großen Anlagen rentabel, also kaum dezentral nutzbar. Von Expert/innen wird eine Umsetzung der Gasifizierung in Europa als unwahrscheinlich erachtet (Quicker & Seitz 2024).

#### Industrielle Umsetzung

Die nachfolgende Tabelle gibt Auskunft über Unternehmen, die das Verfahren der Gasifizierung kommerziell durchführen; für sie sind in (Quicker & Seitz 2024) Verfahrenssteckbriefe hinterlegt. Der Ebara-Prozess wurde bereits im vorstehenden Text dargestellt.

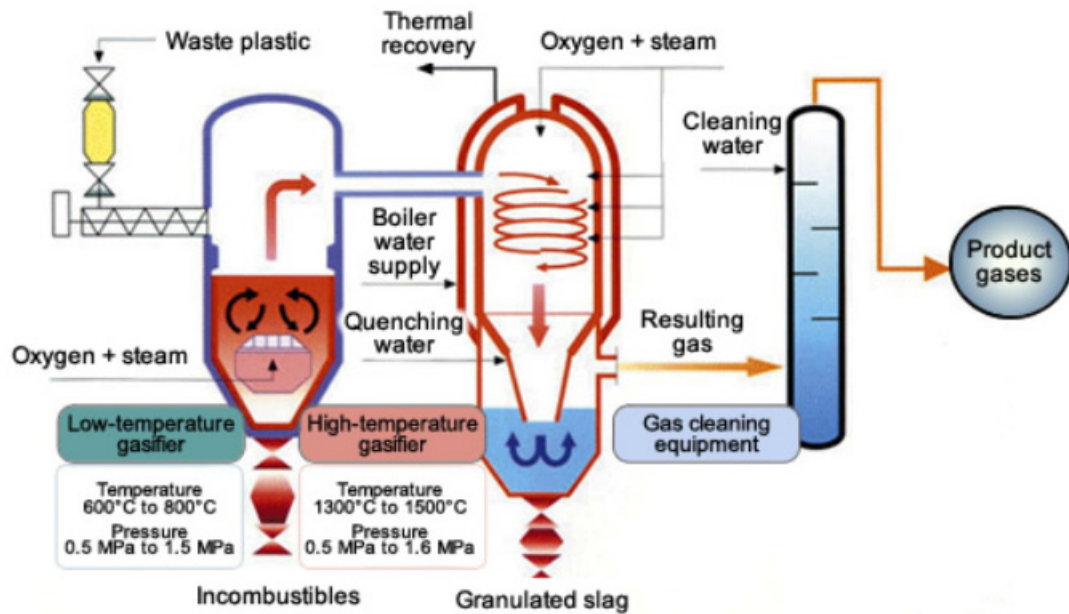


Bild 6: Zweistufiger Ebara-Ube-Prozess (EUP) zur Gasifizierung von Kunststoffabfällen (Ebara o.J.)

| Unternehmen              | Standort     | Kapazität   | Input                      | Output   |
|--------------------------|--------------|-------------|----------------------------|----------|
| Ebara<br>(eep.ebara.com) | Tokio, J     | 60.000 jato | Mischkunststoffe           | Ammoniak |
| Enerkem<br>(enerkem.com) | Montreal, CA | k. A.       | Ersatzbrennstoffe,<br>Holz | Methanol |

Tabelle 4: Ausgewählte Unternehmen (nach Quicker & Seitz 2024), die „chemisches Recycling“ mittels Gasifizierung durchführen  
Angaben über Kapazitäten aus den jeweiligen Internetauftritten

#### 4.2 Solvolyse/Chemische Depolymerisation

Während die Pyrolyse von Kunststoffabfällen praktisch ohne Zusatzstoffe betrieben wird, finden bei diesen Depolymerisationsprozessen chemische Reaktionen mit Lösungsmitteln oder anderen Reaktanden statt.

Die **Solvolyse** wird in erster Linie bei sogenannten Kondensationspolymeren angewendet (Maisels et al. 2021). Sie tragen meist mit Heteroatome (Atome wie Stickstoff, Sauerstoff oder

Schwefel) in der ansonsten aus Kohlenwasserstoffen (Kohlenstoff- plus Wasserstoffatomen) bestehenden Molekülkette. Die wichtigsten Vertreter sind Polyurethan (PU(R)), Polyethylenterephthalat (PET) und Polyamid (PA). Für die Solvolyse werden angepasste Lösungs- bzw. Reaktionsmittel eingesetzt, woraus die verschiedenen Bezeichnungen für die jeweiligen Prozesse resultieren, z.B.: Glycolyse – Ethylenglykol, Aminolyse – Ethylenamin, Methanolyse – Methanol, Hydrolyse – Wasser. Durch die Lösungs-

bzw. Reaktionsmittel werden die Bindungen zwischen den Monomeren im Polymer gelöst, so dass letztere wieder „Schritt für Schritt“ zu **Monomeren** oder auch Oligomeren rückgebaut werden.

Die Solvolyse von PU wird beispielsweise bei Matratzen- und Polsterschäumen angewendet; es resultieren Polyole, die wieder polymerisiert werden können. Einsatzstoffe für die Solvolyse von PET sind meist Verpackungsmaterialien aus der Lebensmittelindustrie sowie Fasern. Endprodukte sind monomere Verbindungen wie Phthalsäure, Phthalate und Ethylenglycol. Für beide Polymergruppen, PU und PET, kommen meist die Glycolyse oder Methanolyse zum Einsatz. PA aus technischen sowie textilen Anwendungen und Fischernetzen kann z.B. über Aminolyse recycelt werden (Maisels et al. 2021).

**Industrielle Umsetzung**

Noch existieren keine großen kommerziellen Anlagen für die Solvolyse von Kunststoffabfällen. Die nachfolgende Tabelle listet einige geplante Aktivitäten auf.

**Studien zur Solvolyse**

In Garcia-Gutierrez et al. 2023 wurden im Auftrag der Europäischen Kommission verschiedene Arten des Recyclings (werkstofflich/mechanisch, physikalisch, CR mittels Pyrolyse und Solvolyse)

unter Zuhilfenahme von vergleichenden Ökobilanz-Methoden miteinander verglichen. Die Daten stammen aus Befragungen von Industrieunternehmen sowie aus der Literatur. Unter den 14 ausgewählten Impact-Kategorien werden Klimawandel, Versauerung, Verbrauch fossiler Rohstoffe und Feinstaub prioritär betrachtet. Für die Berechnung erforderlicher Energien wird der derzeitige europäische Energiemix zugrunde gelegt. Es werden drei Methoden der Solvolyse („partial glycolysis“, „hydrolysis-methanolysis“, „alkaline hydrolysis“) mit dem werkstofflichen/mechanischen Recycling sowie mit der Verbrennung verglichen. Wie in vielen anderen Studien werden in dieser vergleichenden Ökobilanz diverse Gutschriften berücksichtigt, beispielsweise der Ersatz von Neuware durch Rezyklat oder aber Substitution von Energie. Insgesamt gibt es keine klare Tendenz, in etlichen Kategorien (Klimawandel und sogar „resource use, fossils“) schneidet jedoch das werkstoffliche/mechanische Recycling am besten ab.

Eine US-amerikanischere vergleichende Ökobilanz zu PET (Uekert et al. 2023) kommt ebenfalls zu dem Schluss, dass das werkstoffliche/mechanische Recycling ökologische Vorteile gegenüber den verschiedenen untersuchten Solvolysemethoden besitzt, wenngleich das entsprechende Rezyklat schlechtere Materialeigenschaften aufweist.

| Unternehmen                       | Standort     | Input                                                         | Output                                                    |
|-----------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Envint</b><br>(envint.de)      | Bad Grund, D | Epoxidharze                                                   | Bisphenol,<br>Epichlorhydrin                              |
| <b>Evonik</b><br>(evonik.com)     | Marl, D      | PU-Schäume<br>(Matratzen)                                     | Polyole, Amine                                            |
| <b>Rampf</b><br>(rampf-group.com) | Pirmasens, D | PU-Schäume<br>„Post-Consumer“-<br>PET, und Bio-Poly-<br>ester | Polyole, Amine,<br>Terephthalsäure,<br>Ethylenglykol u.a. |

**Tabelle 5:** Ausgewählte Unternehmen, die „chemisches Recycling“ mittels Solvolyse planen

## 5. Pyrolyse – Probleme, Ökobilanzen, Kritik

Das am meiste diskutierte Verfahren des „chemischen Recyclings“ soll auch bezüglich seiner Problematik hier im Fokus stehen. Während kritische Aspekte der anderen vorgestellten Recyclingmethoden in den Einzelabschnitten unter Kapitel 4 jeweils kurz abgehandelt wurden, widmet sich das vorliegende Kapitel intensiv den Problemen der Pyrolyse. Dabei stehen Erkenntnisse aus einer Auswahl deutscher und europäischer Studien im Vordergrund.

### 5.1 Kunststoffe im Pyrolyseprozess

Kunststoffe sind keine sonderlich geeigneten Inputmaterialien für den Pyrolyseprozess. Das liegt am physikalischen Verhalten der **Kunststoffschmelze**: Das Material schmilzt bei der Pyrolyse aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit nicht homogen auf und erschwert so den Wärmeeintrag. Die Schmelze blockiert auch den Gastransfer und die Reinigung vom Teer; anders als z.B. bei der Holzpyrolyse, wo sich Hohlräume im Material bilden (Zeller et al. 2022).

Die Ausbeuten an Pyrolyseöl fallen daher extrem unterschiedlich aus, je nach eingesetzter Kunststoffabfallfraktion und verwendetem Pyrolyseprozess; insbesondere die Kondensationsbedingungen sind hier von Einfluss. (Zeller et al. 2022) gibt bei der Pyrolyse von Leichtverpackungs-Sortierresten Ausbeuten (= Anteil von Einsatz-Kohlenstoff in der öligen Phase) von über 50 % an; bei styrolbasiertem XPS seien es sogar ca. 75 Gew.-%. Werden die Prozessbedingungen nicht optimal an den Inputstrom angepasst, können sehr geringe Ausbeuten resultieren, s.a. Bild 10.

Bei halbindustriellen Anlagen werden die Kohlenstoffausbeuten im Pyrolyseöl mit etwa 70 % beziffert (BASF 2020). Die Ausbeute an High Value Chemicals (HVC = Ethen, Propen, Buten, Butadien, Aromaten) aus dem Crackprozess beträgt laut (Quicker & Seitz 2024) etwa 45 % des eingesetzten Kunststoffabfalls.

### 5.2 Produktqualität und Schadstoffe

Insbesondere für die Pyrolyse, aber auch generell im Zusammenhang mit „chemischem Recycling“ ist anzumerken, dass Schadstoffe nicht nur im gewünschten Produkt, sondern auch in der Abluft und in festen Reststoffen anfallen. In der Bewertung „chemischer Recyclingverfahren“ ist daher eine sorgfältige Berücksichtigung aller Emissionspfade wie Luft, Wasser und Boden unerlässlich (UNEP 2024).

Die nachfolgende Tabelle zeigt anhand der Daten von drei Technologieanbietern exemplarisch, welche Substanzen bei der Pyrolyse von Polyolefinen neben dem Pyrolyseöl anfallen.

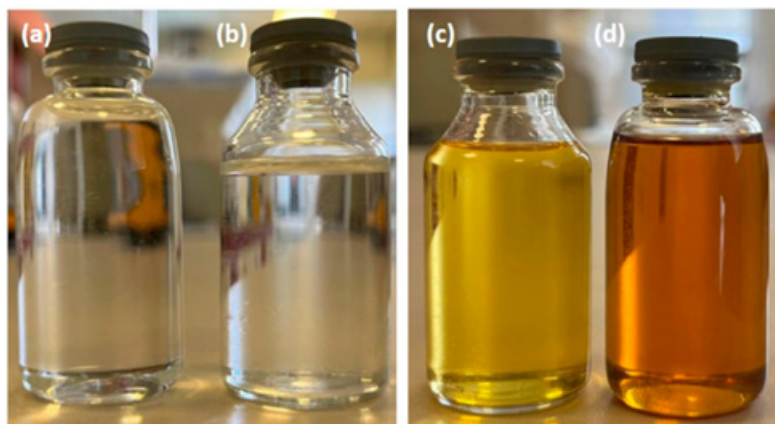
Als zusätzliche gesundheitsschädliche Emissionen wurden weitere VOC (volatile organic components) wie Benzol, Toluol, Schwefelwasserstoff und Cyanwasserstoff gefunden (Plvato et al. 2024), ebenso wie diverse persistente organische Schadstoffe (POPs). In den nachfolgenden Kapiteln wird das Pyrolyseöl selbst eingehender betrachtet.

#### 5.2.1 Technische Qualität des Pyrolyseöls

Man gewinnt Pyrolyseöl, um es anschließend als Ersatzprodukt für fossiles Öl (Naphtha) einem Steamcracker zuzuführen. Traditionell wird Naphtha dort in kleinere Kohlenwasserstoffe gespalten, die u.a. zur Polymerherstellung dienen. Im Idealfall sollte Pyrolyseöl also die gleichen Eigenschaften wie Naphtha besitzen. Tatsächlich jedoch weicht es sowohl in der Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe als auch in der Reinheit deutlich ab. Bild 7 zeigt Pyrolyseöle aus **PP-Neuware** im Vergleich zu leichtem und schwerem Naphtha (Erkmen et al. 2023).

| Substanz                             | Menge in kg | Substanz                         | Menge in kg |
|--------------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|
| Pyrolyseöl                           | 862,3       | Schwefeldioxid                   | 3,68E-3     |
| Synthesegas für interne Verbrennung  | 166,6       | Hydrogenchlorid (Salzsäure)      | 5,11E-3     |
| Abfall zur Deponierung               | 45,6        | Staub                            | 2,41E-3     |
| Unbehandeltes Abwasser               | 882,4       | Total Organic Carbon (TOC)       | 1,89E-3     |
| Unspezifischer Abfall (Gefahrstoffe) | 1,3         | Schwermetalle (Luft)             | 2,43E-5     |
| Sauerstoff                           | 1.165,7     | Hydrogenfluorid (Flusssäure)     | 2,70E-5     |
| Wasserdampf                          | 410,3       | Thallium                         | 6,49E-8     |
| Kohlendioxid                         | 411,9       | Cadmium                          | 6,49E-8     |
| Stickoxide                           | 0,5         | Quecksilber                      | 411,9       |
| Stickstoff                           | 0,3         | Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine | 1,35E-9     |
| Ammoniak                             | 2,02E-2     | Polychlorierte Dibenzo-p-Furane  | 1,35E-9     |
| Kohlenmonoxid                        | 5,50E-2     |                                  |             |

**Tabelle 6:** Output aus der Pyrolyse von 1.000 kg Abfall aus PE/PP-Lebensmittelfolien; Durchschnittswerte aus 3 Prozessen (Sphera 2022)



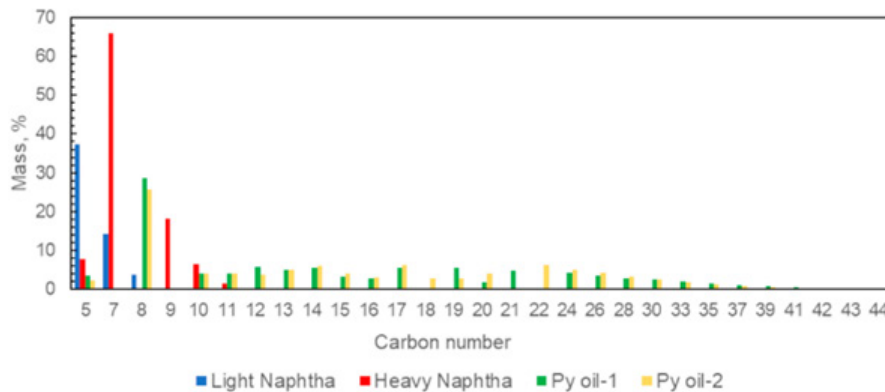
**Bild 7:** Optischer Vergleich zwischen zwei Naphtha-Sorten (links: leichtes und schweres Naphtha) sowie zwei Ölen, die aus der Pyrolyse von **PP-Neuware** gewonnen wurden (rechts; Kondensate bei 270 – 300°C bzw. 370 – 400°C) (Erkmen et al. 2023)

Die erzeugten Kohlenwasserstoffe haben deutlich **längere Molekülketten**, wie aus Bild 8 hervorgeht. Naphtha enthält Kohlenwasserstoffe mit 5–12 C-Atomen, während die „carbon numbers“ der Pyrolyseöle bis über 40 hinausgehen.

Außerdem unterscheidet sich die **chemische Art der Kohlenwasserstoffe**: Bei Naphtha handelt es sich vor allem um gesättigte Substanzen (Paraffine und Naphthene), das bedeutet, sie haben keine Doppelbindungen. Ein solcher „paraffinischer“ Kohlenwasserstoff mit 5 C-Atomen ist beispielsweise das Pentan, ein maßgeblicher Bestandteil von leichtem Naphtha, s.a. Bild 8. Pyrolyseöle dagegen weisen einen hohen Anteil olefinischer Kohlenwasserstoffe auf, d.h. diese Inhaltsstoffe besitzen Doppelbindungen. Zudem sind sie häufig cyclisch. In Pyrolyseölen befinden

sich weiter viele aromatische Verbindungen, die Strukturen wie „Benzolringe“ enthalten. Tabelle 7 erläutert die unterschiedlichen Arten von Kohlenwasserstoffen.

Die vorgenannten chemischen Unterschiede zwischen Pyrolyseöl und Naphtha sind erheblich, wie Bild 8 darstellt. Steamcracking erfordert niedermolekulare Paraffine (C5–C12), wenig Aromaten und Olefine. Die Vielzahl der langkettigen, olefinischen und aromatischen Substanzen im Pyrolyseöl behindert den Steam-Cracking-Prozess, verursacht Blockaden und führt zu Koksablagerung (Rollinson 2023). Um ein Pyrolyseöl allein aufgrund der chemischen Unterschiede in den Kohlenwasserstoffen für den Steamcracker tauglich zu machen, sind aufwändige Destillations- und Reinigungsschritte erforderlich.

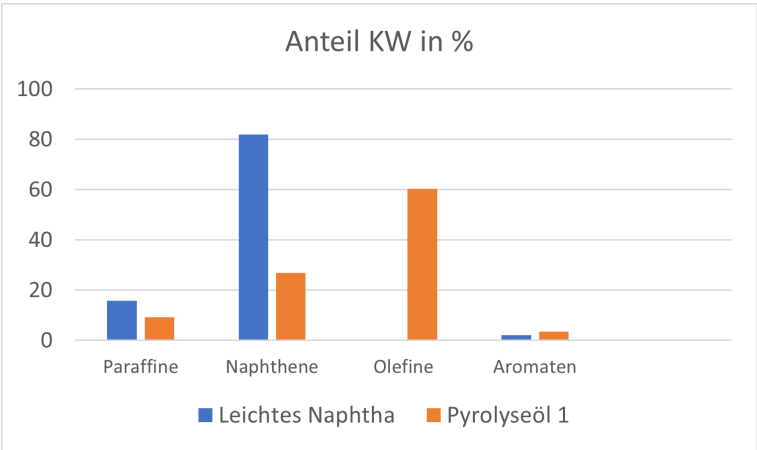


**Bild 8:** Vergleich der Länge der in zwei Naphtha-Sorten enthaltenen Kohlenwasserstoffe („Carbon number“) sowie von zwei Ölen, die aus der Pyrolyse von PP-Neuware stammen (Kondensate bei 270–300°C bzw. 370–400°C) (Erkmen et al 2023)

| Pentan<br>gesättigt                          | Cyclohexan<br>gesättigt                        | Cyclooctadien<br>ungesättigt                  | Benzo(a)pyren*<br>gesättigt                         |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                                              |                                                |                                               |                                                     |
| (Einfachbindungen)<br>linear<br>Carbonzahl 5 | (Einfachbindungen)<br>cyclisch<br>Carbonzahl 6 | (Doppelbindungen)<br>cyclisch<br>Carbonzahl 8 | (Einfachbindungen)<br>polycyclisch<br>Carbonzahl 20 |
| Gehört zur Gruppe<br>der Paraffine           | Gehört zur Gruppe<br>der Naphtene              | Gehört zur Gruppe<br>der Olefine              | Gehört zur Gruppe<br>der Aromaten                   |

**Tabelle 7:** Beispiele für unterschiedliche Kohlenwasserstoffe: linear/cyclisch, gesättigt/ungesättigt/aromatisch, mit jeweiligen Carbonzahlen. Bei den gezeigten cyclischen Strukturen stellt jede „Ecke“ ein C-Atom dar, das bis zu zwei H-Atome trägt.

\*Benzo(a)pyren, ein kritischer polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoff PAK, wurde in Pyrolyseöl gefunden, s.a. Kap. 5.2.2.



Verteilung der verschiedenen Arten von Kohlenwasserstoffen in Naphtha und Pyrolyseöl (nach Erkmen et al 2023), zur Legende s.a. Bild 8.



Betrachtet man Pyrolyseprodukte aus **Kunststoffabfällen**, ist der optische Unterschied zum Naphtha noch weit deutlicher, Bild 9.

**Bild 9:** Ölige Kondensate, die aus der Pyrolyse von Kunststoffabfällen im Labormaßstab gewonnen wurden (Quicker & Seitz 2024). Oben: Pyrolyseöl aus einer Mischkunststofffraktion (v.a. PE, PP, PET, PS), Ausbeute 1 % (ein großer Teil der entstandenen Gase konnte mit dem Laboraufbau nicht kondensiert werden). Unten: Pyrolyseöl aus der Fraktion WEEE Kleingeräte/IT, Ausbeute 27,3 %.

|                                | Stickstoff (%)              | Sauerstoff (%) | Chlor (ppm) | Fluor (ppm) |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------|-------------|-------------|
| Grenzwert Naphtha Steamcracker | 0,01 (light)<br>0,2 (heavy) | 0,01           | 3           | 2           |
| MKS I                          | 0,8 – 1,5                   | 0,5 – 4,3      | 10 – 500    |             |
| MKS II                         | 0,2 – 0,3                   | 7,7 – 15       | 151 – 275   | 30 – 60     |
| MKS III                        | 0,08                        | 0,52           | 119         | 12          |

**Tabelle 8:** In Pyrolyseölen von Mischkunststoffabfallfraktionen (MKS) gefundene Gewichtsanteile an Verunreinigungen (aus drei verschiedenen Studien) im Vergleich zum Grenzwert für die Verarbeitung von Naphtha im Steamcracker (Rollinson 2023)

Für diverse chemische Elemente liegen für die Weiterverarbeitung von Naphtha im Steamcracker Grenzwerte vor. Entsprechende Limits für **Verunreinigungen**, die im fossilen Naphtha nicht vorkommen, gibt es bisher kaum.

**Heteroatome** wie Stickstoff, Sauerstoff oder Schwefel im Pyrolyseöl können als Katalysatorgifte wirken und die Koksbildung erhöhen. Stickstoff muss u.a. wegen  $\text{NO}_x$ -Bildung unterhalb eines sehr geringen Limits bleiben, ähnliches gilt für Sauerstoff. Für Chlor liegt der Grenzwert im Pyrolyseöl bei 3 ppm; auch andere Halogene wie Fluor und Brom sind kritisch. **Metalle** aus den Kunststoffadditiven finden sich ebenfalls im Pyrolyseöl wieder; sie führen zu Katalysatorvergiftung und Korrosion im Steamcracker.

In einer umfassenden Metastudie (Rollinson 2023) sind zahlreiche Daten zu Verunreinigungen von Pyrolyseölen dargestellt. Beispielhaft sind in Tabelle 8 Werte zu Mischkunststoffen MKS im Vergleich zum Steamcracker-Limit tabellarisch zusammengefasst. Diese und auch viele weitere untersuchte Pyrolyseöle liegen zum Teil erheblich über den vorgeschriebenen Grenzwerten. Andere Studien untermauern diese Ergebnisse (z.B. Quicker & Seitz 2024).

### 5.2.2 Toxikologie

Sowohl bei der Pyrolyse als auch im Steamcracking entstehen viele toxische Kohlenwasserstoffe. Diese können sowohl aus dem Ausgangsmaterial als auch während des Prozesses selbst als pyrolytische Verunreinigungen entstehen. Ähnliches gilt auch für den nachgeschalteten

Steamcrackingprozess (Rollinson 2023).

Die Bildung **Polyzyklischer Aromatischer Kohlenwasserstoffe** (PAK/polycyclic aromatic hydrocarbons PAH) sowohl im Pyrolyse- als auch im Steamcracking-Prozess wurde nachgewiesen. Laut (Rollinson 2023) überschreiten die in der Studie betrachteten Pyrolyseöle vielfach die REACH-Grenzwerte. Auch wenn REACH nicht direkt für Pyrolyseöl angewendet wird, sondern nur, wenn besonders besorgniserregende Stoffe (SVHCs) wie PAK mit mindestens 0,1 Massenprozent enthalten und in Erzeugnissen verarbeitet sind, zeigt der exemplarische Vergleich in Tabelle 9, dass Pyrolyseöle die Werte für kontaktsensitive Anwendungen wie Spielzeug bis zu 1.800-fach überschreiten.

In vielen Verbrennungsprozessen entstehen **Persistente Organische Schadstoffe** (POPs – persistent organic pollutants), viele von ihnen mit erheblichem Gefährdungspotenzial. Bei der Pyrolyse sind vor allem Dioxine, Furane und Biphenyle relevant.

Bekanntermaßen sind Prozessbedingungen, wie sie in der Pyrolyse vorliegen – hohe Anteile organischer Substanzen bei weitgehendem Sauerstoffausschluss – geeignet für eine Dioxinbildung; insbesondere bei Vorhandensein von Flammenschutzadditiven, aber auch bei geringen Chlorgehalten. Insofern ist die Bildung von polychlorierten **Dibenzo-p-Dioxinen (PCDD)** und **Dibenzofuranen (PCDF)** zu erwarten.

Zu **polychlorierten Biphenylen (PCB)** sowie weiteren **POPs** im Pyrolyseöl ist noch wenig bekannt, obwohl deren Bildung unter den

| Benzo(a)-pyren | Benzo(a)-anthracen | Chrysen | Benzo(b)fluoranthen | Benzo(k)fluoranthen |
|----------------|--------------------|---------|---------------------|---------------------|
| 180 ppm        | 150 ppm            | 160 ppm | 90 ppm              | 60 ppm              |

**Tabelle 9:** Mengen von Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK/polycyclic aromatic hydrocarbons PAH), die in Pyrolyseölen aus PE-Abfallströmen gefunden wurden (Rollinson 2023). Grenzwerte laut REACH: für Spielzeug: 0,5 ppm; bei Mund- und Hautkontakt: 0,1 ppm

Prozessbedingungen ebenfalls erwartbar ist (Rollinson 2023).

Auch mit carcinogenen und mutagenen Substanzen, endokrinen Disruptoren, Stoffen mit akuter und chronischer aquatischer Toxizität, Schwermetallen oder Asbest ist im Pyrolyseöl zu rechnen (UNEP 2024).

Die Möglichkeit, Schadstoffe aus dem recycelten Stoffstrom auszuschleusen, wird als ein wichtiger Grund für die Entwicklung „chemischer Recycling“-Verfahren angeführt. Aus chemisch-physikalischer Sicht ist dies sicher möglich, in der Praxis ist die Möglichkeit der Schadstoffentfrachtung aber stark von den spezifischen Bedingungen abhängig. Insbesondere bei stark kontaminierten Abfallfraktionen ist die Weiterverarbeitung der anfallenden Produkte sehr aufwendig.

Eine Aufbereitung der Öle (Wäsche, Destillation, Filterung, Adsorption, Hydrierung) ist erforderlich, um Metalle, Asche, Chlor, Stickstoff, Sauerstoff und andere Verunreinigungen, aber auch den hohen Anteil an ungesättigten Verbindungen, zu entfernen oder zu hydrieren (Quicker & Seitz 2024). Von der Industrie werden verschiedene Reinigungsmaßnahmen propagiert („hydrogenation units“, „upgrading plants“, Rollinson 2023), doch gibt es wenig zugängliche Informationen hierzu, und diese Technologien scheinen erst am Anfang zu stehen.

Ohne standardisierte Definitionen, End-of-Waste-Kriterien oder Kontaminationstests sind unerwartete Schadstofffreisetzungen möglich (Quicker 2023). Es „muss erst noch ein Nachweis erbracht werden, dass das postulierte Schadstoffentfrachtungspotenzial „chemischer Recycling“-Verfahren tatsächlich realisiert werden kann und die Kontaminationen nicht lediglich auf andere Produkte oder Rückstände verlagert werden“ (Quicker 2023).

Wegen der oben gezeigten Qualitätsprobleme beim Pyrolyseöl kann dieses nicht ohne weitere Behandlung im Steamcracker verarbeitet werden. Nach jetzigem Stand ist es erforderlich, das Pyrolyseöl trotz Nachbehandlung mit fossilem Naphtha zu mischen. Dabei ist nur eine Beimengung von geringen Anteilen von Pyrolyseöl zum Naphtha technisch machbar. Es wird davon

gesprochen, dass im Allgemeinen **Mischungen von 5–20 % Pyrolyseöl mit 95–80 % Naphtha** für ein Steamcracking verwendet werden können. In Fällen mit starker Verunreinigung ist eine noch höhere Verdünnung erforderlich (Rollinson 2023).

### 5.2.3 Bewertung der Verfahren in Bezug auf Wasser

Die Verfahren Gasifizierung, Pyrolyse und Verölung können wasserintensive Reinigungsprozesse benötigen, insbesondere durch den Einsatz von Nasswäschern, was zu hohem Wasserverbrauch und möglicher Wasserverunreinigung durch Schadstoffe wie Halogene, Teere und Stickstoffverbindungen führt. Konkrete Zahlen zu Verbräuchen und Verschmutzung sind aktuell nicht bekannt (Quicker & Seitz 2024).

## 5.3 Eignung von Inputströmen für die Pyrolyse

### 5.3.1 Thermoplastische „Post-Consumer“-Abfälle für die Pyrolyse

Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf Pyrolyseversuche im Labormaßstab, die an realen Abfallströmen durchgeführt wurden.

In (Quicker & Seitz 2024) wurden eine Mischkunststoff- und eine EBS-Fraktion, zwei Fraktionen aus der WEEE-Aufbereitung (Elektroschrott) sowie zwei Shredder-Leichtfraktionen – von Altfahrzeugen sowie Weißblechdosen – betrachtet. Aus den Versuchen konnte abgeleitet werden, „dass die Mischkunststofffraktion für das „chemische Recycling“ von Kunststoffen geeignet ist“. Alle anderen Abfallfraktionen weisen zu viele Fremdstoffe auf, die zu einer erhöhten Koksbildung und deutlich geringeren Ölausbeuten führen.“

Laut (Zeller 2022-deutsch) können aus styrolbasierten Eingangsmaterialien, z.B. Wärmedämmverbundsystemen, „hochwertige Kondensate mit hohem Monomeranteil“ gewonnen werden. Polyolefinhaltige Abfälle werden als werthaltiger definiert als Inputmaterialien aus dem Bereich WEEE sowie aus der Shredderleichtfraktion, denn u.a. aufgrund des Anteils technischer Kunststoffe resultieren bei letzteren in der Pyrolyse komplexe Produktgemische.

Es lässt sich zusammenfassen, dass bei thermoplastischen Inputmaterialien derzeit nur die **Polyolefine (PE, PP)** und ggfs. **wenig verschmutzte Styrolkunststoffe** als Inputmateri-

al geeignet sind (siehe dazu auch Kap. 4.1.1). Diese finden sich insbesondere in Abfallfraktionen, die aktuell vor allem in hochwertigen und qualitätsgesicherten Ersatzbrennstoffen genutzt werden. Weitere zukünftige Ansätze bestehen in der Abtrennung von Polyolefinfraktionen aus Restmüll, Gewerbeabfällen und anderen Abfallfraktionen (Quicker & Seitz 2024).

Zu befürchten steht aber auch, dass auf hochwertige Polyolefin-Abfallfraktionen, die für das werkstoffliche/mechanische Recycling geeignet sind, zurückgegriffen wird.

### 5.3.2 Konkurrenz zum werkstofflichen/mechanischen Recycling

Das europäische und deutsche Abfallrecht fordert Abfallvermeidung und Rezyklateinsatzquoten, doch die deutsche Mehrweg- und Recyclingindustrie stehen unter Druck. Günstige Neuware aus dem Ausland, niedrige Nachfrage und hohe Energiekosten bedrohen die Branchen. Der Draghi-Bericht stellt zwar eine weltweit führende Rolle der EU im Bereich Kreislaufwirtschaft fest und betont die hier durch Innovationen ergebenden großen Chancen für die Industrie, Wettbewerbsfähigkeit und Klimaschutz, gleichzeitig stellt er fest, dass es gerade an der flächendeckenden Infrastruktur fehlt (Draghi 2024). Obwohl die deutsche Recyclingbranche viel investiert hat, werden Produktionsstraßen und Aufbereitungsanlagen geschlossen. Der Fachverband für Kunststoffrecycling (bvse) stellt eine tiefe Krise fest, da immer mehr Recycling-Anlagen schließen müssen mit dramatischen Folgen für den Übergang zur Kreislaufwirtschaft. Seit 2023 ist in Europa, besonders auch in Deutschland, eine Gesamt-Recyclingkapazität von fast einer Million Tonnen verloren gegangen (BVSE 2025). Werkstoffliches/mechanisches Recycling hat nicht genügend Marktmacht. Geeignete legislative und ökonomische Instrumente werden dringend benötigt, um qualitätsgesichertes Recycling sowie Vermeidung und Mehrweg konkurrenzfähig zur Neukunststoffproduktion zu machen.

Es sind längst nicht alle Potentiale für eine flächendeckende Infrastruktur für Vermeidung und Mehrweg ausgeschöpft. Auch für das werkstoffliche/mechanische Recycling sind viele Verbesserungen bei Sammlung, Sortierung und

Aufbereitung noch nötig, um eine hochwertige Verarbeitung zu garantieren. Es sollten u.a. folgende Potenziale weiterverfolgt und in Anwendung gebracht werden: Nutzung von Markern und digitalen Wasserzeichen, Sortierung nach Produktform in Zusammenhang mit KI-unterstützter Bilderkennung, ggf. Flotationsverfahren und Einsatz weiterer Detektoren bzw. Sensoren, Verbesserung der Reinigungsleistung der Wäsche, Verringerung des Energie- und Wassereinsatzes in der Wäsche sowie anforderungsgerechte Aufbereitung. Durch neue Technologien, die Lasertechnologie, Spektroskopie und Digitalisierung miteinander kombinieren, bestehen zukünftig deutlich verbesserte Möglichkeiten für das werkstoffliche/mechanische Recycling (Vergleich: BUND-Hintergrund „Plastik – Radikales Umdenken nötig“).

### 5.3.3 Reifenpyrolyse

Beim Recycling von Reifen fallen Textil, Metall und Elastomer an, welche rezykliert werden. Das „chemische Recycling“ des Reifengummis wird im industriellen Maßstab durchgeführt. Nach dem Mahlen und Trennen der Fraktionen Gummi, Metall (ca. 27 % bei LKW-Reifen) und Textil (ca. 9,5 %) gelangt die Gummifraktion in die Pyrolyse (Maga et al. 2023). Hier ist nicht das Öl die maßgebliche Komponente, sondern das **Carbon Black**, das aus der Koksfraktion der Pyrolyse hervorgeht. Dieses wird wieder in der Reifenherstellung eingesetzt. Das Pyrolyseöl wird an die chemische Industrie verkauft und das Pyrolysegas in einer Kraft-Wärme-Kopplung energetisch verwertet. Laut (Maga et al. 2023) ist die Reifenpyrolyse in der Lebenszyklusanalyse sowohl der Verbrennung im Zementwerk als auch im EBS-Kraftwerk hinsichtlich des Treibhauspotenzials überlegen. (Die vierte Option, Verwendung von Altreifen-Mahlgut als Kunststrassen-Infill, wird aus Umweltschutzgründen mittelfristig in der EU verboten sein).

Das gute Abschneiden der Reifenpyrolyse beruht – neben den hohen Emissionsgutschriften bei den Verbrennungsoptionen – vor allem auf den hohen Gutschriften für das Carbon Black. Für die Reifenpyrolyse werden aber auch Einschränkungen genannt. Denn pro Altreifen wird mehr Carbon Black hergestellt als in einem neuen Reifen verwendet wird, so dass keine vollständige Kreislaufführung möglich ist. Die Eigenschaften

des erzeugten Carbon Blacks weichen von Virgin-Carbon Black ab, was einer direkten Substitution im Wege stehen kann (Cardona et al. 2018). Weitere Aussagen über Qualität und Toxikologie des Carbon Black sind in der Publikation nicht enthalten.

### 5.4 Vergleichende ökologische Bewertung des „chemischen Recyclings“

Wie gut das „chemische Recycling“ im Vergleich zu anderen Verfahren nach ausgewählten Umweltkriterien abschneidet, lässt sich mit dem Instrument von vergleichenden Ökobilanzen (Life Cycle Assessments, LCA) bewerten. Die zentrale Grundlage bilden die internationalen Normen ISO 14040 und ISO 14044, die einen methodischen Rahmen vorgeben. Ein wesentliches Qualitätsmerkmal ist die Vollständigkeit, die fordert, dass alle im Rahmen einer Ökobilanz relevanten Umweltaspekte über den gesamten Lebensweg – von der Rohstoffentnahme bis zur Entsorgung – betrachtet werden. Damit die Ergebnisse objektiv interpretierbar sind, ist zudem eine lückenlose Transparenz über alle getroffenen Annahmen, die gewählten Systemgrenzen und die genutzten Datenquellen zwingend erforderlich. In einer Ökobilanz werden üblicherweise die folgenden Wirkungskategorien untersucht:

- Klimawandel/Treibhauseffekt
- Ozonabbau
- Versauerung
- Eutrophierung (Überdüngung)
- Photochemische Oxidantienbildung (Sommersmog)
- Toxizität: Unterteilt in Humantoxizität und Ökotoxizität
- Ressourcenbeanspruchung

Die Güte der verwendeten Daten spielt eine entscheidende Rolle für die Validität der Bilanz. Hierbei müssen der zeitliche, geographische und technologische Bezug der Daten präzise zum Untersuchungsgegenstand passen, um Verzerrungen zu vermeiden. Ein weiteres Kernkriterium ist einheitliche Anwendung von Methoden und Berechnungsgrundlagen innerhalb der gesamten Studie. Zusätzlich muss die Definition der funktionellen Einheit, wie beispielsweise die umweltfreundliche Behandlung einer Tonne Kunststoffabfall aus dem gelben Sack, eindeutig sein, da sie den Nutzen des Produkts quantifi-

ziert und somit erst die Basis für faire Vergleiche zwischen verschiedenen Systemen schafft. Zur Absicherung der Ergebnisse werden in qualitativ hochwertigen Ökobilanzen zudem Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die aufzeigen, wie stark sich Änderungen bei kritischen Parametern auf das Gesamtergebnis auswirken. Bei Studien, die für die Öffentlichkeit bestimmt sind oder vergleichende Aussagen enthalten, stellt eine externe kritische Prüfung (Critical Review) durch unabhängige Sachverständige die abschließende Instanz der Qualitätssicherung dar.

Wie bei wissenschaftlichen Studien auch, sollte die Konzeption, Beauftragung und Umsetzung von Ökobilanzen unabhängig von wirtschaftlichen Interessen erfolgen. Nur so können belastbare Ergebnisse erzielt werden, die auf das Wohl der Allgemeinheit ausgerichtet sind.

#### 5.4.1 Vorhandene Ökobilanzen zur Pyrolyse

Bisher existieren keine unabhängigen Ökobilanzen, die den oben genannten Kriterien entsprechen. Die bisherige ökologische Bewertung des „chemischen Recyclings“, insbesondere der Pyrolyse von Kunststoffabfällen, stützt sich vielmehr auf Ökobilanzen, die sowohl von der Industrie als auch von Forschungseinrichtungen durchgeführt wurden. Studien der Industrie können interessengeleitet sein, und bei den wissenschaftlichen Studien werden oft nicht alle Umweltkategorien und auch nicht der gesamte Lebensweg betrachtet. Diese Analysen kommen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Datengrundlagen zustande, weshalb eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Originalliteratur unerlässlich ist. Insgesamt ergeben diese Studien nur Anhaltspunkte und eignen sich nicht für eine fundierte abschließende Bewertung.

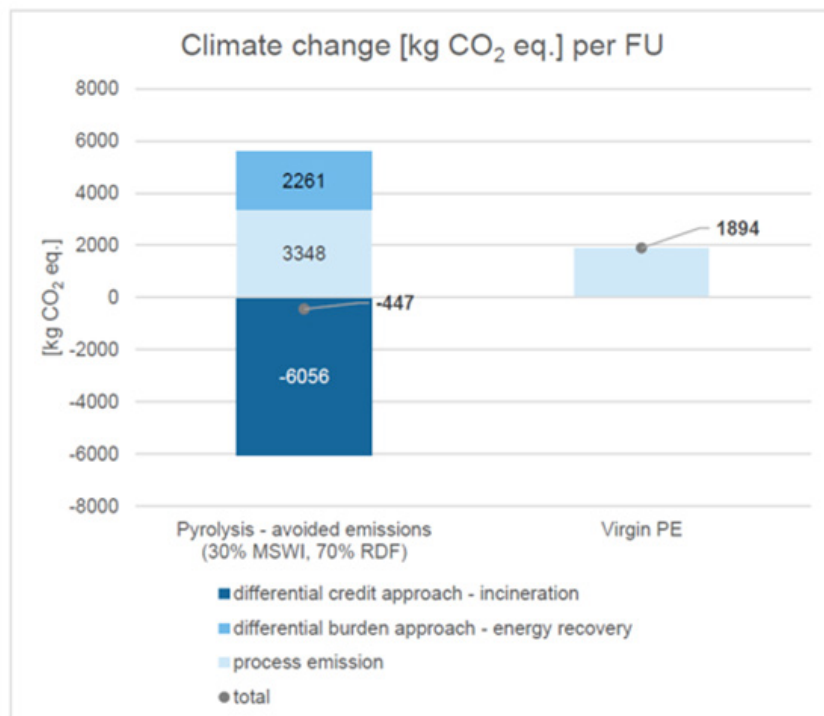
Erste vergleichende Studien zeigen, dass werkstoffliches/mechanisches Recycling hinsichtlich des Klimawandels mit etwa 0,3 – 1 kg CO<sub>2</sub>eq/kg Kunststoff deutlich günstiger abschneidet als die Pyrolyse, deren Energiebedarf und Emissionen zu einem Treibhausgaspotenzial von etwa 1,5 – 3 kg CO<sub>2</sub>eq/kg führen (Quicker & Seitz 2024) (Möck et al. 2022). Werden nachgelagerte Prozesse wie Hydrierung, Aufreinigung des Pyrolyseöls, Steamcracking und Polymerisation berücksichtigt, steigen die Werte auf 3 – 6 kg CO<sub>2</sub>eq/kg.

Eine viel diskutierte Ökobilanz der BASF (2020), die sich ebenfalls auf den Effekt auf den Klimawandel konzentriert, vergleicht die drei Verwertungswege Pyrolyse, energetische Verwertung und werkstoffliches/mechanisches Recycling: Die Pyrolyse von Mischkunststoffen führt zu geringeren Treibhausgasemissionen als die energetische Verwertung, während werkstoffliches/mechanisches Recycling noch bessere Werte erzielt. Im ebenfalls durchgerechneten Szenario der Herstellung von LDPE-Neuware durch Pyrolyse werden zwar hohe Emissionen ausgewiesen: 3.348 kg CO<sub>2</sub>eq pro Tonne Kunststoffabfall; im Vergleich dazu produziert die Polymerherstellung auf fossilem Wege nur 1.894 kg CO<sub>2</sub>eq – nur etwas mehr als die Hälfte. Wie vorgehend dargelegt, mangelt es dieser Ökobilanz jedoch an Transparenz; und auch die Ergebnisse werden teils irreführend dargestellt, siehe Bild 10.

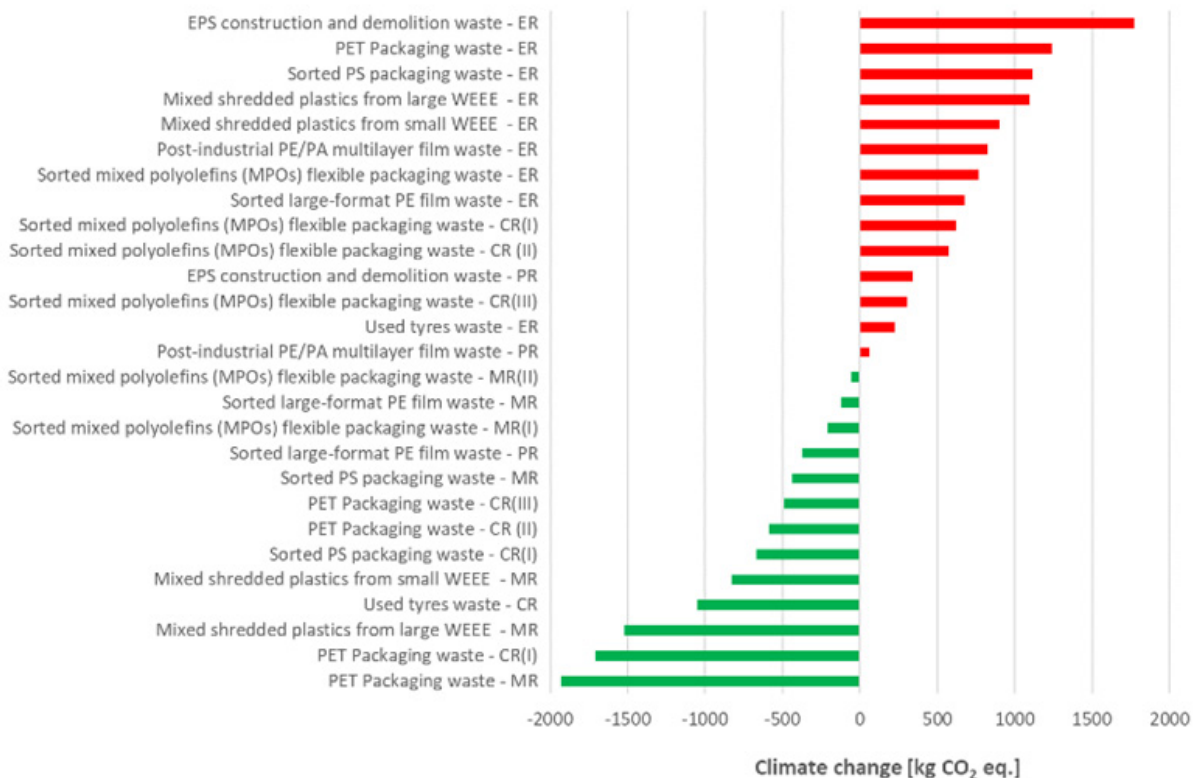
Doch dafür, dass die Kunststoffabfälle nicht in die energetische Verwertung gelangen, wird bei der Pyrolyse eine Gutschrift von 6.056 kg CO<sub>2</sub>eq berechnet (anders wäre das Ergebnis, wenn die

Kunststoffabfälle bspw. werkstofflich rezykliert werden). So resultiert für die Pyrolyse ein negatives Ergebnis von –447 kg CO<sub>2</sub>eq. Nur durch diese hohen Gutschriften für vermiedene Verbrennung wird dieser rechnerisch sogar negative CO<sub>2</sub>eq-Wert erzielt, was als großer Umweltvorteil dargestellt wird. Dieser Verrechnungsansatz ist umstritten und kann auch als Schönrechnen des „chemischen Recyclings“ bezeichnet werden. Die Verbrennung von Kunststoffen sollte künftig sowieso so stark wie möglich reduziert werden und hat keine Zukunft für vermeidbare sowie schadstofffreie Kunststoffe.

Eine weitere umfassende Studie des Joint Research Center (Garcia-Gutierrez et al. 2023), Bild 11, vergleicht Pyrolyse und werkstoffliches/mechanisches Recycling anhand verschiedener Abfallströme und Impact-Kategorien. Während bei der Betrachtung der Treibhausgasemissionen die Pyrolyse bei bestimmten Abfällen und Kategorien Vorteile zeigt, schneidet das differenzierte werkstoffliche/mechanische Recycling insgesamt am umweltfreundlichsten ab.



**Bild 10:** Beispiel für einen irreführenden Vergleich der Herstellung von PE aus der Pyrolyse mit derjenigen von Neuware (virgin) hinsichtlich der Ökobilanz-Kategorie Klimawandel/„climate change“ (BASF 2020)



**Bild 11:** Zusammenfassung über unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Emissionen bei jeweils unterschiedlichen Behandlungen bzw. Entsorgungen von je 1 Tonne verschiedener Kunststoffabfälle. Negative Werte (grüne Balken) stehen für Netto-Treibhausgas-Einsparungen, während positive Werte (rote Balken) Netto-Treibhausgasbelastungen darstellen. CR: „chemisches Recycling“; ER: Verbrennung; MR: mechanisches Recycling; PR: physikalisches Recycling (Garcia-Gutierrez et al. 2023)

#### 5.4.2. Notwendigkeit einer unabhängigen Bewertung

Die Problematik von interessengeleiteten Ökobilanzen wird seit Jahren diskutiert. Wesentliche Kritikpunkte sind die unzureichende Berücksichtigung kritischer Lebenszyklusschritte wie die Entsorgung gefährlicher Abfälle und der Ressourcenbedarf für die Reinigung verunreinigter Outputs. Die bisher vorliegenden Ökobilanzen decken kunststoffbezogene Chemikalien und deren Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt nur unvollständig ab, wodurch toxische Effekte unterschätzt werden. Zudem wird häufig eine unrealistische 1:1-Substitution von Pyrolyseprodukten für die Herstellung von Neuware angenommen, obwohl diese in der Realität oft nur in kleinen Anteilen zugemischt werden können (u.a. Singla 2025). Besonders fragwürdig ist die Praxis, hohe Gutschriften für vermiedene Auswirkungen wie die Verbrennung zu vergeben, was zu

physikalisch nicht plausiblen negativen Emissionswerten führt.

Eine neutrale Bewertung durch Ökobilanzen ist nur möglich, wenn diese unabhängig – möglichst durch staatliche Stellen – beauftragt und umgesetzt werden. Die Industrie sollte zwar zur Finanzierung dieser Untersuchungen in die Pflicht genommen werden, aber ein Einfluss auf die Konzeption und die Ergebnisse der Ökobilanzen muss vermieden werden.

#### 5.4.3 Bewertung der Pyrolyse mit der Nutzenkorkmethode

(Quicker & Seitz 2024) wendet ein anderes Verfahren an, um verschiedene Recycling- bzw. Verwertungsmethoden miteinander zu vergleichen – die Nutzenkorkmethode. Für die Prozesse „chemisches Recycling“ (CR), werkstoffliches/mechanisches Recycling (MR) und energie-

tische Verwertungsoptionen (ER) von Kunststoffabfällen werden hierbei die Parameter **kumulierter Energieverbrauch** und **Treibhausgasemissionen** betrachtet. Die Daten zur Pyrolyse (und Verölung) stammen aus jeweils wenigen halbindustriellen Anlagen, ergänzt durch Laborversuche und Literaturrecherchen.

Dabei werden drei Nutzenkörbe (= identischer Nutzen) betrachtet, die mit den Produkten aus den drei Verfahren gefüllt sind. Jeweils zwei der drei Produkte pro Korb sind auf fossilem Wege hergestellt. Bei den Berechnungen wurden wohlwollende Rahmenbedingungen für das „chemische Recycling“ gesetzt. Als jeweilige Produkte werden High Value Chemicals HVC (aus CR), Regranulat (aus MR) und Strom- bzw. Wärmebereitstellung (aus ER) betrachtet. **Bei angenommen 100 % mechanischem Recycling läge der kumulierte Energieverbrauch um etwa ein Drittel geringer als bei den Varianten zum „chemischen Recycling“. Bei den Treibhausgasemissionen ist der Unterschied noch größer.** Die „chemischen Recycling“-Verfahren haben auch einen höheren kumulierten Energieverbrauch als die Herstellung über die Primärroute.

Um der Weiterentwicklung der Verfahren Rechnung zu tragen, wurden schließlich mehrere Zukunftsszenarien betrachtet – mit zunehmendem Kunststoffrecycling, höheren Marktanteilen des „chemischen Recyclings“ und Rückgang der Verbrennung. **Nach diesen Prognosen verbrauchen diese chemischen Verwertungsmethoden auch zukünftig mehr Energie als die Primärroute aus Naphtha.**

Mit Hilfe der Nutzenkorbmethode kommen die Autoren, anders als viele industrienähe Studien, zu dem Schluss, dass das „chemische Recycling“ aktuell „nicht die optimale Lösung ist, solange an anderer Stelle hochwertige fossile Rohstoffe zur Bereitstellung thermischer Energie verbrannt werden“ (Quicker & Seitz 2024).

## 6. Der Massenbilanzansatz für das „Chemische Recycling“

Beim „chemischen Recycling“ spielt die Massenbilanzierung eine große Rolle. Da Pyrolyseöle so verschmutzt sind, müssen sie stark mit fossilen Ausgangsstoffen (Naphtha) verdünnt und gemeinsam im Steamcracker verarbeitet werden. Die komplett getrennte Verarbeitung von fossilen und Rezyklat-Ausgangsprodukten gilt als technisch und ökonomisch nicht durchführbar.

Aus den – bislang fossilen – Rohstoffen entsteht traditionell eine Vielzahl von Produkten – d.h. neben Kunststoffverpackungen, -bauteilen oder -folien werden auch pharmazeutische Produkte, Bitumen u.ä. sowie Brenn- und Kraftstoffe hergestellt. Werden Rezyklate mitverarbeitet, plädieren die Rohstoffhersteller für eine sogenannte „Allokation“, bei der verschiedenen Produkten ein Rezyklatanteil rechnerisch zugeordnet wird. Kraft- oder Brennstoffe und andere Nicht-Kunststoff-Produkte gelten nicht als „recycelt“, dennoch wird versucht die rechnerischen Anteile den Produkten zuzuordnen, die zu höheren Preisen verkauft werden können.

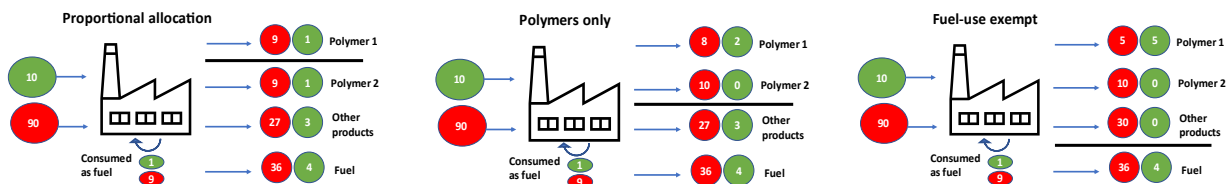
Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Massenbilanzierung. Das nachfolgend dargestellte Beispiel basiert auf einer Inputmenge von 100 t Material. Dabei bestehen 90 Prozent aus fossilen Ressourcen, z.B. Naphtha, 10 Prozent aus Recyclingmaterial, z.B. Pyrolyseöl, entsprechend einem Anteil von 10 % am gesamten Input. Daraus werden vier verschiedene Produkte

hergestellt: 2 verschiedene Kunststoffanwendungen (Polymere) sowie eine Non-Polymer-Anwendung und Kraftstoff. Alle Produkte enthalten in Realität 10 Prozent – egal welche Bilanzmethode angewendet wird.

### Variante 1: Proportionale Zuordnung („Rolling Average“)

Allen Produkten, die aus der Mischung von fossilem und Rezyklat-Einsatzstoff hergestellt werden, wird der gleiche – und damit der reale – Recyclinganteil zugewiesen, also 10 %.

Die chemische Industrie lehnt diese Variante ab, da sich für die Kunststoffprodukte nur geringe Recyclingquoten angeben lassen, sie will jedoch bestimmte Produkte zu höheren Preisen verkaufen. Die rezyklierten Ausgangsprodukte „verschwinden“ in den Nicht-Polymer-Produkten („other products“ im Bild, z.B. Grundstoffe für Agrochemikalien) und sind nicht vermarktbar. Aus diesem Grund sei ein wirtschaftlicher Betrieb eines petrochemischen Prozesses nicht möglich (Klatte et al. 2023). Plastics Europe 2023 lehnt diese Variante ab, da sie davon ausgehen, dass der Rezyklatanteil auf absehbare Zeit gering bleiben wird, weiter fossile Ressourcen genutzt werden und so die Erwartungen des Marktes und Regulierungsziele nicht erfüllt werden können. Der BUND bewertet diese Methode als einzige für die Verbraucher/innen transparente Methode, denn nur bei dieser Methode wird für die jeweili-



**Bild 12:** Übersicht Massebilanz-Verfahren. Links ist der Input in die Anlage und rechts sind die jeweiligen Produkte (Polymere, Non-Polymere und Kraftstoff) dargestellt, und wie diese Produkte vermarktet werden. Dabei bedeutet grün Rezyklat und rot fossiler Anteil (ECOS 2024).

gen Produkte eine dem Verhältnis des eingehenden Rohstoffmixes tatsächlich entsprechende Quote zugewiesen. So bleibt zudem der Transformationsdruck für die chemische Industrie erhalten, stetig weniger fossile Ressourcen zu nutzen.

### Variante 2 und 3: Kredit-Methoden „Polymer only“ und „Fuel Use Exempt“

Beide Ansätze sind Kredit-Methoden, das heißt, auf dem Papier wird bestimmten Produkten ein höherer Recycling-Anteil zugeordnet, als das Produkt tatsächlich enthält. Bei anderen Produkten (zum Beispiel bei weniger relevanten Zwischenprodukten) wird keine Aussage zum Recyclinganteil gemacht.

Bei dem Kredit-Ansatz „Polymer only“ werden unter den beiden Kunststoff-Anwendungen der gesamte Recyclinganteil demjenigen Kunststoff auf dem Papier zugeordnet (hier 20 %), der sich zu einem höheren Preis vermarkten lässt (z.B. Getränkeflasche). Bei der anderen Kunststoffanwendung wird keine Aussage gemacht. Der Recycling-Anteil des Nicht-Polymer-Produkts wird nicht den Polymer-Produkten zugeordnet. Von den Rohstoffherstellern wird auch diese Variante abgelehnt.

Die von der Chemieindustrie favorisierte Bilanzierungsmethode „Fuel Use Exempt“ ermöglicht für einzelne Produkte vergleichsweise hohe Rezyk-

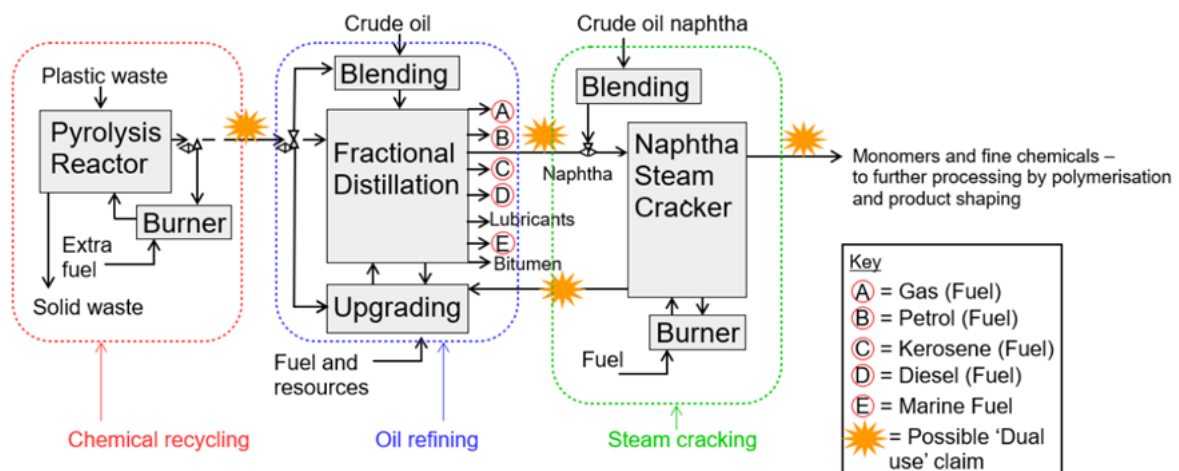
lat-Zuordnungen. Da die Brennstoffe weiter nicht unter die Definition von Recycling fallen, werden sie von der freien Zuordnung ausgenommen. Nun wird jedoch der Recycling-Anteil des Nicht-Polymer-Produkts dem Polymer-Produkt der „marktrelevantesten“ Anwendung zugeordnet. Die anderen Produkte enthalten rein rechnerisch „kein Rezyklat“.

Die chemische Industrie hält nach eigener Aussage dieses Massebilanzverfahren für am besten geeignet, um den Anteil von „chemisch recycelten“ Rohstoffen in der Kunststoffproduktion schnellstmöglich zu erhöhen (Plastics Europe 2024).

### Variante 4 „Fuel Use Exempt“ mit „Dual Use“-Konzept

2025 hat die europäische Kommission nun eine Erweiterung des Fuel Use Exempt-Modells vorgeschlagen: das „Dual Use-Konzept“.

Das „Dual Use“-Konzept berücksichtigt den Steamcracker als einzigen Schritt des Prozesses. Es wird jedoch deutlich, dass es in Realität mehr Schritte gibt: alle Prozesspunkte, an denen potenziell „Dual-Use-Produkte“ geltend gemacht werden können, sind in Bild 13 mit einer „Sonne“ markiert. In der Realität kann eine Nicht-Kraftstoff-Verwendung für Substanzen wie Schmiermittel und Bitumen erst nach der Ölraffination nachgewiesen werden. Und erst nach dem



**Bild 13:** Hier wird die aufwendige Entstehung, Verarbeitung und Verwendung im Steamcracker von Pyrolyse-Öl gezeigt. An jeder Stelle des Prozesses, markiert mit einer „Sonne“, entstehen verschiedene Fraktionen, die entweder zu Polymeren, Nebenprodukten oder Kraftstoffen weiterverarbeitet werden – je nach Qualität (ECOS 2024).

Steamcracker kann eine Nicht-Kraftstoff-Verwendung für Kunststoff-Vorprodukte (Monomere) in der Realität geltend gemacht werden. Es ist üblich, dass Öl zurück „wandert“, d.h. ein Teil der Nicht-Monomer-Produktion des Steamcrackers wird zur Aufbereitung zurück zur Ö Raffinerie geschickt. Normalerweise werden etwa 30 % des Inputs der Ö Raffination zu Naphtha. Daraus wandelt der Steamcracker etwa 30 % dieses Naphtha-Ersatzstoffes zu Ethylen um. Von den 100 % Kunststoff, die der Pyrolyse zugeführt werden, werden also letztendlich 10 % zu Kunststoffmonomeren verarbeitet. Die restlichen 90 % werden als „Dual Use-Produkte“ betrachtet, darunter auch der Teil, der zur Raffinerie zurückgeschickt und einer weiteren Behandlung unterzogen wird, um zu Kraftstoffen verarbeitet zu werden. Bei jedem Teilverarbeitungsschritt entstehen schwerere Fraktionen, die zu anderen Produkten oder Kraftstoff weiterverarbeitet werden.

NGOs fordern, dass die genaue und angemessene Zuteilung von Krediten für Rezyklate erst nach der Polymerisation und der Umwandlung in Produkte stattfinden kann, denn erst dann hat ein Recycling tatsächlich stattgefunden. Es sollte bei Anwendung dieses Modells eine proportionale Abzinsung der Verluste an Brennstoff entlang des Weges erfolgen (ECOS, ZWE & Rethink Plastic 2024). Die EU-Kommission berücksichtigt im 2025 vorgelegten „Dual Use“-Vorschlag jedoch diese Kritik nicht. Dieser Vorschlag beinhaltet auch, dass die EU-Kommission der Industrie und einem Verifizierungssystem vertraut. Für die potentielle (und nicht tatsächliche) Verwendung von „Dual Use“-Produkten bekommt die Industrie dann zusätzliche Kredite gutgeschrieben, da die Kommission darauf vertraut, dass diese für Polymer-Grundstoffe genutzt werden. In dem 2025 vorgelegten „Dual Use“-Konzept werden „Dual Use“-Produkte so definiert: „Produkte, mit Ausnahme von Verlusten, die entweder zu Brennstoffen oder zu anderen Materialien als Brennstoffen verarbeitet werden“ (Europäische Kommission 2025). Mit dieser Definition können Unternehmen Zwischenprodukte, die möglicherweise zu Kunststoffen wiederaufbereitet werden, als solche ausweisen, ohne dass Gewissheit darüber besteht, dass dies tatsächlich geschieht. Diese Anteile werden dann als Rezyklat-Anteile zusätzlich gutgeschrieben.

Zero Waste Europe fordert, dass die Teilverarbeitungsschritte anhand des Massenbilanzmodells überprüft werden, um sicherzustellen, dass schwerere Fraktionen, die zu Kraftstoff werden, nicht für Angaben zum Recyclinganteil berücksichtigt werden (ECOS 2024). Der Begriff und die Definition „Dual Use“ sind daher irreführend und intransparent, da sie potenzielle (und nicht tatsächliche) stoffliche Verwendungen als Rezyklat einrechnen. Es ist möglich, dass Anteile, die zu Kraftstoffen verarbeitet werden, als Rezyklat eingerechnet werden. Der BUND lehnt diesen intransparenten Ansatz ab.

Der 2019/2020 diskutierte noch am meisten verbraucher/innenfreundliche und transparente Ansatz mit proportionaler Zuordnung wurde abgelehnt und der industriefreundlichste Ansatz letztlich verfolgt. Denn bei dem „Dual use Output“-Vorschlag bekommen Unternehmen sogar noch mehr Kredite als beim zuvor diskutierten „Fuel Use Exempt“-Vorschlag. Die Umsetzung bedeutet einerseits, dass „chemisches Recycling“ als Recycling-Methode anerkannt wird. Andererseits wird aus einer in einem delegierten Rechtsakt entstandenen sekundären Gesetzgebung, eine Methode abgeleitet, die festlegt, wie Mitgliedstaaten Recyclingquoten nachweisen. Dies soll nun die Basis für Umweltaussagen auf Endprodukten bilden. Die durch das „Dual Use“-Konzept errechneten und auf den Produkten ausgewiesenen Recyclingquoten spiegeln jedoch nicht die physisch im Produkt enthaltenen Rezyklatanteile wider, auch könnten Kraftstoffanteile als Rezyklat ausgewiesen werden. Dies bewertet der BUND als Verbraucher/innen-Täuschung. Der BUND fordert eine transparente, proportionale Zuordnung.

## 7. Zukunft des „Chemischen Recyclings“ und Alternativen

Recycling allein kann die komplexe Multikrise (Arten-, Ressourcen-, Klima-) nicht lösen, Vermeidung und Wiederverwendung sind effektiver und ressourcenschonender. Die Ressourcenkrise gehört zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Der BUND fordert Suffizienz und ein Ressourcenschutzgesetz mit konkreten und verbindliche Ressourcenschutzzielen (Vergleich: BUND-Position „Ressourcenschutz heißt drastische Verringerung des Ressourcenverbrauchs“). Für Kunststoffe fordert der BUND u.a. verbindliche Ziele zur Reduktion der Kunststoffproduktion, eine Beschränkung des Kunstoffeinsatzes und kurzlebiger Anwendungen, eine Begrenzung der Zahl an Standardkunststoffen und Additiven u.v.m. (Vergleich: BUND-Hintergrund „Plastik – Radikales Umdenken nötig“).

Laut einer Studie der OECD wird sich der globale Kunststoffverbrauch und die Produktion – sofern keine drastischen Politikwechsel eintreten – zwischen 2019 und 2060 in etwa verdreifachen, von 460 Mt auf 1.231 Mt (sog. Baseline-Szenario). Auch wenn von einem noch höheren Wachstum von Recyclingkunststoffen auszugehen ist, wird für 2060 ein Anteil an Recycling-Kunststoff von nur 12 % – gegenüber 9 % heute – erwartet (OECD 2022). Der weit überwiegende Teil der stofflichen Wiederverwertung von Kunststoffen wird heute durch werkstoffliches/mechanisches Recycling erbracht. Das „chemische Recycling“, das auch problematischen Kunststoffabfällen wie z.B. Sortierresten zugänglich sei, wird von der Industrie als Zukunftstechnologie propagiert. 2021 hatte Plastics Europe hohe Investitionen seiner Mitgliedsunternehmen angekündigt; im Jahr 2025 sollten 1,2 Millionen Tonnen neue Kunststoffe mit „chemischem Recycling“ produziert werden (Plastics Europe 2021). 2023 reduzierte der Verband die Prognose auf 900.000 Tonnen – laut NDR-Recherchen waren es 2024 jedoch deutlich weniger als 100.000 Tonnen (Baars 2025). Dies entspricht weniger als einem Prozent der europäischen Kunststoffjahresproduktion von 54,6 Megatonnen aus dem Jahr 2024 (Plastics Europe 2025).

Auch wenn einige Schätzungen aus der chemischen Industrie für die Zukunft höhere Prognosen abgeben, ist ungewiss, ob in absehbarer Zeit große Mengen an „chemisch recyceltem“ Kunststoff zur Verfügung stehen. Die tatsächliche Eignung der verschiedenen Verfahren des „chemischen Recyclings“ für eine großtechnische Umsetzung bleibt aus Sicht vieler Kritiker/innen bislang ungeklärt (Deutscher Bundestag 2024, Allen et al. 2024). Etliche NGOS haben sie in der Vergangenheit u.a. für die hohen Energieverbräuche, Schadstoffgehalte der Produkte oder fehlende Daten kritisiert und die Grenzen aufgezeigt. Auch sind die Technologien nicht neu, an ihnen wird seit Jahrzehnten geforscht. Immer wieder wurden Anlagen aufgrund wirtschaftlicher und technischer Probleme geschlossen. Auch im Jahr 2025 verwarf beispielsweise Dow eine lang angekündigte Pyrolyseanlage (Storck 2025). Zero Waste Europe stellt fest, dass auch nach 50 Jahren bisheriger Entwicklung diese Verfahren weder eine nachhaltige noch effektive Lösung für die Plastikkrise sind. Insbesondere die Pyrolyse sei teuer, ineffizient und benötige große Mengen fossiler Rohstoffe. Selbst bei optimistischer Skalierung weitere 50 Jahre in die Zukunft bleibe ein Drittel des Kohlenstoffs für den Input in Steamcracker fossilen Ursprungs, unter anderem durch die vielen systemischen Verluste von Kohlenstoff entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Veillard 2024). Dies würde Deutschlands fossile Abhängigkeit zementieren und einem Ende der Nutzung fossiler Rohstoffe wie Öl und Gas entgegenstehen.

Bezüglich Pyrolyse schätzt das Umweltbundesamt, dass Pyrolyseöl künftig nur 5–12 % des Inputs für Steamcracker in Deutschland abdecken könnte (UBA 2025).

Auf die Umweltauswirkungen und Risiken des „chemischen Recyclings“, insbesondere der Pyrolyse, welche in den vorherigen Kapiteln ausführlich beschrieben wurden, weisen viele

Organisationen mit hoher Dringlichkeit hin (Veillard 2024, Allen et al. 2024, UNEP 2024, WWF 2025, GAIA 2022). Das Center for Climate Integrity zeigt auf, dass die fossile und Plastikindustrie seit Jahrzehnten bewusst über die Möglichkeiten des Kunststoffrecyclings getäuscht hat. Interne Dokumente zeigen, dass die Industrie seit über 40 Jahren weiß, dass Recycling kein praktikabler Ausweg ist, es aber gezielt als PR-Strategie eingesetzt wurde, um regulatorische Eingriffe und Produktionsbeschränkungen zu vermeiden. Insbesondere das „chemische Recycling“ sei technisch limitiert und man wisse schon lange intern, dass Rohstoffqualität und Menge oft unzureichend sind und gemischte Kunststoffabfälle schlecht genutzt werden können, auch würden häufig Kraftstoffe produziert, und nicht neues Plastik (Allen et al. 2024).

Eine wichtige Frage beim „chemischen Recycling“ ist daher, ob und wie eine Kontrolle der Input- und Outputmaterialien gewährleistet werden kann. Dies umfasst z.B. Abfallströme, die dem mechanischen Recycling entzogen werden. Insbesondere aufgrund der schlechten Qualität der Produkte befürchten NGOs, dass die Produkte doch als Brenn- und Kraftstoffe verwendet und nicht neue Kunststoffprodukte daraus hergestellt werden (Veillard 2024, GAIA 2022). Hier sind in besonderem Maße Politik und Gesetzgebung gefragt, klare Regeln zu verabschieden, durchzusetzen und zu kommunizieren.

Des Weiteren erfordern Anlagen für „chemisches Recycling“ sehr hohe Investitionen, was zu „Lock-in“-Effekten führen kann, d.h. einem ständigen Bedarf großer Abfallmengen, um eine Kapitalrendite zu gewährleisten.

Ein vom Nordischen Ministerrat (offizielle Kooperation der Regierungen der nordischen Länder) vorgestelltes „Global Rules Scenario“ beschreibt ein ambitioniertes, international koordiniertes Maßnahmenpaket zur Beendigung der Plastikverschmutzung bis 2040. Die zentralen Forderungen sind eine Reduktion der Kunststoffproduktion (Produktionsrückgang um 30 % bis 2040) und Verbot vermeidbarer Einwegkunststoffe wie etwa flexible Mehrschichtverpackungen. Es sieht strikte Designregeln und Produktgestaltung vor, wie etwa den schrittweisen Ersatz von Verbundverpackungen durch monomaterialbasierte und

recyclebare Designs. Auch sollen problematische Materialien oder Zusatzstoffe, die Recycling behindern, verboten werden. Dies dient der Förderung einer sicheren Wiederverwendung und kosteneffizienter mechanischer Recyclingprozesse. Weiter ist der Ausbau von Wiederverwendung-/Mehrwegsystemen zentral. Mechanisches Recycling wird priorisiert. Recyclingkapazitäten sollen von 29 Mt (2019) auf insgesamt 201 Mt (2040) steigen, davon 187 Mt durch werkstoffliches/mechanisches Recycling und lediglich 14 Mt durch „chemisches Recycling“. Letzteres soll nur für jene wenigen Kunststoffabfälle eingesetzt werden, die mechanisch nicht recyclebar sind (Dies sind nur 3 % des gesamten Recyclingvolumens von 2040 nach den Berechnungen im Global Rule Scenario). Begründet wird dieser Ansatz mit Nachteilen des „chemischen Recyclings“ wie höherem Energiebedarf, geringerer Materialeffizienz, höheren Treibhausgasemissionen und möglichen Investitionsfallen („lock-in“) sowie Gesundheitsrisiken durch Emissionen. Bei einem weiteren Szenario, das ganz ohne „chemisches Recycling“ modelliert wurde, werden problematische Kunststoffmengen einer kontrollierten Entsorgung durch Müllverbrennung mit Energierückgewinnung und/oder Deponierung zugeführt – mit vertretbaren Auswirkungen (Nordic Council of Ministers 2023).

## 8. Forderungen des BUND

1. Produktion und Einsatz von Kunststoffen müssen erheblich reduziert werden. Dies gilt in besonderem Maße für kurzlebige Artikel wie Verpackungskunststoffe.
2. In allen Anwendungsfällen ist besonderes Augenmerk auf die Abfallhierarchie zu legen. Neben der Vermeidung von Kunststoffabfällen sind die Wiederverwendung, zum Beispiel über flächendeckende Pool-Mehrweg-Infrastrukturen, sowie das werkstoffliche/mechanische Recycling (= stoffliche Verwertung) anzustreben. Für letzteres fordert der BUND erhebliche Anstrengungen für ein recyclinggerechtes Produktdesign sowie den Ausbau fortschrittlicher Sammel-, Sortier- und Aufbereitungsinfrastruktur.
3. Das „chemische Recycling“ muss in der Abfallhierarchie hinter Vermeidung, Wiederverwendung und werkstofflichem Recycling an vierter Stelle eingefügt werden. Es ist dem werkstofflichen Recycling nicht gleichzusetzen, da es sowohl energetisch als auch in Bezug auf Ressourcenschonung und CO<sub>2</sub>-Emissionen nachteilig ist.
4. Die Mengen von enthaltenen Schadstoffen müssen minimiert und die Verschleppung verhindert werden.
5. Der BUND fordert die chemische Industrie auf, ihre Produktionsprozesse des „chemischen Recyclings“ im Hinblick auf Energie- und Materialverbrauch, Abfallaufkommen, Schadstoffe sowie Ausbeuten transparent und wahrheitsgemäß darzustellen. In der Bewertung dieser Verfahren sollen von der Industrie unabhängig erstellte, aber von der Industrie finanzierte, vergleichende umfassende Ökobilanzen verpflichtend sein. Die Erarbeitung dieser Ökobilanzen soll unabhängig bzw. staatlich gesteuert werden. Umweltbewertungen dürfen nicht länger durch umstrittene Gutschriften für vermeintlich vermiedene Verbrennung verzerrt werden. Das Schönrechnen des „chemischen Recyclings“ ist zu beenden.
6. Es sind solche Verfahren des „chemischen Recyclings“ abzulehnen, für die ein erheblicher Anteil fossiler Rohstoffe für die Herstellung von Rezyklatprodukten erforderlich ist. Dies gilt beispielsweise für die Pyrolyse, bei der dem entstandenen Pyrolyseöl erhebliche Mengen an Naphtha zugemischt werden.
7. Der BUND ist gegen die Verwendung von Massenbilanzierungsverfahren der Allokation (= nicht-proportionale Zuordnung von Stoffen aus dem „chemischen Recycling“ zu daraus hergestellten Produkten) und des „Dual Use“. Diese sind intransparent und stellen eine Verbraucher/innentäuschung dar. Der BUND fordert die wahrheitsgemäße, proportionale Zuordnung.
8. Der BUND lehnt einen flächendeckenden Ausbau sowie eine Förderung des „chemischen Recyclings“ mit öffentlichen Geldern ab, solange es nicht nachweislich Ressourcen- und umweltrelevante Vorteile gegenüber bestehendem werkstofflichem/mechanischem Kunststoffrecycling bietet.

# Literatur

Allen, D., Spoelman, N., Linsley, C., Johl, A. 2024. The Fraud of Plastic Recycling. How Big Oil and the plastics industry deceived the public for decades and caused the plastic waste crisis. CCI (Center for Climate Integrity) (Ed.). <https://climateintegrity.org/uploads/media/Fraud-of-Plastic-Recycling-2024.pdf>.

Baars, C., Lambrecht, O., Ondarza, V. 2025 Plastikindustrie verfehlt Recyclingziel deutlich, Tagesschau 10.04.2025 <https://www.tagesschau.de/investigativ/ndr/recycling-plastik-basf-plastics-europe-vci-umweltschutz-100.html>

BASF 2020. Evaluation of pyrolysis with LCA – 3 case studies, Sphera im Auftrag von BASF, 2020. <https://plastics-rubber.basf.com/global/en/plastics-hub/chemcycling/lca-for-chemcycling>

BAuA 2021. REACH-Info: REACH und Recycling, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2021. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Praxis/REACH-Info/REACH-Info-09>

BVSE 2025. Schließungswelle trifft Kunststoffrecyclinganlagen in Europa. Recyclingnachrichten. <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoffrecycling/nachrichten-recycling/12090-schliessungswelle-trifft-kunststoffrecyclinganlagen-in-europa.html>

BUND 2022. BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. 2022. BUND Hintergrund. BUND, Berlin. <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/bio-kunststoffe/>

BUND 2025 BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. 2025. BUND Position 79. BUND, Berlin. [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/lebensraeume/biooekonomie-nachhaltigkeitskreislaufwirtschaft-klimaschutz-ressourcenschonung-umweltpolitik-position-79-bund-2025.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/lebensraeume/biooekonomie-nachhaltigkeitskreislaufwirtschaft-klimaschutz-ressourcenschonung-umweltpolitik-position-79-bund-2025.pdf)

Cardona, N., Campuzano, F, Betancur, M., Jaramillo, L., Martínez, J.D. 2018. Possibilities of carbon black recovery from waste tyre pyrolysis to be used as additive in rubber goods. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 437 (2018) 012012 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/437/1/012012>

CDU & SPD 2025. Verantwortung für Deutschland – Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 2025. [https://www.koalitionsvertrag2025.de/sites/www.koalitionsvertrag2025.de/files/koav\\_2025.pdf](https://www.koalitionsvertrag2025.de/sites/www.koalitionsvertrag2025.de/files/koav_2025.pdf)

Conversio Market & Strategy 2024. Stoffstrombild Kunststoff in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Kurzfassung, November 2024 <https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv/studien/Kurzfasung%20Stoffstrombild%202023.pdf>

Deutscher Bundestag 2024. Anlagenkonvolut 72. Sitzung am 15. Mai 2024. [https://www.bundestag.de/resource/blob/1059452/anlagenkonvolut\\_72\\_sitzung.pdf](https://www.bundestag.de/resource/blob/1059452/anlagenkonvolut_72_sitzung.pdf)

Draghi, M. 2024. The future of European competitiveness. [https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/draghi-report\\_en](https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/draghi-report_en)

Ebara o.J. Ebara Environmental Plant – Gasification Technologies [https://www.eep.ebara.com/en/business\\_technology/technology\\_3.html](https://www.eep.ebara.com/en/business_technology/technology_3.html)

ECHA 2021. REACH requirements need to be considered in chemical recycling ; ECHA NewsNr 21/26 <https://echa.europa.eu/-/reach-requirements-need-to-be-considered-in-chemical-recycling>

ECOS, Rethink Plastic, Zero Waste Europe 2024. Technical paper 'Dual-use output' issues for accounting recycled plastic content. <https://ecostandard.org/publications/dual-use-output-accounting-recycled-plastic/>

Erkmen, B, Ozdogan, A., Ezdesir, A., Celik, G. 2023. Can Pyrolysis Oil Be Used as a Feed-stock to Close the Gap in the Circular Economy of Polyolefins? Polymers 2023, 15, 859. <https://doi.org/10.3390/polym15040859>

Europäische Kommission 2020. Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft – Für ein sauberes und wettbewerbsfähigeres Europa.

Europäische Kommission 2025. Commission Implementing Decision (EU) laying down rules for the application of Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council as regards the calculation, verification and reporting of data on recycled plastic content in single-use plastic beverage bottles and repealing Commission Implementing Decision (EU) 2023/2683. [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13467-Single-use-plastic-beverage-bottles-EU-rules-for-calculating-verifying-and-reporting-on-recycled-plastic-content\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13467-Single-use-plastic-beverage-bottles-EU-rules-for-calculating-verifying-and-reporting-on-recycled-plastic-content_en)

Euwid 2024. Shell nimmt Ziel für chemisches Recycling zurück, Recycling und Entsorgung Pressemeldung 18.7.2024. <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/shell-nimmt-ziel-fuer-chemisches-recycling-zurueck/>

GAIA 2022. Plastic-to-Fuel: A losing Proposition, 2022 [https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2024/07/PTF\\_a-losing-proposition\\_2024-update.pdf](https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2024/07/PTF_a-losing-proposition_2024-update.pdf)

Garcia-Gutierrez, P., Amadei, A.M., Klenert, D., Nessi, S., Tonini, D., Tosches, D., Ardente, F., Saveyn, H. 2023. Environmental and economic assessment of plastic waste recycling. A comparison of mechanical, physical, chemical recycling and energy recovery of plastic waste. JRC Technical Report 132067. <https://doi.org/10.2760/0472>

García-Gutiérrez, P., Amadei, A.M., Klenert, D., Nessi, S., Tonini, D., Tosches, D., Ardente, F., Saveyn, H.G.M., 2025. Environmental and Economic Assessment of Plastic Waste Recycling and Energy Recovery Pathways in the EU. Resources, Conservation and Recycling 215, 108099. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108099>

Gendell, A., Lahme, V. 2022. Feedstock Quality Guidelines for the Pyrolysis of Plastics Waste, Eunomia Report 2022. <https://eunomia.eco/reports/feedstock-quality-guidelines-for-pyrolysis-of-plastic-waste/>

- Hoffmann, H. 2020. Einschätzung des BUND zum „chemischen Recycling“. Müll und Abfall Ausgabe 4 / 2020.
- Höhne, S. 2024: Dow-Recyclingwerk in Böhlen: Großprojekt kommt nicht voran, Mitteldeutsche Zeitung 5.11.2024. <https://www.mz.de/mitteldeutschland/wirtschaft/dow-recyclingwerk-in-bohlen-grossprojekt-kommt-nicht-voran-3944270>
- Jepsen, D., Wirth, O., Reihlen, A., Hauschke, F. 2024. Dialoge zum sachgerechten Umgang mit besorgniserregenden Stoffen in der Kreislaufwirtschaft, UBA-Text 27/2024. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/27\\_2024\\_texte\\_dialoge\\_zum\\_sachgerechten\\_umgang\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/27_2024_texte_dialoge_zum_sachgerechten_umgang_0.pdf)
- Klatte et al. 2023. Unternehmerforum Chemisches Recycling (UfCR): Massenbilanzierung für das chemische Recycling, Think Tank industrielle Ressourcenstrategien. [https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2023/10/RZ\\_THINKTANK\\_Massenbilanzierung-chemisches-Recycling\\_A4\\_DE\\_Web-1.pdf](https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2023/10/RZ_THINKTANK_Massenbilanzierung-chemisches-Recycling_A4_DE_Web-1.pdf)
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg o.J. Das REACH-System – Ausnahmen. <https://www.reach.baden-wuerttemberg.de/reach-system/ausnahmen>
- Maga, D.; Aryan, V.; Blömer, J. 2023. A comparative life cycle assessment of tyre recycling using pyrolysis compared to conventional end-of-life pathways Resources. Conservation & Recycling 199 (2023) 107255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107255>
- Maisels, A., Hiller, A., Simon, F. 2021. Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven, Chemie Ingenieur-technik 93 (2021), 11, S. 1742.1750 <https://doi.org/10.1002/cite.202100115>
- Möck, A., Bulach, W., Betz, J. 2022. Climate impact of pyrolysis of waste plastic packaging in comparison with reuse and mechanical recycling, Ökoinstitut e.V. im Auftrag von Zero Waste Europe. [https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2022/09/zwe\\_2022\\_ExecSummary\\_climat\\_impact\\_\\_pyrolysis\\_plastic\\_packaging.pdf.pdf](https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2022/09/zwe_2022_ExecSummary_climat_impact__pyrolysis_plastic_packaging.pdf.pdf)
- Mura 2025. The next Generation of Plastic Recycling, Broschüre 2025. <https://muratechnology.com/app/uploads/2025/04/Mura-Technology-2025-Brochure.pdf>
- Nageler-Petritz, H. 2023. Bioplastics and composting: Not a Love match, WMW 1/2023, 12-16.
- Nordic Council of Ministers 2023. Towards Ending Plastic Pollution by 2040 – 15 Global Policy Interventions for Systems Change. <https://pub.norden.org/temanord2023-539/global-rules-scenario.html>
- OECD. 2022. Global Plastics Outlook – Policy Scenarios to 2060. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.
- Plastics Europe 2021. Plastics – the Facts 2021, An analysis of European plastics production, demand and waste data. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>
- Plastics Europe 2023. Massenbilanzen auf einen Blick. [https://plasticseurope.org/de/wp-content/uploads/sites/3/2023/11/Massebilanzen-auf-einen-Blick\\_TwoPager-2.pdf](https://plasticseurope.org/de/wp-content/uploads/sites/3/2023/11/Massebilanzen-auf-einen-Blick_TwoPager-2.pdf)
- Plastics Europe 2024. Massebilanzen auf einen Blick. <https://plasticseurope.org/de/knowledge-hub/massebilanzen-auf-einen-blick/>
- Plastics Europe 2025: Plastics the Fast Facts 2025. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2025/>
- Pivato, A., Gohar, H., Antille, D.L., Schievano, A., Beggio, G., Reichardt, P., Maria, F.D., Peng, W., Castegnaro, S., Lavagnolo, M.C. 2024. Air-Polluting Emissions from Pyrolysis Plants: A Systematic Mapping. Environments 2024, 11, 149. <https://doi.org/10.3390/environments11070149>
- Quicker, P. 2023. Status, potentials and risks of Chemical recycling of waste plastics. Swiss Federal Office for the Environment 2023.
- Quicker, P.; Seitz, M. 2024. Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings – UBA-Text 154/2024.
- Rollinson, A. 2023. Leaky Loop Recycling: A technical correction on the quality of pyrolysis oil made from plastic waste, Zero Waste Europe Report. <https://zerowasteurope.eu/library/leaky-loop-recycling-a-technical-correction-on-the-quality-of-pyrolysis-oil-made-from-plastic-waste/>
- Schlummer, M; Fell, T.; Mäurer, A; Altnau, G. 2020. Die Rolle der Chemie beim Recycling, Kunststoffe 6 / 2020. <https://www.creasolv.de/de/presse/die-rolle-der-chemie-beim-recyclen.html>
- Shan, C., Andyaswargo, A.H., Onoda, H. 2023. Environmental Impact of Plastic Recycling in Terms of Energy Consumption: A Comparison of Japan's Mechanical and Chemical Recycling Technologies. Energies 2023, 16, 2199 <https://doi.org/10.3390/en16052199>
- Singla, V. 2025. Major gaps in chemical recycling life cycle assessments (LCAs), Universität San Francisco, 2025. [https://drive.google.com/file/d/19WFKXU2GCEkQ50Q-zFIO\\_uU5VnW8tB24/view](https://drive.google.com/file/d/19WFKXU2GCEkQ50Q-zFIO_uU5VnW8tB24/view)
- Storck 2025: Dow verwirft chemisches Recyclingprojekt mit Mura in Böhlen, EUWID Recycling und Entsorgung, Ausgabe 34/2025.
- Tabrizi, S., Rollinson, A., Hoffmann, M., Favoino, E. 2020. Understanding the Environmental Impacts of Chemical Recycling / Ten concerns with existing life cycle assessments, Zero waste Europe Report. [https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2020/12/zwe\\_jointpaper\\_UnderstandingEnvironmentalImpactsofCREn.pdf](https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2020/12/zwe_jointpaper_UnderstandingEnvironmentalImpactsofCREn.pdf)
- Uekert, T., Singh, A., DesVeaux, J., Ghosh, T., Bhatt, A., Yadav, G., Afzal, S., Walzberg, J., Knauer, K., Nicholson, S., Beckham, G., Carpenter, A. 2023. Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics. ACS Sustainable Chem.Eng. 2023, 11, 965-978. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05497>

## HINTERGRUND CHEMISCHES RECYCLING

UNEP 2024. Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste -Turning rubbish into a resource  
[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44939/global\\_waste\\_management\\_outlook\\_2024.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44939/global_waste_management_outlook_2024.pdf)

Veillard, L. 2024. Fifty years: chemical recycling's fading promise – Executive Summary, Zero Waste Europe 2024.  
[https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2024/11/ZWE\\_Nov24\\_FiftyYearsChemicalRecycling\\_ExecSummary.pdf](https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2024/11/ZWE_Nov24_FiftyYearsChemicalRecycling_ExecSummary.pdf)

Vogel, J. 2025. Politische Schlussfolgerungen der UBA-Studie „Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecycling“, Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie 2025.

Worzewski, T. 2020. Zurück in den Kreislauf. Spektrum.de 7.10.2020.  
<https://www.spektrum.de/news/loest-chemisches-recycling-das-plastikproblem/1777014>

WWF 2025. Impulspapier: Chemisches Recycling im Sektor Verpackung.  
<https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/Impulspapier-Chemisches-Recycling.pdf>

Zeller, M., Leibold, H., Netsch, N., Richter, F., Stapf, D. 2021. Chemisches Recycling kunststoffhaltiger Abfälle - Das Potenzial der Pyrolyse. Ingenieur Technik 93 (2021) 11, pp. 1763-1770 <https://doi.org/10.1002/cite.202100102>

Zeller, M., Leibold, H., Netsch, N., Richter, F., Stapf, D. 2020. Chemisches Recycling kunststoffhaltiger Abfälle - Das Potenzial der Pyrolyse. Chemie Ingenieur Technik 92(9):1260-1260.  
<https://doi.org/10.1002/cite.202055383>

## Publikationen des Wissenschaftlichen Beirates

### Position

|                                                                             |                   |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 79 Bioökonomie                                                              | 2025              |
| 78 Flächenkonkurrenz in Deutschland                                         | 2025              |
| 77 Gentechnik in Landwirtschaft und Naturschutz                             | 2025              |
| 76 Klärschlamm – Nährstoffquelle und Schadstoffsenke                        | 2023              |
| 75 Geoengineering oder ökologischer Klimaschutz                             | 2023              |
| 74 Ressourcenschutz = drastische Verringerung des Ressourcenverbrauchs      | 2023              |
| 73 Zukunftsfähige Landwirtschaft – umweltverträglich, tiergerecht, sozial   | 2022              |
| 72 Freiflächen-Solaranlagen                                                 | 2022              |
| 71 Meeres- und Küstennaturschutz der Nord- und Ostsee                       | 2021              |
| 70 Arzneimittel in der Umwelt                                               | 2020              |
| 69 Herausforderungen für eine nachhaltige Stoffpolitik (2. Auflage)         | 2023              |
| 68 Strom und Wärme aus Tiefengeothermie                                     | 2019              |
| 67 Tiefseebergbau                                                           | 2018              |
| 66 Konzept für eine zukunftsfähige Energieversorgung                        | 2017              |
| 65 Ökonomische Bewertung und Instrumente im Natur- und Biodiversitätsschutz | 2015              |
| 64 Klimagerechtigkeit                                                       | aktualisiert 2019 |
| 63 Energieeffizienz im Wärme- und Strombereich                              | 2015              |

### Standpunkt

|                                                                                         |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 24 Die soziale Dimension von Umwelt- und Naturschutz                                    | 2026 |
| 23 Stoffbewertung im Lichte des Vorsorgeprinzips: Persistenz, Gefährlichkeit und Risiko | 2026 |
| 22 Carbon Capture and Utilization                                                       | 2026 |
| 21 Agroforstsysteme – Gehölze in der Agrarlandschaft                                    | 2025 |
| 20 Wölfe und Weidetiere: Nebeneinander statt Gegeneinander                              | 2024 |
| 19 Wärmewende und Wärmeplanung                                                          | 2024 |
| 18 Energetische Nutzung von Holz                                                        | 2024 |
| 17 Weidehaltung und grünlandbasierte Produktion heimischer Futtermittel                 | 2023 |
| 16 CCS: Falsche Weichenstellung verhindern!                                             | 2023 |
| 15 Wasserstoffstrategie                                                                 | 2022 |
| 14 Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen                                         | 2022 |
| 13 Fangverbot für den Europäischen Aal jetzt notwendig                                  | 2022 |
| 12 Unterwasserlärm – Gefahr für Lebewesen im Meer                                       | 2021 |
| 11 Mikroschadstoff-Strategie                                                            | 2017 |
| 10 Stromeinsatz zu Heizzwecken                                                          | 2016 |
| 09 Kernforderungen zur Novellierung des Bergrechts                                      | 2015 |
| 08 Kraft-Wärme-Kopplung                                                                 | 2015 |
| 07 Neobitoa                                                                             | 2015 |

### Hintergrund

|                                                                 |      |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| Chemisches Recycling                                            | 2026 |
| Plastik – Radikales Umdenken nötig                              | 2025 |
| Heimischer Bergbau                                              | 2025 |
| „Bio“-Kunststoffe                                               | 2022 |
| Fluorchemikalien: Langlebig, gefährlich, vermeidbar             | 2021 |
| Hochwasserschutz fängt bei den Böden an                         | 2021 |
| Ausbau Windenergie - Folgen für Meeres- und Küstennaturschutz   | 2021 |
| Nachhaltige Stoffpolitik zum Schutz von Klima und Biodiversität | 2021 |
| Grundlagen und Konzepte einer Energiewende 2050                 | 2015 |
| Ressourcenschutz                                                | 2015 |



Eine Übersicht der BUND-Positionen finden Sie unter:  
[www.bund.net/ueber-uns/organisation/wissenschaftlicher-beirat](http://www.bund.net/ueber-uns/organisation/wissenschaftlicher-beirat)



Eine Übersicht aller Publikationen des BUND finden Sie unter:  
[www.bund.net/service/publikationen](http://www.bund.net/service/publikationen)

## Der BUND steht für Fakten

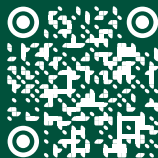
Hunderte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erarbeiten die fundierten Positionen des BUND – unbestechlich und ehrenamtlich. Sie sind in Arbeitskreisen und dem wissenschaftlichen Beirat organisiert und geben drei Publikationsreihen heraus:

Die **Position** legt die Bewertung des BUND zu einem Thema dar, begründet es wissenschaftlich und leitet fundierte und konkrete, umsetzbare Forderungen ab.

Der **Hintergrund** ergänzt die Position mit aktuellen Fakten und Beispielen.

Der **Standpunkt** dient der Positionierung und Präzisierung zu einem aktuellen Thema. Er will Debatten in Verband und in der Öffentlichkeit initiieren und vertiefen.

Unterstützen Sie  
unsere Arbeit:  
[www.bund.net/  
unterstuetzen](http://www.bund.net/unterstuetzen)



### Impressum

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V. (BUND)

Bundesgeschäftsstelle

Kaiserin-Augusta-Allee 5 | 10553 Berlin

Tel. +49 30 27586-40 | [bund@bund.net](mailto:bund@bund.net)

Vorstandsvorsitz: Olaf Bandt | V. i. S. d. P.: Nicole Anton

Autorinnen: Janine Korduan und Dr.-Ing. Eva Bittmann, herausgegeben vom

Bundesarbeitskreis Abfall und Rohstoffe unter Einbeziehung vieler wertvoller

Kommentare des Bundesarbeitskreises Umweltchemikalien/Toxikologie, insbesondere

durch Hon.-Prof. Dr. Markus Große Ophoff, freigegeben vom Bundesarbeitskreis Abfall und Rohstoffe des BUND am 17.02.2026.

Juli 2026 | [www.bund.net](http://www.bund.net)

