

EINE METASTUDIE ZU ÖKOBILANZEN CHEMISCHER RECYCLINGVERFAHREN

Autoren
Teresa Oehlcke,
Rebekka Volk,
Dieter Stapf



Inhaltsverzeichnis

Abstract	4
1. Einleitung	5
2. Hintergrund	6
2.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	7
2.2. Sachbilanz [Life Cycle Inventory, LCI]	8
2.3. Wirkungsabschätzung [Life Cycle Impact Assessment, LCIA]	9
3. Metastudie	10
3.2. Qualitative Erkenntnisse der Metastudie	13
3.2.1. Überblick über untersuchte Verfahren	13
3.2.2. Inputmaterialien bzw. Abfallfraktionen	14
3.2.3. Methodische Eckdaten der LCAs	16
3.3. Quantitative Erkenntnisse aus der Metastudie	17
3.4. Einordnung der Ergebnisse im internationalen Forschungsstand	18
4. Implikationen für künftige Forschung, Industrie und Politik	19
Literaturverzeichnis	20

Vorwort

Die Transformation hin zu einer klimaneutralen und ressourcenschonenden Wirtschaft ist eine der zentralen politischen und gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Im Zentrum dieser Transformation steht die Frage, wie wir mit den stetig wachsenden Mengen an Kunststoffabfällen umgehen. Während mechanisches Recycling seit Jahren etabliert ist, wird das chemische Recycling zunehmend als strategische Ergänzung diskutiert – insbesondere im Kontext der europäischen Kreislaufwirtschafts- und Klimaziele.

Die Europäische Union hat mit dem „Green Deal“ und dem „Circular Economy Action Plan“ ambitionierte Vorgaben formuliert, die eine drastische Reduktion von Abfällen, eine Steigerung der Recyclingquoten und eine Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen verlangen. Chemisches Recycling wird dabei von Teilen der Industrie als Schlüsseltechnologie positioniert, um schwer recycelbare Kunststofffraktionen in den Kreislauf zurückzuführen und gleichzeitig die Versorgungssicherheit für hochwertige Rezyklate zu gewährleisten. Kritiker hingegen verweisen auf hohe Energiebedarfe, unklare Skalierbarkeit und die Gefahr, dass chemisches Recycling als „Feigenblatt“ für eine weiterhin lineare Kunststoffproduktion missbraucht werden könnte.

Vor diesem Hintergrund kommt Lebenszyklusanalysen [Life Cycle Assessments, LCA] eine besondere politische Bedeutung zu. Sie sind nicht nur wissenschaftliche Bewertungsinstrumente, sondern auch Grundlage für regulatorische Entscheidungen, Investitionsstrategien und öffentliche Debatten. Die Ergebnisse solcher Analysen beeinflussen, ob chemisches Recycling als förderwürdige Technologie anerkannt wird, ob es in EU-Taxonomien aufgenommen wird und welche Rolle es in nationalen Abfall- und Klimastrategien spielen kann.

Die vorliegende Metastudie bündelt die Erkenntnisse aus 85 LCA-Studien zum chemischen Recycling. Sie zeigt auf, wo Konsens besteht, wo methodische Divergenzen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen – und welche politischen Implikationen sich daraus ableiten lassen. Damit liefert sie nicht nur eine wissenschaftliche Bestandsaufnahme, sondern auch eine strategische Orientierung für Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft.

Unser Ziel ist es, die Debatte zu versachlichen, Transparenz über Chancen und Grenzen des chemischen Recyclings herzustellen und so eine fundierte Grundlage für die Weichenstellungen zu schaffen, die in den kommenden Jahren über die Richtung der europäischen Kreislaufwirtschaft entscheiden werden.



Dr. Christian Kühne
Geschäftsführer
THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Abstract:

Chemische Recyclingverfahren werden zunehmend als ergänzende Option zur Behandlung von Kunststoffabfällen diskutiert – insbesondere für Fraktionen, bei denen mechanisches Recycling an technische Grenzen stößt. Verfahren wie Pyrolyse, Gasifizierung oder Solvolyse ermöglichen die Rückgewinnung von Kohlenstoff aus bislang schwer verwertbaren Kunststoffabfällen und können somit einen Beitrag zur Defossilisierung der chemischen Industrie leisten.

Vor diesem Hintergrund rückt die ökologische Bewertung dieser Technologien in den Fokus. Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessments, LCA) bilden hierfür den methodischen Rahmen und erlauben eine systematische Quantifizierung und einen Vergleich der Umweltwirkungen der jeweiligen Abfallbehandlungsverfahren. In den letzten Jahren wurden zahlreiche LCA-Studien mit unterschiedlichen Abfallströme, Systemgrenzen und Annahmen erstellt; eine systematische Übersicht fehlte jedoch. Die vorliegende Broschüre fasst die Ergebnisse einer am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des Thinktanks „Industrielle Ressourcenstrategien“ durchgeführten Metastudie zusammen. Ziel war es, die bestehenden LCA-Studien zum chemischen Recycling von Kunststoffabfällen zu identifizieren, systematisch vergleichend auszuwerten und methodische Herausforderungen aufzuzeigen.

Im Rahmen der Metastudie wurden zahlreiche LCA-Studien identifiziert, aber anhand von verschiedenen, eingangs definierten Kriterien konnten nur 22 wissenschaftliche Studien in die Auswertung einbezogen werden. Die ausgewählten Studien unterscheiden sich teils erheblich hinsichtlich der betrachteten Verfahren, der verwendeten Inputmaterialien, der funktionellen Einheiten, der definierten Systemgrenzen und der Substitutionsannahmen. Die daraus resultierende Bandbreite der Ergebnisse – insbesondere beim Treibhauspotenzial – verdeutlicht die derzeit begrenzte Vergleichbarkeit und Aussagekraft einzelner LCAs. Aktuell lässt sich auf Grundlage der vorliegenden Studien kaum eine übergeordnete quantitative technologiebezogene Bewertung ableiten, die politische Entscheidungsprozesse zur Auswahl geeigneter Recyclingpfade fundiert unterstützen könnte. Stattdessen zeigt sich der Bedarf an standardisierten und systematischen Bewertungsmethoden, die insbesondere den Vergleich zwischen unterschiedlichen technischen Verfahren für definierte Kunststoffabfallströme ermöglichen.

Abschließend erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse im internationalen Forschungskontext sowie Empfehlungen für zukünftige LCA-Studien und Bewertungen. Dazu zählen die Notwendigkeit für methodisch konsistente und transparente Rahmensetzungen, industrienaher und nachvollziehbarer Datengrundlagen und einheitlicher Annahmen zur Substitution fossiler Rohstoffe. Nur so können die ökologischen Auswirkungen chemischer Recyclingverfahren belastbar bewertet werden und die Ergebnisse in politische und industrielle Entscheidungsprozesse einbezogen werden.

1. Einleitung

Die Transformation zu einer kreislauforientierten Kunststoffwirtschaft stellt eine zentrale Herausforderung für Industrie und Politik dar. Chemische Recyclingverfahren wie Pyrolyse, Vergasung, Solvolyse und Depolymerisation werden zunehmend als ergänzende Verwertungsoption zu etablierten Verfahren betrachtet. Sie eröffnen Potenziale zur stofflichen Nutzung schwer verwertbarer Kunststoffabfälle und tragen zur Substitution fossiler Rohstoffe bei.

Mit der Entwicklung neuer chemischer Recyclingtechnologien rückt jedoch auch zunehmend ihre ganzheitliche Bewertung in den Fokus. Neben technischer und ökonomischer Machbarkeit, spielt die ökologische Vorteilhaftigkeit gegenüber konventionellen Verfahren eine zentrale Rolle. Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessments, LCAs) stellen hierfür einen etablierten methodischen Rahmen dar. Sie ermöglichen eine umfassende Bewertung von Umweltauswirkungen und können eine potentielle Vergleichsbasis schaffen.^[1] Die vorliegende systematische Analyse verfügbarer LCA-Studien zu chemischen Recyclingverfahren von Kunststoffabfällen soll eine strukturierte und vergleichende Übersicht über den Stand der Forschung und Entwicklung liefern und zeigt vor allem aktuelle methodische Herausforderungen. Sie soll zudem Impulse für künftige LCA-Studien und Bewertungen technischer Recyclingverfahren von Kunststoffabfällen setzen.

Grundlage der Metastudie ist eine im Frühjahr 2023 durchgeführte Datenbankenrecherche sowie eine anschließende Analyse, die im Rahmen des Thinktanks „Industrielle Ressourcenstrategien“ vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt wurde.

2. Hintergrund

Um bestehende Studien zur ökologischen Bewertung chemischer Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle zu erfassen und vergleichend auszuwerten, wurde eine systematische Literaturanalyse durchgeführt. Die Auswahl und Bewertung der ausgewählten LCA-Studien basierte auf definierten Relevanzkriterien und einer Screening-Methodik, die in Kapitel 3.1 vorgestellt werden. Da sich die Studien entsprechend ausschließlich auf die LCA-Methode stützen, ist ein Verständnis dieser Bewertungsmethode essenziell, um die Ergebnisse der Metastudie nachvollziehen zu können. In diesem Kapitel wird daher zunächst die LCA als wissenschaftlich anerkannte Methode zur Umweltbewertung sowie die einzelnen Phasen des Bewertungsprozesses vorgestellt.

Die LCA umfasst gemäß den international gültigen Normen ISO 14040 [2] und 14044 [3] vier miteinander verknüpfte Phasen: die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, die Sachbilanz [Life Cycle Inventory, LCI], die Wirkungsabschätzung [Life Cycle Impact Assessment, LCIA] sowie die abschließende Auswertung. Diese Phasen sind jedoch nicht strikt linear, sondern iterativ miteinander verknüpft – wie in Abbildung 1 dargestellt.

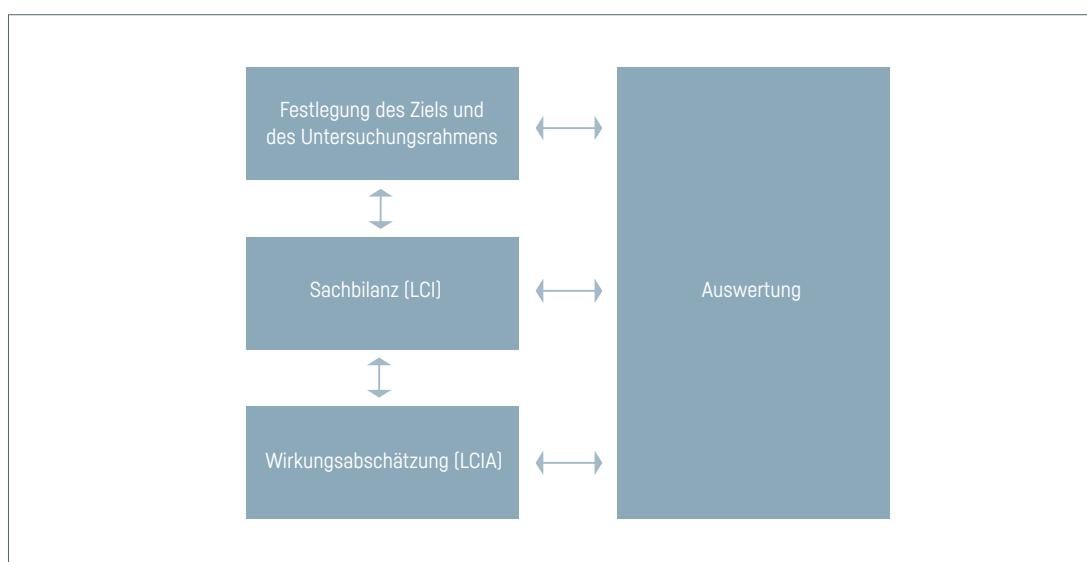


Abbildung 1: Phasen einer Lebenszyklusanalyse (nach EN ISO 14040/44)

2.1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Im ersten Schritt wird definiert, welche Fragestellung adressiert werden soll, welche Systemgrenzen zu setzen sind und was als Bezugsgröße [funktionelle Einheit] dient.

Ziel und Zweck der LCA: Zu Beginn wird festgelegt, wofür die LCA durchgeführt wird. Das kann beispielsweise eine reine Umweltbewertung eines oder mehrerer Produkte, Einzelprozesse, oder Prozessketten [Wertschöpfungsketten] beziehungsweise die vergleichende Analyse von Umweltwirkungen für technologiebezogene Gegenüberstellungen sein.

Festlegung der Systemgrenzen: Die Festlegung der Systemgrenzen bestimmt, welche Inputs, Outputs, Prozesse und Lebenszyklusphasen in die Analyse einbezogen werden. Die Norm schlägt keine Methodiken vor, anhand welcher Systemgrenzen zu kategorisieren oder einzuteilen sind. In der Praxis wird allerdings je nach Zielsetzung meist eine der folgenden Abgrenzungen gewählt:

- a) Gate-to-Gate: Betrachtung eines abgegrenzten Prozessschritts innerhalb eines Produktionsystems, z. B. ausschließlich die chemische Recyclinganlage.
- b) Cradle-to-Gate: Umfasst die vorgelagerten Lebenszyklusphasen von der Rohstoffgewinnung [„cradle“] bis zur Herstellung des fertigen Produkts, d.h. zum Werkstor [„gate“].
- c) Cradle-to-Grave: Betrachtung des vollständigen Lebenszyklus, einschließlich Nutzung und End-of-Life bzw. Entsorgung.

Bestimmung der funktionellen Einheit: Neben der Festlegung der Systemgrenzen ist auch die Wahl der funktionellen Einheit entscheidend für die Aussagekraft und die Vergleichbarkeit einer LCA. Sie beschreibt die Bezugsgröße, auf die sich alle Input- und Outputströme sowie ermittelte Umweltwirkungen beziehen. Die Wahl der funktionellen Einheit beeinflusst, mit welchen Referenzprozessen oder -produkten die Ergebnisse verglichen werden können. In LCA-Studien zum chemischen Recycling können, wie in Abbildung 2 visualisiert, zwei Perspektiven eingenommen werden:

- a) Produktbezogene Perspektive: beispielsweise 1 kg Kunststoffprodukt [einer bestimmten Sorte und/oder Qualität], mit Fokus auf die Substitution von fossilen Rohstoffen durch Rezyklate [oder alternativer Rohstoffe] in der Produktion.
- b) Abfallverwertungsbezogene Perspektive: beispielsweise 1 kg Kunststoffabfall [einer bestimmten Fraktion oder Zusammensetzung], mit Fokus auf die Minimierung der Umweltwirkungen seiner Behandlung durch alternative Verwertungs-, Recycling- oder Entsorgungsoptionen.

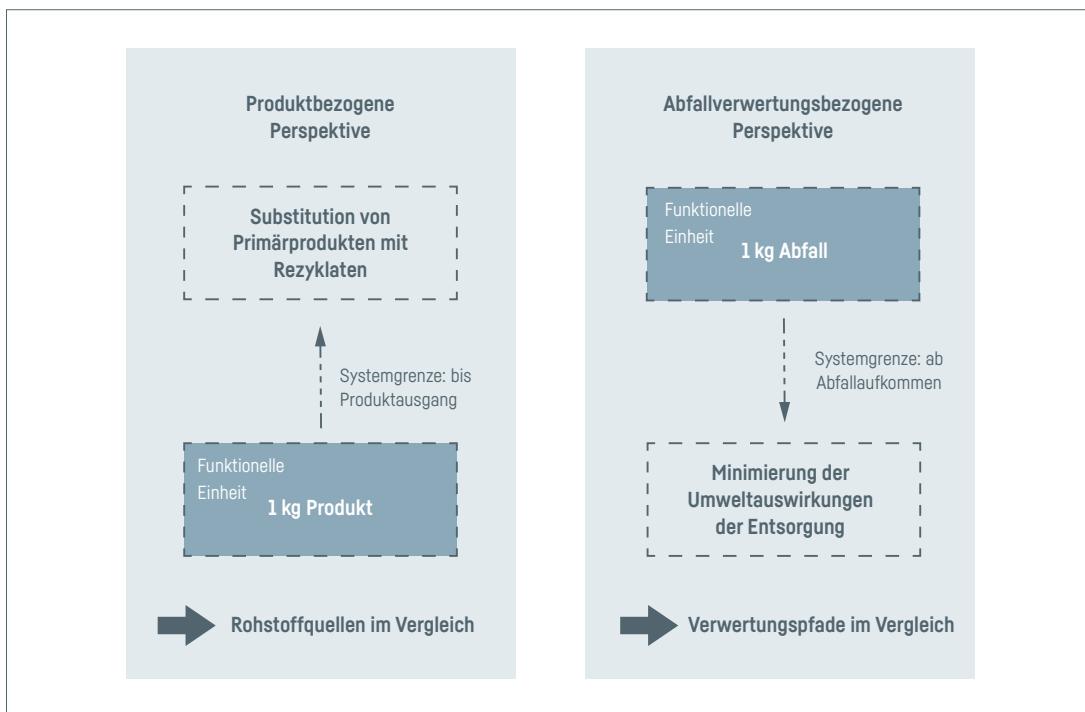


Abbildung 2: Bewertungsansätze in der Ökobilanzierung chemischer Recyclingpfade.

2.2. Sachbilanz [Life Cycle Inventory, LCI]

Die Sachbilanz dient der systematischen Erfassung und Quantifizierung aller Stoff- und Energieströme im untersuchten System. Gemäß ISO 14040/44 werden in diesem Schritt alle Input- und Outputströme eines Systems, bezogen auf die funktionelle Einheit, systematisch erfasst. Beispiele für Input- und Outputdaten finden sich in Tabelle 1. Als Datenbasis können, je nach Untersuchungsrahmen, Primärdaten, Sekundärdaten oder beide kombiniert verwendet werden – etwa aus Pilotanlagen, Industrieprozessen oder etablierten Hintergrunddatenbanken wie Eco-invent oder GaBi. Ziel der Sachbilanz ist eine konsistente Datengrundlage für die Wirkungsabschätzung. In LCA-Studien können Inputs oder Outputs gemäß der Cut-off-Methode ausgeschlossen werden, beispielsweise wenn sie nur in sehr geringen Mengen auftreten oder keine belastbaren Daten vorliegen. Solche Ausschlüsse müssen jedoch transparent dokumentiert werden, um die Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der Studie zu gewährleisten.

Tabelle 1: Beispiele für Input- und Outputdaten in der Sachbilanz einer Lebenszyklusanalyse (LCA).

Inputdaten	Outputdaten
<ul style="list-style-type: none"> - Kunststoffabfall (z.B. Zusammensetzung, Masse) - Energieeinsatz (z.B. Strom, Wärme, Primärenergie) - Prozesschemikalien (z. B. Wasserstoff, Katalysatoren) - Vorbehandlung (z. B. Zerkleinerung, Trocknung) 	<ul style="list-style-type: none"> - Hauptprodukte (z. B. Pyrolyseöl, Gas) - Nebenprodukte - Emissionen in Luft, Wasser und Boden - Abwasser, Abfall, Abwärme und Verluste

2.3. Wirkungsabschätzung [Life Cycle Impact Assessment, LCIA]

In der Wirkungsabschätzung [LCIA], werden die in der Sachbilanz erfassten Stoff- und Energieströme mit sogenannten Charakterisierungsfaktoren verknüpft und Umweltwirkungskategorien wie beispielsweise Klimawandel, Versauerung oder Ökotoxizität zugeordnet [s. Abbildung 3]. Dafür stehen verschiedene LCIA-Methoden zur Verfügung. Diese LCIA-Methoden unterscheiden sich in den abgedeckten Wirkungskategorien, der geographischen Relevanz sowie der wissenschaftlichen Grundlage der Modelle. Das Joint Research Centre [JRC] der Europäischen Kommission empfiehlt die Environmental Footprint 3.1 [EF 3.1] als Methode für die Wirkungsabschätzung in europäischen LCA-Studien. [4]

Auf dieser methodischen Grundlage erfolgte die systematische Analyse dargestellt im folgenden Kapitel.

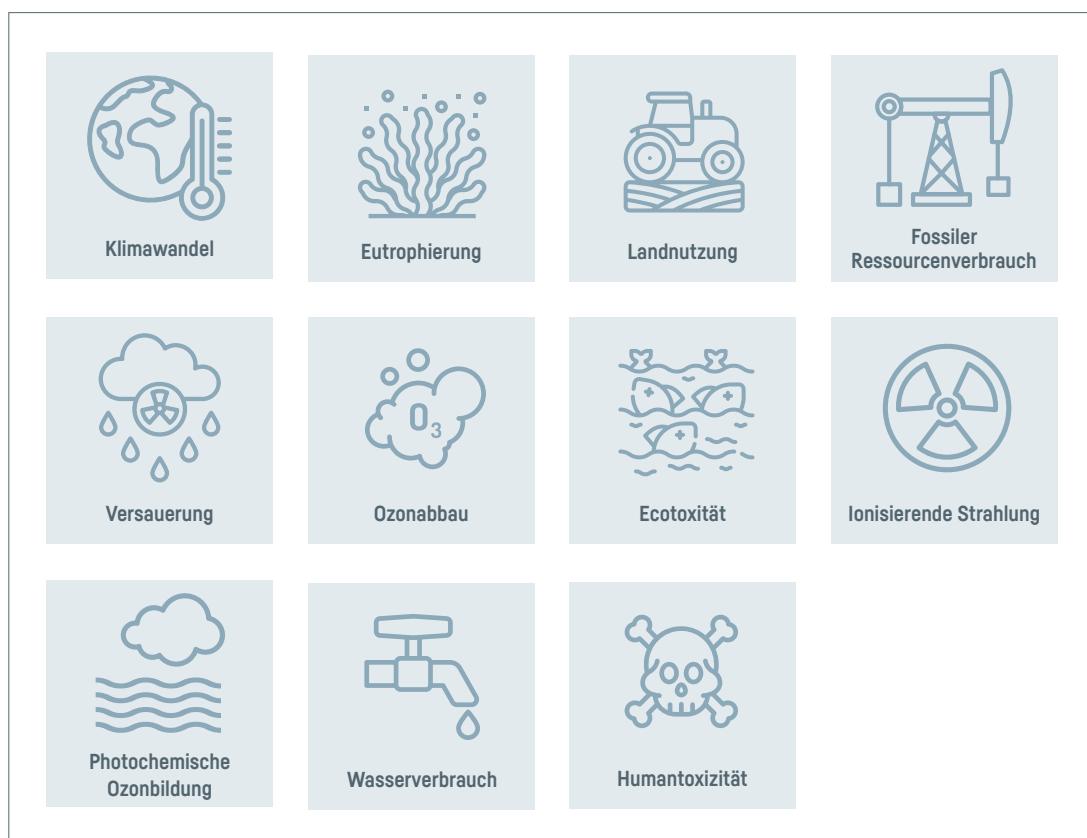


Abbildung 3: Beispiele für Wirkungskategorien der Umweltbewertung [2016]. [4]

3. Metastudie

Für die Identifikation und Auswahl relevanter LCA-Studien wurden die folgenden Schritte durchgeführt:

a) Vorbereitung und Entwicklung des Suchstrings

Die systematische Literaturrecherche stützt sich auf die wissenschaftlichen Literaturdatenbanken Web of Science und Scopus. Hierfür wurde ein boolescher Suchstring genutzt, der die Verknüpfung von Umweltauswirkungen, Kunststoffabfällen und chemischem Recycling abbildet:

- Ökobilanz [z. B. „LCA“, „life cycle assessment“, „carbon management“],
- Abfall [z. B. „plastic waste“, „waste“] und
- Chemisches Recycling [z. B. „chemical recycling“].

Der final verwendete Suchstring lautete: [LCA OR “life cycle assessment” OR carbon management] AND [plastic OR plastic waste] AND “chemical recycling”.

b) Datenbankrecherche und Auswahlprozess

Insgesamt wurden mit dem genannten Suchstring bei der Recherche 126 Treffer erzielt, davon 68 über Web of Science und 58 über Scopus. Nach Entfernung von 39 Duplikaten verblieben 87 Studien, deren Abstracts gesichtet wurden. 42 Publikationen wurden anhand ihres Abstracts als potenziell relevant eingestuft und im Volltext geprüft.

c) Ein- und Ausschlusskriterien

Eingeschlossen wurden in der Volltextprüfung nur Studien, die eine LCA gemäß ISO 14040/14044 durchführten, sich mit mindestens einem chemischen Recyclingverfahren befassen und Kunststoffabfälle als Ausgangsmaterial betrachteten [s. Abbildung 4].

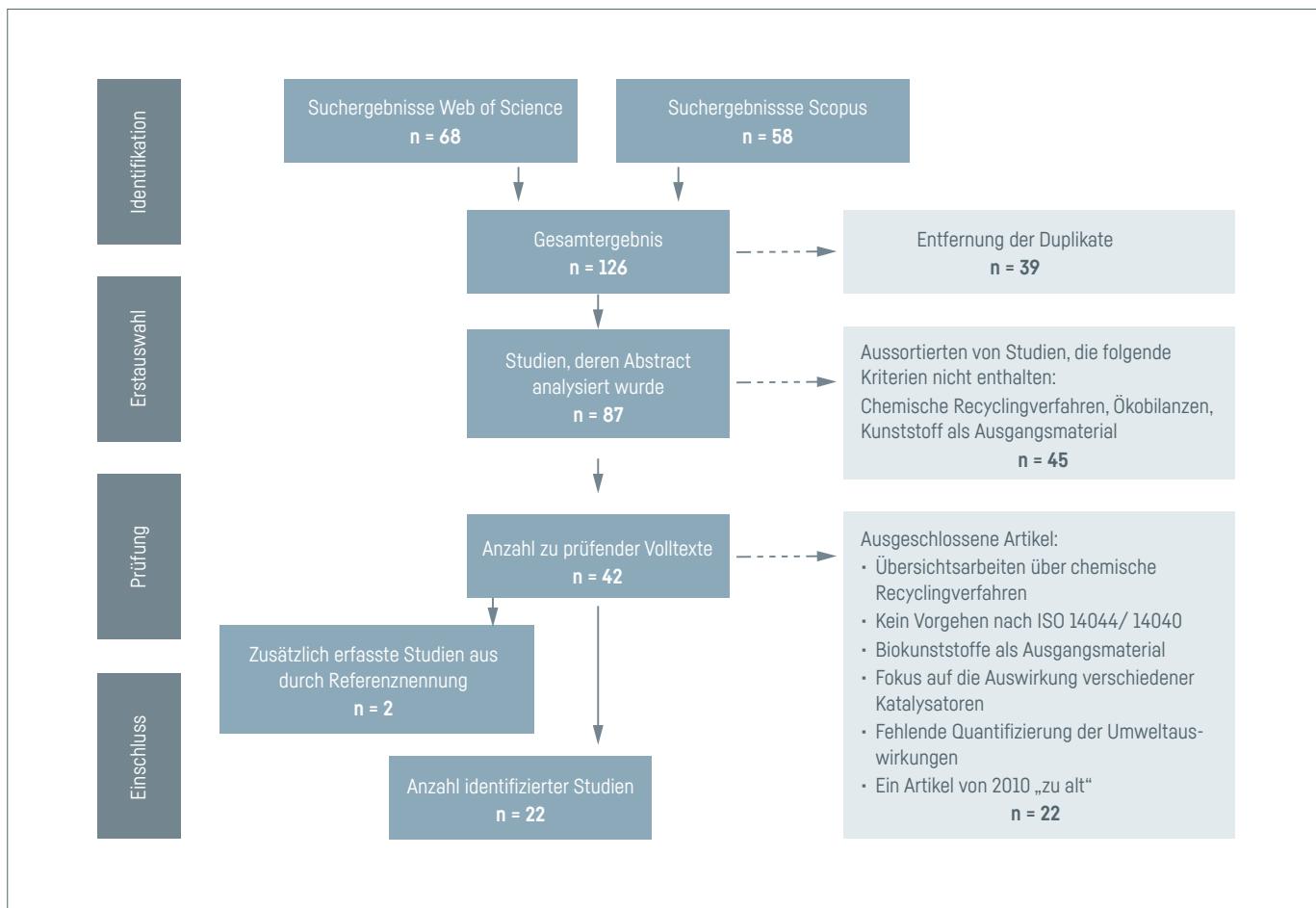


Abbildung 4: Veranschaulichung der Auswahl der LCA-Studien [Stand: 2023]

Ausgeschlossen wurden hingegen Studien, wenn sie reine Übersichtsarbeiten waren, nicht nach ISO 14040/44 arbeiteten, Biokunststoffe statt konventionellen Kunststoffabfällen betrachteten oder sich auf isolierte Aspekte wie Katalysatorvergleiche beschränkten. Darüber hinaus wurden Studien ausgeschlossen, wenn sie veraltet waren (z. B. Publikationen vor 2010).

d) Endauswahl

Insgesamt gingen die folgenden 22 Studien in die vertiefte Analyse ein [s. Tabelle 2], die die Datengrundlage für die folgenden methodischen und inhaltlichen Auswertungen bilden.

Tabelle 2: Auswahl der analysierten LCA-Studien auf Basis der systematischen Literaturrecherche.

AUTOREN	TITEL	REFERENZ
Iribarren et al. [2012]	Preliminary assessment of plastic waste valorization via sequential pyrolysis and catalytic reforming	[5]
La Rosa et al. [2018]	Innovative Chemical Process for Recycling Thermosets Cured with Recyclamines® by Converting Bio-Epoxy Composites in Reusable Thermoplastic – An LCA Study	[6]
Gracida-Alvarez et al. [2019]	System Analyses of High-Value Chemicals and Fuels from a Waste High-Density Polyethylene Refinery.	[7]
Bora et al. [2020]	Waste Polypropylene Plastic Recycling toward Climate Change Mitigation and Circular Economy: Energy, Environmental, and Technoeconomic Perspectives	[8]
Meys et al. [2020]	Towards a circular economy for plastic packaging wastes – the environmental potential of chemical recycling	[9]
Rickert et al. [2020]	Exploring the environmental performance of emerging (chemical) recycling technologies for post-consumer plastic waste	[10]
Civancik-Uslu et al. [2021]	Moving from linear to circular household plastic packaging in Belgium: Prospective life cycle assessment of mechanical and thermochemical	[11]
Jeswani et al. [2021]	Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery	[12]
Khan et al. [2021]	Carbon footprint of different recovery options for the repulping reject from liquid packaging board waste treatment process	[13]
Rosa et al. [2021]	LCA and LCC of a chemical recycling process of waste CF-thermoset composites for the production of novel CF-thermoplastic composites. Open loop and closed loop scenarios	[14]
Schwarz et al. [2021]	Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach	[15]
Volk et al. [2021]	Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways	[16]
Voss et al. [2021]	Global warming potential and economic performance of gasification-based chemical recycling and incineration pathways for residual municipal solid waste treatment in Germany	[17]
Monteiro et al. [2022]	Life Cycle Assessment of the Catalytic Pyrolysis of High-Density Polyethylene (HDPE) and High-Impact Polystyrene (HIPS)	[18]
Huysveld et al. [2022]	Technical and market substitutability of recycled materials: Calculating the environmental benefits of mechanical and chemical recycling of plastic packaging waste	[19]
van der Hulst et al. [2022]	Greenhouse gas benefits from direct chemical recycling of mixed plastic waste	[20]
Khan et al. [2023]	Consequential life-cycle assessment of treatment options for repulping reject from liquid packaging board waste treatment	[21]
Kulas et al. [2023]	Economic and environmental analysis of plastics pyrolysis after secondary sortation of mixed plastic waste	[22]
Luo et al. [2023]	Economic and Environmental Benefits of Modular Microwave-Assisted Polyethylene Terephthalate Depolymerization	[23]

Ozoemena et al. [2023]	Hydrothermal Treatment of Waste Plastics: An Environmental Impact Study	[24]
Shan et al. [2023]	Environmental Impact of Plastic Recycling in Terms of Energy Consumption: A Comparison of Japan's Mechanical and Chemical Recycling Technologies	[25]
Xayachak et al. [2023]	Assessing the environmental footprint of plastic pyrolysis and gasification: A life cycle inventory study	[26]

3.2. Qualitative Erkenntnisse der Metastudie

Die folgenden Abschnitte gliedern sich entlang der vordefinierten Vergleichskriterien Prozessart, Inputmaterialien, funktionelle Einheit, Systemgrenzen sowie LCA-Ergebnissen und dienen dazu, Gemeinsamkeiten, Unterschiede und methodische Herausforderungen systematisch vorzustellen.

3.2.1. Überblick über untersuchte Verfahren

Das mit Abstand am häufigsten betrachtete chemische Recyclingverfahren ist die Pyrolyse, die in 13 der 22 Studien bilanziert wird.[5, 7 bis 9, 11 bis 13, 15, 18, 19, 21, 22, 26] Auch die Vergasung wurde in mehreren Studien als chemischer Verwertungsweg untersucht.[8, 9, 15, 17, 20, 25, 26] Weniger häufig, aber dennoch vertreten sind die Solvolyse [10, 14, 15, 23] und die hydrothermale Behandlung [24].

Viele Studien vergleichen chemische Recyclingverfahren mit konventionellen Verwertungs- und Entsorgungsoptionen, darunter:

- **Mechanisches Recycling** [9, 11 bis 13, 15, 16, 19, 21, 25]
- **Energetische Verwertung bzw. Abfallverbrennung** [9, 11 bis 13, 15, 17, 19, 21]
- **Deponierung** [5, 8]

Des Weiteren setzen einige Studien den Fokus nicht auf die Abfallverwertung, sondern vergleichen die aus den chemischen Recyclingverfahren gewonnenen Produkte mit fossilen Referenzprodukten. [7, 9, 12, 23]

Technologievergleiche sind jedoch stark von regionalen Rahmenbedingungen wie Verfügbarkeit und gesetzlicher Regulierung abhängig. So ist es beispielsweise in Deutschland, den Niederlanden und Belgien wenig zielführend, die Deponierung in einer vergleichenden LCA abzubilden, da sie dort gesetzlich untersagt ist.

Neben der Auswahl des Verfahrens spielt in den untersuchten LCA-Studien auch die Szenarienauswahl eine zentrale Rolle. Szenarien ermöglichen einen strukturierten Vergleich alternativer Prozesskonfigurationen. Die Spannbreite reicht dabei von Studien mit nur einem Referenzszenario bis hin zu Arbeiten, die mehr als 200 Szenarien modellieren. Die analysierten LCA-Studien unterscheiden sich deutlich in der Ausgestaltung ihrer Szenarien.

3.2.2. Inputmaterialien bzw. Abfallfraktionen

Als Input für chemische Recyclingverfahren werden in den untersuchten LCA-Studien sehr verschiedene Kunststoffabfälle betrachtet [s. Abbildung 5], sowohl hinsichtlich Herkunft [Post-Consumer vs. Post-Industrial] als auch in Bezug auf Sortenreinheit und Qualität. Entsprechend reicht die Bandbreite von sortenreinen Polymerfraktionen bis hin zu gemischten Abfallströmen.

Am häufigsten werden folgende Fraktionen analysiert:

- Gemischte Kunststoffabfälle aus kommunaler Sammlung oder industriellen Abfällen [6 Studien],
- Sortenreine Polymere wie Polypropylen [PP; 5 Studien], Polyethylenterephthalat [PET; 4 Studien] und Polystyrol [PS; 4 Studien],
- sowie Kombinationen daraus, etwa Mischungen von HDPE und LDPE oder generische Polyolefin-Fraktionen [MPO; 2 Studien].

Einzelne Studien beziehen sich darüber hinaus auf:

- Verbundmaterialien [z. B. carbonfaserverstärkte Epoxidharze],
- sowie spezifische Kunststoffe wie Polyamid [PA], Polycarbonat [PC], Polybutylenterephthalat [PBT], Polymethylmethacrylat [PMMA] oder Polymilchsäure [PLA].

Die Wahl des Inputmaterials der jeweiligen LCA-Studie hat direkten Einfluss auf die Prozessgestaltung, die potenziellen Erträge sowie die ökobilanzielle Bewertung. Je nach Zusammensetzung des Abfalls ändern sich sowohl die technologischen Anforderungen als auch die Umweltwirkungen entlang des Lebenszyklus.

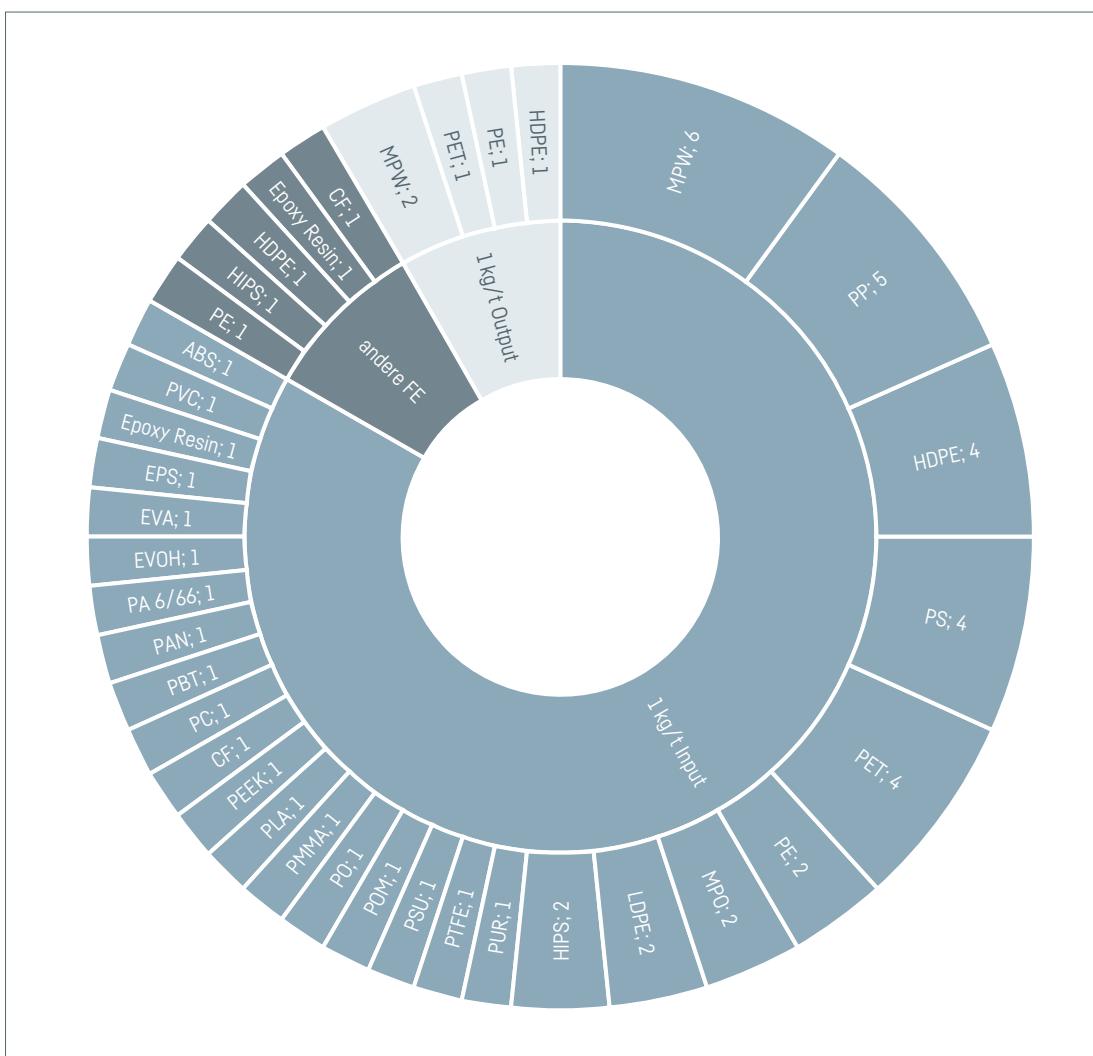


Abbildung 5: Darstellung der in den Studien verwendeten funktionellen Einheit bzw. Bewertungsperspektive (innen) sowie der bilanzierten Kunststofftypen (außen). Die Zahlen geben an, wie oft ein bestimmtes Inputmaterial in den betrachteten LCAs bilanziert wurde. Manche Studien betrachten mehr als ein Material.

ABS = Acrylnitril-Butadien-Styrol; **CF** = Kohlenstofffaser; **Epoxy Resin** = Epoxidharz; **EPS** = Expandiertes Polystyrol; **EVA** = Ethylen-Vinylacetat; **EVOH** = Ethylen-Vinylalkohol; **HDPE** = High-Density Polyethylen; **HIPS** = High-Impact Polystyrol; **LDPE** = Low-Density Polyethylen; **MPO** = Mixed Polyolefine; **MPW** = Gemischte Kunststoffabfälle; **PA 6/66** = Polyamid 6/66; **PAN** = Polyacrylnitril; **PBT** = Polybutylenterephthalat; **PC** = Polycarbonat; **PE** = Polyethylen; **PEEK** = Polyetheretherketon; **PET** = Polyethylenterephthalat; **PLA** = Polymilchsäure; **PMMA** = Polymethylmethacrylat; **PO** = Polyolefine; **POM** = Polyoxytmethylen; **PP** = Polypropylen.

3.2.3. Methodische Eckdaten der LCAs

Neben der betrachteten Technologie und Inputarten variiert auch die methodische Ausgestaltung der analysierten LCAs erheblich. Im Folgenden werden die identifizierten Unterschiede im Hinblick auf die definierte funktionelle Einheit, die Systemgrenzen und die Systemerweiterungen der LCA-Studien vorgestellt.

a) Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit basiert in der Mehrheit der Studien [14 von 22] auf der Masse des Abfalls, meist 1 kg oder 1 t des spezifischen Kunststoffabfalls [Input]. [8 bis 11, 13, 15 bis 17, 19 bis 21, 24 bis 26] Seltener kommen produktbezogene Einheiten zum Einsatz [5 von 22], z. B. 1 kg oder 1 t des spezifischen Outputprodukts. [5, 7, 12, 22, 23] Einzelne Arbeiten weichen von dieser Betrachtungsperspektive ab und verwenden spezifische Abfallmengen [6, 14] oder Produktausbeuten als funktionelle Einheit. [18]

b) Systemgrenzen

Die Mehrheit der Studien [7 von 22] arbeitet explizit oder implizit mit gate-to-gate-Systemgrenzen, d. h. es werden nur ausgewählte Prozessschritte vom spezifischen Kunststoffabfall bis zum spezifischen Outputprodukt betrachtet. [5, 9 bis 11, 13, 15, 25] Cradle-to-gate als Systemgrenzen kommt auch vor, wenn auch seltener. [7, 21 bis 23] Darüber hinaus finden sich auch weniger etablierte Systemgrenzen wie „gate-to-„end of waste“ [24] oder cradle-to-gate + „end of life“ [6]. Auffällig ist in diesem Kriterium, dass die Systemgrenzen in den untersuchten Studien nicht immer konsistent definiert oder klar dokumentiert sind.

c) Gutschriften für vermiedene Emissionen

Zudem kommt die Möglichkeit der Systemerweiterung hinzu, die in den untersuchten Studien in den meisten Fällen genutzt wurde. Hier werden durch den Ersatz von Primärrohstoffen vermiedene Emissionen oder die Nutzung gewonnener Energie dem betrachteten System gutgeschrieben. Die Höhe der Gutschrift ist allerdings abhängig vom betrachteten Verfahren und von den dadurch gewonnenen Materialien. Zusätzlich ist nicht immer klar, ob gewonnene Produkte auch in der Realität die Primärressourcen ersetzen können.

3.3. Quantitative Erkenntnisse aus der Metastudie

Die Auswertung zeigt, dass alle untersuchten LCA-Studien das Treibhauspotenzial berücksichtigen. Deutliche Unterschiede bestehen jedoch darin, wie viele weitere Umweltwirkungen einbezogen werden. Einige beschränken sich auf wenige Indikatoren, während andere ein breites Spektrum von Umweltwirkungen bilanzieren. Wie Abbildung 6 zeigt, reicht die Spannweite dabei von einer bis zu über 20 Wirkungskategorien. Diese Unterschiede spiegeln eine uneinheitliche methodische Tiefe wider.

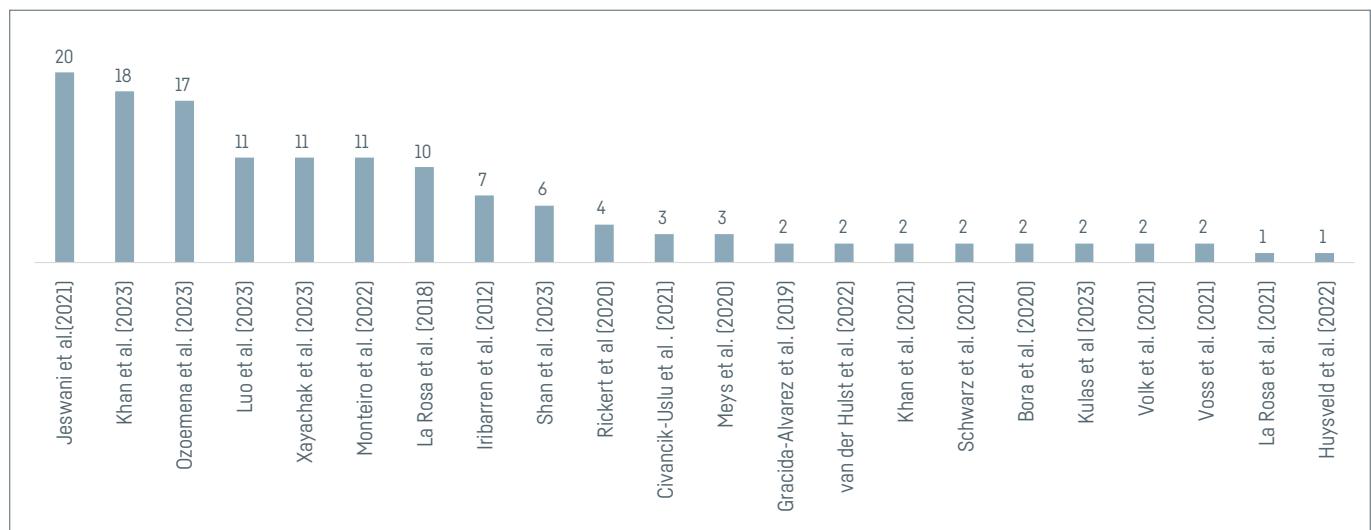


Abbildung 6: Anzahl der bewerteten Umweltwirkungskategorien je Studie.

Die quantitative Auswertung der Ergebnisse zur Umweltwirkung im Hinblick auf die Klimawirkung chemischer Recyclingtechnologien zeigt ein sehr heterogenes Bild. Die Bandbreite der berichteten Klimawirkung in Form von Treibhausgasemissionen liegt zwischen -2.39 CO₂-eq.[9] als niedrigste Nettowirkung und 137.60 CO₂-eq.[15] als höchste Nettowirkung, bezogen auf 1 kg Kunststoffabfall als Input. Die große Bandbreite der Ergebnisse lässt sich durch die oben dokumentierten Unterschiede in den gewählten Prozesskonfigurationen, definierten Systemgrenzen und Substitutionsannahmen erklären.

Insgesamt enthalten 11 der 22 Studien explizite Vergleichsszenarien zur energetischen Verwertung [5, 8, 9, 11 bis 13, 15, 17, 19 bis 21], z. B. durch Abfallverbrennung [MSWI] oder den Einsatz als Ersatzbrennstoff [RDF]. In diesen Studien wird chemisches Recycling entsprechend der Abfallverbrennung gegenübergestellt und hier schneidet das chemische Recycling hinsichtlich der Klimawirkung meist besser ab als die energetische Verwertung.

3.4. Einordnung der Ergebnisse im internationalen Forschungsstand

Die Ergebnisse unserer Analyse decken sich mit einer kürzlich veröffentlichten Metastudie von Zhang und Nakatani (2024) [27], die 57 LCA-Studien zur Klimabilanz chemischer Recyclingverfahren ausgewertet hat. Das Treibhauspotential reicht hier von -3.3 bis +137.6 kg CO₂-eq. pro kg Kunststoffabfall [Input].

Diese Übereinstimmung unterstreicht die Erkenntnis, dass die ökologische Bewertung chemischer Recyclingverfahren aufgrund der heterogenen, schwer vergleichbaren Studienlage bislang keine eindeutigen Aussagen liefert. Vielmehr hängt sie von den untersuchten Prozesskonfigurationen, definierten Systemgrenzen und Substitutionsannahmen ab und muss entsprechend kontextabhängig interpretiert werden.

4. Implikationen für künftige Forschung, Industrie und Politik

Ob chemische Recyclingverfahren tatsächlich zur Reduktion von Umweltbelastungen beitragen, hängt wesentlich von den konkreten Prozessauslegungen ab. Aus der bestehenden LCA-Literatur lassen sich derzeit nur wenige allgemeingültige Aussagen und keine quantitativ begründbare technologiebezogene Entscheidungen ableiten. Dies verdeutlicht den Bedarf an einem einheitlichen Bewertungsrahmen, um Potenziale und Grenzen chemischer Recyclingpfade belastbar abzuschätzen – und damit fundierte Empfehlungen für Politik und Industrie zu ermöglichen.

Hinzu kommt, dass sich die meisten LCA-Studien auf Technologien im Labor- oder Pilotmaßstab beziehen und daher nicht auf industrielle Anlagen hochskaliert sind. Mit Ausnahme einer offensichtlichen Tendenz zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bleibt es weitgehend offen, wie hoch die Umweltauswirkungen großtechnischer Prozesse tatsächlich ausfallen würden und ob Anlagen in größeren Dimensionen effizient betrieben werden können.

Für künftige Bewertungen ist es daher entscheidend, klar definierte Systemgrenzen, einheitliche Regeln für Substitutionsgutschriften und den Zugang zu transparenten Industriedaten zu etablieren, um Umweltwirkungen auf Basis großskaliger Prozessdaten realistisch abzubilden. Ebenso sollten Inputmaterialien und Zielprodukte systematisch festgelegt werden, um Technologien besser vergleichen zu können.

Die jüngst veröffentlichten Guidelines for Chemical Recycling LCAs [28] empfehlen hierfür unter anderem:

- Klare, nachvollziehbare Festlegung und Begründung der funktionalen Einheit und Systemgrenzen
- Transparente Darstellung der Vorbelastungen (Upstream-Burden) von Inputströmen
- Eindeutige Kennzeichnung von Primär- und Sekundärdaten sowie klare Ausweisung von Annahmen
- Auswahl der Wirkungskategorien nach der EF-Methode
- Durchführung von Szenarioanalysen zur Abbildung unterschiedlicher Rahmenbedingungen
- Durchführung von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen für zentrale Parameter
- Prüfung durch unabhängige Expert:innen

Eine methodisch konsistentere Ausgestaltung künftiger LCAs kann wesentlich dazu beitragen, die ökologischen Potenziale und Grenzen chemischer Recyclingpfade realistisch einzuschätzen – und so eine belastbarere Grundlage für Investitionsentscheidungen, politische Förderungen und technologische Entwicklung zu schaffen.

Literaturverzeichnis

- [1] VDI: Leitfaden Ressourceneffizienz. Ökobilanz – DIN EN ISO 14040/44.
<https://www.ressource-deutschland.de/leitfaden-re/methoden/oekobilanz-din-en-iso-14040/44/>, abgerufen am: 22.06.2025
- [2] Deutsches Institut für Normung: Ökobilanz - DIN EN ISO 14040. 2006
- [3] Deutsches Institut für Normung: Ökobilanz - DIN EN ISO 14044. 2009
- [4] Cristobal-Garcia, J., Pant, R., Reale, F. u. Sala, S.: Life cycle assessment for the impact assessment of policies. 2025
- [5] Iribarren, D., Dufour, J. u. Serrano, D. P.: Preliminary Assessment of Plastic Waste Valorization via Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming. 1438-4957 14 [2012] 4, S. 301-307
- [6] La Rosa, A. D., Blanco, I., Banatao, D. R., Pastine, S. J., Björklund, A. u. Cicala, G.: Innovative Chemical Process for Recycling Thermosets Cured with Recyclamines® by Converting Bio-Epoxy Composites in Reusable Thermoplastic-An LCA Study. Materials [Basel, Switzerland] 11 [2018] 3
- [7] Gracida-Alvarez, U. R., Winjobi, O., Sacramento-Rivero, J. C. u. Shonnard, D. R.: System Analyses of High-Value Chemicals and Fuels from a Waste High-Density Polyethylene Refinery. Part 2: Carbon Footprint Analysis and Regional Electricity Effects. 2168-0485 7 [2019] 22, S. 18267-18278
- [8] Bora, R. R., Wang, R. u. You, F.: Waste Polypropylene Plastic Recycling toward Climate Change Mitigation and Circular Economy: Energy, Environmental, and Technoeconomic Perspectives. 2168-0485 8 [2020] 43, S. 16350-16363
- [9] Meys, R., Frick, F., Westhues, S., Sternberg, A., Klankermayer, J. u. Bardow, A.: Towards a Circular Economy for Plastic Packaging Wastes – the Environmental Potential of Chemical Recycling. 09213449 162 [2020], S. 105010
- [10] Rickert, J., Cerdas, F. u. Herrmann, C.: Exploring the environmental performance of emerging [chemical] recycling technologies for post-consumer plastic waste. Procedia CIRP 90 [2020], S. 426-431
- [11] Civancik-Uslu, D., Nhu, T. T., van Gorp, B., Kresovic, U., Larrain, M., Billen, P., Ragaert, K., Meester, S. de, Dewulf, J. u. Huysveld, S.: Moving from Linear to Circular Household Plastic Packaging in Belgium: Prospective Life Cycle Assessment of Mechanical and Thermochemical Recycling. 09213449 171 [2021], S. 105633
- [12] Jeswani, H., Krüger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S. u. Azapagic, A.: Life Cycle Environmental Impacts of Chemical Recycling via Pyrolysis of Mixed Plastic Waste in Comparison with Mechanical Recycling and Energy Recovery. 00489697 769 [2021], S. 144483
- [13] Khan, M. M. H., Laitinen, V., Havukainen, J. u. Horttanainen, M.: Carbon footprint of different recovery options for the repulping reject from liquid packaging board waste treatment process. Waste management [New York, N.Y.] 136 [2021], S. 93-103
- [14] La Rosa, A. D., Greco, S., Tosto, C. u. Cicala, G.: LCA and LCC of a chemical recycling process of waste CF-thermoset composites for the production of novel CF-thermoplastic composites. Open loop and closed loop scenarios. 09560526 304 [2021], S. 127158
- [15] Schwarz, A. E., Ligthart, T. N., Godoi Bizarro, D., Wild, P. de, Vreugdenhil, B. u. van Harmelen, T.: Plastic Recycling in a Circular Economy; Determining Environmental Performance through an LCA Matrix Model Approach. 0956053X 121 [2021], S. 331-342
- [16] Volk, R., Stallkamp, C., Steins, J. J., Yogish, S. P., Müller, R. C., Stapf, D. u. Schultmann, F.: Techno-economic Assessment and Comparison of Different Plastic Recycling Pathways: A German Case Study. 1088-1980 25 [2021] 5, S. 1318-1337
- [17] Voss, R., Lee, R. P., Seidl, L., Keller, F. u. Fröhling, M.: Global Warming Potential and Economic Performance of Gasification-Based Chemical Recycling and Incineration Pathways for Residual Municipal Solid Waste Treatment in Germany. 0956053X 134 [2021], S. 206-219
- [18] Monteiro, Alessandra Da R. Duailibe, Miranda, D. M. V. de, Da Silva Pinto, J. C. C. u. Soto, J. J.: Life Cycle Assessment of the Catalytic Pyrolysis of High-Density Polyethylene [HDPE] and High-Impact Polystyrene [HIPS]. 1862-832X 16 [2022] 6, S. 2200037

- [19] Huysveld, S., Ragaert, K., Demets, R., Nhu, T. T., Civancik-Uslu, D., Kusenberg, M., van Geem, K. M., Meester, S. de u. Dewulf, J.: Technical and Market Substitutability of Recycled Materials: Calculating the Environmental Benefits of Mechanical and Chemical Recycling of Plastic Packaging Waste. 0956053X 152 [2022], S. 69-79
- [20] van der Hulst, M. K., Ottenbros, A. B., van der Drift, B., Ferjan, Š., van Harmelen, T., Schwarz, A. E., Worrell, E., van Zelm, R., Huijbregts, M. A. u. Hauck, M.: Greenhouse gas benefits from direct chemical recycling of mixed plastic waste. 09213449 186 [2022], S. 106582
- [21] Khan, M. M. H., Hävukainen, J., Niini, A., Leminen, V. u. Horttanainen, M.: Consequential life-cycle assessment of treatment options for repulping reject from liquid packaging board waste treatment. Waste management [New York, N.Y.] 155 [2023], S. 348-356
- [22] Kulas, D. G., Zolghadr, A., Chaudhari, U. S. u. Shonnard, D. R.: Economic and Environmental Analysis of Plastics Pyrolysis after Secondary Sortation of Mixed Plastic Waste. 09596526 384 [2023], S. 135542
- [23] Luo, Y., Selvam, E., Vlachos, D. G. u. Ierapetritou, M.: Economic and Environmental Benefits of Modular Microwave-Assisted Polyethylene Terephthalate Depolymerization. 2168-0485 11 [2023] 10, S. 4209-4218
- [24] Ozoemena, M. C. u. Coles, S. R.: Hydrothermal Treatment of Waste Plastics: An Environmental Impact Study. 1566-2543 31 [2023] 7, S. 3120-3130
- [25] Shan, C., PandyaSwargo, A. H. u. Onoda, H.: Environmental Impact of Plastic Recycling in Terms of Energy Consumption: A Comparison of Japan's Mechanical and Chemical Recycling Technologies. 1996-1073 16 [2023] 5, S. 2199
- [26] Xayachak, T., Haque, N., Lau, D., Parthasarathy, R. u. Pramanik, B. K.: Assessing the Environmental Footprint of Plastic Pyrolysis and Gasification: A Life Cycle Inventory Study. 09575820 173 [2023], S. 592-603
- [27] Zhang, C.-Y. u. Nakatani, J.: Implications of chemical recycling of plastic waste for climate change impacts: A critical review. Sustainable Production and Consumption 48 [2024], S. 301-323
- [28] Levis, J., Martinez, A. u. Karg, J.: Guidelines for Chemical Recycling LCAs, 2025

Impressum

Titel

Eine Metastudie zu Ökobilanzen chemischer Recyclingverfahren

Herausgeber

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

c/o Unternehmer BW e. V.

Türlenstrasse 2, 70191 Stuttgart

Homepage: www.thinktank-irs.de

LinkedIn: THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Autoren

Teresa Oehlcke, M.Sc. ^[1]

Prof. Dr. Rebekka Volk ^[2]

Prof. Dr. Dieter Stapf ^[3]

^[1]Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP),
Herzstr. 16, 76187 Karlsruhe

^[2]Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme INATECH,
Emmy-Noether-Str. 2, 79110 Freiburg

^[3]Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Chemie (ITC),
Herrmann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Stand

Veröffentlicht 10/2025

Grafische Konzeption, Illustration, Satz

unger+ kreative strategen GmbH, Stuttgart, www.ungerplus.de

Copyright

Wiedergaben in jeglicher Form, auch in Auszügen, müssen mit Quellenangaben gekennzeichnet werden.

Verteilerhinweis

Der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien ist finanziert aus Landesmitteln,
die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.



Baden-Württemberg