

Teile I und II zum Schlussbericht GreenFeed

Zuwendungsempfänger: Institut für Technische Chemie (ITC),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Förderkennzeichen: 03EI5003B

Vorhaben: GreenFeed – Green Feedstock for a Sustainable Chemistry

Teilvorhaben: Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen

Laufzeit: 01.03.2022 – 28.02.2025

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

I. Kurzdarstellung

Aufgabenstellung

Während heute die Kohlenstoffversorgung der chemischen Industrie in Deutschland überwiegend fossil erfolgt (ca. 80% Erdölderivate, 10% Erdgas, 10% nachwachsende Rohstoffe), muss sie zukünftig eine durchgehend nachhaltige Rohstoffbasis haben. Erste Szenarien einer klimaneutralen, ressourcenschonenden IndustrieverSORGUNG zeigen die möglichen Quellen. Eine detaillierte Bewertung der Versorgung auf Basis von Rohstoff- und Technologiepotenzialen und Energiebedarfen steht noch aus. Dies war Gegenstand des Projektes „GreenFeed“. Das Institut für Technische Chemie (ITC) des KIT fokussierte sich hierbei auf die Modellierung der Wertschöpfungsketten des Chemischen Recyclings von Mischkunststoffabfällen, um das Potenzial des chemischen Recyclings zu ermitteln.

Voraussetzungen

Das ITC verfügt über eigene umfangreiche Expertise auf dem Gebiet der rohstofflichen Verwertung von Abfällen, sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der anwendungsorientierten Verfahrensentwicklung und der Umsetzung in Anlagen bis zum industriellen Maßstab. Die Technologieforschung zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft für Kohlenstoff durch Pyrolyse und Gasifizierung stellt einen Forschungsschwerpunkt am KIT dar. Als Besonderheit für die ganzheitliche Bearbeitung von Fragestellungen der Technologiebewertung kann auf die Prozessdaten großer Versuchsanlagen bis zu TRL 6 zurückgegriffen werden. Dies ermöglicht für das rohstoffliche Recycling von Kunststoffabfällen das Scale-up, das Schließen der Bilanzen und die Validierung von Daten aus Industrieverfahren oder neuen Verfahren, für die oftmals keine vertrauenswürdigen Betreiberdaten zur Verfügung stehen. Diese Daten wurden seitens des KIT als Eigenleistung in dieses Projekt eingebracht. Darüber hinaus bestehen langjährige Erfahrungen in der prozess- und anlagenspezifischen techno-ökonomischen Bewertung des mechanischen und chemischen Recyclings in der Anwendung auf unterschiedliche Abfallarten.

Auf dieser Basis wurden im Projekt die Stoff- und Energiebilanzen des thermochemischen Recyclings von Mischkunststoffabfällen für die thermodynamisch kontrollierte Prozesse (insbesondere Gasifizierung) modelliert und für die kinetisch kontrollierte Kunststoffpyrolyse durch umfangreiche, skalierbare Messdaten beschrieben und skaliert.

Die Bilanzdaten der Solvolyseprozesse, für die keine eigenen Daten zur Verfügung standen, wurden der Literatur entnommen und in die Entwicklung von Prozesskettenmodellen (Modellen der Technologiepfade) inklusive Carbon Capture und der energetischen Verwertung von Nebenprodukten einbezogen. Die Ermittlung der prozessspezifischen Investitionskosten basiert auf der Literaturrecherche zu Referenzen und einschlägigen Methoden zur Kostenskalierung.

Planung und Ablauf

KIT bearbeitete hierfür das Arbeitspaket AP4 „Detailbetrachtung und Bewertung der Technologiepfade des Chemischen Recyclings“ (KIT). Die Bewertungsmethode wurde gemeinsam mit dem DBFZ erarbeitet, in einem Stakeholderworkshop validiert und einheitlich angewendet. Die detaillierten Technologiepfadbewertungen gingen als Datensätze in das AP6 „Entwicklung von Kunststoffproduktionsszenarien und Ableitung von Transformationspfaden“ des WI ein. Zuvor arbeitete KIT bei AP1 „Analyse des heutigen Produktionssystems“ (WI, KIT, DBFZ) und des Fittings zwischen prognostiziertem Abfallaufkommen und mechanischen Recyclingoptionen (AP2 „Entwicklung von Kunststoffnachfrage und Abfallaufkommen in Deutschland und Europa“ (WI, KIT)) mit und brachte die eigene Expertise ein. Abschließend wurden in AP7 „Roadmapping und Synthese“ (WI, KIT, DBFZ) die Transformationspfade gemeinsam erarbeitet, validiert, und im Abschlussworkshop des Projektes sowie als Roadmapdokument veröffentlicht. Abb. 1 zeigt die Gesamt-Projektplanung.

Projekt-Monat	2022										2023												2024												2025		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
AP 0																																					
AP 1																																					
AP 2																																					
AP 3																																					
AP 4																																					
AP 5																																					
AP 6																																					
AP 7																																					

*) M=Meilenstein, WS=Workshop

Mo.1: Statuscheck der Übergabepunkte (Abbruchkriterium), M2.1: Lauffähiges regionalisiertes Stoffstrommodell, M2.2: Szenarienset zur Nachfrage nach Kunststoffen und zum Abfallaufkommen, M3.1: Biomasseeinsatzpotenziale für die chemische Industrie, M4.1: Festlegung der gemeinsamen und spezifischen Bewertungsmethodik für AP4 und AP5, M4.2: Übergabe Technologie- und Bewertungsergebnisse für Szenarien an AP6, M5.1: Festlegung der gemeinsamen und spezifischen Bewertungsmethodik für AP4 und AP5, M5.2: Übergabe Technologie- und Bewertungsergebnisse für Szenarien an AP6, M6.1: Vorläufige Szenarioergebnisse für die Kunststoffproduktion zur Diskussion mit Stakeholdern, M6.2: Endgültige Szenarioergebnisse für die Kunststoffproduktion.

Abbildung 1: Gesamt-Projektplanung

Relevante Meilensteine:

Im ersten Teilarbeitspaket von AP 4 wurden die Bewertungsmethoden und die einzelnen Bewertungskriterien für die Biopolymerproduktionsprozesse im GreenFeed-Konsortium festgelegt (M4.1, KIT = M5.1, DBFZ). Die Übergabe der Technologie- und Bewertungsergebnisse begann mit dem Abschluss der Modellerstellung im zweiten Teilarbeitspaket von AP 4 Ende 2023 (M4.2, KIT) und wurde mit dem Abschluss der technooökonomischen Bewertungen (3. Teilarbeitspaket) Ende 2024 abgeschlossen.

Deliverables:

D4.1 (Erstellung je einer vollständigen Masse- und Energiebilanz sowie ausgewählter Elementarbilanzen einschließlich Vertrauensbereich für je eine exemplarische Pyrolyse-, Vergasungs- und Solvolyse-Prozesskette im Sinne der Datenbereitstellung für Life-Cycle-Inventories) wurde umfassender erfüllt, da für alle im Laufe des Projekts als relevant erarbeiteten Kunststoffabfall-Technologie-Kombinationen vollständige Bilanzen modelliert wurden (siehe Ergebnisse).

Während des Projektablaufs wurden in 6 Zwischenberichten über den jeweiligen Fortschritt des Teilarbeitspaketes berichtet (D4.2, Zwischenbericht zu AP4, KIT).

Neue vergleichende Modellierungsergebnisse wurden gerade international peer-reviewed publiziert (D4.3 Open Access Publikation: Hennig et al., 2025). Der gemeinsame Abschlussbericht in Form der Roadmap für die Transformation der Chemieindustrie (D7.6, WI, KIT, DBFZ) wurde in dem vielbeachteten online-Workshop im April 2025 vorgestellt und durch das WI publiziert (Scholz et al., 2025).

Darüber hinaus wurden KIT-Projektergebnisse in Vorträgen auf internationalen Konferenzen, im Projekt-Workshop zu Bewertungsmethoden und im Projekt-Abschlussworkshop vorgestellt (siehe erfolgte und geplante Veröffentlichungen).

Damit wurde der beantragte Projektumfang vollumfänglich und erfolgreich bearbeitet.

Wissenschaftlicher und technischer Stand

In diesem Vorhaben werden system- und technologieübergreifende Konzepte und Lösungsansätze einer zirkulären Wirtschaft entwickelt, welche den Wert petrochemischer Produkte möglichst lange stofflich erhalten und dadurch signifikante Mengen von Treibhausgasemissionen, Kunststoffabfällen und fossilen Primärressourcen einsparen können. Bisher existieren nur wenige Arbeiten, die die Zukunft der Kunststoffindustrie in Deutschland oder Europa eingebettet in ein klimaneutrales Gesamtsystem untersucht haben.

Auf dem Gebiet des Teilvorhabens zum chemischen Kunststoffrecycling In aktuellen internationalen Studien (beispielsweise von IEA¹ und JRC²) wird hier noch vom zukünftigen Einsatz fossiler Feedstocks ausgegangen, ohne die zwingend notwendige Defossilisierung der Kraftstoffwirtschaft integral in die Analyse einzubeziehen. Erste Arbeiten zur systemischen Untersuchung einer Defossilisierung wurden insbesondere von der Dechema³ und seitens des WI durchgeführt. Hierbei wurde der mögliche Beitrag des chemischen Recyclings von Kunststoffabfällen mit einfachen Ansätzen beleuchtet, jedoch ohne die zukünftige Abfallzusammensetzung (reine Abfälle vs. mixed oder verunreinigt) zu berücksichtigen. Ganzheitliche, modellbasierte Systemoptimierung erfolgten bisher nicht.

Untersuchungen der Potenziale von Kunststoffrecycling erfolgten bisher statisch, gehen also im Wesentlichen vom heutigen Abfallvolumen und der heutigen Abfallstruktur aus. Ein etablierter Zweig ist hier die Technologiebewertung. Hier kann zwischen Arbeiten zum mechanischen und chemischen Recycling unterschieden werden. Für beide Stränge gibt es eine Vielzahl an Einzelanalysen und auch vergleichende Darstellungen. Eine sehr dezidierte Analyse eines ganzen Abfallbereichs haben KIT und WI gemeinsam mit Partnern im Projekt KUBA⁴ vorgenommen. Erstmals wurde hier eine vollständige Prozesskette von Baudämmstoffen mittels mechanischen Recyclings, Pyrolyse bzw. Gasifizierung erarbeitet und bewertet, wie sie exemplarisch für die Feedstock-Transformation der chemischen Industrie benötigt wird. Solche stärker systemischen Analysen bilden aber noch die Ausnahme. Auch die bisher veröffentlichten Metaanalysen zum chemischen Recycling⁵ diskutieren die verschiedenen Technologiestränge in der Regel jeweils für sich aus technologischer (und teilweise ökonomischer) Sicht, ohne in den Blick zu nehmen, welche systemischen Beiträge die Technologien jeweils anteilig leisten können. Erste Arbeiten des KIT zum kombiniert mechanisch-chemischen Recycling gemischter, realer Kunststoffabfälle auf Basis relevanter Experimentaldaten ermöglichen das Scale-up, das Schließen der Bilanzen und die Validierung von Daten aus Industrieverfahren oder neuen Verfahren, für die oftmals keine vertrauenswürdigen Betreiberdaten zur Verfügung stehen. Hierfür wurden prozess- und anlagenspezifischen technisch-ökonomischen Bewertungen des mechanischen und chemischen Recyclings in der Anwendung auf unterschiedliche Abfallarten durchgeführt^{6, 7, 8}.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das KIT hat zur Bearbeitung der Arbeitspakete mit den Projektkoordinator des GreenFeed-Projektes, dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (WI), sowie der Universität Kassel und dem Deutschen Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)

¹ IEA (2018): The Future of Petrochemicals. Towards more sustainable plastics and fertilisers. Paris.

² A. Boulamanti; J.A. Moya (2017): Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the chemical and petrochemical industry, EUR 28471 EN, doi:10.2760/20486.

³ Bazzanella, A.M.; Ausfelder, M. (2017): Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Dechema Technology Study. Study commissioned by CEFIC. FutureCamp; DECHEMA (2020): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI.

⁴ KUBA – Nachhaltige Kunststoffwertschöpfungskette: Pilotfall Kunststoffe im Baubereich (BMBF 033R214D, 1.12.2018 – 31.5.2020).

⁵ Vgl. Ragaert K.; Delva, L.; van Geem, K. (2017): Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste Management 69(24-58); Rahimi, A.; García, J. M. (2017): Chemical recycling of waste plastics for new materials production. Nature Reviews Chemistry 1(6)0046.

⁶ BKV (2019): Survey on thermal processes for feedstock recycling of plastic waste. Studie von KIT und Conversio market & strategy GmbH für BKV GmbH, <https://www.bkv-gmbh.de/infothek/studien.html>

⁷ Stapf, D.; Ciceri, G.; Johansson, I. (2020): Trends and drivers in alternative thermal conversion of waste. Report, IEA bioenergy, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15439.10409>

⁸ Volk, R.; Stallkamp, C.; Steins, J.J.; Jogish, S.P.; Stapf, D.; Schultmann, F. (2021): Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways: A German case study. Journal of Industrial Ecology, 1-20. <https://doi.org/10.1111/jiec.13145>

zusammengearbeitet. Begleitet und unterstützt wurden die Arbeiten von assoziierten Praxispartner aus den Bereichen Petrochemie, Abfallwirtschaft und Bioökonomie sowie von regionalen Netzwerken der chemischen Industrie.

II. Eingehende Darstellung

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Entwicklung von Kunststoffnachfrage und Abfallaufkommen in Deutschland und Europa

Im Stoffstrommodell und Szenarienset zur Nachfrage nach Kunststoffen und zum Abfallaufkommen wurden die künftig zur Verfügung stehenden Kunststoffabfallmengen (nach Sektoren) und deren Polymerzusammensetzungen erarbeitet. Durch Sammlung und Sortierung wird mechanisches Recycling ermöglicht. Zu Verfügung für chemisches Recycling stehen dann die Fraktionen, die nicht für mechanisches Recycling geeignet sind sowie die Rejects der Regranulathersteller. Hierbei handelt es sich um Mischkunststoffabfälle, die heute überwiegend verbrannt, d.h. energetisch verwertet werden. Diese Daten stellen einen Input für die Technologiepfad-Bewertungen dar.

Im zentralen Arbeitspaket „Detailbetrachtung und Bewertung der Technologiepfade des Chemischen Recyclings“ führte das KIT für das abfallbasierte chemische Recycling von Mischkunststoffabfällen Datenerhebungen, Stoffflussanalysen, Techno-ökonomische Bewertungen sowie die Ermittlung Kohlenstoffbilanz- bzw. Klima-relevanter Indikatoren durch. Hierbei kamen folgende Methoden zum Einsatz:

- Literaturrecherche zu den Verfahren des chemischen Recyclings und Experteninterviews bzw. Besuch von in Betrieb befindlichen Anlagen zur Validierung der Modellierungshypothesen der Prozessschritte
- Parametrisierung der reaktiven Prozessschritte Solvolyse und Pyrolyse bzw. thermodynamische Modellierung der Gasifizierung zur Erstellung von Massen- und Energiebilanzen
- Stoffflussanalyse der betrachteten Prozesse mittels Flow-Sheet-Simulationsprogramm.

Festlegung der gemeinsamen und spezifischen Bewertungsmethodik

Dies wurde gemeinsam mit dem Projektpartner DBFZ bearbeitet. Darauf aufbauend wurde mit DBFZ und dem WI ein online-Workshop veranstaltet sowie ein internes gemeinsames Dokument erarbeitet, dass die anzuwendende Bewertungsmethodik beschreibt. Es beinhaltet:

- die Auswahl der Bewertungskriterien unterteilt nach technischen, ökonomischen und ökologischen Kriterien
- deren Anwendung für Biopolymerproduktions- und / oder chemische Recyclingtechnologien für Kunststoffabfälle
- die Berechnungs- bzw. Erhebungsmethoden der Kriterien
- deren Bilanzgrenzen und funktionelle Einheiten der Kriterien
- die Anforderungen an die Kriterien für die Übergabe an das vom WI geführte Modell des Gesamtsystems.

Als gemeinsame relevante Kennzahlen der technooökonomischen Analyse der bewerteten Technologiepfade wurden festgelegt:

- Kumulierter Energieaufwand (Cummulated Energy Demand CED)
- Kohlenstoff-Konversionseffizienz (Kohlenstoffausbeute in den Produkten) als Ressourceneffizienzkriterium der Technologiepfade zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs (Carbon Conversion)
- Global-Warming-Potential / Treibhausgasausstoß
- Gestehungskosten unterteilt in variablen und fixen Kostenanteil (variable costs, fixed costs)

- Investitionskosten als Basis der Fixkostenberechnung.

Alle Indikatoren wurden für die Technologiepfade Einsatzstoff-spezifisch errechnet, d.h. auf den Abfall bezogen als Input der Recycling-Wertschöpfungskette.

Technologiescreening und Datenaufnahme

Die Datenaufnahme des chemischen Recyclings für die Technologien Pyrolyse, Synthesegaserzeugung und Solvolyse wurde abgeschlossen. Die Stoffflussanalyse der Pyrolyse erfolgt auf Basis von vorliegenden Messdaten realer Kunststoffabfälle, die in Prozesssimulationsrechnungen eingebracht werden. Somit kann trotz noch niedrigerer Technologiereife eine nachvollziehbare Bewertung erfolgen. Für die Synthesegaserzeugung, die die größte Technologiereife aufweist, erfolgen Prozesssimulationsrechnungen. Für Solvolysetechnologien, die als Depolimerisationsverfahren von speziellem Interesse für die kleinere Gruppe möglichst sortenrein anfallender mit polaren Lösemitteln auftrennbarer Polymere sind (Polyethylenterephthalat (PET)-, Polyamid-6-(PA6), und Polyurethan (PU)-Abfälle), wurden Literaturdaten ausgewertet. Die Technologiereife ist hier zum Teil niedrig und nachvollziehbare ganzheitliche Prozessbewertungen liegen kaum vor. Für Bewertungsrechnungen erfolgte daher eine Abschätzung der Stoffflüsse und Energiebedarfe, sodass die Projektergebnisse im Vergleich zu anderen Technologien mit größeren Unsicherheiten behaftet sind.

Als potentiell relevante Technologiepfade wurden die zentrale Synthesegaserzeugung aus Pyrolyseöl sowie die Polystyrol-Pyrolyse und katalytische Pyrolyse von Polyolefinen hinzugefügt, letztere, da dabei Monomer erzeugt werden kann. Zusätzlich modellierte Technologien einer klimaneutralen Kunststoffkreislaufwirtschaft sind die Hydrierung von Pyrolyseölen vor dem Einsatz im Steamcracker, die CO₂-Abscheidungen aus den Verbrennungsabgasen der Nebenprodukte bzw. dem dezentral erzeugten Synthesegas mittels Aminwäsche und die Tieftemperatur-Methanolwäsche des zentral erzeugten Synthesegases. Zudem wurde die zentrale Gasifizierung von petrochemischen Nebenprodukten der Steamcracker simuliert, die für das Gesamtsystemmodell relevant sind.

Die entwickelten Modelle und Ergebnisse der Anwendung auf das chemische Recycling von Mischkunststoffabfällen wurden peer-reviewed auf internationalen wissenschaftlichen Tagungen vorgestellt und publiziert (siehe Vorträge und Veröffentlichungen: Hennig et al. (2023), Hennig et al. (2024), Hennig et al (2025)).

Um das Recycling der mengenmäßig relevanten realen Kunststoffabfälle mit den o.g. Technologiepfaden zu simulieren, müssen die Prognoseredaten der Mischkunststoffabfälle mit kompletten Abfallzusammensetzungen, die die typischen sektorspezifischen Verunreinigungen der Sortierreste und Rejects enthalten, in Übereinstimmung gebracht werden. Hierzu wurden erfahrungsbasiert (u.a.^{9,10}) die in den Tabellen 1 und 2 dargestellten Hauptabfallarten definiert. Hiermit konnten alle für das chemische Recycling relevanten prognostizierten Abfallarten mit Mischkunststoffen bzw. Verunreinigungen beschrieben werden, die in die Gesamtmodellierung des Produktionssystems eingehen.

⁹ Zeller, M., et al.: Chemical recycling of mixed plastic wastes by pyrolysis. Chem. Ing. Tech. 2021, 93 (11), 1-9. <https://doi.org/10.1002/cite.202100102>

¹⁰ Netsch, N., et al.: Energy demand for pyrolysis of mixed thermoplastics and waste plastics in chemical recycling: model prediction and pilot scale validation. ACS Sustainable Resource Management (2024). <https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.4c00109>

Tabelle 1: Polymerzusammensetzung polyolefinreicher Mischkunststoffabfälle (Mix) sowie Reinpolymerabfälle als Einsatzstoffe für das chemische Recycling; Verdünnung durch Asche; Angaben in Gew.-%.

	PE	PP	PS	PET	ABS	PA	PVC	Ash
Mix 0	71.96	20	2	4		2	0.04	2
Mix 1	70	20	2	4		2	2	2
Mix 2	50	15	10	10	5	5	5	10
PET				100				1

Tabelle 2: Kunststoffabfälle als Einsatzstoffe für das chemische Recycling, deren Elementarzusammensetzung nicht aus der Polymerzusammensetzung berechnet werden konnte; Verdünnung durch mineralische Anteile (Ash) und Wasser (Feuchte); Angaben in Gew.-%

	C	H	N	S	Cl	Br	O	Ash	Moisture
ASR	63.2	8.5	1.8	0.2	0.9	0.24	11.9	13.3	1.5
WEEE	51.4	6.1	1.5	0.1	2.8	0.5	9.98	27.6	0.5
PU	60.7	7.9	4.9	0.2	0.08		23.9	2.3	

Von besonderer mengenmäßiger Bedeutung sind dabei Polyolefin-reiche Abfälle mit hohen Anteilen an Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) sowie Verunreinigungen durch die Massenpolymere Polystyrol (PS), PET, Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS), PA, und Polyvinylchlorid (PVC). Sie wurden als Hauptabfallarten unterschiedlicher hoher Polymerverunreinigungen (Mix 0 – 2) unter Berücksichtigung der mineralischen Additive als Asche modelliert. Auch die meisten sortierten Polymerabfälle hoher Reinheit, die nicht mechanisch recykliert werden, enthalten diese Ascheanteile.

Wesentliche andere Abfallarten mit höheren Verunreinigungen (mehr Additive, biogene Verunreinigungen), die nicht aus Standardpolymeren zusammengesetzt sind, wurden auf Basis eigener Messdaten repräsentativer Zusammensetzungen modelliert. Sie werden in Tabelle 2 als Elementarzusammensetzungen dargestellt und enthalten zusätzlich Wasser und Asche (Schredderleichtfraktion ASR, Elektro- und Elektronikabfälle WEEE, Polyurethane (PU) unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung).

In den Wertschöpfungsketten ergeben sich für die Abfallarten unterschiedliche Verwertungsoptionen des chemischen Recyclings. Während Pyrolyse und Gasifizierung grundsätzlich auf alle Abfälle angewendet werden können, sind Solvolyseprozesse nur für bestimmte Kunststoffabfälle anwendbar, bei denen sich Monomer zurückgewinnen lässt (hier: PET, PA, Polymethylmethacrylat PMMA, PU bekannter Zusammensetzung). PA, PS und PMMA lassen sich auch durch Pyrolyse thermisch depolymerisieren. Polyolefinabfälle mit geringen Heteroatomanteilen können besonders effizient katalytisch depolymerisiert werden, sodass hohe Monomerausbeuten zu erwarten sind. Hieraus ergibt sich ein Wertschöpfungskettennetzwerk (Abb. 3.), in dem mechanische und chemische Recyclingtechnologien für Mischkunststoffabfälle verknüpft werden. Hierbei werden Nebenproduktströme, die sich auch im chemischen Recycling nur geringe Ausbeuten an Wertprodukten mit hohem Energieaufwand erwarten lassen, der energetischen Verwertung zugeführt.

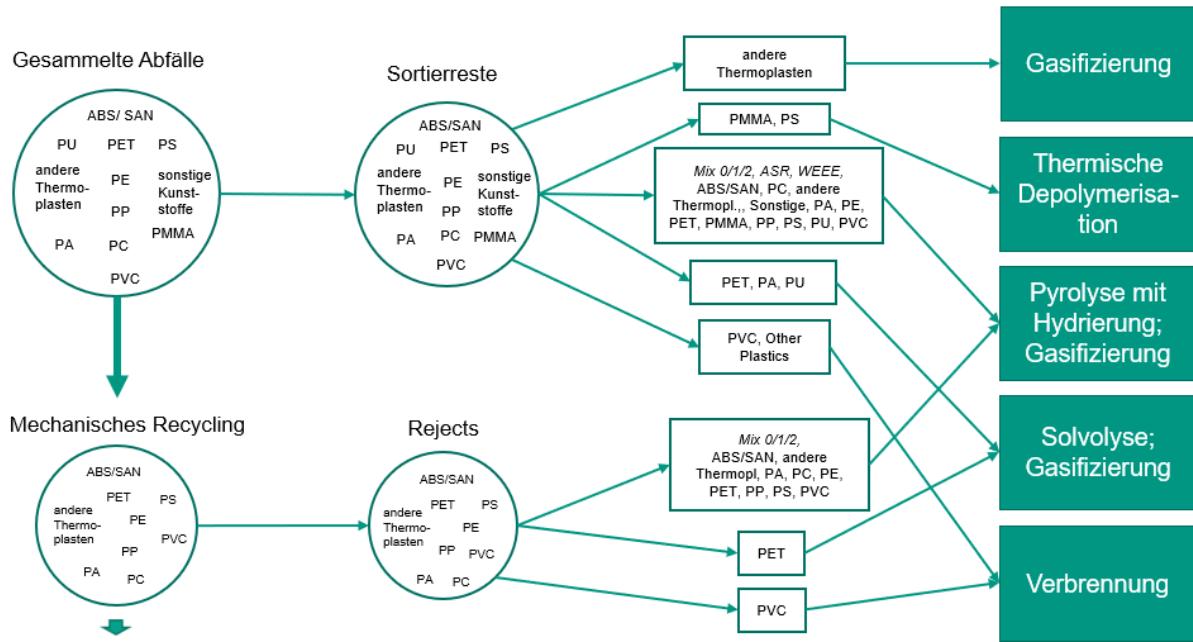


Abbildung 2: Technologiepfade für das chemische Recycling der Kunststoffabfallarten mit Systemrelevanz, die als sogenannte Sortierreste des mechanischen Recyclings bzw. als Rejects bei der Rezyklat herstellung anfallen

Diese Wertschöpfungsketten wurden modelliert und die Ergebnisse wurden als Stoffflussanalyse in Form der Massen- und Energiebilanzen für das Gesamtmodell bereitgestellt. Die Ergebnisse sind im Roadmap-Dokument erläutert (Scholz et al., 2025)

Technologiebewertungen

In der Technologiebewertung wird bei der Gasifizierung zwischen Wirbelschichttechnologie (kleinskaliger / dezentraler) und Flugstrom-Gasifizierung (zentral, integriert in petrochemische Produktionsstandorte) unterschieden. Bei dieser Synthesegasherstellung werden zusätzlich die Optionen mit und ohne Einstellung des H₂:CO Verhältnisses durch Wassergas-shift-Reaktion betrachtet. Im letzteren Fall wird daraus Methanol erzeugt.

Die Pyrolyse enthält das Upgrading / das Hydrotreatment der Pyrolyseprodukte, um Naphtha-Ersatz als Einsatzstoff für Steamcracker zu erzeugen. Bei der Solvolyse werden alle Post-Processing Schritte der Monomer-Rückgewinnung und des Lösemittelrecyclings mit betrachtet.

Zusätzlich wurden Investitionskostenschätzungen für die unterschiedlichen Technologien und Anlagengrößen anhand von Literaturdaten durchgeführt. Hiervon abgeleitet ergeben sich die Fixkosten der Technologien des chemischen Recyclings. Die variablen Kosten ergeben sich aus der Stoffflussanalyse mittels den stoffspezifischen Kostendaten, die durch das WI erarbeitet und seitens KIT und DBFZ einheitlich verwendet wurden.

Im Folgenden werden die Technologiebewertung des chemischen Recyclings wichtiger Mischkunststoffabfallströme gegenübergestellt, bei denen alternative Wertschöpfungsketten vorliegen. Die Ergebnisse verdeutlichen jeweils, welche Wertschöpfungskette abfallspezifisch die höhere Effizienz zeigt.

Die Steckbriefe des Technologievergleichs geben jeweils die Abfallart, für die sie gelten, die Stoffflussanalysen innerhalb der betrachteten Abfall-zu-Zwischenprodukt- Systemgrenzen, und die zugehörigen Effizienzindikatoren für Kohlenstoffeffizienz, kumulierten Energieaufwand, variable Kosten (Gutschriften für Nebenprodukte sowie Kosten für Energie, Hilfsstoffe und Entsorgung) und investitions-relatierte Fixkosten an. Berechnet wurde jeweils

unter der Randbedingungen der Klimaneutralität der Wertschöpfungsketten und mit der Kostendatenbasis 2024. Die technologiespezifischen Anlagengrößen (thermische Leistung bezogen auf den Abfallinput) betragen 50 MW (Pyrolyse und Solvolyse), 100 MW (Gasifizierung in der Wirbelschicht) und 500 MW (Gasifizierung im Flugstrom).

Chemical Recycling of Mixed Polyolefins - Mix 0

Elemental analysis in kg/kg, waf

C	H	N	S	Cl	Br	O	water	ash	LHV (MJ/kg)
0.845	0.137	0.002	-	0.000	-	0.016	-	0.020	41.2

Represents: Sorting residues from the agricultural sector, sorting residues and rejects from commercial packaging, rejects from the mechanical recycling of household packaging.

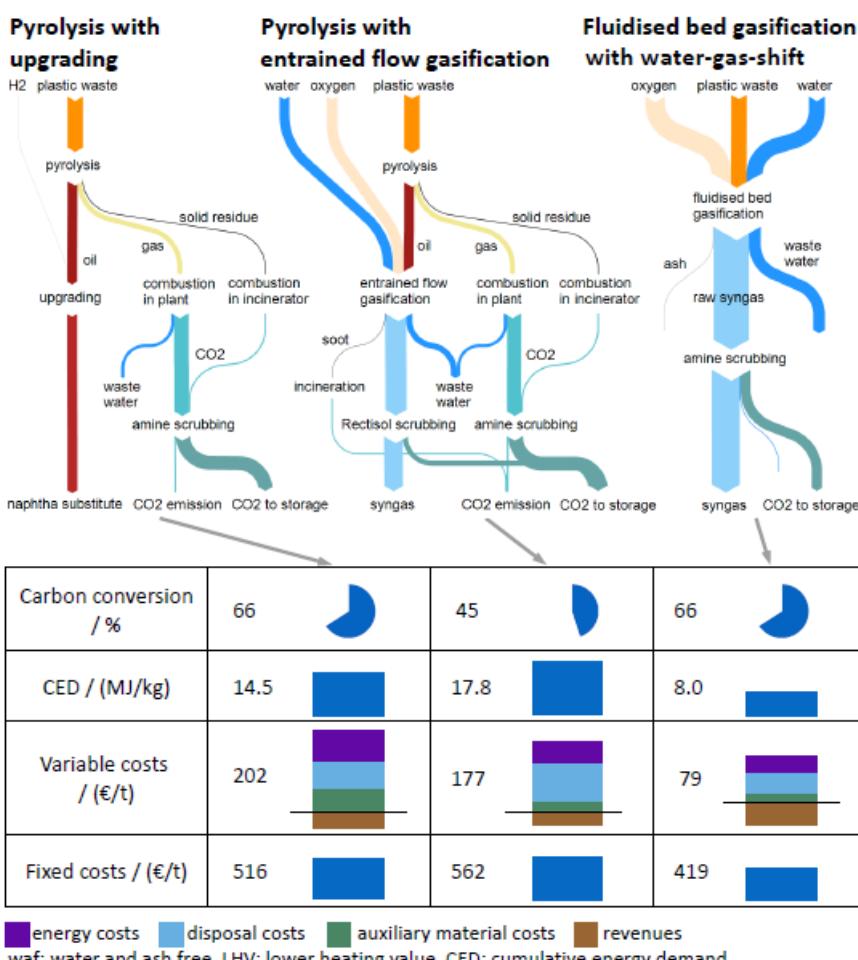


Abbildung 3 Chemisches Recycling von Polyolefin-Mischabfall Mix 0

Abbildung 3 zeigt die Analyse für die größte Abfallfraktionsart, die für chemisches Recycling verfügbar wäre, im Vergleich von Pyrolyse im Vergleich zu Gasifizierungsrouten. Die Kosten für beide Wertschöpfungsrouten, Kunststoffabfälle zu Polymeren via Pyrolyse / Steamcracking und Kunststoffabfälle zu Methanol via Gasifizierung liegen in ähnlicher Größe mit einem Vorteil für die dezentrale Vergasungstechnologie. Letzteres erklärt sich aus der höheren Resourceneffizienz der dezentralen gegenüber der zentralen Gasifizierung höhere Kohlenstoffausbeute im Produkt), da keine Pyrolyseschritt vorgeschaltet werden muss, sowie aus den spezifisch geringeren Investitionskosten der dezentralen Gasifizierung gegenüber der Pyrolyse, da Gasifizierungsanlagen bessere Economies of scale zeigen als Pyrolyseanlagen

/ für höhere Durchsätze gebaut werden können. Hierbei ist zu beachten, dass die Kostenschätzungen mit höherer Unsicherheit belastet sind, als die Stoffflussanalysen.

In der Gesamtmodellierung wird für diese Abfallarten Pyrolyse gewählt um die prognostizierten Polymerbedarfe zu decken (Preisliche Bevorzugung gegenüber der Methanolroute). Die Flugstrom-Gasifizierung wird nicht für Kunststoffabfälle gewählt, sondern für Nebenprodukte der Petrochemie sowie für die Bereitstellung von Synthesegas aus Abfallbiomasse.

Chemical Recycling of Mixed Polyolefins - Mix 1

Elemental analysis in kg/kg, waf

C	H	N	S	Cl	Br	O	water	ash	LHV (MJ/kg)
0.837	0.134	0.003	-	0.010	-	0.016	-	0.020	40.7

Represents: Rejects from the mechanical recycling of agricultural waste after a large fraction of the PVC has been removed for incineration.

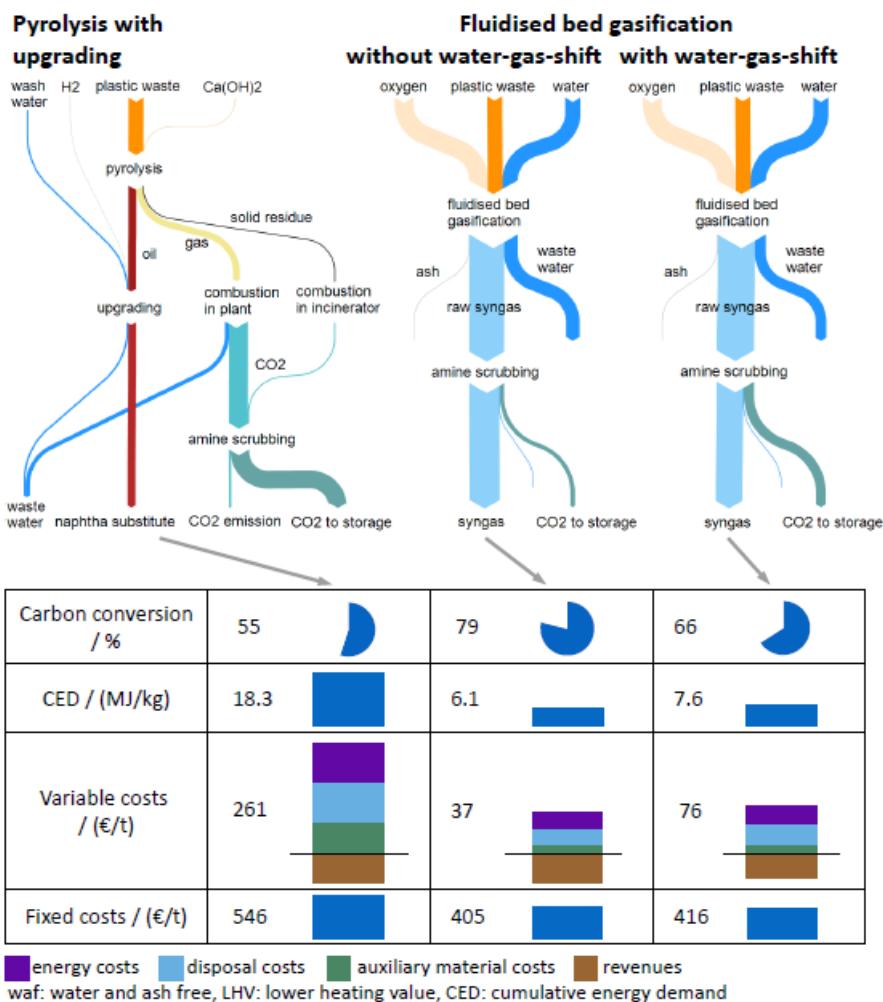


Abbildung 4: Chemisches Recycling von Polyolefin-Mischabfall Mix 1

In Abbildung 4 ist der Technologievergleich beispielhaft für höher verunreinigte Polyolefinabfälle dargestellt. Hier erzielt die Pyrolyse eine geringere Kohlenstoffausbeute im Hauptprodukt (Naphtha) als die dezentrale Gasifizierung (Synthesegas) und damit signifikant höhere Kosten der Mischkunststoffabfallverwertung. Entsprechend wird ein größerer Anteil des Kunststoffabfalls energetisch verwertet, was in die Berechnung des CED eingeht. Bei der Gasifizierung zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen der wasserstoffreichen (Zielprodukt Methanol) und der wasserstoffarmen Synthesegasvariante. Typischerweise wird

die geringere Kohlenstoffeffizienz des Kunststoffabfall-zu-Wasserstoff-Pfades durch einen höheren spezifischen Synthesegaswert kompensiert (hier nicht bewertet).

Chemical Recycling of Mixed Polyolefins - Mix 2

Elemental analysis in kg/kg, waf

C	H	N	S	Cl	Br	O	water	ash	LHV (MJ/kg)
0.806	0.116	0.010	-	0.028	-	0.040	-	0.100	34.7

Represents: Rejects from the mechanical recycling of plastics in the category "other thermoplastics".

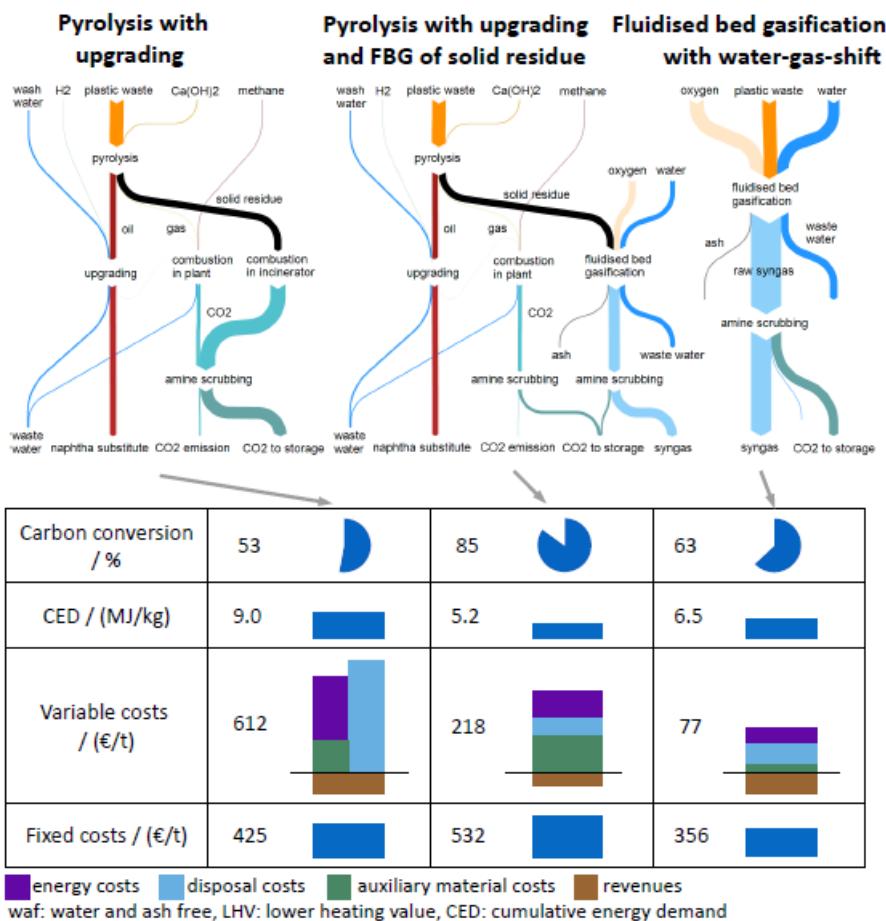


Abbildung 5: Chemisches Recycling von Polyolefin-Mischabfall Mix 2

Bei stark verunreinigten Polyolefinabfällen (Abb. 5) wird die Kohlenstoffeffizienz der Pyrolyse zu niedrig und es entsteht relativ viel Feststoffrückstand mit hohem Kohlenstoffgehalt als Nebenprodukt. Werden diese Nebenprodukte zusätzlich gasifiziert anstatt energetisch verwertet (mittlerer Pfad), so erhöht sich die Kohlenstoffeffizienz und damit die Wirtschaftlichkeit deutlich. Die direkte Gasifizierung dieses Kunststoffabfalls ist trotz niedrigerer Kohlenstoffeffizienz bevorzugt, da sie deutlich niedrigere Kosten aufweist.

Chemical Recycling of PET plastic waste

Elemental analysis in kg/kg, waf

C	H	N	S	Cl	Br	O	water	ash	LHV (MJ/kg)
0.625	0.042	-	-	-	-	0.333	-	0.01	21.9

Represents: Some of the PET plastic waste that is separated out from the sorting residue and from the rejects of the commercial packaging, as well as from the rejects of the household packaging.

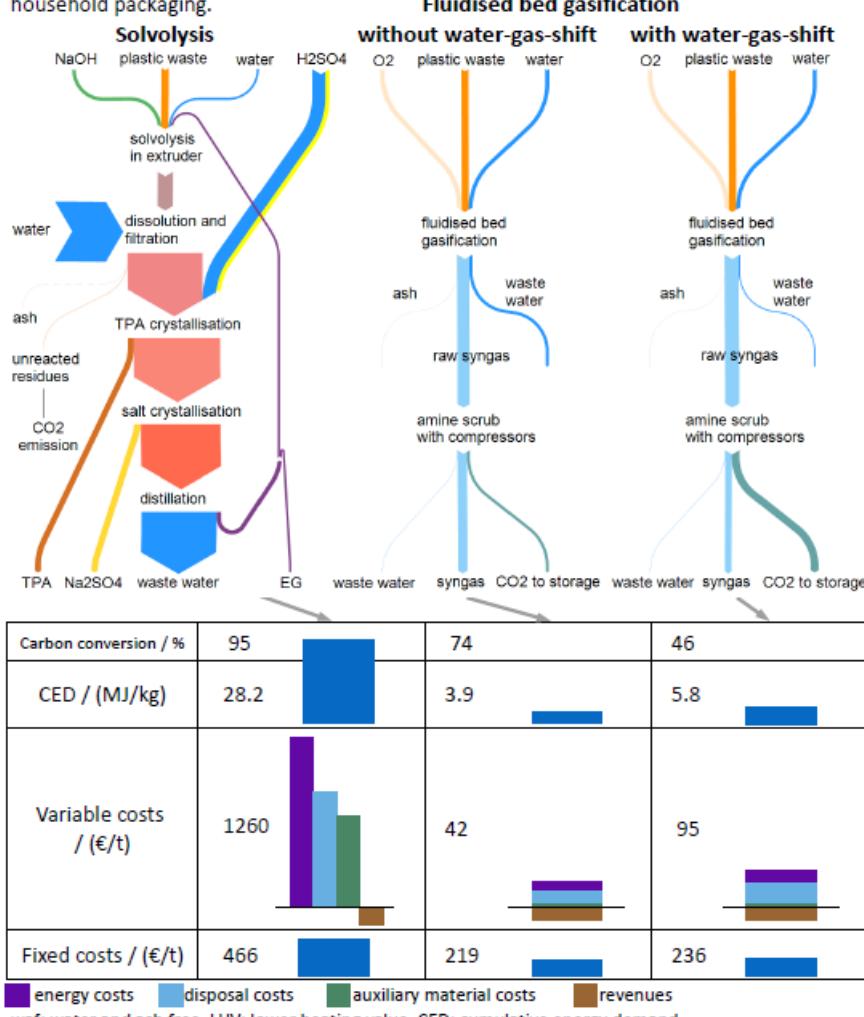


Abbildung 6: Chemisches Recycling von PET, verunreinigt

In Abb. 6 wird das chemische Recycling von sortenreinem, aber verunreinigtem PET als Beispiel für mechanisch nicht recyklierbare Kunststoffe, die aber depolimerisiert werden können, untersucht. Da bei Polyester in der Solvolyse eine schlechte Ressourceneffizienz erzielt wird, wird hier nur die Gasifizierung gegenübergestellt. Die Kohlenstoffeffizienz der Solvolyse ist sehr hoch. Trotz der sehr hohen Kosten dieser Technologie wird sie in diesem Sonderfall von Gesamtmodell gewählt, um den künftigen Bedarf an PET-Rezyklat zu decken.

Abschließend werden die heterogenen kunststoffreichen Mischfraktionen betrachtet, die hoch funktionalisierte Kunststoffe und Verbundmaterialien enthalten. Am Beispiel der Automobil-Schredderleichtfraktion (Abb. 7) zeigt sich eine niedrigere Kohlenstoff-Effizienz und ein hoher Reinigungsaufwand bei der Pyrolyse im Vergleich zur Wirbelschicht-Vergasungstechnologie. Die dadurch verursachten hohen energetischen Verwertungskosten einschließlich CO2-Storage werden im Fall der alternativen Gasifizierung der Nebenprodukte zu Synthesegas signifikant reduziert und die Kohlenstoffeffizienz wird maximiert (mittlerer Pfad). Trotz

niedrigerer Kohlenstoffeffizienz bzw. Produktausbeuten ist jedoch die im rechten Pfad dargestellte direkte Gasifizierung in der Methanolroute heute am kostengünstigsten.

Chemical Recycling of Automotive Shredder Residue

Elemental analysis in kg/kg, waf

C	H	N	S	Cl	Br	O	water	ash	LHV (MJ/kg)
0.741	0.098	0.021	0.002	0.011	0.003	0.124	0.015	0.133	28.8

Represents: Sorting residue from the mechanical recycling of automotive shredder residue, after small amounts of PA6, PMMA and PU have been taken out for solvolysis or pyrolysis and the density fraction $>1.3 \text{ g/cm}^3$ has been separated out.

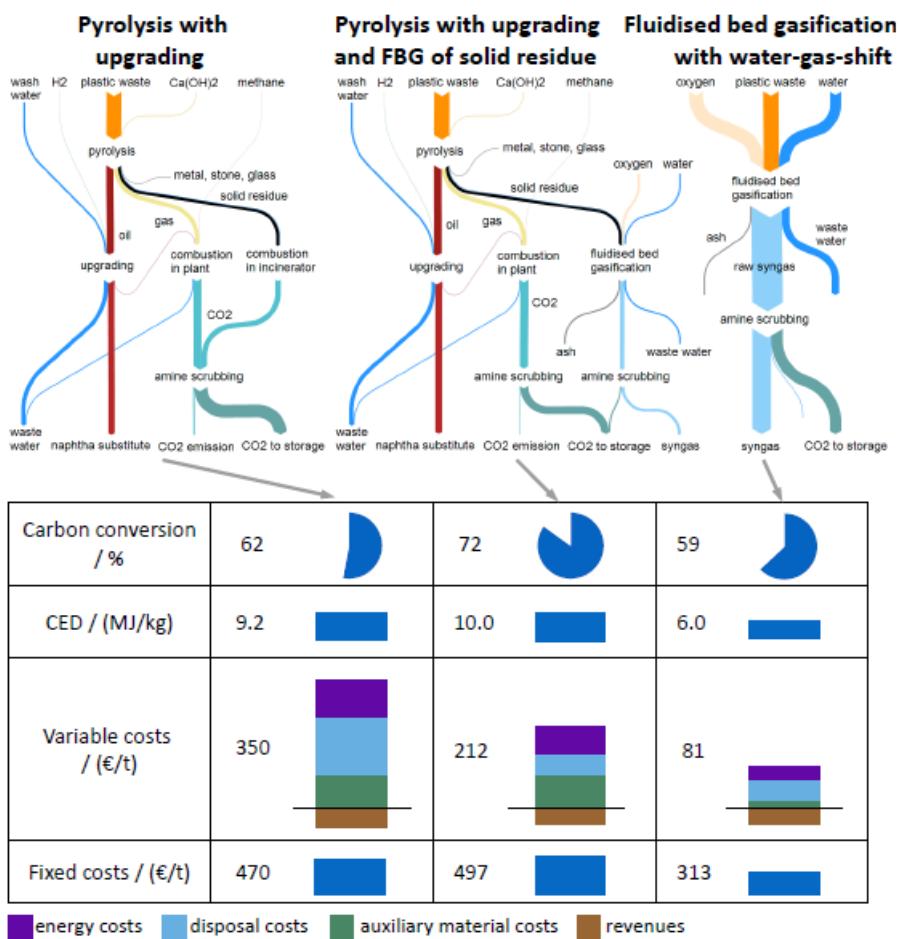


Abbildung 7: Chemisches Recycling der Schredderleichtfraktion aus Altfahrzeugen

Bei WEEE (Abb. 8) mit noch höheren Störstoffanteilen im Polymer ergeben sich gegenüber ASR geringere Wertproduktausbeuten in den dargestellten klimaneutralen Wertschöpfungsketten auf Pyrolysebasis (links und Mitte) bzw. bei der direkten Gasifizierung in der Wirbelschicht (rechts). Die letztere Variante ist daher deutlich kostengünstiger.

Chemical Recycling of WEEE

Elemental analysis in kg/kg, waf

C	H	N	S	Cl	Br	O	water	ash	LHV (MJ/kg)
0.715	0.084	0.021	0.001	0.039	0.007	0.133	0.005	0.276	22.6

Represents: Sorting residue from the mechanical recycling of waste electrical and electronic equipment, after some of the rigid PU foam from the refrigerators has been removed for solvolysis.

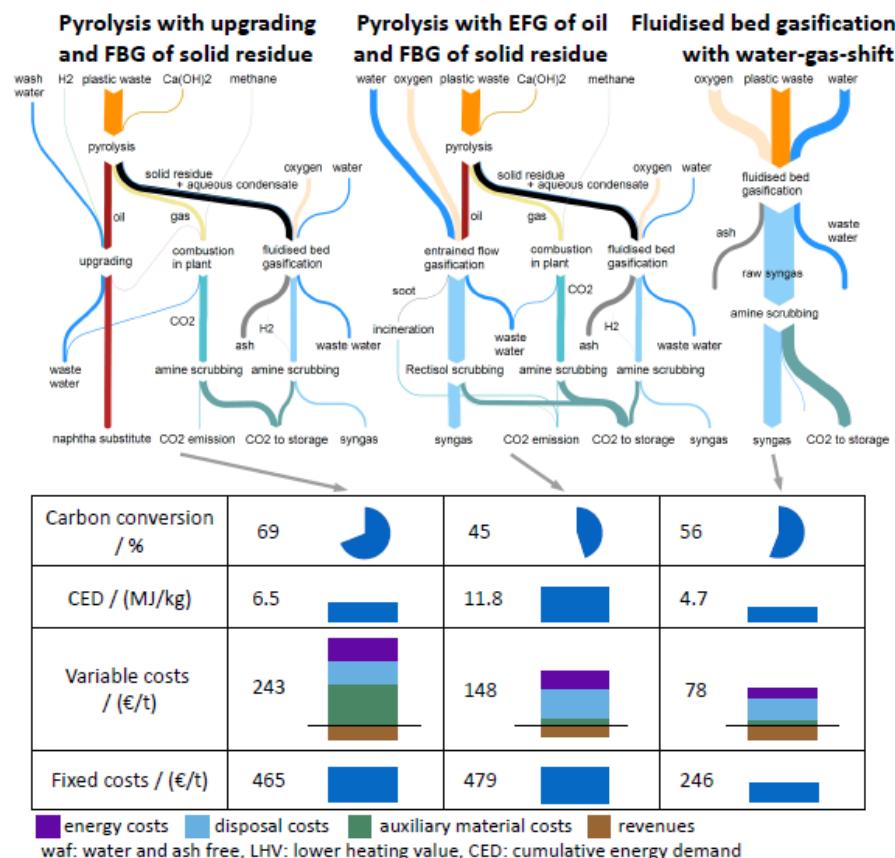


Abbildung 8: Chemisches Recycling der Kunststofffraktion aus Elektro- und Elektronikabfällen

Stakeholderdiskussion der Ergebnisse und Roadmap „Kompass zur Defossilisierung der Chemieindustrie in Deutschland“

Auf Basis der durch das WI in Zusammenarbeit mit Uni Kassel durchgeführten Gesamtsystemsimulationen sowie den hier erläuterten Technologiebewertungen wurde gemeinsam die Roadmap erarbeitet, in Stakeholderworkshops diskutiert und beim Abschlussevent des Projekts vorgestellt sowie als gemeinsamer Abschlussbericht publiziert. Hierbei verantwortete KIT das Teilgebiet des chemischen Recyclings (siehe Vorträge und Veröffentlichungen: Stapf, Reeves (2025), Scholz et al. (2025)). Der gemeinsame Artikel des Konsortiums zur systemischen Bewertung der untersuchten Technologiepfade befindet sich im Nachgang zum Projektabschluss in Vorbereitung.

Zahlenmäßiger Nachweis der wichtigsten Positionen

Der Arbeitsplan wurde im Wesentlichen eingehalten; der Personaleinsatz erfolgte im geplanten Umfang.

Die geringfügige Überziehung der Reisemittel Pos. 0838 konnte durch Einsparungen in der Pos. 0850 (sonstige unmittelbare Vorhabenkosten) ausgeglichen werden; hier fielen geringere Aufwendungen für Softwarelizenzen an.

Die Überziehung der Personalmittel ist den hohen Tarifabschlüssen 2023/2024 und 2025 begründet und kann nur zum Teil durch geringere Ausgaben in Pos. 0850 ausgeglichen werden.

Die genaue Aufschlüsselung ist dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen. Sie entsprachen der im Projektantrag dargelegten Planung. Alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet.

Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Projekt GreenFeed entwickelte mit den Methoden der Szenarioanalyse und Technologiewertung modellbasiert eine Roadmap für die Transformation der petrochemischen Industrie (in Deutschland) hin zu einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft ohne fossilen Ressourceneinsatz. Gemäß dem Projektantrag entfallen damit eine direkte wirtschaftliche Verwertung und wirtschaftliche Erfolgsaussichten. Über die Projektlaufzeit haben sich hierzu keine Veränderungen ergeben. Die wissenschaftliche Verwertung konzentriert sich auf die wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse und die Präsentation auf Konferenzen und den Stakeholder-Workshops des Projektes.

In der aktuellen wirtschaftlichen Situation stagniert die Einführung einer Kreislaufwirtschaft und damit die Defossilisierung der chemischen Industrie als wesentliche Voraussetzung für Klimaneutralität, Resilienz und Unabhängigkeit von Rohstoffimporten. Dies gilt insgesamt für die Industrieproduktion mit unterschiedlichen Roadmaps der Sektoren. Von besonderem Interesse wäre eine integrierte Carbon-Management-Roadmap für den gesamten Energie- und Industriesektor basierend auf einem integrierten Modell, die eine Kohlenstoffkreislaufwirtschaft ganzheitlich betrachtet und so den Einfluss von Steuerungsmaßnahmen aufzeigt. In einem Anschlussprojekt könnte dieses Ziel auf Basis der in GreenFeed erstmals modellbasiert entwickelten Roadmap für die petrochemische, kunststofferzeugende Industrie entwickelt werden, um so industriepolitische Entscheidungsfindungsprozesse zu unterstützen. Hiermit können Implementierungsprozesse zentraler Strategien des Bundes (Carbon-Management-Strategie sowie Kreislaufwirtschafts-Strategie) und der notwendige Industrietransformationsprozess unterstützt werden.

Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

Im Berichtszeitraum wurde das BMWK-geförderte Vorhaben "Chemistry for Climate" abgeschlossen. In den Ergebnissen der Studie werden die Bedeutung und Vorteilhaftigkeit der rohstofflichen Versorgung der chemischen und Kunststoff-Industrie Deutschlands mit biogenen Rohstoffen und Rohstoffen auf Basis des chemischen Recyclings von Kunststoffabfällen hervorgehoben und es werden Potenzialabschätzungen angegeben. Genau hier setzt das "Greenfeed"-Vorhaben an, in dem erstmals mittels eines Systemmodells die Beiträge biopolymerbasierter Routen oder der Technologien des chemischen Recyclings zu einem kohlenstoff- und kostenoptimierten Produktionssystem ermittelt werden. Generell haben sich im Berichtszeitraum keine für das Teilvorhaben grundlegende neue Erkenntnisse (zu Methoden oder Ergebnissen) ergeben.

Veröffentlichungen

Publikationen:

Scholz, A., Kloo, Y., Theisen, S., Saurat, M., Schneider, C., Meisel, K., Röder, L., Dögnitz, N., Cyffka, K.-F., Stäpf, D., Reeves, A. (2025): Unsicherheiten überwinden, grüne Märkte erschließen. Kompass zur Defossilisierung der Petrochemie in Deutschland. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GreenFeed. Wuppertal Institut (Hrsg.).
<https://doi.org/10.48506/opus-8856>

Hennig, M., Dreising, T., Reeves, A., Oehlcke, T., Tavakkol, S., Volk, R., Schultmann, F., Stäpf, D. (2025): Entrained-flow gasification for the utilization of pyrolysis oil from mixed plastic waste. ACS Sustainable Chemistry and Engineering.
<https://doi.org/DOI: 10.1021/acssuschemeng.5c03932>

Fachvorträge:

Hennig, M., Stallkamp, C., Volk, R., Stäpf, D. (2023): Economic and environmental assessment of chemical recycling via pyrolysis: A case study for engineering plastics. 11th International Freiberg Conference, Rotterdam, Niederlande, 24. – 29.09.2023

Hennig, M., Pillich, M., Netsch, N., Tavakkol, S., Bardow, A., Stäpf, D. (2024): Integration of Mixed Plastic Waste Pyrolysis into the Chemical Value Chain via Steam Cracking and Gasification. 10th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation (WasteEng), Sendai, Japan, 20. – 23.08.2024

Stäpf, D., Reeves, A. (2025): Chemisches Recycling – Ausgewählte Bewertungen und Erkenntnisse. Abschlusskonferenz „Green Feedstock for a Sustainable Chemistry“ (online), 29.04.2025. In: „Foliensatz der Abschlusskonferenz GreenFeed“, Wuppertal Institut (Hrsg.).
<https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/1993/>.