Ariadne-Analyse

Reduce, Reuse, Recycle

Circular Economy für eine klimaneutrale Petrochemie in Deutschland

KOPERNIKUS PROJEKTE
Ariadne
Die Zukunft unserer Energie

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Autorinnen und Autoren



» Simon Lukas Bußmann
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung



» Dr. Meta Thurid Lotz
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung



» Jannis Speckmann
Guidehouse



» Dr. Philipp C. Verpoort
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung



» Thobias Sach
Guidehouse



» Dr. Andrea Herbst
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung

Dieses Papier zitieren:
Simon Lukas Bußmann, Meta Thurid Lotz, Jannis Speckmann, Philipp C. Verpoort, Thobias Sach, Andrea Herbst (2026): Reduce, Reuse, Recycle. Circular Economy für eine klimaneutrale Petrochemie in Deutschland. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.
https//doi.org/10.48485/pik.2026.40

Herausgegeben von
Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

November 2026

Kontakt zu den Autorinnen und Autoren: Meta Thurid Lotz,
meta.thurid.lotz@isi.fraunhofer.de

Die vorliegende Ariadne-Analyse wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Die Analyse spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt erstellt.

Inhalt

Kernbotschaften ... **1**

1. Einleitung und Problemstellung ... **2**

2. Maßnahmen für die Petrochemie ... **4**

2.1. Nachfrageseitige Maßnahmen ... *5*

2.2. Materialseitige Maßnahmen ... *8*

3. Potentialanalyse der Maßnahmen ... **10**

3.1. Szenarien und Modellierung ... *10*

3.2. Ergebnisse der modellierten Szenarien ... *20*

3.3. Einordnung der Ergebnisse ... *29*

4. Bestehende Politikinstrumente ... **33**

4.1. Europäische Ebene ... *34*

4.2. Nationale Ebene ... *37*

5. Weiterentwicklung der Politikinstrumente ... **39**

5.1. Mögliche Instrumente ... *40*

5.2. Bewertung der Instrumente ... *43*

5.3. Handlungsempfehlungen ... *48*

6. Fazit und Zusammenfassung ... **50**

Anhang: Modellannahmen ... **53**

Literatur ... **55**

Kernbotschaften

1. **Eine Circular Economy ist ein zentraler Ansatz für eine klimaneutrale und resiliente Petrochemie.** Sie reduziert nicht nur den Bedarf an fossilem Kohlenstoff, sondern auch Energiebedarf, Kosten und Importabhängigkeiten. Dafür müssen nachfrageseitige Maßnahmen wie Reduce und Reuse mit mechanischem und chemischem Recycling verbunden werden.
2. **Eine geringere Nachfrage ist der wirksamste Hebel, um die Größe des petrochemischen Systems zu begrenzen.** Nachfrageseitige Circular-Economy-Maßnahmen können die jährlichen Gesamtsystemkosten und den Energiebedarf senken. Dabei geht es nicht um Verzicht, sondern um einen vergleichbaren Nutzen mit geringerem Materialeinsatz.
3. **Chemisches Recycling ergänzt die Nachfragereduktion und das mechanische Recycling, ersetzt sie aber nicht.** Zusammen mit der Nachfragereduktion kann chemisches Recycling schwer mechanisch recycelbare Abfälle in den Materialkreislauf zurückführen, statt sie zu verbrennen. Dadurch können die spezifischen Kosten des petrochemischen Systems sinken und der Wasserstoffbedarf deutlich zurückgehen.
4. **Der Politikrahmen für eine Circular Economy und die Infrastrukturplanung müssen zusammen gedacht werden.** Die Nachfrageentwicklung, die angestrebten Recyclinganteile und die CO_2-Speicherkapazitäten bestimmen maßgeblich den zukünftigen Bedarf an Strom und Wasserstoff. Strategien für eine Circular Economy müssen daher frühzeitig und verbindlich festgelegt werden, damit Infrastrukturinvestitionen getätigt werden können.
5. **Die Transformation hin zu einer Circular Economy erfordert einen abgestimmten Instrumentenmix statt einzelner Instrumente.** Differenzierte Produktsteuern und eine stärker ökologisch ausgerichtete erweiterte Herstellerverantwortung können nachfrageseitige Maßnahmen fördern. Steigende Quoten für zirkulären Kohlenstoff in Kunststoffanwendungen können einen Anreiz für einen Wechsel der Rohstoffbasis schaffen. Digitale Produktpässe bilden die Grundlage für diese Instrumente.

1. Einleitung und Problemstellung

Die petrochemische Industrie steht vor einer besonderen Herausforderung auf dem Weg zur Klimaneutralität: Während andere Industriesektoren fossile Energieträger vorrangig energetisch nutzen, setzt die petrochemische Industrie diese auch als Rohstoffe ein. Rund die Hälfte der eingesetzten Energieträger der chemischen Industrie entfällt auf die Nutzung als Rohstoff. Diese sogenannten Feedstocks stellen Kohlenstoff für chemische Produkte bereit (European Commission 2023). Olefine und Aromaten bilden dabei die zentralen Grundbausteine der Petrochemie und sind Ausgangsstoffe für den Großteil der heute produzierten Kunststoffe. Da Kunststoffe eine begrenzte Nutzungsdauer aufweisen und überwiegend energetisch verwertet werden, ist davon auszugehen, dass der im Kunststoff gebundene fossile Kohlenstoff am Lebensende in die Atmosphäre gelangt (Eriksson und Finnveden 2009). Der Weg zu einer klimaneutralen Petrochemie erfordert deshalb nicht nur die Minderung energiebedingter Emissionen, sondern auch den Ersatz fossiler Kohlenstoffquellen. Zahlreiche Transformationspfade und Roadmaps sehen hierfür den Einsatz alternativer Feedstocks wie Biomasse, abgeschiedenes CO_2 oder Wasserstoff vor. Allerdings gehen diese Optionen mit erheblichen Herausforderungen hinsichtlich Energiebedarf, Infrastruktur, Verfügbarkeit und Nutzungskonkurrenzen einher (Kloo et al. 2023; Gabrielli et al. 2024; VCI und VDI 2023). Gleichzeitig wächst die Nachfrage nach petrochemischen Produkten weiterhin stark. Insbesondere Kunststoffe gehören zu den am schnellsten wachsenden Materialien weltweit, verbunden mit einem entsprechenden Anstieg von Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen (Stegmann et al. 2022; Barnosell und Pozo 2024). Mehrere Studien betonen daher, dass eine klimaneutrale Chemieindustrie nicht allein durch neue Produktionsrouten erreicht werden kann, sondern eine Circular Economy erforderlich ist (Creutzig et al. 2024; Gabrielli et al. 2023; Stegmann et al. 2022).

Ein zirkuläres Produktionssystem kann dazu beitragen, den Primärrohstoffbedarf zu reduzieren und Kohlenstoff länger im Wirtschaftskreislauf zu halten. Dies ist nicht nur aus Gründen des Klimaschutzes wichtig, sondern hat auch eine hohe wirtschaftliche Relevanz. Da die heimischen erneuerbaren Ressourcen begrenzt sind, wird Deutschland auch zukünftig auf Importe von Energie und Rohstoffen angewiesen sein. Ein geringerer Pri-

märrohstoffbedarf kann dazu beitragen, die Importabhängigkeit zu senken und die Resilienz gegenüber Störungen globaler Lieferketten zu erhöhen (Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE 2025). Gleichzeitig verlagert ein zirkuläres Produktionssystem die Wertschöpfung hin zu wissens- und technologieintensiven Bereichen, beispielsweise dem kreislauffähigen Produktdesign oder Recyclingtechnologien, wo Deutschland grundsätzlich über eine gute Ausgangsbasis verfügt. Deutschland könnte sich, wie in Abbildung 1 dargestellt, weniger von den knappen und teuren Produktionsfaktoren Energie und Rohstoffe abhängig machen und stattdessen auf seine Stärken in Wissen, Forschung und Entwicklung (Know-How, Research & Development) setzen (Acemoglu 2015).

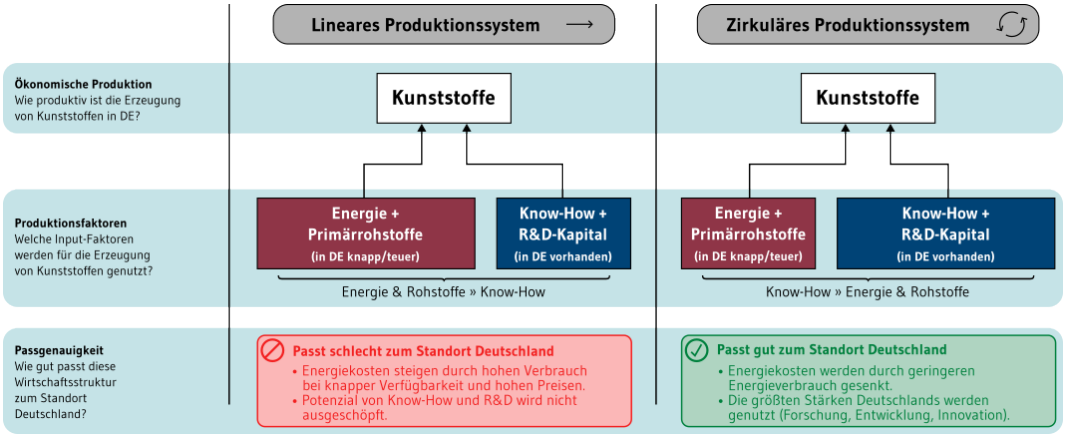

Abbildung 1: Vergleich zwischen linearem und zirkulärem Produktionssystem für Kunststoffe hinsichtlich der Passgenauigkeit für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Quelle: eigene Abbildung

Bisher konzentrieren sich Diskussionen zur Rolle der Circular Economy in der Petrochemie jedoch häufig auf das mechanische Recycling (King und Locock 2022). Insbesondere die Potenziale auf der Nachfrageseite bleiben unzureichend untersucht. Reduce-Maßnahmen wie die Vermeidung unnötiger Anwendungen oder Produkt-Service-Systeme, die Produkte und Dienstleistungen kombinieren, können den Bedarf an Kunststoffen unmittelbar senken. Reuse-Maßnahmen verlängern die Nutzungsdauer von Kunststoffprodukten und reduzieren den Bedarf an Neuproduktion. Für die Chemieindustrie wird geschätzt, dass solche Maßnahmen die Nachfrage deutlich verringern können und damit für die Erreichung von Netto-Null-Emissionen essenziell sind (Creutzig et al. 2024). Neben

nachfrageseitigen Maßnahmen und mechanischem Recycling rücken weitere materialseitige Maßnahmen wie das chemische Recycling in den Fokus. Verfahren wie Pyrolyse, Gasifizierung oder Solvolyse ermöglichen es, Kohlenstoff aus schwer verwertbaren Abfallströmen zurückzugewinnen und als Rohstoff einzusetzen. Gleichzeitig ist die Rolle dieser Verfahren in einem klimaneutralen System umstritten, da sie viel Energie benötigen (VCI und VDI 2023; Kloo et al. 2023; Stegmann et al. 2022).

Die zentrale Frage ist daher nicht, ob Circular Economy einen Beitrag zur Transformation der Petrochemie leisten kann, sondern welche Rolle nachfrageseitige Maßnahmen und chemisches Recycling als Ergänzung zu etablierten Recyclingverfahren spielen. Gleichzeitig ist zu klären, mit welchen politischen Instrumenten sich diese Potenziale erschließen lassen.

2. Maßnahmen für die Petrochemie

Die Circular Economy ist kein neues Konzept, sondern bietet einen Rahmen für diverse Maßnahmen, die den Ressourcenverbrauch minimieren (Blomsma und Brennan 2017). Während zu Beginn das Recycling von Materialien im Fokus stand (Boulding 1966), erweitern neuere Konzepte das Feld. So fassen Kirchherr et al. (2017) verschieden R-Strategienzusammen (3R, 4R, 6R, 9R), die nachfrageseitige Maßnahmen wie Reduce und Reuse oder die energetische Verwertung (Recover) berücksichtigen. Dabei sind nachfrageseitige Maßnahmen nicht als Verzicht zu verstehen, sondern vielmehr als die Bereitstellung eines vergleichbaren Nutzens mit geringerem Materialeinsatz. Darüber hinaus rücken materialseitige Maßnahmen wie chemisches Recycling sowie die Nutzung von Kohlenstoff aus anderen Quellen als Ersatz für fossile Rohstoffe in den Fokus (Replace). Der Begriff Circular Economy wird hier umfassend verwendet und geht über Kreislaufwirtschaft im Sinne des reinen Abfallmanagements hinaus. Die resultierenden Kohlenstoffkreisläufe der petrochemischen Industrie sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

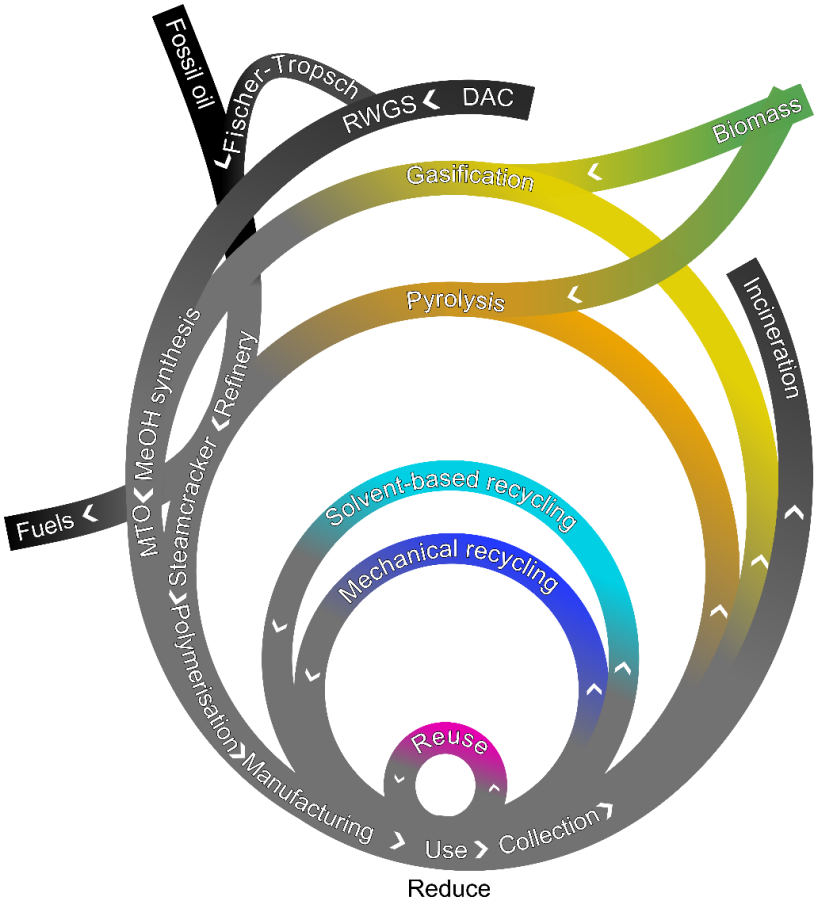

Abbildung 2: Kohlenstoffkreisläufe der Petrochemie (DAC – Direct Air Carbon Capture; RWGS – Reverse-Water-Gas-Shift-Prozess; MeOH – Methanol; MTO – Methanol-to-Olefins-Prozess). Quelle: eigene Abbildung

2.1. Nachfrageseitige Maßnahmen

Aufgrund der Vielzahl der Kunststoffprodukte liegt der Fokus auf nachfrageseitigen Maßnahmen für die mengenmäßig relevantesten Produktbereiche. Gemessen an der Nachfrage in Deutschland im Jahr 2019 entfielen 31 % auf Verpackungen für Lebensmittel oder sonstige Produkte, 28 % auf Rohre, Isolierung, Profile und Sonstiges im Bau, 11 % auf Innen- und Außenausstattung, Elektrik und Komponenten für Fahrzeuge und 9 % auf Elektro- und Elektronikgeräte, beispielsweise Kabel, Elektrogeräte und Telekommunikation. Bereiche wie Haushaltswaren (6 %), Möbel (5 %), Landwirtschaft (5 %), Medizin (3 %) und Sonstiges (2 %) haben im Vergleich hierzu eine untergeordnete Bedeutung (Lindner et al. 2022).

Reduce – Produktbedarf verringern

Um den Einsatz von **Verpackungen** zu reduzieren, gibt es eine Vielzahl von Maßnahmen. Einwegverpackungen können insbesondere im Lebensmittelbereich teilweise vermieden werden (Prakash et al. 2023; Rethink Plastic 2025). Außerdem können alternative biobasierte Materialien anstelle von Plastik für Verpackungen eingesetzt werden (SYSTEMIQ 2022). Auch das optimierte Design von Verpackungen bietet Reduktionspotenzial, begrenzt jedoch auch die Wiederverwendung (SYSTEMIQ 2022; One Planet Network 2023).

Im **Bau** sind die Möglichkeiten zur Reduktion des Kunststoffeinsatzes limitiert. Einerseits kann weniger gebaut werden, indem beispielsweise der Pro-Kopf-Flächenbedarf reduziert wird (Lotz et al. 2024; SYSTEMIQ 2022; Ellen MacArthur Foundation 2019). Andererseits kann die Lebensdauer von Gebäuden beispielsweise durch Renovierung verlängert werden. Inwieweit dadurch auch die Kunststoffnachfrage reduziert wird, ist jedoch unklar, da die Lebensdauer von Kunststoffprodukten deutlich kürzer ist als die des Bauwerks (Ellen MacArthur Foundation 2019; Lotz et al. 2024).

Analog zu Verpackungen und Bau kann auch der Einsatz von Kunststoffen für **Fahrzeuge** teilweise vermieden werden, indem beispielsweise auf öffentliche Verkehrsmittel gesetzt wird (SYSTEMIQ 2022; International Resource Panel 2020; Ellen MacArthur Foundation 2019). Insbesondere für Fahrzeuge spielt auch das effizientere Design bzw. der Bau kleinerer Fahrzeuge eine relevante Rolle (International Resource Panel 2020). Auch eine Verlängerung der Fahrzeuglebensdauer ist denkbar (Ellen MacArthur Foundation 2019; Herbst et al. 2023).

Für **Elektro- und Elektronikgeräte** sind die relevanten Maßnahmen überschaubar. Modelle zur gemeinsamen Nutzung von Elektrogeräten können grundsätzlich die Nachfrage nach Kunststoffen in diesem Bereich senken (Prakash et al. 2023; One Planet Network 2023). Alternativ kann die Lebensdauer dieser Geräte verlängert werden (One Planet Network 2023).

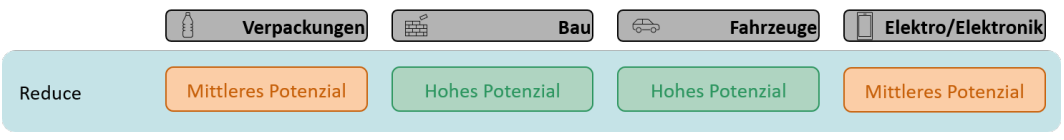

Abbildung 3: Potenziale der Reduce-Maßnahmen je Produktbereich. Quelle: eigene Abbildung

Reuse – Produkte wiederverwenden

Für **Verpackungen** ist insbesondere die Wiederverwendung, also der Übergang von Einweg- zu Mehrwegverpackungen, von hoher Relevanz (Plastics Europe 2024; Material Economics o.J.). Die Umsetzung unterscheidet sich jedoch für Verpackungen für Lebensmittel und solche für sonstige Produkte. Im Lebensmittelbereich sind Rücknahmesysteme für die Endkundschaft denkbar, wie sie beispielsweise heute schon für PET-Pfandflaschen etabliert sind (SYSTEMIQ 2022). Alternativ sind Nachfüllstationen möglich, an denen Endverbraucherinnen und -verbraucher Verpackungen wiederbefüllen können (SYSTEMIQ 2022; 3R 2024). Große Mengen Verpackungen sonstiger Produkte fallen insbesondere im Geschäftsverkehr zwischen Unternehmen (B2B-Bereich) an. Hier hat die Standardisierung beziehungsweise das Design von Verpackungen für die Wiederverwendung nennenswertes Potenzial (3R 2024; SYSTEMIQ 2022; Material Economics o.J.).

Die Wiederverwendung von Kunststoffen im **Bau** ist weniger etabliert und hat geringeres Potenzial als für Verpackungen (Plastics Europe 2024; Material Economics o.J.). Dieses Potenzial kann jedoch erhöht werden, indem Gebäude modular gestaltet und so die Wiederverwendung beim Abriss ermöglicht wird (SYSTEMIQ 2022; Ellen MacArthur Foundation 2019). Die Wirkung verzögert sich jedoch aufgrund der Lebensdauer von Gebäuden (Lotz et al. 2024).

Für **Fahrzeuge** ist das Potenzial für die Wiederverwendung von Kunststoffen geringer als bei Verpackungen, jedoch höher als im Bau (Plastics Europe 2024; Material Economics o.J.; SYSTEMIQ 2022). Analog zum Bau ist auch modulares und standardisiertes Design eine wesentliche Voraussetzung für die Wiederverwendung, die aufgrund einer kürzeren erwarteten Lebensdauer als im Bau früher wirksam wird (Ellen MacArthur Foundation 2019).

Für **Elektro- und Elektronikgeräte** spielt die Wiederverwendung eine untergeordnete Rolle, da Reuse-Systeme für kleinteilige Produkte komplex sind (Prakash et al. 2023).

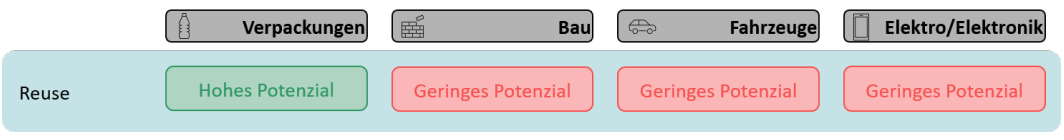

Abbildung 4: Potenziale der Reuse-Maßnahmen je Produktbereich. Quelle: eigene Abbildung

2.2. Materialseitige Maßnahmen

Die materialseitigen Maßnahmen werden im Gegensatz zu den nachfrageseitigen Maßnahmen nicht nach Nachfragebereich, sondern nach Technologie unterschieden. Diese unterscheiden sich maßgeblich abhängig von der Maßnahme.

Recycle – Materialien recyceln

Das **mechanische Recycling** ist bereits etabliert (Kawecki et al. 2021). Kunststoffe werden sortiert, gereinigt und zerkleinert, um zu neuen Produkten verarbeitet zu werden. Das Potenzial ist jedoch eingeschränkt. Produkte aus einer Vielzahl von Kunststoffen sowie gefährlichen Zusätzen und Verunreinigungen verhindern häufig das mechanische Recycling. Eine weitere Einschränkung ist, dass die Kunststoffe mit der Zeit, durch die Nutzung und beim Recycling altern und nicht unendlich oft mechanisch recycelt werden können (Schyns und Shaver 2021). In der Konsequenz ersetzen recycelte Produkte häufig nicht neue Kunststoffprodukte, sondern andere Materialien zum Beispiel bei Parkbänken und Gartenzäunen.

Chemisches Recycling soll Einschränkungen des mechanischen Recyclings überwinden. Hierfür gibt es unterschiedliche Verfahren. Beim **lösemittelbasierten Recycling** werden Kunststoffe mithilfe eines Lösemittels in ihre Molekülketten zersetzt. Unerwünschte Bestandteile können so abgetrennt werden. Während das lösemittelbasierte Recycling in der Regel aufwendiger ist als das mechanische Recycling, können durch dieses Verfahren Kunststoffe in höherer Qualität und Reinheit zurückgewonnen werden, und schwer trennbare Stoffe können ebenfalls abgetrennt werden (Xu et al. 2025).

Thermische Recyclingverfahren wie die **Pyrolyse und Gasifizierung** gehen einen Schritt weiter. Bei thermischen Recyclingverfahren werden Kunststoffe stark erhitzt und zersetzt (Yadav et al. 2023). Bei der Pyrolyse wird das Material unter Sauerstoffausschluss verbrannt und man erhält unter anderem Pyrolyseöl und -gas, die wieder zu Kunststoffen oder auch zu Treibstoffen verarbeitet werden können. Bei der Gasifizierung wird das Material verbrannt und mit Sauerstoff oxidiert, sodass Synthesegas entsteht. Dieses kann über die Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) zu einer Reihe an Kohlenwasserstoffen weiterverarbeitet oder zu Methanol synthetisiert werden (Zang et al. 2021). Methanol

kann direkt als Treibstoff verwendet werden, für die Produktion von Kunststoffen dienen oder über die MTO- (Methanol to Olefins) oder MTA-Routen (Methanol to Aromatics) zu Olefinen beziehungsweise Aromaten für die Kunststoffproduktion weiterverarbeitet werden (Lopez et al. 2023).

Replace – fossile Rohstoffe ersetzen

Auch aus **Biomasse** können Kunststoffe synthetisiert werden. Biologische Reststoffe und ligninhaltige Materialien wie Holz und Stroh können ebenfalls durch Pyrolyse und Gasifizierung verarbeitet werden (Mesfun et al. 2014). Obwohl die genauen Verfahren je nach Biomassetyp variieren, sind die resultierenden Verfahrensrouten ähnlich wie bei der Pyrolyse und Gasifizierung von Kunststoffabfällen. Daneben gibt es Verfahren, welche auf der Fermentation von Biomasse basieren und biologisch abbaubare Kunststoffe Polylactid (PLA) und Polyhydroxyalkanoate (PHA) liefern (Liang et al. 2024; Swetha et al. 2023).

Der Kohlenstoff in Kunststoffen kann auch aus CO_2 gewonnen und mithilfe von Wasserstoff zu neuen Kunststoffen verarbeitet werden (**Carbon Capture and Utilization**, CCU). Der Wasserstoff kann durch Elektrolyse mit grünem Strom aus Wasser gewonnen werden (Lopez et al. 2023). Das CO_2 kann mittels Direct Air Capture (DAC) aus der Luft oder durch Kohlenstoffabscheidung aus Abgasen gewonnen werden (Sievert et al. 2024). Das CO_2 wird hierfür mittels umgekehrter Wassergas-Shift-Reaktion (Reverse Water Gas Shift, RWGS) zu Kohlenmonoxid reduziert, mit dem Synthesegas hergestellt wird. Wie bei der Gasifizierung kann auch dieses Synthesegas auf verschiedene Weise weiterverarbeitet werden.

Recover – Energie zurückgewinnen

Kunststoffe sind sehr energiereich. Bei der **Verbrennung** von Abfällen kann diese Energie teilweise zurückgewonnen werden, um Strom und Wärme zu erzeugen. Allerdings entstehen bei der Verbrennung CO_2 und weitere Schadstoffe. In modernen Müllverbrennungsanlagen können durch aufwändige Abgasreinigungsverfahren Schadstoffe entfernt wer-

den. Diese Schadstoffe werden entweder unschädlich gemacht und als Rohstoffe wiederverwendet oder deponiert. In Zukunft könnte auch CO_2 aus Abgasen abgeschieden werden (Carbon Capture, CC). Eine dauerhafte Vermeidung der Emissionen aus der Müllverbrennung ist durch die Speicherung des abgeschiedenen CO_2 (Carbon Capture and Storage, CCS) möglich, während bei CCU das CO_2 je nach Nutzung freigesetzt werden kann (Hogg 2024).

3. Potentialanalyse der Maßnahmen

Dieses Kapitel quantifiziert die Potentiale der zuvor beschriebenen Maßnahmen für die Transformation der Petrochemie hin zur Klimaneutralität im Jahr 2045. Grundlage ist die Kombination einer Materialflussanalyse für Deutschland mit dem Modell FORECAST-Refine. Im Fokus steht, wie nachfrageseitige Maßnahmen und chemisches Recycling ergänzend zu etablierten mechanischen Recyclingpfaden auf Energiebedarf, Rohstoffeinsatz und Kosten wirken. Um eine Bandbreite möglicher Lösungen abzubilden, werden vier Szenarien für die Nachfrageentwicklung und das chemische Recycling definiert. Die Abfallverfügbarkeit wird dabei als Funktion des Kunststoffverbrauchs modelliert, um die Kopplung zwischen Nachfrageentwicklung und Recyclingpotenzial abzubilden. Auf dieser Basis optimiert das Modell FORECAST-Refine die Produktion von Olefinen und Aromaten sowie die Abfallbehandlung unter der Randbedingung der Klimaneutralität in der Petrochemie. Die Ergebnisse zeigen, wie sich der Einsatz von chemischem Recycling anstelle von energetischer Verwertung auswirkt und welche Rolle die Nachfrageseite spielt.

3.1. Szenarien und Modellierung

Nachfrageentwicklung

Die zukünftige Nachfrage nach Kunststoffen ist die zentrale Inputgröße für die weitere Modellierung, da sie sowohl die benötigte Produktion von Olefinen und Aromaten als auch – über die nachfolgend beschriebene Kopplung mit der Abfallverfügbarkeit – das Potenzial für mechanisches und chemisches Recycling bestimmt. Um einen Lösungsraum für die weitere Analyse aufzuspannen, werden vier Nachfrageszenarien definiert.

Min- und Max-Szenario bilden die äußeren Grenzen dieses Lösungsraums. Sie stellen keine erwarteten Entwicklungspfade dar, sondern dienen als analytischer Rahmen: Das Max-Szenario nimmt eine Fortsetzung des historischen Wachstumstrends ohne signifikante Gegenmaßnahmen an und markiert damit die obere Grenze der plausiblen Nachfrageentwicklung. Das Min-Szenario unterstellt eine drastische Reduktion des Kunststoffverbrauchs auf das Niveau von 1989 durch weitreichende Maßnahmen zum Ersatz von Kunststoffen (Substitution) und zur Verringerung des Materialbedarfs (Suffizienz) und markiert die untere Grenze.

Das Business-as-usual-Szenario (BAU) stellt die als realistisch erachtete Referenzentwicklung dar. Es basiert auf einer Fortschreibung der Trends für die relevanten Produktbereiche ohne zusätzliche, gezielte Circular-Economy-Maßnahmen. Basierend auf historischen Trends wird vereinfachend eine Erholung der Nachfrage bis 2030 auf das Niveau von 2021 angenommen, mit anschließend linearer Steigerung der Nachfrage bis 2045 (Wachstumstrend von 1999 bis 2023). Abbildung 5 zeigt die Kunststoffnachfrage nach Branche von 1990 bis 2050; historische Werte basieren auf Daten von PlasticsEurope, BKV GmbH und Conversio.

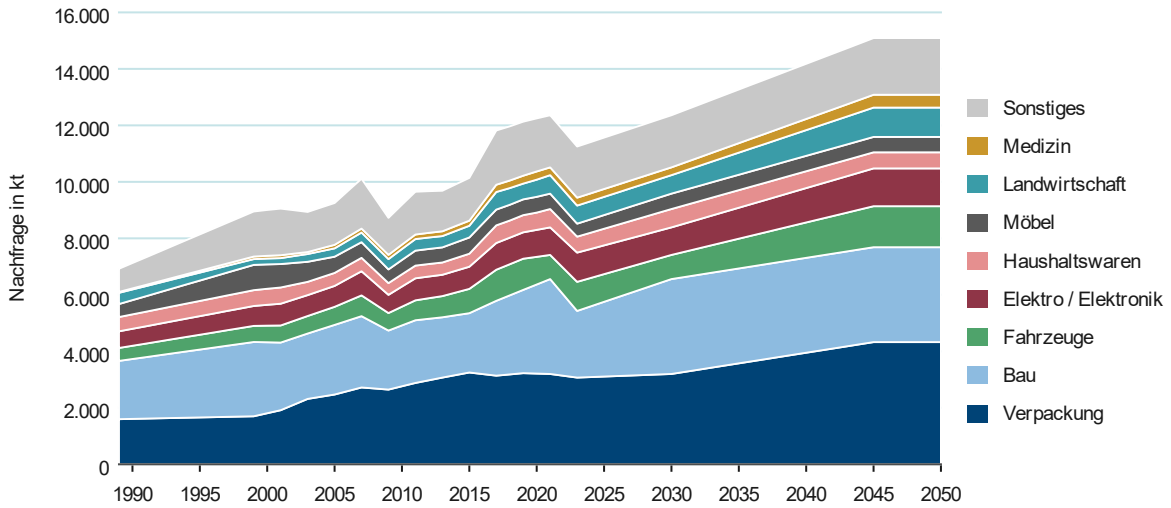

Abbildung 5: Nachfrage nach Kunststoffen nach Branche im Business-as-usual-Szenario von 1990 bis 2050, Quelle: eigene Abbildung basierend auf PlasticsEurope, BKV und Conversio (Lindner et al. 2022; Plastics Europe 2023) und den im Anhang dargestellten Modellannahmen

Das Circular-Economy-Szenario (CE) setzt auf dem BAU-Szenario auf und ergänzt es um die Wirkung der zuvor beschriebenen nachfrageseitigen Maßnahmen. Tabelle 8 im Anhang fasst die zugrunde liegenden, auf Literaturquellen basierenden Modellannahmen zusammen. Das CE-Szenario beschreibt damit eine Variante des BAU-Szenarios unter Annahme einer ambitionierten Umsetzung nachfrageseitiger Circular-Economy-Maßnahmen wie der Vermeidung bestimmter Anwendungen, eines effizienteren Designs und der Verlängerung der Produktlebensdauer.

Abbildung 6 vergleicht den resultierenden Kunststoffverbrauch aller vier Szenarien im Zeitverlauf und veranschaulicht den Lösungsraum zwischen Min- und Max-Szenario, mit BAU- und CE-Szenario als dazwischenliegenden, differenzierten Pfaden. Die detaillierten anwendungsspezifischen Annahmen je Szenario (Wachstumsraten je Produktbereich) sind in Tabelle 9 im Anhang zusammengefasst.

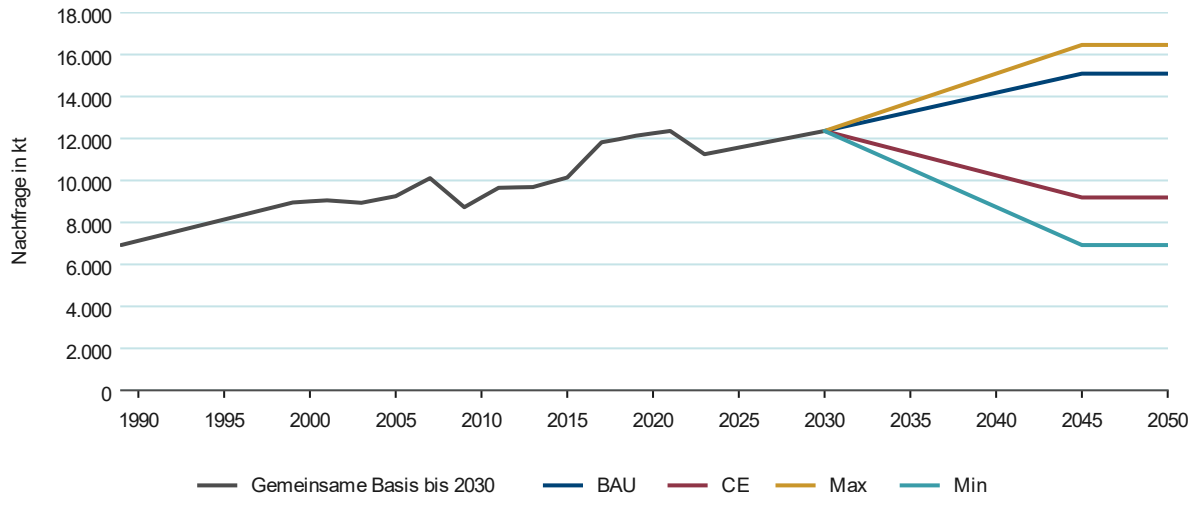

Abbildung 6: Verbrauch von Kunststoffen nach Szenario von 1989 bis 2050. Quelle: eigene Abbildung basierend auf PlasticsEurope, BKV und Conversio (Lindner et al. 2022; Plastics Europe 2023) und den im Anhang dargestellten Modellannahmen

Abfallverfügbarkeit

Die Abfallverfügbarkeit hängt eng mit dem Kunststoffverbrauch zusammen, allerdings zeitversetzt, da Abfall aus Produkten entsteht, die in vorangegangenen Jahren aus Primär- oder Sekundärkunststoff hergestellt wurden. Ein Vergleich historischer Daten zeigt,

dass die tatsächlich anfallende Abfallmenge deutlich unter dem jährlichen Kunststoffverbrauch liegt. Diese Differenz lässt sich zum Teil durch die lange Nutzungsdauer bestimmter Produktgruppen, etwa im Baubereich, durch die Lagerung von Kunststoffprodukten im Bestand, durch Verluste an die Umwelt durch achtlos weggeworfenen Abfall (Littering) und Mikroplastik sowie durch den Handel mit Gebrauchtprodukten erklären, die nicht im Inland als Abfall anfallen.

Um diese Effekte quantitativ zu erfassen, wurde im Rahmen der Langfristszenarien ein Materialflussmodell entwickelt, welches die zukünftige Abfallverfügbarkeit in Abhängigkeit vom Kunststoffverbrauch berechnet (Fleiter et al. 2024). Das Modell berücksichtigt dabei produktgruppenspezifische Lebensdauern und Verlustraten, die anhand historischer Daten und Literaturwerte abgeschätzt wurden. Wie in den Langfristszenarien wird hier angenommen, dass der Anteil importierter und exportierter Produkte und Zwischenprodukte gleich bleibt, während ein Rückgang des Exports von Abfall angenommen wird. Auf dieser Basis ergeben sich für jedes der vier Nachfrageszenarien zeitlich aufgelöste Abfallmengen, die in Abbildung 7 im Vergleich zum jeweiligen Kunststoffverbrauch von 2019 bis 2050 dargestellt sind.

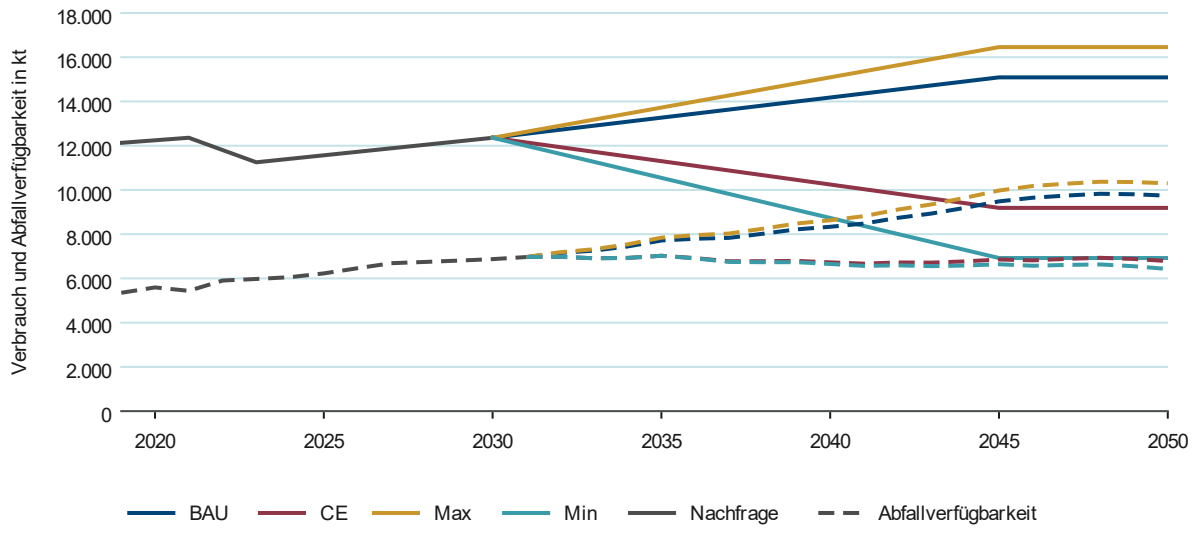

Abbildung 7: Abfallverfügbarkeit und Nachfrage nach Szenario und Jahr. Quelle: eigene Abbildung basierend auf *PlasticsEurope*, BKV *und Conversio* (Lindner et al. 2022; Plastics Europe 2023) und den im Anhang dargestellten Modellannahmen

Für die weitere Modellierung in FORECAST-Refine wird diese Beziehung vereinfacht: Anhand der szenariospezifischen Wertepaare aus Nachfrage und Abfallverfügbarkeit im Zieljahr 2045 wird die Abfallverfügbarkeit wie in Abbildung 8 dargestellt als lineare Funktion des Verbrauchs abgeschätzt. Diese lineare Näherung ermöglicht es, die Abfallverfügbarkeit auch für Zwischenwerte des Verbrauchs konsistent innerhalb des durch Min- und Max-Szenario aufgespannten Lösungsraums abzuleiten, ohne für jeden Verbrauchswert eine vollständige Materialflussmodellierung durchführen zu müssen.

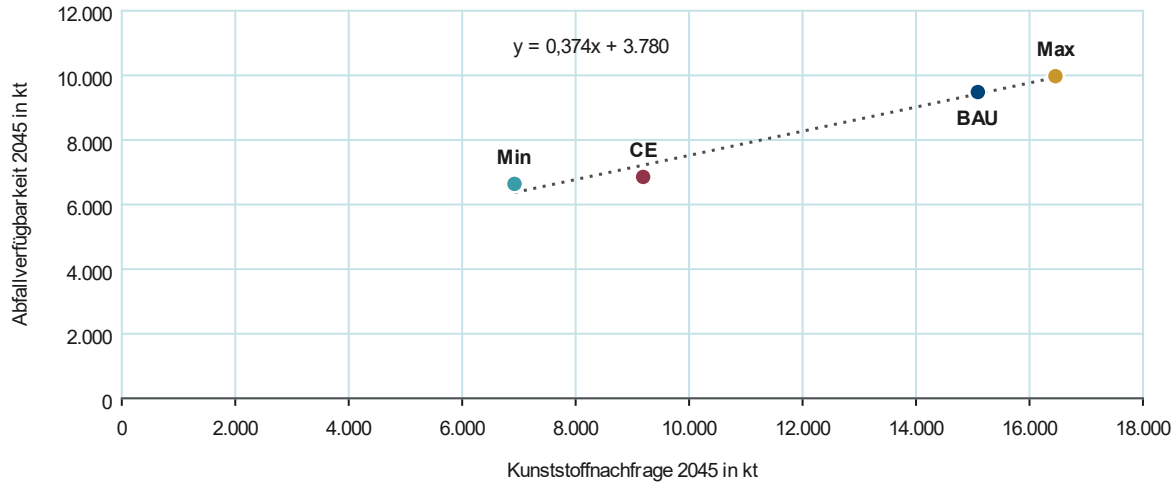

Abbildung 8: Abfallverfügbarkeit als Funktion des Verbrauchs im Jahr 2045 für die vier betrachteten Szenarien und lineare Abschätzung. Quelle: eigene Abbildung

Nettoproduktion

Die Produktion von Olefinen und Aromaten wird im Modell direkt an die Kunststoffnachfrage gekoppelt. Von dieser Nachfrage wird zunächst der Anteil abgezogen, der durch mechanisch recycelte Kunststoffe gedeckt wird – abzüglich jenes Anteils, der entsprechend der Substitutionsquote nicht zur Reduktion der Primärproduktion beiträgt. Für jedes verbleibende Kilogramm Kunststoffnachfrage wird eine Produktion von 770 g Olefinen und 190 g BTX[1]-Aromaten angenommen, entsprechend dem Produktions-Nachfrage-Verhältnis im Jahr 2024.

[1] Benzol, Toluol und Xylol

Recycling

Im Jahr 2019 wurde etwa ein Drittel des gesammelten Kunststoffabfalls in Deutschland dem mechanischen Recycling zugeführt, während weitere 10 % zum Recycling exportiert wurden. Von dem in Deutschland dem Recycling zugeführten Anteil gehen rund 13 % im Recyclingprozess verloren und werden voraussichtlich verbrannt, während die verbleibende Ausbeute als Sekundärkunststoff zur Verfügung steht. Allerdings werden nur etwa 44 % dieser Sekundärkunststoffe tatsächlich zur Substitution von Primärkunststoff eingesetzt (Substitutionsquote) (Lindner et al. 2022). Das entspricht einer effektiven Recyclingquote von etwa 13 %.

Da mechanisches Recycling hohe Emissionseinsparungen bei niedrigen Kosten ermöglicht, sollte es in den kommenden Jahren deutlich ausgebaut werden, sowohl hinsichtlich der Menge als auch der Qualität des recycelten Materials. Für das Jahr 2045 wird angenommen, dass 45 % des gesammelten Kunststoffabfalls dem mechanischen Recycling zugeführt werden, mit einer Ausbeute von 90 % und einer Substitutionsquote von 80 %. Daraus ergibt sich eine effektive Recyclingrate von etwa 32 %, ähnlich wie bei Klotz et al. (2023).

Chemisches Recycling

Kunststoffabfall, der nicht mechanisch recycelt wird, wird heute in der Regel der Müllverbrennungsanlage (MVA) zugeführt. Chemische Recyclingverfahren stellen geringere Anforderungen an die Qualität des Eingangsmaterials als das mechanische Recycling und können daher eingesetzt werden, um einen Teil dieser Verbrennung zu vermeiden.

Das Potenzial des chemischen Recyclings ist jedoch ebenfalls begrenzt, und zwar durch den notwendigen Aufbau der Infrastruktur, den technologischen Hochlauf der entsprechenden Verfahren sowie die Qualität des verfügbaren Ausgangsmaterials – manche Kunststofffraktionen sind aufgrund hoher Verschmutzung durch Zusatzstoffe (Additive) oder eines hohen Chloranteils nur schwer zu verarbeiten.

Um den Einfluss des chemischen Recyclings zu untersuchen, wird der Anteil des nicht mechanisch recycelten Kunststoffabfalls, der dem chemischen Recycling zugeführt wird,

zwischen 0 und 80 % variiert. Diese obere Grenze von 80 % entspricht einem technisch denkbaren Maximalwert und dient dazu, auch Extremfälle in der Sensitivitätsanalyse abzudecken. Als realistisch erreichbar wird jedoch nur ein Anteil von bis zu 66 % angesehen; dieser Wert markiert die Grenze des in dieser Analyse als plausibel betrachteten Lösungsraums. Werte darüber werden als mögliche, aber mit großen Unsicherheiten belastete Extremfälle mitgeführt. Der jeweils verbleibende, nicht chemisch recycelte Anteil wird innerhalb der betrachteten Systemgrenzen der Müllverbrennung zugeführt.

Der resultierende Stoffstrom ist in Abbildung 9 qualitativ dargestellt: Ausgehend von der Kunststoffnachfrage verzweigt sich der Materialfluss in den mechanisch recycelten Anteil, den daraus resultierenden Restabfall sowie die Netto-Nachfrage nach Primärproduktion von Olefinen und Aromaten.

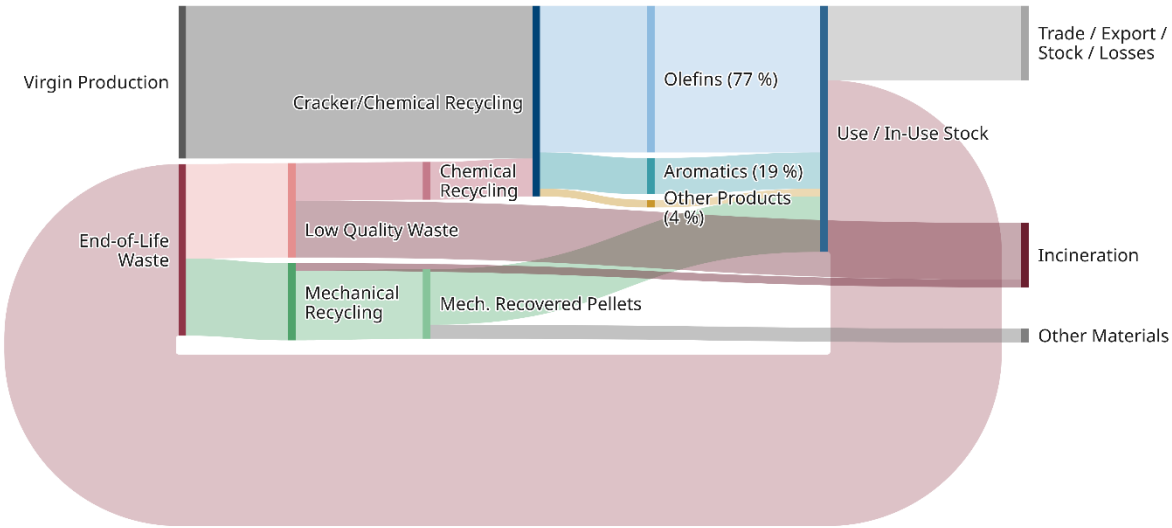

Abbildung 9: Stoffstromdiagramm (bei einer Kunststoffnachfrage von 11,7 Millionen Tonnen und 40 % chemischem Recycling). Quelle: eigene Abbildung

Da die Abfallverfügbarkeit wie zuvor beschrieben eine Funktion des Verbrauchs ist, hängt auch das Potenzial für chemisches Recycling letztlich von der Kunststoffnachfrage ab. Abbildung 10 zeigt dieses Potenzial als Funktion des Verbrauchs und des Anteils des chemisch recycelten Abfalls am verbleibenden Restabfall.

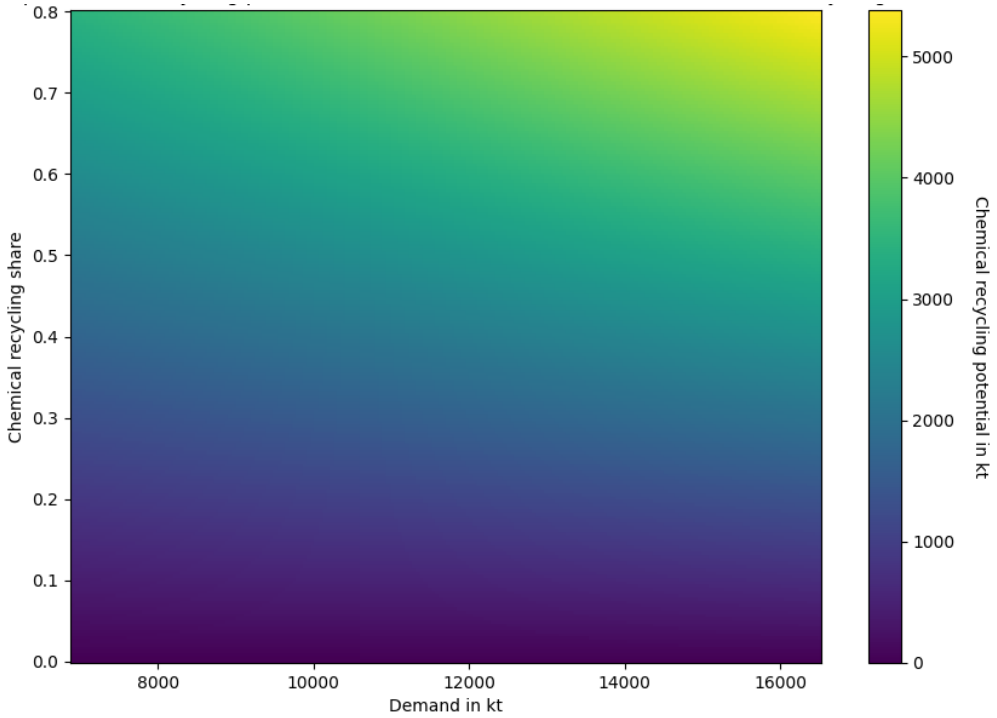

Abbildung 10: Potenzial für chemisches Recycling als Funktion der Nachfrage und des Anteils chemisch recycelten Abfalls bezogen auf den Restabfall, welcher nicht mechanisch recycelt wird. Quelle: eigene Abbildung

Modellierung FORECAST-Refine

Die Produktion von Olefinen und Aromaten wird in FORECAST-Refine unter Berücksichtigung des zuvor beschriebenen Potenzials für chemisches Recycling optimiert. Auch die Verbrennung der übrigen, nicht mechanisch oder chemisch recycelten Abfälle wird im Modell abgebildet. FORECAST-Refine baut methodisch auf dem von Bussmann et al. 2026 für die europäische Raffinerieindustrie entwickelten Optimierungsansatz auf und wird hier auf die Produktion von Olefinen und Aromaten in Deutschland im Zieljahr 2045 angewendet.

Um die Wechselwirkung zwischen Nachfrageentwicklung und Recyclingambition systematisch zu erfassen, werden die Kunststoffnachfrage und der Anteil des chemischen Recyclings schrittweise innerhalb der zuvor definierten Grenzen variiert. Auf diese Weise entsteht eine Lösungsmatrix mit 30 × 30, also insgesamt 900 unabhängigen Optimierungen, die den gesamten Lösungsraum zwischen den Extremszenarien abdeckt und

eine differenzierte Analyse der Kosten- und Energiewirkungen beider Stellgrößen ermöglicht.

Modellbeschreibung

FORECAST-Refine bestimmt die kostenoptimale Produktion von Olefinen und Aromaten in Deutschland im Jahr 2045. Das Modell verfolgt einen Greenfield-Ansatz, das heißt, es berücksichtigt keinen Bestand an Anlagen sowie keine zeitliche oder räumliche Auflösung. Die Optimierung erfolgt mittels linearer Programmierung und basiert auf einer durchgängigen Massen- und Energiebilanz über alle betrachteten Prozesse. Das Modell minimiert die jährlichen Gesamtsystemkosten – bestehend aus auf ein Jahr umgerechneten Investitionskosten (CAPEX), Betriebskosten (OPEX) und Energieträgerkosten – unter Einhaltung der vorgegebenen Nachfrage nach Olefinen und Aromaten. Dabei berücksichtigt es die begrenzte Verfügbarkeit von Energie- und Kohlenstoffträgern, insbesondere von Biomasse und Kunststoffabfall für das chemische Recycling und für die Verbrennung. Für Kunststoffabfall ist zusätzlich ein Mindestverbrauch definiert, sodass der gesamte im jeweiligen Szenario anfallende Restabfall vollständig behandelt werden muss.

Anders als im Modell von Bussmann et al. 2026 wird in dieser Anwendung kein expliziter CO_2-Preis berücksichtigt. Stattdessen wird Klimaneutralität als zwingende Nebenbedingung vorgegeben, sodass das Modell ausschließlich über die Wahl der Technologien und Feedstocks eine emissionsfreie Systemkonfiguration erreichen muss. Für die Emissionsbilanzierung wird eine auf Stoffströmen basierende Bilanzierung (Flow-based Accounting) angewendet (Bussmann et al. 2026): In Produkten gebundener Kohlenstoff, etwa in Kunststoffen, wird als temporär gebunden anerkannt. CO_2 aus der Abfallbehandlung, insbesondere aus der Verbrennung, wird hingegen als Emission gezählt. Das Modell berücksichtigt eine Vielzahl konventioneller und alternativer Prozesse. Dazu zählen das konventionelle Steamcracking (thermische Spaltung) von Naphtha, die Herstellung von Biomethanol über Biomassevergasung sowie Biomassepyrolyse, chemische Recyclingverfahren wie Kunststoffgasifizierung und katalytische Pyrolyse, CCU-basierte Prozesse sowie MTO und MTA.

Annahmen

Die Energieträgerpreise in Tabelle 1 basieren auf dem Technologiemixszenario 2026 (Bartels et al. 2026). Die Preise für fossiles und erneuerbares Naphtha basieren auf einer integrierten Modellierung der klimaneutralen Produktion von Petrochemikalien und Kraftstoffen in der EU. Dabei wird für fossiles Naphtha ein Preis von 17,6 €/GJ angesetzt (Bussmann et al. 2026), der innerhalb der 2025/2026 beobachteten Preisspanne von 10 bis 21 €/GJ liegt (finanzen.net 2026). Für erneuerbares Naphtha wird ein Preis von 80,6 €/GJ festgelegt (Bussmann et al. 2026). Analog zum Referenzmodell für die europäische Raffinerieindustrie werden ein Zinssatz von 8 % und eine Abschreibungsdauer von 10 Jahren angenommen. Wie zuvor beschrieben, wird für CO_2 kein Zertifikatspreis vorgegeben, da Klimaneutralität als zwingende Nebenbedingung modelliert wird. In der Kernanalyse wird eine begrenzte CO_2-Speicherkapazität von 1 Mt/a bei Speicherkosten von 70 €/t angenommen. Die CO_2-Speicherkapazität wird anschließend schrittweise auf 8 Mt erhöht, um den Effekt der Speicherkapazität zu zeigen.

Die Verfügbarkeit von Biomasse wird mit 42,7 TWh bei einem Preis von 34,5 €/GJ angesetzt. Der vergleichsweise hohe Biomassepreis berücksichtigt die zu erwartende sektorübergreifende Konkurrenz um diesen Energieträger, etwa durch andere Industriezweige sowie den Wärme- und Kraftstoffbereich (Bartels et al. 2026).

Tabelle 1: Energieträgerpreise. Quelle: eigene Zusammenstellung basierend auf Bartels et al. (2026) und Bussmann et al. (2026)

Energieträger	Preis 2045 in €/GJ
Strom	36,0
Erdgas	9,9
Kunststoffabfall	1,5
Biomasse (Waldrestholz)	34,5
Wasserstoff	41,2
Naphtha (fossil)	17,6
Naphtha (erneuerbar)	80,6

3.2. Ergebnisse der modellierten Szenarien

Alle 900 Modellläufe ergaben eine zulässige Lösung, was bestätigt, dass das Klimaneutralitätsziel über den gesamten betrachteten Parameterraum technisch erreichbar ist. Die Ergebnisse werden als farbcodierte Diagramme (Heatmaps) mit der Kunststoffnachfrage auf der x-Achse und dem Anteil des chemischen Recyclings (bezogen auf den zur Verfügung stehenden, nicht mechanisch recycelten Kunststoffabfall) auf der y-Achse dargestellt, wobei die Farbe jeweils die betrachtete Zielgröße darstellt. Der realistische Lösungsraum – begrenzt durch CE- und BAU-Szenario auf der Verbrauchsachse und durch 0 bis 66 % auf der Recyclingachse – ist in allen Heatmaps als gestricheltes rotes Rechteck markiert. Die Eckpunkte dieses Rechtecks dienen als Referenzpunkte in der Ergebnisdiskussion: Die BAU-Ecke (hoher Verbrauch, kein chemisches Recycling) entspricht näherungsweise einer Fortschreibung ohne zusätzliche Circular-Economy-Maßnahmen; die CE-Ecke (reduzierte Nachfrage basierend auf den in Tabelle 8 dargestellten Modellannahmen für nachfrageseitige Maßnahmen, maximaler realistischer Recyclinganteil) repräsentiert ein ambitioniertes Kreislaufwirtschaftsszenario.

Die **Gesamtsystemkosten** (Abbildung 11) variieren über die gesamte Matrix zwischen etwa 11 Mrd. € (niedriger Verbrauch, maximales Recycling) und 34 Mrd. € (hoher Verbrauch, kein chemisches Recycling). Innerhalb des realistischen Lösungsraums verengt sich diese Spanne auf rund 16 bis 30,5 Mrd. €. Dominierender Kostentreiber ist der Verbrauch: Der Übergang von der BAU- zur CE-Ecke des Verbrauchs bei konstantem Recyclinganteil senkt die Kosten um etwa 12,7 Mrd. € beziehungsweise 41 %. Chemisches Recycling leistet einen weiteren, kleineren Beitrag – beim Verbrauch des BAU-Szenarios spart eine Erhöhung des Recyclinganteils von 0 auf 66 % zusätzlich rund 3,3 Mrd. € beziehungsweise 11 %.

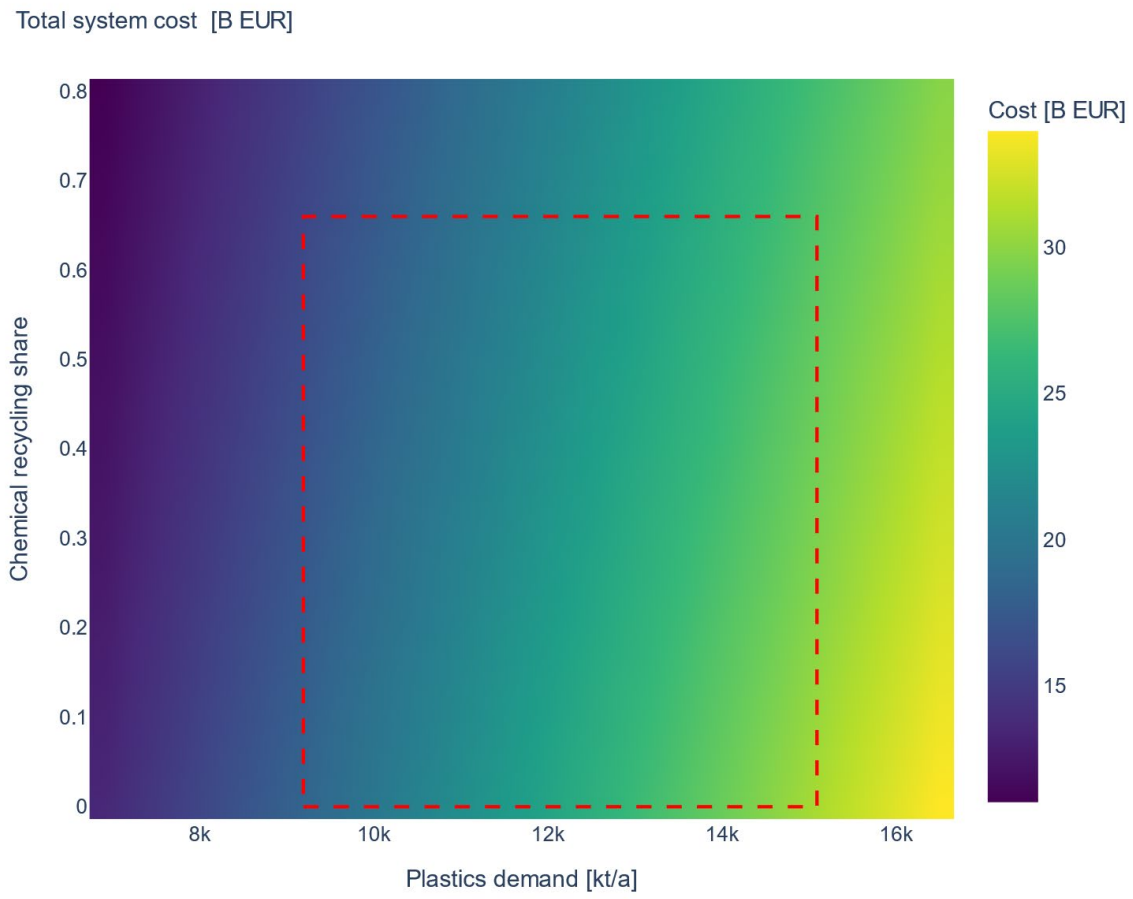

Abbildung 11: Kosten für die Produktion von Olefinen und Aromaten als Funktion des Kunststoffverbrauchs und des Anteils des chemischen Recyclings am nicht mechanisch recycelten Kunststoffabfall. Kosten in Milliarden Euro (B EUR). Quelle: eigene Abbildung

Die **spezifischen Kosten pro Tonne** (Abbildung 12) ergänzen die Betrachtung der Gesamtkosten um eine mengennormierte Perspektive. Innerhalb des realistischen Lösungsraums reichen sie von rund 1.735 €/t (CE-Ecke: niedriger Verbrauch, hohes Recycling) bis etwa 2.053 €/t (BAU-Ecke: hoher Verbrauch, kein Recycling). Wie die Gesamtkosten steigen auch die spezifischen Kosten mit dem Verbrauch: Mit zunehmender Nachfrage muss das Modell zunehmend teurere Syntheserouten in den Produktionsmix aufnehmen, da die günstigeren Feedstocks – insbesondere Abfall und Biomasse – mengenmäßig begrenzt sind. Chemisches Recycling senkt die spezifischen Kosten dagegen über den gesamten Parameterraum hinweg konsistent, was zeigt, dass recycelte Feedstocks wirtschaftlich günstiger sind als die verdrängte Primärroute. Die beiden Hebel wirken auf die spezifischen Kosten in gegensätzlicher Richtung: Nachfrage erhöht sie, chemisches Recycling senkt sie.

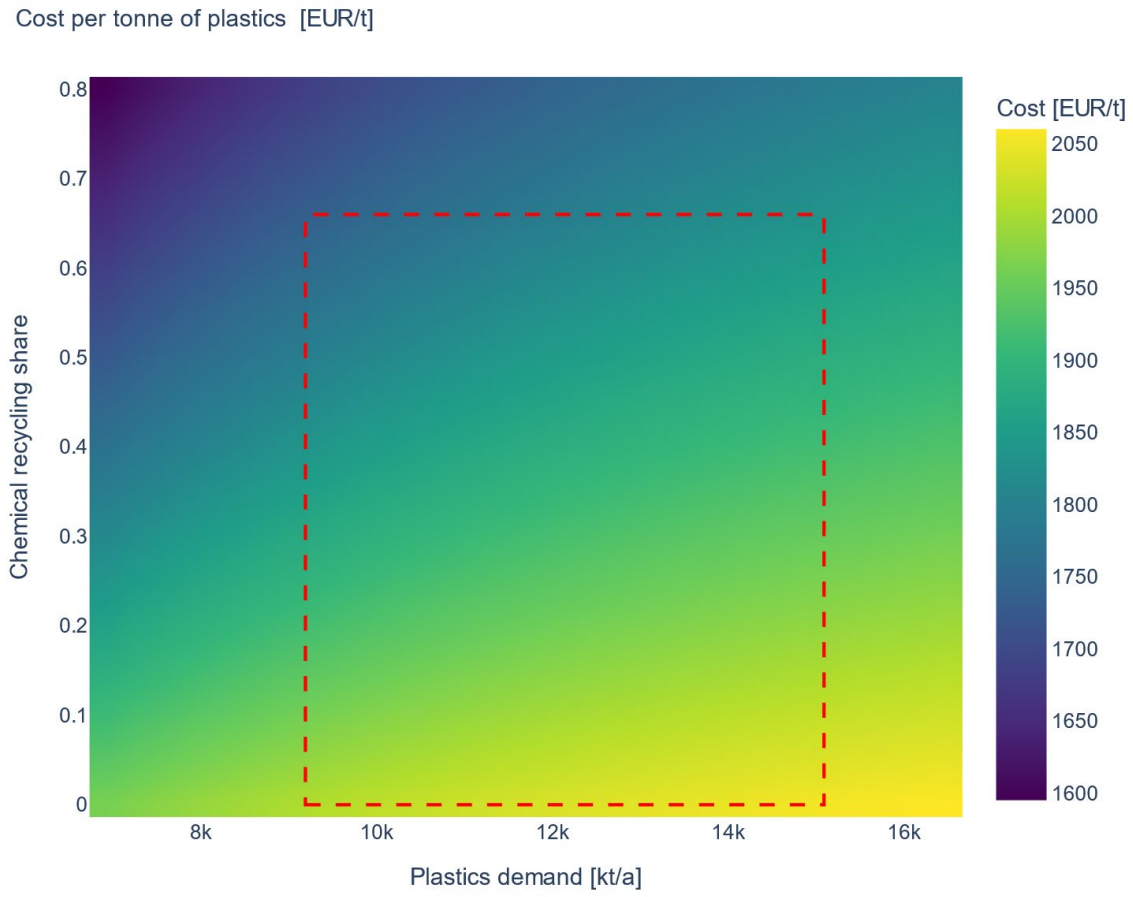

Abbildung 12: Kosten für die Produktion von Olefinen und Aromaten als Funktion des Kunststoffverbrauchs und des Anteils des chemischen Recyclings am nicht mechanisch recycelten Kunststoffabfall bezogen auf die Tonne Kunststoff. Quelle: eigene Abbildung

Der **Gesamtenergiebedarf** (Abbildung 13) folgt einem ähnlichen Muster wie die Gesamtkosten. An der BAU-Ecke des realistischen Lösungsraums (hoher Verbrauch, kein chemisches Recycling) liegt der Energiebedarf bei etwa 301 TWh. An der CE-Ecke (niedriger Verbrauch, maximales realistisches Recycling) sinkt er auf rund 165 TWh – eine Einsparung von etwa 136 TWh beziehungsweise 45 %.

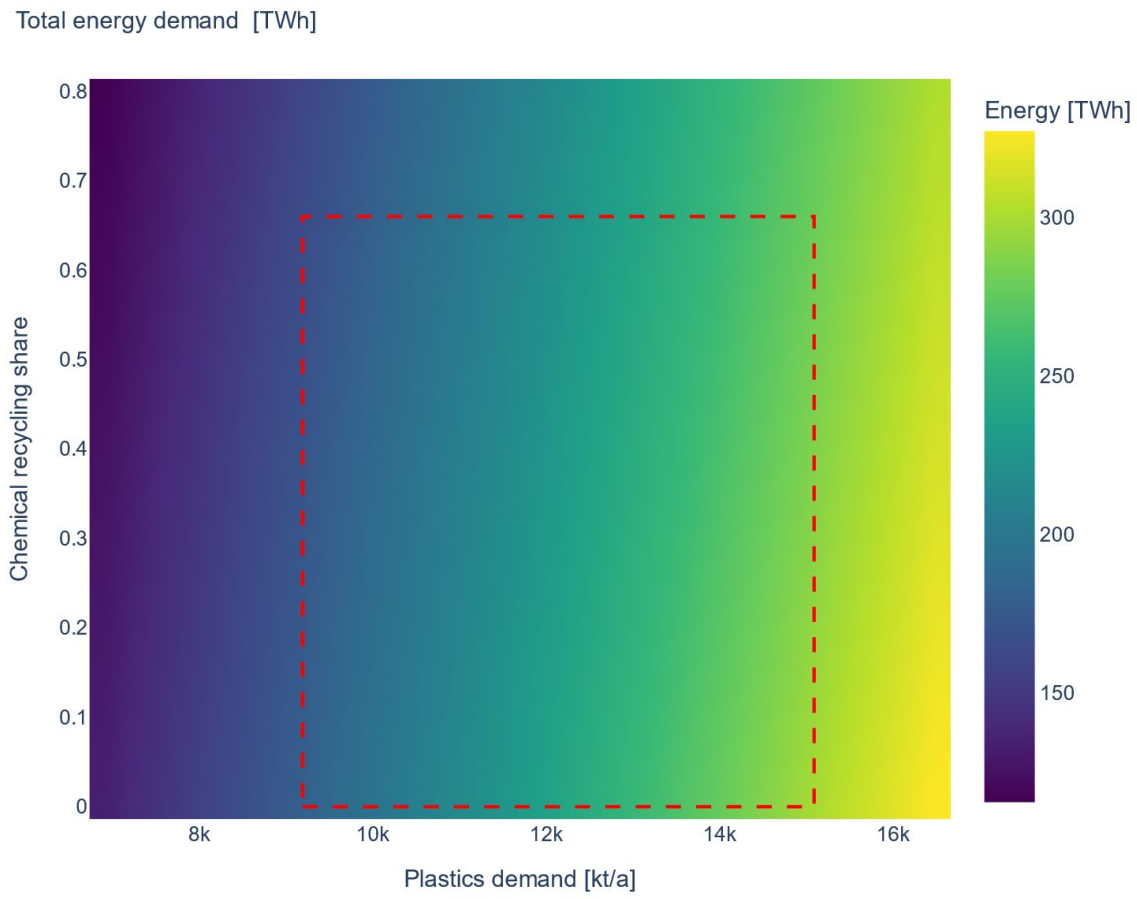

Abbildung 13: Energiebedarf für die Produktion von Olefinen und Aromaten als Funktion des Kunststoffverbrauchs und des Anteils des chemischen Recyclings am nicht mechanisch recycelten Kunststoffabfall. Quelle: eigene Abbildung

Auch die **Energieintensität pro Tonne** (Abbildung 14) verbessert sich entsprechend, was bestätigt, dass recyclingbasierte Routen grundsätzlich weniger energieintensiv sind als eine vollständige Primärsynthese mit Verbrennung.

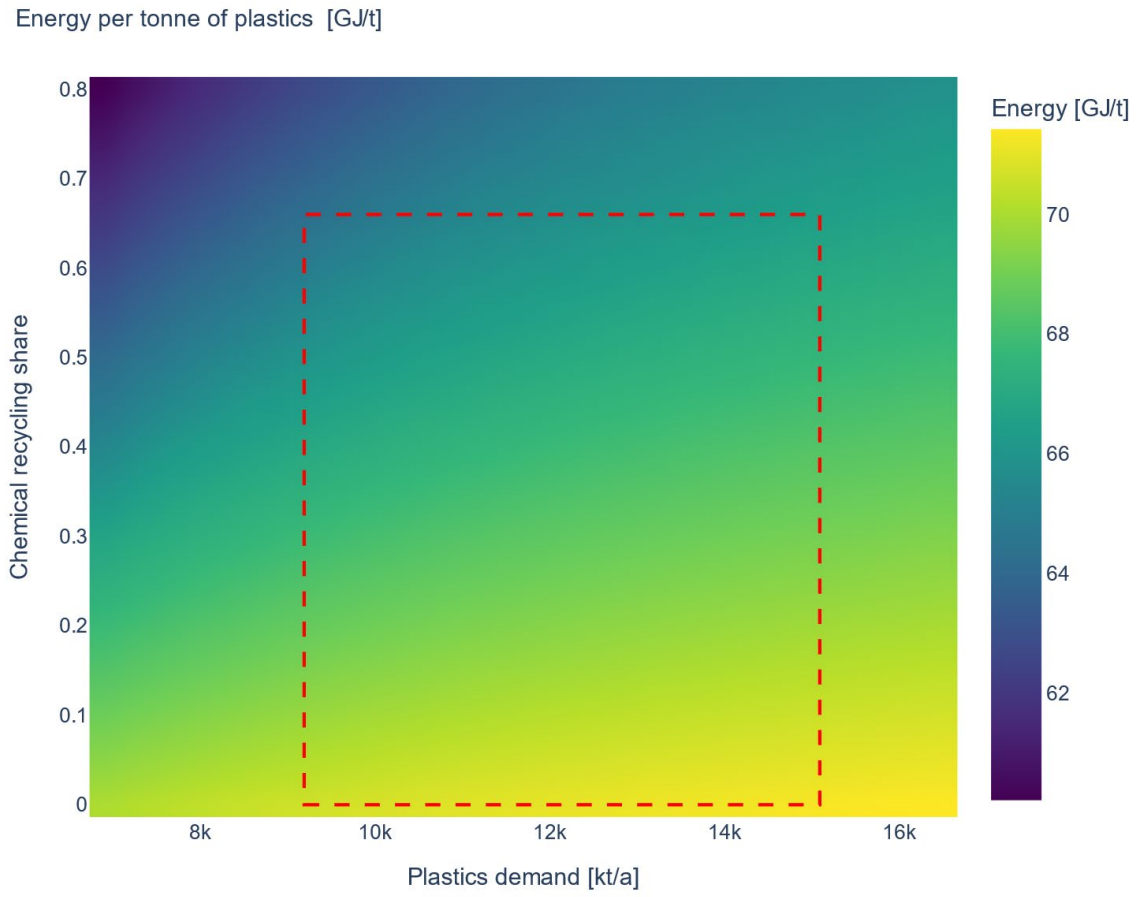

Abbildung 14: Energiebedarf für die Produktion von Olefinen und Aromaten als Funktion des Kunststoffverbrauchs und des Anteils des chemischen Recyclings am nicht mechanisch recycelten Kunststoffabfall bezogen auf die Tonne Kunststoff. Quelle: eigene Abbildung

Der wohl relevanteste Befund betrifft die **Zusammensetzung des Energiebedarfs nach Energieträgern**. Abbildung 15 zeigt den Energieträgermix an den vier Eckpunkten des realistischen Lösungsraums, definiert durch die Kombinationen aus BAU-/CE-Nachfrage und minimalem/maximalem realistischem Recyclinganteil. Die beiden Stellgrößen – Nachfrage und chemisches Recycling – verändern diesen Mix auf grundlegend unterschiedliche Weise.

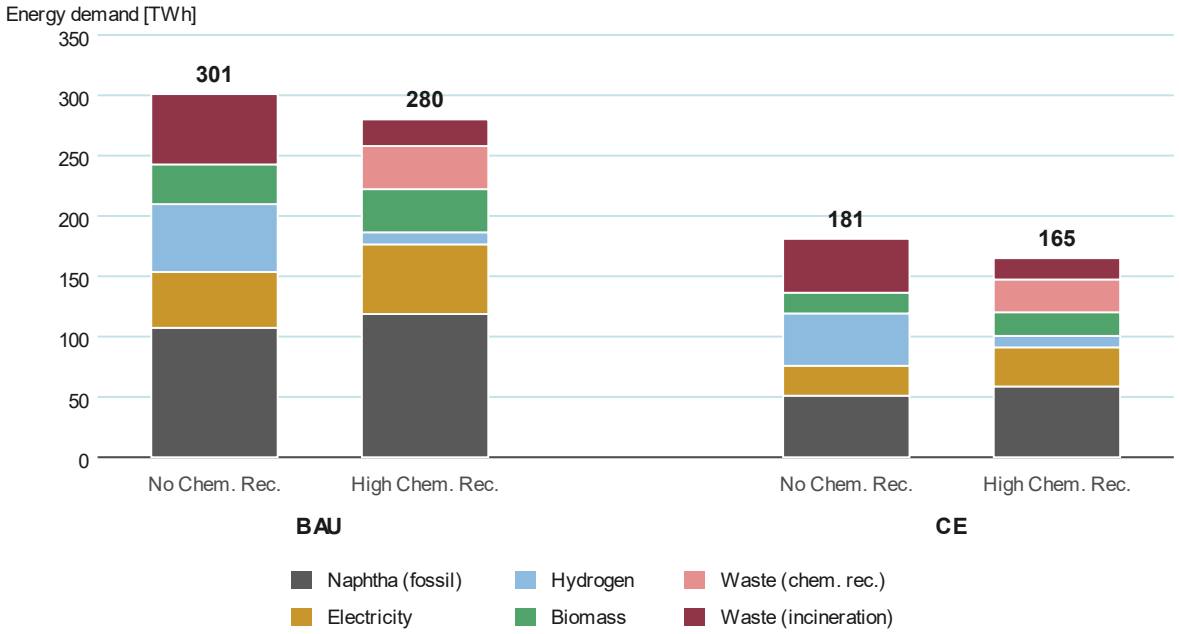

Abbildung 15: Energieträgermix an den vier Eckpunkten des realistischen Lösungsraums (Kombinationen aus BAU- bzw. CE-Nachfrage und minimalem bzw. maximalem realistischem Anteil chemischen Recyclings). Quelle: eigene Abbildung

Der **Strombedarf** steigt mit zunehmendem chemischem Recycling, da Pyrolyseprozesse sowie die nachfolgende Aufbereitung des recycelten Feedstocks stromintensiver sind als die dadurch verdrängten Synthesewege. Der Anteil von Strom am Gesamtenergiebedarf steigt entsprechend von der BAU-Ecke zur CE-Ecke deutlich an.

Naphtha bleibt über die gesamte Matrix dominierend, da es der Standardfeedstock für das Steamcracking ist. Mit steigender Nachfrage steigt der Naphthabedarf stark an. Diese fortgesetzte Nutzung fossiler Rohstoffe ist auch im klimaneutralen System möglich, da die Mengen an Kunststoffabfällen geringer sind als die Produktion neuer Kunststoffe und CO_2 in der Verbrennungsanlage abgeschieden oder durch Recycling wieder zurückgeführt werden kann.

Ein höherer Anteil chemischen Recyclings führt zu einem leichten Anstieg des Naphthaverbrauchs: Indem mehr Kohlenstoff im Kreislauf gehalten und weniger Kunststoffabfall verbrannt wird, kann die Nebenbedingung der Klimaneutralität auch bei einem höheren Einsatz fossiler Rohstoffe eingehalten werden.

Der **Biomassebedarf** ist im Vergleich zu den anderen Energieträgern moderat und durch die begrenzte Biomasseverfügbarkeit limitiert. Zusätzlich werden im Szenario vergleichsweise hohe Biomassepreise angenommen, um die zu erwartende Konkurrenz um diesen Energieträger abzubilden. Beide Faktoren zusammen erklären, warum Biomasse trotz ihrer Rolle als klimaneutraler Kohlenstoffträger nur eine begrenzte, leicht mit Nachfrage und Recyclinganteil steigende Rolle im Energieträgermix einnimmt.

Der nicht mechanisch oder chemisch recycelte Abfall wird verbrannt. An der BAU-Ecke werden rund 58 TWh Kunststoffabfall der **Verbrennung** zugeführt. Chemisches Recycling verlagert diesen Abfallstrom systematisch in den Materialkreislauf: An der CE-Ecke sinkt die verbrannte Menge auf etwa 22 TWh, eine Reduktion um rund 61 %.

Grüner **Wasserstoff** zeigt den auffälligsten Effekt im gesamten Modell (Abbildung 16). An der BAU-Ecke (hoher Verbrauch, kein chemisches Recycling) benötigt das System rund 56 TWh Wasserstoff. Damit ist Wasserstoff der zweitgrößte Energieträger nach Naphtha. Dieser hohe Bedarf lässt sich auf den zugrunde liegenden Mechanismus der Kohlenstoffbilanzierung zurückführen: Die Kapazität zur permanenten CO_2-Speicherung ist im Modell begrenzt. Je weniger Kohlenstoff durch chemisches Recycling in den Materialkreislauf zurückgeführt wird, desto mehr CO_2 fällt bei der Verbrennung des Restabfalls an, das nach der Abscheidung aufgrund der begrenzten Speicherkapazitäten teilweise anderweitig genutzt werden muss – etwa über CCU-Prozesse. Da diese CCU-Routen auf Wasserstoff angewiesen sind, um aus abgeschiedenem CO_2 wieder Kohlenwasserstoffe zu synthetisieren, steigt mit sinkendem Recyclinganteil der Wasserstoffbedarf entsprechend an. Wasserstoff fungiert damit als zentraler Hebel, um die Nebenbedingung der Klimaneutralität dort zu erfüllen, wo Kohlenstoff nicht direkt aus Abfall gespeichert werden kann. Chemisches Recycling eliminiert diesen Bedarf fast vollständig – bei maximalem realistischem Recyclinganteil (bei hoher Nachfrage) sinkt der Wasserstoffbedarf auf etwa 10 TWh. Die Nachfrage selbst hat dagegen einen vergleichsweisen geringen Einfluss auf den Wasserstoffbedarf: Ein Szenario mit niedrigem Verbrauch, aber ohne chemisches Recycling benötigt weiterhin substanzielle Wasserstoffmengen, während ein Szenario mit hohem Verbrauch, aber maximalem Recyclinganteil fast keinen Wasserstoff mehr benötigt. Dies ist ein zentraler Befund für die Infrastrukturplanung: Der Bedarf an Elektrolysekapazität und Wasserstoffinfrastruktur für das petrochemische System wird primär

durch den angestrebten Recyclinganteil bestimmt, nicht durch die Nachfrageentwicklung. Da die CO_2-Speicherkapazität auf diese Weise als struktureller Haupttreiber für den CCU- und damit Wasserstoffbedarf identifiziert wurde, wird im Folgenden der **Einfluss des Kohlenstoffspeicherlimits** genauer untersucht. Dafür wird die Analyse um die verfügbare CO_2-Speicherkapazität als dritte Dimension erweitert.

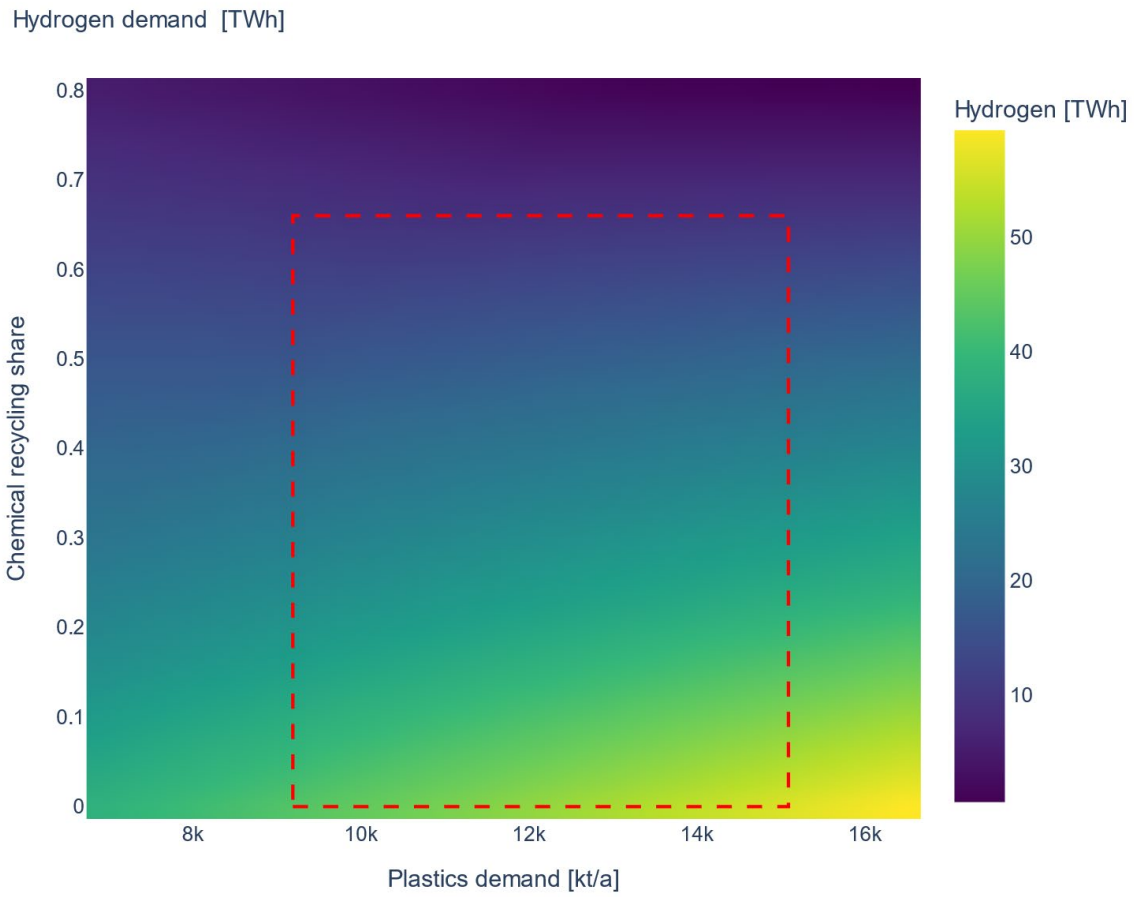

Abbildung 16: Wasserstoffbedarf für die Produktion von Olefinen und Aromaten als Funktion des Kunststoffverbrauchs und des Anteils des chemischen Recyclings am nicht mechanisch recycelten Kunststoffabfall. Quelle: eigene Abbildung

Abbildung 17 zeigt den Einfluss der drei Dimensionen auf die Wasserstoffnutzung. Es zeigt sich, dass die Verfügbarkeit von Kohlenstoffspeichern einen signifikanten Einfluss auf die Wasserstoffnutzung hat: Steht wenig Speicherkapazität zur Verfügung, muss CO_2 aus der Müllverbrennung mittels CCU gebunden werden, wofür Wasserstoff benötigt wird; steht mehr Speicherkapazität zur Verfügung, ist entsprechend weniger CCU nötig.

Bei sehr hoher Nachfrage (Max) und geringem Recyclinganteil kann der Wasserstoffbedarf von 59,4 auf 26,2 TWh sinken, wenn die verfügbare Speicherkapazität von 1 auf 8 Mt/a erhöht wird. Durch geringere Nachfrage (Min) sinkt der Bedarf auf 5,5 TWh, kombiniert mit einem höheren Recyclinganteil sogar auf 0 TWh. Auffällig ist dabei eine Ausnahme bei hohem Recyclinganteil (80 %): Hier sinkt der Wasserstoffbedarf mit steigender Produktion wieder leicht. Der Grund ist, dass bei hoher Nachfrage ergänzend zum Steamcracker verstärkt katalytisches Reforming eingesetzt wird, welches selbst Wasserstoff innerhalb der Systemgrenzen bereitstellt und dadurch indirekt den äußeren CCU-Kreislauf beeinflusst.

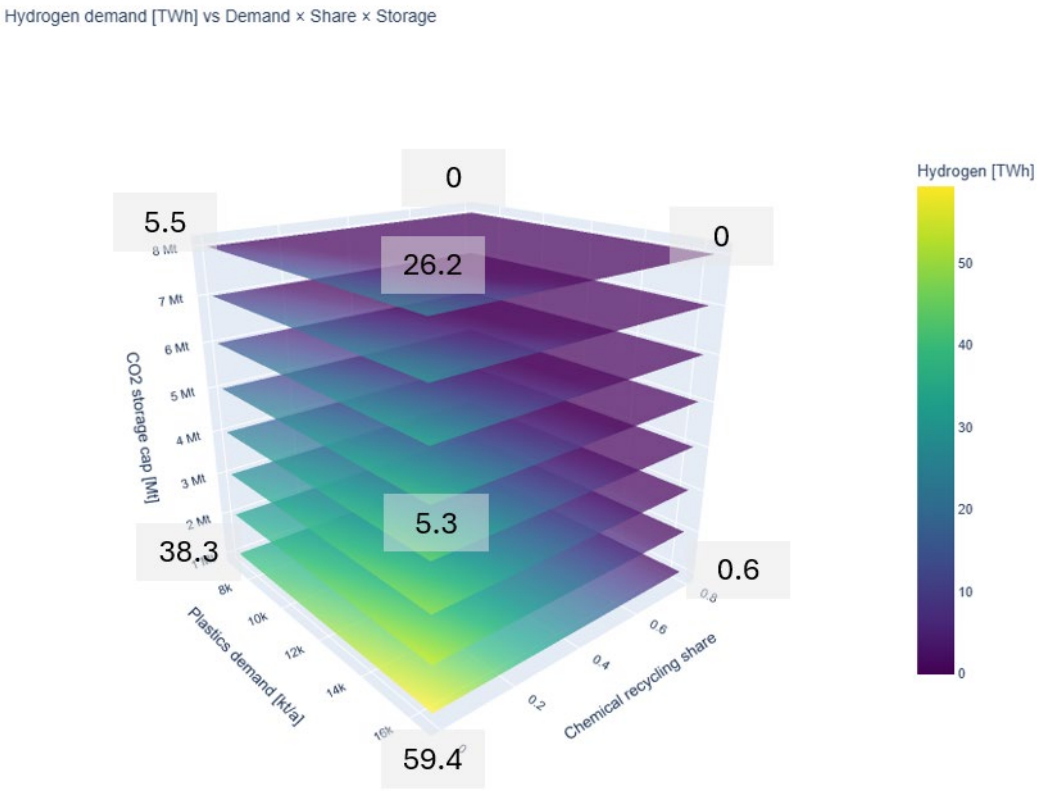

Abbildung 17: Wasserstoffbedarf in Terawattstunden als Funktion des Kunststoffverbrauchs, des Anteils des chemischen Recyclings am nicht mechanisch recycelten Kunststoffabfall und der verfügbaren CO_2-Speicherkapazität dargestellt als gestapelte Ebenen. Quelle: eigene Abbildung

Abbildung 18 zeigt den Einfluss auf die Gesamtsystemkosten. Auffällig ist, dass dieser Einfluss deutlich geringer ausfällt als beim Wasserstoffbedarf: Eine Erhöhung der Speicherkapazität kann die Kosten bei sonst gleichen Parametern lediglich um rund 10 % senken.

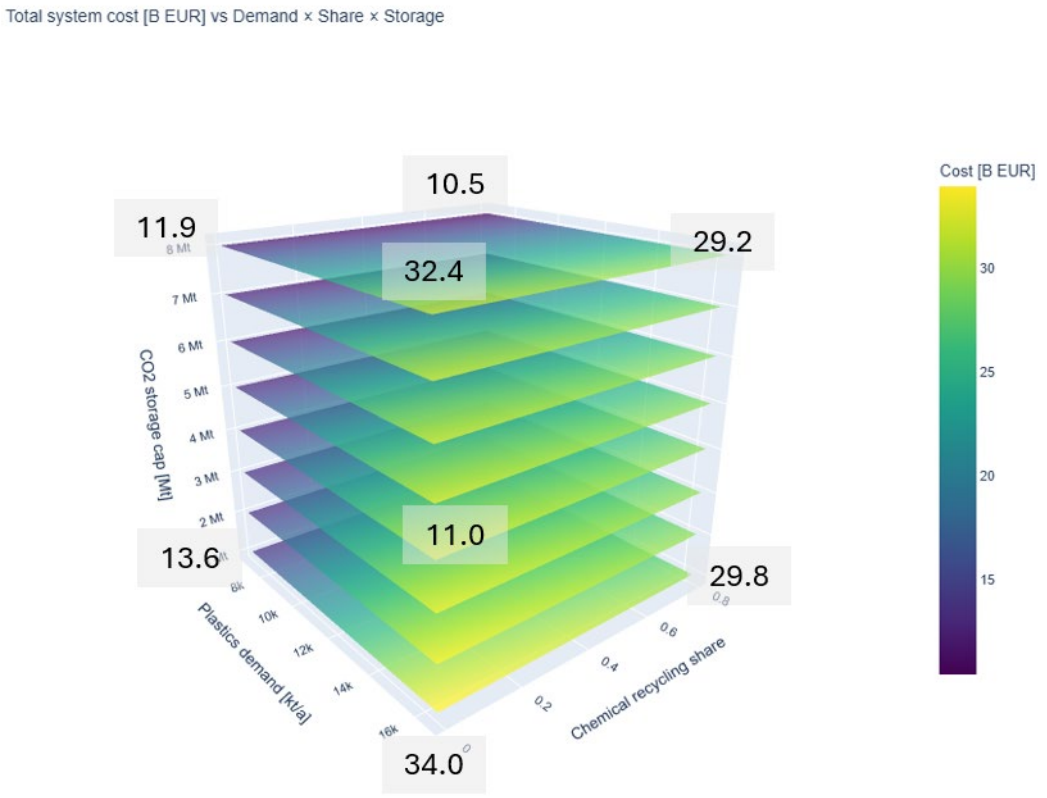

Abbildung 18: Gesamtsystemkosten (in Mrd. €) als Funktion des Kunststoffverbrauchs, des Anteils des chemischen Recyclings am nicht mechanisch recycelten Kunststoffabfall und der verfügbaren CO_2-Speicherkapazität dargestellt als gestapelte Ebenen. Quelle: eigene Abbildung

3.3. Einordnung der Ergebnisse

Kreisläufe von innen nach außen

Die Ergebnisse lassen sich als Abfolge von Kreisläufen lesen, deren Effizienz von innen nach außen abnimmt. Am wirksamsten ist die Reduktion durch nachfrageseitige Maßnahmen: Sie senkt Kosten, Energiebedarf und Abfallmengen nahezu proportional und entlastet damit alle nachgelagerten Stufen gleichzeitig. Das mechanische Recycling wird

hier nicht erneut variiert, sondern als ambitioniert vorausgesetzt – die effektive Recyclingquote steigt in diesem Szenario von heute 13 % auf 31 %; es gilt in der Literatur als der kosten- und energieeffizienteste Recyclingpfad und sollte entsprechend priorisiert ausgebaut werden.

Das bedeutet: Sammlung, Sortierung und Aufbereitung müssen weiterentwickelt werden. Auch schwer zugängliche Abfallströme wie Bau- und Fahrzeugabfälle müssen künftig getrennt und aufbereitet werden. Dabei bestehen teils noch technische Hürden, vor allem aber wirtschaftliche: Die Aufbereitung dieser Ströme ist oft teurer als die Herstellung von Primärmaterial, sodass ohne regulatorische Anreize oder verbindliche Quoten kaum Investitionen in die notwendigen Kapazitäten erfolgen.

Das chemische Recycling erweist sich in unseren Ergebnissen als nächstbeste Option: Es senkt die spezifischen Kosten über den gesamten Lösungsraum und verbessert die Energieintensität pro Tonne. Damit bestätigt sich, dass recyclingbasierte Routen weniger energieintensiv sind als die Kombination aus vollständiger Primärsynthese und Verbrennung des Abfalls. CCU bildet den äußersten Kreislauf und schließt die Kohlenstoffbilanz, wo keine Kohlenstoffspeicherung mehr verfügbar ist, erhöht jedoch Wasserstoffbedarf und Kosten.

Kosten steigen mit dem Verbrauch

Nicht nur die Gesamtkosten, sondern auch die spezifischen Kosten je Tonne nehmen mit der Nachfrage zu. Ursache ist die Begrenztheit der günstigen Feedstocks: Da Abfall und Biomasse mengenmäßig limitiert sind, muss das Modell mit steigender Nachfrage zunehmend teurere zusätzliche Syntheserouten in den Produktionsmix aufnehmen. Chemisches Recycling wirkt diesem Effekt entgegen und senkt die spezifischen Kosten auf allen Verbrauchsniveaus – ein Hinweis darauf, dass chemisches Recycling der Verbrennung vorzuziehen ist. Beide Hebel wirken damit auf unterschiedlichen Ebenen: Die Verbrauchsreduktion durch nachfrageseitige Maßnahmen bestimmt die Größe des Systems, das chemische Recycling seine Effizienz. Die günstigsten Ergebnisse bei allen betrachteten Kennzahlen finden sich folglich dort, wo beide Hebel gemeinsam genutzt werden.

Komplementarität statt Konkurrenz

Nachfrageseitige Maßnahmen und Recycling sind komplementär – das heißt, sie ergänzen einander –, auch wenn sie über die Materialströme miteinander verbunden sind: Eine sinkende Nachfrage verringert langfristig die Abfallmenge und damit das absolute Recyclingpotenzial. Diese Kopplung ist die Konsequenz der Materialflussdynamik des Kunststoffsystems – und sie bedeutet gerade nicht, dass eine der beiden Strategien zurückgestellt werden sollte. Eine Nachfragestrategie ohne begleitende Recyclingziele würde die Zirkularität – also den Anteil der im Kreislauf geführten Materialien – verringern, während ehrgeizige Recyclingziele bei moderater Nachfrage den Anteil neu gewonnener Rohstoffe stärker senken können als eine reine Nachfragereduktion. Politikpakete, die Nachfragereduktion mit verbindlichen Sammel- und Recyclingquoten verbinden, sind daher strukturell robuster als solche, die beide Ansätze gegeneinander abwägen.

Biomasse erweist sich als zentraler Träger, der gleichzeitig Kohlenstoff und Wasserstoff bereitstellt. Bussmann et al. (2026) zeigen, dass sie eine wichtige Rolle einnehmen kann und grundsätzlich stofflich statt energetisch genutzt werden sollte. Die vorliegenden Ergebnisse ergänzen dieses Bild: Bei hohen Biomassepreisen – wie hier angesetzt, um die zu erwartende sektorübergreifende Konkurrenz abzubilden – fällt ihre Rolle kleiner aus, und Klimaneutralität wird über andere Wege erreicht. Auffällig ist zudem, dass ein hoher Anteil fossilen Naphthas im System verbleibt; Klimaneutralität wird nicht durch den vollständigen Ersatz der Feedstocks erreicht, sondern durch die Kombination von Recycling mit CO_2-Abscheidung an der Müllverbrennungsanlage. CCU ist dabei nicht zwangsläufig wirtschaftlich: Solange Kohlenstoff dauerhaft gespeichert werden kann, ist die Speicherung günstiger. CCU trägt aber zur Diversifizierung bei, schont begrenzte Ölressourcen und verringert die Abhängigkeit von CO_2-Speichern, die weiterhin mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.

Implikationen für die Energieinfrastrukturplanung

Die Ergebnisse unterstreichen den Wert einer integrierten Systemanalyse: Maßnahmen für eine Circular Economy und die Planung der Energieinfrastruktur müssen gemeinsam

gedacht werden, um Ziele frühzeitig festzulegen und die Infrastruktur effizient auszulegen. Konkret könnte den aktuellen Schwierigkeiten beim Wasserstoffhochlauf mit einem ambitionierten Ausbau des chemischen Recyclings begegnet werden: Es senkt den Wasserstoffbedarf des petrochemischen Systems drastisch und macht Klimaneutralität weniger abhängig von einem zeitgerechten H_2- und CCS-Hochlauf. Dieser Vorteil kann jedoch mit einem höheren Strombedarf einhergehen und verschiebt so die Anforderung an die Infrastruktur von der Wasserstoffwirtschaft auf Netzanschlüsse und die Elektrifizierung der Anlagen. Hinzu kommt die Rolle der Biomasse, deren nachhaltige Bereitstellung für die stoffliche Nutzung ebenso vorausschauend geplant werden muss wie Strom-, Wasserstoff- und CO_2-Infrastruktur.

Unsicherheit in der Abfallverfügbarkeit

Ein auffälliger Befund der Materialflussanalyse ist die große Lücke zwischen Kunststoffnachfrage und gesammeltem Abfall. Sie lässt sich nicht allein durch lange Produktlebensdauern, Lagerbestände und den Handel mit Gebrauchtprodukten erklären und sollte weiter untersucht werden (Material Economics 2021). Da das Potenzial beider Recyclingpfade unmittelbar von der Abfallverfügbarkeit abhängt, ist die Aufklärung dieser Lücke von erheblicher Bedeutung: Ein systematisch überschätzter Verlust würde das Recyclingpotenzial unterschätzen – und umgekehrt. Für die Bewertung von Circular-Economy-Maßnahmen ist eine belastbare, zeitlich aufgelöste Materialflussbasis daher mindestens so wichtig wie die technische und wirtschaftliche Bewertung der Recyclingverfahren selbst.

Modellgrenzen

Die Analyse unterliegt mehreren methodischen Einschränkungen. Die Optimierung mittels linearer Programmierung (LP) minimiert Kosten unter der Vorgabe der Klimaneutralität, bildet jedoch keine Marktdynamik, Investitionszyklen oder Technologielernraten über die Zeit ab. Die Parameter des mechanischen Recyclings werden über die gesamte Matrix konstant gehalten, was das Potenzial höherer Sammelquoten ignoriert. Die Abfall-

verfügbarkeitsfunktion ist eine vereinfachte lineare Näherung und bildet zeitversetzte Effekte – heutiger Abfall spiegelt vergangenen Verbrauch wider – nur begrenzt ab. Die Systemgrenze umfasst die deutsche Olefin- und Aromatenproduktion; nachgelagerte Kunststoffverarbeitungsschritte und die breitere Lieferkette sind nicht enthalten. Schließlich stellt die Analyse eine statische Momentaufnahme für 2045 dar und keinen Transformationspfad; Kosten des Übergangs und Risiken vorzeitiger Wertverluste bei Investitionen (gestrandete Investitionen) werden nicht behandelt.

4. Bestehende Politikinstrumente

Politikinstrumente für eine Circular Economy können, wie in nachfolgender Abbildung dargestellt, nachfrage- und materialseitige Maßnahmen entlang der petrochemischen Wertschöpfungskette fördern – von Herstellern und Inverkehrbringern hin zu Verbrauchern und Recyclern (Zampori und Pant 2019).

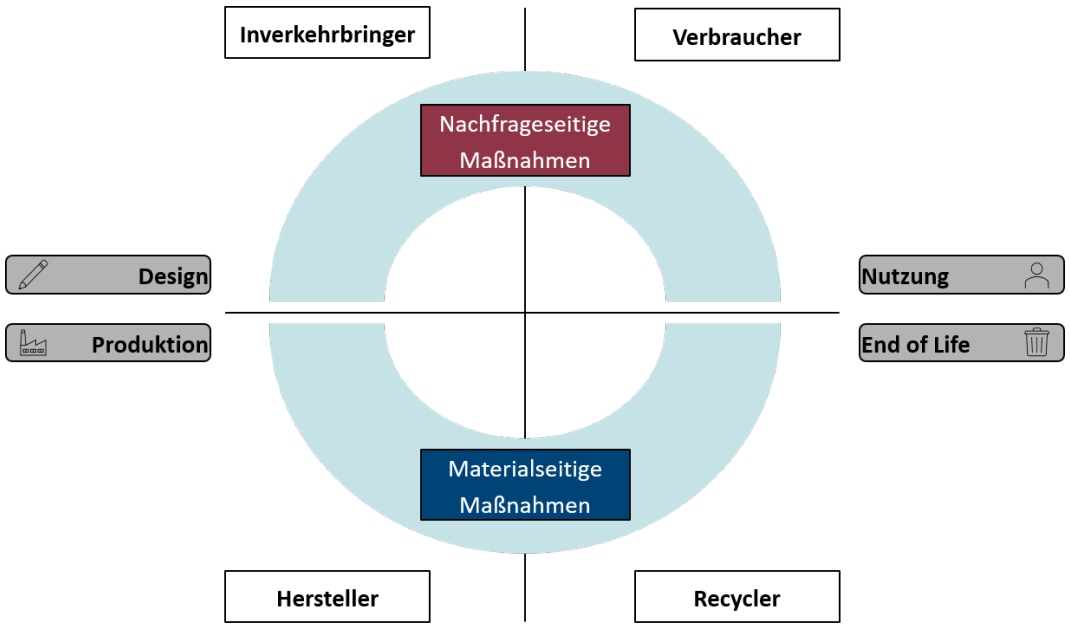

Abbildung 19: Anknüpfungspunkt für Politikinstrumente entlang der Wertschöpfungskette der petrochemischen Industrie. Quelle: eigene Abbildung

4.1. Europäische Ebene

Die Circular-Economy-Politik der Europäischen Union basiert auf einem Zusammenspiel aus Abfallrecht, produktbezogener Regulierung und industriepolitischen Strategien. Den übergeordneten strategischen Rahmen bildet der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy Action Plan, CEAP)[2] von 2020 als zentraler Baustein des European Green Deal[3]. Der Aktionsplan verfolgt das Ziel, den Ressourcenverbrauch zu reduzieren, die Kreislaufführung von Materialien zu stärken und die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft zu erhöhen. Die Umsetzung erfolgt zunehmend über eine produktspezifische Regulierung. Der Entwurf des Industrial Accelerator Act (IAA)[4] ist hingegen nicht primär auf Circular Economy ausgelegt, enthält jedoch mehrere Anknüpfungspunkte. Insbesondere wird die Vereinbarkeit mit produktbezogener Regulierung hervorgehoben. Darüber hinaus wird der im Clean Industrial Deal[5] angekündigte Circular Economy Act[6] ausdrücklich als komplementäres Instrument eingeordnet. Insbesondere sollen ein europäischer Binnenmarkt für Sekundärrohstoffe geschaffen, Angebot und Nachfrage nach hochwertigen Rezyklaten gestärkt sowie bestehende Hemmnisse im grenzüberschreitenden Materialkreislauf abgebaut werden.

Instrumente für nachfrageseitige Maßnahmen

Für **Inverkehrbringer** von Produkten gibt es auf der EU-Ebene ein wesentliches ordnungspolitisches Instrument, die Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (Ecodesign for Sustainable Product Regulation, ESPR, 2024/1781)[7]. Die Erwartungen an die ESPR sind hoch, da sie unterschiedliche Nachhaltigkeitsaspekte entlang des gesamten Lebenszyklus adressieren kann. Die Festlegung von Vorgaben erfolgt auf Produktebene und ist kleinteilig und aufwendig. Darüber hinaus gibt es weitere produktspezifische Regulierungen, welche auch für die petrochemische Industrie relevant sein können. Für Verpackungen gibt es zwei relevante Instrumente, nämlich die Single-use Plastics Directive

[2] EUR-Lex - 52020DC0098 - EN - EUR-Lex
[3] The European Green Deal - European Commission
[4] Industrial Accelerator Act - Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs
[5] Clean Industrial Deal - European Commission
[6] Circular Economy - Environment - European Commission
[7] Regulation - EU - 2024/1781 - EN - EUR-Lex

(SUPD, 2019/904)[8] und die Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR, 2025/40)[9]. Erstere schränkt die Verwendung von Einwegverpackungen ein und schafft somit Anreize für die Wiederverwendung. Letztere macht unter anderem Vorgaben zum Rezyklateinsatz in Verpackungen. Insbesondere bei der PPWR wäre es denkbar, weitere Vorgaben zur Verwendung alternativer Kohlenstoffquellen festzulegen. Für den Bau gibt es ebenfalls zwei relevante Instrumente: die Construction Product Regulation (CPR, 305/2011)[10] und die Energy Performance of Buildings Directive (EPBD, 2024/1275)[11]. Die CPR erlaubt grundsätzlich auch die Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus bei der Festlegung von Produktanforderungen, jedoch wurden Nachhaltigkeitsaspekte hier bisher nicht berücksichtigt. Die ESPR würde es ermöglichen, hier zu ergänzen, falls auch zukünftig keine Berücksichtigung solcher Aspekte in der CPR erfolgt. Die EPBD fokussiert auf Gebäude und erfordert unter anderem die Berechnung der Lebenszyklusemissionen. Hieran anknüpfende ordnungspolitische Vorgaben zu Emissionen wären denkbar. Ähnliches könnte auch für Fahrzeuge gelten, indem die CO_2-Flottengrenzwerte (2023/851)[12] auf den gesamten Lebenszyklus erweitert werden. Darüber hinaus ist kürzlich eine aktualisierte Regulierung für End-of-life Vehicles (2026/1738)[13] in Kraft getreten, welche Vorgaben zum Rezyklateinsatz macht. Elektronik wird im Wesentlichen durch Ecodesign (2009/125/EC)[14] und Energy Label (2017/1369)[15] adressiert, jedoch gibt es eine spezifische Waste Electrical and Electronic Equipment Directive (WEEE, 2012/19/EU)[16], um das Abfallmanagement festzulegen. Zusätzlich begrenzt die Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances Directive (RoHS, 2011/65/EU)[17] den Einsatz einiger Substanzen.

Politikinstrumente für **die Verbrauchsseite** können nach privaten, kommerziellen sowie öffentlichen Abnehmern unterschieden werden. Für private und kommerzielle Abnehmer petrochemischer Produkte (auch zur weiteren Verarbeitung) gibt es im Wesentlichen informelle Instrumente, die Informationen zu den Produkten bereitstellen, um das Konsumverhalten zu beeinflussen, beispielsweise das Ecolabel[18]. Studien zeigen, dass der

[8] Directive - 2019/904 - EN - SUP Directive - EUR-Lex
[9] Regulation - EU - 2025/40 - EN - PPWR - EUR-Lex
[10] Regulation - EU - 2024/3110 - EN - EUR-Lex
[11] Directive - EU - 2024/1275 - EN - EUR-Lex
[12] Regulation - 2023/851 - EN - EUR-Lex
[13] Regulation - EU - 2026/1738 - EN - EUR-Lex
[14] Richtlinie - 2009/125 - EN - EUR-Lex
[15] Verordnung - 2017/1369 - EN - EUR-Lex
[16] Richtlinie - 2012/19 - EN - EUR-Lex
[17] Richtlinie - 2011/65 - DE - rohs - EUR-Lex
[18] Das Umweltzeichen Ihres Vertrauens: EU-Ecolabel

Einfluss von Kennzeichnungen auf das Konsumverhalten zwar vorhanden, aber sehr gering ist (Feucht und Zander 2018; Lohmann et al. 2022; Emberger-Klein und Menrad 2018). Für kommerzielle Abnehmer kann diese Wirkung durch ordnungspolitische Instrumente wie eine verpflichtende Nachhaltigkeitsberichterstattung im Rahmen der Corporate Sustainability Reporting Directive (2022/2464)[19] gestärkt werden. Auch für öffentliche Abnehmer gibt es informelle Instrumente wie EU-Empfehlungen zur nachhaltigen öffentlichen Beschaffung (Green Public Procurement, GPP)[20]. Diese können durch Absichtserklärungen, wie beispielsweise der GPP Pledge der Industrial Deep Decarbonisation Initiative (IDDI)[21] der United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), gestärkt werden.

Instrumente für materialseitige Maßnahmen

Hersteller von Kunststoffen werden aktuell im Wesentlichen durch den CO_2-Preis im EU-Emissionshandelssystem (Emissions Trading System, ETS)[22] reguliert. Gemeinsam mit dem CO_2-Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)[23] wird so ein Marktrahmen für die Vermeidung von Treibhausgasemissionen bei der Herstellung geschaffen. Ein wesentlicher Nachteil ist jedoch, dass dieser CO_2-Preis bisher nicht für im Produkt gebundene Treibhausgasemissionen gilt, wie sie in der Petrochemie zum großen Teil vorkommen. Der aktuelle Vorschlag der Europäischen Kommission[24] sieht jedoch vor, fossiles CO_2 aus Müllverbrennungsanlagen zukünftig zu bepreisen und die entstehenden Kosten entlang der Wertschöpfungskette bis zu den Herstellern weiterzugeben. Darüber hinaus kann die Subventionierung neuer Herstellungsverfahren zumindest übergangsweise eine wesentliche Rolle spielen. Auch die Bereitstellung kostengünstiger Energieträger und Rohstoffe sowie der notwendigen Infrastruktur muss durch Instrumente unterstützt werden. Diese stehen jedoch nicht im Fokus dieser Untersuchung.

[19] Richtlinie - 2022/2464 - DE - EUR-Lex
[20] Green Public Procurement - Green Forum - European Commission
[21] GPP for industrial decarbonization - UNIDO
[22] EU Emissions Trading System (EU ETS) - Climate Action - European Commission
[23] Carbon Border Adjustment Mechanism - Taxation and Customs Union
[24] EUR-Lex - 52026PC0616 - EN - EUR-Lex

Während produktspezifische Instrumente für Inverkehrbringer indirekt die Grundlage für **Recycler** schaffen, indem sie bestimmte Substanzen verbieten oder Design- bzw. Materialeinsatzvorgaben machen, gibt es derzeit ein Instrument, welches direkte Vorgaben in diesem Bereich macht: die Waste Framework Directive (WFD, 2008/98/EC)[25]. Diese gibt Recyclingziele für bestimmte Materialien vor, die von den EU-Mitgliedsstaaten erreicht werden müssen. Unterstützende Instrumente, um die Sammlung und Sortierung von Abfällen zu verbessern, sind denkbar. Auch ist die Wirtschaftlichkeit der Sekundärmaterialien bisher limitiert. Dies soll jedoch teilweise durch die Schaffung eines Binnenmarkts für Sekundärmaterial im Rahmen des Circular Economy Act verbessert werden.

4.2. Nationale Ebene

Circular Economy in Deutschland ist rechtlich und politisch durch ein Zusammenspiel aus übergreifendem Abfallrecht, produktspezifischer Produktverantwortung und strategischen Zielsetzungen geprägt. Das zentrale rechtliche Fundament bildet das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)[26]. Das KrWG setzt damit den grundlegenden Rahmen für Abfallvermeidung, Wiederverwendung, Recycling und sonstige Verwertung. Für die Transformation hin zu einer stärker zirkulären Wirtschaft bildet die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)[27] den strategischen Referenzrahmen. Die NKWS bündelt Ziele und Maßnahmen der Bundesregierung entlang aller Kreislaufphasen – von Produktgestaltung und Materialauswahl über Produktion und Nutzungsphase bis hin zu Wiederverwendung und Recycling. Das 2026 beschlossene Aktionsprogramm zur Umsetzung der NKWS[28] soll unter anderem Umsetzungsplattformen, Förderprogramme, eine stärkere Nutzung der öffentlichen Beschaffung, digitale Instrumente wie Produktpässe zur Schließung von Stoffkreisläufen und die Weiterentwicklung des KrWG vorantreiben. Weiterhin adressiert das Aktionsprogramm die Wettbewerbsfähigkeit sekundärer Rohstoffe, den Einsatz von Kunststoffrezyklaten sowie Fragen zu Rezyklateinsatzquoten, Zertifizierungs- und Nachweismethoden.

[25] Richtlinie - 2008/98 - DE - EUR-Lex
[26] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG)
[27] BMUKN: Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) | Download
[28] BMUKN: Aktionsprogramm der Bundesregierung zur Umsetzung der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie

Instrumente für nachfrageseitige Maßnahmen

Für **Inverkehrbringer** bestehen vergleichsweise konkrete Pflichten, insbesondere im Verpackungsbereich. Das Verpackungsgesetz (VerpackG)[29] verpflichtet gewerbliche Inverkehrbringer bestimmter Verpackungen, sich vor dem Inverkehrbringen im Verpackungsregister LUCID[30] zu registrieren und systembeteiligungspflichtige Verpackungen an einem oder mehreren dualen Systemen zu beteiligen. Diese Vorgaben setzen das Prinzip der erweiterten Produktverantwortung um, das Inverkehrbringer auch nach der Nutzungsphase ihrer Produkte in die Pflicht nimmt, insbesondere mit Blick auf Rücknahme, Verwertung und umweltverträgliche Entsorgung. Im Verpackungsbereich adressiert das VerpackG dieses Prinzip durch Registrierung, Systembeteiligung und Verwertungspflichten. Zudem ist über die Einwegkunststoffverbotsverordnung (EWKVerbotsV)[31], welche die SUPD auf nationaler Ebene umsetzt, das Inverkehrbringen bestimmter Einwegkunststoffprodukte sowie von Produkten aus oxo-abbaubarem Kunststoff untersagt. Mit der EWKVerbotsV entstehen Vorgaben zum Mindestrezyklatanteil bei bestimmten Einwegkunststoffgetränkeflaschen. Ein weiterer Teil der nationalen Umsetzung ist das Einwegkunststofffondsgesetz (EWKFondsG)[32], welches die Hersteller stärker an den Kosten der Abfallbewirtschaftung beteiligt. Die Einwegkunststofffondsverordnung legt Abgabesätze für die Einwegkunststoffabgabe sowie ein Punktesystem für Auszahlungen aus dem Fonds fest.

Verbraucher werden im bestehenden Rechtsrahmen vor allem über Informations-, Rückgabe- und Entsorgungsverpflichtungen adressiert. Analog zur europäischen Ebene kann außerdem nach privaten, kommerziellen und öffentlichen Abnehmern unterschieden werden. Ergänzend zu europäischer Kennzeichnung gibt es nationale Label wie beispielsweise den Blauen Engel[33]. Ihre Wirkung ist jedoch begrenzt. Auf nationaler Ebene gibt es weitere Anknüpfungspunkte für die öffentliche Beschaffung wie beispielsweise das Gesetz zur Beschleunigung der Vergabe öffentlicher Aufträge[34] oder die Kompetenzstelle für nachhaltige Beschaffung[35].

[29] VerpackG3 - Das neue Verpackungsgesetz (VerpackG) 2026
[30] Willkommen im Verpackungsregister LUCID!
[31] EWKVerbotsV - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis
[32] EWKFondsG - Gesetz über den Einwegkunststofffonds
[33] Blauer Engel | Das deutsche Umweltzeichen
[34] DIP - Gesetz zur Beschleunigung der Vergabe öffentlicher Aufträge
[35] Kompetenzstelle für nachhaltige Beschaffung - Startseite

Instrumente für materialseitige Maßnahmen

Auf nationaler Ebene werden die Instrumente für **Hersteller** durch ein Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie für Leitmärkte[36] ergänzt. Leitmärkte sollen gezielt Nachfrage nach klimafreundlichen Grundstoffen wie beispielsweise Ethylen schaffen und damit Investitionen in neue Produktionsrouten wirtschaftlich attraktiv machen. Das Konzept beschreibt Leitmärkte als Kombination aus verschiedenen Instrumenten, welche die Nachfrage nach klimafreundlichen Grundstoffen sicherstellen. Es wäre denkbar, diesen Ansatz auf materialseitige Circular-Economy-Maßnahmen wie beispielsweise das chemische Recycling oder die Verwendung biobasierter Feedstocks zu erweitern.

Für **Recycler** gelten eine Reihe von Vorgaben im nationalen Recht. Die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV)[37] regelt die Bewirtschaftung gewerblicher Siedlungsabfälle sowie bestimmter Bau- und Abbruchabfälle und umfasst Vorgaben zur Getrenntsammlung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, Vorbehandlung sowie Anforderungen an Vorbehandlungsanlagen. Betreiber von Vorbehandlungs- und Aufbereitungsanlagen unterliegen zusätzlichen Anforderungen, etwa Eigenkontrollen, Fremdüberwachung und Betriebstagebuchpflichten. Ergänzend gibt es mit der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV)[38], der Nachweisverordnung (NachwV)[39] und dem Abfallverbringungsgesetz (AbfVerbrG)[40] weitere Vorschriften für die Klassifizierung, Überwachung und Entsorgung von Abfällen.

5. Weiterentwicklung der Politikinstrumente

Dieses Kapitel bewertet Instrumente und entwickelt Handlungsempfehlungen, um die Potentiale einer Circular Economy für eine klimaneutrale petrochemische Industrie zu nutzen. Wie sich im vorangegangenen Kapitel zeigt, existiert bereits ein relativ ausdifferenzierter europäischer und nationaler Regulierungsrahmen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Inverkehrbringern und Recyclern, während Instrumente für Verbraucher sowie

[36] Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe | BMWE
[37] GewAbfV - Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen
[38] AVV - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis
[39] NachwV - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis
[40] AbfVerbrG - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis

Hersteller weniger stark ausgeprägt sind. Die Potentialanalyse der Circular-Economy-Maßnahmen hat jedoch gezeigt, dass nachfrageseitige Maßnahmen den größten Einfluss auf Kosten und Energiebedarf in einer klimaneutralen Petrochemie haben, während chemisches Recycling komplementär dazu die Verbrennung von Kunststoffabfällen reduziert und Kohlenstoff länger im Kreislauf hält. Vor diesem Hintergrund werden zunächst mögliche neue und weiterentwickelte Instrumente identifiziert und anschließend auf der Grundlage von Kriterien bewertet. Ausgehend von dieser Bewertung werden Handlungsempfehlungen entwickelt, um die Transformation der petrochemischen Industrie hin zur Klimaneutralität zu unterstützen.

5.1. Mögliche Instrumente

Ausgehend vom dargestellten Regulierungsrahmen sowie den Ergebnissen der Potentialanalyse der Circular-Economy-Maßnahmen lassen sich Bereiche identifizieren, in denen bestehende Politikinstrumente bereits wirksam sind und wo Bedarf für weiterentwickelte und neue Instrumente besteht. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend mögliche weiterentwickelte Instrumente vorgeschlagen, die diese Lücken schließen können. Ergänzend werden Vorschläge für neue Instrumente dargestellt, insbesondere um Verbraucher zu erreichen, da diese in bisherigen Instrumenten unterrepräsentiert sind.

Instrumente für nachfrageseitige Maßnahmen

Während es schon einen etablierten Regulierungsrahmen für Inverkehrbringer gibt, der insbesondere Reuse-Maßnahmen unterstützen kann, gibt es kaum Anknüpfungspunkte in bestehenden Regulierungen, um Verbraucher beziehungsweise Reduce-Maßnahmen zu fördern. Wie zuvor beschrieben, ist eine mögliche, aber nur begrenzt wirksame Option die Kennzeichnung von relevanten Produktinformationen, um Verhaltensänderungen bei Verbrauchern anzustoßen (European Commission 2018). Dies könnte zusätzlich durch weitere informelle Instrumente unterstützt werden wie beispielsweise durch Lehrplananpassungen oder Suffizienzkampagnen, die für einen sparsameren Umgang mit Ressourcen werben (EEA 2023). Die öffentliche Beschaffung als regulierter Verbraucher könnte mit ord-

nungspolitischen Vorgaben über diese informellen Vorgaben hinausgehen. Nichtsdestotrotz fehlt ein Instrument, welches eine breite Verbraucherschaft erreichen kann. Eine Möglichkeit sind Steuererleichterungen für zirkuläre Produkte wie beispielsweise für Mehrwegverpackungen (Rethink Plastic 2025) oder zusätzliche Steuern für nicht zirkuläre Produkte wie beispielsweise Einwegverpackungen (Universitätsstadt Tübingen o.J.). **Steuern auf Produktebene** werden als Instrument für die nachfolgende Bewertung berücksichtigt, da sie eine Möglichkeit darstellen, Verbraucher zu adressieren.

Auch wenn Instrumente für Inverkehrbringer schon etabliert sind, kann der Fokus auf Circular Economy gestärkt werden. Die bestehenden Produktregulierungen könnten erweitert werden, um Reuse-Maßnahmen ordnungspolitisch zu unterstützen, indem beispielsweise Vorgaben zur Vorhaltung von Ersatzteilen, Reparaturinformationen oder Garantien festgelegt werden (European Commission 2018). Darüber hinaus kann die Rolle der erweiterten Herstellerverantwortung gestärkt werden, um einen ökonomischen Anreiz für Reuse-Maßnahmen zu schaffen (Rethink Plastic 2025). Für die nachfolgende Bewertung wird die **erweiterte Herstellerverantwortung** ausgewählt, da sie anders als Produktregulierungen lösungsoffen ist.

Instrumente für materialseitige Maßnahmen

Eine weitere zentrale Lücke, die sich aus der Potentialanalyse ergibt, betrifft die Rohstoffbasis der petrochemischen Produktion, da weder auf europäischer noch auf nationaler Ebene ein Rahmen existiert, der den Wechsel weg von fossilen Feedstocks in der petrochemischen Grundstoffproduktion systematisch forciert. Eine Option, um dies zu fördern, ist die Berücksichtigung des im Produkt gebundenen Kohlenstoffs im ETS, wie von der Europäischen Kommission vorgeschlagen. Darüber hinaus können Instrumente, welche die Nachfrage nach klimafreundlich produzierten Grundstoffen anreizen, wie beispielsweise Quoten, eine Rolle spielen. Da Ersteres bereits durch die europäische Kommission vorgeschlagen und intensiv diskutiert wird, bieten **Quoten für Kunststoffanwendungen** ein ergänzendes Instrument, das unabhängig von der Ausgestaltung des ETS wirkt.

Im Kontext solcher Quoten stellen die geringe Verfügbarkeit hochwertiger Rezyklate und die unzureichende Etablierung von Märkten für Sekundärrohstoffe eine zentrale Herausforderung dar. Zwar wird auf regulatorischer Ebene das Ziel verfolgt, die Verfügbarkeit von Rezyklat zu erhöhen. Die bisherigen Maßnahmen reichen dafür jedoch noch nicht aus. In der Folge stehen sortenreine und zertifizierte Sekundärrohstoffe, die insbesondere für das mechanische Recycling wichtig sind, nicht in ausreichender Menge zur Verfügung. Gleichzeitig gewinnt das chemische Recycling an Bedeutung. Auf regulatorischer Ebene wird bislang jedoch noch nicht hinreichend zwischen unterschiedlichen Recyclingpfaden differenziert. Für die Ausgestaltung einer Quote ist daher die **Anrechnung von mechanischem und chemischem Recycling** in Abgrenzung zur energetischen Verwertung entscheidend.

Wie von Lotz et al. (2025) beschrieben, bieten sich aufgrund der hohen Komplexität der petrochemischen Wertschöpfungskette und der Vielzahl an Substitutionsmöglichkeiten insbesondere Inverkehrbringer von Endprodukten für solche Quoten an. Im ersten Schritt könnten Verpackungen adressiert werden, da dort mit den Rezyklateinsatzquoten der PPWR bereits regulatorische Anknüpfungspunkte bestehen. Quoten würden nicht allein auf den Einsatz mechanisch recycelter Kunststoffe abzielen, sondern breiter auf den Ersatz von fossilem Primärkohlenstoff. Da es sich um ein neues Instrument handelt, sind weitere Ausgestaltungselemente in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Ausgestaltung von Quoten für zirkulären Kohlenstoff. Quelle: eigene Zusammenstellung

Ausgestaltungselement	Ausgestaltungsansatz
Regulierungsgegenstand	Anteil zirkulären Kohlenstoffs in Kunststoffanwendungen
Anwendungsbereich	kurzfristig: Priorisierung von Verpackungen
	mittelfristig: Prüfung weiterer massenrelevanter Kunststoffanwendungen wie Bauprodukte, Fahrzeugkomponenten oder Elektro- und Elektronikprodukte
verpflichtete Akteure	Inverkehrbringer
Erfüllungsoption	mechanische Rezyklate, chemisch recycelte Rohstoffe, nachhaltige Biomasse und CO_2-basierte Kohlenstoffquellen
steigende Mindestanteile	Mindestanteile sollten über die Zeit ansteigen, während die Höhe an Verfügbarkeit, Qualität, Kostenentwicklung und Kapazitätsaufbau gekoppelt werden sollte, damit der Quotenpfad Investitionssicherheit schafft, aber keine nicht erfüllbaren Vorgaben setzt.

Übergeordnete Instrumente

Die dargestellten Instrumente setzen voraus, dass die relevanten Produkteigenschaften und Materialströme konsequent erfasst werden. Dazu zählen unter anderem Reparierbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit und der Anteil eingesetzter Rezyklate sowie fossiler Primärrohstoffe. **Digitale Produktpässe** bilden somit die Grundvoraussetzung für die notwendige Informationsbasis zur Festlegung konkreter Anforderungen.

5.2. Bewertung der Instrumente

Die identifizierten neuen und weiterentwickelten Instrumente werden im Folgenden anhand des Bewertungsschemas in Tabelle 3 analysiert. Es erfasst systematisch ihre Wirksamkeit, politische und unternehmerische Umsetzbarkeit sowie ihre Zuständigkeit und Wirkung entlang der Wertschöpfungskette. Anhand der Kriterien lässt sich vergleichen, wie wirksam die Instrumente die zentralen Maßnahmen adressieren können, die in der Potentialanalyse herausgearbeitet wurden.

Tabelle 3: Bewertungsschema. Quelle: eigene Zusammenstellung

Kriterium	Definition
Wirksamkeit	erwarteter Beitrag zu nachfrage- und materialseitigen Circular-Economy-Maßnahmen
Zuständigkeit	regulatorische Verankerung des Instruments auf europäischer oder nationaler Ebene
Umsetzbarkeit: Politik	Einschätzung, wie gut das Instrument regulatorisch eingeführt, kontrolliert und in den bestehenden EU- beziehungsweise nationalen Rechtsrahmen eingebettet werden kann
Umsetzbarkeit: Unternehmen	Einschätzung, wie gut Unternehmen das Instrument praktisch erfüllen können, zum Beispiel mit Blick auf verfügbare Rezyklatmengen, Nachweise, Lieferketten und Kosten
Wertschöpfungskette	Wirkt das Instrument vor allem auf Hersteller, Inverkehrbringer, Verbraucherinnen und Verbraucher oder Recycler

Steuern auf Produktebene

Steuern auf Produktebene können einen Anreiz schaffen, um das Verhalten von Verbrauchern zu beeinflussen, indem sie zirkuläre Produkte günstiger beziehungsweise nicht zirkuläre Produkte teurer machen. Die Wirksamkeit hängt jedoch von der konkreten Ausgestaltung ab. Erstens muss die Steuerhöhe ausreichen, um einen wahrnehmbaren Preisunterschied zu erzeugen. Zweitens sollte die Bemessungsgrundlage möglichst eng mit der angestrebten Wirkung verknüpft sein. Denkbare Kriterien sind die Einweg- oder Mehrwegnutzung, die Reparierbarkeit und Lebensdauer oder der Anteil fossiler Primärrohstoffe. Eine Kombination mehrerer Kriterien erhöht die ökologische Zielgenauigkeit, steigert jedoch zugleich den Daten-, Nachweis- und Vollzugsaufwand.

Tabelle 4: Bewertung von Steuern auf Produktebene

Kriterium	Einordnung
Wirksamkeit	mittel bis hoch; bietet in Abhängigkeit von Steuerhöhe und Nachfrageelastizität (Reaktion der Nachfrage auf Preisänderungen) ökonomische Anreize, um Verhalten anzupassen
Zuständigkeit	primär nationale Ebene, Koordinierung auf EU-Ebene sinnvoll
Umsetzbarkeit: Politik	mittel; Anknüpfung an bestehende Steuern ist möglich, aber eine differenzierte Ausgestaltung ist notwendig
Umsetzbarkeit: Unternehmen	mittel; Unternehmen in nachgelagerten Wertschöpfungsstufen haben über Produktdesign und Materialauswahl einen direkten Einfluss auf die Erfüllung
Wertschöpfungskette	Verbraucherinnen und Verbraucher

Erweiterte Herstellerverantwortung

Bislang dient die erweiterte Herstellerverantwortung vor allem dazu, Sammlung, Sortierung und Verwertung von Produkten nach der Nutzungsphase zu finanzieren. Ein stärker zirkulär ausgerichtetes Regime sollte darüber hinaus gezielt Anreize setzen, Produkte langlebiger und wiederverwendbar zu gestalten, den Einsatz von Rezyklaten zu erhöhen und schwer recycelbare Materialkombinationen zu vermeiden. Kern eines solchen Instruments wäre eine deutlich stärkere Ausrichtung der Gebühren an ökologischen Kriterien. Für Produkte mit hoher Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit sollten geringere Gebühren anfallen beziehungsweise finanzielle Vorteile gewährt werden. Für Produkte mit geringer Reparierbarkeit und Recyclingfähigkeit sollten entsprechend höhere Gebühren anfallen.

Tabelle 5: Bewertung der erweiterten Herstellerverantwortung

Kriterium	Einordnung
Wirksamkeit	hoch; bietet durch Gebühren/Bonus-Malus-System einen Anreiz, Produkte langlebiger und recyclingfähiger zu gestalten, sofern diese hoch genug ausfallen
Zuständigkeit	nationale Ebene
Umsetzbarkeit: Politik	hoch; basiert auf der Weiterentwicklung bestehender Instrumente
Umsetzbarkeit: Unternehmen	mittel; Unternehmen in nachgelagerten Wertschöpfungsstufen haben über Produktdesign und Materialauswahl einen direkten Einfluss auf die Erfüllung
Wertschöpfungskette	Inverkehrbringer

Quoten für zirkulären Kohlenstoff in Kunststoffanwendungen

Quoten für zirkulären Kohlenstoff können einen Anreiz für den Wechsel weg von fossilen Feedstocks und die Etablierung eines Binnenmarkts für Sekundärrohstoffe schaffen. Anrechenbar wären mechanische Rezyklate, chemisch recycelte Rohstoffe, nachhaltig verfügbare biogene Kohlenstoffquellen sowie perspektivisch CO_2-basierte Kohlenstoffströme, sofern sie robuste Nachhaltigkeits-, Bilanzierungs- und Nachweiskriterien erfüllen. Damit Technologieoffenheit nicht zu einer Schwächung des Circular-Economy-Ansatzes führt, sollte sie hierarchisch ausgestaltet werden: Mechanisch recycelte Kunststoffe könnten vollständig anerkannt werden, während chemisch recycelte Rohstoffe nur für schwer recycelbare oder bislang thermisch verwertete Abfallströme anerkannt würden.

Tabelle 6: Bewertung einer Quote für zirkulären Kohlenstoff

Kriterium	Einordnung
Wirksamkeit	hoch; kann Nachfrage nach nicht fossilem Kohlenstoff schaffen
Zuständigkeit	EU-Ebene; Schaffung von einheitlichen Vorgaben und Nachweisregeln
Umsetzbarkeit: Politik	mittel bis hoch; unterschiedliche EU-Regelungen bieten Ansatzpunkte
Umsetzbarkeit: Unternehmen	mittel; je nach Produktgruppe können Unternehmen unterschiedlich gut auf zirkuläre Kohlenstoffquellen zugreifen
Wertschöpfungskette	Hersteller und Recycler

Digitale Produktpässe

Digitale Produktpässe, beispielsweise ermöglicht durch die ESPR, können eine gemeinsame Datenbasis entlang der gesamten Wertschöpfungskette bilden. In ihnen können Informationen zu Produkteigenschaften und Materialzusammensetzung standardisiert hinterlegt werden, sodass alle Akteure entlang der Wertschöpfungskette darauf zugreifen können.

Tabelle 7: Bewertung von digitalen Produktpässen

Kriterium	Einordnung
Wirksamkeit	hoch; Voraussetzung für weitere Instrumente
Zuständigkeit	EU-Ebene; Schaffung von einheitlichen Vorgaben und Nachweisregeln
Umsetzbarkeit: Politik	mittel; kleinteilige Regulierung auf Produktebene notwendig
Umsetzbarkeit: Unternehmen	mittel; je nach Produkt können Unternehmen unterschiedlich gut relevante Informationen zur Verfügung stellen
Wertschöpfungskette	Hersteller, Inverkehrbringer, Recycler sowie Verbraucher

5.3. Handlungsempfehlungen

Für die petrochemische Industrie sollte der regulatorische Fokus auf einem kombinierten Instrumentenmix liegen, da die Transformation hin zu einer Circular Economy nicht durch eine einzelne Maßnahme erreicht werden kann. Dabei ist insbesondere das Zusammenspiel von europäischer und nationaler Regulierung wichtig: Beide Ebenen müssen gemeinsam Anreize für eine umfassende Transformation schaffen. Gleichzeitig kann es sinnvoll sein, Instrumente zunächst in ausgewählten mengenrelevanten Bereichen einzuführen, um regulatorisches Lernen zu ermöglichen. Insbesondere für neue Instrumente braucht es regelmäßige Überprüfungen der Kosten, der tatsächlichen Wirkung und möglicher Verlagerungseffekte.

Nachfrageseitige Maßnahmen

Auf nationaler Ebene sollten differenzierte Produktsteuern eingeführt beziehungsweise bestehende Verbrauchsteuern weiterentwickelt werden, um zirkuläre Produkte gegenüber nicht zirkulären Alternativen wirtschaftlich zu begünstigen. Die Besteuerung sollte insbesondere bei vermeidbaren, kurzlebigen und nicht wiederverwendbaren Kunststoffanwendungen ansetzen. Hierzu zählen vor allem Einwegprodukte und Einwegverpackungen, für die bereits wiederverwendbare oder materialeffizientere Alternativen verfügbar sind. Die Steuerhöhe muss berücksichtigen, wie stark die Nachfrage auf Preisänderungen reagiert, und einen ausreichenden Anreiz für ein verändertes Konsumverhalten bieten. Für eine höhere Wirksamkeit ist eine Koordination auf europäischer Ebene mit gemeinsamen Definitionen oder Bemessungskriterien notwendig, um zusätzlich Verzerrungen auf dem Binnenmarkt und mögliche Ausweichbewegungen der Verbraucher zu begrenzen.

Gleichzeitig sollte die bestehende erweiterte Herstellerverantwortung stärker auf ökologische Kriterien ausgerichtet werden. Während Recyclingfähigkeit, Reparierbarkeit oder Materialeffizienz finanziell belohnt werden sollten, muss eine geringe Recyclingfähigkeit höhere Gebühren nach sich ziehen. Gleichzeitig bestehen hier in der Umsetzung deutliche Unterschiede zwischen EU-Mitgliedsstaaten, etwa in Bezug auf die Gebührenhöhe oder den Umfang der etablierten Systeme. Eine stärkere Harmonisierung der Vorgaben

auf europäischer Ebene kann dafür sorgen, dass die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen steigt.

Materialseitige Maßnahmen

Die größte Lücke im Instrumentenmix besteht bei den materialseitigen Maßnahmen. Zwar bestehen bereits Rezyklatvorgaben für einzelne Kunststoffanwendungen, diese sind jedoch nicht in der Lage, einen breiten Markt für zirkulären Kohlenstoff zu etablieren. Entsprechend müssen Rezyklateinsatzquoten insbesondere auf europäischer Ebene weiterentwickelt werden – hin zu Quoten für Kunststoffanwendungen, welche unterschiedliche Erfüllungsoptionen zulassen, um der steigenden Bedeutung von chemischem Recycling Rechnung zu tragen. Ziel einer Quote muss es dabei sein, eine verlässliche Nachfrage nach nicht fossilen Kohlenstoffquellen zu schaffen, fossile Primärrohstoffe zu ersetzen und Investitionen durch einen langfristig ansteigenden Quotenpfad abzusichern. Kurzfristig muss dabei an bestehende EU-Regulierung im Verpackungsbereich angeknüpft werden. Erst mittelfristig sollten weitere massenrelevante Kunststoffanwendungen geprüft werden, insbesondere Bauprodukte, Fahrzeugkomponenten sowie Elektro- und Elektronikprodukte.

Produktpässe als Grundvoraussetzung

Grundsätzlich gilt für alle Instrumente, dass relevante Produkteigenschaften und Materialströme verlässlich erfasst und überprüft werden müssen. Ohne robuste Daten- und Nachweissysteme können die zuvor genannten Instrumente nicht effektiv umgesetzt werden. Daher sollten digitale Produktpässe trotz einer hohen Komplexität auf Produktebene als übergeordnetes Instrument aufgebaut werden.

6. Fazit und Zusammenfassung

Die Transformation der Petrochemie hin zur Klimaneutralität erfordert nicht nur die Dekarbonisierung der Produktionsprozesse, sondern auch eine grundlegende Änderung der Rohstoffbasis. Eine Circular Economy bietet einen zentralen Ansatz, um den Bedarf an fossilem Kohlenstoff zu senken und die Resilienz des Wirtschaftsstandorts Deutschland zu stärken. Dabei müssen nachfrageseitige Maßnahmen wie Reduce und Reuse mit materialseitigen Maßnahmen, insbesondere mechanischem und chemischem Recycling, verbunden werden.

Die Potentialanalyse quantifiziert systematisch, wie nachfrageseitige Maßnahmen und chemisches Recycling zur Dekarbonisierung der deutschen Olefin- und Aromatenproduktion im Zieljahr 2045 beitragen können. Durch die Kopplung einer Materialflussanalyse mit dem Optimierungsmodell FORECAST-Refine und die Berechnung eines Rasters aus Verbrauchsniveaus und chemischen Recyclinganteilen lässt sich der Lösungsraum eines klimaneutralen petrochemischen Systems in seiner Struktur beschreiben. Alle betrachteten Kombinationen führen zu einer zulässigen Lösung: Klimaneutralität ist über den gesamten realistischen Lösungsraum technisch erreichbar – die Frage ist nicht, ob, sondern zu welchen Kosten, mit welchem Energiebedarf und mit welcher Infrastruktur. Die Nachfragereduktion ist der wirksamste Hebel für die Systemgröße. Innerhalb des realistischen Lösungsraums senkt sie die Gesamtsystemkosten um bis zu 12,7 Mrd. € pro Jahr und den Gesamtenergiebedarf um bis zu 136 TWh. Um diese Potentiale zu nutzen, sind nachfrageseitige Maßnahmen wie die Vermeidung bestimmter Anwendungen, das effizientere Design und die Verlängerung der Produktlebensdauer erforderlich. Dies entlastet alle Versorgungsengpässe gleichzeitig – Strom, Wasserstoff, Biomasse und Abfall. Zur Verbesserung der Zirkularität trägt sie jedoch nicht direkt bei. Das chemische Recycling ist ebenfalls ein wichtiger Hebel. Es senkt die spezifischen Kosten über alle Verbrauchsniveaus hinweg, reduziert den Anteil der Primärproduktion deutlich, leitet erhebliche Abfallmengen von der Verbrennung in den Materialkreislauf um und – als auffälligster Einzeleffekt – senkt den Wasserstoffbedarf des Systems um bis zu rund 47 TWh. Der Mechanismus dahinter ist die begrenzte CO_2-Speicherkapazität: Je weniger Kohlenstoff im Kreislauf gehalten wird, desto mehr abgeschiedenes CO_2 muss über wasserstoffintensive

CCU-Routen stofflich genutzt werden. Der Bedarf an Elektrolyse- und Wasserstoffinfrastruktur für die Petrochemie hängt damit vor allem vom angestrebten Recyclinganteil und der verfügbaren Speicherkapazität ab – und erst in zweiter Linie von der Nachfrageentwicklung. Erkauft wird dieser Vorteil mit einem höheren Strombedarf, wodurch sich der Infrastrukturengpass von der Wasserstoffwirtschaft auf Netzanschluss und Anlagenelektrifizierung verlagert. Die beiden Hebel sind komplementär. Die niedrigsten spezifischen Kosten, die höchste Zirkularität und der günstigste Energieträgermix treten gemeinsam bei niedriger Nachfrage und hohem Recyclinganteil auf. Politikrahmen, die nachfrage- und materialseitige Maßnahmen als konkurrierende Prioritäten behandeln, nutzen dieses Zusammenspiel nicht. Eine robuste Dekarbonisierungsstrategie für die deutsche Petrochemie sollte daher verbindliche Nachfragereduktionsziele mit ambitionierten Recyclingvorgaben koppeln – zusammen mit den dafür notwendigen Infrastrukturinvestitionen in Stromnetz, Anlagenelektrifizierung und Abfallsammelsysteme.

Der bestehende europäische und nationale Regulierungsrahmen enthält bereits zahlreiche Ansatzpunkte hierfür, ist jedoch noch nicht konsequent auf diese Kombination aus Nachfragereduktion und Schließung des Kohlenstoffkreislaufs ausgerichtet. Die vorhandenen Instrumente adressieren vor allem Inverkehrbringer und Recycler, während Verbraucherinnen und Verbraucher sowie die fossile Rohstoffbasis der petrochemischen Produktion bislang weniger systematisch erfasst werden. Auf der Nachfrageseite können differenzierte Produktsteuern Anreize für langlebige und ressourceneffiziente Produkte schaffen. Eine stärker an ökologischen Kriterien ausgerichtete erweiterte Herstellerverantwortung sollte diese Anreize ergänzen, indem sie die Gebühren stärker an Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit ausrichtet. Auf der Materialseite können schrittweise steigende Mindestanteile für zirkulären Kohlenstoff in Kunststoffanwendungen die Nachfrage nach nicht fossilen Kohlenstoffquellen absichern und Investitionen in entsprechende Produktions- und Recyclingkapazitäten unterstützen. Voraussetzung für die Wirksamkeit dieser Instrumente sind verlässliche Informationen über Produkteigenschaften und Materialzusammensetzung. Digitale Produktpässe sollten deshalb als übergeordnetes Instrument aufgebaut werden.

Zugleich sind die Modellierungsergebnisse mit Unsicherheiten verbunden. Die Lücke zwischen Kunststoffnachfrage und gesammeltem Abfall ist groß und begrenzt unmittelbar

die Aussagekraft aller Recyclingpotenziale; ihre Aufklärung ist eine wichtige Forschungsaufgabe. Die Rolle der Biomasse hängt stark von ihrem Preis und der sektorübergreifenden Konkurrenz ab, und die verfügbare CO_2-Speicherkapazität bleibt eine politisch wie technisch offene Größe. Da die Analyse eine statische Momentaufnahme für 2045 darstellt, bleiben Transformationspfade, Investitionszyklen und Risiken gestrandeter Investitionen der künftigen Forschung überlassen. Für die Praxis der Energie- und Infrastrukturplanung folgt daraus: Circular-Economy-Ambitionen müssen früh und verbindlich kommuniziert werden, weil sie Anforderungen an Strom-, Wasserstoff- und CO_2-Infrastruktur mitbestimmen.

Insgesamt zeigt diese Studie, dass eine klimaneutrale Petrochemie in Deutschland nicht allein durch den Ersatz fossiler Produktionsverfahren erreicht werden sollte. Ein robuster Transformationspfad verbindet eine geringere Nachfrage nach petrochemischen Produkten bei gleichem gesellschaftlichem Wohlstand mit einem ambitionierten Ausbau von mechanischen und chemischen Recyclingpfaden. Ein darauf abgestimmter politischer Rahmen kann nicht nur fossilen Kohlenstoff und Treibhausgasemissionen reduzieren, sondern auch Kosten und Energiebedarf begrenzen, Importabhängigkeiten verringern und die Anforderungen an die künftige Strom-, Wasserstoff-, Abfall- und CO_2-Infrastruktur frühzeitig planbar machen. Circular Economy ist eine zentrale Voraussetzung für eine resiliente und klimaneutrale petrochemische Industrie in Deutschland.

Anhang: Modellannahmen

Tabelle *8*: Parametrisierung der nachfrageseitigen Maßnahmen gegenüber dem Basisjahr. Quelle: siehe Tabelle

Maßnahme	Quantifizierung
Vermeidung von Verpackungen	Bis zu 10 % der Verpackungen können durch Verzicht vermieden werden (Prakash et al. 2023).
Papier- statt Kunststoffverpackungen	Bis zu 8 % der Kunststoffverpackungen können durch Papierverpackungen ersetzt werden (SYSTEMIQ 2022).
optimiertes Verpackungsdesign	Bis zu 8 % Verpackungsmaterial können durch optimiertes Design eingespart werden (SYSTEMIQ 2022).
Reduktion des Gebäudebedarfs	Zwischen 4 und 42 % des Materialbedarfs (Annahme: 20 %) können durch geringere Flächennutzung in Wohn- und Bürogebäuden eingespart werden (Lotz et al. 2024).
Verlängerung der Gebäudelebensdauer	Bis zu 15 % des neuen Materialbedarfs können durch eine Vermeidung von Gebäudeabrissen eingespart werden (Lotz et al. 2024).
Reduktion des Fahrzeugbedarfs	Bis zu 22 % des Materialbedarfs für Fahrzeuge können durch geringere Fahrzeugnutzung eingespart werden (SYSTEMIQ 2022; International Resource Panel 2020).
optimiertes Fahrzeugdesign	Bis zu 10 % des Materialbedarfs für Fahrzeuge können durch optimiertes Design eingespart werden (International Resource Panel 2020).
Verlängerung der Fahrzeuglebensdauer	Rund 1,8 % des Materialbedarfs für Fahrzeuge können durch eine Lebensdauerverlängerung um rund 5 Jahre erreicht werden (Herbst et al. 2023).
Reduktion des Elektrogerätebedarfs	Bis zu 10 % der Elektrogeräte können durch Verzicht vermieden werden (Prakash et al. 2023).
Verlängerung der Elektrogerätelebensdauer	Rund 13 % des Materialbedarfs für Elektrogeräte können durch eine Verdopplung der Lebensdauer von Unterhaltungselektronik (brauner Ware) und eine Verlängerung der Lebensdauer von Haushaltselektronik (weißer Ware) um 5 Jahre eingespart werden (Prakash et al. 2023).
Mehrwegverpackungen im Lebensmittelbereich	Bis zu 35 % der Verpackungen können durch Mehrweg im Lebensmittel- und B2B-Bereich eingespart werden (SYSTEMIQ 2022; Plastics Europe 2024).
Wiederverwendung von Kunststoffen im Baubereich	Bis zu 4 % des Materialbedarfs können durch Wiederverwendung im Baubereich eingespart werden (Plastics Europe 2024; Material Economics o.J.; Ellen MacArthur Foundation 2019; SYSTEMIQ 2022).
Wiederverwendung von Kunststoffen in Fahrzeugen	Bis zu 6 % des Materialbedarfs können durch Wiederverwendung im Fahrzeugbereich eingespart werden (SYSTEMIQ 2022; Material Economics o.J.; Plastics Europe 2024).
Wiederverwendung von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronikgeräten	Bis zu 0,9 % des Materialbedarfs können durch Wiederverwendung von Elektrogeräten eingespart werden (Plastics Europe 2024; Prakash et al. 2023).

Tabelle 9: Annahmen zur Verbrauchsentwicklung nach Branche und Szenario. Quelle: eigene Zusammenstellung

Sektor	BAU-Szenario	CE-Szenario	Oberes Limit (Max)	Unteres Limit (Min)
Verpackung	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2023)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend um 50 % bis 2045	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2021)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend auf Niveau von 1989 bis 2045
Bau	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann gleichbleibend	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend um 32 % bis 2045	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2021)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend auf Niveau von 1989 bis 2045
Fahrzeuge	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2023)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend um 35 % bis 2045	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2021)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend auf Niveau von 1989 bis 2045
Elektro / Elektronik	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2023)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend um 20 % bis 2045	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2021)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend auf Niveau von 1989 bis 2045
Haushaltswaren	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2023)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann gleichbleibend	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2021)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend auf Niveau von 1989 bis 2045
Möbel	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann gleichbleibend	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann gleichbleibend	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann gleichbleibend	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend auf Niveau von 1989 bis 2045
Landwirtschaft	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2023)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann gleichbleibend	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2021)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend auf Niveau von 1989 bis 2045
Medizin	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2023)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann gleichbleibend	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2021)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend auf Niveau von 1989 bis 2045
Sonstiges	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2023)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann gleichbleibend	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann linear steigend bis 2045 (Steigung von 1999–2021)	Erholung auf 2021-Level bis 2030, dann sinkend auf Niveau von 1989 bis 2045

Literatur

3R (Hg.) (2024): Joint Action Plan for a Circular Economy in Plastics. Online verfügbar unter https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2024-08/Joint-Action-Plan-for-Circular-Economy-in-Plastics.pdf, zuletzt geprüft am 23.09.2025.

Acemoglu, Daron (2015): Localised and Biased Technologies: Atkinson and Stiglitz's New View, Induced Innovations, and Directed Technological Change. In: *The Economic Journal* 125 (583), S. 443–463. DOI: 10.1111/ecoj.12227.

Barnosell, Irene; Pozo, Carlos (2024): The impacts of the European chemical industry on the planetary boundaries. In: *Sustainable Production and Consumption* 44, S. 188–207. DOI: 10.1016/j.spc.2023.12.006.

Bartels, Frederike; Luderer, Gunnar; Brown, Tom; Frank, Fabio; Gnann, Till; Kost, Christoph, Lindner, Michael et al. (2026): Die Energiewende kosteneffizient weiterdenken – aktualisierte Szenarien und ein erweiterter Optionenraum. Kurzbericht zum Ariadne Szenarienupdate 2026.

Blomsma, Fenna; Brennan, Geraldine (2017): The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. In: *Journal of Industrial Ecology* 21 (3), S. 603–614. DOI: 10.1111/jiec.12603.

Boulding, Kenneth E. (1966): The Economics of the Coming Spaceship Earth.

Bussmann, Simon L.; Männer, Wolfgang; Fleiter, Tobias; Neuwirth, Marius; Herbst, Andrea; Lechtenböhmer, Stefan (2026): Crediting temporarily bound carbon reduces emissions and costs in integrated production of EU refineries. In: *Commun Earth Environ* 7 (1). DOI: 10.1038/s43247-026-03891-4.

Creutzig, Felix; Simoes, Sofia G.; Leipold, Sina; Berrill, Peter; Azevedo, Isabel; Edelenbosch, Oreane et al. (2024): Demand-side strategies key for mitigating material impacts of energy transitions. In: *Nat. Clim. Chang.* 14 (6), S. 561–572. DOI: 10.1038/s41558-024-02016-z.

EEA (Hg.) (2023): Accelerating the circular economy in Europe. State and outlook 2024. Online verfügbar unter https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2024-03/TH-AL-24-002-EN-N%20Accelerating%20the%20circular%20economy%20in%20Europe.pdf, zuletzt geprüft am 14.10.2025.

Ellen MacArthur Foundation (Hg.) (2019): Completing the picture. How the circular economy tackles climate change.

Emberger-Klein, Agnes; Menrad, Klaus (2018): The effect of information provision on supermarket consumers' use of and preferences for carbon labels in Germany. In: *Journal of Cleaner Production* 172, S. 253–263. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.105.

Eriksson, Ola; Finnveden, Göran (2009): Plastic waste as a fuel - CO2-neutral or not? In: *Energy Environ. Sci.* 2 (9), S. 907. DOI: 10.1039/b908135f.

European Commission (Hg.) (2018): Behavioural Study on Consumers' Engagement in the Circular Economy. Online verfügbar unter https://trinomics.eu/wp-content/uploads/2018/10/CHAFEA2018-Behavioural-study-on-consumer-engagement-in-the-circular-economy.pdf, zuletzt geprüft am 14.10.2025.

European Commission (Hg.) (2023): Transition Pathway for the Chemical Industry. Online verfügbar unter https://ecta.com/wp-content/uploads/2023/02/Transition-Pathway-for-the-Chemical-Industry.pdf, zuletzt geprüft am 11.08.2026.

Feucht, Yvonne; Zander, Katrin (2018): Consumers' preferences for carbon labels and the underlying reasoning. A mixed methods approach in 6 European countries. In: *Journal of Cleaner Production* 178, S. 740–748. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.236.

finanzen.net (2026): Naphthapreis (European) Chart in Euro. Online verfügbar unter https://www.finanzen.net/rohstoffe/naphthapreis, zuletzt geprüft am 27.10.2026.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Manz, Pia; Bussmann, Simon; Neuwirth, Marius; Herbst, Andrea; Lotz, Meta Thurid" (2024): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - O45-Szenarien - Modul Industriesektor.

Gabrielli, Paolo; Goericke, Hanne; Rosa, Lorenzo (2024): Optimal Combination of Net-Zero Pathways for Minimum Energy, Land, and Water Consumption in Chemical Production. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 63 (31), S. 13929–13942. DOI: 10.1021/acs.iecr.4c01649.

Gabrielli, Paolo; Rosa, Lorenzo; Gazzani, Matteo; Meys, Raoul; Bardow, André; Mazzotti, Marco; Sansavini, Giovanni (2023): Net-zero emissions chemical industry in a world of limited resources. In: *One Earth* 6 (6), S. 682–704. DOI: 10.1016/j.oneear.2023.05.006.

Herbst, Andrea; Langkau, Sabine; Rostek, Leon; Lotz, Meta Thurid; Rehfeldt, Matthias; Besler, Malte et al. (2023): Role of the circular economy as a contributor to industry decarbonisation beyond 2030. Hg. v. Fraunhofer ISI und ICF.

Hogg, Dominic (2024): Materials or gases? How to capture carbon. Hg. v. Zero Waste Europe. Online verfügbar unter https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2024-02/Report%20ZWE.pdf, zuletzt geprüft am 20.08.2026.

International Resource Panel (2020): Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. Unter Mitarbeit von Edgar G. Hertwich, Reid Lifset, Stefan Pauliuk, Niko Heeren, Saleem Ali, Qingshi Tu et al.

Kawecki, Delphine; Wu, Qie; Gonçalves, João S.V.; Nowack, Bernd (2021): Polymer-specific dynamic probabilistic material flow analysis of seven polymers in Europe from 1950 to 2016. In: *Resources, Conservation and Recycling* 173, S. 105733. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105733.

King, Sarah; Locock, Katherine E.S. (2022): A circular economy framework for plastics: A semi-systematic review. In: *Journal of Cleaner Production* 364, S. 132503. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132503.

Kirchherr, Julian; Reike, Denise; Hekkert, Marko (2017): Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: *Resources, Conservation and Recycling* 127, S. 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Kloo, Ylva; Scholz, Alexander; Theisen, Svenja (2023): Wege zu einer Netto-Null-Chemieindustrie : eine Meta-Analyse aktueller Roadmaps und Szenariostudien. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "Green Feedstock for a Sustainable Chemistry - Energiewende und Ressourceneffizienz im Kontext der dritten Feedstock-Transformation der chemischen Industrie". Teilbericht 2. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8168/file/8168_GreenFeed_Chemieindustrie.pdf, zuletzt geprüft am 11.08.2026.

Klotz, Magdalena; Haupt, Melanie; Hellweg, Stefanie (2023): Potentials and limits of mechanical plastic recycling. In: *J of Industrial Ecology* 27 (4), S. 1043–1059. DOI: 10.1111/jiec.13393.

Liang, Xiangmin; Cha, Daniel K.; Xie, Qingqing (2024): Properties, production, and modification of polyhydroxyalkanoates. In: *Resources, Conservation & Recycling Advances* 21, S. 200206. DOI: 10.1016/j.rcradv.2024.200206.

Lindner, Christoph; Schmitt, Jan; Fischer, Elena; Hein, Julia (2022): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Hg. v. BKV GmbH, Plastics Europe und BDE Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser-, und Rohstoffwritschaft e. V. Conversio Market & Strategy GmbH.

Lohmann, Paul M.; Gsottbauer, Elisabeth; Doherty, Anya; Kontoleon, Andreas (2022): Do carbon footprint labels promote climatarian diets? Evidence from a large-scale field experiment. In: *Journal of Environmental Economics and Management* 114, S. 102693. DOI: 10.1016/j.jeem.2022.102693.

Lopez, Gabriel; Keiner, Dominik; Fasihi, Mahdi; Koiranen, Tuomas; Breyer, Christian (2023): From fossil to green chemicals: sustainable pathways and new carbon feedstocks for the global chemical industry. In: *Energy Environ. Sci.* 16 (7), S. 2879–2909. DOI: 10.1039/d3ee00478c.

Lotz, Meta Thurid; Rosales Carreon, Jesus; Worrell, Ernst; Herbst, Andrea; Kochański, Maksymilian; Korczak, Katarzyna (2024): Estimating the impact range of circular economy actions for buildings on basic material demand in the European Union: A combination of qualitative and quantitative approaches. In: *Sustainable Production and Consumption*. DOI: 10.1016/j.spc.2024.10.002.

Lotz, Meta Thurid; Speckmann, Jannis; Bussmann, Simon; Sach, Thobias; Fleiter, Tobias; Manych, Niccoló et al. (2025): Leitmärkte für die Industriewende - Umsetzungsvorschläge für Instrumente zur Steigerung der Nachfrage nach klimafreundlichen Grundstoffen. Analyse. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam. Online verfügbar unter https://ariadneprojekt.de/publikation/leitmaerkte-fuer-die-industriewende-umsetzungsvorschlaege-fuer-instrumente-zur-steigerung-der-nachfrage-nach-klimafreundlichen-grundstoffen/, zuletzt geprüft am 31.08.2026.

Material Economics (Hg.) (o.J.): The Circular Economy. A Powerful Force for Climate Mitigation. Online verfügbar unter https://materialeconomics.com/sites/default/files/2024-06/material-economics-the-circular-economy.pdf, zuletzt geprüft am 23.09.2024.

Material Economics (2021): Europe's missing plastics. Taking Stock of EU Plasitcs Circularity.

Mesfun, Sennai; Lundgren, Joakim; Grip, Carl-Erik; Toffolo, Andrea; Nilsson, Rasika Lasanthi Kudahettige; Rova, Ulrika (2014): Black liquor fractionation for biofuels production - a techno-economic assessment. In: *Bioresource technology* 166, S. 508–517. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.062.

One Planet Network (Hg.) (2023): Rethinking, Extending, Re-using. Harnessing Digital Technologies for the Circular Economy. Online verfügbar unter https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/2023-11/RETHINKING%2C%20EXTENDING%2C%20REUSING-%20HARNESSING%20DIGITAL%20TECHNOLOGIES%20FOR%20THE%20CIRCULAR%20ECONOMY%20-%205%20%281%29.pdf, zuletzt geprüft am 16.09.2025.

Plastics Europe (2023): Plastics – the fast Facts.

Plastics Europe (Hg.) (2024): The Plastics Transition. Online verfügbar unter https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2024/09/2310838_RoadmapCopyChange_110924.pdf, zuletzt geprüft am 23.09.2025.

Prakash, Siddharth; Löw, Clara; Antony, Florian; Dehoust, Günter; Stuber-Rousselle, Kevin; Liu, Ran et al. (2023): Modell Deutschland Circular Economy. Modellierung und Folgenabschätzung einer Circular Economy in 9 Sektoren in Deutschland.

Rethink Plastic (Hg.) (2025): Packaging and packaging waste regulation implementation. A roadmap for national & local governments to slash record levels of packaging waste. Online verfügbar unter https://rethinkplasticalliance.eu/wp-content/uploads/2025/03/PPWR-implementation-guide-for-national-and-local-governments.pdf, zuletzt geprüft am 16.09.2025.

Schyns, Zoé O. G.; Shaver, Michael P. (2021): Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. In: *Macromolecular rapid communications* 42 (3), e2000415. DOI: 10.1002/marc.202000415.

Sievert, Katrin; Schmidt, Tobias S.; Steffen, Bjarne (2024): Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture. In: *Joule* 8 (4), S. 979–999. DOI: 10.1016/j.joule.2024.02.005.

Stegmann, Paul; Daioglou, Vassilis; Londo, Marc; van Vuuren, Detlef P.; Junginger, Martin (2022): Plastic futures and their CO2 emissions. In: *Nature* 612 (7939), S. 272–276. DOI: 10.1038/s41586-022-05422-5.

Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (Hg.) (2025): Resilienz in Chemie, Pharma und Rohstoffgewinnung. Kritische Verwundbarkeiten und strategische Optionen. Berlin. Online verfügbar unter https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/2025/09/AuU_Studie_Resilienz_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 17.08.2026.

Swetha, T. Angelin; Ananthi, V.; Bora, Abhispa; Sengottuvelan, Nallathambi; Ponnuchamy, Kumar; Muthusamy, Govarthanan; Arun, A. (2023): A review on biodegradable polylactic acid (PLA) production from fermentative food waste - Its applications and degradation. In: *International journal of biological macromolecules* 234, S. 123703. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123703.

SYSTEMIQ (Hg.) (2022): ReShaping Plastics. Pathways to a circular, climate neutrale plastics system in Europe.

Universitätsstadt Tübingen (Hg.) (o.J.): Verpackungssteuer. Online verfügbar unter https://www.tuebingen.de/verpackungssteuer#/34235, zuletzt geprüft am 14.10.2025.

VCI; VDI (Hg.) (2023): Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Chemistry4Climate. Abschlussbericht 2023. Online verfügbar unter https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf, zuletzt geprüft am 11.08.2026.

Xu, Zhuo; Sanchez-Rivera, Kevin; Granger, Charles; Zhou, Panzheng; Del Munguia-Lopez, Aurora Carmen; Ikegwu, Ugochukwu M. et al. (2025): Solvent-based plastic recycling technologies. In: *Nat Chem Eng* 2 (7), S. 407–423. DOI: 10.1038/s44286-025-00247-1.

Yadav, Geetanjali; Singh, Avantika; Dutta, Abhijit; Uekert, Taylor; DesVeaux, Jason S.; Nicholson, Scott R. et al. (2023): Techno-economic analysis and life cycle assessment for catalytic fast pyrolysis of mixed plastic waste. In: *Energy Environ. Sci.* 16 (9), S. 3638–3653. DOI: 10.1039/d3ee00749a.

Zampori, L.; Pant, R. (2019): Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. Hg. v. Publications Office of the European Union. Luxembourg. Online verfügbar unter https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC115959, zuletzt geprüft am 14.10.2025.

Zang, Guiyan; Sun, Pingping; Yoo, Eunji; Elgowainy, Amgad; Bafana, Adarsh; Lee, Uisung et al. (2021): Synthetic Methanol/Fischer-Tropsch Fuel Production Capacity, Cost, and Carbon Intensity Utilizing CO2 from Industrial and Power Plants in the United States. In: *Environmental science & technology* 55 (11), S. 7595–7604. DOI: 10.1021/acs.est.0c08674.

Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:

@ariadneprojekt.bsky.social

Kopernikus-Projekt Ariadne

ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMFTR auf kopernikus-projekte.de

Wer ist Ariadne? In der griechischen Mythologie gelang Theseus durch den Faden der Ariadne die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne im Konsortium von 26 wissenschaftlichen Partnern. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Forschungsinstitut für Nachhaltigkeit – Helmholtz-Zentrum Potsdam (RIFS) | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Hertie School | ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Julius-Maximilian-Universität Würzburg | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klima-folgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung Umweltenergierecht | Stiftung Wissenschaft und Politik | Technische Universität Berlin | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Technische Universität Nürnberg | Universität Duisburg-Essen | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung