



CHEMCOLOGNE

connecting the chemical industry

CHEMCOLOGNE. **NEUTRAL**

Transformation zu einer
treibhausgasneutralen
Chemieregion im Rheinland

REPORT – MODELLIERUNG EINER CHEMIEREGION

DIE CHEMIE-REGION RHEINLAND IN ZAHLEN UND FAKTEN



Veröffentlichungs- details

ZUSAMMENFASSUNG IN EINEM SATZ	Dieser Bericht verwendet neueste wissenschaftliche Modellierungsansätze und Fachwissen der Industrie, um verschiedene Wege und wichtige Voraussetzungen zum Erreichen der Treibhausgasneutralität für die Chemieindustrie im Rheinland zu identifizieren.
BITTE ZITIEREN ALS	Rohrbach, Leif; Meys, Raoul. ChemCologne.Neutral - Transformation zu einer treibhausgasneutralen Chemieregion im Rheinland. Juni 2024. Köln. Letztes Update: 11.11.2024
GESCHRIEBEN VON	Carbon Minds Eupener Straße 165, 50933 Köln https://www.carbon-minds.com/
BEAUFTRAGT DURCH	ChemCologne https://www.chemcologne.de/
AUTOREN	Leif Rohrbach, Ronja Hermanns, Ludwig Jolmes, Raoul Meys
KORRESPONDENZ MIT	Raoul Meys raoul.meys@carbon-minds.com
GRAFISCHE UMSETZUNG	HolleSand, Agentur für Strategie und Kommunikation
DANKSAGUNGEN	Dieses Projekt wurde mit Vertretern verschiedener Unternehmen und Verbände der chemischen Industrie im Rheinland entwickelt.
VERSION	2024.11_V1.0

Wir bedanken uns für die Unterstützung:



Vorwort



Christoph Kappenhagen
Vorstandsvorsitzender
ChemCologne

Die große Chance für das Rheinland – Auf dem Weg zur treibhausgasneutralen Chemieregion

Die chemische Industrie im Rheinland steht an einem entscheidenden Wendepunkt.

Die Studie der ChemCologne in Zusammenarbeit mit CarbonMinds und vielen Industriepartnern zeigt eindrucksvoll, dass die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Produktion bis 2045 machbar ist – ein Meilenstein für die Region und weit darüber hinaus.

Diese Vision ist nicht nur ein ambitioniertes Ziel, sondern eine echte Chance für das Rheinland, sich als Vorreiter in der nachhaltigen Industrie zu positionieren.

Klimaneutralität ist kein Luxus, sondern eine Notwendigkeit.

Die Umstellung auf treibhausgasneutrale Prozesse kann erheblich zur Erreichung der nationalen und internationalen Klimaziele beitragen.

Das Rheinland hat die Ressourcen, das Know-how und die Innovationskraft, diese Herausforderung zu meistern. Doch es erfordert einen mutigen Schritt nach vorn – gemeinsam von Industrie, Politik und Gesellschaft.

Die Studie hebt hervor, dass durch gezielte Investitionen in erneuerbare Energien, die Kreislaufwirtschaft und innovative Technologien die Wettbewerbsfähigkeit der Region gestärkt werden muss. Dies ist entscheidend, denn die Transformation darf nicht auf Kosten wirtschaftlicher Stärke und Arbeitsplätze gehen. Im Gegenteil, eine grüne Chemieindustrie kann neue Märkte erschließen und nachhaltige Jobs schaffen.

Ein zentraler Punkt ist der Aufbau einer robusten Infrastruktur: Pipelines für CO₂ und Wasserstoff, erweiterte Stromnetze und effiziente Recyclinganlagen. Diese Maßnahmen erfordern zwar hohe Investitionen, bieten jedoch langfristig enorme Kosteneinsparungen und sichern die Zukunftsfähigkeit der Region. Es ist ein Balanceakt, der durch enge Zusammenarbeit und kluge sowie mutige politische Entscheidungen gelingen kann.

Das Rheinland hat jetzt die Möglichkeit, ein leuchtendes Beispiel für andere Industrieregionen zu werden. Die Transformation hin zu einer treibhausgasneutralen Chemieregion ist keine Bürde, sondern eine einmalige Gelegenheit, die Zukunft mitzugestalten und global Maßstäbe zu setzen.

Lassen Sie uns diese Chance gemeinsam ergreifen – für das Klima, die Wirtschaft und die kommenden Generationen.

Kurzfassung

Das Rheinland ist eine der bedeutendsten Chemieregionen Deutschlands. Sie ist geprägt durch eine hohe Bevölkerungsdichte von etwa 8,7 Millionen Menschen und einer ausgeprägten Infrastruktur. Die Region beherbergt über 260 Chemieunternehmen mit mehr als 70.000 Beschäftigten und erwirtschaftet einen jährlichen Umsatz von rund 35 Milliarden Euro, was etwa 21 % des gesamten deutschen Chemieumsatzes ausmacht.¹ Damit trägt die Chemieregion Rheinland wesentlich zur wirtschaftlichen Stärke und Innovationskraft des Landes bei. Allerdings steht die Region vor der großen Herausforderung, bis 2045 treibhausgasneutral zu werden. Angesichts der dringenden Notwendigkeit, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und den Klimawandel zu bekämpfen, untersucht diese Studie die möglichen Wege, erforderlichen Maßnahmen sowie Kosten, um die Chemieindustrie im Rheinland treibhausgasneutral zu gestalten.

1. Die Chemieindustrie im Rheinland kann Treibhausgasneutralität auf verschiedenen Wegen erreichen.

Die Studie zeigt, dass eine treibhausgasneutrale Chemieregion Rheinland im Jahr 2045 erreicht werden kann. Damit die Unternehmen der chemischen Industrie im Rheinland künftig treibhausgasneutral produzieren können, müssen emissionsarme Technologien und Produktionsprozesse, alternative Ressourcen und die notwendige Infrastruktur zur Verfügung stehen und verwendet werden. Beispiele hierfür sind erneuerbarer Strom und Wasserstoff, das Recycling von Kunststoffabfällen, die Nutzung von biogenen Rohstoffen, Elektrifizierungstechnologien wie zum Beispiel Wärmepumpen und die Kohlenstoffdioxid-Abscheidung zur Speicherung oder Nutzung.

Vor diesem Hintergrund wurden fünf Szenarien erarbeitet, mit denen Treibhausgasneutralität erreicht wird. Dabei wird eine Kostenoptimierung verwendet, sodass die Treibhausgasneutralität bei minimalen Kosten erreicht wird, um die Transformation möglichst wirtschaftlich zu erreichen. Für die chemische Industrie im Rheinland ergeben sich je nach Szenario Betriebskosten von insgesamt 9 bis 21 Milliarden Euro pro Jahr und Investitionskosten von 22 bis 39 Milliarden Euro, die bis 2045 in der Chemieregion Rheinland anfallen. In den Betriebskosten sind alle wesentlichen laufenden Kosten wie der Lohn für Mitarbeiter, der Einkauf von Ressourcen, die Abfallbehandlung oder die Nutzung von sektorübergreifender Infrastruktur wie das Stromnetz enthalten. In den Investitionskosten sind der Bau und von Produktions-, Entsorgungs- und Recyclinganlagen als auch Anlageninfrastruktur enthalten.

Die resultierenden Kosten für die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Chemieindustrie müssen künftig in einem wettbewerbsfähigen Rahmen liegen. Dafür muss der Zugang zu Technologien und alternative Ressourcen die Handlungsfähigkeit der regionalen Unternehmen gewährleisten, die politischen Rahmenbedingungen faire Wettbewerbsbedingungen im globalen Umfeld ermöglichen und der Wert einer treibhausgasneutralen Produktion von den Verbrauchern anerkannt werden.

2. Ein optimaler Dreiklang aus erneuerbaren Energien, alternativen Ressourcen und notwendiger Infrastruktur ist essenziell für die Region.

Eine treibhausgasneutrale Chemieindustrie im Rheinland erfordert eine stabile Versorgung mit Ressourcen und eine funktionierende Infrastruktur. Dazu gehören insbesondere erneuerbare, treibhausgasneutrale Energien, darunter 23 bis 35 Terawattstunden Strom und 7 bis 77 Terawattstunden Wasserstoff pro Jahr sowie alternative Ressourcen, darunter jährlich 1,3 bis 2,0 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle und 3 bis 14 Millionen Tonnen biogene Rohstoffe wie Rest- und Abfallstoffe oder bisher energetisch genutzte Stoffe. Die Infrastrukturbedarfe schließen den Netzausbau für eine stabile Energieversorgung, sichere Transportwege sowie ein Wasser-

¹ www.chemcologne.de/investitionen/die-chemie-region, Stand September 2024.

stoffnetz und eine Kohlenstoffdioxid-Infrastruktur mit ein. Umfangreiche Investitionen in die Ressourcenversorgung können die Wettbewerbsfähigkeit der Chemieunternehmen verbessern und die Transformation der Chemieindustrie und anderer Sektoren stark beschleunigen.

3. Durch eine effiziente Energienutzung wird der Primärenergiebedarf von Prozessen reduziert. Zur Nutzung der Potentiale sind der Erhalt von Verbundstandorten und Investitionen in neue Technologien notwendig.

Die Studie zeigt, dass im Jahr 2045 der optimierte primäre Prozessenergiebedarf der Chemieindustrie im Rheinland zwischen 23 und 35 Terawattstunden liegt. Dies entspricht in etwa 11,5 % bis 17,5 % des deutschlandweiten Prozessenergiebedarfes der chemischen Industrie im Jahr 2022.²

Verbundstandorte ermöglichen bereits heute in hohem Maße eine effiziente Energienutzung durch Wärmeintegration und Energierückgewinnung in der Region. Die damit verbundenen Energieeinsparungen helfen den primären Prozessenergiebedarf zu senken und somit die Betriebskosten wettbewerbsfähig zu reduzieren. Wird auf die Potentiale der Energieintegration verzichtet, steigt der Prozessenergiebedarf auf zwischen 35 bis 41 Terawattstunden pro Jahr, was einer Steigerung von bis zu 66 % entspricht. Es gilt daher, Verbundstandorte mit ihren Vorteilen zu erhalten und neue Entwicklungen sektorübergreifend im Verbund zu denken.

Wird ausschließlich Erdgas (mit CCS) oder Wasserstoff als Brennstoff zur Bereitstellung der thermischen Energie verwendet, steigt der primäre Prozessenergiebedarf ohne Energieintegration weiter auf 40 bis 54 Terawattstunden im Jahr 2045. Die Ausnutzung von Elektrifizierungstechnologien und Wärmepumpen vermeidet in diesem Vergleich einen Anstieg des primären Prozessenergiebedarfs um bis zu 41 %. Um diese Potentiale vollständig zu heben, sollten Investitionen in neue und effiziente Technologien, wie direkte Elektrifizierungstechnologien und industrielle Wärmepumpen gefördert werden. Diese Technologien sollten durch ein geeignetes politisches Rahmenwerk unterstützt werden, da umfängliche Investitionen in diese zukunftsweisenden Technologien unter den aktuellen Bedingungen vermehrt nicht wettbewerbsfähig sind.

4. Der Ausbau der Kreislaufwirtschaft reduziert Treibhausgasemissionen maßgeblich. Zusätzlich kann Recycling die Wettbewerbsfähigkeit der Chemieindustrie im Rheinland langfristig stärken.

Deutschland und speziell das Rheinland sind im globalen Vergleich bereits heute Vorreiter beim Recycling von Kunststoffabfällen. Recycling vermeidet durch eine verbesserte Kreislaufführung kostengünstig Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung von Kunststoffabfällen und reduziert gleichzeitig den Bedarf an kohlenstoffhaltigen Ressourcen. Beides stärkt langfristig die Wettbewerbsfähigkeit und die Resilienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Um diese regionalen Vorteile zu maximieren, kann der Recyclinganteil der produzierten Kunststoffe durch den Ausbau von Recyclingverfahren wie mechanisches und chemisches Recycling sowie durch eine verbessertes Wertstoffmanagement in der Region und in Europa erhöht werden. Dadurch können in der Region insgesamt 2,2 bis 3,5 Millionen Tonnen Treibhausgasemissionen pro Jahr gegenüber der Verbrennung eingespart werden.

Damit das gelingt, sollten Investitionen in Recyclingtechnologien und in den Ausbau der Kreislaufwirtschaft über den gesamten Lebenszyklus von Chemikalien und Kunststoffen in der Region gefördert werden. Kunststoffabfälle sollten als sekundäre Rohstoffe anerkannt und ihr Handel europaweit möglich gemacht werden

² Basierend auf einem Prozessenergiebedarf von 200 TWh für die deutsche Chemie- und Pharmabranche im Jahr 2022 (VCI, Energiestatistik im Überblick. Stand Oktober 2024).

5. Der Kohlenstoffbedarf muss künftig durch Ressourcen abgedeckt werden, die Treibhausgasneutralität ermöglichen. Dafür ist eine ausreichende Verfügbarkeit von Recyclingmengen, biogenen Rohstoffen und klimaneutraler Energie für CC(U)S notwendig.

Der Kohlenstoffbedarf der regionalen Chemieindustrie liegt bei etwa 5,3 Millionen Tonnen pro Jahr. Recyclingmengen und biogene Rohstoffe können diesen Bedarf teilweise decken, wobei Recycling etwa 0,6 bis 0,9 Millionen Tonnen und biogene Rohstoffe 0,9 bis 4,1 Millionen Tonnen Kohlenstoff abdecken können. Weiterhin können fossile Ressourcen und Kohlenstoffdioxid (CO₂), das sowohl aus CO₂-Punktquellen als auch aus der direkten Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) stammen kann, als Kohlenstoffquellen eingesetzt werden. Eine geeignete Auswahl aus all diesen Kohlenstoffressourcen unter Einbeziehung von Importen kann in Kombination mit Carbon Capture and Utilization (CCU) und Carbon Capture and Storage (CCS) die Deckung des regionalen Kohlenstoffbedarfs für eine treibhausgasneutrale Produktion ermöglichen. Um mit begrenzten Ressourcen eine treibhausgasneutrale Produktion mit maximaler Wertschöpfung zu erreichen, sollte die stoffliche Nutzung von Biomasse und Kunststoffabfällen der energetischen Nutzung vorgezogen werden.

6. CC(U)S-Technologien können unvermeidbare Treibhausgasemissionen reduzieren und dabei helfen, Kohlenstofflücken zu schließen. Ein optimierter Einsatz kohlenstoffhaltiger Rohstoffe in Kombination mit CCS kann die gesamten Kosten reduzieren.

Carbon Capture and Utilization oder Storage (CCU/CCS) beschreibt die Abscheidung, den Transport und Nutzung oder Speicherung des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid, was bei chemischen Prozessen entstehen kann. CCS bietet dadurch die Möglichkeit, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, indem deren Freisetzung in die Atmosphäre durch die Speicherung verhindert wird, während CCU die Nutzung von Kohlenstoffdioxid als Quelle für die Produktion von Chemikalien zugänglich macht.

CCS wird mit 4 bis 12 und CCU mit 0 bis 10 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid im Jahr 2045 in der Region benötigt. Diese Technologien können in Kombination mit recycelbaren, biogenen oder fossilen Rohstoffquellen die Kosten minimieren und gleichzeitig Treibhausgasemissionen effektiv einsparen. Der Aufbau einer entsprechenden Kohlenstoffdioxid-Infrastruktur ist entscheidend für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der Chemieregion Rheinland.

7. Die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Chemieregion Rheinland ist eine Herausforderung, die Industrie, Politik und Zivilgesellschaft nur gemeinsam meistern können.

Der Austausch mit Unternehmen der Chemieregion hat gezeigt, dass Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette reduziert werden können, wenn die passenden Rahmenbedingungen für die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Chemieindustrie geschaffen werden. Die Transformation zu einer wettbewerbsfähigen und treibhausgasneutralen Chemieindustrie erfordert dabei das Zusammenwirken aller Akteure sowie eine Kombination aus alternativen Technologien und Ressourcen, erneuerbaren Energien, Infrastruktur, Investitionen, sektorübergreifender Zusammenarbeit und die Zustimmung der Gesellschaft und der Verbraucher. Wenn die damit verbundenen Herausforderungen erfolgreich gemeistert werden, bleibt die Chemieindustrie als Antriebsmotor für die Region erhalten und kann die Transformation des Rheinlands, Deutschlands und Europas durch effiziente Technologien und Produkte beschleunigen. Umgekehrt steigt auch die Wettbewerbsfähigkeit der Chemieindustrie durch eine beschleunigte Transformation in anderen Sektoren, zum Beispiel durch eine verbesserte Versorgung mit erneuerbaren Energien.

Die Entwicklung und Umsetzung einer gemeinsamen Strategie ist jetzt der nächste Schritt – dazu lädt die Chemieindustrie die Industrie, Politik und Zivilgesellschaft ein.

Inhaltsverzeichnis

	Veröffentlichungsdetails	03
	Vorwort	05
	Kurzfassung	06
	Inhaltsverzeichnis	09
01	Einleitung	11
02	Studienumfang und methodischer Rahmen	13
	2.1 Produktionsumfang an regionalen Chemikalien und Kunststoffen	13
	2.2 Betrachtung der Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus	15
	2.3 Investitions- und Betriebskosten	16
	2.4 Modellierungsansatz für eine treibhausgasneutrale Produktion	17
	2.5 Übersicht der Produktionsverfahren und zukünftiger alternativer Technologien	19
	2.6 Annahmen zu zukünftigen Entwicklungen von Ressourcen-Verfügbarkeiten	23
03	Vorstellung der analysierten Szenarien	26
	3.1 Ziel und Relevanz der Szenarien	26
	3.2 Aufbau der Szenarien	26
04	Ergebnisse der Szenarien und zentrale Schlussfolgerungen	29
	4.1 Treibhausgasneutralität und die dabei anfallenden Kosten	29
	4.2 Bedarfe an Energie, alternativen Ressourcen und Infrastruktur	32
	4.3 Beitrag einer effizienten Energienutzung	33
	4.4 Potential von Recycling zur Ressourcenschonung	36
	4.5 Optimale Bereitstellung von Kohlenstoff	38
	4.6 Potentiale von Kohlenstoffdioxidspeicherung und -nutzung	39
	4.7 Transformation durch Zusammenarbeit von Industrie, Politik und Zivilgesellschaft	40
05	Zusammenfassung und nächste Schritte	43
	Glossar und Abkürzungsverzeichnis	46

01

Einleitung

Einleitung

Deutschland hat das Ziel, bis 2045 treibhausgasneutral zu werden.³ Dazu ist es unerlässlich, dass alle relevanten Sektoren ihre Treibhausgasemissionen reduzieren. Ein wichtiger Sektor ist die Chemieindustrie, die zentrale Bausteine für Produkte in vielen Bereichen liefert, wie zum Beispiel medizinische Produkte, Baustoffe und Verpackungen sowie Materialien für Elektronikteile, erneuerbare Energien, Mobilität, Sport und Freizeit. Viele dieser Produkte sind essenziell für ein ressourcenschonendes Wirtschaften, wodurch die chemische Industrie als ein Enabler für die Transformation zur Klimaneutralität fungiert. Die Chemieindustrie trägt jedoch auch als ein bedeutender Emittent von Treibhausgasen zum Klimawandel bei.

Als eine der größten Branchen in NRW, steht die Chemieindustrie im Rheinland also vor der besonderen Herausforderung, ihren Weg zur Treibhausgasneutralität zu beschreiten. Dabei zeichnet sich die Chemieregion Rheinland durch eine hohe Bevölkerungsdichte von etwa 8,7 Millionen Menschen, eine gute infrastrukturelle Anbindung, viele Chemieunternehmen in großen Verbundstandorten und eine tiefe Wertschöpfung in der Chemieindustrie aus.⁴ Sie umfasst über 260 Chemieunternehmen mit mehr als 70.000 Beschäftigten und erwirtschaftet einen jährlichen Umsatz von rund 35 Milliarden Euro, was etwa 21 % des gesamten deutschen Chemieumsatzes ausmacht.

Die Unternehmen der chemischen Industrie im Rheinland arbeiten bereits heute an dem Weg zur Umstellung ihrer Energie- und Rohstoffbasis, Produktionsprozesse und Wertstoffkreisläufe. Es fehlt jedoch eine fundierte Analyse über die gesamtheitliche Transition zur Treibhausgasneutralität der Chemieregion Rheinland. Deshalb zielt diese Studie darauf ab, eine fundierte Datenbasis für politische und strategische Entscheidungen zu schaffen, um die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Chemieregion Rheinland zu unterstützen und gemeinschaftlich voranzutreiben.

Dazu werden zunächst die minimierten Kosten und die Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus von Chemikalien und Kunststoffen für verschiedene Transformationswege vorgestellt. Diese basieren auf Technologien und Rahmenbedingungen, die im Austausch mit regionalen Unternehmen erarbeitet wurden. Der Energie- und Rohstoffbedarf, der erforderlich ist, um die Chemikalien- und Kunststoffproduktion in der Region durch eine Kombination aus konventionellen und alternativen Technologien bis 2045 treibhausgasneutral zu betreiben, wird detailliert aufgezeigt. Es werden Optimierungspotentiale identifiziert, beispielsweise durch den effizienten Einsatz von Energie und alternativen Rohstoffen wie Kunststoffabfällen. Anschließend wird erläutert, wie der Kohlenstoffbedarf der Chemieindustrie gedeckt werden kann und welchen Beitrag die Kohlenstoffdioxidabscheidung und -nutzung (CCU) beziehungsweise -speicherung (CCS) leisten können.

Abschließend werden Handlungsempfehlungen und geeignete Maßnahmen für die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Chemieindustrie im Rheinland gegeben, die in Zusammenarbeit mit regionalen Unternehmen auf Grundlage der Studienergebnisse erarbeitet wurden.

3 BGBl. I S. 3905 § 3, Nationale Klimaschutzziele, Deutschland, 2024.

4 www.chemcologne.de/investitionen/die-chemie-region, Stand August 2024.

02

Studienumfang und methodischer Rahmen

Studienumfang und methodischer Rahmen

In dieser Studie wird untersucht, wie eine treibhausgasneutrale Chemieindustrie im Rheinland bis zum Jahr 2045 erreicht werden kann. Dazu werden die regionale Produktion von Chemikalien und Kunststoffen für das Jahr 2045 abgeschätzt, alle wesentlichen Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigt und die Kosten über alle Prozesse technologieoffen optimiert. Die Optimierung erfolgt auf Basis einer Lebenszyklusanalyse und unter Berücksichtigung regionaler Rahmenbedingungen.

Dieses Kapitel beschreibt den Umfang der Studie und thematisiert das methodische Vorgehen, die relevanten Rahmenparameter und die verschiedenen Szenarien. Zunächst werden die im Rahmen der Studie untersuchten Chemikalien und Kunststoffe beschrieben, für die das Modell die Produktion in der Region abbildet. Anschließend wird ein Überblick über die relevanten Produktionsverfahren inklusive zukünftiger und alternativer Technologien gegeben, die in die Modellierung für eine klimaneutrale Produktion 2045 einfließen. Danach werden Annahmen zu zukünftigen Entwicklungen vorgestellt, wie zum Beispiel zur Verfügbarkeit von Recyclingmengen, die von politischen, gesellschaftlichen und regionalen Entwicklungen abhängen. Abschließend wird der Modellierungsansatz beschrieben, mit dem die kosteneffizienteste Erreichung einer treibhausgasneutralen Chemieindustrie für verschiedene Rahmenbedingungen berechnet werden kann.

2.1 Produktionsumfang an regionalen Chemikalien und Kunststoffen

Die Studie legt einen Produktionsumfang zugrunde, der eine Auswahl an wichtigen Chemikalien und Kunststoffen der regionalen Chemieproduktion umfasst. Für die Produkte im Produktionsumfang wird die gesamte chemische Wertschöpfungskette berücksichtigt und bedingt einen bestimmten Bedarf an Rohstoffen und Energie, die Herstellung von Zwischenprodukten und die Entsorgung der Produkte am Lebensende.

Der Produktionsumfang wurde in Absprache mit regionalen Chemieunternehmen definiert, und wird eingeteilt in Basischemikalien, Kunststoffe sowie weitere Chemikalien. Tabelle 1 listet die entsprechenden Chemikalien und Kunststoffe auf, deren Herstellung und Entsorgung auf Basis von Energie- und Massenbilanzen detailliert modelliert werden. Die aggregierten Produktionsvolumen dieser Chemikalien und Kunststoffe sind in Abbildung 1 dargestellt. Die bestimmten Produktionsvolumen basieren auf bereitgestellten Daten von regionalen Unternehmen oder, wenn keine Unternehmensdaten vorliegen, der ICIS-Angebots- und Nachfragebank⁵ für das Jahr 2021. Alle weiteren Chemikalien und Kunststoffe gehen über den Umfang dieser Studie hinaus und die entsprechende Produktion und Entsorgung wird nicht betrachtet.

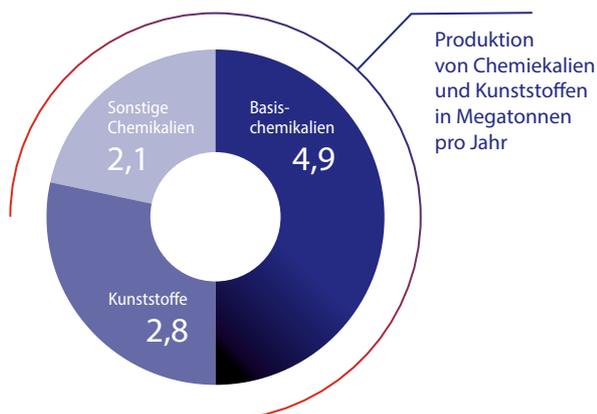


Abbildung 1

Produktionsvolumen der Produkte in Megatonnen pro Jahr, die im Studienumfang auf Basis von Massen- und Energiebilanzen untersucht wurden. Basischemikalien, die für die Produktion der Kunststoffe und sonstigen Chemikalien im betrachteten Produktionsumfang benötigt werden, sind nicht in den dargestellten Basischemikalien Jahr enthalten.

⁵ ICIS, Supply and Demand Database, 2021.

Tabelle 1

Liste der in dieser Studie untersuchten Chemikalien und Kunststoffe

Basischemikalien	Kunststoffe	Sonstige Chemikalien
Ammoniak	Polyethylen (HD)	Anilin
Benzol	Polyethylen (LD)	Blausäure
C4-Fraktion	Polyethylen (LLD)	Butadien
Chlor	Polyisobuten	n-Butanol
Ethylen	Polypropylen	Ethylenoxid
Methanol	Polyvinylchlorid	2-Ethylhexanol
Natronlauge		Natriumwasserglas
Propylen		Propylenoxid
Toluol		Tolul-2,4-diisocyanat
Xylol		

Zusätzlich zu dem Produktionsumfang wird ein zusätzlicher Energiebedarf für einige weitere Produkte, die in der Region hergestellt werden und nicht im Produktionsumfang enthalten sind, erfasst. Dieser zusätzliche Energiebedarf umfasst unter anderem die regionale Produktion von Acrylnitril, Adipinsäure, Bisphenol A, i-Butanol, Chlorbenzole, Diethylenglykol, Dipropylenglykol, Ethylendichlorid, Ethylenglykol, Maleinsäureanhydrid, Methylmethacrylat, Methylendiphenyldiisocyanat, Nitrobenzol, gemischte dibasische Säuren, Phthalsäureanhydrid, Polybutadien, Propylendichlorid, Propylenglykole, Silica und Silikate.

Der zusätzliche Energiebedarf wird auf Basis von Unternehmensdaten oder Produktionsvolumen mit grob angenäherten Prozessenergiebedarfen pro Masse Produkt bestimmt. Hierbei werden Unternehmensdaten von regionalen Chemieunternehmen priorisiert verwendet, da diese die höchste Datenqualität versprechen. Wenn keine Unternehmensdaten verfügbar sind, werden auf Basis von Produktionsvolumen der ICIS-Angebots- und Nachfragedatenbank im Jahr 2021⁶ und durchschnittlichen Prozessenergiebedarfen pro Masse Produkt⁷ ein zusätzlicher Energiebedarf in grober Annäherung abgeschätzt.

Die zukünftigen Produktionsvolumen der in diesem Kapitel vorgestellten Chemikalien und Kunststoffe in der Region hängen im Kontext des globalen Wettbewerbs von schwer vorhersehbaren Entwicklungen ab, wie zum Beispiel gesetzlichen Vorgaben oder der wirtschaftlichen Entwicklung. In dieser Studie wird angenommen, dass die regionale Produktion in den untersuchten Szenarien im Jahr 2045 dem Niveau der aktuellen Produktion entspricht. Die untersuchte Region erstreckt sich im Wesentlichen auf die Rheinlandregion und die Produktionsstandorte der Mitgliedsunternehmen von ChemCologne. Das betrachtete Gebiet umfasst die Regierungsbezirke Köln und Düsseldorf.

6 ICIS, Supply and Demand Database, 2021.

7 1,49 kg Dampf pro kg Produkt, 0,58 MJ Wärme (< 200 °C) pro kg Produkt, 0,46 MJ Wärme (200-500 °C), 0,01 MJ Wärme (>500 °C) pro kg Produkt, 1,60 MJ Strom pro kg Produkt.

2.2 Betrachtung der Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus

Dieses Kapitel beschreibt die Lebenszyklusphasen für chemische Produkte und Kunststoffe, die im Rahmen der betrachteten Wirkungskategorie berücksichtigt wurden. Zudem wird die verwendete Methodik beschrieben und wodurch sich ein Überblick über die berücksichtigten Treibhausgasemissionen ergibt.

Berücksichtigte Lebenszyklusphasen

In dieser Studie wird die Produktion und Entsorgung der in Tabelle 1 aufgelisteten Chemikalien und Kunststoffe abgebildet. Die Nutzungsphase dieser Chemikalien und Kunststoffe wird bewusst ausgeschlossen, da die große Variation an Produkten in der Nutzungsphase eine detaillierte Darstellung im Rahmen dieser Studie zu komplex machen würde. Die Treibhausgasemissionen, Energiebedarfe und Vorteile der verschiedenen Produktvariationen in der Nutzungsphase werden dementsprechend vernachlässigt. Es wird angenommen, dass jedes Produkt, das nicht in einem spezifischen Prozess entsorgt wird, wie zum Beispiel mechanischem Recycling, am Lebensende vollständig zersetzt wird.

Der Lebenszyklus von Chemikalien und Kunststoffen beginnt mit der Gewinnung von Rohstoffen, inklusive recycelter Wertstoffe, führt über deren Umwandlung in chemische Ausgangsstoffe und gipfelt in der Produktion spezifischer Chemikalien und Kunststoffe. Im Anschluss müssen alle produzierten Chemikalien und Kunststoffe entsorgt werden. Für das Lebensende von Kunststoffen geht das Modell dieser Studie von der einfachen Verbrennung nach Doka⁸ aus, das heißt von der Verbrennung mit Energierückgewinnung und fortgeschrittenen Recyclingtechniken. Eine Deponierung von Kunststoffabfällen wird nicht angenommen. Dokas Modell zur thermischen Abfallbehandlung erfasst die Umweltauswirkungen der chemischen Behandlung und Verbrennung basierend auf der elementaren Zusammensetzung. Zudem umfasst es den gesamten Abfallmanagementprozess, einschließlich der Verbrennung sowie der Trennung und Deponierung von Feststoffen. Dieses Modell wird im Rahmen dieser Studie mit Primärdaten von Anlagen zur gefährlichen Abfallverbrennung in Nordrhein-Westfalen aktualisiert, um die Genauigkeit und Relevanz zu erhöhen.

Beim Recycling werden sowohl mechanische als auch chemische Verfahren als mögliche Bestandteile einer Kreislaufwirtschaft betrachtet. Recycelte Kunststoffabfälle stellen eine alternative Kohlenstoffressource dar, die das Potential hat, die Treibhausgasemissionen entlang der chemischen Wertschöpfungskette zu reduzieren. Für das effiziente Recycling von Kunststoffabfällen werden hochentwickelte Sammel- und Sortiersysteme benötigt. Die Recyclingraten von Kunststoffen stellen daher eine wesentliche Einschränkung des Modells dar, da sie die Menge an Kunststoffabfällen begrenzen, die wieder in die Kunststoffwerteschöpfungskette zurückgeführt werden können. Weitere Details zur Verfügbarkeit von Kunststoffabfällen für das Recycling werden im Kapitel 2.6 beschrieben. Das Modell unterscheidet zwischen Verpackungsabfällen und anderen Kunststoffabfällen, die aus anderen Anwendungsbereichen wie zum Beispiel dem Transport, dem Bauwesen oder der Elektronik stammen können.⁹

Neben dem Lebensende von Kunststoffabfällen deckt das Modell dieser Studie auch das Lebensende von Ammoniak in seinen herkömmlichen Anwendungen als Düngemittel und Ausgangsmaterial für chemische Produkte ab. Andere Anwendungen wie der Einsatz von Ammoniak als Schiffskraftstoffe und zur Energieerzeugung werden nicht berücksichtigt. Treibhausgas-Emissionsfaktoren aus Ammoniak Anwendungen werden aus der neuesten Literatur berechnet.¹⁰

⁸ Gabor Doka, "Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services," Ecoinvent Report No. 13 Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2003.

⁹ Conversio (2022), Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland, 2021.

¹⁰ Fertilizers Europe, Energy efficiency and greenhouse gas emissions in European nitrogen fertilizer production and use, 2021.
IEA, Ammonia Technology Roadmap, IEA, Paris, 2021; www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap, Stand August 2024.

Für andere Chemikalien, verfolgt das Modell keine spezifische Abfallbehandlung, da die hohe Komplexität der endgültigen Produkte den Umfang dieser Studie übersteigt. Stattdessen wird ein konservativer Ansatz gewählt, bei dem davon ausgegangen wird, dass diese Chemikalien durch Abfallbehandlungsprozesse, wie von Doka et al.⁸ beschrieben, endgültig entsorgt werden.

Zusätzlich schließt das Modell explizit die End-of-Life-Auswirkungen von Chlor, Wasserstoff und Natriumwasserglas aus. Diese Ausnahmen beruhen auf der Annahme, dass die Entsorgung oder Behandlung dieser nicht kohlenstoffhaltigen Produkte am Lebensende (End-of-Life) im Vergleich zu den anderen Chemikalien und Kunststoffen keine signifikanten Treibhausgasemissionen und somit vernachlässigbare Klimaauswirkungen verursachen. Dies entspricht der Ausrichtung des Modells auf kohlenstoffintensive Materialien und Prozesse.

Zusammengefasst basiert das gesamte Modell auf einer detaillierten Lebenszyklusanalyse (engl. life cycle assessment, LCA) und detaillierten technischen Daten. Die Nutzung technischer Energie- und Massenbilanzen sowohl für die Produktions- als auch für die Entsorgungsprozesse von Chemikalien und Kunststoffen ermöglicht eine umfassende Bewertung der Umweltauswirkungen.

Wirkungsabschätzung und Methodik

Die Methode der Wirkungsabschätzung (engl. life cycle impact assessment, LCIA) und der Untersuchungsrahmen der Emissionen umfassen in dieser Studie die Treibhausgasemissionen Kohlendioxid, Methan, Stickoxide und in geringerem Umfang andere Treibhausgasemissionen, entsprechend dem Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) und dem Treibhausgasprotokoll (engl. Greenhouse Gas Protocol) auf Basis der Umfangsdefinition von 2013.¹¹ Der Ansatz, der auf der Lebenszyklusanalyse basiert, berücksichtigt die Treibhausgas-Emissionen aus den Emissionskategorien („Scopes“) 1, 2 und 3. Für indirekte Emissionen aus Bereich 3 werden die Kategorien 1 und 12 des GHG-Protokolls für „gekaufte Waren“ und die „End-of-Life“-Behandlung berücksichtigt, sofern nicht anders beschrieben.

2.3 Investitions- und Betriebskosten

In dieser Studie werden die Kosten für die Produktion und Entsorgung von Chemikalien und Kunststoffen untersucht, einschließlich der Betriebs- und Investitionskosten. Die verwendeten prozessbezogenen Kosten basieren auf verschiedenen Publikationen und Informationen regionaler Unternehmen.¹² Die Betriebskosten umfassen sowohl feste Betriebskosten, die für den laufenden Betrieb von Chemieanlagen anfallen, als auch variable Betriebskosten, die durch externe Einkäufe von der chemischen Industrie bezogen werden. Zu den festen Betriebskosten zählen zum Beispiel Arbeitskräfte, Wartungsmaterialien, Versorgungsleistungen, Steuern, Versicherungen und Gemeinkosten. Die variablen Kosten beinhalten beispielsweise den Einkauf von stofflichen oder energetischen Ressourcen für die chemische Produktion. Die Investitionsausgaben decken die Anlagengrenzen und die Nebenanlagen ab.

Für die Produktionstechnologien und die Abfallbehandlung sind Daten zu Investitionskosten und fixen Betriebskosten enthalten. Für stoffliche und energetische Ressourcen sowie weitere Betriebsmittel (z. B. Kühlwasser, Prozesswasser und Stickstoff) werden hingegen nur Marktpreise berücksichtigt. Diese Marktpreise für Ressourcen und Versorgungsleistungen hängen von schwer vorherzusehenden Entwicklungen ab. In dieser Studie wird angenommen, dass die Marktpreise für Ressourcen im Jahr 2045 den aktuellen Marktpreisen entsprechen, sofern nicht anders in Kapitel 2.6 beschrieben. Die berechneten Betriebs- und Investitionskosten im Jahr 2045 entsprechen der heutigen Wertstellung.

¹¹ Greenhouse Gas Protocol and Carbon Trust, Scope 3 Standard for requirements and guidance related to scope 3 accounting and reporting, 2013.

¹² Meys et al., Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy; Science, 2021.
Zibunas et al., Cost-Optimal Pathways towards Net-Zero Chemicals and Plastics Based on a Circular Carbon Economy, Computers & Chemical Engineering, 2022.

2.4 Modellierungsansatz für eine treibhausgasneutrale Produktion

Dieses Kapitel gibt einen Überblick, wie in dieser Studie mithilfe eines wissenschaftsbasierten Modellierungsansatzes treibhausgasneutrale Szenarien für die chemische Industrie im Rheinland erstellt werden. Dieser Modellierungsansatz wurde bereits in ähnlicher Weise in früheren wissenschaftlichen Veröffentlichungen wie Science¹³, PNAS¹⁴, Nature Communications¹⁵ und anderen¹⁶ verwendet, um Wege zur Treibhausgasneutralität und kostenoptimale Lebenszyklen von Chemikalien und Kunststoffen vorherzusagen. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der Veröffentlichung in Science über eine treibhausgasneutrale Kunststoffproduktion im jüngsten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) nachgedruckt.^{13, 17} Eine detaillierte Beschreibung des mathematischen Konzepts kann auf Anfrage bereitgestellt werden. Die folgende Beschreibung des Modellierungsansatzes gibt nur eine vereinfachte Beschreibung des wesentlichen Konzepts wieder.

Der Modellierungsansatz zielt im Wesentlichen darauf ab, eine kostenoptimale treibhausgasneutrale Produktion und Entsorgung von Chemikalien und Kunststoffen für ausgewählte Szenarien im Rheinland für das Jahr 2045 zu bestimmen. Dies erfolgt mit Hilfe eines linearen Kostenoptimierungsansatzes, der die Gesamtkosten aller Prozesse über den Lebenszyklus der betrachteten Produkte minimiert. Die Gesamtkosten umfassen alle Investitionsausgaben und Betriebskosten, wie fixe und variable Betriebskosten, um ein bestimmtes Niveau an Treibhausgasemissionen zu erreichen.

Für die Bestimmung der Technologieauswahl unter Minimierung der Kosten wird eine Gewichtung von 30:1 der jährlichen Betriebskosten zu den kumulierten Investitionskosten gewählt. Während Abschreibungen von Investitionskosten in der Chemieindustrie häufig mit 10 bis 30 Jahren angegeben werden¹⁸, was einem Verhältnis von 10:1 bis 30:1 der jährlichen Betriebskosten zu den kumulierten Investitionskosten entsprechen würde, verstärkt die Gewichtung von 30:1 den Fokus auf die Optimierung der festen und variablen Betriebskosten in der Modellierung, um eine möglichst wettbewerbsfähige Chemieproduktion zu gewährleisten. Diese Gewichtung ist nur für die Bestimmung der Technologieauswahl relevant und ist somit nicht in den Betriebs- und Investitionskosten in Kapitel 4 enthalten.

13 Meys et al., Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy; Science, 2021; <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>.

14 Kätelhön et al., Climate Change Mitigation Potential of CCU; PNAS, 2019; <https://doi.org/10.1073/pnas.1821029116>.

15 Leow et al., Electrified hydrocarbon-to-oxygenates coupled to hydrogen evolution for efficient greenhouse gas mitigation; Nature Communication, 2023; <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37382-3>.

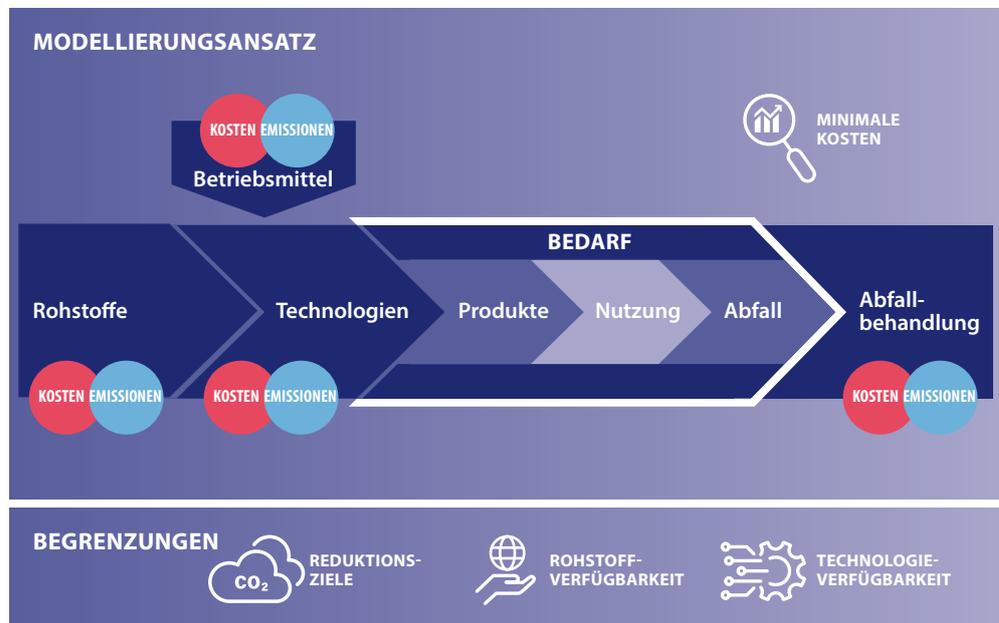
16 Kätelhön et al., Stochastic Technology Choice Model for Consequential Life Cycle Assessment, 2016; <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04270>. Zibunas et al., Cost-optimal pathways towards net-zero chemicals and plastics based on a circular carbon economy, 2022; <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>.

Gabrielli et al., Net-zero emissions chemical industry in a world of limited resources, 2023; <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.05.006>. Bachmann et al., Towards circular plastics within planetary boundaries, 2023; <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01054-9>.

17 Bashmakov et al., Industry. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2022; <https://doi.org/10.1017/9781009157926.013>.

18 § 193ff AO, § 7 Abs 1 EstG, § 1551, Bundesministerium der Finanzen, 1995.

Abbildung 2
Schematische Darstellung des Modellierungsansatzes.



Während in allen in Kapitel 3 vorgestellten Szenarien die Chemieproduktion im Jahr 2045 der aktuellen Produktion (siehe Kapitel 2.1) entspricht, werden in den Szenarien jeweils unterschiedliche Randbedingungen abgebildet. So werden verschiedene Verfügbarkeiten alternativer Rohstoffe wie Biomasse, Recyclingmengen und klimaneutraler Strom oder Kapazitäten zur Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid in den Modellierungsansatz einbezogen. Diese Randbedingungen spiegeln Entwicklungen wider, in denen sich die Verfügbarkeit einer bestimmten Technologie oder eines bestimmten Rohstoffes unterscheidet. Auf diese Weise ermöglicht es der datenbasierte Modellierungsansatz, unterschiedliche zukünftige Konstellationen in der chemischen Industrie abzubilden. Während der umfassende Modellierungsansatz in der Lage ist, viele Szenarien für die chemische Industrie zu analysieren, beschränkt sich der Umfang dieser Studie auf die Bewertung von fünf möglichen kostenoptimalen Szenarien für Treibhausgasneutralität.

2.5 Übersicht der Produktionsverfahren und zukünftiger alternativer Technologien

Im Modell dieser Studie wird zwischen konventionellen und alternativen, potenziell emissionsarmen Technologien unterschieden. Während die konventionellen Verfahren den Status quo der chemischen Industrie darstellen, repräsentieren die alternativen Technologien aussichtsreiche Alternativen oder Ergänzungen für eine treibhausgasneutrale Chemieindustrie. Wenn nicht anders beschrieben, basieren die verwendeten Technologien auf den gleichen Quellen wie von Meys et al. beschrieben.¹⁹

Status quo der chemischen Industrie im Rheinland

Die chemische Industrie nutzt fossile Rohstoffe in zweifacher Hinsicht: Sie sind sowohl als Rohstoffe für die Synthese einer Vielzahl von Chemikalien wichtig als auch als Quelle für Prozessenergie für die Durchführung dieser Synthesen. Die Raffination von Rohöl liefert Naphtha, aus dem durch Steamcracking Olefine und Aromate gewonnen werden. Ähnlich liefert die Aufbereitung von Erdgas Ethan und Propan Ausgangsstoffe, die durch Steamcracking in wichtige chemische Bausteine wie Ethylen und Propylen umgewandelt werden.

Ethylen, ein Hauptprodukt des Steamcrackings von Naphtha oder Ethan, ist die Grundlage für Polyethylen – den weltweit am häufigsten verwendeten Kunststoff. Propylen, das häufig zusammen mit Ethylen hergestellt wird, ist entscheidend für die Herstellung von Polypropylen. Der Produktionsweg setzt sich mit dem C4-Strom fort, der zu Butadien für synthetischen Kautschuk führt, während Benzol, Toluol und Xylole, die aus Naphtha gewonnen werden, eine Reihe von Industriechemikalien ermöglicht. Ammoniak und Methanol, die aus Wasserstoff beziehungsweise Synthesegas hergestellt werden, veranschaulichen die Vielseitigkeit der chemischen Industrie und finden Einsatzbereiche von der Landwirtschaft bis zu den Kraftstoffsektoren. Chlor, das durch Elektrolyse produziert wird, ist entscheidend in der Wasseraufbereitung und der Polyvinylchlorid-Produktion. Diese Prozesse bilden zusammen eine komplexe Wertschöpfungskette, die auf fossile Brennstoffe nicht nur als Rohstoff, sondern auch für die benötigte Wärme und Energie zurückgreift, was die bisherige Relevanz fossiler Ressourcen für die Chemieindustrie unterstreicht.

Im Modell dieser Studie, das den Status quo der chemischen Industrie im Rheinland erfasst, werden bestehende Technologien auf Basis fossiler Brennstoffe, die Rohstofflieferkette für die chemische Industrie und die Entsorgung am Lebensende für alle Chemikalien innerhalb des Studienumfangs berücksichtigt. Die Prozesse innerhalb des chemischen Sektors werden detailliert auf Basis von Einzelprozessdaten modelliert. Massen- und Energiebilanzen sowie wirtschaftliche Werte, einschließlich Investitionskosten und fixen Betriebskosten, basieren auf mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen.¹⁹

Die Versorgung der chemischen Industrie mit Rohstoffen und Betriebsmitteln sowie die Bereitstellung fossiler Energie in Form von Dampf, thermischer Energie und Elektrizität werden als aggregierte Prozesse modelliert. Diese breite Perspektive ermöglicht es, die übergreifenden Trends und Auswirkungen zu erfassen. Die mit diesen Versorgungen verbundenen Treibhausgasemissionen werden genau erfasst, mit Daten, die aus dem Ecoinvent 3.8 Cut-Off-Systemmodell extrahiert und angepasst sind.²⁰

¹⁹ Meys et al., Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy; Science, 2021; <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>.
Zibunas et al., Cost-optimal pathways towards net-zero chemicals and plastics based on a circular carbon economy, 2022; <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107798>.

²⁰ Ecoinvent, Ecoinvent Database v. 3.8 - Cut-off (2022), 2022, <https://ecoinvent.org/>.

Zukunft der chemischen Industrie im Rheinland

Die aktuelle Abhängigkeit der chemischen Industrie von fossilen Brennstoffen unterstreicht die dringende Notwendigkeit einer nachhaltigen Veränderung. Diese Veränderung umfasst sowohl die Adoption erneuerbarer und kreislauffähiger Rohstoffe – wie recycelfähige Kunststoffabfälle, Biomasse und die Abscheidung und Nutzung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Utilization, CCU) mit Hilfe von treibhausgasneutralem Wasserstoff – als auch die Integration effizienterer Technologien (z. B. zur Energiebereitstellung) und die Abscheidung und Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) unvermeidbarer Emissionen. Nachhaltige Produktions- und Verfahrensweisen werden immer bedeutender. Daher muss eine Kombination emissionsarmer Produktionswege realisiert werden, damit die Chemieregion Rheinland treibhausgasneutral produzieren kann. Dafür sind verschiedene Prozesse aussichtsreich, wie beispielsweise die Umwandlung von Biomasse in Chemikalien durch Vergasung oder Fermentation, die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse mit grüner Energie und die Wiederverwertung von Kunststoffabfällen oder von Kohlendioxid als Ausgangsstoff für neue Chemikalien und Kunststoffe. Diese Schritte, zusammen mit CC(U)S, das Emissionen einfängt und entweder speichert oder wiederverwendet, repräsentieren einen umfassenden Ansatz zur drastischen Reduzierung der Klimaauswirkungen des Chemiesektors innerhalb der Region Rheinland.

Die wichtigsten Annahmen für die Systemgrenzen des in dieser Studie verwendeten Modells sind nachstehend aufgeführt.

CO₂-Bereitstellung

Das Modell berücksichtigt Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus verschiedenen Quellen. Dazu gehören CO₂-Emissionen, die direkt aus chemischen und Kunststoffproduktionsprozessen wie der Herstellung von Ethylenoxid und der Dampfmethanreformierung eingefangen werden, CO₂, das durch die Verbrennung von Produktionsrückständen und Kunststoffabfällen erzeugt wird, CO₂, das bei der Nutzung biogener Rohstoffe wie zum Beispiel bei der Biogasifizierung entsteht, und CO₂, das direkt aus der Atmosphäre extrahiert wird. Für eine effektive CO₂-Abscheidung werden Technologien eingesetzt, die speziell auf die jeweilige Emissionsquelle abgestimmt sind. So wird beispielsweise das Rectisol-Verfahren für mit Synthesegas verbundene Prozesse verwendet, die an der Wasserstoff- oder Ammoniakproduktion beteiligt sind. Das Monoethanolamin (MEA)-Verfahren wird zur Abscheidung von CO₂ aus Abgasen verwendet, wie sie von Steampcrackern oder Anlagen zur Kunststoffabfallverbrennung emittiert werden. Für die direkte Luftabscheidung (Direct Air Capture, DAC) wird im Rahmen dieser Studie von einer Adsorption an festen Adsorptionsmitteln ausgegangen, die sich durch eine niedrige für die Regeneration benötigte Temperatur auszeichnet.²¹

Biomasseversorgung

Das Modell betont die Nutzung von lignocellulöser Biomasse wie Holzspäne, Rindenmulch, Holzpellets und Miscanthus als nachhaltige Rohstoffquelle. Diese Wahl hat das Ziel die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen zu mildern und das erneuerbare Potential von Biomasse zu nutzen. Die Daten zu Treibhausgasemissionen für Lignocellulose-Biomasse aus der Ecoinvent-Datenbank werden verfeinert, indem die während der Wachstumsphase der Biomasse absorbierte Kohlenstoffmenge gemäß der von Meys et al. vorgeschlagenen Methodik angepasst wird.²² Die limitierte Verfügbarkeit von Biomasse stellt eine Einschränkung in den Szenarien des Modells dar, was die Herausforderung hervorhebt, nachhaltige Biomasse so zu beschaffen, dass sie nicht mit den Anforderungen anderer Sektoren in Konflikt gerät. Weitere Annahmen zur Versorgung mit Biomasse sind in Kapitel 2.6 zu finden.

²¹ Energy Transitions Commission, Carbon Capture, Utilisation and Storage in the Energy Transition, 2022.

²² Meys et al., Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy; Science, 2021; <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>.

Versorgung mit fossilen Brennstoffen

Die Analyse der fossilen Brennstoffversorgungskette des Modells dieser Studie umfasst die Förderung von Rohstoffen wie Erdgas und Rohöl, ihre Verteilung bis hin zu ihrem endgültigen Einsatz als chemische Rohstoffe oder zur Erzeugung von Prozessenergie. Es verwendet die Datensätze des Ecoinvent 3.8 Cut-Off-Systemmodells, um die mit diesen Versorgungsketten verbundenen Treibhausgasemissionen zu quantifizieren und bietet eine robuste Grundlage für die Bewertung von Umweltauswirkungen.²³

Methanemissionen, insbesondere aus chemischen Rohstoffen, die von Erdgas abgeleitet sind, wie Ethan und Erdgas, das als Prozessenergie verwendet wird, sind aufgrund ihres erheblichen Beitrags zum Kohlenstoff-Fußabdruck der chemischen Industrie ein Schwerpunkt. Das Modell verfolgt einen proaktiven Ansatz, indem es Methanemissionsreduktionen integriert, die mit internationalen Verpflichtungen im Rahmen der UN-Klimakonferenz in Dubai 2023 (COP 28) übereinstimmen, ergänzt durch Prognosen und Forschungsergebnisse der Internationalen Energieagentur (IEA).²⁴

Weitere Verfeinerungen der Analyse haben dazu geführt, dass wir diese Methanreduktionswerte aktualisiert haben, um die neuesten Entwicklungen bei den Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Erdgas widerzuspiegeln, wobei Daten aus den Ecoinvent-Versionen 3.9.1 und 3.10 einbezogen wurden. Diese Aktualisierung stellt sicher, dass das Modell weiterhin mit den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und den Umweltstandards übereinstimmt.²⁵

Angesichts der Aktualisierungen in der Ecoinvent-Datenbank, die bereits Verbesserungen bei den Treibhausgas-Emissionsfaktoren berücksichtigen, wendet das Modell keine zusätzlichen Anpassungen für aus Rohöl gewonnene chemische Rohstoffe wie Naphtha an. Diese Entscheidung basiert auf der Prämisse, dass die jüngsten Fortschritte und Verfeinerungen in der Ecoinvent-Datenbank die notwendigen Anpassungen für diese Rohstoffe angemessen erfassen.

Chemikalien- und Kunststoffproduktion

Das Modell soll bewerten, wie die chemische Industrie im Rheinland auf eine treibhausgasneutrale Produktion umgestellt werden kann. Dabei wird besonderer Wert auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen durch etablierte Kreislauf-Kohlenstofftechnologien gelegt, wie chemisches und mechanisches Recycling, die Nutzung von Biomasse sowie die Kohlenstoffabscheidung und -nutzung sowie Speicherung (CC(U)S). Diese Technologien sind in der Studie berücksichtigt und spiegeln eng die in der Studie von Meys et al.²⁶ detailliert beschriebenen Technologien wider. Damit gewährleistet die vorliegende Studie einen umfassenden und konsistenten Ansatz zur Emissionsreduktion.

Kohlenstoffabscheidung und -speicherung

Neben der Verwendung von CO₂ zusammen mit Wasserstoff als chemischer Rohstoff untersucht das Modell dieser Studie auch die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) zur direkten Minderung des Klimawandels durch Speicherung von CO₂ in geologischen Formationen, um dessen Eintritt in die Atmosphäre zu verhindern. In diesem Modell wird CO₂ auf etwa 100 bar komprimiert, um seinen Transport und seine sichere unterirdische Speicherung zu erleichtern. Im Modell sind die geschätzten Kosten für den Transport und die Speicherung

²³ Ecoinvent, Ecoinvent Database v. 3.8 - Cut-off, 2022.

²⁴ International Energy Agency (IEA), What Did COP28 Mean for Methane? – Global Methane Tracker 2024 – Analysis, accessed March 28, 2024, <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024/what-did-cop28-mean-for-methane>.
International Energy Agency (IEA), Curtailing Methane Emissions from Fossil Fuel Operations: Pathways to a 75 % Cut by 2030, OECD, 2021, <https://doi.org/10.1787/1616ff90-en>.

²⁵ Renewable Carbon, Products Made from Crude Oil Have a Significantly Higher CO₂Footprint than Previously Assumed, Renewable Carbon News (blog), 2024, www.renewable-carbon.eu/news/products-made-from-crude-oil-have-a-significantly-higher-co2-footprint-than-previously-assumed/, Stand November 2024.

²⁶ Meys et al., Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy; Science, 2021; <https://doi.org/10.1126/science.abg9853>.

von CO₂ durch CCS auf 28 US-Dollar pro Tonne festgelegt und sollen damit Transport und Speicherung in großem Maßstab und über mittlere Distanzen abdecken, zum Beispiel von Nordrhein-Westfalen bis nach Norwegen.

Konventionelle und alternative Technologien zur Erreichung der Treibhausgasneutralität

Der Übergang zur Klimaneutralität wird von der Chemieregion Rheinland verlangen, nicht nur die etablierten konventionellen Prozesstechnologien zu nutzen, sondern auch auf alternative Technologien zu setzen, die auf die Reduzierung von Emissionen ausgerichtet sind. Obwohl derzeit zahlreiche unterschiedliche Prozesse entwickelt werden, konzentriert sich diese Studie auf alternative Technologien, die durch hohe Technologiereife gekennzeichnet sind und die durch Diskussionen mit Branchenvertretern ausgewählt wurden. Die erneuerbaren und zirkulären Technologien, die in der Studie berücksichtigt werden, sind in Abbildung 3 zusammengefasst.

Abbildung 3

Übersicht über alternative Technologien, die in dieser Studie untersucht werden.

ALTERNATIVE TECHNOLOGIEN: End-of-life-Technologien, CO ₂ - und H ₂ -Technologien und Biomasse-Technologien		
 RECYCLING	 KOHLENSTOFFDIOXID	 BIOMASSENUTZUNG
Stoffliches Recycling <ul style="list-style-type: none"> • Mechanisches Recycling • Chemisches Recycling (Pyrolyse) Energetisches Recycling <ul style="list-style-type: none"> • Verbrennung mit Energie-rückgewinnung 	Kohlenstoffdioxid-Abscheidung und -Nutzung (CCU) <ul style="list-style-type: none"> • CO₂ aus (industriellen) Punktquellen oder der Atmosphäre (DAC) • Wasserstoff via Elektrolyse • CO₂ und Wasserstoff zu Methan oder Methanol • Methanol zu Olefinen oder Aromaten Kohlenstoffdioxid-Abscheidung und -Speicherung (CCS) <ul style="list-style-type: none"> • CCS mit CO₂ aus (industriellen) Punktquellen 	Biomasse-Fermentation <ul style="list-style-type: none"> • Bioethanol via Hydrolyse und Fermentation • Ethylen via Dehydrierung von Ethanol Biomasse-Gasifizierung <ul style="list-style-type: none"> • Synthesegas via Biomasse-Gasifizierung • Methanol zu Olefinen oder Aromaten

2.6 Annahmen zu zukünftigen Entwicklungen von Ressourcen-Verfügbarkeiten

Biomasse

Der Bereich der verfügbaren Biomasse für die Chemieindustrie in Deutschland wird durch einen minimalen und einem maximalen Wert beschrieben. Als Minimum wird die minimale Menge an ungenutzten biogenen Abfällen und Restbiomasse, vor allem Getreidestroh und forstwirtschaftlichen Reststoffen, verwendet (14 Megatonnen pro Jahr). Als Maximum wird die maximale Menge an ungenutzten biogenen Abfällen und Restbiomasse (48 Megatonnen pro Jahr) sowie 50 % der energetisch verwendeten Biomasse eingesetzt (17 Megatonnen pro Jahr).²⁷ Dies entspricht einer Biomassenverfügbarkeit von 14 bis 65 Megatonnen pro Jahr für die Chemieindustrie in Deutschland, die auf die untersuchte Chemieregion im Rheinland (in Annäherung Nordrhein-Westfalen) mit einem Faktor skaliert wird. Der Faktor von 21,4 %, der zur Skalierung auf die Chemieregion Rheinland gewählt wird, entspricht dem Umsatz der Chemieindustrie (inkl. Pharmaindustrie) in NRW im Verhältnis zu dem Umsatz der gesamten Chemieindustrie (inkl. Pharmaindustrie) in Deutschland im Jahr 2022.²⁸ Dieses Verhältnis wird gewählt, um die Kaufkraft für biogene Rohstoffe widerzuspiegeln und gleichzeitig den zum Umsatz verhältnismäßig hohen Kohlenstoffbedarf der Basischemie im Rheinland zu berücksichtigen. Damit ergibt sich eine Biomassen-Verfügbarkeit in den Szenarien mit moderaten Verfügbarkeiten von 3,0 Megatonnen und in den Szenarien mit umfassenden Verfügbarkeiten von 13,9 Megatonnen.

Recycling

Die Produktionsmenge gibt in der Lebenszyklusanalyse vor, welche Abfallmengen entsorgt werden müssen, und damit ist die Produktionsmenge (siehe Abbildung 1) gleich der zu entsorgenden Abfallmenge. Die Abfallmenge wird anschließend unterteilt in (1) Abfall, der aufgrund des hohen Exportes von Kunststoffen in anderen Ländern anfällt und (2) Abfall, der in der Region anfällt. Für (1) wird angenommen, dass der Abfall verbrannt wird, für (2) wird eine weitere Unterteilung in (i) Verpackungsabfall und (ii) sonstige Kunststoffabfälle vorgenommen. (i) Verpackungsanfälle können verbrannt, mechanisch recycelt oder chemisch recycelt werden. (ii) Sonstige Kunststoffabfälle können verbrannt und chemisch recycelt werden. Wenn Kunststoffe recycelt werden, müssen sie zuvor sortiert werden, wobei sich Sortierverluste ergeben. Zudem entstehen bei dem Recyclingprozess in Abhängigkeit von der Kunststoffart Recyclingverluste, die als Recyclingreste bezeichnet werden.

Um Grenzen in zukünftigen Entwicklungen für Recyclingmengen abzuschätzen, werden Szenarien mit moderaten und umfassenden Recyclingmengen untersucht. In beiden Fällen wird ein Ausbau der mechanischen Recyclingquote auf 50 % und der chemischen Recyclingquote auf 36 % angenommen.²⁹ Moderate Recyclingmengen umfassen eine gleichbleibende Verfügbarkeit an Kunststoffabfällen anteilig an der regionalen Kunststoffproduktion. Dementsprechend stehen durch exportierte Produkte und unzureichend gesammelte Kunststoffabfälle bei moderaten Verfügbarkeiten 44 % der Kunststoffabfälle in der Region zur Verfügung, entsprechend dem Verhältnis der verfügbaren Kunststoffe in Deutschland zu der produzierten Menge in Deutschland.³⁰ Da in der Region ungefähr 2,8 Megatonnen Kunststoffe produziert werden (siehe Kapitel 2.1), wird davon ausgegangen, dass in den Szenarien mit moderaten Verfügbarkeiten 1,3 Megatonnen Kunststoffabfälle zur Verfügung stehen.

27 Agora Industrie, Chemie im Wandel. Die drei Grundpfeiler für die Transformation chemischer Wertschöpfungsketten, 2023. DBFZ, Jahresbericht 2019, Leipzig, 2020; ISBN: 978-3-946629-50-4.

28 Verband der Chemischen Industrie e.V., Chemiewirtschaft in Zahlen, 2022. Landesverband Nordrhein-Westfalen im Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI NRW), Umsatz der chemisch-pharmazeutischen Industrie NRW; Stand 31. Oktober 2022: <https://www.vci.de/nrw/branche/statistik/chemische-industrie-nordrhein-westfalen-kompakt.jsp>. Verband der Chemischen Industrie e.V., Chemie-Kennzahlen 2023, Pressemitteilung, 2023.

29 DECHEMA, VCI Fact-Finding Studie, Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt, 2021.

30 Conversio, Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen, 2022.

Szenarien mit umfassenden Recyclingmengen implizieren ebenfalls den Ausbau der Recyclingquoten auf 50 % für mechanisches Recycling und 36 % für chemisches Recycling. Zusätzlich wird hier angenommen, dass zu den bereits in der Region verfügbaren Kunststoffabfällen von 44 % der produzierten Kunststoffe weitere 26 % in die Chemieregion Rheinland importiert werden können. Dies entspricht dem Ausbau der Kreislaufwirtschaft, da sowohl die Produktion als auch das Recycling und die Rückführung in den Kreislauf nach der Nutzung in der Region geschieht. Zusammengefasst stehen so potenziell 70 % der produzierten Kunststoffmengen zur Verfügung, was 2,0 Megatonnen Kunststoff entspricht.

Carbon Capture and Storage (CCS)

Durch eine Abschätzung angekündigter Entwicklungen und den Dialog mit Industriepartnern wurde die Verfügbarkeit von CCS für die Chemieregion auf 4 Megatonnen CO₂ pro Jahr bei moderater Verfügbarkeit und 12 Megatonnen CO₂ pro Jahr bei umfassender Verfügbarkeit für das Jahr 2045 abgeschätzt. Die Abschätzung für die Verfügbarkeit von CCS kann mit weiteren Referenzwerten von angekündigten CC(U)S-Projekten, -Zielen, und -Abschätzungen verschiedener Regionen verglichen werden. Bei der Betrachtung der CCS-Verfügbarkeit sollten die in der gesamten Europäischen Union verfügbaren Speicherkapazitäten berücksichtigt werden. Als Referenzwerte für die CCS-Verfügbarkeit in der EU können die Schätzungen des europaweiten CCS-Bedarfs durch die EU (400 Mt CO₂ pro Jahr in 2045),³¹ der IEA (350 Mt CO₂ pro Jahr in 2050)³² oder die von den Mitgliedern der Europäischen Kommission als benötigt erklärten Mengen (550 Mt CO₂ pro Jahr in 2050)³³ herangezogen werden.

Dabei sollte beachtet werden, dass ein großer Teil der CCS-Anwendungen für die Chemieindustrie in dieser Studie in Einklang mit dem Entwurf zur CCS-Strategie in Deutschland und den Anwendungsgebieten von CCS stehen.³⁴ So ist in diesem Strategieentwurf CCS vor allem bei unvermeidbaren Treibhausgasemissionen vorgesehen. Dazu zählen zum Beispiel Emissionen, die bei der Nutzung alternativer Ressourcen wie biogenen Rohstoffen oder Kunststoffwertstoffen entstehen oder Treibhausgasemissionen, die am Lebensende von Produkten entstehen, wie zum Beispiel bei der Energierückgewinnung von nicht recycelten Abfallresten. Zudem wird durch das Lebensende von Ammoniak ein weiterer wesentlicher Teil der als unvermeidbar angesehenen Treibhausgasemissionen berücksichtigt.

Strompreis

Der Preis für klimaneutralen Strom wird als Indikator für die zukünftige Verfügbarkeit von klimaneutralem Strom verwendet. Auf Grundlage des Dialogs mit den Industriepartnern werden die zukünftigen Preise für klimaneutralen Strom für 2045 bei moderaten Stromverfügbarkeiten auf 60 Euro pro Megawattstunde und bei umfassenden Verfügbarkeiten auf 100 Euro pro Megawattstunde geschätzt. Damit liegen sie einmal über der Prognose der IEA für den globalen Durchschnitt, die bei 85,5 US-Dollar pro Megawattstunde für 2040 und 80,3 US-Dollar pro Megawattstunde für 2050 liegt.³⁵

31 ACCUS Vision WG, A Vision for Carbon Capture, Utilisation and Storage in the EU, Communication and Information Resource Centre for Administrations, Businesses and Citizens, 2022; Stand August 2024.

32 International Energy Agency (IEA), Technology 2020 Perspectives Energy: Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage, Sustainable Scenario, 2020.

33 Thierry Breton und Frans Timmermans, Pressekonferenz 16.03.2023, Brüssel.

34 Bundesregierung, Gesetzesentwurf, Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes, Pressemitteilung am 29.05.2024.

35 International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2023, 2023.

03

Vorstellung
der analysierten
Szenarien

Vorstellung der analysierten Szenarien

3.1 Ziel und Relevanz der Szenarien

In dieser Studie werden Wege zur Treibhausgasneutralität der Chemieregion Rheinland untersucht und geeignete Schlüsselkomponenten identifiziert. Schlüsselkomponenten können sowohl etablierte, gut verfügbare Ressourcen und Technologien sein als auch alternative Ressourcen, deren zukünftige Verfügbarkeiten und Einsatzbarkeiten nur schwer vorher-sagbar sind. In Kapitel 2.6 wurden die Annahmen zur zukünftigen Verfügbarkeit wichtiger Ressourcen und der betrachtete Rahmen möglicher Entwicklungen im Hinblick auf Recyclingmengen, biogene Rohstoffe, klimaneutralen Strom (erneuerbare Energien) und CCS-Speicherkapazitäten beschrieben. Im Folgenden werden verschiedene Konstellationen von Ressourcenverfügbarkeiten anhand von fünf verschiedenen Szenarien untersucht. Dabei werden ein Referenzszenario mit nur moderaten Verfügbarkeiten, drei Szenarien mit teilweise erhöhten Verfügbarkeiten (Szenario 1-3) und ein Szenario mit nur umfassenden Ressourcenverfügbarkeiten untersucht. Der Vergleich der Szenarien gibt Aufschluss über mögliche Entwicklungen sowie die Bedeutung einzelner Technologien und Ressourcen für die Transformation der Chemieregion Rheinland zur Treibhausgasneutralität.

3.2 Aufbau der Szenarien

In allen Szenarien sind alle Technologien grundsätzlich bis 2045 verfügbar und die Zusammensetzung wird mit dem Ziel einer Minimierung der Kosten ausgewählt (vergleiche Kapitel 2.4). Für fossile Ressourcen und CO₂ aus der Atmosphäre wird davon ausgegangen, dass sie 2045 unbegrenzt verfügbar sind. Bei der Nutzung von Recyclingmengen, biogenen Rohstoffen, Strom und der Nutzung von CCS, wird angenommen, dass die Nutzung durch die regionale Verfügbarkeiten limitiert sind, deren zukünftige Entwicklung nicht eindeutig ist. Unterschiedliche Entwicklungen anhand von moderaten und umfassenden Verfügbarkeiten sind in Kapitel 2.6 erläutert. Die Szenarien erfassen unterschiedliche Kombinationen an Entwicklungen, so dass durch die Mischung der Szenarien der Raum der wahrscheinlichen Entwicklungen erfasst wird. Im Folgenden entsprechen alle Beschreibungen von moderaten und umfassenden Verfügbarkeiten den Werten, die in Kapitel 2.6 vorgestellt wurden und in Tabelle 2 zusammengefasst sind.

Tabelle 2

Übersicht über die moderate und umfassende Verfügbarkeiten von Ressourcen. Die Szenarien unterscheiden sich in der Kombination dieser Begrenzungen.

	Moderate Verfügbarkeit	Umfassende Verfügbarkeit
Biomasse	3,0 Megatonnen/Jahr	13,9 Megatonnen/Jahr
Recyclingmengen	1,3 Megatonnen/Jahr	2,0 Megatonnen/Jahr
CCS-Kapazität	4 Megatonnen Kohlenstoffdioxid/Jahr	12 Megatonnen Kohlenstoffdioxid/Jahr
Treibhausgas-neutraler Strom	100 Euro/Megawattstunde	60 Euro/Megawattstunde

Im Referenzszenario werden lediglich moderate Verfügbarkeiten für alle Ressourcen angenommen (siehe Abbildung 4). Das erste Szenario mit erhöhten Verfügbarkeiten untersucht die Erhöhung der Recyclingmengen auf umfassende Verfügbarkeiten. Ein deutlicher Ausbau der Recyclingmengen erscheint möglich, da Deutschland eines der leistungsfähigsten Mitgliedsstaaten der OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) in Bezug auf eine umweltgerechte Abfallbewirtschaftung ist und dementsprechend eine hohe Akzeptanz für Recyclingtechnologien hat.³⁶ Das Land hat eine der höchsten Verwertungsquoten und die zweithöchste Recyclingquote im OECD-Raum. Etwa zwei Drittel der Siedlungsabfälle werden recycelt oder kompostiert.

Im zweiten Szenario stehen zusätzlich zu den umfassenden Recyclingmengen auch umfassende biogene Rohstoffe zur Verfügung. Dies entspricht dem Kreislaufgedanken durch die Schließung des Kohlenstoffkreislaufs, indem Kohlenstoff am Lebensende von Produkten als Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre emittiert wird und durch biogene Rohstoffe wieder in die Produkte eingebracht wird. Im dritten Szenario wird untersucht, wie Treibhausgasneutralität erreicht werden kann, wenn keine umfassenden Recyclingmengen und biogenen Rohstoffe zur Verfügung stehen, sondern günstige erneuerbare Energien und umfassende CCS-Speicherkapazitäten. Die Kombination aus günstiger, erneuerbarer Energie und umfassenden CCS-Speicherkapazitäten stellt ein hohes Potential dar, da die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid energieintensiv ist. Im letzten Szenario wird untersucht, wie Treibhausgasneutralität in einem offenen Szenario erreicht werden kann, wenn Ressourcen und Technologien (siehe Kapitel 2.6) umfassend zur Verfügung stehen. Der Vergleich der Szenarien ermöglicht es, Optimierungspotentiale zu erkennen und Handlungsoptionen aufzuzeigen.

Abbildung 4

Übersicht über die analysierten Szenarien. In jedem Szenario sind alle betrachteten Technologien grundsätzlich verfügbar. Unsicherheiten über zukünftige Verfügbarkeiten werden durch den Ergebnisraum der verschiedenen Szenarien abgebildet und betreffen die Verfügbarkeit von Recyclingmengen, biogenen Rohstoffen, klimaneutralem Strom (Energie) und Carbon Capture and Storage (CCS).

	Referenzszenario	1. Szenario	2. Szenario	3. Szenario	4. Szenario
Verfügbare Recyclingmengen					
Verfügbare Biomasse					
Verfügbarer treibhausgasneutraler Strom (Energie)					
Verfügbare CCS-Kapazitäten					

■ umfassende Verfügbarkeit / günstig
■ moderate Verfügbarkeit / teuer

³⁶ OECD Environmental Performance Reviews: Germany 2023, OECD, 2023; <https://doi.org/10.1787/f26da7da-en>.

04

Ergebnisse
der Szenarien
und zentrale
Schlussfolgerungen

Ergebnisse der Szenarien und zentrale Schlussfolgerungen

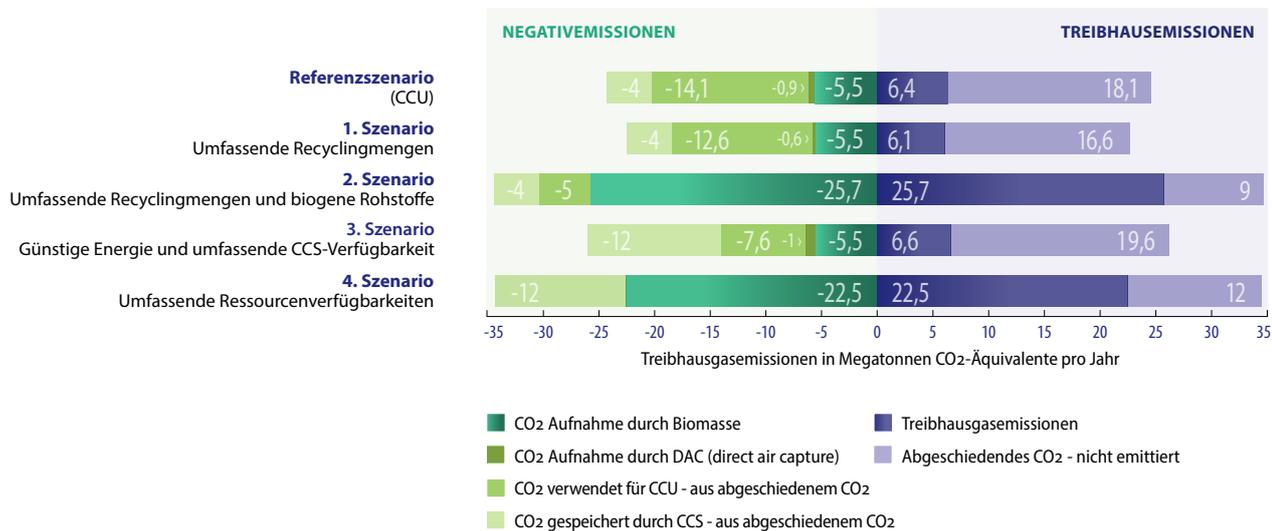
4.1 Treibhausgasneutralität und die dabei anfallenden Kosten

In dieser Studie wird untersucht, wie eine treibhausgasneutrale Chemieregion Rheinland im Jahr 2045 unter Berücksichtigung aller Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus von Chemikalien und Kunststoffen sowie der Rahmenbedingungen für die Region erreicht werden kann. Damit die Unternehmen der chemischen Industrie im Rheinland treibhausgasneutral produzieren können, müssen emissionsarme Technologien und Produktionsprozesse, alternative Ressourcen und die notwendige Infrastruktur zur Verfügung stehen. Entscheidende regionale Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel zukünftige regionale Ressourcenverfügbarkeiten, werden durch einen Korridor aus verschiedenen Szenarien untersucht.

In allen Szenarien wird Treibhausgasneutralität erreicht, indem über den gesamten Lebenszyklus gesehen genauso viele Treibhausgase aus der Atmosphäre aufgenommen werden (Negativemissionen), wie Treibhausgasemissionen entstehen (siehe Abbildung 5). Treibhausgasemissionen können generell durch Recycling oder effizienzsteigernde Technologien vermieden werden. Verbleibende Treibhausgasemissionen werden entweder durch die Aufnahme von atmosphärischem CO₂ (durch Biomasse oder DAC) aufgewogen, dauerhaft durch CCS gespeichert, oder mit Hilfe von CCU im Kohlenstoffkreislauf gehalten.

Abbildung 5

In allen Szenarien wird Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 erreicht. Die Restemissionen aus den Lebenszyklusstadien werden durch die CO₂-Aufnahme aus dem Wachstum der Biomasse oder aus der Luft durch direkte Luftabscheidung ausgeglichen.



Die Auswahl der verschiedenen Technologien zum Erreichen von Treibhausgasneutralität erlaubt die Optimierung der (I) Betriebskosten für die Produktion und (II) der Investitionskosten für die Anlagen (vgl. Kapitel 2.4.).

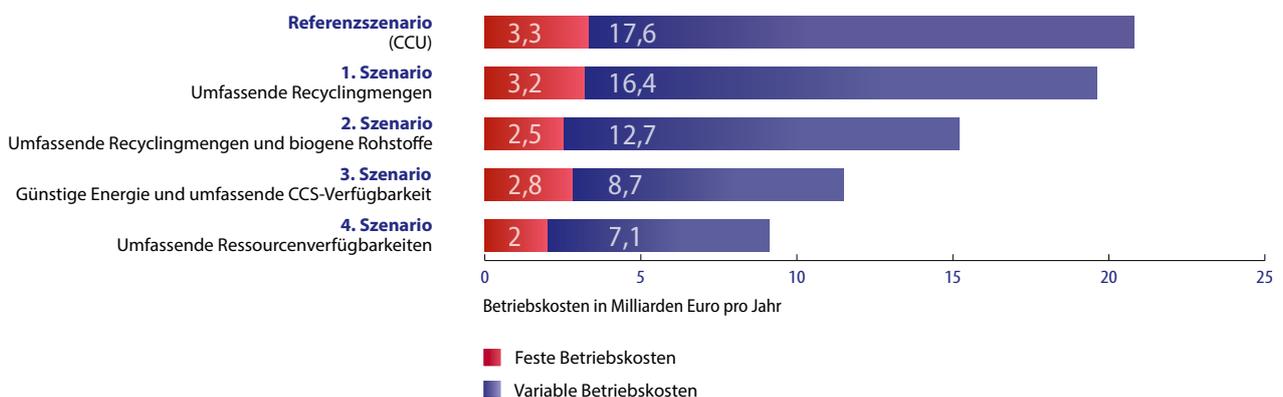
(I) Die Betriebskosten umfassen alle wesentlichen Kosten, die für den Betrieb von Anlagen anfallen, inklusive fester Betriebskosten wie Lohnkosten (vgl. Kapitel 2.3) und variabler Betriebskosten wie den Einkauf von Biomasse, Strom oder CCS Transport- und Speicherkapazitäten sowie die Entsorgung von Abfällen. Für die Chemieregion Rheinland ergibt die Optimierung feste Betriebskosten für den Anlagenbetrieb von 2,1 bis 3,3 Milliarden Euro pro Jahr und variable

Betriebskosten von 7,1 bis 17,6 Milliarden Euro pro Jahr. Der Unterschied über die verschiedenen Szenarien beträgt bei den festen Betriebskosten 1,2 Milliarden Euro pro Jahr und ist im Vergleich zu dem Unterschied in den variablen Betriebskosten von 10,5 Milliarden Euro pro Jahr geringer. Die festen Betriebskosten sind ähnlich in den verschiedenen Szenarien, da sie im Wesentlichen von dem Anlagenumfang und somit dem Produktionsumfang abhängen. Das Referenzszenario und das Szenario 2 weisen gegenüber den anderen Szenarien leicht erhöhte feste Betriebskosten auf (vergleiche Abbildung 6), da hier mehr beziehungsweise größere Anlagen für die Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyse sowie von Methanol aus Kohlenstoffdioxid durch CCU benötigt werden. Die variablen Betriebskosten hängen hingegen stark von den verfügbaren Ressourcen und Technologien ab. Die starke Varianz der variablen Betriebskosten verdeutlicht ihre Relevanz für die Wettbewerbsfähigkeit der Chemieindustrie.

Der größte Kostenfaktor für die variablen Betriebskosten in die verschiedenen Szenarien ist die Produktion von Wasserstoff und der dafür benötigte Strom. Dieser Strom ist ausschlaggebend für die hohen Kosten im Referenzszenario, Szenario 1 und Szenario 3. Im Referenzszenario (moderate Verfügbarkeiten) und im 1. Szenario (umfassende Recyclingmengen) entfallen über 60 % der anfallenden variablen Betriebskosten auf die Produktion von Wasserstoff, der vor allem für die Nutzung von Kohlenstoffdioxid mit Hilfe von CCU verwendet wird. Im 2. Szenario (umfassende Recyclingmengen und biogene Rohstoffe) entfallen noch über 40 % der variablen Betriebskosten auf die Produktion von Wasserstoff, der größtenteils für CCU, doch auch für eine effizientere Nutzung der Biomasse für die Synthesegasherstellung verwendet wird. Im 3. Szenario (günstige Energie und umfassende CCS-Verfügbarkeit) macht Wasserstoff für CCU immer noch einen deutlichen Anteil mit 40 % der variablen Kosten aus, doch die absolute Menge an benötigtem Wasserstoff ist deutlich reduziert. Generell sind die variablen Kosten in den Szenarien mit viel CCS (drittes und viertes Szenario) deutlich reduziert, da CCS im Vergleich zu CCU eine vergleichsweise kostengünstige Variante ist, um Treibhausgasemissionen zu verhindern. Bei umfassenden Ressourcenverfügbarkeiten (4. Szenario) wird eine Kombination aus Recycling, CCS und Biomassenutzung verwendet, um kostengünstig Treibhausgasneutralität zu erreichen. Der Einkauf von Biomasse ist hier der größte Kostenfaktor der variablen Kosten. Recycling ist einer der effizientesten Möglichkeiten Emissionen kostengünstig zu vermeiden und wird in allen Szenarien maximal ausgenutzt (siehe Kapitel 4.4). Dennoch ist die Menge an verfügbaren Kunststoffabfällen für Recycling von bis zu 2,0 Millionen Tonnen (siehe Kapitel 2.6) gering im Vergleich zur CCS- oder Biomasseverfügbarkeit und die Skalierbarkeit deshalb begrenzt. Hier gilt es vorhandene Potentiale auszunutzen, Recyclingmöglichkeiten auszuweiten und die Zugänglichkeit zu Kunststoffabfällen für stoffliches Recycling zu verbessern.

Abbildung 6

Betriebskosten in den verschiedenen Szenarien, aufgeteilt in feste und variable Betriebskosten (wie in Kapitel 2.3 beschrieben).



(II) Die gesamten Investitionskosten für die Unternehmen der Chemieregion Rheinland bis 2045 liegen zwischen 21,9 Milliarden Euro in dem Szenario mit umfassenden Ressourcenverfügbarkeiten und 38,6 Milliarden Euro in dem Szenario mit moderaten Ressourcenverfügbarkeiten. Wenn die Investitionen bis 2045 abbezahlt sein sollen, d.h. eine Abschreibung der Kosten ab 2025 über 20 Jahre, ergeben sich durchschnittliche jährliche Investitionskosten von 1,1 bis 1,9 Milliarden Euro. Dies umfasst alle Investitionen über den gesamten Lebenszyklus, um die benötigten Kapazitäten zu ermöglichen, außer Investitionskosten, die sektorübergreifend relevant sind und nicht eindeutig zuzuordnen sind. Nicht enthaltene Investitionskosten sind beispielsweise der Ausbau der erneuerbaren Energien und des Stromnetzes oder der Bau von CCS-Pipelines und CCS-Speicherkapazitäten, die den genutzten Kapazitäten entsprechend in den Marktkosten in den Betriebskosten enthalten sind. Die anfallenden Investitionskosten sind allerdings in die variablen Betriebskosten umgerechnet. Zum Vergleich können die geplanten Sachinvestitionen des Landes NRW für das Jahr 2025 mit 1,4 Milliarden Euro oder die geplante Investitionsförderung mit 10,3 Milliarden Euro betrachtet werden.³⁷

Abbildung 7
Kumulierte Investitionskosten in den verschiedenen Szenarien.



Für den Chemiestandort Rheinland ist es essenziell, dass entsprechende Investitionen in die Region und in die verbundene Infrastruktur getätigt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu stärken. Die Chemieindustrie im Rheinland ist ein Antriebsmotor für Innovationen und Wertschöpfung mit langjähriger Erfahrung, besonders effiziente Technologien und Maßnahmen voranzutreiben und eine Vorreiterrolle einzunehmen. Effiziente Technologien, die die Kosten senken, werden durch die Unternehmen gezielt gefördert und in der Produktion implementiert, da sie die Wettbewerbsfähigkeit im globalen Umfeld steigern. Damit die Kosten für die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Chemieindustrie im globalen Umfeld wettbewerbsfähig sind, müssen die politischen Rahmenbedingungen faire Wettbewerbsbedingungen ermöglichen. In dem globalen Wettbewerbsumfeld muss auch der Wert einer treibhausgasneutralen Produktion von den globalen Verbrauchern anerkannt werden.

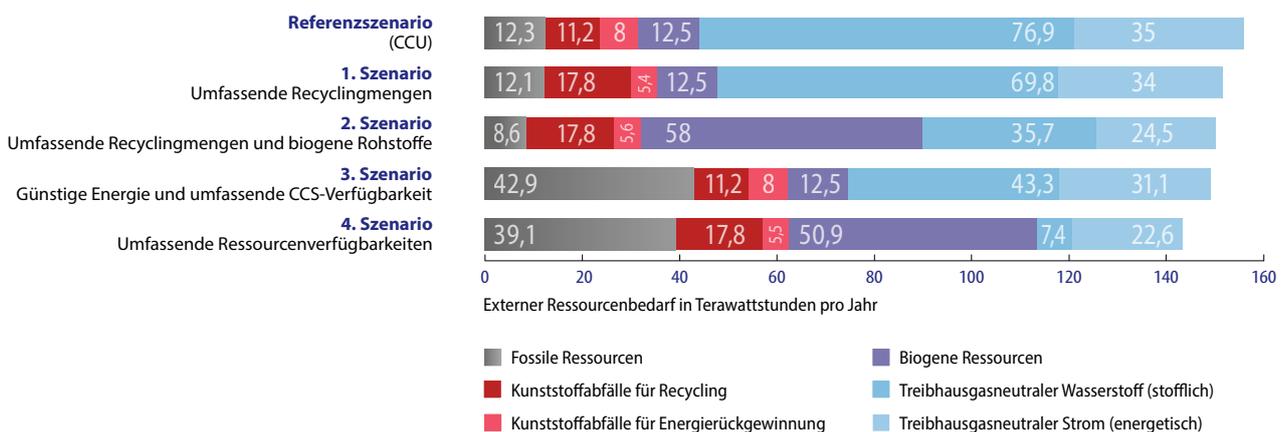
4.2 Bedarfe an Energie, alternativen Ressourcen und Infrastruktur

Für die treibhausgasneutrale Chemieindustrie ist besonders ein optimaler Dreiklang aus erneuerbaren Energien, alternativen Ressourcen und notwendiger Infrastruktur wichtig, um eine stabile Versorgung der Chemieregion zu ermöglichen.

Eine klimaneutrale Chemieindustrie im Rheinland erfordert eine stabile Versorgung mit Ressourcen (siehe Abbildung 8). Dazu zählen insbesondere (1) erneuerbare Energien mit 22,6 bis 35,0 Terawattstunden klimaneutralem Strom und 7,4 bis 76,9 Terawattstunden treibhausgasneutraler Wasserstoff, (2) alternative Ressourcen, wie 1,3 bis 2,0 Millionen Tonnen recycelte Kunststoffabfällen und 3,0 bis 13,9 Millionen Tonnen biogene Rohstoffe (Trockenmasse), wie Rest- und Abfallstoffe oder bisher energetisch genutzte Stoffe, und (3) die notwendige Infrastruktur.

Abbildung 8

Externer Ressourcenbedarf zur Deckung des energetischen und stofflichen Bedarfs für die Produktion und Entsorgung der Chemikalien und Kunststoffe im Studienumfang bei optimierter Stoff- und Energienutzung.



Bei den (1) erneuerbaren Energien in Abbildung 8 wird der klimaneutrale Strom im Wesentlichen für die Bereitstellung von Prozessenergie verwendet, darunter

- der Betrieb von Prozessanlagen (z. B. Strom für Elektrolyseure in der Chlorherstellung, Widerstandsheizungen in elektrifizierten Steamcrackern oder Recyclinganlagen),
- die großtechnische Wärmebereitstellung (z. B. Wärmepumpen und elektrische Heizkessel) und
- der Betrieb alternativer Technologien (z. B. Energie für Heiz- und Kühlleistungen bei der Abscheidung von CO₂, Carbon Capture and Storage und Carbon Capture and Utilization).

Wasserstoff dagegen wird hauptsächlich für die Reduktion mit Kohlenstoffdioxid (CCU) oder zur Effizienzsteigerung bei der stofflichen Nutzung von Biomasse verwendet. Der in Abbildung 8 angegebene Wasserstoff wurde in der Modellierung aus ca. 10 bis 105 Terawattstunden klimaneutralem Strom pro Jahr hergestellt. Zu Darstellungszwecken wurde hier der Heizwert des Wasserstoffs gezeigt und nicht der dafür notwendige Strombedarf.

Erneuerbare Energien, wie Solar- und Windenergie, bieten eine kostengünstige Basis, um eine klimaneutrale Energieversorgung zu ermöglichen. Zusätzlich können Energieimporte, z. B. Strom-, Wasserstoff- oder Ammoniakimporte zur Deckung des Primärenergiebedarfs genutzt werden. Sofern möglich, sollte die direkte Nutzung von klimaneutralem Strom der Nutzung von alternativen Energieträgern, wie z. B. Wasserstoff, vorgezogen werden, da sich sonst der ausgewiesene und primäre Prozessenergiebedarf durch Prozessverluste erhöht. Weitere Erklärungen zu der Optimierung des primären Prozessenergiebedarfs sind in Kapitel 4.3 aufgeführt.

Die in (2) benötigten Ressourcenbedarfe hängen von dem Produktionsumfang (siehe Kapitel 2) und den Rahmenparametern, wie zum Beispiel Ressourcenverfügbarkeiten, ab. Durch die Technologieauswahl ergeben sich zum Erreichen der Treibhausgasneutralität ein Bedarf von 1,3 bis 2,0 Millionen Tonnen rezyklierende Kunststoffwertstoffe und 3,0 bis 13,9 Millionen Tonnen biogene Rohstoffe. Recyclingmengen werden vorzugsweise für stoffliche Recyclingprozesse wie mechanisches und chemisches Recycling verwendet und biogene Rohstoffe für die Herstellung von Basischemikalien durch Gasifizierung oder Hydrolyse und Fermentation. Weitere Erklärungen zur Nutzung von Kunststoffwertstoffen und der Nutzung von Biomasse sind in den Annahmen in Kapitel 2.6 und den Ergebniskapiteln 4.4 und 4.6 zu finden.

Für die Bereitstellung der benötigten alternativen Ressourcen ist (3) eine entsprechende Infrastruktur notwendig. Dazu gehören der Ausbau und Investitionen in folgenden Bereichen:

- erneuerbare Energien inklusive Netzausbau und Stromspeicher für eine stabile Energieversorgung mit jährlich 22,6 bis 35,0 Terawattstunden klimaneutralem Strom und 7,4 bis 76,9 Terawattstunden treibhausgasneutralem Wasserstoff,
- funktionsfähige Straßen-, Schienen- und Wasserwege für den Transport von Rohstoffen, insbesondere von Kunststoffabfällen und biogenen Rohstoffen (zusammen 4 bis 16 Megatonnen pro Jahr) sowie von wichtigen Zwischenprodukten wie Methanol und
- Pipelines für den Transport von Kohlenstoffdioxid (6,3 bis 17,4 Megatonnen CO₂, weitere Details in Kapitel 4.6) und treibhausgasneutralem Wasserstoff (12,3 bis 76,7 Terawattstunden).

Wenn Investitionen in notwendige Infrastruktur die Wettbewerbsfähigkeit der Chemieindustrie verbessern, wird die Transformation der Chemieindustrie stark beschleunigt.

4.3 Beitrag einer effizienten Energienutzung

Dieses Kapitel geht darauf ein, wofür primäre Prozessenergie in der Chemieregion Rheinland im Jahr 2045 benötigt wird. Zudem wird gezeigt, welche Bedeutung eine effiziente Energienutzung hat und welche Rolle dabei der Erhalt von Verbundstandorten und Investitionen in neue Technologien dabei für den primären Prozessenergiebedarf spielen.

Der gesamte Bedarf an primärer Prozessenergie für die treibhausgasneutrale Chemieproduktion im Jahr 2045 beträgt bei einer effizienten Energienutzung 33 bis 140 Terawattstunden pro Jahr, je nach Szenario. Davon entfallen 10 bis 105 Terawattstunden Strom pro Jahr auf die Herstellung von Wasserstoff (siehe Kapitel 4.2). Somit verbleiben 23 bis 35 Terawattstunden pro Jahr für den restlichen primären Prozessenergiebedarf. Dieser restliche Prozessenergiebedarf resultiert aus der Optimierung der Kosten und wird deshalb im Folgenden optimierter primärer Prozessenergiebedarf genannt.

Der optimierte primäre Prozessenergiebedarf wird für die Bereitstellung von unterschiedlichen Energieformen benötigt. In einer vereinfachten Darstellung kann der Energiebedarf unterteilt werden in direkt genutzten Strom, beispielsweise Strom für Motoren oder die Chloralkali-Elektrolyse und in Prozesswärme, die für viele Produktionsprozesse benötigt wird. Wärme bis 500 °C kann beispielsweise durch Dampfkessel, Heizkessel, Wärmepumpen (Wärme bis 200 °C wurde für Wärmepumpen in dieser Studie berücksichtigt) oder Energierückgewinnung von Kunststoffabfällen bereitgestellt werden. Wärme über 500 °C, die zum Beispiel bei Steamcrackern benötigt wird, kann bereitgestellt werden durch die energetische Nutzung von Nebenprodukten, Kesseln mit direkter Feuerung oder elektrische Widerstandsheizungen.

Der optimierte primäre Prozessenergiebedarf an direkt genutzten Strom inklusive des Bedarfes an Strom für Wärmepumpen liegt bei 10 bis 11 Terawattstunden pro Jahr. Der optimierte primäre Prozessenergiebedarf an Prozesswärme unter 500 °C liegt bei 11 bis 24 Terawattstunden pro Jahr, der für Prozesswärme über 500 °C bei 0 bis 1,9 Terawattstunden pro Jahr. Hier wird darauf hingewiesen, dass ohne die Nutzung der Energierückgewinnung von Nebenprodukten oder Abwärme von Prozessen deutlich höhere Wärmebedarfe entstehen würden. Wenn beispielsweise Nebenprodukte aus Steamcrackern nicht mehr energetisch genutzt werden würden, würde der primäre Prozessenergiebedarf für Wärme über 500 °C auf 3 bis 10 Terawattstunden pro Jahr ansteigen.

In den verschiedenen Szenarien ergeben sich Unterschiede im optimierten primären Prozessenergiebedarf. Diese resultieren aus den optimierten Technologiezusammensetzungen sowie die unterschiedliche Menge an Energie, die bereits in anderen Ressourcen wie Biomasse oder Kunststoffabfälle (vergleiche Abbildung 8) enthalten sind und in die Produkte gelangt.

Die Spannen ergeben sich durch die Abhängigkeit des Energiebedarfes von der Technologiezusammensetzung in den unterschiedlichen Szenarien. Bei Szenarien, die vermehrt die stoffliche Nutzung von CO₂ (Carbon Capture and Utilization, CCU) für die Herstellung von Methanol einsetzen und zum Teil auch CO₂ aus der Luft abscheiden (Direct Air Capture, DAC), wie im Referenzszenario, werden für diese Technologien größere Mengen an Wärme bis 500 °C benötigt. Bei Technologiezusammensetzungen, in denen vermehrt Steamcracker verwendet werden, entsteht ein erhöhter Bedarf an Wärme über 500 °C. Durch die unterschiedliche Verfügbarkeit von Ressourcen in den Szenarien ergeben sich auch unterschiedliche Mengen an Energie, die bereits in Ressourcen wie Biomasse oder Kunststoffabfälle (vergleiche Abbildung 8) enthalten sind und dadurch in die Produkte gelangen. Wenn viel Biomasse verwendet wird, entsteht als Nebenprodukt viel Wärme, die zuvor chemisch in der Biomasse gespeichert war. Diese Wärme muss bei angepasster Wärmeintegration nicht mehr durch zusätzlichen Bezug von Primärenergie bereitgestellt werden, was den optimierten primären Prozessenergiebedarf reduziert.

Nachdem der optimierte primäre Prozessenergiebedarf vorgestellt wurde, soll im Folgenden eine Abschätzung ermöglicht werden, welchen Beitrag eine effiziente Energienutzung durch (I) Energieintegration und (II) neue effiziente Technologien liefert, um den Prozessenergiebedarf zu senken. Zu diesem Zweck wird im Folgenden der primäre Prozessenergiebedarf zunächst ohne Energieintegration durch die Nutzung von Abwärme oder Energierückgewinnung vorgestellt, wodurch sich eine Erhöhung des Prozessenergiebedarfes ohne diese Maßnahmen ergibt. Zusätzlich wird eine Variante berechnet, in der keine neuen effiziente Elektrifizierungstechnologien und Wärmepumpen zur Bereitstellung von Wärme verwendet werden, sondern die Wärme aus Erdgas in Kombination mit CCS oder Wasserstoff aus der Elektrolyse bereitgestellt wird.

(I) Energieintegration in der chemischen Produktion entsteht vor allem durch die Nutzung von Prozessabwärme und der Energierückgewinnung aus Nebenprodukten oder Abfällen. Ohne diese Energieintegration würde der primäre Prozessenergiebedarf von 23 bis 35 Terawattstunden pro Jahr auf 36 bis 41 Terawattstunden pro Jahr ansteigen (siehe Tabelle 3), was einem Anstieg von bis zu 66% entspricht (siehe Abbildung 9). Vor allem in den Szenarien wo viel Abwärme oder energetisch nutzbare Nebenprodukte entstehen, zum Beispiel bei einer ausgeprägten Nutzung von Biomasse im 2. Szenario und 4. Szenario, ist die Energieintegration essenziell. Aus dem Austausch mit den regionalen Unternehmen geht hervor, dass ein Großteil der Einsparungspotentiale für Prozessenergie durch Energieintegration bereits sektorübergreifend ausgenutzt wird, beispielsweise durch die Produktion in Verbundstandorten. Um diese Einsparung und den damit verbundenen Wettbewerbsvorteil zu erhalten, ist es essenziell effiziente Maßnahmen zur Wärmeintegration weiterhin zu fördern, Verbundstandorte zu erhalten und neue Anlagen sektorübergreifend im Verbund zu denken.

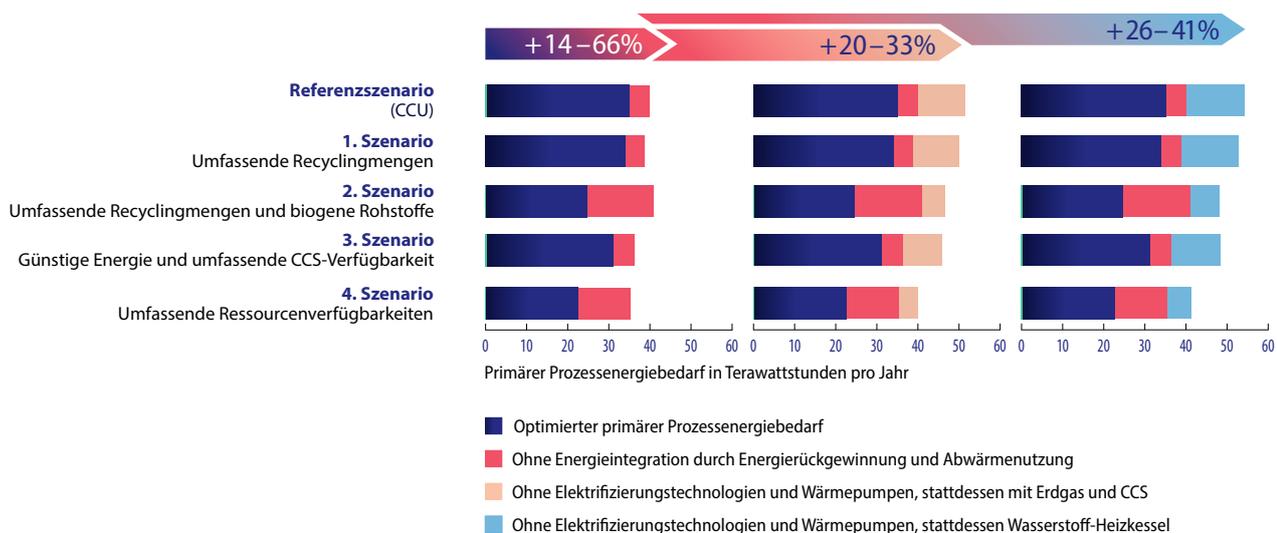
Tabelle 3

Primärer Prozessenergiebedarf bei einer effizienten Energiebereitstellung und ohne Teilaspekte einer effizienten Energiebereitstellung.

	Referenzszenario	1. Szenario	2. Szenario	3. Szenario	4. Szenario
Optimierter primärer Prozessenergiebedarf, in TWh pro Jahr	35,0	34,0	24,6	31,1	22,6
Primärer Prozessenergiebedarf ohne Energieintegration (Energierückgewinnung aus Abfällen und Abwärmenutzung), in TWh pro Jahr	40,0 (+14%)	38,8 (+66%)	40,9 (+66%)	36,3 (+16%)	35,4 (+56%)
Primärer Prozessenergiebedarf ohne Energieintegration, ohne Elektrifizierungstechnologien und ohne Wärmepumpen, stattdessen basierend auf Erdgas mit CCS zur Wärmebereitstellung, in TWh pro Jahr	51,5 (+47%)	49,9 (+47%)	46,5 (+89%)	45,9 (+47%)	39,9 (+76%)
Primärer Prozessenergiebedarf ohne Energieintegration, ohne Elektrifizierungstechnologien und ohne Wärmepumpen, stattdessen basierend auf Wasserstoff-Heizkessel zur Wärmebereitstellung, in TWh pro Jahr	54,2 (+55%)	52,5 (+55%)	48,0 (+95%)	48,2 (+54%)	41,1 (+82%)

Abbildung 9

Optimierter primärer Prozessenergiebedarf und Beiträge einer effizienten Energienutzung durch (I) Wärmeintegration und (II) effiziente Elektrifizierungstechnologien und Wärmepumpen.



(II) Energie wird aktuell vor allem durch die energetische Nutzung von fossilen Ressourcen bereitgestellt. Durch die Nutzung von bisher nicht etablierten effizienten Technologien, wie zum Beispiel Elektrifizierungstechnologien und industriellen Wärmepumpen, kann der primäre Prozessenergiebedarf reduziert werden. Um das Potential einer effizienten Energienutzung durch die direkte Nutzung von Strom und Wärmepumpen zu verdeutlichen, wird im Folgenden eine Abschätzung einer vergleichbaren Wärmebereitstellung einmal durch eine erdgasgestützte Wärmebereitstellung und einmal eine wasserstoffgestützte Wärmebereit-

stellung als Referenz verwendet. Für die erdgasgestützte Wärmebereitstellung wird zusätzlich CCS mit betrachtet, um zusätzliche Treibhausgasemissionen so gering wie möglich zu halten. Wenn eine vergleichbare Wärmeversorgung mit einem Erdgas betriebenen Gas- und Dampfturbinen Kraftwerk³⁸ in Kombination mit CCS³⁹ anstatt mit der direkten Nutzung von Strom und Wärmepumpen verwendet werden würde, stiege der primäre Prozessenergiebedarf durch den Zukauf von Erdgas um bis zu 33 % (bis zu 89 % ohne Energieintegration), wie in Abbildung 9 dargestellt. Sollte die Energieversorgung alternativ durch Wasserstoff⁴⁰ anstelle von Erdgas mit CCS erfolgen, wäre der Primärenergiebedarf an treibhausgasneutralem Strom um bis zu 41 % (bis zu 95 % ohne Energieintegration) höher im Vergleich zur Kombination von Elektrifizierungstechnologien und Wärmepumpen.

Diese Vergleiche unterstreichen die Notwendigkeit, in neue Technologien zu investieren, um Ressourcen zu schonen und den Energiebedarf nachhaltig und effizient zu decken. Dies kann zum Beispiel durch einen passenden Mix aus elektrischen Dampfkesseln, elektrischen Widerstandsheizungen und Wärmepumpen erfolgen. Da bei einer elektrischen Wärmebereitstellung auf Basis von erneuerbarer Solar- oder Windenergie Fluktuation in der Stromversorgung auftreten können, sollten Energiespeicher in Kombination mit einer Erdgas- oder Wasserstoffgestützten Wärmebereitstellung für eine stabile Wärmebereitstellung sorgen. Um die zuvor erwähnten Reduktionspotentiale durch effiziente Technologien zu realisieren, sollte die direkte Nutzung von Strom durch Elektrifizierung nach Möglichkeit priorisiert angewendet werden. Diese Technologien sollten mit einem passenden politischen Rahmenwerk gefördert werden, um die Wettbewerbsfähigkeit von Investitionen in effiziente Technologien zur emissionsarmen Energiebereitstellung zu stärken.

4.4 Potential von Recycling zur Ressourcenschonung

Deutschland ist einer der Vorreiter beim Recycling von Kunststoffwertstoffen innerhalb der Mitgliedsstaaten der OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development)⁴¹, was eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung erfordert und den ambitionierten Ausbau von Recyclingmaßnahmen zu einem plausiblen Szenario macht. Deswegen wird bereits bei moderaten Recyclingverfügbarkeiten von einem deutlichen Ausbau der Recyclingtechnologien ausgegangen, wie in Kapitel 2.6 beschrieben. Im Modell dieser Studie hängt das Ausmaß des Recyclingpotentials neben der kunststoffspezifischen Recyclierbarkeit von (I) den deutschen Recyclingquoten für mechanisches und chemisches Recycling und (II) der regionalen Verfügbarkeit von Kunststoffabfällen ab (siehe Kapitel 2.6 für weitere Details).

In der Rheinland-Region gibt es bereits Investitionen in großtechnische Pilotanlagen für chemische Recyclingverfahren⁴², was die Rohstoffversorgung mit Recycling-Naphtha für die lokalen Cracker künftig verbessert und Treibhausgasemissionen durch die Vermeidung der Verbrennung von Kunststoffwertstoffen einspart. Dementsprechend wird für alle Szenarien eine Erhöhung der Recyclingquoten von 31 % auf 86 % angenommen, wobei die gesamte mechanische Recyclingquote von 31 % auf 50 % und die chemische Recyclingquote von 0 % auf 36 % ansteigt (siehe Kapitel 2.6 für die Annahmen).

38 Berücksichtigung der zusätzlichen Erdgasbedarfs (Brennwert) mit der Annahme, dass das Kraftwerk einen Wirkungsgrad von 90 % hat; Umweltbundesamt, Status quo der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland - Sachstandspapier, 2020; ISSN 2363-829X.

39 Annahme: Zusätzlicher Energiebedarf für die CO₂-Abscheidung und -Komprimierung von 20 %; Babae, S., Loughlin, D.H. Exploring the role of natural gas power plants with carbon capture and storage as a bridge to a low-carbon future. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 379–391, 2018; <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1479-x>.
Annahme: Zusätzlicher Energiebedarf für den Transport und die Speicherung von CO₂ von 7,5 %; Ligen, T., Guosheng, D., Shijie, S. et al. Bottlenecks and Technological Developments for Geologic Storage of CO₂. *Chemistry Technology of Fuels and Oils*, 59, 213–218, 2023; <https://doi.org/10.1007/s10553-023-01518-4>.

40 Berücksichtigung des Strombedarfs zur Herstellung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse und der anschließenden Umwandlung in Dampf als Energieträger.

41 OECD Environmental Performance Reviews: Germany 2023, OECD, 2023; <https://doi.org/10.1787/f26da7da-en>.

42 Pressemitteilung, Ineos, INEOS unterzeichnet Vereinbarung mit Plastic Energy für seine größte Anlage zur Herstellung von 100.000 Tonnen Rohstoffen aus Kunststoffabfällen, Köln, 18.11.2022.

Eine Einschätzung des Potentials an eingesparten Treibhausgasemissionen ermöglicht den Vergleich der Szenarien mit moderaten oder umfassenden Recyclingmengen. Moderate Recyclingmengen von 44 % der produzierten Kunststoffe bei Optimierung des mechanischen und chemischen Recyclings führen zu einer Vermeidung von Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung von Kunststoffabfällen von ungefähr 2,2 Megatonnen CO₂-Äquivalente. Umfassende Recyclingmengen von 70 % der produzierten Kunststoffe, deren Verfügbarkeit zum Beispiel durch die Zulassung des Imports von Kunststoffabfällen von zuvor exportierten Kunststoffprodukten ermöglicht werden kann, führen zu einer Vermeidung von ungefähr 3,5 Megatonnen CO₂-Äquivalente.

Hierbei ist anzumerken, dass in den Optimierungen möglichst effiziente Recyclingverfahren kunststoffspezifisch ausgewählt werden, wobei die Ausnutzung der möglichen Recyclingtechnologien bei einer Optimierung der Kosten in jedem Szenario 100 % ist. Dies entspricht einer maximalen Ausnutzung von stofflichem Recycling über alle Szenarien hinweg und zeigt, dass Treibhausgasemissionen aus der Verbrennung von Kunststoffabfällen durch den Ausbau von Recycling kosteneffizient vermieden werden können.

Tabelle 4

Mögliche Einsparungen von Treibhausgasemissionen durch die Nutzung von Recycling im Vergleich zur Verbrennung von Kunststoffabfällen und Ausnutzung dieser Einsparungen in den Szenarien.

	Verfügbarkeit Recyclingmengen im Verhältnis zur regionalen Produktion an Kunststoffen	Mögliche Einsparungen an Treibhausgasemissionen durch vermiedene Verbrennung von Kunststoffabfällen	Ausnutzung der Einsparungen an Treibhausgasemissionen durch Recycling in den verschiedenen Szenarien
2021	14 %	0,8 Megatonnen CO ₂ -Äquivalente pro Jahr	–
2045 Moderate Recyclingmengen	44 %	2,2 Megatonnen CO ₂ -Äquivalente pro Jahr	100 % Referenzszenario 100 % Szenario 3
2045 Umfangreiche Recyclingmengen	70 %	3,5 Megatonnen CO ₂ -Äquivalente pro Jahr	100 % Szenario 1 100 % Szenario 2 100 % Szenario 4

Zudem kann durch Recycling ein Teil der Produktion von neuen Polymeren (mechanisches Recycling) und der Naphtha-Produktion (chemisches Recycling) als Ausgangsstoff für Basischemikalien reduziert werden. Dieser reduzierte Ressourcenbedarf steigert die Resilienz der Industrie durch eine Versorgung mit regional verfügbaren Ressourcen anstelle von importiertem Rohöl und reduziert die Ressourcenkosten für eine treibhausgasneutrale Produktion über den Lebenszyklus von Chemikalien und Kunststoffen. Dies erhöht langfristig auch die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen in der Region. Das Rheinland ist hierfür besonders geeignet, da sich hier mit 54 % ein besonders hoher Anteil der deutschen Steamcracker-Kapazitäten befindet.⁴³ Steamcracker können recyceltes Naphtha aus chemischem Recycling als Ersatz für fossiles Naphtha verwenden, so dass das Potential für chemisches Recycling in der Region besonders hoch ist. Das hohe Potential für chemisches Recycling in der Region kann indirekt auch das Potential für andere Recyclingtechnologien erhöhen, wenn erhöhte Mengen an Kunststoffabfällen als Ausgangsstoff für chemisches Recycling in der Region in Sortieranlagen vorbereitet werden. Dadurch erhöht sich auch die Menge an geeigneten Kunststoffabfällen, die für mechanisches Recycling oder andere Recyclingtechnologien zur Verfügung stehen.

⁴³ Steamcracker Kapazitäten in Europa, Petrochemicals Europe, 2023, www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/petrochemicals-facts-and-figures/cracker-capacity, Stand August 2023.

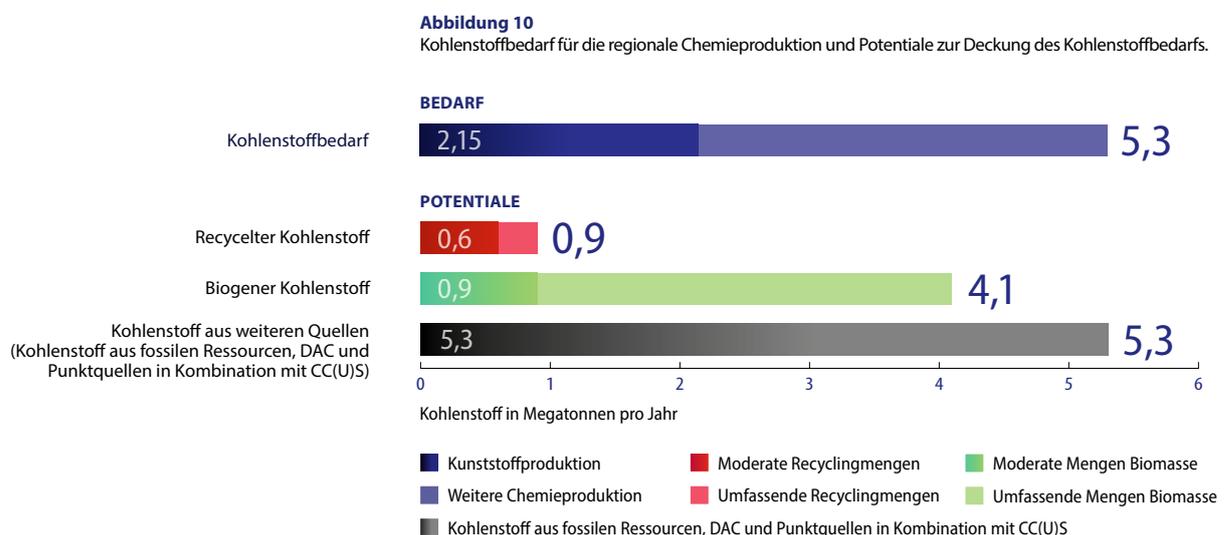
Um diese Potentiale auszuschöpfen, ist die Förderung von Recycling und der Kreislaufwirtschaft durch geeignete politische Rahmenbedingungen von entscheidender Bedeutung. Diese sollten (I) die Priorisierung und Förderung von stofflichen Recyclingtechnologien, inklusive des mechanischen und chemischen Recyclings, und (II) eine effizientere Nutzung von Kunststoffabfällen als Wertstoff ermöglichen. Ein besseres Verständnis von Kunststoffabfällen als Wertstoff und Ressource sollte den Handel von Kunststoffabfällen einschließen. Dadurch kann die generelle Kunststoffmenge, die für Recycling in der Region zu Verfügung steht, erhöht werden. Der Handel mit Kunststoffabfällen ist insbesondere für exportstarke Regionen wie NRW relevant, da die Region durch Importe aus anderen Bundesländern oder Europa auf eine breite und zirkuläre Rohstoffbasis gestellt werden kann.

4.5 Potentiale zur Bereitstellung von Kohlenstoff

Ein großer Teil der rheinischen Chemieindustrie ist durch die kohlenstoffbasierte Chemie geprägt und im Umfang dieser Studie enthalten. Die untersuchte Produktion im Rheinland (siehe Kapitel 2.1) hat einen entsprechenden Bedarf an kohlenstoffhaltigen Ressourcen von ungefähr 5,3 Megatonnen Kohlenstoff. Dieser Kohlenstoffbedarf kann gedeckt werden durch Kohlenstoffquellen wie (I) fossile Ressourcen, (II) Kunststoffabfälle, (III) biogene Ressourcen oder (IV) Kohlenstoffdioxid aus unterschiedlichen Quellen. In diesem Kapitel werden nur die Potentiale der verschiedenen Kohlenstoffquellen diskutiert, um den Fokus auf die Handlungsfähigkeit und die Rahmenbedingungen für die Chemieunternehmen in der Region zu legen. Die Nutzung der Ressourcen wird in Kapitel 4.2 erläutert.

Kohlenstoff aus (I) Kunststoffabfällen kann unter Berücksichtigung der Annahmen zu verfügbaren Recyclingmengen in Kapitel 2.6 durch die Ausnutzung von mechanischem oder chemischen Recycling 0,6 bis 0,9 Megatonnen des Kohlenstoffbedarfs abdecken. Recycling kann priorisiert verwendet werden, um Treibhausgasemissionen durch die sonstige Verbrennung von Kunststoffwertstoffen einzusparen und einen Teil des Kohlenstoffbedarfs zu decken. Zusätzlich Potentiale können entstehen, wenn die Menge, der aus anderen Bundesländern oder Europa importierten Kunststoffwertstoffe weiter erhöht wird, um die Kreislaufführung zu verbessern.

Kohlenstoff aus (II) Biomasse kann durch eine Mischung aus Gasifizierung und Hydrolyse mit Fermentation und unter Berücksichtigung der Annahmen in Kapitel 2.6 ungefähr 0,9 bis 4,1 Megatonnen Kohlenstoff für die regionale Produktion bereitstellen. Biogene Rohstoffe haben zuvor Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre aufgenommen und können so Treibhausgasemissionen aufwiegen, die beispielsweise am Lebensende von Kunststoffen bei der Verbrennung von Recyclingüberresten entstehen.



Weiterhin können Kohlenstoffressourcen eingesetzt werden, deren Verfügbarkeiten im Jahr 2045 als nicht limitierend angesehen werden. Dazu zählen fossile Ressourcen, wie zum Beispiel Naphtha, das aus Rohöl gewonnen wird, und Kohlenstoffdioxid, wobei der enthaltene Kohlenstoff durch CCU nutzbar gemacht werden kann.

Kohlenstoffdioxid kann aus Punktquellen, wie zum Beispiel der Verbrennung von Abfallstoffen oder Recyclingrückständen, oder aus der Atmosphäre mittels Direct Air Capture (DAC) abgetrennt werden. Kohlenstoffdioxid, das der Atmosphäre entzogen wurde, kann Treibhausgasemissionen, die beispielsweise am Lebensende von Kunststoffen bei der Verbrennung von Recyclingüberresten entstehen, aufwiegen.

In allen Szenarien dieser Studie wird die stoffliche Nutzung von Kunststoffwertstoffen und biogenen Rohstoffen der energetischen Nutzung vorgezogen, was im Einklang mit Publikationen zur Steigerung der Wertschöpfung durch die kaskadische Nutzung biogener Rohstoffe steht.⁴⁴ Um Treibhausgasneutralität mit limitierten Ressourcen wettbewerbsfähig und mit höchster Wertschöpfung zu erreichen, sollte die stoffliche Nutzung von Recyclingmengen und biogenen Rohstoffen entsprechend gefördert werden.

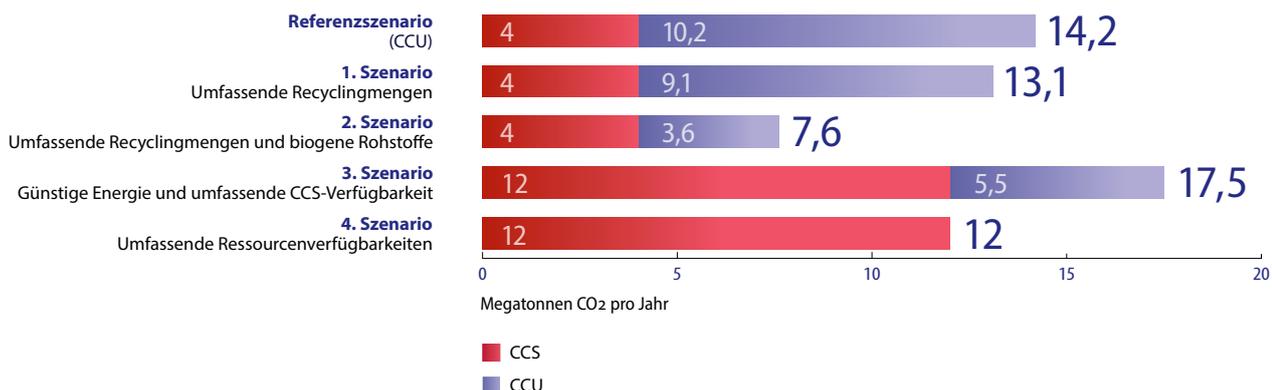
4.6 Potentiale von Kohlenstoffdioxidspeicherung und -nutzung

Carbon Capture and Utilization oder Storage (CC(U)S) umfasst die Abscheidung, den Transport sowie die Nutzung (CCU) oder Speicherung (CCS) von Kohlenstoffdioxid (CO₂), das in industriellen Prozessen entstehen und nicht vermieden werden kann. Während CCS die Möglichkeit bietet, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, indem es die Freisetzung von Kohlendioxid in die Atmosphäre verhindert, ermöglicht CCU die Verwendung von Kohlenstoffdioxid als Kohlenstoffquelle.

CCS wird in allen Szenarien ausgewählt, mit einem Umfang von 4 bis 12 Megatonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr. Dies entspricht der vollen Ausnutzung der angenommenen CCS-Verfügbarkeit (vergleiche Kapitel 2.6). In dieser maximalen Ausprägung ist CCS geeignet, Treibhausgasemissionen in Kombination mit recycelbaren, biogenen und fossilen Rohstoffquellen kosteneffizient einzusparen. Nicht eingefangene Treibhausgasemissionen, die zum Beispiel bei der Verbrennung von Abfällen oder bei der Gewinnung fossiler Rohstoffe entstehen, müssen durch Negativemissionen über den gesamten Lebenszyklus ausglich werden. Negativemissionen können durch die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre durch den Einsatz biogener Rohstoffe oder Direct Air Capture (DAC) in Kombination mit der Vermeidung der Re-Emission von Kohlenstoffdioxid am Lebensende von Produkten (CCS, CCU und Recycling) erreicht werden.

Abbildung 11

Kohlenstoffdioxidmengen, die in den Szenarien abgeschieden und genutzt (CCU) oder abgeschieden und gespeichert (CCS) werden.



Da die geologischen Kapazitäten für CCS mittel- bis langfristig limitiert sind,⁴⁵ sollte CCS als Brückentechnologie auf dem Weg zu einer kreislauffähigen Wertschöpfung angesehen werden, um die Kosten für eine schnelle Reduktion der Treibhausgasemissionen niedrig zu halten. Diese Kostenreduktion kann die Wettbewerbsfähigkeit einer treibhausgasneutralen Produktion der Chemieindustrie im Rheinland stärken, weshalb der Aufbau einer entsprechenden CO₂-Infrastruktur von besonderer Bedeutung ist.

Eine CO₂-Infrastruktur ist nicht nur für CCS erforderlich, sondern bildet auch die Grundlage für die Carbon Capture and Utilization (CCU) Technologie. CCU wird in den Szenarien in unterschiedlichem Umfang zwischen 0 und 10,1 Megatonnen Kohlenstoffdioxid gewählt und wird vor allem in den Szenarien mit geringen Verfügbarkeiten von CCS und biogenen Rohstoffen eingesetzt. Als Zukunftstechnologie kann CCU zu einer zirkulären Chemieindustrie beitragen, indem der Kohlenstoff aus chemischen Abfallprodukten durch Verbrennung in Kohlenstoffdioxid und anschließend per CCU im chemischen Kohlenstoffkreislauf gehalten wird. Für CCU werden große Mengen an treibhausgasneutralem Wasserstoff benötigt, dessen emissionsarme Herstellung sehr stromintensiv ist. Für die breite Nutzung von CCU in der Zukunft sollten die Versorgung mit klimaneutralem Strom und Wasserstoff durch Investitionen in erneuerbare Energien und die entsprechende Infrastruktur gefördert werden. Durch die Kombination von Technologien zur Aufnahme von Treibhausgasemissionen und die Speicherung am Lebensende hat die chemische Industrie das Potential, Negativemissionen zu erzeugen. Sollen zusätzliche Negativemissionen aus der Chemieindustrie zur Klimaneutralität der Region oder Deutschlands in anderen Sektoren beitragen, müssen zusätzlich zu den hier dargestellten Kapazitäten entsprechende CCS-Speicherkapazitäten und eine entsprechende Infrastruktur zugänglich gemacht werden.

4.7 Transformation durch Zusammenarbeit von Industrie, Politik und Zivilgesellschaft

Die Ergebnisse dieser Studie sowie wichtige Handlungsoptionen und Hindernisse für die Transformation wurden mit Chemieunternehmen aus dem Rheinland erörtert. Aus den Gesprächen mit regionalen Akteuren aus verschiedenen Stellen der chemischen Wertschöpfungsketten wurde die Notwendigkeit einer gemeinsamen Transformation zu einer treibhausgasneutralen Chemieregion deutlich. Herausforderungen müssen gemeinsam angegangen werden und regionale Potentiale müssen zusammenhängend gedacht und realisiert werden, um eine wettbewerbsfähige Transformation zur Treibhausgasneutralität zu erreichen. Treibhausgasemissionen entstehen entlang der gesamten chemischen Wertschöpfungsketten und müssen gezielt reduziert werden. Zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen durch die einzelnen Akteure in der chemischen Wertschöpfungskette braucht es passende Rahmenbedingungen, die den Unternehmen Handlungsoptionen für die Transformation in einem globalen Wettbewerbsumfeld bieten.

Die Transformation zu einer wettbewerbsfähigen treibhausgasneutralen Chemieindustrie erfordert eine Kombination aus alternativen Technologien und Ressourcen, erneuerbaren Energien, Infrastruktur, Investitionen, sektorübergreifender Zusammenarbeit und Zustimmung durch die Gesellschaft und Verbraucher. Diese Herausforderungen müssen gemeinsam gemeistert werden, damit die Chemieindustrie als Antriebsmotor für die Region erhalten bleibt und die Transformation des Rheinlands, Deutschlands und Europas durch effiziente Technologien und Produkte beschleunigen kann. Die Chemieindustrie liefert zentrale Bausteine für zukunftsweisende Technologien, wie zum Beispiel Elektronikbauteile für die Digitalisierung oder Hochleistungsmaterialien für Windkraftanlagen, und ist somit auch essenziell für die Transformation anderer Sektoren in Richtung Treibhausgasneutralität. Umgekehrt erleichtert eine beschleunigte Transformation in anderen Sektoren, wie zum Beispiel eine verbesserte Versorgung mit erneuerbaren Energien durch den Ausbau von Windrädern, auch die Transformation der Chemieindustrie.

⁴⁵ Europäische Kommission, Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European and Social Committee and the Committee of the regions - Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU, 2024.

Zusammenfassend lassen sich aus dem Austausch mit den Unternehmen und der Auswertung der Studienergebnisse unter anderem die folgenden Erkenntnisse und Handlungsoptionen ableiten:

- Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 ist im Zusammenspiel aller Akteure in der Chemieregion Rheinland mit passenden Rahmenbedingungen erreichbar. Treibhausgasemissionen können entlang der gesamten Wertschöpfungskette deutlich reduziert werden.
- Die politischen Rahmenbedingungen müssen eine Transformation der chemischen Industrie in Richtung Treibhausgasneutralität ermöglichen, inklusive Investitionen in die Nutzung alternativer Technologien und Ressourcen wie Recyclingmengen, biogene Rohstoffe oder erneuerbare Energien. Eine geeignete und funktionsfähige Infrastruktur, sektorübergreifende Zusammenarbeit und gesellschaftliche Zustimmung sind ebenfalls wichtige Randbedingungen für eine beschleunigte Transformation.
- Für eine beschleunigte Transformation und das Erreichen einer weltweiten Spitzenposition sollten zukunftsweisende und wettbewerbsstärkende Optionen und Technologien zugänglich sein und gefördert werden.
- Die Zugänglichkeit zu diesen Schlüsselfaktoren kann durch ein Zusammenspiel aus dem Abbau von Hindernissen, wie Überregulierung und Bürokratie, der gezielten Förderung zukunftsweisender Entwicklungen durch Arbeitskräfte, Technologieförderung und Subventionen sowie einer transparenten und umfassenden Kommunikation inklusive einer gesellschaftsübergreifenden und langfristigen Strategie verbessert werden.
- Die langfristige Strategie sollte kontinuierlich angepasst werden, da es auch 2045 und darüber hinaus noch Handlungsbedarf bei der Umsetzung und Etablierung einer effizienten und nachhaltigen Kreislaufwirtschaft geben wird. Damit das Rheinland im globalen Wettbewerb eine zukunftsweisende Metropolregion bleibt, sollte die Entwicklung und Implementierung zukunftsfähiger Technologien gefördert werden.
- Die Transformation der Metropolregion Rheinland, Deutschlands und der EU kann durch die Chemieindustrie mit effizienten Technologien und Produkten beschleunigt werden. Von einer beschleunigten Transformation profitiert die Chemieindustrie langfristig auch selbst, denn Transformationsvorsprünge können in einer sich wandelnden Welt zu Wettbewerbsvorteilen führen, zum Beispiel durch effizientere Technologien und bessere Lieferketten. Die tiefgreifende Transformation der Region sollte von allen Akteuren gemeinsam gefördert und mitgetragen werden.

Wenn diese Herausforderungen gestemmt werden können, bleibt die Chemieindustrie als Antriebsmotor für die Region erhalten. Die Chemieindustrie ist ein zentraler Arbeitgeber in der Region, fördert die lokale Wertschöpfung und die Transformation der Metropolregion Rheinland in Richtung einer treibhausgasneutralen Industrieregion. Die Chemieindustrie ist sowohl Innovationstreiber als auch traditioneller „Macher“. Mit ihren Produkten, die Ausgangspunkt vieler Wertschöpfungsketten sind, trägt sie zur Versorgungssicherheit und allgemeinen Resilienz bei.

Die offene Diskussion einer gemeinsamen Strategie für die Transformation und die Umsetzung ist jetzt der nächste Schritt: Dazu lädt die Chemieindustrie die Industrie, die Politik und die Zivilgesellschaft ein.

05

Zusammenfassung
und nächste Schritte

Zusammenfassung und nächste Schritte

Diese Studie schafft eine fundierte Datenbasis für politische und strategische Entscheidungen und Maßnahmen, die die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Chemieregion Rheinland unterstützen. In diesem Kapitel werden zunächst die zentralen Ergebnisse der Studie zusammengefasst und anschließend die zentralen Aussagen der Studie formuliert. Auf Basis dieser Ergebnisse werden geeignete Maßnahmen und Handlungsempfehlungen vorgestellt, die dazu beitragen können, die Transformation hin zu einer treibhausgasneutralen Chemieindustrie im Rheinland zu fördern.

Die Ergebnisse der Studie verdeutlichen, dass eine treibhausgasneutrale Chemieindustrie im Rheinland bis zum Jahr 2045 unter Berücksichtigung verschiedener regionaler Rahmenbedingungen erreicht werden kann. Rahmenbedingungen hängen von zukünftigen Entwicklungen ab und spiegeln Unsicherheiten hinsichtlich der Ressourcenverfügbarkeiten, wie Recyclingmengen, biogene Rohstoffe und CCS-Kapazitäten, sowie der zukünftigen Kosten für treibhausgasneutralen Strom, wider. Diese Unsicherheiten wurden in der Studie anhand verschiedener Szenarien analysiert, wobei ein technologieoffenes Optimierungsmodell für die Auswahl der Technologien zum Erreichen einer treibhausgasneutralen Chemieindustrie im Rheinland eingesetzt wurde. Dieses Modell ermöglicht es zum Beispiel, Ressourcen wie biogene Rohstoffe wahlweise energetisch oder stofflich zu nutzen oder Energie erneuerbar oder fossil bereitzustellen. Das Optimierungsmodell wählt, unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen und des Umfangs der in der Region zu produzierenden Chemikalien und Kunststoffe, die kostengünstigsten Kombinationen von Technologien aus, die gleichzeitig eine treibhausgasneutrale Produktion über den gesamten Lebenszyklus ermöglichen. Diese treibhausgasneutrale Produktion wurde für alle fünf Szenarien untersucht, davon ein Referenzszenario mit moderaten Ressourcenverfügbarkeiten und vier unterschiedliche Szenarien mit erhöhten Verfügbarkeiten. Die Kombination aus den fünf Szenarien erlaubt es, einen Korridor möglicher Entwicklungen für die Chemieindustrie im Rheinland aufzuzeigen und daraus konkrete Handlungsschritte für die Transformation in Richtung Treibhausgasneutralität abzuleiten.

Für diesen tiefgreifenden Wandel ist der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit ein wichtiger Schlüsselfaktor. Die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen der chemischen Industrie hängt stark von den Betriebs- und Investitionskosten ab und wie sich diese in Relation zu anderen Standorten im globalen Wettbewerb entwickeln. Je nach Ressourcenverfügbarkeiten und den entsprechend optimierten Technologiekombinationen ergeben sich Betriebskosten von 9 bis 21 Milliarden Euro pro Jahr und Investitionskosten von 22 bis 39 Milliarden Euro für den Zeitraum bis 2045. Um die Kosten zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit in der Chemieregion Rheinland zu stärken, ist ein optimaler Dreiklang aus erneuerbaren Energien, alternativen Ressourcen und der notwendigen Infrastruktur essenziell.

Eine ausreichende Verfügbarkeit erneuerbarer Energien für die regionale Versorgung mit treibhausgasneutralem Strom ist für das Erreichen einer treibhausgasneutralen Energieversorgung unverzichtbar. Die regionale Energieversorgung kann durch einen reduzierten Primärenergiebedarf gestärkt werden, indem bereits genutzte Effizienzsteigerungen, wie zum Beispiel Wärmeintegration in Verbundstandorten, mit dem Einsatz neuer, bisher vermehrt nicht wettbewerbsfähiger Technologien, wie zum Beispiel industriellen Wärmepumpen und Elektrifizierungstechnologien, kombiniert werden. Ohne die Ausnutzung von Wärmeintegration durch die Produktion in Verbundstandorten entsteht ein Anstieg des primären Prozessenergiebedarfes von bis zu 66%. Wenn auf die höheren Wirkungsgrade von neuen Technologien verzichtet wird und ausschließlich eine Erdgas- oder wasserstoffgestützte Wärmeversorgung verwendet wird, steigt der primäre Prozessenergiebedarf im Jahr 2045 um bis zu 33% bis 41%.

Alternative Ressourcen und die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft können Treibhausgasemissionen einsparen und den gesamten Ressourcenbedarf senken. So kann der Ausbau einer Kreislaufwirtschaft durch ambitionierte Integration von Recycling 2,2 bis 3,5 Megatonnen CO₂-Äquivalente an Treibhausgasemissionen kostengünstig einsparen. Emissionen aus der Verbrennung von Kunststoffen werden vermieden, wodurch die notwendige Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre an anderer Stelle reduziert wird. Gleichzeitig werden die in Kunststoffabfällen gespeicherte Energie und stofflichen Komponenten stärker im chemischen Kreislauf gehalten. Die dadurch eingesparten Kosten und der reduzierte Ressourcenbedarf können die Wettbewerbsfähigkeit und die Resilienz der Chemieindustrie in der Region langfristig stärken.

Die Kreislaufwirtschaft kann weiterhin gestärkt werden, indem nicht genutzte biogene Reststoffe und Anteile von bisher energetisch verwendeter Biomasse stofflich zur Herstellung von Basischemikalien verwendet werden. Biogene Rohstoffe nehmen Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und können so Treibhausgasemissionen, die beispielsweise am Lebensende bei der Verbrennung von Recyclingresten entstehen, aufwiegen.

Der Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie im Rheinland von 5,3 Megatonnen Kohlenstoff, der für die Produktion von Chemikalien und Kunststoffe notwendig ist, muss durch Ressourcen gedeckt werden, die Treibhausgasneutralität erlauben. Kunststoffabfälle (0,6 bis 0,9 Megatonnen Kohlenstoff) und biogene Rohstoffe (0,9 bis 4,1 Megatonnen Kohlenstoff) können dafür wichtige Bausteine sein. Darüber hinaus können Kohlenstoffressourcen genutzt werden, die innerhalb des betrachteten Zeitrahmens als unbegrenzt gelten, wie fossile Rohstoffe und Kohlendioxid aus CO₂-Punktquellen oder Direct Air Capture (DAC). Eine Kombination dieser Ressourcen, zusammen mit Carbon Capture and Utilization (CCU) und Carbon Capture and Storage (CCS), kann den regionalen Kohlenstoffbedarf decken und gleichzeitig eine treibhausgasneutrale Produktion ermöglichen. Ein optimierter Einsatz kohlenstoffhaltiger Rohstoffe in Verbindung mit CCS kann dabei die Gesamtkosten in allen untersuchten Szenarien senken, wobei eine entsprechende CO₂-Infrastruktur erforderlich ist. Um Treibhausgasneutralität mit begrenzten Ressourcen und bei maximaler Wertschöpfung zu erreichen, sollte die stoffliche Nutzung von biogenen Rohstoffen und Recyclingmengen gegenüber der energetischen Nutzung bevorzugt werden.

Die Evaluierung der Studienergebnisse durch wissenschaftliche und industrielle Experten zeigt, dass die Transformation zu einer wettbewerbsfähigen treibhausgasneutralen Chemieindustrie durch die Zusammenarbeit von Industrie, Politik und Zivilgesellschaft gelingen kann. Die Chemieindustrie kann die Transformation des Rheinlands, Deutschlands und Europas mit innovativen, effizienten Technologien und Produkten beschleunigen. Eine Abwanderung der chemischen Industrie aufgrund nicht wirtschaftlicher Rahmenbedingungen verringert nicht nur die Wertschöpfung und den Wohlstand in der Region, sondern verzögert auch notwendige Innovationen für den weltweit notwendigen Klimaschutz. Umgekehrt kann auch die Wettbewerbsfähigkeit der Chemieindustrie auf dem Weg zu Treibhausgasneutralität durch eine beschleunigte Transformation der Region in anderen Bereichen gestärkt werden, wie zum Beispiel durch die Versorgung mit erneuerbaren Energien.

Folgende Maßnahmen können die Transformation der chemischen Industrie im Rheinland in Richtung Treibhausgasneutralität ermöglichen und beschleunigen:

- Um die Wettbewerbsfähigkeit der regionalen Chemieindustrie zu steigern, sind umfassende Investitionen in eine sichere und kostengünstige Versorgung mit klimaneutraler Energie und alternativen Ressourcen notwendig. Dazu gehören klimaneutraler Strom (23 bis 35 Terawattstunden pro Jahr), treibhausgasneutraler Wasserstoff (7 bis 77 Terawattstunden pro Jahr) biogene Rohstoffe (3 bis 14 Megatonnen pro Jahr) und Recyclingmengen (1,3 bis 2,0 Megatonnen pro Jahr).

- Um diese Ressourcen bereitzustellen, ist der Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur unerlässlich. Dazu gehört:
 1. Die Infrastruktur von erneuerbaren Energien, einschließlich Stromnetze und Stromspeichern, sowie Backup-Kraftwerke, um eine stabile Energieversorgung zu gewährleisten.
 2. Ein angemessener Ausbau und die Instandhaltung von Verkehrswegen, um den Transport von Kunststoffabfällen sowie biogenen Rohstoffen oder alternativen Zwischenprodukten möglichst effizient zu ermöglichen.
 3. Es bedarf Pipelines für den Transport von Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff. Die Kohlenstoffdioxid-Infrastruktur muss eine CCS-Kapazität von mindestens 4 bis 12 Megatonnen und eine CCU-Kapazität von 0 bis 10 Megatonnen Kohlenstoffdioxid erlauben. Die Wasserstoff-Infrastruktur muss die Deckung des Wasserstoffbedarfs ermöglichen, der nicht durch Elektrolyse mit regional verfügbarem Strom gedeckt werden kann
- Standortvorteile wie die Wärmeintegration in Chemieparks sollten weiter ausgenutzt werden, denn sie sind erforderlich, um die Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie im globalen Umfeld zu erhalten. Der Primärenergiebedarf kann zusätzlich durch die Förderung von bisher nicht wettbewerbsfähigen effizienten Technologien gesenkt werden. Dies beinhaltet den Ausbau industrieller Wärmepumpen, direkten Elektrifizierungstechnologien und weitere Technologien wie beispielsweise Wärmespeicher, die eine stabile Energieversorgung erlauben. Ohne eine effektive Energienutzung durch Energieintegration und effiziente Technologien kann der Primärenergiebedarf für Prozesse um bis zu 95 % höher liegen.
- Bei begrenzten Ressourcen wie Biomasse und Kunststoffabfällen sollte die stoffliche Nutzung priorisiert werden, um Treibhausgasneutralität bei maximaler Wertschöpfung zu erreichen. Investitionen in Recyclingtechnologien (mechanisches und chemisches Recycling) sowie in die Entwicklung der Kreislaufwirtschaft über den gesamten Lebenszyklus von Chemikalien und Kunststoffen sollten gefördert werden. Kunststoffwertstoffe sollten als sekundäre Rohstoffe anerkannt und ihr Handel auf überregionaler, europäischer Ebene ermöglicht werden.
- Eine Optimierung der Kosten für eine treibhausgasneutrale Produktion (9 bis 21 Milliarden Euro Betriebskosten und 22 bis 39 Milliarden Euro Investitionskosten) ist für die Chemieindustrie im Rheinland nur unter fairen Wettbewerbsbedingungen möglich. Der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Chemieindustrie kann durch passende Rahmenbedingungen und die Anerkennung des Werts treibhausgasneutraler Produkte durch die globalen Verbraucher erreicht werden. Dies ist derzeit jedoch noch nicht in ausreichendem Maße der Fall. Die Sensibilisierung der Verbraucher, auch durch die Politik, ist daher eine wesentliche Aufgabe in den nächsten Jahren. Dieser Wert spiegelt sich in der Nachfrage nach treibhausgasneutralen Produkten wider und erfordert neben der Sensibilisierung der Verbraucher und der Schaffung von Anreizen zur Implementierung von Treibhausgasneutralität für globale Produzenten auch einen transparenten und anerkannten Nachweis für die Treibhausgasneutralität von Produkten.

Durch die konsequente Umsetzung dieser Schritte kann die Chemieindustrie im Rheinland eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung einer treibhausgasneutralen Metropolregion übernehmen und gleichzeitig zur Erreichung der Klimaziele regional und global beitragen. Der nächste Schritt ist die offene Diskussion und die Entwicklung eines gemeinsamen Fahrplans – dazu lädt die Chemieindustrie die Industrie, die Politik und die Zivilgesellschaft ein.

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

Aggregierte Prozesse	Die Zusammenfassung von mehreren Prozessen in einem zusammengefasten Prozess
Allokation	Zuordnung der Eingangs- und Ausgangsflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen
Alternative Technologien	Technologien, die bisher nicht im großen Maßstab verbreitet sind und die für die Zukunft als potenziell vorteilhafte Technologien angesehen werden
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DAC	Direct Air Capture (engl. für Abscheidung von Kohlenstoffdioxid aus der Luft)
EU	Europäische Union
H ₂	Wasserstoff
Konventionelle Technologien	Technologien, die bereits in der Region verbreitet sind
Net-Zero	Bezeichnung für Treibhausgasneutralität aus dem Englischen
PE-HD	Polyethylen High Density
PE-LD	Polyethylen Low Density
PE-LLD	Polyethylen Linear Low Density
THG	Treibhausgasemissionen
Treibhausgasneutralität	Zustand, in dem Treibhausgasemissionen keine Nettoauswirkung auf das Klimasystem haben

