



STRUKTURWANDEL: Kohlenstoffbasierte Industrien in Mitteldeutschland auf dem Weg in neue Märkte

**– Wirtschaftliche Ausgangslage und
Entwicklungspotentiale**

Basisstudie im Rahmen des STARK-Projekts unter dem Titel: **„Strukturwandel: Kohlenstoffbasierte Industrien in Mitteldeutschland auf dem Weg in neue Märkte - Wirtschaftliche Ausgangslage und Entwicklungspotentiale“**. Die Studie ist in Zusammenarbeit mit dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH und dem Unternehmensberater Arvid Friebe durchgeführt worden. Auftraggeber ist der Forum Rathenau e.V. Der Verein wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert.



Arvid Friebe
Projektmanagement – Interimsmanagement
Betriebsorganisation

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Bibliographische Angaben:

Herausgeber: Forum Rathenau e.V.

Veröffentlicht: Erstveröffentlichung (Version 1.0): 18.03.2025

Überarbeitete Fassung (Version 2.0): 17.07. 2025

Autor*innen: Christoph Zeiss, Wuppertal Institut; Arvid Friebe, Friebe-PM
Dr. Valentin Espert, Wuppertal Institut

Projektteam: Dr. Kerstin Schmidt, Melanie Bitzer, Madita Flohe, Lilli Isabell Förster,
Helena Tiare Herre, Ludmilla Martens, Thies Schröder

Kontakt: info@forum-rathenau.de

Webseite: www.forum-rathenau.de

Impressum:

Forum Rathenau e.V. (Hrsg.)
Andresenstraße 1A
06766 Bitterfeld-Wolfen
Tel.: 03494/6579210

TEILBERICHT II



Zukunftsperspektiven einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

2.1 Einführung: Kohlenstoffwirtschaft in Klimaneutralitätsszenarien.....	5
2.2 Studienauftrag für den Teilbericht II.....	6
2.3 Methodik und Systemgrenzen.....	6
2.4 Überblick über wichtige Kohlenstoffströme im klimaneutralen Zielsystem	9
2.5 Unternehmens- und Institutsperspektiven aus dem Rheinischen Revier	16
2.6 Zusammenfassung und Fazit	19
2.7 Literatur	21
Abbildungsverzeichnis	22
Tabellenverzeichnis.....	22

2.1 Einführung: Kohlenstoffwirtschaft in Klimaneutralitätsszenarien

Mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes im Jahr 2021 wurde festgelegt, dass in Deutschland bis zum Jahr 2045 Klimaneutralität erreicht werden soll. Dies erfordert insbesondere in der Industrie ambitionierte Strategien und Maßnahmen. Eine zentrale Entscheidungsgrundlage für die Industrietransformation sind in Politik und Wirtschaft Klimaneutralitätsszenarien.

Klimaneutralitätsszenarien sind in der Regel modellbasierte Zielszenarien. Ausgehend von konsistenten Annahmen beschreiben sie unterschiedliche Pfade zur Erreichung des Ziels einer klimaneutralen Entwicklung (netto Null Emissionen) bis 2045. Im Unterschied zu Prognosen stellen Szenarien nicht einen oder den wahrscheinlichsten Verlauf dar, sondern verschiedene Wege der Zielerreichung. Auch wenn Unsicherheiten in Bezug auf die getroffenen Annahmen bestehen, ermöglichen Szenarien eine Orientierung bei der Entwicklung komplexer Systeme und sind daher etablierte Instrumente der Zukunftsvorschau.

Klimaneutralitätsszenarien basieren mehrheitlich auf Energiesystemmodellen, die sich auf Energieträger fokussieren und Kohlenstoff daher vor allem aus dem Blickwinkel der Strom- und Wärmeerzeugung und der Treibstoffproduktion betrachten. Eine umfängliche Darstellung der Kohlenstoffwirtschaft in einem klimaneutralen Gesamtsystem erfordert neben der energetischen allerdings auch eine stoffliche Betrachtungsebene.

In einem klimaneutralen Gesamtsystem wird es zu einer grundlegenden Umstrukturierung des bisherigen Umgangs mit Kohlenstoff kommen. Kohlenstoff wird auch ohne fossile Quellen ein wichtiger Rohstoff des Wirtschaftssystems bleiben. Zentral wird es aber sein, eine Kreislaufwirtschaft mit geschlossenen Kohlenstoffkreisläufen zu etablieren, um eine Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre zu verhindern und die weiterhin bestehenden Bedarfe für Kraftstoffe und Grundstoffe (Feedstock) z. B. der chemischen Industrie zu decken. Es ergeben sich Fragen nach der Substitution von fossilen Kohlenstoffströmen, bspw. durch Wasserstoff im Verkehr und Kohlenstoff aus Biomasse in der chemischen Industrie.

Eine Kohlenstoffwirtschaft erfordert damit die Berücksichtigung einer weiteren Systemebene, die in ihren komplexen Zusammenhängen noch nicht in Gänze darstellbar ist und aufgrund ihrer Integration mit dem Strom- und Wärmesystem neben der stofflichen auch eine energetische Teilebene aufweist. Dabei geht es um eine integrierte Betrachtung unterschiedlicher Stoffströme, um Wechselwirkungen abbilden zu können. Derartige Aspekte werden in den meisten Klimaneutralitätsszenarien nicht vertieft betrachtet. Eine vollumfängliche Betrachtung der Auswirkungen und Möglichkeiten der Stoffströme einer Kohlenstoffwirtschaft ist aufgrund der Datenlage bislang auch nur eingeschränkt möglich.

2.2 Studienauftrag für den Teilbericht II

Der Teilbericht liefert eine Analyse der Rolle von Kohlenstoffen in einem Klimaneutralitätsszenario des Wuppertal Instituts. Ein zentraler Fokus liegt auf der Analyse von Kohlenstoffströmen innerhalb einer klimaneutralen Wirtschaft. Während bisherige Energiesystemmodelle Kohlenstoff primär aus der Perspektive der Strom- und Wärmeerzeugung sowie der Treibstoffproduktion betrachten, zielt das Szenario SCI4-KN (SCI4climate.NRW, 2023b) des Wuppertal Instituts darauf, eine zusätzliche Betrachtung der Kohlenstoffströme zu ermöglichen. Hierzu werden die im Projekt SCI4climate.NRW erarbeiteten Erkenntnisse genutzt, die bereits eine erste systematische Erfassung von Kohlenstoffströmen innerhalb der Industrie beinhalten.

Im Rahmen des Teilberichtes werden die Kohlenstoffströme des Szenarios SCI4-KN detailliert erläutert und um zusätzliche, in Unternehmens- und Verbandsdiskussionen erarbeitete Kohlenstoffströme ergänzt. Die Diskussionen, die insbesondere im Rheinischen Revier mit Wirtschaftsakteuren geführt wurden, ermöglichten eine kritische Reflexion der ursprünglichen Annahmen sowie die Identifikation möglicher Alternativen und Einschränkungen für verschiedene Entwicklungspfade.

Das finale Produkt der Studie ist ein Kurzbericht, der die Rolle von Kohlenstoffen in Klimaneutralitätsszenarien beschreibt. Darin enthalten sind eine detaillierte Darstellung der relevanten Kohlenstoffströme, deren Systemintegration im Szenario SCI4-KN sowie eine Analyse der wichtigsten Kohlenstoffströme einer klimaneutralen Wirtschaft. Diese Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die zukünftige Rolle von Kohlenstoff innerhalb der Industrie besser zu verstehen und politische sowie wirtschaftliche Handlungsspielräume für die Transformation zu identifizieren.

2.3 Methodik und Systemgrenzen

Das Wuppertal Institut hat auf Basis seiner nationalen Industrieszenarien im vom Land NRW finanzierten Forschungsprojekt „SCI4climate.NRW“ eine Betrachtung der Stoffströme einer Kohlenstoffwirtschaft vorgenommen. Das Szenario „SCI4climate.NRW-Klimaneutralität“ (S4C-KN) berücksichtigt im Unterschied zu anderen Klimaneutralitätsszenarien sowohl energetisch als auch stofflich bedingte Kohlenstoffströme in einem klimaneutralen Gesamtsystem.

Das hier vorgestellte Klimaschutzszenario „SCI4climate.NRW-Klimaneutralität“ (S4C-KN) wurde im Rahmen des vom Land NRW finanzierten Forschungsprojekts „SCI4climate.NRW“ entwickelt. Es stellt mögliche künftige Entwicklungen in der energieintensiven Industrie in den Mittelpunkt der Analyse. Das Szenario analysiert diese Entwicklungen im Kontext eines gesamtwirtschaftlichen Transformationspfads hin zu einem klimaneutralen Deutschland im Jahr 2045. Zugleich berücksichtigt das Szenario S4C-KN die klimapolitischen Zielverschärfungen, die von der 2021 gewählten Regierungskoalition aus SPD, Grünen und FDP in ihrem Koalitionsvertrag formuliert wurden. Hierzu zählen v. a. die ambitionierteren Ausbauziele bei den erneuerbaren Energien, die im Szenario entsprechend der im März

2022 veröffentlichten Referentenentwürfe für die Novellen des EEG sowie des Windenergie-auf-See-Gesetzes übernommen wurden.

Im Rahmen der Erstellung des Szenarios S4C-KN wurden insbesondere detaillierte Bottom-up-Modellierungen für die Transformation der Grundstoffindustrie durchgeführt. Dies gilt vor allem für die Herstellung von Stahl, Zement und chemischen Grundstoffen, für die sehr differenzierte Ergebnisse dargestellt werden. Für diese Branchen wurden zudem Fachworkshops mit Vertreterinnen und Vertretern aus der Industrie durchgeführt, in denen vorläufige Ergebnisse des Szenarios diskutiert wurden. Ebenso wurde die zukünftige Rolle der Raffinerien in Deutschland im Rahmen der Entwicklung des Szenarios S4C-KN intensiv beleuchtet. **So wurden zwei vom Hauptszenario grundlegend abweichende Varianten der zukünftigen Rolle der Raffinerien entwickelt und diskutiert.**

Für die Erstellung des Szenarios S4C-KN wurde die WISEE-Modellfamilie genutzt (SCI4climate.

NRW, 2023b). Die Modellfamilie teilt sich ein in ein integriertes Modellsystem zur Modellierung der Energiebereitstellung (ESM) sowie verschiedene Modelle bzw. Modellsysteme zur Modellierung der Nachfragesektoren (EDM). Die Modellierung der Energienachfrage und -bereitstellung erfolgte in einem iterativen Prozess, in dem die Gesamtsystementwicklung mehrmals sektorübergreifend abgeglichen und angepasst wurde. Mittels der EDM-Modelle wurden zunächst die Nachfrage nach Energie (Strom, Wasserstoff, Wärme) sowie die THG (Treibhausgase)-Emissionen der Nachfragesektoren errechnet und daraus ein Emissions-Limit für das optimierende Modellsystem ESM abgeleitet. Das HEAT-Modellsystem ermittelte darüber hinaus installierte Kapazitäten von Wärmepumpen und Klein-KWK-Anlagen im Zeitverlauf als weiteren Input für das ESM. Basierend darauf erfolgte jeweils die Modellierung der Bereitstellung der nachgefragten Energie mittels des ESM. Die industrielle Dampfbereitstellung wurde ebenfalls mittels des ESM im Rahmen der Berechnung der Energiebereitstellung modelliert und die mit der Dampfbereitstellung verbundenen CO₂-Emissionen an das EDM-Industry zurückgespielt, so dass diese bilanziell der Industrie zugeordnet werden konnten.

Die Kohlenstoffströme dieses Szenarios wurden in den Jahren 2023 und 2024 im Rheinischen Revier in dem „Zukunftslabor Nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft“ des Projektes „IN4climate.RR“ mit Wirtschaftsakteuren diskutiert. Aus diesen Diskussionen wurden Alternativen oder Einschränkungen abgeleitet, die eine Bandbreite möglicher Pfade und möglicher Einschränkungen darstellen. Der Teilbericht wurde im Zeitraum zwischen Mai 2024 und Februar 2025 erstellt.

SCI4climate.NRW Szenario S4C-KN

Das Szenario „SCI4climate.NRW-Klimaneutralität“ (S4C-KN) aus dem vom Land NRW finanzierten Forschungsprojekt „SCI4climate.NRW“ thematisiert die Transformation der Industrie in einem klimaneutralen Gesamtsystem in Deutschland bis zum Jahr 2045. Eine zentrale Annahme des Szenarios ist, dass die energie- und klimapolitischen Zielvorgaben der Bundesregierung erreicht werden (nicht aber zwingend sektorspezifische THG-Minderungsziele). Abbildung 2.1 stellt die zeitliche Entwicklung der THG-Emissionen im Szenario S4C-KN dar.

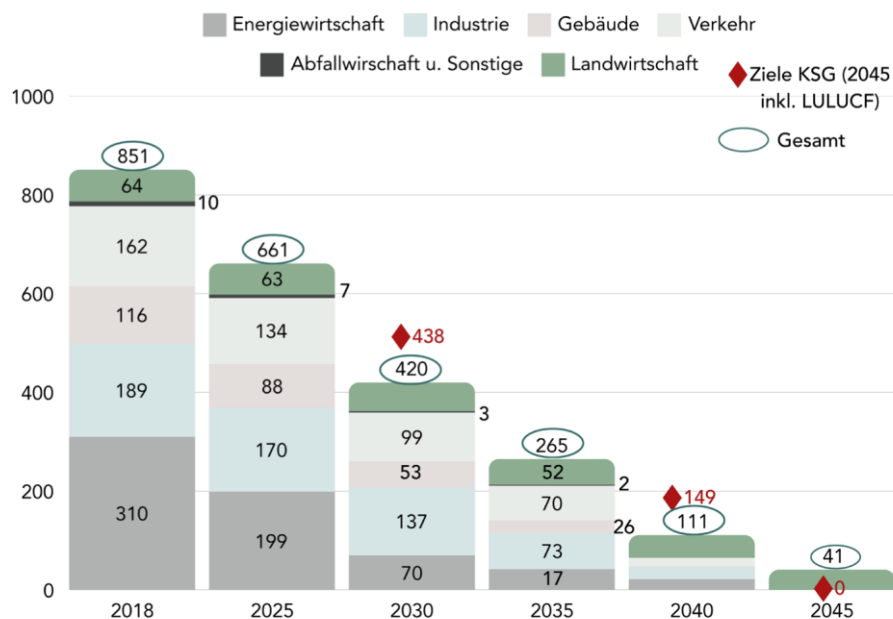


Abb. 2.1: Zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Gesamtsystems (ohne LULUCF und ohne Anrechnung von Negativemissionen durch den Import von grünem Naphtha) (SCI4climate.NRW 2023b: 13)

Im Unterschied zu anderen Klimaneutralitätsszenarien wird neben der energetischen auch die stoffliche Ebene einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft betrachtet und detaillierte Modellierungen der Entwicklung der energieintensiven Grundstoffindustrie vorgenommen. Es wird dabei davon ausgegangen, dass große Teil der Grundstoffindustrie und der industriellen Wertschöpfungsketten in Deutschland erhalten bleiben und es bis zur Mitte des Jahrhunderts zu keiner deutlichen Änderung der Produktionsmengen in der Grundstoffindustrie kommt.

Weitere Annahmen mit Relevanz für eine klimaneutrale Kohlenstoffwirtschaft sind eine zunehmende Bedeutung der Kreislaufwirtschaft, ein möglicher Import klimaneutraler Energieträger und Grundstoffe sowie eine ausreichende gesellschaftliche Akzeptanz für CO₂-Abscheidung und Speicherung für nicht vermeidbare industrielle CO₂-Emissionen (CCS) und den Aufbau eines CO₂-Transportnetzes.

Die Ausführungen zum Szenario „SCI4climate.NRW-Klimaneutralität“ (S4C-KN) mit dem Fokus auf der Kohlenstoffwirtschaft beruhen auf einer zusammenfassenden Darstellung des Gesamtberichts von SCI4climate.NRW (2023b) „Treibhausgasneutralität bis 2045 – Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW“. Darin lassen sich weiterführende Informationen zur energetischen Dimension der Industrietransformation und hier nicht dargestellten quantitativen Modellierungsergebnissen finden.

2.4 Überblick über wichtige Kohlenstoffströme im klimaneutralen Zielsystem

Abbildung 2.2 stellt die wichtigsten Kohlenstoffströme in Deutschland entsprechend im modellierten klimaneutralen Zielsystem im Jahr 2050 des S4C-KN Szenarios dar. Berücksichtigt werden auch für das nationale System bedeutsame Importe und Exporte von kohlenstoffhaltigen Produkten bzw. CO₂.

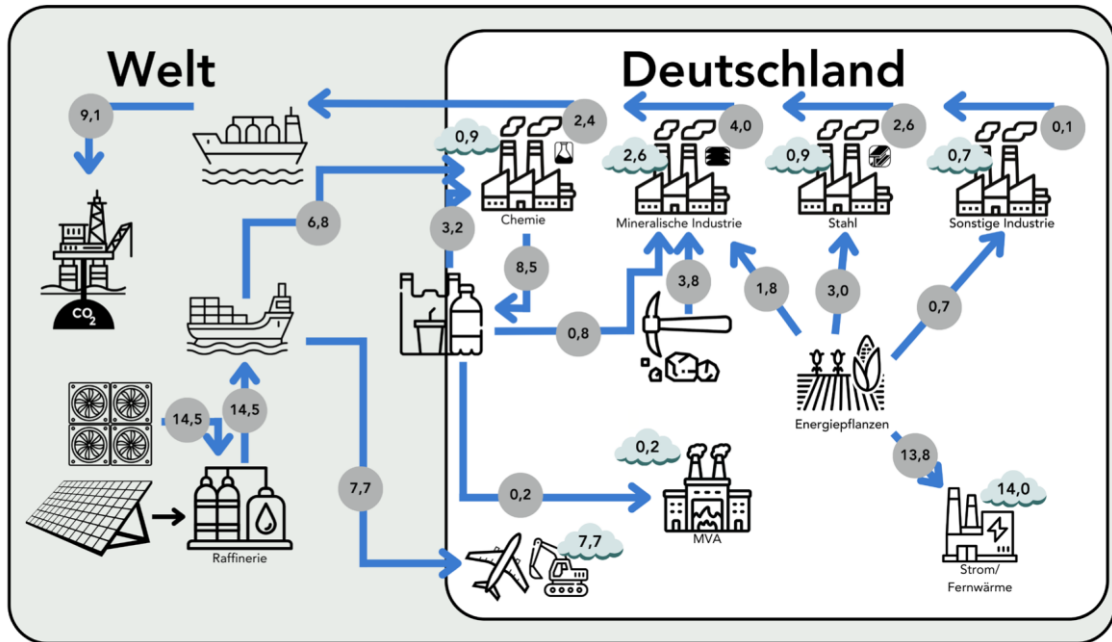


Abb. 2.2 (und Hinweis): Überblick über verbleibende zentrale Kohlenstoffflüsse im klimaneutralen Zielsystem, Jahr 2050 (SCI4climate.NRW 2023b: 16)

Hinweis: Alle Zahlenwerte stehen für Mio. t Kohlenstoff. Die Zahlen in den grauen Kreisen beziehen sich auf Kohlenstoffmengen in Form von Produkten, Rohstoffen, Biomasse und CO₂, die gezielt durch das System geführt werden. Wolken stellen die C-Menge in CO₂-Emissionen in die Atmosphäre in Höhe von insgesamt 26,8 Mio. t Kohlenstoff (bzw. 98 Mio. t CO₂) dar, wobei sowohl fossile als auch biogene C-Mengen und C-Mengen aus DAC umfasst sind. Diesen entgegen stehen Kohlenstoff-Entnahmen aus der Atmosphäre durch DAC und Biomasse in Höhe von 33,8 Mio. t Kohlenstoff, so dass der Atmosphäre infolge der dargestellten Kohlenstoffflüsse im Jahr 2050 rund 7,1 Mio. t Kohlenstoff bzw. 26 Mio. t CO₂ entzogen werden. Die Abbildung zeigt nicht sämtliche Kohlenstoffflüsse (nicht aufgeführt sind z. B. die Nutzung von Biomasse für Biopolymere, im Holzbau und in der Papierindustrie, der Nahrungsmittelanbau und Abfallströme außer Kunststoffabfällen).

Neben dem Hauptszenario S4C-KN werden im Szenariobericht von SCI4climate.NRW (2023b) auch andere denkbare Kohlenstoffflüsse vergleichend dargestellt, die hier ebenfalls berücksichtigt werden. Dies betrifft einerseits Szenario-Varianten für den Raffineriesektor und andererseits für den Umgang mit nicht oder schwer vermeidbaren CO₂-Mengen aus der mineralischen Industrie. Neben der im Hauptszenario getroffenen Annahme einer Abscheidung und Speicherung dieser industriellen CO₂-Mengen bei gleichzeitigem Import von synthetischen Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen auf Basis von Kohlenstoff aus DAC-Anlage („Import/CCS“) wird auch der Vergleichsfall einer

inländischen Verwendung des industriellen CO₂ für die Erzeugung von Kohlenwasserstoffen und Methanol (CCU_{CH}) betrachtet (siehe Abbildung 2.3).

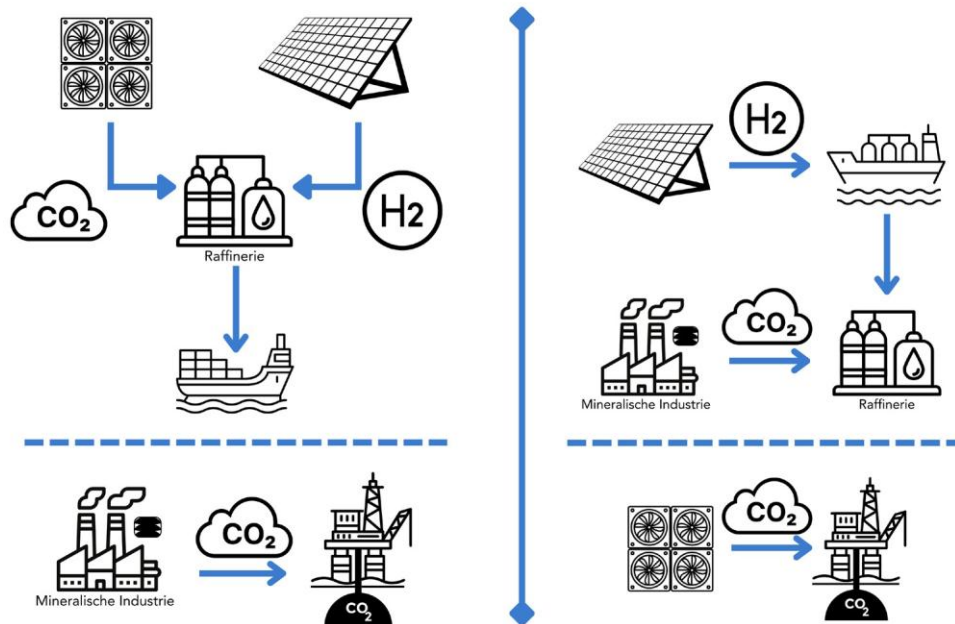


Abb. 2.3: Vergleich: Import von Kraftstoffen und Grundstoffen in Kombination mit geologischer Speicherung industrieller CO₂-Mengen („Import/CCS“, links) sowie inländisches CCU_{CH} unter Verwendung von importiertem Wasserstoff in Kombination mit DACCS („CCU_{CH}/DACCS“, rechts) (SCI4climate.NRW 2023b: 96)

Die nachfolgenden Ausführungen erläutern zentrale Systemelemente einer Kohlenstoffwirtschaft gemäß dem Szenario S4C-KN (und seiner Varianten), ihre Verbindungen sowie ihre politischen, wirtschaftlichen und infrastrukturellen Implikationen.

Industrielle Emissionen und CCS

Eine zentrale Annahme für die Kohlenstoffwirtschaft in Klimaneutralitätsszenarien betrifft den Umgang mit nicht oder schwer vermeidbaren prozessbedingten CO₂-Mengen aus der Industrie. Dies betrifft in erster Linie CO₂-Mengen durch den Abbau und die Entsäuerung von Kalkstein in der mineralischen Industrie (Zement- und Kalkindustrie). Klimaneutralitätsszenarien unterscheiden sich in zwei Pfaden des Umgangs mit diesen industriellen Emissionen:

1. Inländische CO₂-Abscheidung und Nutzung für die Treibstoffproduktion und als Grundstoff in der chemischen Industrie (CCU)
2. Dauerhafte Abscheidung und geologische Speicherung (CCS) bei Import von grünem Kohlenstoff aus Ländern mit kostengünstigen erneuerbaren Energien

Im S4C-KN Szenario wird die Annahme getroffen, dass die nicht vermeidbaren CO₂-Mengen der Zementindustrie über CCS-Verfahren direkt an den Industriestandorten abgeschieden und dauerhaft geologisch gespeichert werden¹.

Dies erfordert bis zum Jahr 2045 den Aufbau einer überregionalen CO₂-Infrastruktur, die den Transport von CO₂ von den Punktquellen zu Seehäfen (bspw. Rotterdam, Wilhelmshaven) und eine offshore Speicherung in der Nordsee ermöglicht.

Eine Abscheidung und Speicherung erfolgt auch bei den verbleibenden CO₂-Emissionen der Chemie-, Stahl- und Primäraluminiumindustrie, die ebenfalls an die CO₂-Infrastruktur angeschlossen werden. Die Glasindustrie wird in dem Szenario nur an Standorten mit der CO₂-Infrastruktur verbunden, die eine geringe räumliche Distanz zu anderen Industrien mit CCS haben. CCS im Energie-, Verkehrs- und Gebäudesektor ist in dem Szenario nicht vorgesehen, da energiebedingte CO₂-Emissionen durch die Nutzung von erneuerbaren Energien und Wasserstoff weitestgehend vermieden werden.

Der Aufbau einer überregionalen CO₂-Infrastruktur ist ein ambitioniertes Vorhaben, das sowohl Regulierung und Planung auf unterschiedlichen Politikebenen als auch öffentlich-private Kooperationen voraussetzt. Erforderlich sind zudem zwischenstaatliche Vereinbarungen zwischen Herkunftsländern des CO₂ und Ländern, die Speicherstätten betreiben. Eine wichtige Grundvoraussetzung ist neben verlässlichen Technologieoptionen für die Abscheidung, den Transport und geologische Speicherung der CO₂-Emissionen auch eine ausreichende gesellschaftliche Akzeptanz, von der in diesem Szenario als Annahme grundsätzlich ausgegangen wird.

Kompensation industrieller Restemissionen über negative Emissionen mit BECCS

Eine vollständige CO₂-Abscheidung ist in der Industrie technisch nicht möglich bzw. kann nicht an allen Standorten erfolgen, weshalb industrielle Restemissionen entstehen. Für das Erreichen von Klimaneutralität sind daher negative Emissionen notwendig.

Im S4C-KN Szenario wird von einer Kompensation der industriellen Restemissionen über negative Emissionen aus dem Einsatz von Bioenergie in Kombination mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (BECCS) ausgegangen. Biogener Kohlenstoff wird im Rahmen des BECCS Verfahrens über abfallbasierte Brennstoffe mit biogenen Kohlenstoffanteilen in der Zementindustrie sowie über Bioenergie in der Stahl-, Zement-, Kalk- und Glasindustrie verwendet.

Dafür ist ein ausreichendes Angebot an Bioenergie aus nachhaltigen und regionalen Quellen zu schaffen. Eine Grundvoraussetzung ist auch hier eine CO₂-Infrastruktur, mit der das CO₂ aus der Verbrennung von Biomasse in Industrieanlage abgeschiedenen und zu Speicherstätten transportiert werden kann. Negative Emissionen müssten ohne eine entsprechende Infrastruktur und natürliche CO₂-Senken ansonsten über eine Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre über Direct Air Capture (DAC)-Anlagen und eine dauerhafte CO₂-Speicherung (DACCS) erreicht werden. Dieser Technologiepfad wird in anderen

¹ Für Standorte der Klinkerproduktion in Süddeutschland, die nicht an die CO₂-Infrastruktur angebunden werden, wird von einer Bindung des abgeschiedenen CO₂ über Mineralisierung in Produkten ausgegangen.

Klimaschutzszenarien zugrunde gelegt, geht aber mit Herausforderungen in Bezug auf Energieeinsatz, Kosten und Flächeninanspruchnahme einher.

CCU (Kraftstoffe und chemische Grundstoffe)

Im S4C-KN Szenario spielt die Abscheidung und wirtschaftliche Nutzung von Kohlenstoff zur Deckung der in einem klimaneutralen Zielsystem weiterhin bestehenden Kohlenstoffbedarfe eine wichtige Rolle. Langfristig ist von einem großen Bedarf an nicht fossilem Kohlenstoff auszugehen. Aufgrund der direkten Abscheidung und dauerhaften Speicherung der prozessbedingten fossilen CO₂-Mengen der mineralischen Industrie kann dieser Kohlenstoff aber keiner stofflichen Nutzung für die Produktion von Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen zugeführt werden, wodurch es zu einer Trennung des CCS- und CCU-Pfads kommt.

Die Abscheidung und wirtschaftliche Nutzung von Kohlenstoff für die Herstellung von Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen erfolgt im S4C-KN Szenario über den Import von synthetischen Kraftstoffen und synthetischen Grundstoffen für die Chemieindustrie. Deren Herstellung erfolgt durch den Einsatz von atmosphärischem Kohlenstoff aus DAC-Anlagen. Aufgrund der Energieintensität findet dieses Verfahren in Ländern mit kostengünstigen erneuerbaren Energien sowie ausreichender Flächen- und Wasserverfügbarkeit statt.

Die Chemieindustrie importiert 2050 grüne Grundstoffe (synthetisches Naphtha und Methanol) aus dem Ausland. „Grünes“ Naphtha hat in Deutschland mit mehr als der Hälfte des Bedarfs an Grundstoffen weiterhin einen hohen Anteil.

Es wird von einem deutlich gesunkenen Bedarf an Kohlenwasserstoffen im Verkehr ausgegangen, der nach 2040 vollständig durch importierte flüssige synthetische Kraftstoffe auf Basis von Wasserstoff und CO₂ (E-Fuels) gedeckt wird. Nachfrager für E-Fuels sind neben Spezialfahrzeugen in erster Linie der Flugverkehr und die Seeschifffahrt. Bei einer umfassenden Elektrifizierung und Verwendung von Wasserstoff im Verkehrssektor ist in Deutschland bis 2040 eine Eigenversorgung mit fossilen Kraftstoffen bilanziell möglich.

In Übereinstimmung mit dieser Nachfrageentwicklung wird in dem Szenario ein schrittweiser Abbau von Raffineriekapazitäten angenommen, der mit der Schließung der letzten Raffinerien ab den 2040er Jahren zu einem Netto-Import von synthetischen Kraftstoffen führt.

Voraussetzung für dieses Szenario ist die Etablierung eines Weltmarkts für synthetische Grundstoffe und einer Transportinfrastruktur für die importierten Stoffe. Es wird angenommen, dass aufgrund der niedrigen Transportkosten für flüssige Kohlenwasserstoffe auch eine Herstellung in entfernten Ländern erfolgen kann. Nach der Einfuhr in Europa (bspw. über die Ölhäfen Rotterdam, Wilhelmshaven, Brunsbüttel und Rostock) kann ein Transport zu inländischen Flughäfen und Chemieparks über existierende Produktpipelines, Binnenschifffahrt oder Bahntransport erfolgen.

Eine weitere Bedingung für grüne synthetische Grundstoffe in der Chemieindustrie ist, dass diese „klimapositiv“ bewertet werden, dass also das CO₂ in Produkten im Rahmen einer Emissionsgutschrift mit dem bei der Herstellung der Grundstoffe aus der Atmosphäre entnommenen CO₂ ausgeglichen werden kann.

Im S4C-KN Hauptszenario hat daneben Biomasse als grüne Kohlenstoffquelle eine bestimmte, wenn auch eingeschränkte Bedeutung (ab 2040 auch als Energieträger). Resultierend aus einem begrenzten Butadien- und Benzol-Output in den getroffenen Annahmen zu HVC-Pfaden kommen im Jahr 2050 Biopolymere für etwa 9 % der HVC-Basis auf.

Es wird davon ausgegangen, dass heimische Biomasse (einschließlich Anbaubiomasse) in einem Umfang genutzt wird, der nach dritten Quellen als nachhaltig eingeschätzt wird. Ein nicht unerheblicher Teil wird energetisch und stofflich in der Industrie verwendet. Biomasse wird per Annahme ab dem Jahr 2045 nur in Verbindung mit BECCS verwendet

Die im Ausgangszustand noch auf fossile Kohlenstoff basierende Produktion wird damit bis 2050 auf zirkuläre bzw. grüne Produktionsverfahren umgestellt. Alternative fossile Kohlenstoffquellen (bspw. Shalegas) spielen in Deutschland im Unterschied zu anderen europäischen Ländern aufgrund der fehlenden Transportinfrastruktur keine Rolle.

Kohlenstoffbasierte Produkte

Kohlenstoffbasierte Rohstoffe werden in der Chemieindustrie für die Herstellung von Kunststoffprodukten benötigt. Diese fließen in dem modellierten Szenario nach ihrer Nutzung über ein mechanisches und chemisches Recycling wieder in die Kunststoffproduktion ein, werden in der Zementindustrie thermisch genutzt oder kommen Müllverbrennungsanlagen (MVA) zu.

CO₂-Emissionen aus der Verbrennung und thermischen Nutzung von Kunststoffabfällen werden im Szenariomodell als fossile Emissionen bilanziert. Unsicherheiten bestehen bei der Bindungsdauer von grünem Naphtha in Produkten, weshalb der aus der Atmosphäre dafür entnommene Kohlenstoff im Szenario nicht als negative Emissionen angerechnet wird.

Szenario-Varianten für den Raffineriesektor

Die klimaneutrale Transformation des Energiesystems führt zu großen Veränderungen im Raffineriesektor, da von einer umfangreichen bis vollständigen Senkung der Nachfrage nach fossilen Mineralölprodukten ausgegangen wird. Im Hinblick auf die Petrochemie und den Raffineriesektor werden daher neben dem Hauptszenario weitere Pfade für mögliche Kohlenstoffströme betrachtet, die sich insbesondere in der Art der chemischen Grundstoffe und der Bedeutung des Imports von Kohlenstoffen unterscheiden.

Neben der im Hauptszenario getroffenen Annahme eines vollständigen Imports synthetischer grüner Kohlenwasserstoffe bis 2040 werden die beiden Raffinerie-Varianten „Fossile Feedstock Raffinerie“ und „grüne NRW-Fischer-Tropsch-Raffinerie“ betrachtet. Gemeinsamkeit der drei Varianten ist, dass die in Zukunft deutlich gesunkene Nachfrage nach Kohlenwasserstoffen im Verkehrssektor durch synthetische Kraftstoffe gedeckt wird.

- Die im Hauptszenario getroffene Annahme eines Imports von synthetischen Kohlenwasserstoffen ist auch aus Kostengründen die verbreitetste Variante in Klimaschutzszenarien. Risiken in Bezug auf Versorgungssicherheit könnten durch eine hohe Diversifizierung von Exportländern ausgeglichen werden. Vorteile liegen insbesondere in der Herstellung von Grundstoffen über DAC und grünen Wasserstoff,

wodurch sich eine echte Senkenleistung für CO₂ und damit negative Emissionen aus der Herstellung von Grundstoffen ergeben.

- Bei der fossilen Feedstock-Raffinerie, als möglichem strukturkonservativen Übergangsszenario, wird weiterhin fossiler Kohlenstoff zur stofflichen Nutzung (v. a. in Kunststoffen) verwendet. Es kommt zu einem Import von „grünen“ Kraftstoffen und (fossilem) Rohöl. Für Klimaneutralität sind umfangreiche Kompensationen etwa über DACCS notwendig. Ein Unterschied zum Hauptszenario sind auch höhere Strombeschaffungskosten durch die inländische Raffinierung und Elektrifizierung von Steamcrackern. Aus industriepolitischer Sicht können Vorteile bei der Sicherung von Standorten und Beschäftigung liegen. Über die Weiternutzung von fossilen Rohstoffen können sich Risiken in Bezug auf zukünftige Rohstoffverfügbarkeit auf dem Weltmarkt, Kosten und Akzeptanzprobleme bei zunehmenden Betriebsauflagen ergeben.
- Bei der „grünen NRW-Fischer-Tropsch-Raffinerie“ wird eine in Deutschland angesiedelte Raffinerie zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen eingesetzt. Es könnte eine hohe Selbstversorgung mit Kohlenwasserstoffen erreicht werden, allerdings bei zunehmender Abhängigkeit von Biomasse- und Wasserstoffimporten. Für eine umfassende Bewertung dieser Variante im Hinblick auf Kosten und THG-Emissionen ist eine Systemperspektive notwendig. Denkbar wäre die Variante bei einer angestrebten Selbstversorgung europäischer Länder mit Kraft- und Grundstoffen.

Vergleich der Varianten „Import/CCS“ (Hauptszenario) und „CCU_{CH}/ DACCS“ (Alternativpfad)

Eine zentrale Annahme im Szenario S4C-KN ist der Import von synthetischen Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen auf Basis von Kohlenstoff aus DAC-Anlagen mit der geologischen Speicherung industrieller CO₂-Mengen („Import/CCS“). Die Frage nach dem Umgang mit einerseits den nicht vermeidbaren Emissionen aus der mineralischen Industrie und andererseits den weiterhin bestehenden Bedarfen an Kohlenstoff in der chemischen Industrie und für Treibstoffe legen allerdings auch eine inländische Verwendung des industriellen CO₂ für die Erzeugung von Kohlenwasserstoffen und Methanol (CCU_{CH}) nahe.

Es wird in dem Szenariobericht daher auch der Vergleichsfall betrachtet, bei dem für verbleibende Bedarfe an Kohlenwasserstoffen für Flugzeugtreibstoffe und Kunststoffe inländische industrielle CO₂ Emissionen und importierter Wasserstoff in Kombination mit einer Kompensation über DACCS verwendet wird („CCU_{CH}/DACCS“). Die Prämisse der beiden Pfade ist, dass beide Ansätze zu einem klimaneutralen Zielsystem führen und den Bedarf an Kohlenstoff in der Chemie- und Kraftstoffindustrie decken (siehe Tabelle 2.1) für einen Vergleich der beiden Szenario-Varianten).

	Import/CCS (Hauptszenario)	CCU _{CH} /DACCS (Alternativpfad)
CO ₂ -Abscheidung	CO ₂ -Abscheidung an Industrieanlagen	
CO ₂ -Speicherbedarf	prinzipiell identisch	

DAC CO ₂ -Menge	prinzipiell identisch	
Infrastruktur	• DAC-Anlagen in Herkunftsländern synthetischer Stoffe ("Sweet Spots" für erneuerbare Energien) • Transport industrieller CO₂-Mengen zu Offshore-Speicherstätten • Transportinfrastrukturen für Import flüssiger Kohlenwasserstoffe und Methanol (prinzipiell vorhanden)	• DAC-Anlagen in räumlicher Nähe zu CO₂-Speicherstätten • CO₂-Transport von Industrieanlagen zu Standorten der CO₂-Nutzung • H₂-Transport nach Deutschland

Tabelle 2.1: Vergleich der Szenario-Varianten „Import/CCS“ (Hauptszenario) und „CCU_{CH}/DACCS“ (Alternativpfad) (In Anlehnung an SCI4climate.NRW 2023b)

Eine Gemeinsamkeit ist in beiden Varianten die CO₂-Abscheidung an Industriestandorten und die CO₂-Speichermengen. Während bei der Variante „CCU_{CH}/DACCS“ aber eine geringe Entfernung von DAC-Anlagen und CO₂-Speicher vorteilhaft ist, sind im Hauptszenario bei der Annahme „Import/CCS“ die Transportnetzwerke zwischen Industriestandorten und Speicherstätten entscheidend (sowie von DAC-Anlagen und Produktionsstandorten von synthetischen Stoffen in den Exportländern). Es kann von einer identischen Menge des mit DAC-Anlagen aus der Atmosphäre entnommenen CO₂ ausgegangen werden, die im Wesentlichen dem industriellen Kohlenstoffdurchfluss bei der Herstellung von Kunst- und Kraftstoffen entspricht („CCU_{CH}/DACCS“: Ableitung aus zu kompensierenden CO₂-Emissionen, „Import/CCS“: Ableitung aus verwendeten Kraft- und Grundstoffen). Beide Varianten unterscheiden sich besonders in der benötigten Transportinfrastruktur. Ein erhöhter Bedarf für CO₂-Transport ergibt sich in der Variante „Import/CCS“ aus der Leitung von industriellem CO₂ von Seehäfen zu geologischen Speicherstätten, wohingegen in der Variante „CCU_{CH}/DACCS“ ein Wasserstofftransport nach Deutschland erfolgen muss. Aus den Effizienzverlusten beim Wasserstofftransport folgt dabei ein deutlicher erhöhter Energiebedarf. Beim Transport von Kohlenstoffen können in größerem Maße bestehende Transportoptionen genutzt werden. Aus energetischen und wirtschaftlichen Gründen wird im Szenario S4C-KN daher von einem Import von synthetischen Kraftstoffen und Grundstoffen (Variante „Import/CCS“) und nicht der heimischen Produktion ausgegangen.

Allerdings können staatliche Regulierung und Partnerschaften mit Exportländern von Wasserstoff zu Änderungen in der zugrunde gelegten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung führen. Eine sinnvolle Möglichkeit für den CCU_{CH} Pfad der heimischen Produktion von synthetischen Kraftstoffen und Grundstoffen kann in einer Übergangsphase (ca. 2030-2045) zu einem klimaneutralen Zielsystem bestehen, wenn die Rahmenbedingungen für „Import/CCS“ noch nicht vorhanden sind. Einschränkende Faktoren könnten jedoch die Verfügbarkeit von Wasserstoff und die Amortisationszeiten der erforderlichen Anlagen sein.

Einen Ausnahmefall bilden Standorte, bei denen langfristig keine sinnvolle Option für eine Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂-Mengen besteht. Für das Erreichen von Klimaneutralität wird angenommen, dass die CO₂-Emissionen an diesen Standorten in beiden Varianten über DACCS kompensiert werden.

2.5 Unternehmens- und Institutspektiven aus dem Rheinischen Revier

Die im Projekt „SCI4climate.NRW“ modellierten Kohlenstoffströme bieten eine Grundlage zum Verständnis einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft, basieren aber nur auf einem Szenario. Die Ergebnisse wurden mit Wirtschaftsakteuren im Rheinischen Revier diskutiert, woraus sich auch alternative Pfade und Entwicklungen sowie etwaige Einschränkungen ableiten lassen.

Die Diskussionen fanden im Rahmen des „Zukunftslabors Nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft“ des vom Land NRW finanzierten Projektes „IN4climate.RR“ statt. Das Ziel des Zukunftslabors ist die Entwicklung eines Gesamtbilds für eine industrielle Transformation mit Fokus auf die Kohlenstoffwirtschaft. Es sollen Kohlenstoffflüsse im Rheinischen Revier, Potentiale für eine Substitution von fossilen durch grünen Kohlenstoff und erforderliche Technologiepfade identifiziert werden. Ein weiterer Aspekt sind auch mögliche Impulse für die regionale Wertschöpfung und die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle (Zeiss, 2025c).

Die Diskussionen fanden im räumlichen Kontext des Rheinischen Reviers statt, thematisierten aber auch allgemeine Aspekte des Aufbaus einer Kohlenstoffwirtschaft, die nachfolgend zusammenfassend dargestellt werden (siehe Abbildung 2.4 für eine Übersicht der Diskussionsthemen).

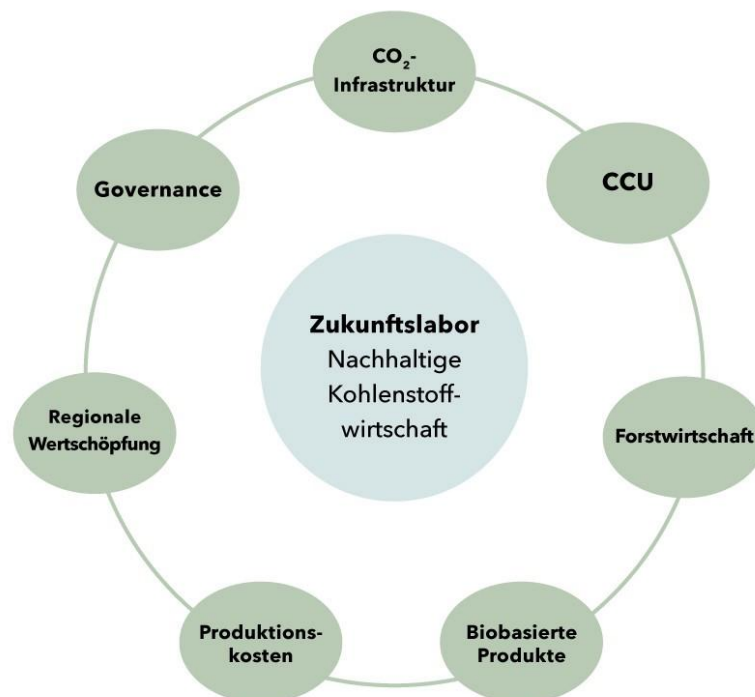


Abb. 2.4: Diskussionsthemen im „Zukunftslabor Nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft“ des Projekts „IN4climate.RR“ (eigene Darstellung)

In der Diskussion wurde schnell deutlich, dass die beispielhafte Struktur des Szenarios aus S4C-KN nicht alle für das Rheinische Revier zentralen Pfade abbildet. In Abbildung 2.5 ist ein von den Akteuren des Zukunftslabors als zentral identifizierter Pfad von den Energiepflanzen zur chemischen Industrie ergänzt worden. Die für das Verständnis der

Kohlenstoffwirtschaft im Revier besonders relevanten Pfade sind in grün und gelb hervorgehoben und wurden im Zukunftslabor intensiv diskutiert.

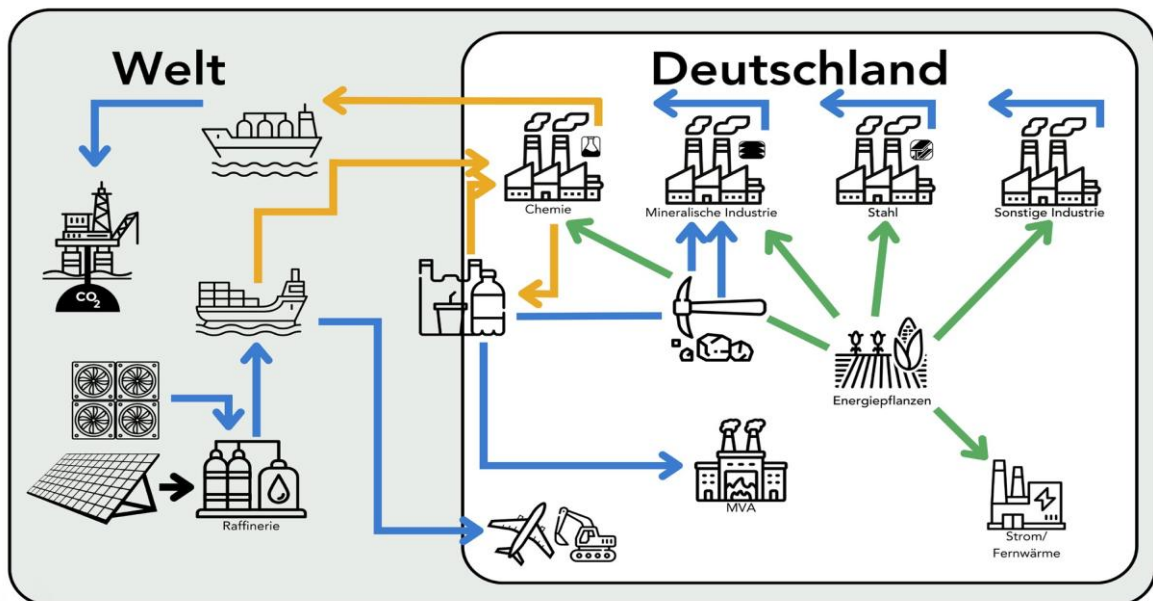


Abb. 2.5: Übersicht einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft auf Basis von Klimaneutralitätsszenarien mit

Ergänzung aus dem Zukunftslabor Nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft von IN4climate.RR (in Anlehnung an SCI4climate.NRW 2023b: 16)

CO₂-Infrastruktur:

Es wurde über die CO₂-Infrastruktur diskutiert, die sich aus den modellierten Kohlenstoffströmen im Szenario S4C-KN ergibt und für eine Vernetzung von Kohlenstoffquellen, Speicherstätten und potenziellen Nutzern erforderlich ist. Ein regionaler Transportbedarf ergibt sich insbesondere von industriellen Punktquellen bis zu Transporthubs. Im Rheinischen Revier wird dieser Transport gemäß Einschätzung der Diskussionsteilnehmenden des Zukunftslabors am ehesten über Schienentransport als durch eine Pipeline-Anbindung stattfinden. Als konkrete Herausforderungen wurden bislang fehlende Genehmigungen und der noch unklare regulative Rahmen hervorgehoben. Diese Aspekte werden als überregionale Themen mit hoher Dringlichkeit bewertet.

CCU und Kohlenstoffquellen:

Im Zukunftslabor wurde die im Szenario vertretene zentrale Annahme eines Imports von synthetischen Kraft- und Grundstoffen diskutiert (anstatt der Nutzung von nicht vermeidbaren CO₂-Mengen aus den Prozessen von heimischen Industrieunternehmen). Aufgrund der fehlenden Punktquellen sind CCU-Prozesse auf der Grundlage prozessbedingter CO₂-Emissionen im Rheinischen Revier auch nicht vorstellbar.

Es wurde aber dafür plädiert, die stoffliche Nutzung industrieller Emissionen im erweiterten Raum (v. a. Rheinschiene) und auf nationaler Ebene zu berücksichtigen, da dies für einen umfassenden Blick auf die Kohlenstoffwirtschaft von Bedeutung sei. Aspekte der Bilanzierung und Wirtschaftlichkeit sollten näher untersucht werden. CCU / Synthese

(bspw. Pyrolyse) an Müllverbrennungsanlagen könnte einen weiteren zu berücksichtigenden Technologiepfad darstellen.

Allerdings sind die prozessbedingten CO₂-Mengen etwa in der mineralischen Industrie fossilen Ursprungs, so dass daraus erzeugte Produkte (z. B. SynFuels) nicht klimaneutral sind. Aus heutiger Sicht kann dies für eine Übergangszeit als Effizienztechnologie sinnvoll sein, eine Investition in einen Technologiepfad, der heute schon absehbar endlich ist, erscheint aber nicht sinnvoll. Vor dem Hintergrund wurde auch diskutiert, Wertschöpfungsketten für Produkte mit einer langfristigen Kohlenstoffbindung zu entwickeln.

In den Diskussionen wurde hervorgehoben, dass alle nachhaltigen Kohlenstoffquellen und nicht nur biogene Stoffe zu berücksichtigen sind. Der Fokus einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft sollte aufgrund der begrenzten Flächenverfügbarkeit und der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion nicht nur auf Biomasse liegen. Grundsätzlich berücksichtigt werden sollte neben CO₂ aus industriellen Punktquellen auch Kohlenstoff aus DAC-Anlagen, biogenen Reststoffen, chemisch recycelten Kunststoffen und organisch belasteten Erden. Holz sollte zukünftig in einem Kaskadenprozess genutzt und erst im letzten Schritt für die Verbrennung verwendet werden.

Forstwirtschaft:

Ein weiteres Diskussionsthema war die Senkenfunktion der Forstwirtschaft. Es sollte berücksichtigt werden, in welchen Bereichen CO₂-Emissionen unter Nutzung von Holz eingespart werden könnten. Einschränkend wurden dabei die begrenzten Potentiale von Wirtschaftswäldern genannt. Holzersatz durch Fasern sollte ebenfalls in Erwägung gezogen werden. Der Austausch zwischen Industrie, Gesellschaft, Forschung und Forstwirtschaft sollte dafür gestärkt werden.

Biobasierte Produkte und ihrer Syntheserouten:

Es fand eine Diskussion zu biobasierten Produkten und ihren Syntheserouten statt. Dabei ging es im Wesentlichen um die Frage, ob es zu Veränderungen in den Produkten von Unternehmen kommt oder sich nur andere Syntheserouten für die Herstellung der Ausgangsmaterialien ergeben. Ein Beispiel aus dem Projektkontext ist die Herstellung von Alltagsprodukten wie Tellern und Bechern aus Pektin aus Rübenschnitzelabfällen. Die Einschätzung der Diskussionsteilnehmenden ist, dass es für Unternehmen nur wenig Veränderungen gibt, wenn Produkte auf der Grundlage von biogenem Kohlenstoff hergestellt werden. In vielen Bereichen würden Produkte wie Verpackungen oder Polymere damit weiter zur Verfügung stehen. Ebenfalls diskutiert wurden Wachstumspotentiale bei biobasierten Produkten und Märkten. Diese werden vor allem bei ungenutzten Reststoffen, Dämmmaterialien aus Holz oder auch Design for Recycling Konzepten gesehen.

Produktionskosten klimafreundlicher Produkte:

Ein weiteres Thema waren die in der Regel höheren Produktionskosten von klimafreundlichen Produkten und die Zahlungsbereitschaft dafür bei den Endverbraucher*innen. Als wichtigster Faktor für die Erhöhung der Zahlungsbereitschaft wurde benannt, dass nachhaltige Produkte sich durch eine höhere Qualität und einen Mehrwert gegenüber konventionellen Produkten kennzeichnen sollten. Dies kann sich auf verschiedene Eigenschaften des Produkts wie Komfort, Erlebnis, Image oder Haltbarkeit

beziehen. Informationsangebote und Best-Practice-Sustainability-Products könnten der Vermittlung dieses Mehrwerts dienen. Ein einheitliches Nachhaltigkeits-Label einer offiziellen, unabhängigen Stelle würde eine verlässliche Grundlage für die Bewertung von klimafreundlichen Produkten sein. Ebenfalls diskutiert wurde, ob über regulative Maßnahmen der Preis von klimafreundlichen und konventionellen Produkten angeglichen werden sollte.

Rolle von Regionen und regionale Wertschöpfung:

Regionen können in einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft unterschiedliche Rollen einnehmen. Sie können als Räume für die Bereitstellung von Biomasse aus der Landwirtschaft, als Produktionsstandort für Zwischenprodukte für die chemische Industrie, den Anlagen und Komponentenbau für die Bereitstellung und Verarbeitung von grünem Kohlenstoff und als Forschungsstandorte fungieren. Damit einher gehen verschiedene Auswirkungen auf die regionale Wertschöpfung und Beschäftigung.

Grundsätzlich bestand in den Diskussionen ein Einverständnis, dass eine regionalisierte Betrachtungsweise von Bedeutung ist, um diese wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft adäquat adressieren zu können. Erforderlich sei auch eine Analyse von Technologiekomponenten, die bereits heute in Regionen produziert werden und die als Keimzellen künftiger Wertschöpfungsketten einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft fungieren können.

Governance der Kohlenstoffwirtschaft:

Neben alternativen Kohlenstoffströmen und den Auswirkungen auf die regionale Wertschöpfung wurden auch Fragen der Governance, d. h. der kooperativen Steuerung einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft diskutiert. Als Faktoren einer erfolgreichen Governance wurden folgende Aspekte identifiziert:

- Etablierung einer Modellregion für eine nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft
- Beschleunigung von Genehmigungsverfahren bei neuen Technologien und Infrastrukturen
- Institutionalisierung von Vernetzungsformaten zwischen Unternehmen, Politik und Wissenschaft
- Identifizierung vorhandener Biomasse- und Kohlenstoffströme zur Ermöglichung von Innovationen und integrierter Planung
- Generierung von Wissen und Informationsvermittlung zu neuen Technologien (bspw. Pilotprojekte, Technologietransfer)
- Nutzung der Vorteile der Digitalisierung bei der intelligenten Vernetzung von Prozessen und Rohstoffen

2.6 Zusammenfassung und Fazit

Klimaneutralitätsszenarien wie S4C-KN aus dem Projekt „SCI4climate.NRW“ verdeutlichen, dass es im Zuge der klimaneutralen Transformation zu einer grundlegenden Veränderung der wirtschaftlichen Nutzung von Kohlenstoff kommen wird. Entscheidend wird die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft sein, um eine Freisetzung von fossilem Kohlenstoff in die Atmosphäre zu verhindern und zugleich die weiterhin bestehenden Kohlenstoffbedarfe für Grundstoffe für die Chemieindustrie zu decken.

Wie das Szenario S4C-KN, aber auch andere Klimaneutralitätsszenarios zeigen, werden CCS und CCU zentrale Technologiepfade sein. CCS-Verfahren werden insbesondere für die nicht vermeidbaren CO₂-Emissionen der mineralischen Industrie und zur Realisierung negativer Emissionen eingesetzt. CCU-Pfade sind für die Versorgung der Industrie mit Kohlenstoff notwendig.

Wichtige Unterschiede in den Szenarien für eine Kohlenstoffwirtschaft liegen in den Annahmen zu den genutzten Kohlenstoffquellen für CCU und insbesondere der Frage, ob auch fossile Prozessemissionen aus der Industrie einbezogen werden sollen. Je nach Ausgestaltung und Verbindung der CCS- und CCU-Pfade ergeben sich unterschiedliche infrastrukturelle, wirtschaftliche und regulative Implikationen, welche für die Realisierung einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft zu berücksichtigen sind.

Es bestehen dabei zahlreiche offene Fragen zur systemischen Ausgestaltung einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft, die sich um die zentralen Herausforderungen der Vermeidung von zusätzlichen CO₂-Emissionen und der Deckung von weiterhin bestehenden industriellen Kohlenstoffbedarfen drehen, u. a.:

- Wie gelingt eine vollständige Kreislaufführung von Kohlenstoff?
- Welche Importe von synthetischen Kraft- und Grundstoffen werden notwendig sein?
- Welche klimafreundlichen Kohlenstoffquellen sind grundsätzlich einsetzbar?
- Wie kann die benötigte CO₂-Infrastruktur aufgebaut werden?
- Wie können Recyclingraten bei Grundstoffen erhöht werden?
- Wie ist eine langfristige Bindung von Kohlenstoff in Produkten möglich?
- Wie wird mit dem vorhandenen Kohlenstoff in der Technosphäre umgegangen?

Wie die Diskussionen mit Wirtschaftsakteuren im Rheinischen Revier andeuten, kann die Etablierung einer Kohlenstoffwirtschaft neben positiven Klimaeffekten auch Potentiale für regionale Wertschöpfung und Beschäftigung freisetzen. Entscheidend ist dafür eine Berücksichtigung der jeweiligen räumlichen Rahmenbedingungen im Hinblick auf Kohlenstoffströme und bestehende Technologiepotentiale als auch die Implementierung geeigneter Governanceformate unter Beteiligung von Unternehmen, Politik und Forschung.

2.7 Literatur

SCI4climate.NRW. (2023b). *Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045–Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW*. Wuppertal Institut & Institut der deutschen Wirtschaft.

<https://www.energy4climate.nrw/>

fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2023/treibhausgasneutralitaet-indeutschland-bis-2045-szenario-cr-sci4climate.nrw.pdf

Zeiss, C. (2025c). *Zentrale Aspekte einer aktorsbasierten Diskussion und Umsetzung einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft*.

Abbildungsverzeichnis

S. 8: Abb. 2.1: Zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Gesamtsystems (ohne LULUCF und ohne Anrechnung von Negativemissionen durch den Import von grünem Naphtha) (SCI4climate.NRW 2023b: 13)

S. 9: Abb. 2.2 (und Hinweis): Überblick über verbleibende zentrale Kohlenstoffflüsse im klimaneutralen Zielsystem, Jahr 2050 (SCI4climate.NRW 2023b: 16)

S. 10: Abb. 2.3: Vergleich: Import von Kraftstoffen und Grundstoffen in Kombination mit geologischer Speicherung industrieller CO₂-Mengen („Import/CCS“, links) sowie inländisches CCUCH unter Verwendung von importiertem Wasserstoff in Kombination mit DACCS („CCUCH/DACCS“, rechts) (SCI4climate.NRWb: 96)

S. 16: Abb. 2.4: Diskussionsthemen im „Zukunftslabor Nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft“ des Projekts „IN4climate.RR“ (eigene Darstellung)

S. 17: Abb. 2.5: Übersicht einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft auf Basis von Klimaneutralitätsszenarien mit Ergänzung aus dem Zukunftslabor Nachhaltige Kohlenstoffwirtschaft von IN4climate. RR (in Anlehnung an SCI4climate.NRW 2023b: 16)

Tabellenverzeichnis

S. 14 + S. 15: Tabelle 2.1: Vergleich der Szenario-Varianten „Import/CCS“ (Hauptszenario) und „CCUCH/ DACCS“ (Alternativpfad) (In Anlehnung an SCI4climate.NRW 2023b)