



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.

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
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 III



Bewertung von Kohlenstoffströmen und deren Wertschöpfungspotentiale

Inhaltsverzeichnis

3.1 Einführung: Kohlenstoffkreisläufe	5
3.2 Studienauftrag für den Teilbericht III	5
3.3 Methodik und Systemgrenzen	5
3.4 Grundlagen einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft.....	6
3.4.1 Definition einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft.....	6
3.4.2 Kohlenstoffpfade am Beispiel der Kunststoffproduktion	9
3.5 Kriterien zur Bewertung von Kohlenstoffpfaden einer klimaneutralen Industrie.....	12
3.6 Potentielle Marktakteure bei der Erzeugung von negativen Emissionen (CDR).....	14
3.7 Literatur	17
Abbildungsverzeichnis	19

3.1 Einführung: Kohlenstoffkreisläufe

Aktuell laufen auf EU- und nationaler Ebene intensive Prozesse zur Organisation und Strukturierung einer zukünftigen Kohlenstoffwirtschaft. Dabei müssen zahlreiche Themen parallel berücksichtigt werden, wie zum Beispiel der Umgang mit unvermeidbaren CO₂-Emissionen aus der Industrie, die Nutzung und Konkurrenzsituation von Biomasse sowie der Aufbau von Infrastrukturen für den Transport und die Speicherung von CO₂. Politische und regulatorische Rahmenbedingungen beeinflussen maßgeblich, welche Geschäftsmodelle möglich oder ausgeschlossen sind. Die Vielzahl unterschiedlicher Kohlenstoffnutzungs- und Verarbeitungswege macht die Einschätzung und Bewertung potenzieller Geschäftsmodelle komplex und aufwendig. Die treibende Motivation für den Wandel weg von fossilen Rohstoffen ist der Klimaschutz. Daher müssen alle Modelle und Pfade robust gegenüber den Anforderungen der Klimaneutralität sein. Eine umfassende Betrachtung der Kohlenstoffströme ermöglicht eine klare Einschätzung, ob ein Geschäftsmodell klimaneutral ist oder ob weitere Maßnahmen erforderlich sind, um den Kohlenstoffkreislauf zu schließen. Da Klimaschutz das zentrale politische Ziel darstellt, bietet eine solche Betrachtung auch Aufschluss darüber, ob ein kohlenstoffbasiertes Geschäftsmodell langfristig tragfähig und politisch gewollt ist.

Ein entscheidender Meilenstein ist das Jahr 2045, da ab diesem Zeitpunkt Geschäftsmodelle mit Treibhausgasemissionen in Deutschland aufgrund der Klimaneutralitätsziele nicht mehr zulässig sein werden. Angesichts der kurzen verbleibenden Zeitspanne von etwa 20 Jahren sollten diese Vorgaben bereits heute in Investitionsentscheidungen für Infrastrukturen und Geschäftsmodelle einbezogen werden. Dieser Bericht gibt eine Übersicht über grundlegende Bewertungsaspekte einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft und zeigt Beispiele aus unterschiedlichen Zukunftsvisionen.

3.2 Studienauftrag für den Teilbericht III

Eine Wertschöpfung mit Kohlenstoff in einer klimaneutralen Industrie setzt voraus, dass Kohlenstoff insgesamt klimaneutral genutzt wird. Das beinhaltet Systemüberlegungen zum Einsatz von atmosphärischem oder biogenem Kohlenstoff, Aspekte der Kreislaufwirtschaft, CCUS-Konzepte, Kompensationsmöglichkeiten für Restemissionen und auch Fragen nach negativen Emissionen. Zusätzlich ist die Einordnung der Bewertung von Kohlenstoffpfaden zentral für die aktuelle Erarbeitung von politischen Rahmenbedingungen wie der nationalen Carbon Management Strategie sowie für die Einordnung der Kompatibilität von Prozess- und Wertschöpfungsketten zur Klimaneutralität. Daraus lassen sich z. B. auch heute schon potentielle Marktakteure für die Erzeugung von negativen Emissionen ableiten. Daher werden in diesem Teilbericht zentrale Aspekte zu der Bewertung von Kohlenstoffströmen aus einer Klimaneutralitätsperspektive dargestellt und auf Basis der aktuellen Literatur beschrieben. Dazu gehören eine Darstellung der Systemzusammenhänge und Optionen einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft sowie Angaben zu potentiellen Marktakteuren bei der Erzeugung von negativen Emissionen (CDR).

3.3 Methodik und Systemgrenzen

Eine Wertschöpfung mit Kohlenstoff in einer klimaneutralen Industrie setzt voraus, dass der Kohlenstoff insgesamt klimaneutral genutzt wird. Das beinhaltet Systemüberlegungen zum Einsatz

von atmosphärischem oder biogenem Kohlenstoff, Aspekte der Kreislaufwirtschaft, CCUS-Konzepte, Kompensationsmöglichkeiten für Restemissionen und auch Fragen nach negativen Emissionen. Zusätzlich ist die Einordnung der Bewertung von Kohlenstoffpfaden zentral für die aktuelle Erarbeitung von politischen Rahmenbedingungen wie der nationalen Carbon Management Strategie sowie für die Einordnung der Kompatibilität von Prozess- und Wertschöpfungsketten zur Klimaneutralität. Daraus lassen sich z. B. auch heute schon potentielle Marktakteure für die Erzeugung von negativen Emissionen ableiten.

Dieser Teilbericht beschreibt zentrale Aspekte der Bewertung von Kohlenstoffströmen aus einer Klimaneutralitätsperspektive, stellt die Systemzusammenhänge und Optionen einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft dar und skizziert potentielle Marktakteure bei der Erzeugung von negativen Emissionen (CDR).

Die Definition der klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft und der möglichen Akteure für Negative Emissionen fasst die Erkenntnisse aus nationalen Klimaneutralitätsszenarien (SCI4climate.NRW, 2023b), den Formaten zur Kohlenstoffwirtschaft aus NRW (Zeiss, 2025c), aktuellen Strategien der Bundesregierung (BMWK, 2024e, 2024a) sowie der EU (Europäische Kommission, 2024) und internen Diskussionen des Wuppertal Instituts zusammen.

Die Darstellung der grundsätzlichen Zusammenhänge der Kohlenstoffströme basiert auf einem vereinfachten Modell der globalen Ökosphäre auf Basis von Grundlagen der Kohlenstoffkreisläufe des IPCC (IPCC, 2021). Der Teilbericht wurde im Zeitraum zwischen Mai 2024 und Februar 2025 erstellt.

3.4 Grundlagen einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft

3.4.1 Definition einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft

Die Kohlenstoffwirtschaft beschäftigt sich mit der Bereitstellung, Verarbeitung, Nutzung und Speicherung von Kohlenstoffen zur Herstellung kohlenstoffhaltiger Produkte. Sie basiert auf der Grundannahme, dass klimaneutrale Kohlenstoffpfade bilanziell keine zusätzlichen klimawirksamen Kohlenstoffmengen aus der Lithosphäre in die Atmosphäre entlassen. Langfristig soll die Kohlenstoffwirtschaft einen Beitrag dazu leisten, klimawirksamen Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu entfernen, um damit dem Treibhausgaseffekt entgegenzuwirken. Eine weitere Grundannahme ist, dass Kohlenstoff ein Element darstellt, das aufgrund seiner vielfältigen Anwendungs- und Nutzungsmöglichkeiten auch in einer klimaneutralen Industrie weiter einen zentralen Stellenwert haben wird. Viele heute schon vorhandene Industriezweige sind aus dieser Sichtweise Bestandteil der Kohlenstoffwirtschaft, es werden im Zuge der Transformation zur klimaneutralen Industrie und der Abkehr des Einsatzes von fossilen Kohlenstoffquellen aber noch weitere Wertschöpfungsoptionen hinzukommen. Die klimaneutrale Kohlenstoffwirtschaft ist eine Betrachtungsebene, die Systemzusammenhänge sowie direkte und indirekte Wechselwirkungen zwischen bereits etablierten Wirtschaftsbereichen über Kohlenstoffströme sichtbar macht. Wichtige Teilbereiche der klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft sind daher die Bioökonomie, die Kreislaufwirtschaft, die Land- und Forstwirtschaft und die kohlenstoffbasierte Chemieindustrie.

Die **Bereitstellung von Kohlenstoff** wird, wie heute, einen wichtigen Faktor in der Aufstellung der Wertschöpfung in Deutschland darstellen.

- Biogene Kohlenstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft werden zentrale Quellen für die Herstellung chemischer Produkte darstellen und stehen in direkter Flächen-Verfügbarkeits- und Preiskonkurrenz zu anderen Biomassenutzungsoptionen. Insbesondere Rest- und Abfallstoffe bieten sich für eine stoffliche Nutzung an, werden aber von vielen Akteuren bereits nachgefragt. Die heimische Produktion von Biomasse wird die absehbare Nachfrage nach biogenem Kohlenstoff nicht befriedigen können, der Import wird daher eine wichtige Rolle spielen. In welcher Form biogener Kohlenstoff in Zukunft importiert werden wird, ist noch nicht klar, derzeit werden verschiedene Optionen abgewogen.
- Atmosphärischer Kohlenstoff über Direct Air Capture hat in allen Klimaneutralitätsszenarien eine wichtige Rolle, trotz des hohen Energieaufwandes dieser Technologie. Nennenswerte Mengen werden in Deutschland absehbar aufgrund der im Vergleich zu anderen Regionen geringeren Verfügbarkeit Erneuerbarer Energien nur über Importe eine Rolle spielen.
- Eine weitere Kohlenstoffquelle stellt die Nutzung bereits verarbeiteten Kohlenstoffs aus der Technosphäre dar, zum Beispiel aus Kunststoffabfällen oder Altreifen. Diese Mengen werden zur Deckung des Kohlenstoffbedarfes sehr wahrscheinlich benötigt, sind aber zum überwiegenden Teil aus fossilem Kohlenstoff hergestellt. Daher ist es notwendig, diese Mengen in einem eng kontrollierten Kreislauf zu führen, um treibhausgaswirksame Freisetzung von CO₂ zu verhindern.
- Es gibt auch Prozesse zur Produktion von Kalk und Zement, bei denen aufgrund des im Kalk gebundenen Kohlenstoffes prozessbedingte CO₂-Mengen anfallen. Da wir auch weiter diese Produkte benötigen, muss ein Umgang damit gefunden werden, der verhindert, dass klimawirksame Mengen in die Atmosphäre gelangen.
- Die Bereitstellung von Kohlenstoff durch biotechnologische Methoden ist ebenfalls eine Option, die allerdings mengenmäßig eingeschränkt ist und sich eher auf die Produktion von konkreten Produkten ausweitet.

Die **Verarbeitung von Kohlenstoffen** beinhaltet eine Vielzahl von Prozess- und Umwandlungstechnologien, da gebundener Kohlenstoff eine Vielzahl von Eigenschaften annehmen kann und die organische Chemie sich seit langer Zeit mit der Anwendung dieser Potentiale beschäftigt. Wichtige Branchen sind die chemische Industrie, die zum Beispiel Verpackungskunststoffe oder Klebstoffe herstellt. Auch die Verarbeitung von Holz im Baubereich oder in der Möbelindustrie wird weiterhin eine Rolle spielen. Wichtige Umwandlungstechnologien sind beispielsweise die Pyrolyse, die Methanisierung oder die Vergärung.

Bei der **Nutzung von Kohlenstoff** muss in einer klimaneutralen Kohlenstoffwirtschaft zwingend eine Kreislaufführung mitgedacht werden. Solange Kohlenstoff nicht energetisch verwertet wird, können nach Ende der Nutzung (zum Beispiel in der Bauwirtschaft oder bei Kunststoffabfällen) weitere Nutzungspfade eingebunden werden. Dazu gehört auch ein Sammlungs- und Aufbereitungssystem, um die eingesetzten Kohlenstoffprodukte in einer wirtschaftlich nutzbaren Menge zur Verfügung zu haben. Bei Einbindung von ursprünglich fossil basierten Kohlenstoffmengen muss diese Kreislaufführung geschlossen sein, um keine treibhausgaswirksamen Kohlenstoffmengen in die Atmosphäre zu entlassen. Die Behandlung von Mischströmen aus fossil und biogen basierten Kohlenstoffmengen setzt zumindest eine bilanzielle Trennung und einen differenzierten Umgang mit den Kohlenstoffmengen voraus.

Die langfristige **Speicherung von Kohlenstoffen** bietet für fossil basierten Kohlenstoff die Möglichkeit einer klimaneutralen Bilanz, für biogen oder atmosphärisch basierten Kohlenstoff sogar die Möglichkeit negative Emissionen zu realisieren. Für die Produktion von Kalk und Zement werden Pipelines benötigt, die das entstehende CO₂ abtransportieren und an entsprechende Speicherorte (zum Beispiel ehemalige Erdgaslagerstätten) transportieren. Hier bietet sich auch die Option der Einspeisung von CO₂ aus biogenen Quellen und damit die Erzeugung negativer Emissionen. Eine Nutzung des anfallenden CO₂ aus der Kalk- und Zementproduktion in CCU-Prozessen ist möglich, allerdings mit hohem Energieaufwand verbunden. Zusätzlich müssen die erzeugten Produkte den Kohlenstoff so langfristig binden, dass er keine Klimawirksamkeit mehr entfalten kann. Daher fallen viele Nutzungsmöglichkeiten für diesen Pfad weg.

Eine klimaneutrale Kohlenstoffnutzung setzt voraus, dass keine zusätzlichen klimawirksamen Kohlenstoffmengen in die Atmosphäre gelangen oder es zumindest einen bilanziellen Ausgleich durch negative Emissionen gibt (Pfeiffer et al., 2024). Da es aber eine Vielzahl von möglichen Pfaden inklusive Kreisläufen gibt, ist eine Betrachtung der einzelnen Bereiche, in denen Kohlenstoffe vorkommen, notwendig:

Lithosphäre: Die Lithosphäre ist der Bereich der Erdkruste, in dem sich erdgeschichtlich Kohlenstoffe angesammelt haben. Diese Kohlenstoffe stammen entweder aus anorganischen Sedimenten oder aus organischen Prozessen. Dieser Kohlenstoffspeicher ist erdgeschichtlich sehr stabil gewesen und hat nur wenig Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre freigesetzt. Durch die anthropogene Nutzung und Freisetzung von Kohlenstoff in Form von Erdgas, Erdöl, Kohle und Kalkgesteinen erwärmt sich die Erdatmosphäre zunehmend (IPCC, 2021). Jegliche Entnahme von Kohlenstoff aus der Lithosphäre führt zu einer weiteren Erderwärmung, außer der Kohlenstoff wird nach seiner Nutzung so umgewandelt, dass er langfristig gebunden ist und nicht als klimawirksames Gas wieder in die Atmosphäre entweicht. Die Speicherung von CO₂ in ausgeförderten Gasfeldern (CCS) ist eine Methode zur Rückführung von Kohlenstoff in die Lithosphäre.

Technosphäre: Die Technosphäre ist der gesamte von Menschen und dessen Technologien erschaffene Bereich. In diesem Bereich sind kohlenstoffbasierte Produkte in großer Menge vorhanden, werden genutzt und gelagert (Haff, 2014). Dabei handelt es sich um alle kohlenstoffbasierten Produkte wie Kunststoffe oder Straßenbeläge. Dabei ist es unerheblich, ob sich diese Produkte in der Nutzungsphase oder zum Beispiel auf einer Deponie befinden. Diese Kohlenstoffmengen sind fast ausschließlich fossilen Ursprungs und können über Prozesse wie das chemische Recycling oder andere Verfahren der Kreislaufwirtschaft wieder in eine Nutzung überführt werden. Derzeit werden sie allerdings überwiegend thermisch verwertet, damit gehen die Kohlenstoffe aus der Technosphäre in die Atmosphäre über.

Atmosphäre: Bei der Atmosphäre handelt es sich um die gasförmige Hülle des Planeten Erde. Die trockene Atmosphäre besteht fast ausschließlich aus Stickstoff (78,1 %) und Sauerstoff (20,9 %), zusammen mit einer Reihe von Spurengasen wie Argon (0,93 %), Helium und Treibhausgasen (THGs) wie Kohlendioxid (CO₂) (0,04 % Volumenmischungsverhältnis) Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und Ozon (O₃) (IPCC, 2022).

Biosphäre: Der Teil des Erdsystems, der alle Ökosysteme und Lebewesen, also Organismen umfasst, in der Atmosphäre, an Land (terrestrische Biosphäre) oder in den Ozeanen (Marine Biosphäre), einschließlich abgeleiteter toter organischer Substanz, wie Abfall, organische Bodensubstanz und ozeanischen Detritus (IPCC, 2022).

Weitere Bereiche wie die Hydrosphäre und die Cryosphäre sind für die Betrachtung der Klimaerwärmung wichtig, spielen bei der Pfadbetrachtung der heimischen Industrie jedoch nur eine kleine und indirekte Rolle und werden hier nicht vertieft betrachtet.

3.4.2 Kohlenstoffpfade am Beispiel der Kunststoffproduktion

In einem einfachen Beispiel (Abbildung 3.1) wird auf Basis von Erdöl aus der Lithosphäre in einem Hydrocracker das Erdöl aufgespalten und die Kohlenstoffe als Grundlage einer Kunststoffproduktion verwendet. Das Kunststoffprodukt wird nach Ende seiner Nutzungszeit über eine Müllverbrennungsanlage energetisch verwertet, das entstehende CO₂ wird in die Atmosphäre entlassen.

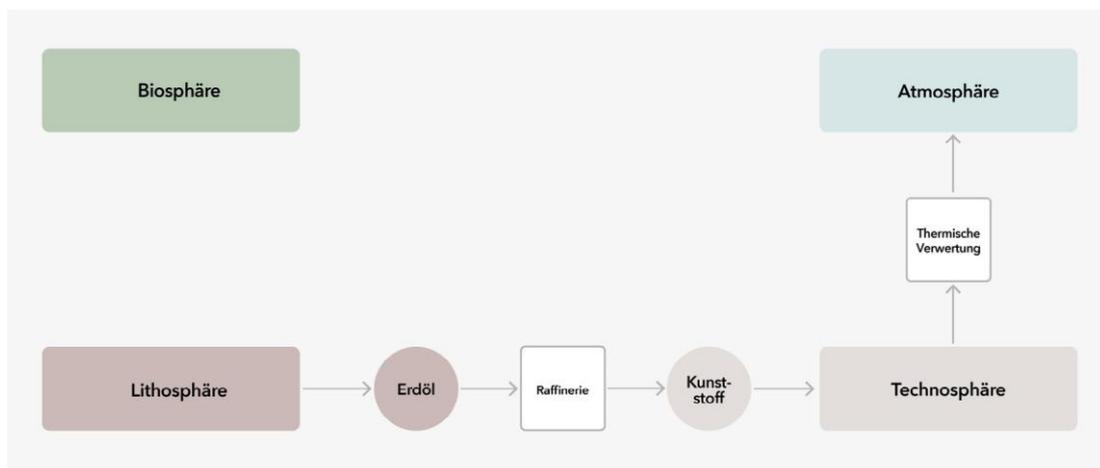


Abb. 3.1: Vereinfachter Kohlenstoffpfad konventioneller Kunststoff

Bei einer Darstellung von Pfaden einer klimaneutralen Kunststoffproduktion auf Basis fossiler Rohstoffe werden die Pfadbeziehungen deutlich komplexer. Das in Abbildung 3.2 gezeigte Beispiel behält die erdölbasierte Kunststoffproduktion bei. Auch hier wird das Kunststoffprodukt nach Ende der Nutzungsdauer eingesammelt. Als eine Kreislaufwirtschaftsoption ist hier das chemische Recycling gezeigt, durch das der Kohlenstoff wieder in die Produktion eingespeist werden kann. Zusätzlich wird das CO₂ aus der Verbrennung des Kunststoffes in einer Müllverbrennungsanlage aufgefangen, abgeschieden, über Pipelines zu einer Speicherstätte transportiert und da eingespeichert. Diese Pfade setzen aber voraus, dass die Kunststoffe vollständig in einen der beiden Pfade eingespeist werden und es nicht z. B. zum Export von Abfallmengen kommt. Zusätzlich ist der energetische und wirtschaftliche Aufwand für die beiden Pfade sehr hoch. Da eine Abscheidung von CO₂ in den entsprechenden Anlagen nicht zu 100 % erfolgt, braucht es hier auch weitere Optionen (wie zum Beispiel eine Kompensation durch negative Emissionen), die in dieser vereinfachten Darstellung aber nicht betrachtet sind.

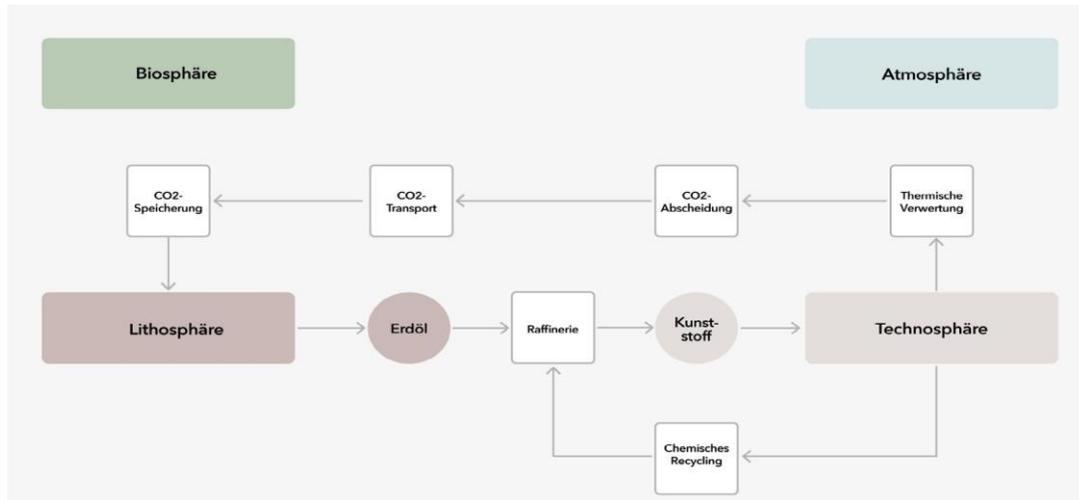


Abb. 3.2: Vereinfachte klimaneutrale Kunststoffproduktion mit CCS

Die Einbeziehung von biogenem und atmosphärischem Kohlenstoff in Abbildung 3.3 zeigt die Komplexität der Vermischung von biogenen, atmosphärischen und fossil basierten Kohlenstoffen. Während der biogene und der atmosphärische Anteil klimaneutral wieder in die Atmosphäre entweichen können, muss der fossile Anteil des Kohlenstoffes zumindest im Kreislauf geführt werden. Die Nachverfolgung des jeweiligen Anteils in den Produkten und Stoffströmen ist dabei komplex und setzt ein umfassendes Zertifizierungs- und Kontrollsystem voraus. Sollte wie in diesem Bild außerdem weiter fossiler Kohlenstoff in das System eingebunden werden, erhöht sich der Vorrat fossilen Kohlenstoffes in der Technosphäre immer weiter. Daher gehört unter dieser Betrachtung zu einem vollständigen Bild auch eine Methode, den fossilen Kohlenstoff wieder aus dem System zu entfernen.

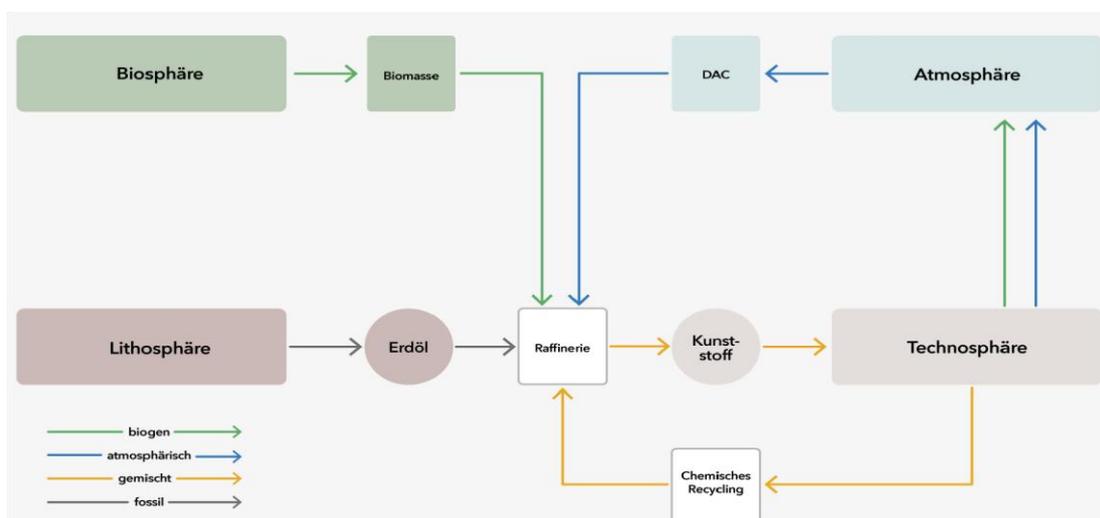


Abb. 3.3: Vereinfachte Darstellung einer klimaneutralen Kunststoffproduktion mit biogenem und atmosphärischem Kohlenstoff

Das ist in Abbildung 3.4 dargestellt, in dem ein zusätzlicher CCS-Pfad eingebunden wurde. Der Aufbau einer CCS-Infrastruktur ermöglicht zusätzlich bei Einspeisung von Kohlenstoffmengen aus der Biosphäre oder der Atmosphäre die Erzeugung negativer Emissionen. Allerdings wäre der

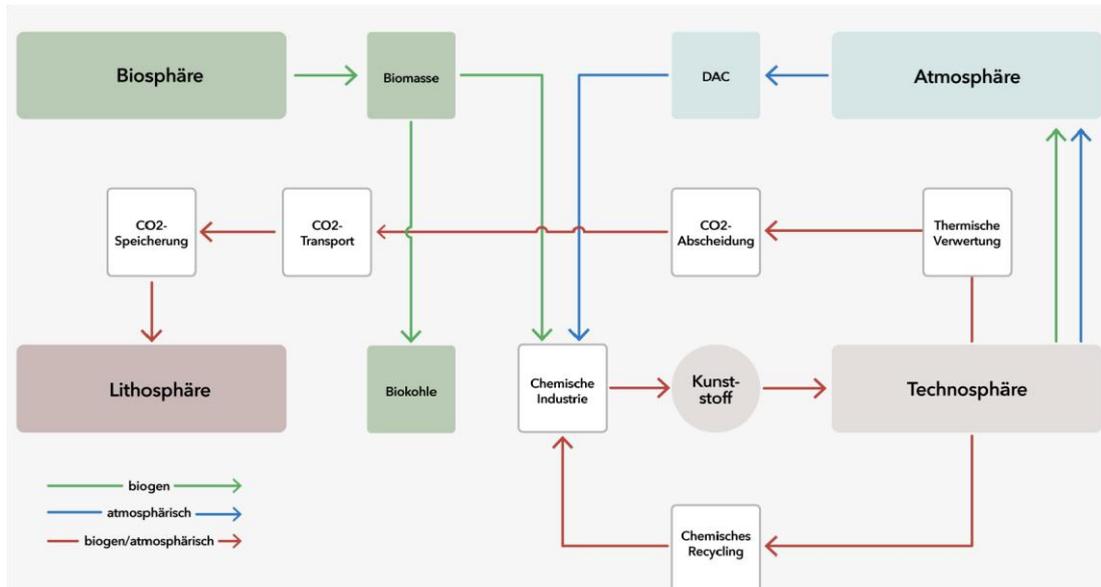


Abb. 3.5: Pfaddarstellung negativer Emissionserzeugung durch BECCS und Biokohle in Verbindung mit der Herstellung von Kunststoffen

3.5 Kriterien zur Bewertung von Kohlenstoffpfaden einer klimaneutralen Industrie

Die Bewertung von Kohlenstoffpfaden ist eine zentrale Voraussetzung bei der Einschätzung, ob ein Produkt oder ein Produktionspfad in einer klimaneutralen Industrie noch eine Rolle spielen kann. Das gilt insbesondere für Investitionsentscheidungen in Anlagen, Infrastrukturen oder komplexerer Produktionssysteme. Pfade, die den Herausforderungen einer Klimaneutralität nicht entsprechen, werden auf Basis der aktuellen Gesetzgebung auf deutscher Ebene in spätestens 20 Jahren nicht mehr möglich sein. Bei einer Investition in nicht klimaneutrale Pfade sollte daher berücksichtigt werden, dass diese Investitionen in diesem Zeitraum abgeschrieben sind und bis dahin alternative Produkte oder Produktionswege gefunden werden. Je nach strategischer Aufstellung des Unternehmens kann es daher heute schon sinnvoll sein, in klimaneutrale Strukturen zu investieren, um keine stranded investments zu generieren.

Der Ersatz von fossilen Kohlenstoffen in der Strom- und Wärmeerzeugung ist heute schon alltäglicher Gegenstand strategischer Überlegungen von Unternehmen, der Ersatz von fossilem Kohlenstoff in der stofflichen Nutzung ist allerdings noch deutlich weniger breit diskutiert. Die Diskussion des Carbon Managements auf nationaler (BMWK, 2024a) und europäischer (Europäische Kommission, 2024) Ebene konzentriert sich derzeit noch auf den Aufbau einer CCS-Infrastruktur und unvermeidbar anfallende CO₂-Mengen aus der Zement- und Kalkproduktion. Es gibt allerdings, nicht zuletzt in Nordrhein-Westfalen, schon länger Überlegungen, auch die stoffliche Seite der Kohlenstoffwirtschaft mit in das Carbon Management aufzunehmen (MWIDE, 2021).

Um den Einsatz von Kohlenstoff auf seine Eignung für eine klimaneutrale Industrie zu bewerten, sind einige grundlegende Kriterien zu definieren, die sich aus der oben durchgeführten systemischen Kohlenstoffflüssen ableiten.

Herkunft des Kohlenstoffes: Kohlenstoff kann aus verschiedenen Quellen genutzt werden, die jeweils andere Voraussetzungen haben.

- **Lithosphäre:** Hier handelt es sich grundsätzlich um Kohlenstoff fossilen Ursprungs, dessen Freisetzung in die Atmosphäre als Treibhausgas zur Erderwärmung beiträgt. Die wichtigsten Kohlenstoffquellen sind Erdöl, Erdgas, Braun- und Steinkohle sowie kalkhaltige Gesteine.
- **Technosphäre:** Dieser Kohlenstoff wurde bereits verarbeitet und zu Produkten geformt. Dazu gehören zum Beispiel Kunststoffe, Autoreifen oder teer- oder bitumenhaltige Straßenbeläge. Die heute in der Technosphäre enthaltenen Kohlenstoffe sind überwiegend fossilen Ursprungs, mengenmäßig fällt derzeit nur Holz als Baustoff ins Gewicht (16,5 % des globalen Kohlenstoffvorrats in der Technosphäre in 2015 (Kaufmann et al., 2024). Bei der Nutzung von Kohlenstoff aus der Technosphäre muss also heute davon ausgegangen werden, dass es einen hohen fossilen Anteil gibt, außer es werden konkrete biogene Reststoffe wie Bauholz verwendet.
- **Biosphäre:** Kohlenstoff aus der Biosphäre wird derzeit grundsätzlich als klimaneutral angesehen, da der darin enthaltene Kohlenstoff durch Photosynthese aus der Atmosphäre entnommen wurde. Im Gesamtsystem kann aber zusätzlich noch fossiler Kohlenstoff eingesetzt worden sein, sei es durch Herstellung und Nutzung von Düngemittel oder den Transport der Biomasse. Zusätzlich ist der Anbau von Biomasse immer auch mit Umweltauswirkungen verbunden.
- **Atmosphäre:** Der in der Atmosphäre enthaltene Kohlenstoff kann durch Direct Air Capture entnommen und genutzt werden. Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre ist allerdings sehr gering, daher sind hohe Energieaufwendungen aus erneuerbaren Energien notwendig. Bei der Weiterverarbeitung des CO₂ zu Kohlenwasserstoffen (z. B. für die organische Chemie) sind zusätzlich große Energiemengen z. B. für den benötigten grünen Wasserstoff notwendig. Daher wird derzeit angenommen, dass nennenswerte DAC-Kapazitäten dort entstehen, wo erneuerbare Energien in großen Mengen und zu geringen Kosten vorhanden sind (IEA, 2022).

Lebensdauer der Produkte mit Kohlenstoff: Ein weiteres wichtiges Kriterium ist der Zeitraum, in dem Kohlenstoff in Produkten gebunden werden kann. Die EU-Kommission schlägt für die Anrechnung von negativen Emissionen im Rahmen des europäischen Emissionshandels eine Bindungsdauer von „zumindest mehreren Jahrhunderten“ vor (Council of the European Union, 2024). Auf Basis dieser Definition können fossil basierte Kohlenstoffe nicht mehr in kurzlebigen Anwendungen wie zum Beispiel Treibstoffen oder mittelfristigen Anwendungen wie im Baubereich genutzt werden. Anwendungen, in denen die Materialien durch eine Wiederverwendung im Kreislauf gehalten werden können, wären nach dieser Definition möglich. Allerdings ist die reine Möglichkeit der Kreislaufführung nicht ausreichend, um als permanent gebunden zu gelten, die Kreislaufführung muss schon der „normale Nutzen“ der Produkte sein.

Dokumentation der Zusammensetzung und des Verbleibs des Kohlenstoffs: Um nachvollziehbar die Kohlenstoffbilanz eines Produktes nachweisen zu können, braucht es Dokumentationen der Herkunft, der Verwendung und des finalen Verbleibs des Kohlenstoffes. Entsprechende Nachweissysteme werden sich entwickeln, zumindest eine Dokumentation ähnlich einer Lieferkette wird in Zukunft notwendig sein. Es wird einen großen Anreiz geben, fossilen Kohlenstoff als grünen Kohlenstoff umzudeklarieren, da Verfügbarkeit und Preis sich sehr unterscheiden werden. Eine Deklaration der Zusammensetzung von Kohlenstoffimporten auf EU-Ebene ist dafür eine zwingende Voraussetzung. Ein Zertifizierungs- und Nachweisregime ist heute bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Biotreibstoffe) noch nicht vorhanden.

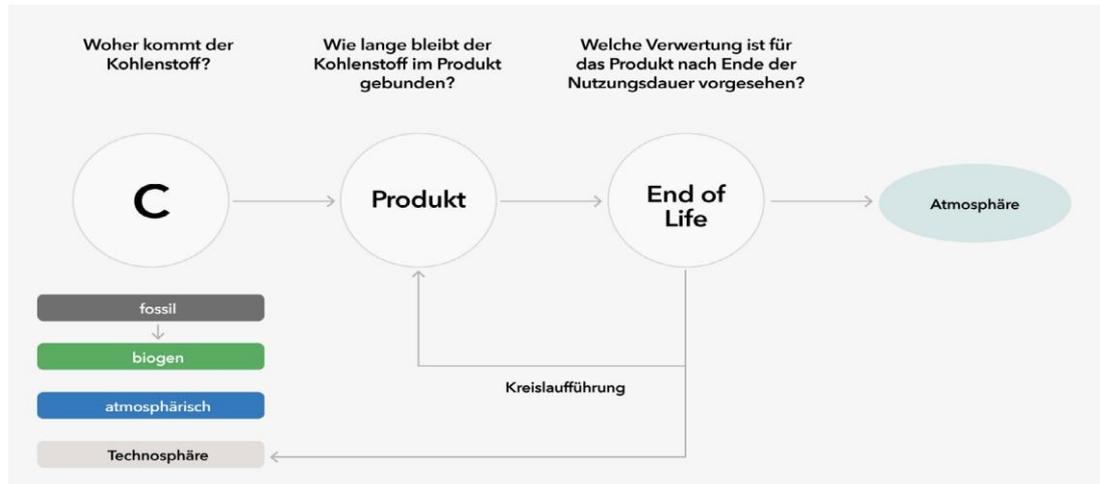


Abb. 3.6: Einfache Struktur zur Prüfung der Klimaneutralität des produktgebundenen Kohlenstoffes

3.6 Potentielle Marktakteure bei der Erzeugung von negativen Emissionen (CDR)

Es ist aus heutiger Sicht absehbar, dass eine Erreichung der Klimaneutralitätsziele bis 2045 eine Nachfrage nach Zertifikaten für negative Emissionen auslösen wird. Aus heutiger Sicht ist es allerdings noch unklar, aus welchen der vorstellbaren Optionen diese negativen Emissionen generiert werden. Sicher ist allerdings, dass der Europäische Emissionshandel durch entsprechende Regelwerke und Rahmenbedingungen ergänzt wird (Council of the European Union, 2024). Wenn man davon ausgeht, dass in Zukunft unvermeidbare technische Emissionen auch durch technisches CDR kompensiert werden, eröffnen sich hier Wertschöpfungsmöglichkeiten für unterschiedliche Branchen.

Wer könnte negative Emissionszertifikate nachfragen?

Nachfrager für negative Emissionszertifikate werden Akteure sein, die in geringem oder größerem Maße weiter treibhausgaswirksame Gase emittieren. Die Gründe dafür können unterschiedlich sein. So müsste bei der Nutzung von fossilem Methan trotz eventuell angeschlossener CCS-Anlage der Methanschluß während des Transportes kompensiert werden. Zusätzlich kann es auch 2045 in Industrieanlagen weiter dezentral emittiertes CO₂ oder andere klimawirksame Gase geben, die aufgrund des dezentralen Anfalls und der geringen Mengen nicht aufgefangen werden können oder deren Auffangen mit sehr hohen Kosten verbunden wäre. Auch ist vorstellbar, dass bestimmte Anwendungsfälle z. B. für fossile Kraftstoffe bei der Bundeswehr nur schwer zu ersetzen sind, hier wäre die Kompensation durch CDR-Zertifikate ebenfalls eine Option. Darüber hinaus könnte auch in einem Übergangszeitraum bis 2045 in Einzelfällen eine Kompensation von Emissionen kostengünstiger sein als die Änderung komplexer Industrieprozesse. Solche Nachfragen treffen allerdings auf einen sich erst entwickelnden Markt für CDR-Zertifikate, der langfristig von hohen Preisen und/oder Kohlenstoffkonkurrenzen z. B. bei der Biomasse geprägt ist.

Wer könnte negative Emissionszertifikate anbieten?

Option 1: Anbietersysteme

Anbieter wären aus heutiger Sicht in vielen Fällen komplexe, durch Infrastruktur dominierte Anbietersysteme, von denen nur ein Teil der Akteure in Deutschland ansässig ist. Zumindest die heutigen Speicheroptionen in geologischen Schichten liegen überwiegend weit außerhalb von Deutschland. Beispiele dafür sind:

- Müllverbrennungsanlagen mit Anschluss an das CO₂-Netz, Abscheidungsanlage und Zugriff auf biogenen Hausmüll oder andere Biogene Reststoffe
- Kalk- und Zementwerke mit Anschluss an das CO₂-Netz, Abscheidungsanlage und Zugriff auf biogene Zufeuerung

Diese Optionen setzen einen Anschluss an das zukünftige CO₂-Fernnetz, dahinterliegende Speicheroptionen und den langfristigen Zugriff auf biogene Reststoffe voraus. Gerade thermische Abfallbehandlungsanlagen mit kommunaler Verankerung könnten da langfristig einen Vorteil hinsichtlich der Biomasseverfügbarkeit haben.

Weitere mögliche Anbieter sind Produzenten langlebiger C-haltiger Produkte. Bei der Verwendung von biobasierten Kunststoffen in Gebäuden oder der Einbringung von Biokohle in landwirtschaftliche Flächen ist aus heutiger Sicht eine langfristige Speicherung des Kohlenstoffes vorstellbar. Wie lange der Kohlenstoff gebunden sein muss, um negative Emissionszertifikate zu generieren, ist allerdings derzeit politisch noch nicht entschieden, für den ETS werden gerade Zeiträume von mehreren Jahrhunderten diskutiert. Zusätzlich ist auch noch offen, wer von den Zertifikaten profitieren kann. Im Falle von biobasierten Kunststoffen könnte das der Produzent der Produkte sein, aber auch das Bauunternehmen oder der Bauherr.

Option 2: Technologie- und Logistikanbieter

Die verschiedenen technischen Optionen für die Kohlenstoffnutzung bieten für den Anlagenbau interessante Zukunftsoptionen. Für die Bereitstellung von klimaneutralem Kohlenstoff wird aus heutiger Sicht global Direct Air Capture eine wichtige Rolle spielen, auch wenn die Anwendungsmöglichkeiten in Deutschland begrenzt sind. Sowohl die Herstellung von DAC-Anlagen wie auch einzelner Komponenten (Flüssigkeitsverteilungssysteme, Pumpen, Tropfenabscheider, Ventilator oder Wärmetauscher) bieten Wertschöpfungspotentiale und Ansatzpunkte für bestehende Firmen zur Anwendung ihres technologischen Wissens (IN4climate.RR, 2022). Auch die Sammlung und Aufbereitung biogener Reststoffe wird für die Mobilisierung von Kohlenstoffquellen wichtiger werden, da Branchen wie die Chemieindustrie langfristig zentral auf diese Stoffe angewiesen sein werden. Dazu gehören auch Technologien zur Umwandlung von CO₂ in Chemiegrundstoffe (CCU). Die Kohlenstoffroute von DAC zu kohlenstoffhaltigen Produkten bedarf dieses Umwandlungsschrittes, für eine Übergangszeit bis 2045 ist das auch für CO₂ aus fossilen Quellen vorstellbar.

Die Technologie für die Abscheidung und den Transport von CO₂ wird schon deutlich schneller eine Rolle für die Wertschöpfung spielen als DAC, da der Aufbau des CO₂-Netzes in Deutschland gerade mit großen Schritten vorangetrieben wird (BMWK, 2024e). Hier ist schon heute sichtbar, dass bestehende Anlagenbauer und Netzbetreiber dieses Geschäftsfeld aktiv angehen.

Option 3: Dienstleistung und Forschung

Die Entwicklung von negativen Zertifikaten bedarf neben den technischen Aspekten auch eines Ökosystems von Dienstleistungen und Forschung, das möglicherweise durch bereits vorhandene Akteure bedient werden kann.

Die Finanz- und Versicherungswirtschaft wird sich mit Investitionen und den damit verbundenen Risiken von CDR-Projekten beschäftigen und entsprechende Produkte anbieten. Zertifizierer und Zertifikathändler werden gebraucht, um den Markt verlässlich und sicher zu machen und den notwendigen Handel zu betreiben. Universitäten und außeruniversitäre Forschungsinstitute werden sich mit technischen und gesellschaftlichen Fragestellungen dieses Marktes befassen. Nicht zuletzt ist auch Qualifizierung und Weiterbildung von Personal in den beteiligten Unternehmen ein notwendiges und auch profitables Betätigungsfeld.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass es mittel- bis langfristig neue Wertschöpfungspotentiale im Bereich CDR in verschiedenen Branchen in Deutschland und Europa geben wird. Es ist sinnvoll sich heute schon damit zu beschäftigen und die Weichen so zu stellen, dass diese Potentiale auch aus Deutschland heraus bedient werden.

3.7 Literatur

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024a): *Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie*. URL:

https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunkteder-bundesregierung-fuer-eine-carbon-management-strategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (abgerufen am 07.11.2024)

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024e): *Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes*. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwurf-eines-gesetzes-zur-aenderung-des-kohlendioxid-speicherungsgesetzes.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (abgerufen am 13.11.2024)

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024c): *Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe) - Eckpunkte* -. URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am 07.11.2024)

Council of the European Union. (2024). *Draft of the COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) of 30.07.2024 supplementing Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council as regards the requirements of considering that greenhouse gases have become permanently chemically bound in a product* (C(2024) 5294). <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-12681-2024-INIT/en/pdf>

Europäische Kommission. (2024). *Auf dem Weg zu einem ehrgeizigen industriellen CO₂-Management in der EU* (COM(2024) 62). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=COM%3A2024%3A62%3AFIN>

Haff, P. K. (2014). *Technology as a geological phenomenon: Implications for human well-being*. Geological Society, London, Special Publications, 395(1), 301-309. <https://doi.org/10.1144/SP395.4>

IEA. (2022). *Direct Air Capture 2022 - a key technology for net zero*. IEA - International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>

IN4climate.RR. (2022). *Technologiekompetenzanalyse Direct Air Capture*. Wuppertal. https://www.rheinisches-revier.nrw/fileadmin/user_upload/2022_Direct_Air_Capture_cr-in4climateRR.pdf

IPCC. (2021). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, K. Huang, E. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, & B. Zhou (eds.)]. In Press.

IPCC. (2022). Annex II: *Glossary*. [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestedt, A. Reisinger (eds.)] In: *Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösckke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Kaufmann, L., Wiedenhofer, D., Cao, Z., Theurl, M. C., Lauk, C., Baumgart, A., Gingrich, S., & Haberl, H. (2024).

Society's material stocks as carbon pool: An economy-wide quantification of global carbon stocks from 1900–2015. Environmental Research Letters, 19(2), 024051. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad236b>

MWIDE. (2021). *Kohlenstoff kann Klimaschutz: Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen.* Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/documents/mwide_carbon_management_strategie_barrierefrei.pdf

Pfeiffer, J., Erlach, B., Fishedick, M., Fuss, S., Geden, O., Löschel, A., Pittel, K., Ragwitz, M., Stephanos, C., & Weidlich, A. (2024). *Kohlenstoffmanagement integriert denken: Anforderungen an eine Gesamtstrategie aus CCS, CCU und CDR (Impuls) (Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS)).* https://doi.org/10.48669/esys_2024-5

SCI4climate.NRW. (2021a). *CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW - Impuls für eine Infrastrukturgestaltung.* https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/co2-entstehung-der-industrie-in-einem-klimaneutralen-nrw-impuls-fu__r-eineinfrastrukturgestaltung-cr-sci4climatenrw.pdf

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. 9: Abb. 3.1: Vereinfachter Kohlenstoffpfad konventioneller Kunststoff

S. 10: Abb. 3.2: Vereinfachte klimaneutrale Kunststoffproduktion mit CCS

S. 10: Abb. 3.3: Vereinfachte Darstellung einer klimaneutralen Kunststoffproduktion mit biogenem und atmosphärischem Kohlenstoff

S. 11: Abb. 3.4: Vereinfachte Darstellung einer klimaneutralen Kunststoffproduktion mit biogenem und atmosphärischem Kohlenstoff inkl. CCS-Pfad

S. 12: Abb. 3.5: Pfaddarstellung negativer Emissionserzeugung durch BECCS und Biokohle in Verbindung mit der Herstellung von Kunststoffen

S. 14: Abb. 3.6: Einfache Struktur zur Prüfung der Klimaneutralität des produktgebundenen Kohlenstoffes