



Carbon Dioxide Removal in der Industrie Nordrhein-Westfalens

Diskussionspapier der Fachgruppe Kohlenstoffwirtschaft

IN4climate.NRW-Partner, welche die Inhalte des vorliegenden Papiers sichtbar vertreten möchten, sind hier aufgeführt. Dies lässt jedoch keine Rückschlüsse auf die Positionierung anderer IN4climate.NRW-Mitglieder oder des Ministeriums für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen zu.

Dieses Dokument wird von folgenden Unternehmen und Institutionen unterstützt:



Bibliografische Angaben:

Herausgeber:

IN4climate.NRW
(NRW.Energy4Climate GmbH)

Veröffentlicht:

08/2024

Autor:innen:

Dr. Christoph Glasner
(Fraunhofer UMSICHT)
Dr. Iris Rieth-Menze
(IN4climate.NRW)
Prof. Dr. Ulrich Seifert
(Fraunhofer UMSICHT)
Domenik Treß
(IN4climate.NRW)
Christoph Zeiss
(Wuppertal Institut)

Kontakt & Koordination:

Domenik Treß (IN4climate.NRW),
Fachexperte Industrie & Produktion,
CarbonManagement@energy4climate.nrw

Bitte zitieren als:

IN4climate.NRW (Hrsg.) 2024: Carbon Dioxide Removal
in der Industrie Nordrhein-Westfalens. Diskussions-
papier der Initiative IN4climate.NRW. Düsseldorf.

Kernbotschaften

Carbon Dioxide Removal (CDR) ist keine ferne Zukunftsidee, sondern eine Chance für **bestehende Industrieprozesse** in Nordrhein-Westfalen (NRW). Dabei existieren **Synergien** zwischen Carbon Management in der Industrie und der Möglichkeit, auf gemeinsamen Infrastrukturen aufbauend **permanente** Negativemissionen zu produzieren (Kapitel 2). Emissionsreduktion und technische CO₂-Senken gehen hier Hand in Hand.

BioCCS-Prozesse (biogenes Carbon Capture and Storage) bieten ein relevantes Potenzial für industrielle Negativemissionen in NRW. In Anwendungen, in denen **biogene Reststoffe energetisch verwertet werden** (u. a. Biogasaufbereitung, Papier-, Zucker- oder Alkoholherstellung), insbesondere **in Synergie mit Prozessen, in denen unvermeidbar CO₂ entsteht** (u. a. Zement-, Kalk-, Chemieindustrie sowie Abfallverwertung) kann BioCCS einen Beitrag zur Treibhausgasneutralität leisten.

Für den Anlagenbau in Nordrhein-Westfalen bietet **Direct Air Capture (DAC)** als schnell wachsender **Exportmarkt** der Zukunft großes Wertschöpfungspotenzial. Die Anwendung von DAC dürfte allerdings in NRW eher begrenzt bleiben. Zum einen wird die zusätzlich dafür notwendige Erneuerbare Energie in den kommenden Jahrzehnten im Rahmen der Transformation zur Treibhausgasneutralität dringend an anderen Stellen gebraucht. Zum anderen gibt es weltweit zahlreiche Standorte, die günstigere Bedingungen vorweisen und sich daher besser für DAC eignen.

Die Skalierung von Technologien für Carbon Dioxide Removal hat begrenztes Potenzial und erfordert daher ein **breit angelegtes Technologieportfolio**, um Risiken zu minimieren. Die hier skizzierten Ansätze für industrielles BioCCS sind ein sinnvoller, umsetzbarer und gezielter Ansatzpunkt für den Hochlauf von permanenten CDR-Methoden in Nordrhein-Westfalen. Gleichzeitig gibt es Zielkonflikte und Risiken (Kapitel 3), die im Auge behalten werden müssen. Daher ist es wichtig, dass der Hauptfokus weiterhin auf der Vermeidung von CO₂-Entstehung liegt (Kapitel 1), parallel die natürlichen Senken gestärkt werden und die Forschung und Entwicklung weiterer CDR-Technologien vorangetrieben wird. Diese Maßnahmen müssen gleichzeitig umgesetzt werden und ergänzen sich, weshalb es nicht ausreicht, sich lediglich auf eine oder wenige ausgewählte Technologien zu konzentrieren.

Um die in dieser Publikation skizzierten Synergien für CDR zu erzielen und in konkrete Investitionsentscheidungen umzusetzen, **braucht es dringend eine klare Perspektive für industrielle CDR-Technologien**. Hierfür fehlen bisher die Rahmenbedingungen. Zudem ist es wichtig, künftige Mengen an Negativemissionen **bereits heute** bei der Dimensionierung der Abscheideanlagen sowie den Transport- und Speicherinfrastrukturen mitzubedenken (Kapitel 4).

1 Carbon Dioxide Removal (CDR): Worum geht es?

1.1 Unvermeidbare und schwer vermeidbare Restemissionen

Nordrhein-Westfalen hat sich durch das Klimaschutzgesetz dazu verpflichtet, bis 2045 treibhausgasneutral zu sein. Zu den besonderen Herausforderungen auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität gehören die sogenannten schwer vermeidbaren Restemissionen. Diese treten voraussichtlich zum Beispiel in der Landnutzung und Landwirtschaft, aber auch in bestimmten Industrieprozessen auf.

Definiert werden Restemissionen hier als **Größe an Treibhausgasemissionen¹, die im und nach dem Netto-Null-Jahr 2045 tatsächlich in die Atmosphäre gelangen** (Schenuit et al. 2023). In mindestens äquivalenter Höhe wird somit die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre erforderlich, um Netto-Null-Emissionen zu erreichen. Als solche erfordern Restemissionen in der Regel eine Begründung, warum sie nicht vermieden werden können (Brad et al. 2024). Während Restemissionen also zunächst lediglich eine Zahl darstellen, ist die Frage, ob sie als „unvermeidbar“ oder „schwer vermeidbar“ gelten, deutlich schwieriger zu beantworten. Die Verfügbarkeit von Optionen zur Emissionsvermeidung von Treibhausgasen unterliegt einem zeitlichen Wandel und wird durch kontinuierliche Forschung und Entwicklung vorangetrieben, sodass heute unvermeidbare Treibhausgasemissionen zukünftig unter weiterentwickelten Rahmenbedingungen vermeidbar sein können.

Entsprechend der Unsicherheit, welche Restemissionen in zehn oder 20 Jahren tatsächlich unvermeidbar sind, gibt es unterschiedliche Szenarien mit unterschiedlichen Mengen an Restemissionen (siehe Tabelle 1). Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) macht deutlich, dass Treibhausgasneutralität – und damit die Stabilisierung der globalen Temperaturen – nur möglich ist, wenn Restemissionen durch CO₂-Entnahme (Carbon Dioxide Removal) ausgeglichen werden².

1.2 Carbon Dioxide Removal: Grundlegende Einordnung

Carbon Dioxide Removal (CDR) wird als **Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre und dessen Speicherung für Jahrzehnte bis Jahrtausende** (Smith et al. 2024, S.23), also für klimarelevante Zeiträume, definiert. Diese entnommenen CO₂-Mengen werden auch als Negativemissionen bezeichnet. Damit Nordrhein-Westfalen das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität erreicht, muss demnach bis spätestens 2045 bilanziell mindestens so viel CO₂ als Negativemissionen aus der Atmosphäre entnommen werden, wie die verbleibenden Treibhausgas-Quellen³ weiterhin emittieren. Die Entnahme von CO₂ wird neben CO₂-Restemissionen auch die Klimawirkung anderer Treibhausgasemissionen wie Methan oder Lachgas ausgleichen müssen, denn das Ziel ist die umfassendere Treibhausgasneutralität, nicht lediglich CO₂-Neutralität. Reine CO₂-Netto-Nullemissionen werden also bereits vor 2045 erreicht werden müssen, um im Jahr 2045 eine alle Treibhausgase umfassende Treibhausgasneutralität zu erreichen (Reisinger und Geden 2023). Darüber hinaus legen das nationale Klimaschutzgesetz (§ 3 Absatz 2) und das europäische

1 Der Begriff „Treibhausgasemissionen“ im engeren Sinn steht für die Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre, so auch in diesem Dokument. Gelegentlich wird der Begriff ungenau auch für die Entstehung von Treibhausgasen ohne Freisetzung in die Atmosphäre verwendet.

2 Siehe IPCC AR6, Working Group III, Summary for Policymakers, C.11.

3 In Äquivalenten.

Klimagesetz für die Zeit nach 2050 die Erreichung von netto-negativen Treibhausgasemissionen fest. Dieses langfristige Ziel der Netto-Negativemissionen – es wird mehr CO₂ aus der Atmosphäre entnommen und dauerhaft gespeichert, als im selben Zeitraum Treibhausgase freigesetzt werden – wird aktuell von der Bundesregierung in der „Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe)“ genauer gefasst und erarbeitet.

Die Europäische Union unterscheidet in der Carbon Removals and Carbon Farming Regulation (CRCF)⁴ drei Kategorien zur Zertifizierung: 1.) Carbon Farming 2.) Kohlenstoffspeicherung in Produkten und 3.) Permanente Speicherung (Europäische Kommission 2024a).

Die erste Kategorie „Carbon Farming“ bezieht sich auf natürliche Senken und somit den LULUCF-Sektor (Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft). Dabei geht es um eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Bindung von Kohlenstoff in Böden und den Ökosystemen **zusätzlich** und **dauerhaft** zu erhöhen.

Die Kategorie „Kohlenstoffspeicherung in Produkten“ bezieht sich auf besonders langlebige Produkte der Bioökonomie. Entsprechend der obigen Definition von CDR geht es bei der CO₂-Entnahme um die Speicherung von mindestens mehreren Jahrzehnten. Im Zertifizierungsrahmen CRCF umfasst diese Kategorie aufgrund der langen Produktlebensdauer zunächst ausschließlich biobasierte Materialien im Bausektor.

Diese sind abzugrenzen von Produkten, die über Carbon Capture-Anlagen abgeschiedenes atmosphärisches CO₂ permanent chemisch binden, denn diese werden regulatorisch als „permanente Speicherung“ der dritten Kategorie zugeordnet. Wird abgeschiedenes CO₂ permanent in Produkten gebunden, wird dies auch als „CCUS“ bezeichnet (Carbon Capture, Utilization and Storage)⁵. Dagegen beschreibt „CCU“ (Carbon Capture and Utilization) im Allgemeinen zunächst die Nutzung von abgeschiedenem Kohlendioxid, unabhängig von Quelle und

Speicherdauer im Produkt. Viele CCU-Produkte wie z.B. Kraftstoffe führen nicht zu einer permanenten Speicherung, sondern letztlich zu einer verzögerten Emission. CCU ohne eine permanente Bindung im Produkt trägt somit nicht zu Negativemissionen bei, sondern ist vielmehr eine Möglichkeit, Kohlenstoff mehrfach zu nutzen und dadurch zusätzlichen Kohlenstoffeintrag in Form fossiler Kohlenstoffträger zu vermeiden (Gabrielli et al. 2020).

Die dritte Kategorie im EU CRCF umfasst die permanente Speicherung von **atmosphärischem** CO₂ in geologischen Formationen sowie die **permanente** chemische Bindung von **atmosphärischem** CO₂ in bestimmten Produkten⁶. Permanente Negativemissionen können mithilfe der zentralen Technologie Carbon Capture and Storage (CCS) erzielt werden, wobei CO₂ tief unter der Erde gespeichert wird. Dies erfolgt für die Erzeugung von negativen Emissionen auf Basis von Direktabscheidung aus der Umgebungsluft (DACCS) oder durch die Speicherung von biogenem CO₂ (BioCCS, oder bisher häufig BECCS genannt⁷). Der Vorteil dieser Kategorie liegt in der Dauerhaftigkeit (Permanenz) der Speicherung (Chiquier et al. 2022). Bei adäquater Erschließung ist die geologische Speicherung über viele Jahrhunderte möglich, wobei das CO₂ schrittweise mineralisiert und somit der Atmosphäre dauerhaft entzogen bleibt (CDRmare 2024). Die permanente Speicherung im Produkt bezieht sich auf eine durch die EU zu definierende Liste bestimmter Produkte, die auch am Ende ihrer Produktlebensdauer das CO₂ nicht wieder freisetzen, weil sie nicht verbrannt, sondern deponiert werden. Dies sind im Wesentlichen karbonatisierte, mineralische Bauprodukte⁸.

4 Vollständiger Name: Certification Framework for permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products.

5 Häufig wird „CCUS“ auch als Sammelbegriff für CCU und CCS verwendet. Dies führt jedoch zur Vermengung dieser teils sehr unterschiedlichen Ansätze. Die Nutzung der Abkürzung „CCUS“ für das Nutzen und Speichern im Produkt folgt der DIN SPEC 91458.

6 Siehe Entwurf der delegierten Verordnung der EU-Kommission zu permanentem CCU, Ares(2024)4402362.

7 Der Begriff „BioCCS“ wurde in der Industrial Carbon Management Strategy der EU Kommission eingeführt und beschreibt die Abscheidung und permanente Speicherung von biogenem CO₂ an Energieanlagen oder industriellen Prozessen (Europäische Kommission 2024b). „BioCCS“ bezieht sich also nicht nur auf biogenes CO₂, das bei Verbrennungsprozessen zur Energieerzeugung entsteht („BECCS“), sondern schließt auch biogenes CO₂ aus Prozessen ein, in denen die Energieerzeugung nicht das primäre Ziel ist.

8 Siehe Entwurf der delegierten Verordnung der EU-Kommission zu permanentem CCU, Ares(2024)4402362.

In diesem Diskussionspapier legen wir den Fokus auf die **permanenten** CDR-Potenziale für die Industrie Nordrhein-Westfalens, die durch die Hochskalierung von Carbon Management entstehen können. **Nicht permanente** Wege zur CO₂-Entnahme über natürliche Senken (also in der ersten Kategorie „Carbon Farming“) und der Kohlenstoffspeicherung in langlebigen Produkten (die zweite Kategorie) werden nicht betrachtet. Natürliche Senken sind trotzdem nicht von geringerer Bedeutung, da das Binden von CO₂ in Form von Kohlenstoff in Ökosystemen schon heute möglich und im Vergleich zu technischen Senken relativ kostengünstig ist und viele weitere Co-Benefits bietet. Die Ausweitung natürlicher Senken ist nicht nur für den Klimaschutz entscheidend, sondern unterstützt auch Klimafolgenanpassung, Naturschutz und Biodiversität. Technische und natürliche Senken sind also komplementäre Strategien, die sich gegenseitig ergänzen, denn es existiert bei natürlichen Senken ein mit fortschreitendem Klimawandel stetig zunehmendes Risiko, dass das CO₂ nicht dauerhaft gebunden bleibt (Chiquier et al. 2022). Dürren und damit zusammenhängende Brände können das CO₂ direkt wieder in die Atmosphäre freisetzen. Auch eine mögliche Änderung der Landnutzung innerhalb des nächsten Jahrhunderts und die damit einhergehende erneute Freisetzung von CO₂ gehören zu den Unsicherheiten. Aus diesem Grund ist die zusätzliche Erschließung **permanenter** technischer Senken eine entscheidende Maßnahme, um mit größtmöglicher Sicherheit zu erreichen, dass das der Atmosphäre entnommene CO₂ dauerhaft gespeichert bleibt. **Monitoring, Reporting und Verification** müssen dabei so ausgelegt sein, dass die Dauerhaftigkeit der Speicherung gewährleistet und die Haftung klar geregelt ist, falls doch wieder CO₂ freigesetzt wird (Schuett 2024).

1.3 Die Rolle von CDR in einer industriellen Carbon-Management-Hierarchie

In den kommenden zwei Jahrzehnten hat es mit Blick auf die Treibhausgasneutralität der Industrie weiterhin höchste Priorität, die Entstehung von CO₂ so gering wie möglich zu halten. In allen Sektoren gibt es verschiedene Vermeidungsstrategien, die prioritär und synergetisch umgesetzt werden müssen. Hierbei sind beispielsweise der schnelle Ausbau Erneuerbarer Energien, die Umstellung industrieller Prozesse auf Wasserstoff oder Direktelektrifizierung, die Effizienzsteigerung oder die zunehmende Kreislaufwirtschaft zu nennen. Die CO₂-Entnahme ist nur wirksam, wenn die zur Verfügung stehenden Vermeidungsstrategien voll ausgeschöpft werden. Laut wissenschaftlichen Klimaszenarien wird es bereits herausfordernd, technische und natürliche Senken so weit auszubauen, dass sie Negativemissionen in der Größenordnung von schwer vermeidbaren Restemissionen im Jahr 2045 bereitstellen können. Für den größten Anteil der CO₂-Mengen gilt grundsätzlich, dass es sowohl technisch als auch ökonomisch sinnvoller ist, dafür zu sorgen, dass ihre Entstehung vermieden wird.

Mit Blick auf die Rolle von Carbon Dioxide Removal als Teil von Carbon Management⁹ hilft ein Blick auf die folgende Priorisierung.

⁹ Carbon Management beschreibt den Umgang mit Kohlenstoff an sich (MWIDE 2021). Abgesehen von CO₂-Management (also Carbon Capture and X) beinhaltet dies zuvorderst den Verzicht auf Kohlenstoff und die Substitution fossiler durch nachhaltige Kohlenstoffquellen. Die Carbon Management Strategie des Bundes hingegen behandelt in einer enger gefassten Definition ausschließlich den Aspekt CO₂-Management (BMWK 2024), wobei Verzicht und Substitution als vorrangig anzuwendend ausgewiesen, jedoch nicht näher vertieft werden. Diesem Papier liegt die umfassende Definition gemäß der Carbon Management Strategie NRW zugrunde.

Eine industrielle Carbon-Management-Hierarchie

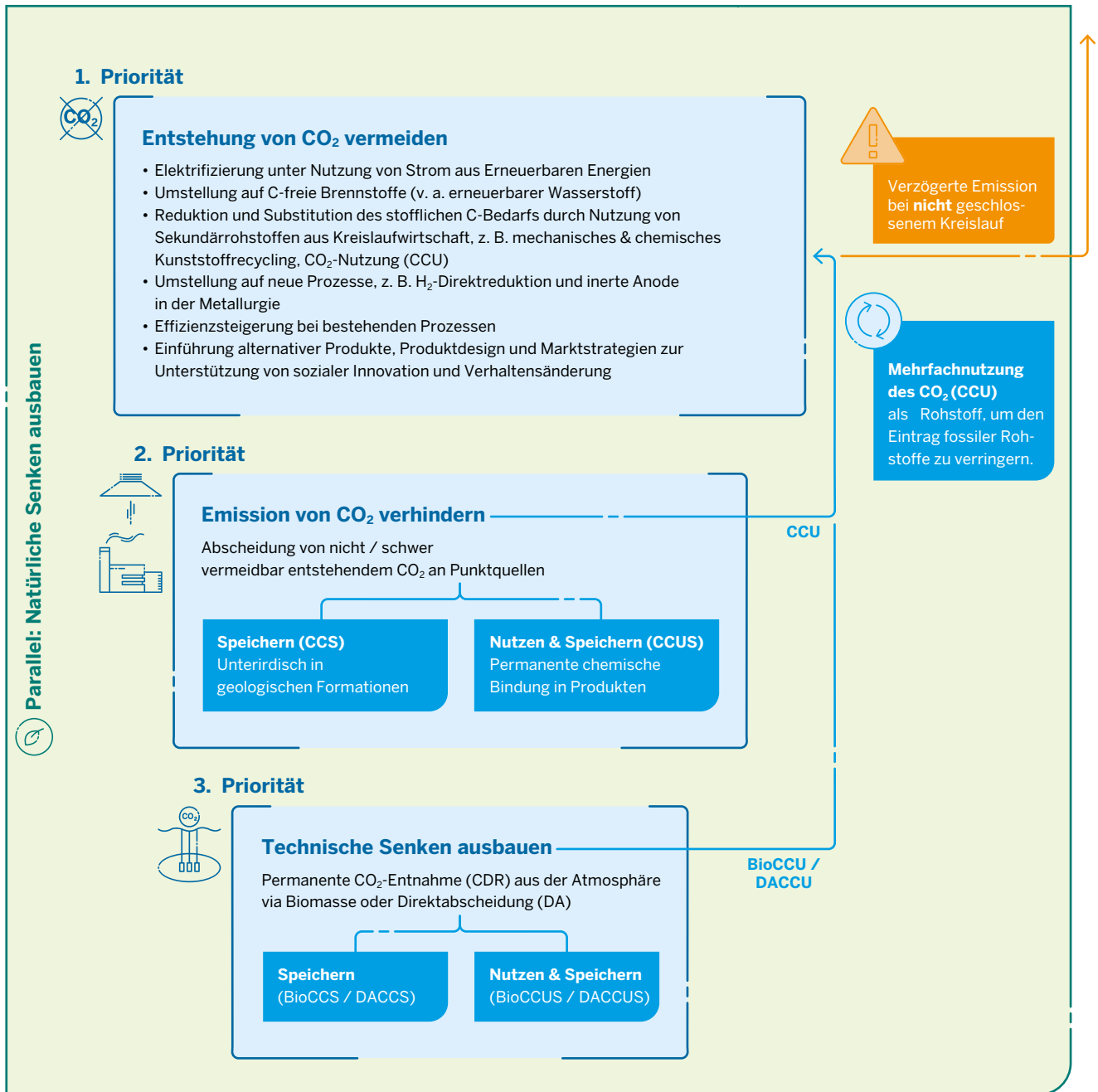


Abbildung 1: Priorisierung der verschiedenen Handlungsoptionen auf dem Weg hin zur Treibhausgasneutralität, die jedoch keine zeitliche Abfolge darstellt

Priorität 1: Entstehung von CO₂ vermeiden

Die höchste strategische Relevanz haben zum aktuellen Zeitpunkt Maßnahmen, die die Entstehung von CO₂ vermeiden. Die aufgeführten Optionen tragen auf unterschiedliche Weise dazu bei, dass CO₂ weniger oder gar nicht mehr entsteht und somit auch nicht mit großem Aufwand abgeschieden und gespeichert werden muss.

Priorität 2: Emissionen von CO₂ verhindern

In Fällen, in denen die CO₂-Entstehung nicht vermieden werden kann (beispielsweise prozessbedingte CO₂-Mengen in der Zement- oder Kalkherstellung), sollte das entstandene CO₂ zu einem möglichst hohen Grad abgeschieden und gespeichert werden, um die Emission zu verhindern. Die permanente Speicherung ist auf zwei Wegen möglich: In tiefengeologischen Formationen (CCS) oder über die **permanente** Speicherung in Produkten (CCUS)¹⁰. Eine dritte Option ist die **nicht-permanente** Einbindung des abgeschiedenen CO₂ in Produkte mit begrenzter Nutzungsdauer (Carbon Capture and Usage, CCU). Indem CO₂ abgeschieden und dessen Kohlenstoff in Produkte eingebunden wird, bleibt die Emission vermieden, solange sich das Produkt nicht zersetzt. Durch die Nutzung von abgeschiedenem CO₂ als Produktionsrohstoff werden jedoch primär-fossile Kohlenstoffverbindungen ersetzt und somit der Eintrag von **zusätzlichem** fossilem Kohlenstoff in das Gesamtsystem vermieden. Je nach Produkt ist aber auch bei einer Mehrfachnutzung des abgeschiedenen CO₂ eine – immerhin zeitlich verzögerte – End-of-Life-Emission nicht zu verhindern. Deswegen weisen Produkte, die CCU-basiert oder anderweitig aus recyceltem Kohlenstoff hergestellt werden, im Regelfall nicht die Funktion einer dauerhaften technischen Senke auf. Gleichzeitig ist CCU ein zielführender Baustein im Carbon Management, mit Blick auf die Quelle und nicht die Senke.

Das Hauptziel ist hier, Kohlenstoff erneut für die Produktion verfügbar zu machen und somit den Eintrag von zusätzlichem fossilem Kohlenstoff in die Technosphäre zu reduzieren – im Gegensatz zu permanenten Speicherungsverfahren (CCS, CCUS), die dazu dienen, dem System (Technosphäre und Atmosphäre) dauerhaft Kohlenstoff zu entziehen.

Priorität 3: Technische Senken ausbauen

CO₂-Abscheidungstechnologien können keine Abscheideraten von 100 Prozent erreichen. Deswegen, aber auch weil es immer weiter schwer vermeidbare Treibhausgasemissionen geben wird, bleiben trotz der Abscheidung von CO₂ an Punktquellen Restemissionen zurück. Diese können und müssen durch Carbon Dioxide Removal (CDR) aus der Atmosphäre ausgeglichen werden. Die permanenten Speicheroptionen in der Industrie sind im Wesentlichen die gleichen wie bei CCS und CCUS. Allerdings wird bei CDR atmosphärisches CO₂ gespeichert, welches entweder direkt (DACCS/DACCUS) oder indirekt mittels der Abscheidung von biogenem CO₂ an Industrieprozessen oder -kraftwerken (BioCCS/BioCCUS) abgeschieden wird. Das biogene CO₂ wurde mittels Photosynthese zuvor der Atmosphäre entzogen.

¹⁰ Häufig wird „CCUS“ auch als Sammelbegriff für CCU und CCS verwendet. Dies führt jedoch zur Vermengung dieser teils sehr unterschiedlichen Ansätze. Die Nutzung der Abkürzung „CCUS“ für das Nutzen **und Speichern** im Produkt folgt der DIN SPEC 91458.

	Prognos (2021)	Ariadne (2023)	BCG (2021)	dena (2021)	SCI4climate.NRW (2023)	T45-Langfrist- szenarien (2024)
Restemissionen in Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente	63	62–127	59	87	55	55

Tabelle 1: Restemissionen in Deutschland im Jahr 2045 laut verschiedener Klimaneutralitätsstudien (Prognos et al. 2021, BCG 2021, dena 2021, SCI4climate.NRW 2023, T45-Langfristszenarien in Fraunhofer ISI et al. 2024 und Ariadne in Merfort et al. 2023)

Bei den Restemissionen geht es deutschlandweit um mindestens 55 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente im Jahr 2045 (vgl. Tabelle 1). Dem gegenüber stehen 674 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten an Gesamtemissionen im Jahr 2023. Es wird eine große Herausforderung sein, in den kommenden zwei Dekaden auch nur einen zweistelligen Millionenbetrag an Negativemissionen zu erreichen. Daraus ergibt sich der Grundsatz: Je geringer die Restemissionen und je schneller das Tempo der Emissionsreduktion sind, desto wahrscheinlicher wird es, in der Mitte des Jahrhunderts in Deutschland Netto-Null-Emissionen oder sogar Netto-Negativemissionen zu erreichen (Minx et al. 2018). CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre kann also kein Ersatz für Emissionsvermeidung sein. Im Gegenteil ermöglicht erst die ambitionierte Emissionsvermeidung, dass CDR eine relevante Rolle auf dem Weg zur Klimaneutralität spielt.

Gleichzeitig darf die Carbon-Management-Hierarchie nicht im zeitlichen Sinne verstanden werden. Es ist wichtig, so früh wie möglich mit der Vorbereitung und dem CO₂-Infrastrukturaufbau zu beginnen, damit CCU/CCS-Technologien in den 2030er-Jahren eine relevante Rolle einnehmen können und über diesen Technologiepfad CDR ermöglicht werden kann. Nur so ist eine ausreichende Skalierung der technischen Senken bis zur Treibhausgasneutralität realistisch (Lamb et al. 2024). Außerdem besteht jetzt die Chance für den Maschinen- und Anlagenbau in Nordrhein-Westfalen, Wertschöpfungspotenziale zur Bedienung des globalen Zukunftsmarkts für Negativemissionstechnologien zu erschließen.

2 Potenziale für permanentes CDR in der NRW-Industrie

Noch gibt es keine klaren Rahmenbedingungen für die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre, sie werden aktuell, aber sukzessive auf Ebene der Europäischen Union erarbeitet. Für die in diesem Kapitel beschriebene Zukunftsskizze gehen wir von der Annahme aus, dass bis zum Ende der 2020er-Jahre ein EU-Mechanismus für Negativemissionen entstanden sein wird, der einer Tonne CO₂, die der Atmosphäre entnommen wurde, einen angemessenen Preis als Anreiz bietet.

In dem folgenden Kapitel geht es dementsprechend nicht um die Detailfragen der Regulatorik, die bis dahin geklärt werden müssen, sondern darum, zu skizzieren auf welche Weise die Industrie in Nordrhein-Westfalen zukünftig Negativemissionen erzeugen kann. Diese Zukunftsskizze basiert auf Workshops der Landesinitiative IN4climate.NRW und soll als Zielbild dienen, das Potenziale nach der Schaffung von Rahmenbedingungen und Anreizen aufzeigt. Sie wurde außerdem mit bereits veröffentlichten politischen Strategien bzw. deren Eckpunkten auf Bundes- und EU-Ebene abgeglichen (Stand Juni 2024). Die Zukunftsskizze ist als „Backcasting“, also dem Blick aus einer imaginierten Zukunft im Jahr 2045 heraus, geschrieben.

2.1 Zukunftsskizze für permanentes CDR in der NRW-Industrie

Für diese Zukunftsskizze versetzen wir uns in das Jahr 2045, das Zieljahr für ein treibhausgasneutrales NRW. Die Zukunftsskizze orientiert sich an Klimaneutralitätsszenarien (u.a. BIG 5¹¹) sowie an politischen Zielen und Strategien und ist dabei optimistisch ausgerichtet. In den Jahrzehnten zuvor wurden Prozesse mit vermeid-

barer CO₂-Entstehung auf CO₂-neutrale Technologien wie z. B. Elektrifizierung oder grünen Wasserstoff umgestellt. Nahezu alle Prozesse der Grundstoffindustrie mit unvermeidbaren bis schwer vermeidbaren CO₂-Mengen sowie thermische Abfallverwertungsanlagen wurden mit einer CO₂-Abscheidung ausgestattet. Damit wurde das Potenzial der ersten beiden Prioritätsstufen der hier vorgestellten Carbon-Management-Hierarchie (Abb. 1) weitestgehend ausgeschöpft und die weiteren Puzzlestücke zur Treibhausgasneutralität wie Erneuerbare Energien, Speicherkapazitäten, Sektorkopplung, Kreislaufwirtschaft, Suffizienz etc. erfolgreich skaliert. Die verbleibenden Kohlenstoffbedarfe werden durch nachhaltige Kohlenstoffquellen klimaneutral gedeckt. Dabei spielen die regionalen Reststoffe und Abfallbiomassen eine wichtige Rolle in der Rohstoffversorgung der kohlenstoffbasierten Industrie wie der Chemieindustrie.

An Industriestandorten, die an eine CO₂-Transportinfrastruktur angeschlossen sind, werden anteilig Negativemissionen erzeugt, die dazu beitragen, die bisher nicht vermeidbaren Restemissionen auszugleichen. Dies sind im Wesentlichen Industrieprozesse, an denen (anteilig) über Carbon-Capture-Technologien biogenes CO₂ abgeschieden werden und anschließend der permanenten geologischen Speicherung zugeführt werden kann (BioCCS).

BioCCS wird also in der nordrhein-westfälischen Industrie in Synergie mit den Anlagen umgesetzt, in denen ohnehin Biomasse eingesetzt oder CO₂ abgeschieden wird. Anlagen zur Abscheidung von prozessbedingten sowie schwer vermeidbaren CO₂-Mengen sind entsprechend so ausgelegt, dass sämtliche, also auch biogene CO₂-Mengen mit abgeschieden werden. Die CO₂-Entnahme wird also anteilig über dieselben Anlagen erreicht, die auch der Verhinderung von Prozessemissionen dienen. Die so erzeugten Negativemissionen kompensieren dann zunächst die verbleibenden Emissionen aus dem Brennprozess, da die Abscheiderate nicht 100 Prozent erreicht. Darüberhinausgehende Mengen können durch den Verkauf von Negativemissions-Zertifikaten sogar zusätzliche Einnahmen generieren und bieten somit einen Anreiz, bei der Dimensionierung einer

¹¹ Vergleich der „BIG 5“-Klimaneutralitätsstudien (Prognos et al. 2021, BCG 2021, dena 2021, Fraunhofer ISI 2021, Kopernikus-Projekt Ariadne 2021) in (Kopernikus-Projekt Ariadne 2022).

Abscheideanlage eine möglichst hohe Abscheiderate zu erzielen. BioCCS wird also in Nordrhein-Westfalen vor allem durch die Industrie umgesetzt. Eigens für BioCCS neu errichtete Verstromungskraftwerke sind dagegen in NRW nicht zu finden.

Industriestandorte für Carbon Dioxide Removal als Synergie sind im Jahr 2045 die Folgenden:

- **Kalk- und Klinkerbrennen:** Für die Hochtemperaturprozesswärme in der Kalk- und Zementindustrie werden teils biogene Energieträger auf Basis von Reststoffen eingesetzt, sodass neben dem prozessbedingten CO₂ auch bis zu einem Drittel biogenes CO₂ als anteilige Negativemissionen abgeschieden werden kann.
- **Thermische Verwertung von biogenen Abfällen:** Anlagen der thermischen Abfallverwertung sowie die Klärschlammverbrennung (unabhängig von ihrem Nutzungs- bzw. Versorgungszweck) sind aufgrund ihrer CO₂-Mengen Punktquellen, deren Anschluss an ein CO₂-Pipelinennetz sich für viele Standorte in NRW als sinnvoll erweist. Der biogene Anteil des abgeschiedenen CO₂ steht für die CO₂-Entnahme zur Verfügung. Dieser betrug im Jahr 2024 bei thermischen Abfallbehandlungsanlagen bereits einen Anteil von bis zu 60%. Durch zunehmende Kreislaufwirtschaft, Abfallvermeidung und einen wachsenden Anteil der Bioökonomie in der Produktion ist der biogene Anteil im Abfall an manchen Orten gestiegen – gleichzeitig hat der zunehmende Wettbewerb um die biogenen Fraktionen zu ansteigenden Preisen und geringerer Verfügbarkeit für Rest- und Abfallbiomasse geführt, sodass hier regionale Unterschiede bestehen.
- **Glasherstellung:** Während viele Glashersteller auf Wasserstoff oder vollelektrische bzw. hybride Wannen (Grünstrom/Wasserstoff) umgestellt haben, haben andere Standorte, die nicht schnell Wasserstoff zur Verfügung hatten, Erdgas durch Biomethan ersetzt. An den Punktquellen mit prozessbedingter CO₂-Entstehung werden diese CO₂-Mengen zusammen mit den biogenen CO₂-Mengen aus der Biomethanverbrennung abgeschieden. Andere Standorte konnten dagegen bereits einen Teil ihrer Prozessemissionen durch die Umstellung der Rohstoffe in die Vorkette verlagern. So werden die prozessbedingten CO₂-Mengen direkt beim Rohstoff-

hersteller abgeschieden und gespeichert bzw. genutzt. An Standorten, wo die CO₂-Emissionen im Abgas durch die Umstellung auf klimaneutrale Energieträger, eine Anpassung der Rohstoffe und hohen Recyclinganteil sehr gering sind, werden Restemissionen durch Negativemissionen ausgeglichen. Ob es auch noch weit über 2045 hinaus in der Glasindustrie zum Einsatz von Biomethan und zur Abscheidung von CO₂ kommt, ist aber durchaus noch offen. Dies ist teils produkt- (Flach-, Spezial- oder Behälterglas) und teils standortspezifisch (regionale Verfügbarkeit von Biomethan und Wasserstoff sowie einer CO₂-Transportanbindung). So werden in der Glasindustrie mindestens Emissionen verhindert und teils sogar Negativemissionen generiert.

- **Energiewirtschaft:** Bereits vor dem Aufbau einer CO₂-Infrastruktur bestehende Biomasse(heiz-)kraftwerke in NRW leisten durch die energetische Verwertung von stofflich nicht mehr nutzbaren Reststoffen einen Beitrag zur Biomassenutzungshierarchie¹² und stellen das biogene CO₂ zur Nutzung und zur Generierung von Negativemissionen zur Verfügung. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse wurden kaum mehr neue Biomasse(heiz-)kraftwerke gebaut.
- **Biogasaufbereitung und -weiterverarbeitung:** Biomethan aus industriellen und kommunalen Kläranlagen sowie der Land- und Abfallwirtschaft hat eine wichtige Rolle dabei gespielt, fossiles Erdgas zu ersetzen. Bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan wird das biogene CO₂ abgeschieden¹³ und dort, wo die Anlagen an eine CO₂-Transportinfrastruktur angeschlossen sind, als Negativemission oder biogenes CO₂ für die Nutzung zur Verfügung gestellt. An Anlagen, bei denen sich eine Abscheidung aufgrund der CO₂-Mengen lohnt, jedoch keine CO₂-Transportinfrastruktur vorhanden ist, wird das CO₂ zum Transport verflüssigt und zu CO₂-Hubs transportiert. Aus dem Biomethan wird in begrenzten Mengen auch erneuerbarer Wasserstoff hergestellt. Dazu werden bereits heute etablierte

¹² Siehe hierzu NRW.Energy4climate (2023).

¹³ Dieser Prozess ist nicht neu. Bei der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan wird schon immer CO₂ abgeschieden, allerdings wurde das CO₂ bisher freigesetzt (Stand 2024).

Verfahren wie beispielsweise das Steamreforming, verwendet, bei dem Wasserstoff und CO₂ entstehen, wobei das CO₂ separat abgetrennt wird. Dieses kann geologisch als permanente Negativemission gespeichert werden. Alternativ kann durch eine Methanpyrolyse das Biomethan zu Wasserstoff umgesetzt werden, bei dem biogenes Carbon Black gebildet wird, welches dann in Produkten oder Böden eingebracht und gespeichert wird – mit einer gewissen Unsicherheit bezüglich der Permanenz.

- **Steamcracker:** Im ersten Schritt wurde zunächst die Energieversorgung von Steamcrackern mittels Elektrifizierung oder durch die Umstellung auf Wasserstoff dekarbonisiert. Der benötigte Wasserstoff kann durch Reforming oder Pyrolyse des im Steamcracker entstehenden Prozess-Methans hergestellt werden. Bei der Pyrolyse entstandener fester Kohlenstoff kann in anderen Prozessen als Kohlenstoffquelle eingesetzt werden. Beim Reforming entstandenes CO₂ wird abgetrennt und teils geologisch gespeichert. Mit zunehmender Umstellung von fossilen auf biogene, CO₂-basierte (synthetische) oder recyclingbasierte Feedstocks wird anteilig entsprechend zunehmend biogenes oder aus der Direktabscheidung aus der Luft stammendes CO₂ abgetrennt. Dieses wird teilweise als Kohlenstoffquelle für CCU genutzt. Dieser zumeist nicht-permanent gespeicherte Kohlenstoff in den Produkten der nachgelagerten Branchen kann wiederum in Teilen durch die Abscheidung in der thermischen Abfallverwertung erneut abgetrennt und anschließend wiederverwendet oder gespeichert werden. Permanente Negativemissionen werden nur bei permanenter Speicherung generiert, entweder durch die permanente geologische Speicherung oder die permanente chemische Bindung in Produkten der direkt beim Reforming oder aber in der nachgelagerten thermischen Abfallbehandlung abgetrennten CO₂-Mengen (mit der entsprechenden Herausforderung, hierfür den Nachweis zu erbringen).¹⁴

- **Weitere Branchen mit biogenen Stoffströmen:** Zum Beispiel in der Papier-, Alkohol- oder in der Zuckerindustrie gibt es ein signifikantes Aufkommen an biogenen Reststoffen. Wo möglich, werden diese zunehmend z. B. für biochemische Produkte stofflich weiterverwendet. Am Ende der Nutzungskaskade verbleibt aber durchaus ein gewisses Potenzial für die energetische Verwertung mit CO₂-Abscheidung, das auf Basis der langjährig etablierten Stoffströme und Lieferketten dieser Branchen genutzt wird. In einzelnen Fällen sind hier also Negativemissionen als Synergie zu bereits bestehenden Prozessen entstanden. Dies gelang jedoch nur an den Standorten, die wirtschaftlich an eine CO₂-Infrastruktur angeschlossen werden konnten. Grundsätzlich ist der Einsatz von CCS in diesen Branchen zur Dekarbonisierung nicht notwendig und der stoffliche Einsatz von Biomasse dem energetischen vorzuziehen (s. Kapitel 3). Es sind also bestimmte sinnvolle Standorte und teils als Übergangslösung eingestufte Prozesse, die sich für industrielles Carbon Dioxide Removal eignen.

Neben diesen BioCCS-Prozessen wurden in Nordrhein-Westfalen auch Anlagen zur **Direktabscheidung** aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) installiert, die sich allerdings auf wenige Demonstrationsanlagen oder zur dezentralen Versorgung mit CO₂ für CCU-Prozesse beschränken. Um zentrale Anlagen zur Direktabscheidung für Negativemissionen vor Ort einsetzen zu können, waren die Energiepreise im internationalen Vergleich in den für die Skalierung der Technologie wesentlichen Jahren nicht ausreichend wettbewerbsfähig. Großskalige DAC-Anlagen wurden entsprechend in anderen Regionen mit geeigneteren Standortbedingungen und viel Fläche für Erneuerbare Energien errichtet. Für diesen globalen Zukunftsmarkt konnten sich Anlagenbauer aus NRW auf dem Weltmarkt positionieren, wodurch ein erhebliches Wertschöpfungspotenzial für den Standort NRW entstanden ist. Das Land profitiert in der Rolle als Exporteur dieser Schlüsseltechnologie davon, dass Direct Air Capture-Anlagen zum Teil aus herkömmlichen Komponenten bestehen, die hier bereits seit langem hergestellt werden (IN4climate.RR 2022).

¹⁴ Die Transformation der Wertschöpfungsketten der chemischen Industrie ist komplex. Daher ist eine Zukunftsskizze für die zukünftige Einbindung der Steamcracker aus dem Jahr 2024 heraus hier mit besonders großen Unsicherheiten behaftet. Entscheidend ist: Wenn der Feedstock für den Steamcracker auf atmosphärischem C/CO₂ basiert, gibt es ein theoretisches Potenzial für Negativemissionen. Inwieweit dieses dann tatsächlich umgesetzt wird, kann von Anlage zu Anlage stark variieren und ist zudem eine Herausforderung bei Permanenz und Anrechenbarkeit.

Transportinfrastruktur- und Speicherbetreiber haben frühzeitig die Transport- und Speichermöglichkeiten auf die zusätzliche Menge an biogenem und atmosphärischem CO₂ ausgelegt und können somit ihren notwendigen Beitrag zum Erreichen von Negativemissionen in der Lieferkette leisten.

Neben der CO₂-Infrastruktur ist auch der Ausbau der **Energieinfrastruktur** gelungen, so dass die Energiebedarfe der energieintensiven Anlagen für die CO₂-Abscheidung an Punktquellen, Direktabscheidung und die CCU-Prozesse¹⁵ erneuerbar gedeckt werden können.

Insgesamt hat der Hochlauf von Carbon Dioxide Removal in NRW für weitere Wertschöpfung gesorgt. CCS- und CCU-Anlagen sowie Anlagen zur Sammlung, Aufbereitung und Sortierung biogener Rest- und Abfallstoffe sowie zur Pyrolyse sind ein Betätigungsfeld für den Anlagenbau, jeweils mit Chancen für eine Exportorientierung (Herhold et al. 2024). Weitere Wertschöpfung ist im Dienstleistungssektor entstanden, zum Beispiel für Versicherungen, Finanzdienstleistungen, Zertifizierungsstellen, den Qualifizierungs- und Weiterbildungssektor sowie die weiterhin notwendige Forschung und Entwicklung.

2.2 Fazit: Synergien für industrielles CDR

Diese Zukunftsskizze zeigt, dass Carbon Dioxide Removal auf bestehende Industrieprozesse aufbauen kann. Die Synergien ergeben sich entweder dort, wo ohnehin CO₂ abgeschieden werden muss, oder dort, wo prozessbedingt biogene Reststoffe anfallen und energetisch verwertet werden. Diese Synergiepotenziale sollten in der Hochlaufphase von Carbon Dioxide Removal in Nordrhein-Westfalen eine wichtige Rolle spielen – mit durchaus relevantem Potenzial dafür, vergleichsweise günstige Preise pro Tonne entnommenem CO₂ zu erreichen.

BioCCS kann also in erheblichem Maße in der Industrie stattfinden, und zwar gerade auch in Branchen mit schwer vermeidbarer CO₂-Entstehung. Verstromungs-

kraftwerke sind dagegen deutlich weniger sinnvoll, da hierzu genügend günstige Alternativen an Erneuerbaren Energien verfügbar sind. Daher rückt die Energieerzeugung aus Biomasse bei dem aktuellen Tempo des Ausbaus von Windkraft und Solarenergie zusehends in den Hintergrund, während der Wert von Negativemissionen immer wichtiger wird, je näher NRW dem Ziel der Treibhausgasneutralität kommt.

Außerdem fällt ein Unterschied zur bisherigen Debatte um industrielles Carbon Management auf: Es gibt Anwendungsbereiche für permanente Negativemissionen mittels CCS auch in Branchen, die nicht mit „schwer vermeidbarer CO₂-Entstehung“ konfrontiert sind. Hierbei handelt es sich um Branchen, die bereits biogene Reststoffe verwerten, wie z. B. Klär- und Biogasanlagen. In anderen Branchen sind die Transformationspfade aufgrund der noch unsicheren lokalen Verfügbarkeit von großen Strommengen und Wasserstoff noch mit Unsicherheiten behaftet bzw. sehr standortspezifisch. Insbesondere bei der Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme, wie in der Glasindustrie, oder der internen energetischen Nutzung von biogenen Reststoffen, wie in Steamcrackern, hängt das Potenzial für die synergetische Generierung von Negativemissionen daher von der standortspezifischen Verfügbarkeit von Biomasse gegenüber Wasserstoff und Strom ab. An Standorten, die sich sinnvoll an eine CO₂-Infrastruktur anbinden lassen, kann künftig durch Zertifikate für permanente CO₂-Entnahme ein Geschäftsmodell für die Abscheidung und Speicherung des biogenen CO₂ entstehen. Es ist daher sinnvoll, dass diese Branchen durch die Carbon Management Strategie und das Kohlendioxidspeicherung- und -transportgesetz von der Nutzung der CCU/CCS-Technologien und CO₂-Infrastruktur nicht ausgeschlossen werden.

¹⁵ Mindestens derselbe Energiebetrag, den man bislang durch das Verbrennen C-haltiger Verbindungen zu CO₂ gewinnt, muss aufgewendet werden, um aus dem CO₂ wieder die energiehaltigen Verbindungen zu erzeugen.

3 Zielkonflikte und Limitierungen bei CDR

Beim Ausbau von Carbon Dioxide Removal in der Industrie sind mehrere Zielkonflikte zu erwarten, die sich limitierend auf die Skalierung der jeweiligen Anwendungen auswirken dürften. Um negative Nebenwirkungen zu minimieren, sollten sie laufend im Blick gehalten werden. Zugleich zeigen sie die Notwendigkeit auf, die Carbon-Management-Hierarchie im Gesamtsystem mit Blick auf Wechselwirkungen umzusetzen.

3.1 Begrenzte Verfügbarkeit von nachhaltiger Biomasse: Ein Nutzungs- und Flächenkonflikt

In welchem Umfang bei der CO₂-Abscheidung an Bioenergieanlagen auf Lebenszyklusbasis Negativemissionen entstehen, hängt stark von der Nachhaltigkeit der eingesetzten Biomasse ab. Nachhaltige Biomasse und Anbauflächen dafür sind begrenzt verfügbar. Gleichzeitig sollten die Flächen für natürliche Senken zunehmen, um der Atmosphäre auf natürliche Weise CO₂ zu entnehmen und die Biodiversitätsziele zu erreichen. Vor dem Hintergrund dieser Flächenkonkurrenz ist es wichtig, die begrenzte nachhaltige Biomasse so effizient wie möglich einzusetzen. Bevor Biomasse also Energie liefert, müssen entlang einer Nutzungshierarchie ihre anderen Nutzungspotenziale ausgeschöpft werden – auf struktureller und stofflicher Ebene (NRW.Energy4Climate 2023).

Ein Beispiel: Aus dem Rohstoff Holz wird zunächst ein Baustoff oder Möbelstück und aus den entstehenden Sägespänen wird z.B. eine Spanplatte (strukturelle Nutzung). Holzreststoffe, auch eine alte Spanplatte, können wiederum als Kohlenstoffquelle für die stoffliche Nutzung dienen, zum Beispiel in der Chemiebranche oder für die Aufkohlung des Roheisens in der Metallurgie. Auch Reststoffe wie Stroh und Überreste aus der Lebensmittel- oder Zellstoffindustrie können stofflich

genutzt werden. Dies spielt durch die Ersetzung fossiler Rohstoffe an vielen Stellen eine wichtige Rolle auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität (erste Priorität: Reduktion der CO₂-Entstehung) und führt zu einer effizienten Mehrfachnutzung, bevor es zu einem Einsatz in einer Verbrennungsanlage kommt.

Für die energetische Nutzung und somit auch die daran anschließende CO₂-Abscheidung für Negativemissionen mittels BioCCS sind in der Nutzungshierarchie deshalb allein Rest- und Abfallstoffe vorgesehen. Mit der Herstellung von Pflanzenkohle existiert außerdem ein weiteres CDR-Verfahren mit Bedarf an biogenen Reststoffen, bei dem ein potenzieller Nutzungskonflikt möglich ist, den es beim Hochlauf von CDR-Methoden im Auge zu behalten gilt. Dieser Fokus auf Reststoffe am Ende der Nutzungskaskade bei BioCCS sorgt für eine sinnvolle Ausschöpfung des nachhaltigen Potenzials von begrenzt verfügbarer Biomasse.

3.2 Volatile Verfügbarkeit von Erneuerbarer Energie

Solange Erneuerbare Energien noch nicht im ausreichenden Maße kontinuierlich verfügbar sind, um die gesamten EE-Bedarfe für den Standort NRW zu jedem Zeitpunkt zu decken¹⁶, sollten diese dort eingesetzt werden, wo sie am effizientesten zur Vermeidung der CO₂-Entstehung beitragen. Dies ist in erster Linie der Fall, wenn Industrieprozesse direkt elektrifiziert werden. CCS/CCU-Technologien verbrauchen viel Energie, um das CO₂ aus dem Rauchgas der Punktquelle zu waschen. Nur wenn dieser große Energiebedarf mit Erneuerbaren Energien gedeckt werden kann, stimmt die Gesamtbilanz. Deshalb ist es sinnvoll, CCS im ersten Schritt für diejenigen Anwendungen zu priorisieren, bei denen die CO₂-Entstehung schwer vermeidbar ist¹⁷ und CCU insbesondere auf Basis von Energiemengen aus der Überproduktion in Spitzenzeiten zu betreiben. Das übergeordnet wichtigste Mittel, um diesen Zielkonflikt handhabbar zu halten, bleibt in jedem Fall der schnelle Ausbau Erneuerbarer Energien sowie der Speicherkapazitäten, um die Knappheit und Volatilität der Erneuerbaren Energien besonders in NRW zu überwinden.

Die Direktabscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre über Direct Air Capture-Technologien erfordert aufgrund der geringen Konzentration in der Atmosphäre (ca. 420 ppm CO₂) einen erheblich höheren Energieaufwand als die Abscheidung an Punktquellen. Das heißt, solange Erneuerbare Energien noch zeitweise knapp sind, ist die Abscheidung aus Punktquellen zu priorisieren, da diese sowohl energetisch als auch wirtschaftlich günstiger ist und damit ein größeres Potenzial zur Emissionsreduktion bietet.

3.3 Begrenzte Verfügbarkeit von nicht-fossilem Kohlenstoff als Rohstoff

Parallel zum Ausbau der Erneuerbaren Energien braucht es zum Erreichen von Treibhausgasneutralität einen Einstieg in die Produktion und Nutzung alternativer, nicht-fossiler Kohlenstoffquellen (Defossilisierung). Für die Zeit bis 2045 wird mit Blick auf die oben beschriebenen Zielkonflikte erwartet, dass atmosphärische¹⁸ CO₂-Mengen in NRW nicht ausreichend zur Verfügung stehen werden, um die benötigten Mengen an Kohlenstoff (zum Beispiel für die Produktion chemischer Grundstoffe) bereitzustellen. Daher können das Ziel der Defossilisierung der chemischen Industrie und das Ziel der Negativemissionen in Konkurrenz bezüglich der CO₂-Mengen treten. Langfristig sind sowohl CDR als auch CCS und CCU wichtige Bausteine, um gesamtbilanziell den weiteren Anstieg von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu vermeiden. In der Hochlaufphase bis 2045 gilt es im Blick zu behalten, dass das Portfolio dieser Bausteine zeitlich und technologisch differenziert skaliert wird, um Zielkonflikte und negative Nebenfolgen zu vermeiden.

16 Hierzu gehört auch der Bedarf an Erneuerbaren Energien (EE) für die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff – mit einer gewissen Sonderrolle, da Wasserstoff auch für defossilisierte Kohlenwasserstoffe gebraucht wird und somit bei der Skalierung von CCU-Prozessen auch der Bedarf für erneuerbaren Wasserstoff weiter steigt. Je nachdem, wie viel erneuerbarer Wasserstoff importiert wird, ist der Zielkonflikt mit anderen EE-Bedarfen stärker oder geringer ausgeprägt.

17 Siehe Carbon Management Strategie NRW (MWIDE 2021) sowie auch E3G & Bellona (2023).

18 Atmosphärisch impliziert sowohl BioCCU/S als auch DACCU/S (s.o.).

4 Handlungsbedarf

Noch fehlen die Rahmenbedingungen, um industrielle Negativemissionen zu bilanzieren und als Zertifikate mit einem Marktwert handeln zu können. Langfristig ist es unwahrscheinlich, dass der freiwillige Kohlenstoffmarkt (Voluntary Carbon Market) als Marktrahmen ausreicht. Das Eckpunktepapier zur Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) der Bundesregierung benennt die wichtigsten Klärungsbedarfe wie Anrechenbarkeit, ökonomische Anreizbedingungen, Rechtsrahmen und MRV (Monitoring, Reporting and Verification) sowie die gesellschaftliche Akzeptanz.

Da es bei den hier beschriebenen Anwendungen um Kernbereiche der Industrietransformation geht, in denen jetzt Investitionsentscheidungen für die folgenden Jahrzehnte anstehen, ist jedoch klar, dass es bis 2025 eine Perspektive braucht. Die ersten CCS-Anlagen für thermische Abfallbehandlungsanlagen sowie für die Zement- und Kalkindustrie werden aktuell dimensioniert und geplant. Damit diese Anlagen neben den prozessbedingten CO₂-Mengen auch biogene CO₂-Mengen für Carbon Dioxide Removal abscheiden können, müssen sie schon jetzt dafür ausgelegt werden. Hierfür braucht es also schneller klare Anreize sowie Rechts- und Investitionssicherheit als für andere CDR-Anwendungen. Das Zeitfenster, das sich hierfür nach der Veröffentlichung der „nationalen Carbon Management Strategie“ und der Verabschiedung des Kohlendioxid-speicherung- und -transportgesetzes ergibt, sollte dafür genutzt werden, damit der absehbar darauffolgende Infrastruktur- und Anlagenaufbau bereits die Synergien für Negativemissionen ermöglicht.

Eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit der CDR-Zertifizierung ist dabei Teil der Bedingungen für Investitionssicherheit. Nur wenn es eine sichere und ausweisbare Werthaltigkeit von Negativemissionen gibt, lassen sich die umfangreichen Investitionen rechtfertigen. Ein angemessen hoher Zertifikatspreis lässt sich durch eine hohe Verlässlichkeit des Systems und damit einhergehend ein hohes Vertrauen in die Zertifizierung begründen. Hierfür ist es erforderlich, technisch erzeugte, permanente Negativemissionen von nicht-permanenten Senken gut unterscheidbar zu halten und auch unterschiedlich anzureizen. So kann der eingeschränkten Vergleichbarkeit Rechnung getragen werden.

Literaturverzeichnis:

BCG 2021: Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft – Gutachten für den BDI. Boston Consulting Group.

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

Brad, Alina et al. 2024: Whose negative emissions? Exploring emergent perspectives on CDR from the EU's hard to abate and fossil industries. In: *Frontiers in Climate* 5.

CDRmare 2024: Policy Brief – Chancen und Hürden der marinen geologischen CO₂-Speicherung. CDRmare Research Mission.

Chiquier, Solene et al. 2022: A comparative analysis of the efficiency, timing, and permanence of CO₂ removal pathways. In: *Energy & Environmental Science* 15 (10), S. 4389–4403.

dena 2021: Leitstudie: Aufbruch Klimaneutralität – Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH.

E3G; Bellona 2023: Carbon Capture and Storage Ladder – Assessing the Climate Value of CCS Applications in Europe – Briefing document.

Europäische Kommission 2024a: Certification of permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/certification-permanent-carbon-removals-carbon-farming-and-carbon-storage-products/certification-permanent-carbon-removals-carbon-farming-and-carbon-storage-products_en.

Europäische Kommission 2024b: Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU – COM(2024) 62 final. Strasbourg. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS.

Fraunhofer ISI 2021: Langfristszenarien 3. Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands. In: *Langfristszenarien*. URL: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>.

Fraunhofer ISI et al. 2024: THG-Emissionen Deutschland (KSG) – Szenario T45-Strom. URL: <https://enertile-explorer.isi.fraunhofer.de:8443/open-view/52735/6a70b7bf6ce0c58d91e3d63251cf5fad>.

Gabrielli, Paolo et al. 2020: The Role of Carbon Capture and Utilization, Carbon Capture and Storage, and Biomass to Enable a Net-Zero-CO₂ Emissions Chemical Industry. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 59 (15), S. 7033–7045.

Herhold, Patrick et al. 2024: Negative Emissionen. Europa und Deutschland als Katalysatoren einer Billionen-Euro-Industrie. Boston Consulting Group. URL: https://negative-emissions.bcg.com/home/?utm_source=email&utm_medium=email&utm_campaign=dvne2024&utm_description=organic&utm_content=pressrelease.

IN4climate.RR 2022: Technologiekomponentenanalyse Direct Air Capture. Wuppertal: IN4climate.RR.

IPCC (Hrsg.) 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change. 1. Aufl. Cambridge University Press. S. 3–48.

Kopernikus-Projekt Ariadne 2021: Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich.

Kopernikus-Projekt Ariadne 2022: Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien.
URL: <https://ariadneprojekt.de/news/big5-szenarienvergleich/>.

Lamb, William F. et al. 2024: The carbon dioxide removal gap. In: Nature Climate Change, S. 1–8.

Merfort, Anne et al. 2023: Energiewende auf Netto-Null: Passen Angebot und Nachfrage nach CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen? Potsdam: Kopernikus-Projekt Ariadne.

Minx, Jan C et al. 2018: Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis.
In: Environmental Research Letters 13 (6), S. 063001.

MWIDE 2021: Kohlenstoff kann Klimaschutz – Carbon Management Strategie Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf: Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen.

NRW.Energy4Climate 2023: Nachhaltiger Einsatz von Biomasse – Die Rolle von Biomasse in der Energiewende und in einer klimaneutralen Industrie. Düsseldorf.

Prognos et al. 2021: Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann – Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.

Reisinger, Andy; Geden, Oliver 2023: Temporary overshoot: Origins, prospects, and a long path ahead.
In: One Earth 6 (12), S. 1631–1637.

Schenuit, Felix et al. 2023: „Carbon Management“: Chancen und Risiken für ambitionierte Klimapolitik.

Schuett, Lukas 2024: Permanence and Liability: Legal Considerations on the Integration of Carbon Dioxide Removal into the EU Emissions Trading System. In: Transnational Environmental Law 13 (1), S. 87–110.

SCI4climate.NRW 2023: Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045 – Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW.

Smith, Steve M. et al. 2024: The State of Carbon Dioxide Removal – 2nd Edition.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Publikation (08/2024) waren alle Links aktuell.

Impressum:

NRW.Energy4Climate GmbH
(im Rahmen der Initiative IN4climate.NRW)
EUREF-Campus 1c
40472 Düsseldorf

kontakt@energy4climate.nrw
www.energy4climate.nrw
© NRW.Energy4Climate / B24005

Stand:
08/2024

Bildnachweis:
Ruediger-Fessel-iStock.com