IN4 CLIMATE .NRW

CO_2 IN EINER KLIMANEUTRALEN GRUNDSTOFFINDUSTRIE: INFRASTRUKTURANFORDERUNGEN FÜR NRW

Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft

Dieses Dokument wird inhaltlich von folgenden Partnern unterstützt:

Air Liquide creative oxygen · BFI Angewandte Spitzenforschung · covestro · Fraunhofer UMSICHT · HEIDELBERGCEMENT · IW · Kalk vielseitig faszinierend wertvoll · LANXESS Energizing Chemistry · Lhoist · RHM Die Rohstoffhändler · LTT Lehrstuhl für Technische Thermodynamik · RWTH AACHEN UNIVERSITY · SCI4 CLIMATE .NRW · SOLVAY · spenner · thyssenkrupp · vdz · Stahl Wirtschaftsvereinigung Stahl · Wuppertal Institut

IN4climate.NRW – eine Initiative der NRW-Landesregierung

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

IN4climate.NRW lebt von der Diskussion und den verschiedenen Standpunkten der beteiligten Unternehmen und Organisationen. IN4climate.NRW versteht sich nicht als Verband, der die Interessen seiner Mitglieder aktiv in der Politik vertritt. Die Initiative stellt eine Plattform zum Meinungsaustausch und Diskurs dar. In diesem Umfeld entstehen Papiere und Ausarbeitungen, die von einzelnen Mitgliedern erarbeitet, diskutiert und ausformuliert werden. Andere Mitglieder können sich in einem strukturierten Prozess den Ergebnissen oder Diskussionsbeiträgen explizit anschließen und das Dokument mittragen. Alle IN4climate.NRW-Mitglieder, die sich zu einer Unterzeichnung explizit entschlossen haben, werden transparent aufgeführt. Dies erlaubt aber keine Aussage zur Positionierung anderer nicht aufgeführter IN4climate.NRW-Mitglieder. Die Geschäftsstelle von IN4climate.NRW stellt Transparenz und Beteiligungsmöglichkeiten sicher.

AutorInnen: Dr. Christoph Glasner (Fraunhofer UMSICHT), Dr. Iris Rieth (IN4climate.NRW), Dr. Johannes Ruppert (VDZ), Prof. Dr. Ulrich Seifert (Fraunhofer UMSICHT), Christoph Zeiss (Wuppertal Institut)

Beiträge von: Frank Balzer (Air Liquide), Andreas Fischer (IW), Dr. Lukas John (IN4climate.NRW), Prof. Dr. Stefan Lechtenböhmer (Wuppertal Institut), Dr. Frank Ohnemüller (FG Kalk und Mörtel), Theresa Overbeck (BFI), Dario Zander (Wuppertal Institut), Christian Zibunas (LTT RWTH Aachen)

Bibliographische Angaben

Herausgeber: IN4climate.NRW
Veröffentlicht: Oktober 2021
Koordination: Dr. Iris Rieth (IN4climate.NRW), Dr. Christoph Glasner (Fraunhofer UMSICHT), Christoph Zeiss (Wuppertal Institut)
Kontakt: iris.rieth@energy4climate.nrw

Bitte zitieren als: IN4climate.NRW (Hrsg.) 2021: CO_2 in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen.

UNSERE KERNBOTSCHAFTEN

Auch in einer klimaneutralen Industriezukunft in NRW werden prozessbedingte CO_2-Mengen entstehen. Diese müssen abgeschieden und aufgefangen werden, sodass keine Emission stattfindet. Das abgeschiedene CO_2 kann langfristig geologisch gespeichert werden (CCS) oder als Kohlenstoffquelle für neue Produkte dienen (CCU). Aus Sicht der AG Kohlendioxidwirtschaft der Plattform IN4climate.NRW wird das in NRW entstehende CO_2 zukünftig sowohl CO_2-Lagerstätten als auch industriellen Nutzungspfaden zugeführt werden. Für beide CO_2-Routen sind Abscheidetechnologien und der Aufbau einer CO_2-Infrastruktur erforderlich. Zu klären sind hierbei von der **Industrie** und **Wissenschaft** noch **technische Fragen**, u. a. zur jeweils benötigten Reinheit des CO_2 sowie die dafür benötigten Abscheide- und Aufreinigungsanlagen. Seitens der **Politik** besteht vor allem der Bedarf, den **rechtlichen Rahmen** und die **Instrumente** zu schaffen, um eine Kohlendioxidwirtschaft zu ermöglichen. Dazu zählen:

- Ratifizierung des geänderten Art. 6 des **London-Protokolls** und Umsetzung in nationales Recht durch den Bundesgesetzgeber, sodass eine CO_2-Speicherung in internationalen Speicherstätten möglich wird,
- Entwurf bilateraler Abkommen, die Art. 6 des London-Protokolls für den grenzüberschreitenden Transport von CO_2 voraussetzen,
- Anpassung des nationalen Rechtsrahmens für den CO_2-Transport zum Zweck der Nutzung und Speicherung von Kohlendioxid,
- Regelung der Anrechnungsmöglichkeiten für CO_2-Nutzungen (und ggf. negative Emissionen) im **EU-ETS**.

Darüber hinaus lassen sich einige zentrale Hemmnisse nur **gemeinsam** von Industrie, Wissenschaft und Politik lösen:

- Erarbeitung einer **Kommunikationsstrategie** für den gesellschaftlichen Diskurs zur Kohlendioxidwirtschaft in Deutschland,
- Definition von „permanent chemisch gebundenem“ CO_2, sodass die **Anrechenbarkeit im EU-ETS** klar geregelt ist,
- Entwicklung eines **Stufenplans** für eine CO_2-Infrastruktur und Berücksichtigung dieser im **Netzentwicklungsplan** und in der **TEN-E-Verordnung**,
- Starthilfe für eine Kohlendioxidwirtschaft in **Reallaboren** in NRW.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage (Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
CAPEX	Capital Expenditure (Investitionskosten)
CCS	Carbon Capture and Storage (Kohlenstoffabscheidung und -speicherung)
CCU	Carbon Capture and Utilization (Kohlenstoffabscheidung und -nutzung)
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
DAC	Direct Air Capture
EE	Erneuerbare Energien
EU-ETS	EU Emissions Trading System (EU-Emissionshandelssystem)
MVA	Müllverbrennungsanlage
HKW	Heizkraftwerk
OPEX	Operational Expenditure (Betriebskosten)
PtX	Power-to-X
TEN-E	Leitlinien für transeuropäische Energienetze
THG	Treibhausgas

INHALT

UNSERE KERNBOTSCHAFTEN 3

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 4

1. EINLEITUNG 6

2. VERBLEIBENDE CO_2-MENGEN IN EINER KLIMANEUTRALEN INDUSTRIE IN NRW 6

3. UMGANG MIT WEITERHIN ENTSTEHENDEN CO_2-MENGEN 8
3.1 Abscheidung 8
3.2 Nutzung 9
3.3 Speichermöglichkeiten 11
3.4 Transport 12

4. MÖGLICHE INFRASTRUKTUREN FÜR EINEN CO_2-TRANSPORT IN NRW 12
4.1 Infrastrukturkarte NRW 12
4.2 CO_2 als Kohlenstoffquelle 14

5. HANDLUNGSNOTWENDIGKEITEN ZUR EINFÜHRUNG EINER CO_2-INFRASTRUKTUR 16

LITERATUR 25

1. EINLEITUNG

Der Klimawandel und die daraus resultierenden Klimaschutzziele stellen die Grundstoffindustrie in Nordrhein-Westfalen vor große Herausforderungen. Eine klimaneutrale Industrie unter Beibehaltung der Wertschöpfung in Nordrhein-Westfalen ist möglich, bedarf aber neben verlässlichen politischen Rahmenbedingungen auch einer angepassten Infrastruktur. Infrastrukturentwicklungen sind immer langfristige Prozesse, die auf Basis einer möglichst robusten Zukunftsvorstellung gestartet und umgesetzt werden müssen. Bislang berücksichtigen Planungen auf Übertragungsebene nur die Infrastruktur für die Stromversorgung und die Versorgung mit Erdgas sowie Wasserstoff (Netzentwicklungsplanung Strom und Gas). Kohlendioxid ist bisher kein Bestandteil von Infrastrukturplänen in Deutschland. Dabei müssen dringend zeitnah Wege gefunden werden, sodass Kohlendioxid zukünftig nicht mehr emittiert, sondern abgeschieden und gebunden wird – wenn die Entstehung nicht zu vermeiden ist.

Der Bedarf und die Voraussetzungen geeigneter Infrastrukturen für den Transport von CO_2 wurden anfänglich in einem gemeinsamen Workshop des Vereins Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ) und der Landesinitiative IN4climate.NRW sowie derem wissenschaftlichen Kompetenzzentrum SCI4climate.NRW mit Unternehmen, NGOs und Wissenschaftlern diskutiert (VDZ 2019). In der Folge fand eine vertiefte Auseinandersetzung mit offenen Fragen in der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft von IN4climate.NRW und bei der Ausarbeitung von Szenarien zum industriellen Klimaschutz durch SCI4climate.NRW statt. Hierbei wurden die unvermeidbare CO_2-Entstehung in NRW (IN4climate.NRW 2020) und grundlegende rechtliche Fragen einer Kohlendioxidwirtschaft untersucht (Benrath 2021).

Die IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft hat vor diesem Hintergrund mögliche Optionen zum Umgang mit prozessbedingt anfallenden CO_2-Mengen diskutiert und diese Überlegungen in dem vorliegenden Papier festgehalten. Beschrieben werden CO_2-Mengen in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie in Nordrhein-Westfalen, mögliche Optionen für einen Umgang mit diesen Mengen und die erforderlichen Infrastrukturentwicklungen, welche sich daraus ableiten lassen. Zusätzlich gibt die Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft Handlungsempfehlungen, wie eine Umsetzung dieser Infrastrukturentwicklungen ermöglicht und beschleunigt werden kann.

2. VERBLEIBENDE CO_2-MENGEN IN EINER KLIMANEUTRALEN INDUSTRIE IN NRW

Die prozessbedingten Emissionen aus der Grundstoffindustrie stellen eine besondere Herausforderung für die Klimaneutralität dar, da sich die CO_2-Entstehung bei einigen Produktionsprozessen absehbar nicht vermeiden lässt, sofern die entsprechenden Grundstoffe auch zukünftig hergestellt werden. Jedoch ist auch manche brennstoffbedingte CO_2-Entstehung aus heutiger Sicht nicht vermeidbar, da für einige Prozesse (z. B. die Herstellung von Zementklinker) voraussichtlich auch zukünftig kohlenstoffbasierte Brennstoffe benötigt werden und noch nicht absehbar ist, ob alle Brennstoffenergiebedarfe mit Wasserstoff gedeckt werden können. Das Wuppertal Institut hat in Zusammenarbeit mit dem VDZ, dem VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI) und weiteren wissenschaftlichen Partnern in einer Studie (SCI4climate.NRW 2021a) drei Zielbilder für eine klimaneutrale Industrie in NRW erstellt, um daraus Bandbreiten für anfallende CO_2-Mengen in der Grundstoffindustrie abzuleiten. Grundlage bilden industrielle Prozesse mit langfristig (nahezu) unvermeidbarer CO_2-Entstehung. Die zukünftige CO_2-Entstehung an industriellen Punktquellen in einem klimaneutralen NRW wurde für drei Zielbilder abgeschätzt, in denen die Einbettung des Industriesektors ins Energiesystem auf unterschiedliche Weise berücksichtigt wurde. Jedes Zielbild bildet eine hypothetische Ausgestaltung einer klimaneutralen Industrie ab. Die Annahmen zu Produktionsmengen im Jahr 2045 im Vergleich zu heute (Basisjahr 2016) wurden in allen Zielbildern gleich getroffen. Sie basieren auf historischen Trends, publizierten Szenariostudien zur Entwicklung spezifischer Sektoren, eigenem ExpertInnenwissen sowie Konsistenzbetrachtungen. (ebd.) Die drei Zielbilder berücksichtigen noch nicht mögliche Suffizienz- und Effizienzpotenziale in den Produktionsmengen.

- **Zielbild Tech_Min:** In diesem Zielbild wird für jede Punktquelle als Einzelanlage ein theoretisches technisches Minimum der CO_2-Entstehung angenommen. Dafür wird vorausgesetzt, dass der sehr hohe Bedarf an Erneuerbaren Energien, der durch die Umstellung einiger Prozesse entsteht, gedeckt werden kann und benötigte Infrastrukturen an jedem Standort verfügbar sind.

- **Zielbild SYS:** Dieses Zielbild nimmt über den Industriesektor hinaus das Gesamtsystem in den Blick und wägt (aus Sicht des Wuppertal Instituts plausibel) zwischen folgenden Faktoren ab:
  - Minimierung der CO_2-Entstehung aus industriellen Quellen,
  - entstehender Bedarf an Erneuerbarer Energie,
  - Infrastrukturerfordernisse,
  - Kosten,
  - sonstige systemische Effekte (z. B. Verlagerung von Abfallströmen).

  Gegenüber dem Zielbild Tech_Min kommen hier vor allem CO_2-Mengen aus abfallbasierten Alternativbrennstoffen der Zementklinker- und Branntkalkherstellung sowie aus der thermischen Nutzung von Feedstocks in den Steamcrackern hinzu.

- **Zielbild BECCS:** Dieses an die Studie „Klimaneutrales Deutschland“ (Prognos et al. 2020) angelehnte Zielbild entspricht weitgehend dem Zielbild SYS. Jedoch werden für die Bereitstellung von Prozessdampf in der Grundstoffchemie sowie für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme für die Walzwerke der Stahlindustrie gezielt große Mengen biogene Energieträger (gasifizierte Biomasse) eingesetzt, um (in Kombination mit CCS) negative Emissionen zu erzeugen (BECCS).

In der Analyse des Wuppertal Instituts wurden in Nordrhein-Westfalen für das Zielbild SYS 50 Standorte der Grundstoffindustrie (Eisen und Stahl, Grundstoffchemie, Zement, Kalk und Glas) identifiziert.

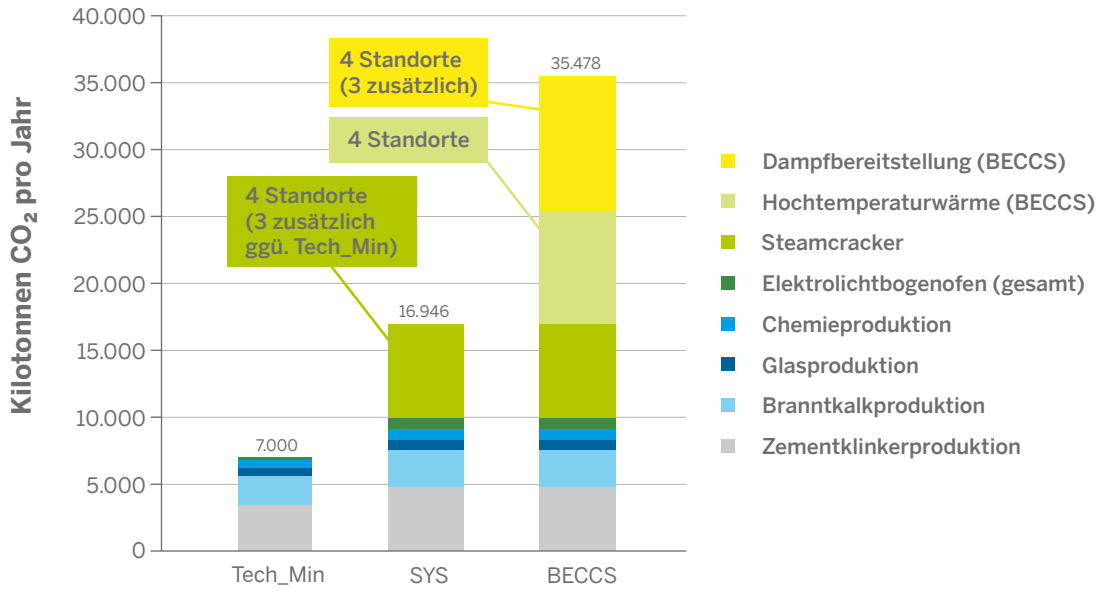


Abbildung 1: CO_2-Entstehung an industriellen Quellen in NRW in einer klimaneutralen Industrie im Jahr 2045 nach SCI4climate.NRW (SCI4climate.NRW 2021a)

Die Studie zeigt, dass in den drei Zielbildern einer klimaneutralen Industrie in Nordrhein-Westfalen weiterhin CO_2 anfallen wird, wenn auch mit deutlichen Mengenunterschieden. Außerdem fällt CO_2 in den drei Zielbildern an unterschiedlich vielen Standorten an (s. Abbildung 1). Die in dem Zielbild Tech_Min angenommene geringe Menge dient einer Auslotung des theoretisch technischen Minimums einer zukünftigen CO_2-Entstehung; seine Realisierung würde jedoch den Einsatz äußerst großer Mengen Erneuerbarer

Energie erfordern, die mit Blick auf das gesamte Energiesystem an anderer Stelle gewinnbringender eingesetzt werden könnten. Klar ist, in allen drei Zielbildern werden weiterhin CO_2-Mengen anfallen, für die im Zuge der Transformation hin zu einem klimaneutralen System Lösungen gefunden werden müssen.

3. UMGANG MIT WEITERHIN ENTSTEHENDEN CO_2-MENGEN

3.1 Abscheidung

Einige wichtige Industrieprozesse zur Herstellung von Grundstoffen sind prozessbedingt mit der Entstehung von CO_2 aus den Einsatzstoffen verbunden. Wenn die Entstehung im Prozess selbst nicht vermieden werden kann, gilt es mit Blick auf die Klimaschutzziele, die Emission des CO_2 in die Atmosphäre zu verhindern. In diesen Fällen wird eine Abscheidung des in dem Prozess gebildeten CO_2 notwendig. In europäischen Forschungs- und Pilotprojekten wurden und werden unterschiedliche Verfahren zur CO_2-Abscheidung aus Industrieprozessen hinsichtlich ihrer Eignung, Voraussetzungen und technischen Umsetzung untersucht.

CO_2-Abscheidung im engeren technischen Sinn umfasst Prozessschritte, die dazu dienen, das in einem (Prozess-)Gasgemisch enthaltene Kohlendioxid hinreichend rein und in komprimierter, gasförmiger, verdichteter oder verflüssigter Form für den Abtransport oder für eine weitere Nutzung bereitzustellen. CO_2-Abscheidung im weiteren Sinn umfasst auch Veränderungen der vorgelagerten Hauptprozesse, die darauf abzielen, die Konzentration von Kohlendioxid im Abgas dieser Prozesse deutlich zu erhöhen: Je höher die Konzentration des Kohlendioxids bereits im Ausgangsgemisch ist, desto niedriger ist der unvermeidliche Mindestenergieaufwand, um Kohlendioxid in eine nahezu reine Form zu überführen.
Neben der Abscheidung von Kohlendioxid am Ende eines Hauptprozesses (z. B. als Post-Combustion-Abscheidung) existieren auch Prozesse, mit denen bereits in einem dem Hauptprozess vorgelagerten Schritt Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid abgetrennt und aus dem Prozess ausgeschleust wird.

Während die Abscheidung von CO_2 in petrochemischen Prozessen sowie im Zusammenhang mit der Erzeugung von Synthesegas seit langem zum Stand der Technik zählt, stehen heute weitere Technologien zur industriellen CO_2-Abscheidung in anderem Umfeld oder für eine Demonstration im Industriemaßstab bereit (ECRA 2020). Der Stand der Technik zur CO_2-Abscheidung ist in Berichten zahlreicher Forschungsprojekte der letzten Jahre (siehe **Infoboxen**) und u. a. in den Technical Reports 27912 und 27922 der ISO festgehalten (ISO/TR 27912:2016(en); ISO/TR 27922:2021(en)).

Stand der Technik der CO_2-Abscheidung in der Kalk- und Zementindustrie

Ein Hauptaugenmerk der Zementindustrie zur Abscheidung von prozessbedingtem CO_2 liegt aktuell auf Oxyfuel- und Post-Combustion-Technologien (Hoenig et al. 2012, IEAGHG 2013, ECRA CSI 2019), aber auch andere Verfahren werden derzeit getestet. Eine Ofenanlage nach dem Pure-Oxyfuel-Prinzip befindet sich als Demonstrationsanlage in Planung (Thomas 2019), während die Aminwäsche bereits in der Zementindustrie im Pilot- sowie Demonstrationsmaßstab getestet wurde (Brevik 2017, CemNet 2019a). Das Calcium-Looping-Verfahren bietet sich vor allem in der Kalk- und Zementindustrie an, da Branntkalk (CaO) als Adsorbens dient, und wird in verschiedenen Varianten derzeit im Pilotmaßstab erprobt (LEAP o. J., TCC 2017). Die Kalkindustrie arbeitet zudem im AiF-IGF Projekt 21261 BG (2020-2022) an einem Verfahren zur CO_2-Abscheidung mittels eines Feststoffreaktors (AiF 2020). Ein Upscaling auf Reallabormaßstab an einem Kalkwerk ist bereits in Planung (BVK o. J.). Eine Pilotanlage zur indirekten Kalzinierung, bei der das rohstoffbedingte und das brennstoffbedingte CO_2 separat anfällt, wurde mehrere Jahre in einem belgischen Zementwerk betrieben (LEILAC Project o. J.), eine größere Anlage befindet sich derzeit in Planung (CemNet 2019a).

Stand der Technik der CO_2-Abscheidung in der Stahlindustrie

In der Stahlindustrie wird ebenfalls intensiv an den verschiedenen Technologien zur CO_2-Abscheidung geforscht. Dabei stehen die Prozessgase der integrierten Hochofenroute, der Hüttengaskraftwerke sowie die Abgase der erdgasbetriebenen Direktreduktion im Fokus. Das Projekt ULCOS erforschte die CO_2-Abscheidung und Rückführung der CO-reichen Abgase am Hochofen (Top Gas Recycling), wodurch die CO_2-Konzentration im Gas und somit die Effizienz der CO_2-Abscheidung steigt (Leeson et al. 2017). Im Projekt Stepwise wird eine Pre-Combustion-Technologie erforscht, bei der das CO mittels Wassergas-Shift-Reaktion zu CO_2 reagiert und abgeschieden wird. Der dabei entstehende Wasserstoff wird als Brennstoff genutzt (The Stepwise SEWGS Project o. J.).

Bei der erdgasbetriebenen Direktreduktionsanlage können die entstehenden CO_2-Mengen über aminbasierte Absorption abgeschieden werden (Tenova HYL et al. 2020). Außerdem wird aktuell an Membranverfahren für den Einsatz an Direktreduktionsanlagen geforscht. Die Abscheidung und Nutzung von CO_2 für Grundstoffe der chemischen Industrie wird in Projekten wie Carbon2Chem® demonstriert (Deerberg et al. 2018).

Neben den hier betrachteten Punktquellen von CO_2 wird es auch zukünftig diffuse CO_2-Emissionen geben (z. B. Landwirtschaft, Luftfahrt). Können diese nicht vermieden werden, müssen sie ausgeglichen werden, um Klimaneutralität zu erreichen. Eine technische Lösung bietet neben der Aufforstung und BECCS die Direct-Air-Capture-Technologie (DAC). Da eine Aufkonzentrierung von CO_2 aus der Atmosphäre mit DAC sehr energieintensiv ist, ist die CO_2-Vermeidung und die energieeffizientere Abscheidung an bereits höher konzentrierteren CO_2-Punktquellen mit den oben genannten Verfahren zu priorisieren.

3.2 Nutzung

Die derzeitige technische Nutzung von Kohlendioxid umfasst eine Vielzahl von Verfahren und Anwendungen, in denen dieses Gas aufgrund seiner spezifischen stofflichen Eigenschaften Verwendung findet. Dies schließt physikalische Anwendungen (z. B. als Kälteträger in Form von Trockeneis, als Kältemittel in geschlossenen Kältekreisläufen, als Strahlmittel oder als Lösch- oder Inertisierungsgas) ebenso ein wie eine Verwendung in der Lebensmittelindustrie. Zudem ist Kohlendioxid ein Ausgangsstoff chemischer und biochemischer Umsetzungen, wobei die natürliche Photosynthese als mehrstufiger Aufbau von Biomasse aus Kohlendioxid und Wasser unter Nutzung von Energie in Form von Licht zweifellos eine Sonderstellung einnimmt.

Im Hinblick auf das Ziel einer treibhausgasneutralen Industrie sind insbesondere technische Nutzungsformen von Kohlendioxid von besonderem Interesse, die die Kohlenstoffnutzungskette von der Bereitstellung bis zur CO_2-Emission in die Atmosphäre verlängern und langfristig idealerweise sogar zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs beitragen. Auf diese Weise hilft die technische Nutzung von CO_2, den Eintrag von Kohlenstoff aus energiereichen fossilen Rohstoffen (Kohle, Erdöl und Erdgas) in die Techno- und Biosphäre zu minimieren. Über den Zwischenschritt der Methanol-Synthese aus CO_2 und Wasserstoff ist es grundsätzlich möglich, die nötigen Rohstoffe für den Großteil industriell bedeutsamer organisch-chemischer Produkte bereitzustellen (Kätelhön et al. 2019).

Eine grundsätzliche Herausforderung bei der Nutzung von Kohlendioxid als Kohlenstoffträger für chemische Reaktionen besteht darin, den niedrigen Energiegehalt des Kohlendioxids durch den Einsatz energiereicher Reaktionspartner, insbesondere Wasserstoff, oder durch eine Energiezufuhr auf anderem Weg (z. B. elektrochemisch) anzuheben, um zu energiereicheren Zielprodukten zu gelangen.

CO_2 als Rohstoff für die Harnstoffsynthese

Bereits heute werden großtechnische Verfahren eingesetzt, um CO_2 als Rohstoff zu nutzen und in Produkten zu binden. Die Harnstoffsynthese aus Ammoniak und Kohlendioxid ist hier das hinsichtlich der weltweiten Produktionsmenge bedeutsamste Verfahren (Otto et al. 2017). Das zur Harnstoffsynthese benötigte Kohlendioxid steht im Fall der erdgasbasierten Ammoniakproduktion bereits aus dem Vorprozess im Überschuss zur Verfügung und kann somit vor Ort genutzt werden, wodurch sich die emittierte CO_2-Menge reduziert. Ein Potenzial zur zusätzlichen Einbindung von CO_2 kann sich bei der Harnstoffproduktion ergeben, sobald Ammoniak künftig ohne die Nutzung kohlenstoffhaltiger fossiler Energierohstoffe erzeugt wird – also beispielweise mit grünem Wasserstoff auf Basis Erneuerbarer Energie.

Wird Kohlendioxid mit dem Ziel einer Emissionsminderung chemisch genutzt, um energiereiche Produkte zu erzeugen, ist es wichtig, dass auch die notwendige Energie bzw. die benötigten energiereichen Reaktionspartner mit niedriger THG-Bilanz bereitgestellt werden (acatech (Hrsg.) 2018). Nur so lässt sich eine positive Gesamtwirkung erzielen (ebd.). Gleichzeitig erfordert eine künftige, treibhausgasneutrale Erzeugung kohlenstoffhaltiger Power-to-X-Produkte (z. B. Methanol oder Naphtha) an Standorten mit günstig verfügbarer Erneuerbarer Energie die Bereitstellung von Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid, welches entweder lokal mittels DAC, der Biomasseverbrennung mit anschließender CO_2-Abscheidung oder durch Anlieferung aus Quellen mit energetisch günstigerer CO_2-Abscheidung bereitgestellt werden könnte. Im Hinblick auf CCU bedeutet dies, dass die Abscheidung (CC) und die Nutzung (U) des Kohlendioxids künftig nicht am gleichen Ort stattfinden muss.

Eine energetisch andere Situation als bei energiereichen Produkten ergibt sich für die Einbindung von Kohlendioxid in basische Materialien wie Beton (Mineralisierung/Rekarbonatisierung). Hier liegt das Gleichgewicht dieser Prozesse unter Umgebungsbedingungen auf der Seite der entsprechenden Karbonate. Dies bedeutet, dass – anders als bei der CO_2-basierten Synthese energiereicher Produkte – dieser chemische Reaktionspfad an sich keine Energiezufuhr benötigt. Im Lebenszyklus kalkbasierter Erzeugnisse erfolgt in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen auf natürliche Weise eine Rekarbonatisierung und somit dauerhafte mineralische Bindung von CO_2. Das Potenzial der natürlichen CO_2-Wiederaufnahme kann in einigen Anwendungen technisch erhöht werden (EuLa 2021), wie zum Beispiel bei der Eisen- und Stahlschlacke aus Hochofen und Konverter (DECHEMA o. J.) oder bei rezykliertem Zement (VDZ 2020). Eine Nutzung und mineralische Einbindung von CO_2 kann zum Teil bereits bei der Herstellung von Kalk- und Betonprodukten erfolgen (Grosso et. al 2020, Ruppert et al. 2019). Für die zusätzliche Mineralisierung/Rekarbonatisierung kann die Logistik und Aufbereitung der geeigneten Materialien mit unterschiedlich hohem Aufwand verbunden sein. Vorteil ist neben der CO_2-Nutzung die abschließende dauerhafte mineralische Bindung des CO_2.

Um Klimaneutralität zu erreichen, muss gewährleistet werden, dass die Kohlenstoffkreisläufe bilanziell geschlossen sind. CCU ist dafür eine mögliche Option und führt durch Mehrfachnutzung des Kohlenstoffs auch zur Vermeidung von THG-Emissionen, die mit der Bereitstellung fossiler oder biomassestämmiger kohlenstoffhaltiger Rohstoffe verbunden sind. Die Abschätzung möglicher Potenziale von CCU erfolgt separat zu einem späteren Zeitpunkt.

3.3 Speichermöglichkeiten

Während CCU auch darauf abzielt, das Kohlendioxid bzw. den darin enthaltenen Kohlenstoff erneut zu nutzen, besteht das Ziel von Carbon Capture and Storage (CCS) darin, Kohlendioxid aus dem Kreislauf zu entfernen und langfristig zu speichern.

Speichermöglichkeiten innerhalb von Deutschland

Die geologische Speicherung von CO_2 innerhalb von Deutschland ist zurzeit rechtlich ausgeschlossen (Benrath 2021). Nach dem weitgehend prohibitiven Kohlendioxid-Speicherungsgesetz von 2012 haben die Infrastruktur und Speicherstätten, aber auch die hierfür benötigten politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland keine Weiterentwicklung erfahren. Für die geologische CO_2-Speicherung innerhalb von Deutschland wurde eine Speicherkapazität von 6,3 bis 12,3 Gigatonnen CO_2 (Gt CO_2) berechnet (Knopf et al. 2010). Am brandenburgischen Standort Ketzin wurde ein Forschungs- und Pilotprojekt zur geologischen CO_2-Speicherung erfolgreich abgeschlossen (GFZ 2004). Es bleibt jedoch fraglich, ob eine Speicherung in Deutschland in der Zukunft möglich sein wird. Die Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft konzentriert sich daher auf Speichermöglichkeiten außerhalb Deutschlands.

Speichermöglichkeiten außerhalb von Deutschland

International haben sich Projektkonsortien gebildet, um die langfristige geologische Speicherung weiterzuentwickeln und schließlich als Dienstleistung anbieten zu können. Als Projekt innerhalb der EU ist u. a. „Strategy CCUS“ zu nennen, das Speichermöglichkeiten im Süden und Osten Europas On- und Offshore in den Blick nimmt (Rocha 2021). Als Potenzial der Lagerstätten werden für Süd- und Osteuropa 8,5 Gigatonnen CO_2 genannt (ebd.). Das größte Speicherpotenzial wird unter geologischen Deckschichten im Untergrund unter der Nordsee gesehen. CO_2 kann dort in salinen Aquiferen, in Sandsteinen oder in erschöpften geologischen Lagerstätten für Erdöl oder Erdgas dauerhaft gespeichert werden. Vor Norwegen und Großbritannien wird die mögliche Kapazität derzeit auf 61 bis 73 Gigatonnen CO_2 geschätzt (ECRA 2020, Global CCS Institute 2020). Große Teile davon gilt es jedoch noch zu erschließen.

Für Deutschland und insbesondere für NRW rückt aufgrund der räumlichen Nähe und der möglichen Zugänge die Offshore-Speicherung von CO_2 im Untergrund unter der Nordsee in den Fokus. Verschiedene Unternehmen machen mit Projekten in der Nordsee bereits als zukünftige Dienstleister für CO_2-Speicherung auf sich aufmerksam. Drei konkrete Projekte werden exemplarisch in Abbildung 2 aufgezeigt. Weitere Projekte sind z. B. bei der europäischen Zero Emissions Platform (ZEP 2021) zu finden und sind u. a. in Island und Dänemark verortet.

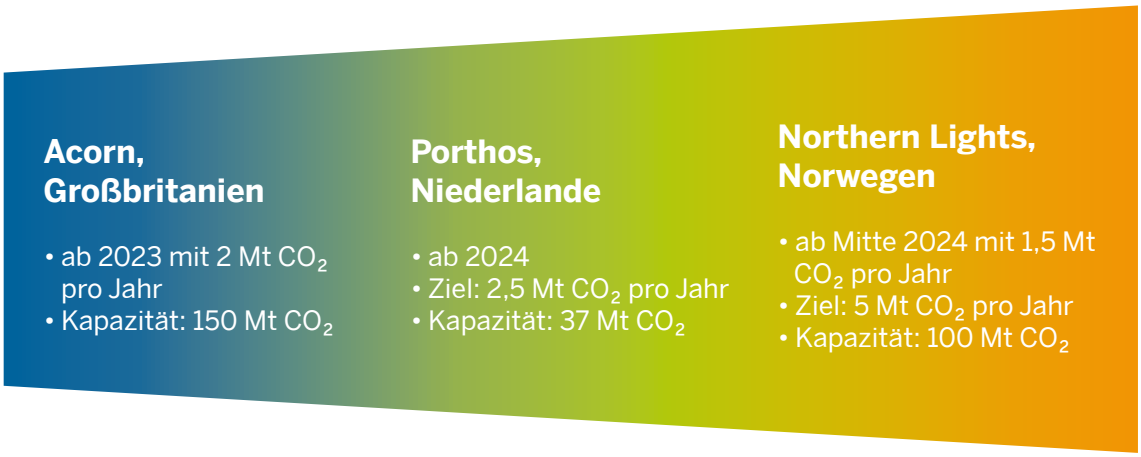


Abbildung 2: Beispielhafte CCS-Projekte in Europa (Porthos und ACT Acorn Consortium 2019, Smit 2021, Northern Lights und Arends 2021), Angabe in Megatonnen CO_2 (Mt CO_2)

3.4 Transport

Grundsätzlich kann CO_2 auf verschiedene Weise transportiert werden, u. a. per Pipeline, Schiff, Bahn oder LKW. Während der Transport mittels Pipeline kontinuierlich durchgeführt werden kann, handelt es sich bei den LKW-, Bahn- und Schiffstransporten um diskontinuierliche Prozesse, für die auch eine Zwischenspeicherung von CO_2 vor der Verladung am Ort der CO_2-Entstehung und nach der Entladung erforderlich ist. Ein weiterer Unterschied liegt in der rechtlichen Einstufung von CO_2, die bislang sowohl von der Transportart als auch der Verwendung von CO_2 (Nutzung oder Speicherung) abhängig ist. Ein von IN4climate.NRW beauftragtes Gutachten (Benrath 2021) stellt die aktuelle Rechtslage detailliert dar und zeigt Lücken auf (s. Kapitel 5).

In der Anfangszeit mit kleineren Carbon-Capture-Projekten erscheint ein Transport mit Bahnwaggons oder LKWs zunächst ausreichend. Falls die CO_2-Quelle an oder in der Nähe einer Wasserstraße gelegen ist, sind auch Schiffstransporte möglich. Ein ISO-Container für den Straßentransport kann 20 Tonnen CO_2 fassen (Ruban 2021). Ein Eisenbahnkesselwagen kann bis zu 60 Tonnen CO_2 fassen (ebd.), sodass in einem Ganzzug bis zu 1.200 Tonnen CO_2 transportiert werden können. Je nach Größe des Schiffes können über Flüsse und Kanäle 1.000 bis 8.000 Tonnen CO_2 pro Ladung bei 15 bar Druck transportiert werden (ebd.). Für den Transport größerer Mengen CO_2, wie sie langfristig in NRW erwartet werden können, ist daher eine Pipeline-Infrastruktur sinnvoll, unabhängig davon, ob das CO_2 gespeichert oder an anderer Stelle weiterverwendet wird.

Das Forschungsprojekt ELEGANCY hat die verschiedenen Transportmöglichkeiten für CO_2 von den Quellen in Deutschland bis zu den Speicherfeldern von Porthos für den Gesamttransportweg von etwa 5.280 Kilometern betriebswirtschaftlich gegenübergestellt: Der Schiffstransport (inkl. Be- und Entladen) über die Flüsse, Kanäle und über die Nordsee zur Lagerstätte koste mit ca. 13,50 Euro pro Tonne CO_2 mindestens doppelt so viel wie der Aufbau und die Nutzung einer Pipeline-Infrastruktur, um die CO_2-Quellen in Deutschland mit der Lagerstätte Porthos zu verbinden (Benrath et al. 2020).

Technisch gesehen, muss der CO_2-Strom eine bekannte Zusammensetzung haben, um die richtigen Transportbedingungen gewährleisten zu können. Hierbei gilt es, Mindestanforderungen festzulegen, die für den flüssigen Transport des CO_2 eingehalten werden müssen (Brown 2021). Anforderungen an die Qualität des in Pipelines zu transportierenden Kohlendioxids werden beispielsweise in den Technical Reports 27913 und 27921 eingehend adressiert (ISO/TR 27921:2020(en); ISO/TR 27913:2016(en)).

4. MÖGLICHE INFRASTRUKTUREN FÜR EINEN CO_2-TRANSPORT IN NRW

4.1 Infrastrukturkarte NRW

Das Wuppertal Institut hat in einer Studie (SCI4climate.NRW 2021a) ein mögliches Infrastrukturbild für die entstehenden CO_2-Mengen in NRW innerhalb des Zielbilds SYS einer klimaneutralen Industrie aufgezeigt (siehe Kapitel 2). Dieses geht von einer anfallenden Menge von ca. 16,9 Megatonnen CO_2 pro Jahr aus. Die Ausgestaltung dieser Pipeline-Infrastruktur orientiert sich an der anfallenden CO_2-Menge, der geografischen Lage der Punktquellen und der angedachten Lagerstätten in der Nordsee. Grundsätzlich wurde versucht, für möglichst viele Punktquellen eine Infrastrukturanbindung zu finden. In Ausnahmefällen wurden Punktquellen nicht berücksichtigt, die eine ungünstige geographische Lage (Entfernung und unwegsames Gelände) in Bezug auf die übrigen Quellen aufwiesen, an denen nur geringe CO_2-Mengen anfielen und für die alternative Transportmöglichkeiten (Zug) denkbar sind.

Die hier vorgenommene Clusterung berücksichtigt 97 Prozent der in NRW anfallenden CO_2-Mengen aus dem Zielbild SYS und verbindet 30 von 50 Standorten in NRW mit einer Pipeline. Die 20 kleineren Punktquellen in NRW, welche in diesen Perspektiven zunächst keine Berücksichtigung gefunden haben, sind oftmals dezentral an den Grenzen von NRW verortet (Nord-, Süd- und Ostwestfalen sowie im Aachener

Raum). Perspektivisch wäre es möglich, auch diese 20 Standorte nach einer konkreten Kosten-Nutzen-Abwägung in ein Pipeline-System einzubinden. Eine Einbeziehung lokaler CO_2-Senken (wie zum Beispiel CCU) ist in dieser Darstellung nicht erfolgt und müsste bei einer konkreteren Planungsphase ergänzend berücksichtig werden (s. Kapitel 4.2).

Zentrale Erkenntnisse aus (ebd.) sind:

- Für die entstehenden CO_2-Mengen und unter Berücksichtigung der geographischen Lage und Infrastrukturanbindung der Standorte ist für einen großen Teil der Standorte der CO_2-Transport per Pipeline die sinnvollste Lösung.

- Die CO_2-Entstehung in der Zement- und Kalkindustrie hat in allen betrachteten Zielbildern einen wesentlichen Anteil.

- Die zukünftige CO_2-Entstehung an den Steamcrackern kann einen signifikanten Anteil an der gesamten CO_2-Menge haben. Die Mengen treten zudem sehr konzentriert an nur wenigen Standorten auf. Die zukünftige Entwicklung der CO_2-Entstehung an Steamcrackern ist gleichzeitig mit vielen Unsicherheiten behaftet – u. a. hinsichtlich einer möglichen Elektrifizierung, aber auch hinsichtlich veränderten Feedstocks sowie ggf. Konkurrenz durch andere Verfahren der Herstellung von Olefinen und Aromaten. Die Zukunft der Steamcracker ist bei der Planung einer zukünftigen CO_2-Infrastruktur daher in besonderer Weise mitzubetrachten.

- Eine explizite BECCS-Strategie zur Erzeugung negativer Emissionen an Standorten der Stahl- und Chemieindustrie hätte auf die Länge und Struktur eines CO_2-Pipelinesystems kaum Auswirkungen, da die zusätzlichen Standorte nahe der aus dem Zielbild SYS entwickelten Pipeline liegen. Jedoch müsste dies aufgrund der möglichen großen CO_2-Mengen bei der Kapazitätsauslegung von Pipelines von vornherein mitgedacht werden.

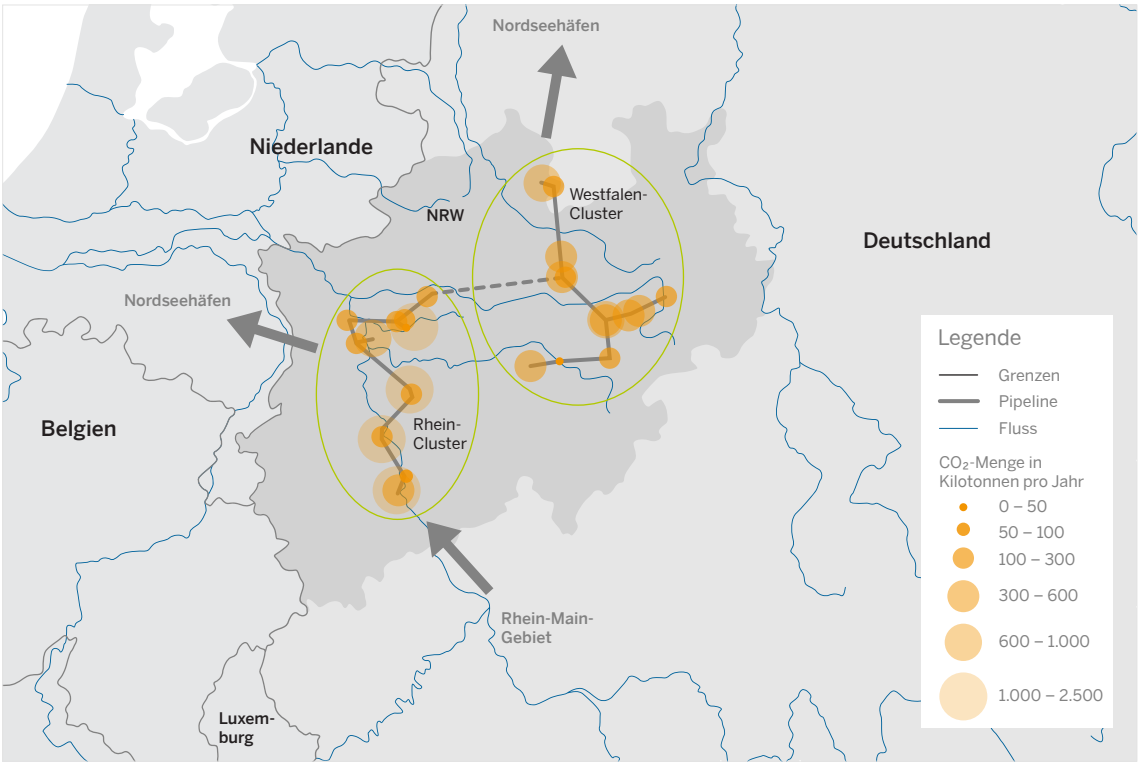


Abbildung 3: CO_2-Pipeline-Infrastrukturentwurf für das Rhein- und Westfalen-Cluster im Zielbild SYS in einer klimaneutralen Industrie inklusive möglicher Anbindungen und Querverbindungen (gestrichelt) (nach SCI4climate.NRW 2021a)

Der im Rahmen der Studie des Wuppertal Institutes (ebd.) gezeigte, auf NRW beschränkte CO_2-Pipeline-Infrastrukturentwurf stellt lediglich eine mögliche Konfiguration dar. Andere Infrastrukturen sind ebenfalls denkbar ((ebd.); Diskussion in der AG Kohlendioxidwirtschaft) und zeigen die Bandbreite der möglichen Entwicklungen:

1. Alternative Infrastrukturoption: Fokussierung auf einen CO_2-Hub

Die CO_2-Infrastruktur in NRW könnte sich lediglich auf einen CO_2-Hub bzw. Zielhafen (Rotterdam oder Wilhelmshaven) konzentrieren. Der in der Abbildung 3 gezeigte Infrastrukturentwurf würde hierfür z. B. um einen ca. 100 Kilometer langen Pipelineabschnitt zwischen den Zementwerken in Beckum und dem Chemiepark Marl erweitert werden.

2. Alternative Infrastrukturoption: Verbindung der Rhein- und Westfalen-Cluster

Durch eine Verbindung der Rhein- und Westfalen-Cluster ausgehend von dem Chemiepark Marl zu den Zementwerken in Beckum könnte eine erhöhte Flexibilität beim Abtransport des CO_2 erreicht werden, da das CO_2 wahlweise in Richtung Rotterdam oder Wilhelmshaven transportiert werden könnte. Jedoch müssten die Dimensionierung der Verbindungspipeline und die nachgelagerten Anschlüsse angepasst werden.

3. Alternative Infrastrukturoption: Anbindung des Rhein-Main-Gebietes

In dem gezeigten Infrastrukturentwurf sind mögliche CO_2-Mengen aus angrenzenden Regionen, die Nordrhein-Westfalen durchfließen, nicht mitberechnet worden. Die Anbindung für den Transport zusätzlicher CO_2-Mengen aus dem Rhein-Main-Gebiet, welche den Anschluss des Rhein-Clusters im Chemiewerk in Wesseling nutzen könnte, ist aber tendenziell eine sinnvolle Option und könnte Auswirkungen auf die in NRW zu errichtende Infrastruktur haben.

4.2 CO_2 als Kohlenstoffquelle

Die zuvor angestellten Betrachtungen haben Infrastrukturen allein vor dem Hintergrund untersucht, wie und wohin das entstehende CO_2 abtransportiert werden kann, bzw. wie sich durch Biomasseeinsatz und CCS Negativemissionen erzeugen ließen. Dieses Zielbild ist als Startpunkt hilfreich, um potenzielle Strukturen einer CCS-Infrastruktur zu skizzieren. Jedoch ist eine zukünftige, komplexere Realität zu erwarten, sodass diese ermittelten Infrastrukturen noch einmal in einen umfangreicheren Kontext gesetzt werden müssen. Dieser umfasst die Tatsache, dass insbesondere die Chemie- und Petrochemieindustrie eine erhebliche Menge Kohlenstoff benötigen wird, um weiterhin an ihren Standorten in NRW zu wirtschaften. Hier ist die zentrale Frage, wie dieser benötigte Bedarf gedeckt werden kann. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, den Kohlenstoff bereitzustellen, was jedoch jeweils teils signifikant unterschiedliche CO_2-Infrastrukturen bedeuten würde. Die offensichtlichsten Möglichkeiten für die Optionen in der (Petro-)Chemieindustrie werden im Folgenden kurz skizziert.

Option 1: Der Kohlenstoffbedarf wird durch Biomasse gedeckt

Schon heute sind die nachhaltig verfügbaren Biomassepotenziale begrenzt. Es ist nicht zu erwarten, dass zukünftig mehr Biomasse zur Verfügung stehen wird, insbesondere nach der Ankündigung des Bundesumweltministeriums (BMU) im Mai 2021 (BMU 2021), zunehmend Flächen zur dauerhaften Kohlenstoffeinbindung vorzusehen, z. B. Moore. Des Weiteren muss langfristig eine gesamtsystemische Optimierung erfolgen. Biomasse ist eine potenzielle Kohlenstoffquelle für den benötigten Kohlenstoff in der Stahlerzeugung, ein möglicher Brennstoff zur Prozesswärmebereitstellung oder ein Rohstoff für chemische Prozesse. Alle denkbaren Anwendungsfelder werden sich nicht vollständig durch biogenen Kohlenstoff decken lassen. Die effizienteste Verwendung von Biomasse (in der Grundstoffindustrie) muss ermittelt werden. Beispielsweise könnte zukünftig der Biomasseeinsatz mit Produktionsrouten gekoppelt werden, bei denen eine Abscheidung von unvermeidbar entstandenem CO_2 erfolgt, sodass hier ein Potenzial für Negativemissionen gegeben ist.

Damit bliebe wahrscheinlich für die Chemieindustrie kaum nachhaltig erzeugte Biomasse übrig, außer solche aus dem Recycling von biogenen Reststoffen oder CO_2 aus Rauchgasen der thermischen Biomassenutzung. Die Frage, welcher Einsatz von Biomasse in der Nutzungskonkurrenz mit anderen Sektoren am vorteilhaftesten wäre, erfordert weitere Untersuchungen.

Option 2: Der Kohlenstoffbedarf wird durch abgeschiedenes CO_2 innerhalb von NRW gedeckt

Mit Blick auf die Infrastrukturkarten in den untersuchten SCI4climate.NRW-Szenarien (SCI4climate.NRW 2021a) zeigt sich, dass sowohl die Orte, an denen auch zukünftig noch CO_2 anfallen wird, als auch die Standorte der Chemieindustrie verhältnismäßig nah beieinanderliegen. Mit der Absicht, Kohlenstoff mittels CCU im Kreislauf zu halten, könnte das vorgeschlagene Rhein-Cluster deutlich anders aussehen – und zwar vielmehr wie eine untereinander vernetzte CO_2-Transportstruktur. Des Weiteren wäre es auch denkbar, dass das Westfalen-Cluster ggf. noch die Standorte im Rhein-Cluster mit weiterem Kohlenstoff versorgen kann, um den Bedarf zu decken.

Option 3: Abgeschiedenes CO_2 wird exportiert und der enthaltene Kohlenstoff in Form von Power-to-X-Basisprodukten (PtX) wie z. B. grünem Naphta anschließend importiert

Tendenziell ist damit zu rechnen, dass der CO_2-Preis für emittiertes CO_2 insbesondere langfristig signifikant steigen wird, da dies ein wirksames Instrument ist, Technologien einzuführen und Prozesse umzustellen, die andernfalls nicht wirtschaftlich darstellbar wären. Gleichzeitig wird auch zukünftig Kohlenstoff benötigt. Insbesondere in NRW gibt es industrielle Punktquellen für CO_2 in vergleichsweiser hoher Konzentration. Dies eröffnet die Option, abgeschiedenes CO_2 als Rohstoff in Länder zu exportieren, die günstig und in ausreichendem Maße EE-Strom erzeugen können. In diesen Ländern würden dann PtX-Basisprodukte wie grünes Naphta erzeugt, die wiederum nach NRW importiert würden. Die Importmöglichkeiten für die PtX-Produkte dürften vergleichbar zu den aktuell verfügbaren Möglichkeiten fossilstämmiger Rohstoffe sein. Die CO_2-Infrastruktur dürfte der des Wuppertal Instituts (ebd.) sehr ähnlich sein. Dabei muss die Treibhausgasneutralität gewährleistet sein, indem globale Kohlenstoffkreisläufe geschlossen werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Option wird maßgeblich davon abhängen, wieviel EE-Strom in den Ländern verfügbar ist, um die PtX-Basisprodukte zu erzeugen und ggf. selbst Kohlendioxid mittels DAC bereitzustellen und welche Art der Kohlendioxidbereitstellung (Import vs. DAC) kostengünstiger sein wird.

Option 4: Vollständige Erzeugung der Chemieprodukte am EE-Standort (Renewables Pull)

Option 4 unterscheidet sich zu Option 3 dahingehend, dass nicht nur PtX-Zwischenprodukte in Ländern mit günstigen EE-Bedingungen erzeugt werden, sondern dass in diesen Ländern ebenfalls die weiteren Veredelungsschritte stattfinden.[1] Mit Blick auf NRW würde dies bedeuten, dass sich Produkte und Wertschöpfungsketten des Rheinclusters signifikant verändern würden.

Fazit:
Die vorangestellten Überlegungen zeigen deutlich, dass es insbesondere bezogen auf das Rhein-Cluster erhebliche Unterschiede im CO_2-Infrastrukturbedarf geben kann. Für eine solide Planung wäre es förderlich, verlässliche Rahmenbedingungen und Grundlagen für neue Geschäftsmodelle zu schaffen, sowohl für die heutigen und zukünftigen CO_2-Emittenten als auch für die Akteure, die Kohlenstoff weiterhin für Ihre Prozesse benötigen.

Zum Erhalt der Wirtschaftsleistung in NRW und zum gleichzeitigen Erreichen einer klimaneutralen industriellen Produktion muss eine CO_2-Infrastruktur frühzeitig geplant werden und rechtzeitig zur Verfügung stehen, sowohl für den Transport von CO_2 für CCS als auch für CCU.

1 Dieser Prozess wird als Renewables Pull bezeichnet (vgl. SCI4climate.NRW 2021b).

5. HANDLUNGSNOTWENDIGKEITEN ZUR EINFÜHRUNG EINER CO_2-INFRASTRUKTUR

Die Planung und Vorbereitung des Infrastrukturaufbaus muss aufgrund der langen Organisations- und Entwicklungsvorläufe kurzfristig begonnen werden. Hierzu müssen möglichst sofort die Weichen von der Politik gestellt werden, um eine Kohlendioxidwirtschaft zu ermöglichen, die Wertschöpfung der betroffenen Industrien durch entsprechende Rahmenbedingungen zu sichern und NRW als Standort international wettbewerbsfähig zu halten. Dies umfasst auch die für die Errichtung von Infrastrukturen erforderlichen ökonomischen Instrumente.

Die Industrie muss indes gemeinsam mit der Wissenschaft offene technologische Fragen klären und geeignete Konzepte und Projekte erarbeiten.

Einige Aufgaben können jedoch nur gemeinsam von den AkteurInnen der Politik, Industrie und Wissenschaft gemeistert werden. Im Folgenden hat die AG Kohlendioxidwirtschaft aus den aus ihrer Sicht aktuellen Hemmnissen konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Gemeinsame Handlungsfelder

Hemmnisse	Handlungsempfehlungen
Fehlendes Wissen zur Akzeptanz für eine CO_2-Infrastruktur und CO_2-Speicherung	• Grundvoraussetzung für den Infrastrukturausbau ist die gesellschaftliche Akzeptanz für die Maßnahmen. Diese muss durch **frühzeitige Information und Beteiligungsverfahren** unterstützt werden. Ein informierter Diskurs, einhergehend mit einer geeigneten Kommunikationsstrategie, muss vorbereitet werden, um unterschiedliche Stakeholder (insbesondere Gesellschaft und Politik) über die Anforderungen und Notwendigkeiten einer CO_2-Infrastruktur und -Speicherung zu informieren.
Fehlende Kommunikationsstrategie	Für die Entwicklung einer geeigneten Kommunikationsstrategie sind folgende Aspekte wichtig: • **Sicherheitsrelevante Aspekte** müssen adressiert werden. Erkenntnisse aus bestehenden Projekten (siehe Port of Rotterdam und Antwerpen) können dabei helfen. • Selbst bei einer Umstellung auf 100 Prozent EE wird zukünftig weiterhin CO_2 in bestimmten Prozessen entstehen. Um Klimaneutralität zu erreichen, ist es unabdingbar, dass eine **Nutzung und ein Umgang** mit weiterhin anfallendem CO_2 gefunden wird.

	• Im Gegensatz zu Carbon Capture am Kohlekraftwerk entsteht durch Carbon Capture nicht vermeidbarer CO_2-Mengen in Industrieprozessen **kein Lock-In** für die Verwendung fossiler Energieträger. • CCS für unvermeidbar anfallende CO_2-Mengen ist ein wichtiges Element, um die **Klimaneutralität** bis 2045 zu erreichen. • CCU ist nicht nur eine Möglichkeit, um CO_2 einer weiteren Verwendung zuzuführen. Vielmehr ist CCU ein Element der **Rohstoffsicherung** in einer klimaneutralen Welt. • Zum Aufbau einer CO_2-Infrastruktur sollte die Anbindung an bestehende Projekte zur **Offshore-CO_2-Speicherung** gesucht werden.
Fehlende Planung und Umsetzung von CO_2-Infrastrukturprojekten Unterschiedliche Entwicklungspfade hin zur Klimaneutralität (s. Kapitel 4): teils signifikant unterschiedlicher Infrastrukturbedarf	• **Reallabore** als Starthilfe für Praxisprojekte: Mit einem Reallabor sollten die bislang eher vernachlässigten, aber relevanten Aspekte beim CO_2-Transport demonstriert werden: u. a. Aufreinigung und flüssiger/gasförmiger Transport. Hierzu scheint für begrenzte CO_2-Mengen in ersten Projekten ein Transport auf der Schiene innerhalb und aus NRW heraus hin zu Nordseehäfen in Deutschland, Niederlande oder Belgien möglich. • Der Aufbau einer **CO_2-Infrastruktur (Pipelines)** ist beim Umgang mit großen Mengen CO_2 der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Diese muss noch vor der Abscheidung großer CO_2-Mengen geplant und aufgebaut werden. • Wünschenswert wäre eine **ausreichend dimensionierte Infrastruktur**, um auf gewisse Entwicklungen entsprechend reagieren zu können. Hier gilt es, eine **volkswirtschaftliche Abwägung** zwischen Kosten und Flexibilität zu treffen. Höhere Flexibilität und Kapazitäten gehen einher mit höheren Kosten für eine CO_2-Infrastruktur. Gleichzeitig führt eine spätere Kapazitätserweiterung bei Gasinfrastrukturen oft zu zusätzlichen Kosten, die an

Keine nationale Strategie für den Ausbau einer CO_2-Infrastruktur vorhanden	die ursprüngliche Investition heranreichen. Dementsprechend sollte eine nachhaltige Infrastrukturplanung schon anfänglich die Zielbilder einer klimaneutralen Wirtschaft in NRW berücksichtigen. • Erarbeitung und Abstimmung einer **„No-regret"-Strategie** für den Aufbau einer CO_2-Infrastruktur mit allen Akteuren. Grundlage hierfür ist die Klärung der in jedem Fall benötigten CO_2-Infrastruktur sowie die Erarbeitung einer robusten Strategie, die eine modulare Erweiterung dieser Infrastruktur ermöglicht.

Politik

Hemmnisse	Handlungsempfehlungen
Fehlendes Wissen zu (lokaler) Akzeptanz für einen umfangreichen Infrastrukturausbau	• Die Landesregierung NRW muss sich dazu bekennen, dass der **CO_2-Transport** für CCS und CCU notwendig ist. • Die Landesregierung sollte Konzepte zur Projektförderung zur **gesellschaftlichen Akzeptanz** schaffen und umsetzen.

Fehlende rechtliche Rahmenbedingungen verhindern den Aufbau einer Kohlendioxidwirtschaft[2]	• Schaffung eines Rechtsrahmens für CO_2-Infrastrukturen und CCS-Maßnahmen, der u. a.
	  • den **EU-ETS** Schiffs- und Pipelinetransport regelt,
	  • die Ergänzung zum **London-Protokoll** enthält, sodass CCS international möglich ist.
	• Die Landesregierung soll sich für die Schaffung notwendiger **planungs- und zulassungsrechtlicher Voraussetzungen** einsetzen, z. B. beim Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (KSpG).

2 Das von IN4climate.NRW in Auftrag gegebene Gutachten (Benrath 2021) gibt eine Übersicht zu den aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen einer Kohlendioxidwirtschaft.

	• In diesem sollte der Anwendungsbereich infrastrukturbezogener Regelungen auf den CO_2-Leitungstransport auch für CCU-Zwecke erweitert werden.

Sehr aufwendige Genehmigungsverfahren: fehlende Leitplanken der Politik für Reallabore	• **Genehmigungsverfahren von Reallaboren** sollten vereinfacht werden. Bisher entsprechen die Verfahren denen von ETS-Anlagen:
	  • Die Notwendigkeit öffentlicher Verfahren für Reallabore sollte hinterfragt werden. Den zuständigen Behörden sollten Entscheidungshilfen gegeben werden, welche die Einordnung von Reallaboren als **(Versuchs-)Anlagen zur Forschung, Entwicklung** oder **Erprobung von Verfahren** erleichtern, speziell im Hinblick auf § 1 Abs. 6 und § 2 Abs. 3 der 4. BImSchV.
	  • Zur Vereinfachung und Beschleunigung sollten Reallabore entweder im Rahmen eines **vereinfachten statt eines förmlichen BImSchG-Verfahrens** genehmigt werden (§ 2 Abs. 3 der 4. BImSchV) oder aber ohne Genehmigung errichtet und betrieben werden dürfen (§ 1 Abs. 6).

Fehlende Wirtschaftlichkeit von Geschäftsmodellen für die Kohlendioxidwirtschaft unter den gegebenen Rahmenbedingungen	• Die Bundesregierung soll die nötigen wirtschaftsrechtlichen Voraussetzungen schaffen. Das betrifft z. B. Fragen der **Zulässigkeit, Bilanzierung und Anrechenbarkeit**[3], wenn CO_2 in die Transportinfrastruktur eingespeist oder daraus entnommen wird sowie die Frage möglicher **Betreiberstrukturen** (ggf. analog Transportnetzbetreiber Gas/Strom oder Entsorgungsdienstleister). • Sowohl die **Einspeisung als auch Entnahme von CO_2** in eine Infrastruktur muss bei der Planung und der Setzung des Rechtsrahmens gleichberechtigt berücksichtigt werden. Die Sektorenkopplung ist als ein mögliches Ziel mitzudenken. • **CAPEX- und OPEX-Förderung** wird notwendig sein.

3 Im „Fit for 55"-Paket (European Commission 2021) wurde festgelegt, dass CO_2, das in Produkten permanent chemisch gebunden wird, im EU-ETS anrechenbar ist. Eine Definition, ab wann das CO_2 als „permanent chemisch gebunden" gilt, bzw. eine Liste der CCU-Produkte, die anrechenbar sind, steht noch aus.

	• Zum Aufbau einer Wertschöpfungskette in einer Kohlendioxidwirtschaft soll die Bundesregierung **Nachfrageanreize** für klimaneutrale Produkte schaffen. • Um Planungssicherheit zu schaffen, sollte die **Entwicklung des EU-ETS** in der 2. Hälfte der 4. Phase ab 2026 und ab 2031 durch die EU-Kommission frühzeitig bekannt gemacht werden, sodass die Entwicklung des CO_2-Preises für alle Akteure und die öffentliche Auseinandersetzung mit dem Thema Kohlendioxidwirtschaft und CO_2-Infrastruktur schon langfristig vorhersehbar wird. • CCS muss in der **TEN-E**-Regulierung berücksichtigt werden.
Fehlende Planung zur CO_2-Infrastruktur	• Benötigt wird ein **Stufenplan** zur Einführung und Umsetzung von CO_2-Infrastrukturen in NRW und CCS-Maßnahmen – national ebenso wie auf europäischer und internationaler Ebene. • Die Verabschiedung der **europäischen Förderrichtlinie** für EE und Transportsysteme sowie für CO_2 ist notwendig. • Die Erstellung eines **Netzentwicklungsplans** zur CO_2-Infrastruktur durch die Bundesregierung bis 2023 ist erforderlich.
Fehlendes Angebot von Erneuerbaren Energien für CCU	• Der hohe Strom- und oder Wasserstoffbedarf für CCU sollte von der Landes- und Bundesregierung bei der **Ausbauplanung** der Erneuerbaren Energien mitbedacht werden.
Fehlende Alternativen für CO_2-intensive Produkte	• Die Förderung weiterer Forschung im Bereich der **Substitution von Produkten und Effizienz im Produkteinsatz** zur Verringerung von anfallendem CO_2 ist nötig. Zudem sollten politische Instrumente den Einsatz von CCS-Alternativen fördern.

Unternehmen

Hemmnisse	Handlungsempfehlungen
Fehlende Standards und Normen	• **Mindestanforderungen an CO_2-Ströme**, die transportiert und gelagert werden sollen, müssen identifiziert und in Normen festhalten werden.
Fehlende Konzepte für die CO_2-Aufbereitung	• **Branchenübergreifende Konzepte** für die CO_2-Aufbereitung auf Basis konkreter Produktionsstandorte sind zu erarbeiten: Zu klären ist u. a., ob die CO_2-Aufbereitung für den Transport ausschließlich lokal direkt an der Abscheideanlagen stattfinden wird oder auch zentrale Aufbereitungsanlagen für räumlich nahe CO_2-Quellen sinnvoll sind.
Unausgereifte Abscheidetechnologien für manche Anwendungen	• **Abscheidetechnologien** sollten weiterentwickelt und evaluiert werden und Ergebnisse der laufenden Forschung auf weitere Anwendungsfelder übertragen werden.
Effizienz im Kohlenstoffkreislauf	• Um die anfallenden CO_2-Mengen gering zu halten, sollten neben der Nutzung von CCS alle **Alternativen der CO_2-Emissionsvermeidung** in den jeweiligen Branchen ausgeschöpft werden.
Fehlende Infrastruktur und Wertschöpfungsketten in Deutschland	• **Transparenz** zum Zeitplan und zur Skalierung von CO_2-Abscheidung einerseits und zur CO_2-Nutzung andererseits sollte sichergestellt werden, sodass eine Verknüpfung von Nutzern, Erzeugern und Transporteuren sowie relevanten Behörden unterstützt werden kann. • Denken im Netzwerk – **Synergien** in NRW sollten genutzt und ausgebaut werden, um eine Kohlendioxidinfrastruktur und -wirtschaft anzustoßen. Lokale Vorteile in NRW zu nutzen, kann zur Akzeptanz in der Gesellschaft beitragen. • Gemeinsam mit der Wissenschaft müssen **Langfristprognosen** erstellt werden, die den **CO_2-Bedarf** für CCU gegenüber den CO_2-Mengen zur Entsorgung mittels CCS abgrenzen. Die zeitliche Entwicklung muss

	hier näherungsweise ermittelt werden, um festzustellen, inwieweit bestimmte CCS-Infrastrukturen auch langfristig notwendig sein werden.
Fehlende rechtliche und politische Rahmenbedingungen	• Modellprojekte und Reallabore sollten gestartet werden, um die Sichtbarkeit der Technologien zu erhöhen und so **Blaupausen für die Definition des „permanent chemisch gebundenen“[4] CO_2 für die Anrechenbarkeit im EU-ETS** zu schaffen. • Aufzeigen von **Geschäftsmodellen** bzw. der Grenzen eines Business Cases: Zu klären sind u. a. die Kosten der Abscheidung, aber auch der Wert von CO_2 als Rohstoff gegenüber einer Speicherung. Die gesamte Wertschöpfungskette sollte betrachtet werden, um aufzuzeigen, ab welchem CO_2-Preis sich CCS und CCU lohnen und welche Energieeinsätze dafür erforderlich sind.

Wissenschaft

Hemmnisse	Handlungsempfehlungen
Fehlende Infrastrukturkonzepte	• Es sind Untersuchungen über einen stufenweisen Aufbau einer Infrastruktur bzw. ein **holistisches Systemdesign** notwendig. Dabei sollten u. a. Machbarkeitsansätze angewandt werden. • Die Notwendigkeit von **Zwischenspeichern** ist gemeinsam mit der Industrie zu prüfen. Werden Zwischenspeicher benötigt, muss die Infrastruktur dahingehend ergänzt werden. Hier ist eine Kosten-Nutzen-Betrachtung erforderlich.
Unbekannter Kohlenstoffbedarf	• Gemeinsam mit der Industrie müssen **Langfristprognosen** erstellt werden, die den **CO_2-Bedarf** für CCU gegenüber den CO_2-Mengen zur Entsorgung mittels CCS

4 Im „Fit for 55“-Paket (ebd.) wurde festgelegt, dass CO_2, das in Produkten permanent chemisch gebunden wird, im EU-ETS anrechenbar ist. Eine Definition, ab wann das CO_2 als „permanent chemisch gebunden“ gilt bzw. eine Liste an CCU-Produkten, die anrechenbar sind, steht noch aus.

Unbekannte Senkenpotenziale verschiedener Technologien	abgrenzen. Die zeitliche Entwicklung muss hier näherungsweise ermittelt werden, um festzustellen, inwieweit bestimmte CCS-Infrastrukturen auch langfristig notwendig sein werden.
	• In Ergänzung zum CO_2-Bedarf der Industrie ist eine **Bilanzierung des Kohlenstoffkreislaufs** notwendig. Die Kreislaufbetrachtung muss perspektivisch weltweit erfolgen. Zu Beginn kann es zielführend sein, den Bilanzraum kleiner zu wählen: NRW → Deutschland → Nachbarländer bis Europa → weltweit.
	• Dafür sind **zukünftige Wertschöpfungsketten** und deren Entwicklung über die Zeit zu skizzieren. Hierzu zählt auch:
	  • H_2-Bedarf für CCU
	  • Konkurrenzsituation: Green Crude[5]
	• **Rekarbonatisierung:** Ein Senkenpotenzial ist hier gegeben, dessen Größenordnung und zeitliche Entwicklung noch ermittelt werden muss.
	• Die Rollen von **BECCS** und **DAC** für eine klimaneutrale Industrie in NRW müssen weiter untersucht werden.

Unausgereifte Abscheidetechnologien für manche Anwendungen Fehlende Alternativen für CO_2-intensive Produkte Keine ausgereiften CCU-Pfade	• **CO_2-Abscheidetechnologien** müssen für die verschiedenen Abgasströme der Industrie weiterentwickelt werden. • Weitere Forschung im Bereich der **Substitution von Produkten und Effizienz im Produkteinsatz** zur Verringerung von anfallendem CO_2 ist nötig. • **CCU-Konzepte und Nutzungspfade** müssen weiterentwickelt sowie energetisch, ökonomisch und ökologisch bewertet werden.

5 Green Crude bezeichnet Rohöl, das nicht auf fossilem Kohlenstoff basiert, sondern aus alternativen, „grünen“ Quellen erzeugt wird.

Hohe Reinheitsansprüche an CO_2 und diverse CO_2-Quellen	• Konzepte für die **CO_2-Aufbereitung** müssen erarbeitet werden. Hier gilt es, entsprechende Technologien in entsprechender Skalierung bereitzustellen, denn perspektivisch wird es zentrale Punktquellen geben (z. B. Zementwerke), aber auch dezentralere Quellen (z. B. MVA oder Biomasse-HKW), die zukünftig zur Kreislaufschließung genutzt werden müssen. Dies betrifft auch andere **Prozessschritte und Technologien** im Kontext des Umgangs mit CO_2.
Keine ausreichenden Standards zu Reinheitsanforderungen des CO_2	• Technische Anforderungen an CO_2-Reinheitsgrade: Sowohl die Nutzung als auch der Transport werden voraussichtlich unterschiedliche Anforderungen an Reinheitsgrade haben, hierfür werden europäische Standards benötigt. Dazu gilt es, ein gestuftes **Qualitätskonzept** zu entwickeln.
Fehlendes Wissen zur Akzeptanz für eine CO_2-Infrastruktur und CO_2-Speicherung	• Forschung und Entwicklung zur **aktuellen Akzeptanz** der deutschen Gesellschaft zu CCS- und CCU-Vorhaben und der dafür benötigten CO_2-Infrastruktur müssen intensiviert werden.
Fehlende Erkenntnisse zu Geschäftsmodellen	• Bestehende internationale Beispiele zur Anwendung von CCS und CCU sollten untersucht werden, u. a. hinsichtlich der Entwicklung, der **wirtschaftlichen Erfolge** sowie der jeweiligen politischen Rahmenbedingungen. • Neue **Wertschöpfungsketten** sind im Rahmen der Anwendung von CCS- und CCU-Technologien zu identifizieren und deren Potenziale sind abzuschätzen.

LITERATUR

acatech (Hrsg.) 2018: CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. München: Herbert Utz Verlag. acatech POSITION.

ACT Acorn Consortium 2019: D20 Final Report. 10196 ACTC-Rep-35-01. Online unter: https://actacorn.eu/sites/default/files/ACT%20Acorn%20Final%20Report.pdf.

AiF 2020: Kalkbasierter Feststoffreaktor zur CO_2-Abtrennung aus Abgasen mit regenerativ Rückgewinnung der Reaktionsenthalpie (IGF-Projektsteckbrief). AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. Online unter: https://igf.aif.de/innovationsfoerderung/industrielle-gemeinschaftsforschung/igf-steckbrief.php?id=23955&suchtext= (abgerufen am 28. September 2021).

Arends, Peter 2021: CO_2 reduction through storage beneath the North Sea. Experiences & Challenges. Präsentation auf der ECRA Online Conference 2021.

Benrath, Daniel et al. 2020: CO_2 and H_2 Infrastructure in Germany – Final Report of the German Case Study.

Benrath, Daniel 2021: Rechtliche Rahmenbedingungen einer Kohlendioxidwirtschaft – Gutachten zu Fragestellungen aus der IN4climate.NRW-Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. Gelsenkirchen: IN4climate.NRW GmbH (Hrsg.). Online unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2021/Gutachten_KdW/in4climate.nrw-gutachten-ag-kdw-rechtliche-rahmenbedingungen-kohlendioxidwirtschaft.pdf.

BMU 2021: Novelle des Klimaschutzgesetzes vom Bundestag beschlossen. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Online unter: https://www.bmu.de/pressemitteilung/novelle-des-klimaschutzgesetzes-vom-bundestag-beschlossen (abgerufen am 9. August 2021).

Brevik, Per 2017: The full scale CCS-project at Norcem Brevik. Can it be realised? Düsseldorf.

Brown, Andy 2021: Solutions for CO_2 pipeline construction in the UK. Präsentation auf der ECRA Online Conference 2021.

BVK o. J.: Kalk. In: Bundesverband der deutschen Kalkindustrie e. V. Online unter: https://www.kalk.de/klimaschutz/partner (abgerufen am 25. August 2021).

CemNet 2019a: Carbon capture is a loss-maker for Anhui Conch. In: International Cement Review. Online unter: https://www.cemnet.com/News/story/167315/carbon-capture-is-a-loss-maker-for-anhui-conch.html (abgerufen am 11. Juni 2021).

CemNet 2019b: LEILAC 2 is in the pipeline. In: International Cement Review. Online unter: https://www.cemnet.com/News/story/167975/leilac-2-is-in-the-pipeline.html (abgerufen am 11. Juni 2021).

DECHEMA o. J.: NuKoS – Nutzung von Kohlenstoffdioxid in Schlacken aus Stahl- und Metallproduktion. In: CO_2-Win. Online unter: https://co2-utilization.net/de/projekte/co2-mineralisation/nukos/ (abgerufen am 2. September 2021).

Deerberg, Görge; Oles, Markus; Schlögl, Robert 2018: The Project Carbon2Chem. In: Chemie Ingenieur Technik 90 (10), S. 1365–1368.

ECRA 2020: Creating value chains for CO_2 capture, transport, storage and use. In: ECRA-Newsletter (2), S. 3–4.

ECRA, CSI 2017: Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead; CSI/ECRA-Technology Papers 2017. Düsseldorf, Geneva: European Cement Research Academy; Cement Sustainability Initiative (Hrsg.). Online unter: https://ecra-online.org/research/technology-papers/.

EuLa o. J.: Lime as a natural carbon sink - Examples of mineral carbonation in lime applications. Brüssel: European Lime Association. Online unter: https://www.eula.eu/politecnico-di-milano-literature-review-on-the-assessment-of-the-carbonation-potential-of-lime-in-different-markets-and-beyond/.

European Commission 2021: Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757. Online unter: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision-eu-ets_with-annex_en_0.pdf.

GFZ 2004: CO_2SINK und CO_2 des deutschen Geoforschungszentrums. Online unter: https://www.co2ketzin.de/ (abgerufen am 28. September 2021).

Global CCS Institute 2020: Global Status of CCS: 2020. Australien.

Grosso, Mario et al. 2020: Literature review on the assessment of the carbonation potential of lime in different markets and beyond. Report prepared by Assessment on Waste and Resources (AWARE) Research Group at Politecnico di Milano (PoliMI), for the European Lime Association (EuLA). Pp. 333.

Hoenig, Volker et al. 2012: ECRA CCS Project – Report on Phase III. Technical Report TR-ECRA-119/2012. Düsseldorf: European Cement Research Academy. Online unter: https://ecra-online.org/research/ccs/.

IEAGHG 2013: Deployment of CCS in the Cement Industry, 2013/19. Cheltenham, UK: International Energy Agency. Online unter: https://ieaghg.org/publications/technical-reports/reports-list/9-technical-reports/1016-2013-19-deployment-of-ccs-in-the-cement-industry.

IN4climate.NRW (Hrsg.) 2020: Unvermeidbare CO_2-Entstehung in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie NRW: Definition und Kriterien. Ein Diskussionsbeitrag der AG Kohlendioxidwirtschaft von IN4climate.NRW. Gelsenkirchen. Online unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2020/Diskussionspapier_Unvermeidbare_CO2_Entstehung/in4climatenrw-diskussionspapier-unvermeidbare-co2-entstehung-web.pdf.

ISO/TR 27912:2016(en): Carbon dioxide capture — Carbon dioxide capture systems, technologies and processes. Online unter: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:27912:ed-1:v1:en.

ISO/TR 27913:2016(en): Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Pipeline transportation systems. Online unter: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:27913:ed-1:v1:en.

ISO/TR 27921:2020(en): Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage — Cross Cutting Issues — CO_2 stream composition. Online unter: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:27921:ed-1:v1:en.

ISO/TR 27922:2021(en): Carbon dioxide capture — Overview of carbon dioxide capture technologies in the cement industry. Online unter: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:27922:ed-1:v1:en.

Kätelhön, Arne et al. 2019: Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. In: PNAS 116 (23), S. 11187–11194.

Knopf, Stefan et al. 2010: Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO_2-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen (4), S. 76–80.

LEAP o. J.: CLEANKER is a project addressing CO_2 capture from cement production. Online unter: http://www.cleanker.eu (abgerufen am 11. Juni 2021).

Leeson, D. et al. 2017: A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refiningand pulp and paper industries, as well as other high purity sources. In: International Journal of Greenhouse Gas Control (61), S. 71–84.

LEILAC Project o. J.: Low Emissions Intensity Lime & Cement - LEILAC. Online unter: https://www.project-leilac.eu (abgerufen am 11. Juni 2021).

Northern Lights o. J.: What we do. In: Northern Lights. Online unter: https://northernlightsccs.com/what-we-do/ (abgerufen am 11. Juni 2021).

Otto, Alexander; Markewitz, Peter; Robinius, Martin 2017: Technologiebericht 2.4 CO_2-Nutzung. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.). Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Porthos o. J.: Project. In: Porthos. Online unter: https://www.porthosco2.nl/en/project/ (abgerufen am 11. Juni 2021).

Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut 2020: Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.

Rocha, Paulo 2021: Strategy CCUS. Präsentation auf der ECRA Online Conference 2021.

Ruban, Sidonie 2021: From capture to storage - CO_2 cryogenic technologies and logistic chain. Präsentation von Air Liquide auf der ECRA Online Conference 2021.

Ruppert, Johannes et al. 2019: Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie: Abschlussbericht (UFOPLAN FKZ 3716 36 320 0). Düsseldorf: VDZ. Online unter: https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/abschlussbericht-prozesskettenorientierte-ermittlung-der-material-und-energieeffizienzpotentiale-in-der-zementindustrie.

SCI4climate.NRW 2021a: CO_2-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW Impuls für eine Infrastrukturgestaltung. Online unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/co2-entstehung-der-industrie-in-einem-klimaneutralen-nrw-impuls-fu%CC%88r-eine-infrastrukturgestaltung-cr-sci4climatenrw.pdf.

SCI4climate.NRW 2021b: Konzeptualisierung des möglichen Renewables-Pull-Phänomens - Definition, Wirkmechanismen und Abgrenzung zu Carbon Leakage. Wuppertal. Online unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/konzeptualisierung-des-m%C3%B6glichen-renewables-pull-ph%C3%A4nomens-cr-sci4climatenrw.pdf.

Smit, Martijn 2021: Northern Lights. A European CO_2 transport and storage network. Präsentation auf der ECRA Online Conference 2021.

TCC 2017: Corporate Sustainability Report. Taiwan Cement Corporation. Online unter: https://media.taiwancement.com/web_tcc/en/report/csr/report_2017.pdf.

Tenova HYL; Danieli; S.p.A. 2020: Unmatchable Performances and Sustainable Decrease of CO_2 Emissions in Steelmaking. LCF Webinar.

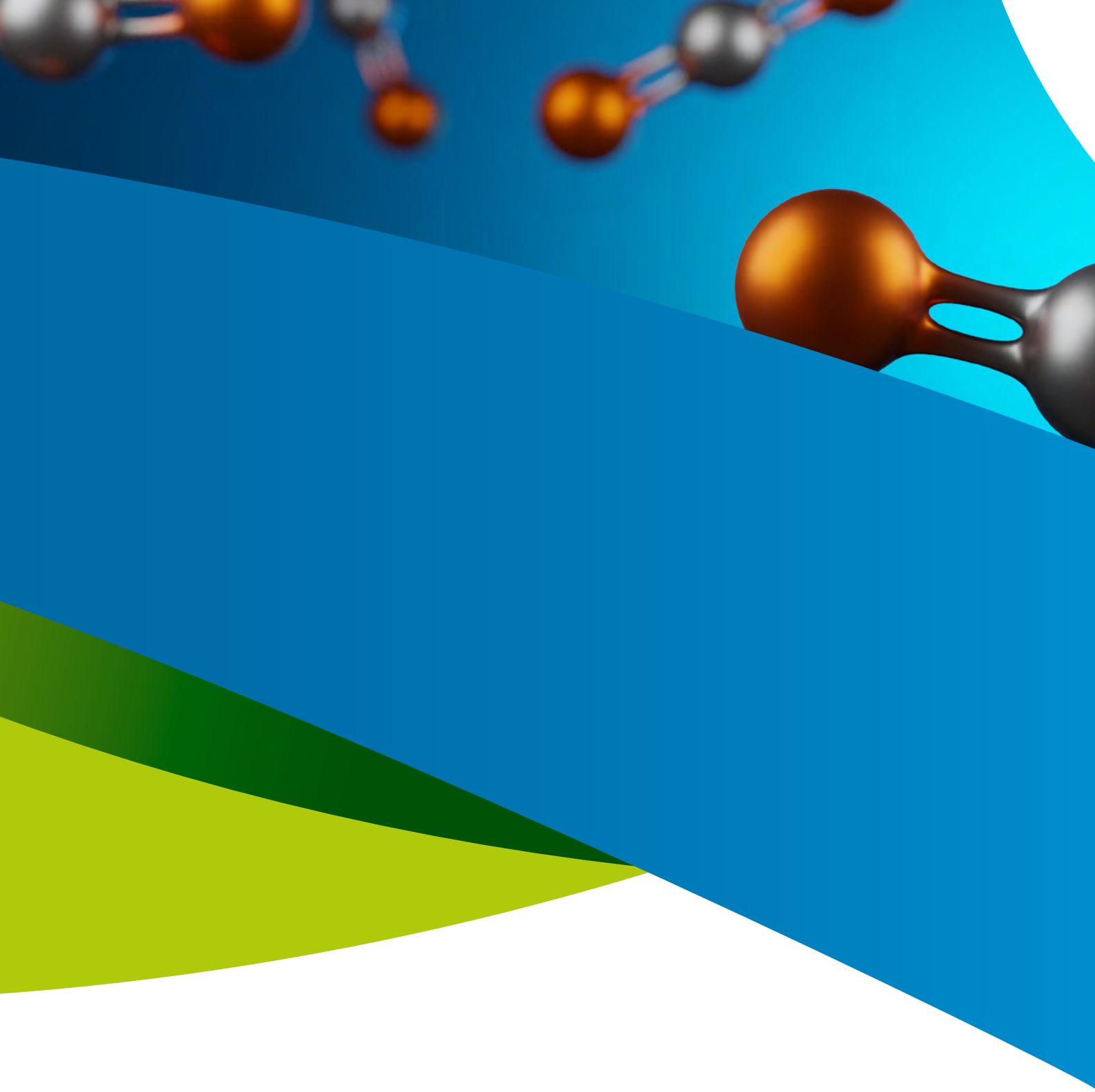
The Stepwise SEWGS Project o. J.: STEPWISE. Online unter: https://www.stepwise.eu/ (abgerufen am 11. Juni 2021).

Thomas, Emily 2019: Cement producers have founded an oxyfuel research corporation. In: World Cement. Online unter: https://www.worldcement.com/europe-cis/11122019/cement-producers-have-founded-an-oxyfuel-research-corporation/ (abgerufen am 11. Juni 2021).

VDZ 2020: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Eine CO_2-Roadmap für die deutsche Zementindustrie. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V.

VDZ (Hrsg.) 2019: CO_2-Infrastruktur in NRW – Workshop am 22. August 2019 in Düsseldorf. Online unter: https://www.vdz-online.de/wissensportal/veranstaltungen/co2-infrastruktur-in-nrw.

ZEP 2021: CCS/CCU projects. In: Zero Emissions Platform. Online unter: https://zeroemissionsplatform.eu/about-ccs-ccu/css-ccu-projects/ (abgerufen am 28. Juli 2021).



IN4 CLIMATE .NRW

Kontakt: **IN4climate.NRW**
Munscheidstraße 14
45886 Gelsenkirchen
+49 209 40 85 99-0
post@in4climate.nrw
www.in4climate.nrw