

Block, Simon et al.

Research Report

Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementierung von CCU, CCS und CDR: Handlungsempfehlungen für die Carbon-Management-Strategie des Bundes

Zukunftsimpuls, No. 30

Provided in Cooperation with:

Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy

Suggested Citation: Block, Simon et al. (2025) : Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementierung von CCU, CCS und CDR: Handlungsempfehlungen für die Carbon-Management-Strategie des Bundes, Zukunftsimpuls, No. 30, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/316422>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementierung von CCU, CCS und CDR



Handlungsempfehlungen für die Carbon-Management-Strategie des Bundes

*Simon Block
Nora Weber
Peter Viebahn
Christoph Sievering
Karin Arnold
Katja Witte
Maximilian Blum
Alexander Kling
Constanze Schmidt
Moritz Overberg
Christoph Zeiss*

Zukunftsimpuls 30

Herausgeberin:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
www.wupperinst.org

Kontakt:

Simon Block
simon.block@wupperinst.org

Peter Viebahn
peter.viebahn@wupperinst.org

Bitte die Publikation folgendermaßen zitieren:

Block, S., Weber, N., Viebahn, P., Sievering, C., Arnold, K., Witte, K. et al. (2025). Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementierung von CCU, CCS und CDR. Handlungsempfehlungen für die Carbon-Management-Strategie des Bundes. Zukunftsimpuls Nr. 30. Wuppertal Institut.

„Zukunftsimpulse“ liefern in loser Folge Thesen, Diskussionsbeiträge, Einschätzungen, Stellungnahmen und Forschungsergebnisse mit Bezug zu aktuellen politischen Debatten.

Dank: Aileen Reichmann und Georg Holtz haben den Entstehungsprozess des Zukunftsimpulses mit wertvollen Anregungen begleitet. Ihre Bereitschaft, ihre Expertise zur Verfügung zu stellen, war eine wertvolle Hilfe. Christian Kensbrock hat mit seinen kritischen Anmerkungen und Ideen wesentlich zur Verbesserung der Arbeit beigetragen und dem Zukunftsimpuls den nötigen Feinschliff gegeben. Herzlichen Dank für die Unterstützung und das Engagement!

Bildquelle Titelseite: Getty Images

Wuppertal, März 2025
ISSN 2701-3200

Dieses Werk steht unter der Lizenz „Creative Commons Attribution 4.0 International“ (CC BY 4.0). Der Lizenztext ist abrufbar unter: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen	4
Abbildungsverzeichnis	5
1 Zehn Kernbotschaften	6
2 Präambel	7
3 Einleitung	8
4 Einschätzung zu übergreifenden Aspekten der Carbon Management Strategie der Bundesregierung	12
5 Handlungsempfehlungen zu zentralen Aspekten der Carbon Management Strategie der Bundesregierung	15
5.1 Entwicklung einer CO ₂ -Infrastruktur	15
5.2 Erschließung von CO ₂ -Speichern	19
5.3 CO ₂ -Abscheidung und Speicherung im Vergleich zur CO ₂ -Nutzung	24
5.4 Akzeptanz von Carbon Capture and Storage	28
5.5 Schnittstellen mit der Langfriststrategie Negativemissionen	32
6 Resümee und Ausblick	36
7 Literaturverzeichnis	39

Verzeichnis von Abkürzungen, Einheiten und Symbolen

Abkürzungen

ANK	Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BEC	Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung
BECCS	Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und Speicherung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CCU/S	Carbon Capture and Utilisation/Storage
CDR	Carbon Dioxide Removal
CMS	Carbon Management Strategie
DAC	Direct Air Capture
DACCS	Direct Air Capture and Storage
DK	Dänemark
EG	Energiegesetz
EOR	Enhanced Oil Recovery
EU	Europäische Union
EU-ETS	Europäisches Emissionshandelssystem
HVC	High Value Chemicals
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KSG	Klimaschutzgesetz
KSpG	Kohlendioxid-Speicherungsgesetz
KSpTG	Kohlendioxid-Speicherungs- und -Transportgesetz
LNe	Langfriststrategie Negativemissionen
LULUCF	Land Use, Land Use-Change and Forestry
NABIS	Nationale Biomassestrategie
NL	Niederlande
NOR	Norwegen
OGE	Open Grid Europe
SAF	Synthetic Aviation Fuel
UK	United Kingdom / Vereinigtes Königreich
TAB	Thermische Abfallbehandlungsanlage
THG	Treibhausgasemissionen
USA	United States of America

Einheiten und Symbole

°C	Grad Celsius
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Gt	Gigatonne
H ₂	Wasserstoff
km	Kilometer
Mt	Megatonne
t	Tonne
TWh	Terrawattstunde

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Bestandteile des Carbon Managements aus heutiger Perspektive -----	9
Abb. 2	Planung des CO ₂ -Startnetzes -----	18
Abb. 3	Klimawirkung von CCU am Beispiel synthetische Polymere und Kraftstoffe aus heutiger Perspektive -----	25
Abb. 4	Wissen über CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung -----	29
Abb. 5	Akzeptanz der industriellen Nutzung von CCS in NRW -----	30
Abb. 6	Darstellung der zeitlichen Entwicklung sowie der Unsicherheiten der CCS-Kette	37

1 Zehn Kernbotschaften

Damit die Carbon Management Strategie (CMS) des Bundes ein zielführendes Instrument für den Umgang mit Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Utilisation (CCU) wird, sollten aus Sicht des Wuppertal Instituts folgende Aspekte bei der Umsetzung der CMS berücksichtigt werden:

- 1 | Die Anwendung von CCS sollte – mit wenigen Ausnahmen – auf unvermeidbare Emissionen limitiert werden. CCS sollte für schwer vermeidbare Emissionen nur dann zur Anwendung kommen, wenn alle denkbaren Alternativen durch eine ganzheitliche (multidimensionale) Bewertung auf deren Vor- und Nachteile hin evaluiert wurden. CCS für Gaskraftwerke sollte generell ausgeschlossen werden.
- 2 | Um bei der Anwendung von CCS für schwer vermeidbare Emissionen zudem Lock-In-Effekte fossiler Produktionsketten zu verhindern, bedarf es einer klaren Strategie, um die aufgebaute CCS-Infrastruktur langfristig für Negativemissionen nutzen zu können.
- 3 | Insbesondere für die chemische Industrie stellt CCS eine vielversprechende Übergangslösung zur Sicherung ihrer Zukunftsfähigkeit dar, bis alternative Kohlenstoffquellen hinreichend erschlossen werden können.
- 4 | Aufgrund der Vielschichtigkeit der Möglichkeiten bedarf auch die Anwendung von CCU einer umfassenden ganzheitlichen Bewertung, die nicht zuletzt auch die Herkunft des Kohlenstoffdioxid (CO₂) und die Dauer der Kohlenstoffbindung sowie die Möglichkeit der Kreislaufrückführung in den Blick nimmt.
- 5 | Ein flächendeckendes CO₂-Transportnetz und die dafür notwendigen rechtlichen Rahmenbedingungen müssen geschaffen werden. Dabei gilt es insbesondere, die Spezifika des zu transportierenden CO₂ sowie die Zuständigkeiten frühzeitig verbindlich abzustimmen.
- 6 | Alle Abschätzungen, Konzepte und Roadmaps für CCS sollten auf einer konservativen Berechnung der zeitlichen Verfügbarkeit der CCS-Kette basieren und insbesondere den langen zeitlichen Vorlauf der Erschließung von CO₂-Speichern sowie Planungsauern für Pipelines berücksichtigen.
- 7 | CO₂ aus Deutschland sollte, soweit möglich, auch in Deutschland gespeichert werden. Aufgrund der wahrscheinlichen Knappheit von Speicherstätten in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) sollte auch die CO₂-Speicherung an Land ergebnisoffen, ganzheitlich und partizipativ geprüft werden.
- 8 | Es bedarf einer Festlegung spezifischer institutionalisierter Verantwortlichkeiten zur nachhaltigen Unterstützung einer robusten Wissens- und Meinungsbildung zu CCS, auf deren Basis Ängste und Sorgen der Gesellschaft hinreichend adressiert werden können.
- 9 | Themen aus der CMS, die voraussichtlich mit Akzeptanzproblemen einhergehen werden, sind die Speicherung von CO₂ unter dem Meer und an Land, die Transportinfrastrukturen und die Zulässigkeit von CCS für schwer vermeidbare Emissionen und insbesondere für Gaskraftwerke.
- 10 | Es gibt zentrale Lücken in der Verzahnung der CMS und der Langfriststrategie Negativemissionen (LNe). So braucht es beispielsweise eine intensive Abstimmung zur passgenauen Ermittlung von Infrastrukturbedarfen sowie eine einheitliche Definition negativer Emissionen. CMS und LNe sollten daher parallel entwickelt und verabschiedet werden.

2 Präambel

Der Einsatz von CCS und in Teilen auch CCU (CCU/S) wird in Deutschland spätestens seit der Vorlage der „Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie“ (BMWK 2024a) Anfang 2024 wieder stärker in Fachkreisen diskutiert. Das Wuppertal Institut als umsetzungsorientiertes Forschungsinstitut für Nachhaltigkeits- und Transformationsforschung nimmt mit diesem Zukunftsimpuls Stellung zur in der Vorbereitung befindlichen Carbon Management Strategie auf Bundesebene und möchte wichtige Aspekte in den Diskurs um CCS, CCU und Carbon Dioxide Removal (CDR) einbringen. Dazu werden in Kapitel 3 einleitend der Begriff Carbon Management aus Sicht des Wuppertal Instituts definiert sowie *Lessons Learned* aus früheren CCS-Debatten dargestellt. In Kapitel 4 legen die Autor*innen eine grundlegende Einschätzung zu relevanten Aspekten rund um den CMS-Prozess vor. In Kapitel 5 identifizieren sie fünf aus Sicht des Wuppertal Instituts zentrale Bereiche des Carbon Managements und formulieren Handlungsempfehlungen für eine zielführende Berücksichtigung in und Verzahnung mit der CMS: die Entwicklung einer CO₂-Infrastruktur, das Erschließen von CO₂-Speichern, die Anwendung von CCU im Vergleich zu CCS, die Frage der Akzeptanz von CCS in der Gesellschaft sowie die Verknüpfung der CMS mit der Langfriststrategie Negativemissionen. Eine Diskussion der aufgeworfenen Fragen mit Fokus auf die zeitliche Entwicklung der Etablierung von CCS und CCU erfolgt abschließend in Kapitel 6.

Da der Prozess zur Verabschiedung der CMS durch die Neuwahlen des Bundestages im Februar 2025 noch nicht abgeschlossen ist, beziehen sich die Aussagen und Diskussionen in diesem Zukunftsimpuls auf die „Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie“ des BMWK vom 26.02.2024, darauf aufbauende Stellungnahmen sowie Positionspapiere zu CCU, CCS und CDR.

3 Einleitung

Das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verpflichtet Deutschland, bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Mit dem Auslaufen der CO₂-Zertifikate im Rahmen des Europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS) müssen zudem die Energiewirtschaft und die Industrie bereits in 2040 klimaneutral sein. Zentrale Maßnahmen hierfür sind die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, der Ausbau erneuerbarer Energien und die Elektrifizierung, wo immer möglich und sinnvoll. Ergänzend kommt der Einsatz von (grünem) Wasserstoff hinzu für Prozesse, die sich nicht direkt elektrifizieren lassen, beispielsweise im Stahl- und Chemiesektor. Nicht alle Bereiche lassen sich jedoch mit diesen Maßnahmen defossilisieren. Deshalb wird, für ausgewählte Prozesse, auch die Abscheidung von fossilem CO₂ nötig sein. Zusätzlich werden auch nach Umsetzung aller möglichen Optionen Residualemissionen anfallen, die zum Erreichen der Klimaneutralität durch CDR-Maßnahmen ausgeglichen werden müssen. Mit der weiteren Entwicklung einer Carbon Management Strategie würde auch die neue Bundesregierung anerkennen, dass zum Erreichen der Klimaziele auch eine zentrale Kohlenstoffstrategie nötig ist.

Carbon Management

Unter Carbon Management, beziehungsweise *Kohlenstoff-Management*, versteht das Wuppertal Institut Maßnahmen zum Umgang mit Kohlenstoff sowie die Erfassung und Bilanzierung natürlicher Kohlenstoff-Prozesse im Kontext der Klimaneutralitätsziele Deutschlands und der EU. Darunter fallen die Reduktion des Kohlenstoffbedarfs, die Verringerung des Einsatzes fossilen Kohlenstoffs und das Beenden der Freisetzung von klimawirksamen Kohlenstoffmengen aus der Energieumwandlung und der industriellen Produktion. Zusätzlich gehört dazu auch das Erfassen der Bindung oder Freisetzung von klimawirksamem Kohlenstoff aus Wäldern, Böden und Gewässern. Die wesentlichen Strategien zur Minderung von Treibhausgasemissionen (THG) durch Carbon Management sind (siehe auch Abb. 1):

- A) die Abscheidung und langfristige Speicherung von CO₂ aus Anlagen der Industrie oder der Energiewirtschaft (CCS),
- B) die Bereitstellung von biogenen Kohlenstoffen (Bioenergie mit CO₂-Abscheidung, BEC) oder atmosphärischen Kohlenstoffen (Direct Air Capture, DAC) als Ersatz für fossile Kohlenstoffe,
- C) die weitgehende Kreislaufführung von Kohlenstoffen aus der Technosphäre durch CCU, chemisches oder mechanisches Recycling sowie
- D) die Entfernung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre (CDR) durch technische Maßnahmen sowie natürliche Senkenleistungen.

Der verwendete Begriff der CMS kann hinsichtlich der Definitionen irreführend sein, da die CMS nur die Strategien zu fossilem CCS und zu CCU abdeckt. Maßnahmen zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre sind nicht direkt Bestandteil der CMS, sondern werden durch die LNe auf Bundesebene adressiert. Neben der CMS und der LNe

wurden in den vergangenen Jahren eine Vielzahl energiewirtschaftlicher Strategien initiiert, die mehr oder weniger miteinander verzahnt sind¹.

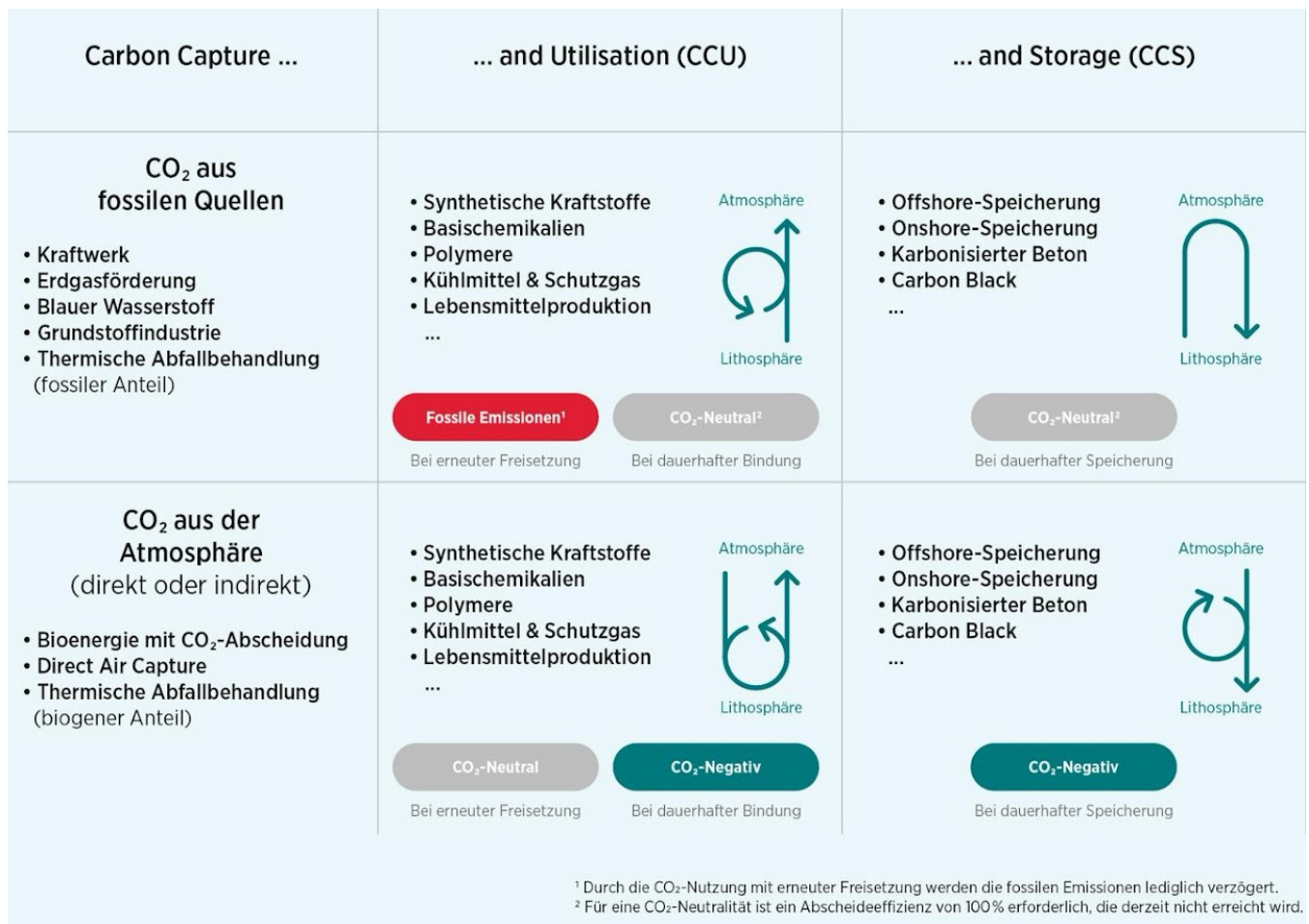


Abb. 1 Bestandteile des Carbon Managements aus heutiger Perspektive

Quelle: eigene Darstellung

Aus Sicht der CMS weist die LNe die größten und wichtigsten Schnittstellen auf. Dennoch besteht ein regelmäßiger, übergreifender Abstimmungsbedarf zwischen den einzelnen Strategieprozessen. Dabei ist auch die Kompatibilität mit europäischen Strategien zu erfassen und zu berücksichtigen, hier ist vor allem die „Industrial Carbon Management Strategy“ (Europäische Kommission, 2024c) zu nennen.

Mengenmäßiger Bedarf an CCS und CDR in Deutschland

Nach der Langfriststudie für ein klimaneutrales Deutschland (Agora Think Tanks, 2024) müssen ab dem Jahr 2030 3 Megatonnen (Mt), ab 2035 15 Mt, ab 2040 31 Mt und ab 2045 45 Mt CO₂ pro Jahr abgeschieden und gespeichert werden. In 2045 sind dies 24 Mt via CCS, 18 Mt via BECCS und 3 Mt via DACCS. Andere Langfristszenarien gehen von deutlich höheren Abscheidemengen von bis zu 116 Mt CO₂ pro Jahr aus (Block et al., 2024). Neben unvermeidbaren Emissionen der Zement- und

¹ Darunter beispielsweise die Nationale Biomassestrategie, Grüne Leitmärkte, die Industriestrategie 2030, die Kraftwerksstrategie, die nationale Wasserstoffstrategie oder die Systementwicklungsstrategie (BMWK, 2024b).

Kalkindustrie, der thermischen Abfallbehandlung (TAB) sowie Kompensationen für die Emissionen aus der Landwirtschaft sind hier auch geringe Mengen an Emissionen aus der Chemie- und der Stahlindustrie inkludiert. Die schließlich zu speichernden CO₂-Mengen könnten jedoch weit höher ausfallen, falls auch schwer vermeidbare Emissionen einbezogen werden sollen. Auch falls die angenommenen Emissionseinsparungen aller Sektoren bis 2045 nicht vollständig umgesetzt werden können, müssten gegebenenfalls eigentlich vermeidbare Emissionen zusätzlich abgetrennt oder kompensiert werden. Hinzu kommen ab 2050 erheblich größere zusätzliche Mengen an CO₂, wenn weltweit jährlich negative Emissionen im Gigatonnen (Gt)-Bereich erzielt werden müssen (IPCC, 2023).

Lessons Learned aus der früheren CCS-Diskussion

Insbesondere zwischen 2005 und 2015 wurde CCS in Deutschland und vielen anderen Ländern bereits intensiv diskutiert und erforscht. Der Schwerpunkt lag dabei auf dem Einsatz von CCS in der Energieerzeugung, insbesondere in Kohlekraftwerken. Dies wurde von vielen Akteur*innen stark kritisiert, da die Einführung von CCS eine Verlängerung des fossilen Zeitalters bedeutet hätte. Auch forschungsseitig wurde die Nutzung von CCS im Kraftwerkssektor bereits frühzeitig vom Wuppertal Institut und anderen Instituten kritisch analysiert (Wuppertal Institut et al., 2007; Wuppertal Institut, 2010). Das 2012 zur Umsetzung der EU-Richtlinie 2009/31/EG über die geologische Speicherung von Kohlendioxid erlassene deutsche CCS-Gesetz² erlaubte aufgrund der kritischen öffentlichen Diskussion nur Demonstrationsprojekte, wobei die jährliche Speichermenge auf 1,3 Mt CO₂ pro Speicherprojekt begrenzt wurde, bei insgesamt maximal 4,1 Mt CO₂. Nachdem bis Ende 2016 kein Speicherprojekt beantragt wurde, ist die CO₂-Speicherung in Deutschland seitdem nicht mehr erlaubt gewesen. Zudem haben fünf Bundesländer ihr Vetorecht in Anspruch genommen und die CO₂-Speicherung auf ihrem Territorium verboten. Auch Forschung zu CCS fand seitdem in Deutschland de facto nicht mehr statt.

Inzwischen hat sich die energiepolitische Situation mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien und der Zielsetzung der Klimaneutralität strukturell geändert, so dass CCS im Energiesektor in Deutschland in keinem der bestehenden Szenarien und Roadmaps mehr eine Rolle spielt. Auch wenn die aktuelle Diskussion um CCS daher vor einem ganz anderen Hintergrund zu sehen ist und es unbestritten ist, dass CCS zumindest für unvermeidbare Emissionen aus Industrie und Abfallwirtschaft benötigt wird, können aus dem Ablauf und dem Outcome der damaligen Debatte einige *Lessons Learned* abgeleitet werden (Viebahn, 2019):

- Für CCS wurden systematisch zu hohe Lernraten angesetzt und die massive Kostendegression bei den erneuerbaren Energien wurde unterschätzt, weshalb CCS oft günstiger als alternative Optionen berechnet wurde. Die angenommenen Kostensenkungen konnten jedoch nicht realisiert werden, so dass die hohen Erwartungen an einen Klimaschutzbeitrag von CCS, zum Beispiel von der IEA (OECD und IEA, 2009), nicht erfüllt wurden und entsprechende Roadmaps nicht realisiert werden konnten.

² Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz – KSpG)

- Trotz großer Erfolge beim Ausbau und der Kostensenkung der erneuerbaren Energien wurde CCS in der vergangenen Debatte daher auch stets als „Brücke“ zu den erneuerbaren Energien propagiert, solange diese noch zu teuer seien. Dadurch wurde lange ein Pfad verfolgt, der sich als nicht umsetzbar herausstellte. Da auch aktuell CCS oft als Brückentechnologie angesehen wird, sollte jeweils kritisch geprüft werden, unter welchen Voraussetzungen dies gilt und welche Vergleichsmaßstäbe dabei angesetzt werden.
- Der Einsatz von CCS wurde als klimaneutral beziehungsweise „near-zero“ bezeichnet. Da die CO₂-Abscheideraten jedoch in der Regel nur zwischen 90 und 95 Prozent liegen, ein hoher Mehrverbrauch an Kohle und Erdgas anfällt und auch die Stoffströme und deren Emissionen in den Vorketten (Herstellung von Chemikalien, Methanemissionen bei der Förderung fossiler Rohstoffe usw.) berücksichtigt werden müssen, liegen die Netto-Reduktionsraten der THG-Emissionen nur bei 59 bis 87 Prozent.
- Grob abgeschätzte theoretische CO₂-Speicherpotenziale suggerierten ein großes und schnell umsetzbares Potenzial. In der Praxis sind die Werte allerdings erheblich kleiner und lange Vorlaufzeiten sind nötig, bis ein Speicher funktionsfähig ist.
- Insbesondere die lokale Öffentlichkeit sowie auch die organisierte Zivilgesellschaft wurden in der vergangenen Debatte zur Erkundung von potentiellen CO₂-Speicherstätten nicht oder nicht hinreichend mit einbezogen. Eine frühzeitige und angemessene Wissensbildung und Beteiligung der lokalen Öffentlichkeit hätte mögliche Akzeptanzprobleme sichtbar machen können.

Im Hinblick auf die aktuelle Debatte um CCS und die CMS sollten sich die Akteur*innen diese Aspekte vergegenwärtigen, um die Chancen und Herausforderungen des – aus jeder Hinsicht notwendigen – Einsatzes von industriellem CCS frühzeitig zu erkennen und möglichen Fehlentwicklungen entgegenwirken zu können.

4 Einschätzung zu übergreifenden Aspekten der Carbon Management Strategie der Bundesregierung

Bevor in Kapitel 5 Handlungsempfehlungen hinsichtlich konkreter Herausforderungen bei der Umsetzung der CMS diskutiert werden, erfolgt hier zunächst eine grundlegende Einschätzung zur CMS.

- Das Wuppertal Institut begrüßt die Planung der CMS zur Vermeidung fossiler CO₂-Emissionen aus der Industrie.

Wie verschiedene Klimaneutralitätsszenarien zeigen, spielt Carbon Management eine zentrale Rolle beim Erreichen der deutschen Klimaneutralität (Agora Think Tanks, 2024; Fraunhofer ISI et al. 2022; Luderer et al. 2021). Grüner Kohlenstoff muss der Industrie als Produkt zur Verfügung stehen und verbleibende fossile Kohlenstoffmengen dürfen die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nicht weiter erhöhen. Daher ist nicht nur der Einsatz von CCS-Technologien zur Vermeidung weiterer fossiler CO₂-Emissionen notwendig, sondern es bedarf auch CDR-Maßnahmen zur Kompensation von Residualmissionen durch Negativemissionen. Der Einsatz von CCS und CDR sollte jedoch mit einer Prüfung der Möglichkeiten einer weiteren Effizienzsteigerung bestehender Anlagen und Prozesse, dem Ausbau erneuerbarer Energien, der Nutzung von Wasserstoff sowie der Wandel hin zu klimaneutralen Lebens- und Wirtschaftsweisen einhergehen. Denn letztendlich gilt: Je später die Emissionsreduktionen erfolgen, desto drastischer werden sie ausfallen müssen. Eine verspätete Emissionsreduktion, ein sogenannter „Overshoot“, mag zunächst volkswirtschaftlich verheißungsvoll sein, ist aber ein „Wetten auf negative Emissionen“ (Fuss, 2014) in der Hoffnung, dass diese ab 2045 in großem Maßstab verfügbar sind. Zudem ist die Klimawirkung größer, wenn zunächst mehr emittiert und dann stark reduziert wird.

- Das Wuppertal Institut empfiehlt, die Anwendung von CCS – mit wenigen Ausnahmen – auf unvermeidbare Emissionen zu limitieren und den Einbezug schwer vermeidbarer Emissionen regelmäßig zu überprüfen.

Der Einsatz von CCS in einzelnen Industriesektoren ist aus heutiger Sicht notwendig. Jedoch stellt sich hierbei die Frage, für welche Bereiche CCS und CCU zugelassen und welche Bereiche gefördert werden sollten. Das Eckpunktepapier zur CMS zeichnet sich durch eine differenzierte Betrachtung der Vermeidbarkeit von CO₂-Emissionen aus: Die Zuordnung in schwer- oder unvermeidbare Emissionen wird von der technischen, tatsächlichen und wirtschaftlichen Verfügbarkeit von Alternativen abhängig gemacht. Entsprechend werden Zement- und Kalkwerke sowie TAB als Prozesse klassifiziert, in denen unvermeidbare Emissionen anfallen. Bei Zement- und Kalkwerken ist dies in den Prozessemissionen begründet, die hier durch den Aufschluss mineralischer Karbonate entstehen. Bei TAB umfassen die Prozessemissionen sowohl CO₂ aus der Verbrennung der fossilen als auch der biogenen Anteile des Abfalls. Durch die auf absehbare Zeit zunächst weiter bestehende gesellschaftliche Nachfrage nach Zement und den kontinuierlichen Bedarf der Entsorgung von Abfällen sind somit die fossilen Prozessemissionen technisch nicht vermeidbar. Auch wenn Prozessemissionen in diesen Sektoren heute als unvermeidbar gelten, sollte eine regelmäßige kritische Überprüfung erfolgen, was zukünftig als unvermeidbar gilt. Änderungen dieser Einschätzung könnten sich beispielsweise durch potentielle Substitute von Zement durch den Holzbau ergeben.

Für eine Klassifizierung von Anlagen mit schwer vermeidbaren Emissionen lassen sich als Beispiel Steamcracker in der Petrochemie anführen. Im Steamcracking-Prozess fallen, neben den olefinischen und aromatischen Hauptprodukten (HVC) ebenfalls Methan und Wasserstoff an. Das Methan wird als Energieträger in den Öfen des Steamcrackers unterfeuert. Durch die Verwendung von biogenen oder synthetischen Rohstoffen lässt sich der Steamcracking-Prozess defossilisieren. Jedoch sind biogene oder synthetische Rohstoffe zum jetzigen Zeitpunkt wirtschaftlich beziehungsweise tatsächlich nicht verfügbar.

Um Lock-In-Effekte durch die Zulassung von CCS für schwer vermeidbare Emissionen der Industrie zu vermeiden, sollte die Zulassung an die Bedingung geknüpft werden, parallel mit der Implementierung von CCS eine Strategie vorzulegen, wie die Prozesse mittelfristig ohne den Einsatz fossiler Brennstoffe klimaneutral gestaltet werden können. Die Weiternutzung der CCS-Anlagentechnik würde dann Negativemissionen erzeugen. Dies wäre, wie oben beschrieben, beispielsweise beim Einsatz von CCS am Steamcracking-Prozess gegeben.

Generell ausgeschlossen werden sollte jedoch der Einsatz von CCS im Energiesektor und somit auch für Gaskraftwerke, da hier keine Notwendigkeit für CCS besteht.

- Es bedarf dringend Maßnahmen für mehr Planungssicherheit sowie wirtschaftlicher Anreize für Unternehmen entlang der gesamten CCS-Kette, da industrielle Transformationsprojekte bis 2030/2032 gestartet sein müssen.

Aufgrund der fehlenden Erfahrung mit CCS in Deutschland ist ein schnellerer Hochlauf von Pilotprojekten notwendig, um CO₂-Abscheidung, -Transport und -Speicherung zu erproben und zeitnah großskalig zum Einsatz zu bringen. Hierbei gilt es, die Potenziale, die Kosten und die zeitliche Verfügbarkeit von CCS realistisch einzuschätzen. So werden CO₂-Speicherkapazitäten auf absehbare Zeit knapp bleiben und CO₂-Infrastrukturen müssen erst noch errichtet werden. Gleichzeitig müssen mit der Extrapolation der aktuell gültigen Ausgestaltung des EU-ETS die Energiewirtschaft und die Industrie aber bis 2040 de facto die Klimaneutralität erreichen, da die CO₂-Zertifikate dann auslaufen. Aufgrund der Vorlaufzeiten für industrielle Großprojekte bedeutet das für den Großteil der Industrieunternehmen, dass sie bis spätestens 2030/2032 Investitionen in die Transformation zur Klimaneutralität auslösen müssen (Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE, 2024). Dies wird allerdings erst auf Basis behördlicher Genehmigungen, detaillierter Projektplanungen und gesetzlich fixierter Rahmenbedingungen erfolgen. Das betrifft die Planungssicherheit für die Verfügbarkeit von Infrastrukturen und der entsprechenden Kostenallokation, die Entwicklung von CO₂-Speichermöglichkeiten, die zeitnahe Verankerung nationaler und mit der EU abgestimmter Strategien sowie die Konzeptionierung und Ausgestaltung des Hochlaufs Grüner Märkte. Da die Abscheidung von CO₂ technisch nicht zu 100 Prozent möglich ist, muss zudem der rechtliche Umgang und Handel mit Kompensationsmöglichkeiten geregelt werden. Die Klärung und Rechtssicherheit in diesen Fragen sollten innerhalb der kommenden Legislatur in Deutschland und parallel in der EU geschaffen werden, um der Industrie die rechtzeitige Konzeptionierung und Genehmigung ihrer Transformationsprojekte zu ermöglichen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die Transformation der Industrie nicht stattfinden wird.

- Last but not least sollte für alle Phasen der CCS-Kette eine umfassende Risikobewertung erfolgen, mindestens in Bezug auf Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit.

Verschiedene Studien haben bereits mögliche Risiken einzelner Prozessschritte der CCS-Kette aufgezeigt. So haben Cames et al. (2024) insbesondere Risiken untersucht, die mit der geologischen Offshore-Speicherung einhergehen, und eine Reihe von Maßnahmen zu deren Minderung empfohlen. Risiken für Umwelt und Menschen sind danach gering, sollten aber nichtsdestotrotz sorgfältig analysiert, abgewogen und vermindert werden. Daneben werden Risiken aufgrund des rechtlichen Rahmens, der Betriebsführung in Speicherprojekten oder hinsichtlich der späteren Haftung analysiert. Auf Risiken für Mensch und Umwelt durch mögliches Austreten von CO₂ in den einzelnen Phasen der CCS-Kette weisen insbesondere SRU (2024), UBA (2009) und UBA (2023) hin. Darunter fallen Aspekte wie Veränderungen in mikrobiellen Aktivitäten, eine geringere Sauerstoff-Konzentration in oberflächennahen Bodenschichten, die mögliche Versauerung von Meerwasser mit nachfolgender Schädigung von Meeresorganismen oder Verunreinigungen beziehungsweise Versalzung von oberflächennahem Grundwasser an Land.

Aus Sicht des Wuppertal Instituts sollte daher rechtzeitig vor dem Aufbau von Transport- und Speicherstrukturen eine umfassende Risikobewertung sowie eine Abschätzung möglicher Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit erfolgen, jeweils angepasst an die einzelnen geplanten Schritte (z. B. die jeweilige Transportart oder die Speicherung in Onshore- oder Offshore-Lagerstätten).

5 Handlungsempfehlungen zu zentralen Aspekten der Carbon Management Strategie der Bundesregierung

Das Wuppertal Institut sieht fünf zentrale Herausforderungen bei der Umsetzung der CMS: den Aufbau einer CO₂-Infrastruktur zur Realisierung einer Kohlenstoffwirtschaft, die Speicherung von CO₂ unter der Erdoberfläche, die Anwendung von CCU im Vergleich zu CCS, die gesellschaftliche Akzeptanz von CCS sowie die Anschlussfähigkeit der CMS an die LNe des Bundes.

Die CO₂-Abscheidung an Punktquellen, der CO₂-Transport sowie die Speicherung oder Nutzung des CO₂ stellen die zentralen Aspekte entlang der CCU/S-Kette dar. Bereits in der CCS-Debatte zu Beginn des Jahrhunderts waren insbesondere die CO₂-Infrastruktur und die Speicherung die zentralen, kritisch diskutierten Themen. Eine geplante CO₂-Pipeline von Hürth nach Norddeutschland und die Untersuchung der dortigen CO₂-Speicher haben viele Proteste ausgelöst, auch verursacht durch fehlende sowie mangelhafte Kommunikation und einer zu späten Bürger*innenbeteiligung in den potentiellen Speichergebieten. Aktuelle Diskussionen um das Wasserstoffkernnetz in Deutschland lassen vermuten, dass auch der Ausbau einer CO₂-Infrastruktur mit Hürden verbunden sein könnte. Die Erschließung von CO₂-Speichern wird optimistisch schnell antizipiert. Im Hinblick auf CCU existiert bisher kein gemeinsames Verständnis unter den relevanten Stakeholdern, welche Pfade als sinnvoll einzuordnen sind und welche nicht. Für eine gelingende Transformation stellen die gesellschaftliche Akzeptanz sowie eine koordinierte Strategieplanung zwei weitere wichtige Aspekte dar. Die Notwendigkeit, näher auf das Thema Akzeptanz einzugehen, ergibt sich ebenfalls aus der früheren CCS-Debatte: Hier waren es jahrelange Proteste aus der Zivilgesellschaft und der lokalen Bevölkerung, die die Umsetzung einer CCS-Strategie (damals allerdings für fossile Kraftwerke und nicht für die Industrie) letztendlich zum Erliegen brachten. Die Anschlussfähigkeit der CMS an die LNe ist relevant, da nach 2045 große Mengen an Negativemissionen realisiert werden müssen, die bereits jetzt bei der Planung von Infrastrukturen und Speichern berücksichtigt werden sollten.

5.1 Entwicklung einer CO₂-Infrastruktur

Laut Branchenangaben wird in Deutschland derzeit rund 1 Mt CO₂ pro Jahr erzeugt, zum größten Teil als Nebenprodukt der Ammoniakherstellung. Es wird in geringeren Mengen als Rohstoff genutzt, etwa für chemische Anwendungen, zu etwa 70 Prozent aber für die Lebensmittelindustrie. Zu diesem Zweck wird es per LKW transportiert. Europaweit findet der CO₂-Transport bisher vorwiegend auf der Schiene statt, teils auch per Schiff. Ein Pipelinenetz existiert derzeit weder in Deutschland noch in Europa. Dagegen liegen seit den 70er Jahren Erfahrungen aus den USA vor, wo 2015 bereits eine Netzlänge von über 7.000 km erreicht wurde – und das CO₂-Netz auch aktuell weiter ausgebaut wird.

Transportoptionen und technische Voraussetzungen

CO₂ kann in verschiedenen Zuständen und in verschiedenen Modi transportiert werden. Die Wahl des Transportmittels hängt unter anderem von Faktoren wie den zu transportierenden Mengen, der Entfernung und den Kosten ab. Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften von CO₂ ist die Reinheit von zentraler Bedeutung für

die Transportoption, denn anders als bei Erdgas oder Wasserstoff (H_2) beeinflussen mögliche Störstoffe im CO_2 die Eigenschaften beziehungsweise den Phasenwechsel in größerem Maße: Schon geringe Mengen an Störstoffen ändern das thermodynamische Verhalten derart, dass der Phasenwechsel quasi unvorhersehbar ist.

Per Straße oder Schiene wird CO_2 im Container in flüssiger Form und tiefkalt gehandhabt, wobei die Temperatur bei ungefähr $-50\text{ }^{\circ}C$, der Druck bei 0,7 bis 2 MPa und die Reinheit bei 99,5 Prozent liegt. Damit genügt es zum Beispiel den Anforderungen in der Lebensmittelverarbeitung. Deshalb ist dieser Transport in Deutschland aktuell die bevorzugte Option. Mit dem Einbezug von CO_2 aus CCS und CDR werden erheblich größere Mengen transportiert werden müssen. Sollte dies ebenfalls über Straße und Schiene erfolgen, muss das auch bei der Planung dieser Verkehrswege berücksichtigt werden: Als anzupassende Instrumente sind die Bedarfsplanung Schiene sowie der Bundesverkehrswegeplan zu nennen. In der Planung sind die zusätzlichen CO_2 -Volumina dem absehbar sinkenden Transport von fossilen Energieträgern wie Kohle gegenüberzustellen.

Der Transport per *Schiff* ist eine Option für größere Volumina mit relativer Flexibilität. Er spielt vor allem in Küstengebieten mit Offshore-Speichern eine Rolle. So soll der Transport von CO_2 zu einem Anlandeterminal vor Norwegen per Schiff erfolgen, bevor das CO_2 per Pipeline weiter zum Speicherprojekt „Northern Lights“ transportiert wird (Totalenergies, o. J.). Die Flexibilität wird – relativ zur Pipeline, die aufgrund ihrer Anbindung überhaupt nicht flexibel ist – dadurch gegeben, dass die Schiffe nicht technisch auf bestimmte Hafen-Terminals festgelegt sind, sondern auch andere Ziele ansteuern könnten. Das gilt natürlich nur dort, wo eine entsprechende Ver- und Entladeinfrastruktur am Hafen besteht.

Pipelines sind die effizienteste Methode für den Transport großer CO_2 -Mengen über lange Strecken. Auch hier gibt es verschiedene Optionen: der Transport kann flüssig, gasförmig oder in der so genannten „dichten Phase“ erfolgen. Nach derzeitigem Stand ist in Deutschland bereits eine Einigung auf die so genannte „dichte Phase“ erfolgt³. Beim Transport muss ein unkontrollierter oder spontaner Phasenwechsel – etwa zwischen flüssiger und gasförmiger Phase – aus Sicherheitsgründen unbedingt vermieden werden. Eine Umwidmung von Erdgas- zu CO_2 -Pipelines ist daher nicht ohne weiteres möglich; zu beachten sind unter anderem die Auslegung der Rohrstärke sowie die Sicherheit gegenüber interner Korrosion oder unkontrollierten chemischen Reaktionen. Um den benötigten Druck von $>8\text{ MPa}$ aufrechtzuerhalten, sind – wie bei Erdgas-Pipelines – etwa alle 200 km Kompressorstationen nötig.

Die Kombination verschiedener Transportmittel, zum Beispiel LKW und Bahn zum Sammeln von CO_2 und Weitertransport per Pipeline, wird als *multi-modaler Transport* bezeichnet. Hierbei, aber auch bei der nachfolgenden Speicherung, müssen die Anforderungen an die Beschaffenheit und Reinheit des CO_2 bei der Einspeisung in die Pipeline mit den Rahmenbedingungen für das Pipeline-Design abgeglichen werden. Dabei muss die Balance zwischen CO_2 -Reinheit und Flexibilität bezüglich der

³ Thermodynamisch ist damit die superkritische Phase gemeint, in der sich das CO_2 in einer Mischphase zwischen flüssig und gasförmig befindet und die Vorteile beider Phasen vereint – die Dichte der Flüssigkeit mit der Viskosität und Kompressibilität des Gases, was in geringerer Reibung und damit höherer Transportkapazität resultiert.

Anforderungen verschiedener Einspeiser erhalten bleiben. Damit ist Multi-Modalität deutlich aufwendiger, als bei einem Modus zu bleiben. Während der Transport zu den Lagerstätten aufgrund der kleinen Mengen zunächst per Schiff und in flüssigem Zustand abgewickelt werden wird, kommen mittelfristig Pipelines zum Einsatz (so beispielsweise die in Planung befindliche NORGE-Pipeline, die den CO₂-Hub Wilhelmshaven mit den 900 Kilometer entfernten Speicherstätten unter der norwegischen Nordsee verbinden wird). Da die Einspeicherung in dichter Phase erfolgt, wird mit der Pipelineanbindung im Unterschied zum Schiffstransport auch kein Phasenwechsel mehr notwendig.

Derzeit werden rund zwei Drittel aller in Planung befindlichen europäischen Projekte über multi-modalen Transport geplant (Zukunft Gas, o. J.) – was mit der derzeit fehlenden Verfügbarkeit eines flächendeckenden CO₂-Netzes korreliert.

Kosten und technische Kapazitäten

Die Kosten für den CO₂-Transport variieren je nach Transportmittel. Der Pipeline-Transport ist für große Mengen über lange Strecken am wirtschaftlichsten, allerdings kann der Schiffstransport bei Entfernungen über 1.000 km eine wirtschaftliche Alternative sein. Der LKW- und Bahntransport ist aufgrund von Skaleneffekten teurer als der Pipeline-Transport (FfE, 2024).

Grundsätzlich sind alle Transportoptionen für tiefkaltes CO₂ (Schiff, Schiene, LKW bzw. Container) derzeit bereits verfügbar. Für den Schiffstransport kryogener Gase gibt es weltweit einige Anbieter. Ebenso gibt es Kesselwagen für die Schiene sowie Flüssiggastanks für LKW. Im Hochlauf kann die konkrete Verfügbarkeit der Wagen, Schiffe oder Container an ihre Grenzen stoßen. Einen Eindruck der verschiedenen Größenordnungen gibt folgende Übersicht:

- Schiff: Small Bulk Cryo Ships können 2,5 bis 7,5 Kilotonnen (kt) CO₂ transportieren. In Hafen-Terminals können bis zu 7 Mt CO₂ pro Jahr abgefertigt werden.
- Bahn: Ein Güterzug kann bis zu 190 kt CO₂ pro Jahr transportieren.
- LKW: Ein LKW-Trailer kann bis zu 18 Tonnen (t) CO₂ transportieren.

Rahmenbedingungen und Herausforderungen eines CO₂-Pipelinenetzes

Für die relativ großen Mengen an CO₂, die in Deutschland zukünftig zu Speicherstätten transportiert werden müssen (siehe Kapitel 3), ist die Pipeline unverzichtbar – nicht zuletzt aufgrund der ökonomischen Vorteile gegenüber anderen Transportarten sowie des hohen Verkehrsaufkommens, das durch Straßen- und Schienentransport erzeugt würde. Beim Aufbau des CO₂-Pipelinenetzes ist absehbar, dass nicht jede Punktquelle direkt zu Beginn angeschlossen werden kann. Daher muss für abgelegene Standorte und kleinere Mengen der multi-modale Transport in Betracht gezogen werden. Dieser beinhaltet einen Hub, an dem etwa flüssiges CO₂ zur Einspeisung in die Pipeline verdichtet wird oder vice versa. Das Verhältnis von multi-modalem zu reinem Pipelinetransport wird sich im Hochlauf der Pipelineanbindung erwartbar verschieben; ganz ohne Straßen-, Schienen- und Schiffstransport wird eine dauerhafte Infrastruktur für alle anzuschließenden Punktquellen nicht darstellbar sein. Onshore-Speicherstätten könnten den Problemdruck jedoch reduzieren, insbesondere für regionale Emittenten fernab von Transitpipelines (siehe Kapitel 5.2). Im Hochlauf der Pipeline beziehungsweise im Ausblick auch für abgelegene einzelne

Punktquellen wird diese Lösung jedoch notwendig bleiben – ebenso beim Anschluss an die (Untersee-)Speicherung. Einige weiterführende Überlegungen zur Anbindung, auch im Zeitverlauf, sind in Machbarkeitsstudien nachzulesen, etwa im Projekt Ge-Zero (Heidelberg Materials, o. J.) oder in der umfassenden Infrastrukturstudie des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ, 2024).

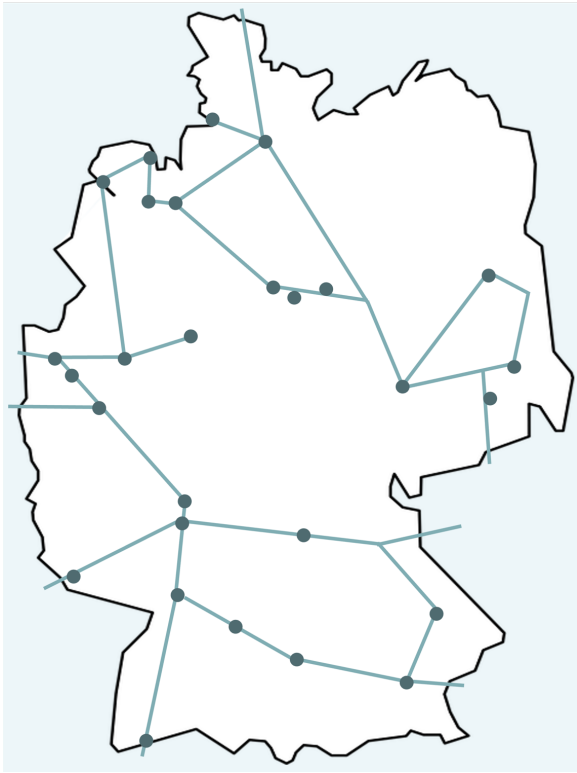


Abb. 2 Planung des CO₂-Startnetzes

Quelle: eigene Darstellung basierend auf VDZ (2024)

Ein „Startnetz“ für CO₂, das analog zum H₂-Kernnetz den Anfang eines weiter verzweigten Netzes bilden soll, ist in Planung und ist in Abb. 2 dargestellt. Allerdings ist derzeit weder die Finanzierung geklärt, noch sind verbindliche Bedarfsabfragen erfolgt – die Umsetzung des CO₂-Netzes hinkt dem H₂-Netz damit mehrere Schritte hinterher. Das hängt unter anderem daran, dass es bisher keine gesetzliche Grundlage für den Transport von CO₂ gibt.

Aus den Erfahrungen bei der Planung und der nun begonnenen Umsetzung des H₂-Kernnetzes lässt sich ableiten, dass die Auslegung der zu transportierenden CO₂-Menge nicht trivial ist. Aufgrund des dynamischen Hochlaufs der Netznutzung müsste die Auslegung eigentlich iterativ erfolgen; dies ist aber bei der Verlegung einer Pipeline nicht zielführend. Daher wird das H₂-Netz für den Beginn als überdimensioniert wahrgenommen, im Ausblick aber als unterdimensioniert (Zauner, 2024). Ähnliche Herausforderungen werden sich auch für die CO₂-Infrastruktur ergeben. Um die Transportkapazitäten zu bestimmen, wurden für das H₂-Kernnetz – nach Szenario-Berechnungen – Bedarfsabfragen durchgeführt, wobei es gerade für kleine und mittlere Unternehmen nicht einfach ist, einen verbindlichen Bedarf an H₂ anzugeben, zumal die tatsächlichen Kosten für H₂ noch nicht verbindlich sind. Auch hier ist eine Analogie zum CO₂-Netz gegeben.

Gleichzeitig erschwert die bisher fehlende Sicherheit in der Infrastrukturplanung die Verbindlichkeit bei den Umsetzungsplänen der Unternehmen. Umgekehrt stellt VDZ (2024) dar, dass die Gesamtmenge des bis 2045 aus Zement- und Kalkwerken abgeschiedenen CO₂ steigt, wenn die Pipelineinfrastruktur bereits 2028 verfügbar ist. Wichtige rechtliche Aspekte sind derzeit noch in Bearbeitung. So wird das bisherige Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) derzeit novelliert und zu einem Kohlendioxid-Speicherungs- und Transportgesetz (KSpTG) erweitert, so dass auch der Transport erfasst wird. Das soll beschleunigte Planungs- und Genehmigungsverfahren ermöglichen. Für den ökologisch sicheren Bau und Betrieb von CO₂-Transportleitungen werden im KSpTG klare Regelungen getroffen, welche unter anderem

Umweltverträglichkeitsprüfungen für die Pipelines vorsehen⁴. Dies ist relevant, da hier – auch bei gleichzeitiger Nutzung bereits bestehender Trassen – von erheblichen Beeinträchtigungen wie etwa Lärm- und Staubimmissionen, Gehölzverlust, temporärer Grundwasserabsenkung oder Eingriffe in die Bodenstruktur auszugehen ist.

Da Deutschland neben dem Transport der eigenen CO₂-Mengen auch Transitland für CO₂ aus den Nachbarländern sein wird, müssen die einzelnen nationalen Strategien aufeinander abgestimmt werden. Für eine vorausschauende Planung sollten die zukünftig zu transportierenden CO₂-Mengen aus den verschiedenen Ländern erfasst und zusammengeführt werden, um die passende Dimensionierung der Transportinfrastrukturen zu ermöglichen. Ein wichtiger nicht-technische Aspekt, der in diesem Kontext geklärt werden muss, ist die Definition von schwer vermeidbaren Emissionen – und damit die mögliche Zugangsberechtigung zur Pipeline und die maximale Transportkapazität des Netzes. Auch ist zu klären, wer für das transportierte CO₂ zuständig ist, vor allem im Hinblick auf mögliche Leckagen und die damit einhergehende Haftung⁵ – die Übergabe des CO₂ von einer Anlage auf eine andere (etwa Abscheideanlage zum Transport oder bei der Umlagerung im Hub) ist durch Verträge der beiden Parteien abzusichern.

Handlungsempfehlungen

Flächendeckendes CO₂-Transportnetz schaffen: Um die Klimaziele zu erreichen, muss ein flächendeckendes CO₂-Transportnetz aufgebaut werden. Die optimale Transportlösung muss im Zeitverlauf – und unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit, die von diversen Faktoren abhängt – für die verschiedenen Anwendungen ermittelt werden. Multi-modale Hubs sind zu schaffen, die als Übergangslösung sowie für Standort ohne Pipelineanbindung notwendig sein werden.

Rahmenbedingungen schaffen: Es müssen die Rahmenbedingungen geschaffen werden, um rechtzeitig die Weichenstellungen umzusetzen. Dazu gehört vor allem die schnelle Verabschiedung der Novelle des KSpTG, aber auch die frühzeitige Zusammenstellung von Arbeitsgruppen zu Genehmigungsverfahren. Eine Einigung der Beteiligten über die Spezifika des zu transportierenden CO₂ (Reinheit, Störstoffe) sowie eine Verbindlichkeit über die Zuständigkeit („Besitz“) müssen frühzeitig auf den Weg gebracht werden. Dabei muss auch geklärt sein, für welches CO₂ die Nutzung der Infrastruktur erlaubt ist und wie diese Einschränkung gesetzlich verankert wird.

5.2 Erschließung von CO₂-Speichern

Zum Erreichen der Klimaneutralität wird Deutschland nach einem sukzessiven Hochlauf ab 2045 jährlich mindestens 45 Mt CO₂ einspeichern müssen. Rechnet man eine gleichbleibende Abscheidung (beispielsweise) über 100 Jahre, ergäbe dies kumuliert einen deutschen Speicherbedarf von 4,5 Gt CO₂. Deutschland steht

⁴ Bundesrat Drucksache 266/1/24 (2. Zu Artikel 1 Nummer 6 Buchstabe a (§ 4 Absatz 1 Satz 5 KSpTG); <https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2024/0201-0300/266-1-24.pdf>

⁵ Der Monitoringbericht der EU zum ETS legt nahe, dass die Verantwortung beim jeweiligen Anlagenbetreiber liegt. Die Schnittstelle sollte aber noch vertraglich abgesichert werden. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32018R2066>

allerdings nicht alleine mit diesen Bemühungen: Die EU-Kommission geht gemäß ihrer Wirkungsabschätzung zu ihrem Klimaschutzgesetz davon aus, dass (ohne UK und NOR) bis 2030 34 Mt, bis 2040 285 Mt und bis 2050 450 Mt CO₂ pro Jahr aus fossilen Quellen oder der Luft abgeschieden werden sollen (Europäische Kommission, 2024a, 2024b). Neben unvermeidbaren Emissionen beinhalten diese Mengen auch Emissionen aus Erdgaskraftwerken. Nach der Industrial Carbon Management Strategy (Europäische Carbon Management Verordnung) sollen hiervon in 2030 5 Mt, in 2040 85 Mt und in 2050 230 Mt CO₂ pro Jahr für CCU verwendet werden, insbesondere zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe. Demnach verblieben in 2030 29 Mt, in 2040 rund 200 Mt und in 2050 220 Mt CO₂ pro Jahr zur Speicherung (Europäische Kommission, 2024c). Deutschland würde in 2045 rund 25 Prozent dieser Speichermenge benötigen.

Speicheroptionen für Deutschland

a) Offshore-Speicherung in Deutschland

Das CMS-Eckpunktepapier und der Entwurf der KSpTG-Novelle sieht vor, CO₂ aus Deutschland auf deutschem Hoheitsgebiet zu speichern, dies jedoch zunächst nur offshore zu erlauben. Hierfür sollen CO₂-Speicher in bestimmten Gebieten des deutschen Festlandssockels und der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) erschlossen werden. Dem deutschen Speicher-Kataster zufolge stehen effektive Speicherpotenziale für rund 5 Gt CO₂ in salinen Aquiferen zur Verfügung (BGR, 2011; Müller und Reinhold, 2011). Aktuelle Ergebnisse des GEOSTOR-Forschungsprojekts zeigen, dass allein für die dort untersuchten Gesteinsschichten des Mittleren Buntsandsteins zwischen 0,9 und 5,6 Gt CO₂ effektiver Speicherkapazität möglich wären (Wallmann und Löschke, 2024). Diese verteilen sich auf 38 untersuchungswürdige Formationen. Die Bandbreite ergibt sich dabei aus der Anwendung von Effizienzfaktoren⁶ E mit E zwischen 5 und 20 Prozent. Hinzu kommen weitere Gesteinsschichten (Sandsteine des Rotliegend und des Jura), die bisher jedoch noch nicht analysiert wurden.

Dieses auch „statisch“ genannte Potenzial ist jedoch als Obergrenze zu verstehen: Die Autor*innen weisen darauf hin, dass „aufgrund der raumplanerischen, geotechnischen und wirtschaftlichen Randbedingungen damit gerechnet werden [muss], dass die tatsächlich nutzbare Speicherkapazität in der deutschen Nordsee deutlich niedriger sein wird als die statische Kapazität“. Dieses „dynamische Potenzial“ oder „praktische Potenzial“ ergibt sich daraus, dass die AWZ bereits jetzt stark genutzt wird, für Windparks, Schifffahrtsrouten, militärische Anwendungen sowie Kabel und Pipelines. Auch wenn der oben ermittelte deutsche Speicherbedarf von 4,5 Gt über 100 Jahre rein rechnerisch in der AWZ umsetzbar wäre, wird sehr wahrscheinlich nur ein begrenzter Anteil dieses Potenzials zur Verfügung stehen. Es ist dennoch zu begrüßen, CO₂ aus Deutschland soweit wie möglich auch in Deutschland zu speichern, um der eigenen Verantwortung gerecht zu werden. Dabei sollte aus Sicht des Wuppertal Instituts jedoch folgendes beachtet werden:

⁶ Effizienzfaktoren dienen dazu, aus dem „theoretisch“ nutzbaren Speicherpotenzial das „effektive“ Speicherpotenzial abzuleiten. Dies berücksichtigt insbesondere, wie hoch der zulässige Druck werden darf, um ein Durchbrechen des CO₂ durch die Deckschichten zu verhindern. Der Effizienzfaktor E wird zwischen 0 und 1 angegeben. Je geringer E angesetzt wird, desto geringer ist das Risiko, aber auch das effektive Potenzial (effektives Potenzial = theoretisches Potenzial * E).

- Es ist zu begrüßen, dass nach dem novellierten KSpTG die Speicherung von CO₂ in Meeresschutzgebieten und in einem Abstand von weniger als 8 km dazu ausgeschlossen werden soll. Auch der Transport des CO₂ durch die Meeresschutzgebiete, zum Beispiel mittels Pipelines, sollte ausgeschlossen werden, da beispielsweise das Wattenmeer „ein einzigartiger, besonders schützenswerter Lebensraum [ist], der für die marine Biodiversität, aber auch für den Vogelzug eine immense Bedeutung hat“ (SRU, 2024).
- Risiken für Natur und Umwelt sollten weitgehend ausgeschlossen werden: Die Belastung von Vögeln und Walen, etwa durch Lärm, sowie Belastungen der marinen Biodiversität sollten vermieden und der Meeresschutz sollte, aufgrund der zunehmenden Nutzung der AWZ, generell intensiviert werden (SRU, 2024; Cames et al., 2024).
- Bisher genießen Windkraft und Wasserstoff ein „überragendes öffentliches Interesse“. Dies sollte auch in der AWZ beibehalten werden. Das heißt: Die bisher und zukünftig geplanten Offshore-Windparks sowie mögliche H₂-Pipelines von „H₂-Inseln“ zum Festland sollten nicht zulasten der CO₂-Speicherung eingeschränkt werden. Vielmehr sollten Offshore-Projektierungen im Bereich Windkraft, H₂ und CO₂-Speicherung sektorübergreifend geplant werden.

b) Offshore-Speicherung im Ausland

Eine weitere Option besteht darin, CO₂-Speicher im Ausland zu nutzen. Hier werden insbesondere Offshore-Speicher unter dem Meeresboden der Nordsee diskutiert. Schon frühe Studien haben hier ein großes Speicherpotenzial aufgezeigt. Selbst konservative Schätzungen (mit einem geringen Effizienzfaktor) kamen auf ein effektives Speicherpotenzial für 44 Gt CO₂ in den Deutschland umgebenden Ländern, darunter allein 21 Gt in Norwegen und 15 Gt in UK (Wuppertal Institut, 2010; Höller und Viebahn, 2010). Die EU-Kommission hat sich gemäß der Netto-Null-Industrie-Verordnung (Europäische Union, 2024) das Ziel gesetzt, innerhalb der EU bis 2030 eine Speicherkapazität von mindestens 50 Mt CO₂ pro Jahr zu schaffen. Bis 2040 soll sie auf 250 Mt CO₂ pro Jahr (bei Abzug von Wartungsintervallen auf netto 220 Mt CO₂ pro Jahr) ansteigen (Europäische Kommission, 2024a).

Nimmt man die oben genannten konservativen Schätzungen als Basis, sollten die geplanten Speicherkapazitäten die geplante Menge des zu speichernden CO₂ in den Jahren 2030 und 2040 abdecken können. Für 2050 gibt es jedoch bisher keine Aussagen. Zudem ist zu beachten, dass die EU keine Aussage zur Speicherdauer macht – und somit auch nicht zur Gesamtspeicherkapazität. Die Rechnung geht nur auf, wenn die Speicherkapazität dauerhaft bereitgestellt wird. Rechnet man zum Beispiel über 100 Jahre, ergeben sich aus den 220 Mt pro Jahr in Summe 22 Gt an Gesamtkapazität.

Eine Auswertung laufender Vorhaben zur Erschließung von Speichern im europäischen Ausland zeigt, dass konkrete Aussagen zur Höhe des kurz- bis mittelfristig verfügbaren Speicherpotenzials derzeit nur für die drei Speicherprojekte Greensand (DK), Northern Lights (NOR) und Porthos (NL) gemacht werden können, die bis 2026 mit einer jährlichen Speicherkapazität von rund 0,4 Mt CO₂, 1,5 Mt CO₂ und 2,5 Mt CO₂ starten sollen. Die Kapazitäten dieser ersten Phasen sind jedoch schon vollständig vergeben. Im Bau befinden sich aktuell nur ein weiterer Speicher im Projekt Northern Lights. Bis 2030 sollen, laut den entsprechenden Projektseiten der

Speicherbetreiber, mehr als zehn weitere Speicher mit einer Gesamtkapazität von 110-140 Mt pro Jahr in Europa realisierbar sein. Allerdings ist der Großteil der Speicherkapazitäten Projekten in Norwegen und Großbritannien zuzuordnen, während in der EU bis 2030 nur 66 Mt pro Jahr erwartet werden (CATF, 2024; VDZ, 2024). Viele Speicherprojekte sind in PCI-Vorhaben (Projects of Common Interest) der EU inkludiert (z. B. Norne, Bifrost, Aramis) (Europäische Union, 2023). Rechnet man Norwegen dazu, könnten nach eigenen Berechnungen auf Basis der Planungsdaten der Speicherbetreiber in 2030 rund 80 bis 100 Mt pro Jahr realisierbar sein (Overberg, 2025). Für das weit höhere EU-Speicherkapazitätsziel in 2040 (250 Mt pro Jahr) sind bisher keine Planzahlen verfügbar.

c) Onshore-Speicherung in Deutschland

Von Unternehmen und Verbänden wird zunehmend diskutiert, auch Speicherstätten an Land (onshore) mitzudenken und ihre potenzielle Rolle zu analysieren. Onshore-Speicherung ist nach dem neuen KSpTG zunächst nur für Forschungszwecke erlaubt. Die Bundesländer bekommen jedoch eine Opt-In-Option, mit der sie proaktiv Onshore-Speicherung in ihrem Bundesland zulassen dürfen. Dabei wären zwei Strategien möglich:

Einerseits können größere Formationen saliner Aquifere in Norddeutschland genutzt werden. Sie wurden von der BGR im deutschen Speicher-Kataster mit 6,3 bis 12 Gt CO₂ ausgewiesen (BGR, 2011). In einer Studie des Wuppertal Instituts wurden sie konservativ mit 0,84 Gt CO₂ (und einer Varianz von 0,38 bis 8,4 Gt CO₂) abgeschätzt (Wuppertal Institut, 2010; Höller und Viebahn, 2010).

Andererseits können auch regionale, kleinere Formationen im Umkreis von etwa 50 km um die Emittenten genutzt werden, was den Transportaufwand erheblich reduzieren würde (siehe auch Kapitel 5.1). Da in solchen Formationen das CO₂ in Wasser gelöst gespeichert werden könnte und damit das CO₂ die natürliche Auftriebskraft von Gasen verlieren würde (Speichermechanismus Lösungsrückhalt), könnte möglicherweise die Akzeptanz für CO₂-Speicherung steigern. Für kleine industrielle CO₂-Emittenten dürfte das – insbesondere in nahegelegenen Speichergebieten – von Interesse sein (Deutscher Bundestag, 2018). Im deutschen Speicher-Kataster sind solche Formationen bisher nicht enthalten, so dass die genannten Speicherpotenziale entsprechend größer wären. Nur für NRW und angrenzende Gebiete wurden von BGR und Geologischem Dienst NRW in Kooperation mit dem Wuppertal Institut bereits früh kleinere Speicherstätten abgeschätzt (BGR, 2005). Diese ergaben, mit 90 Prozent simulierter Wahrscheinlichkeit, 21 mögliche Formationen zwischen ca. 0,2 und 116 Mt CO₂ und einer Gesamtkapazität von 0,4 Gt CO₂. Das Land NRW positioniert sich derzeit allerdings gegen eine Onshore-Speicherung. Dagegen steht das Land Baden-Württemberg Untersuchungen zu möglichen lokalen Speichern offen gegenüber und möchte die Ermittlung möglicher Speicherpotenziale „schnellstmöglich anstoßen“ (BW, 2024).

Eine Reihe von Aspekten könnte aus heutiger Sicht für die Erschließung von Onshore-Speichern in Deutschland sprechen, diese sollten jedoch in einer Vergleichsstudie zwischen Onshore- und Offshore-Speicherung abgewogen werden (siehe unten):

- Im Hinblick auf die zu erwartende Knappheit von Offshore-Speichern in Deutschland und Europa könnten mögliche Speicherengpässe reduziert werden.

- Es ist nicht sicher, ob deutsche Unternehmen auf ausländische CO₂-Speicher zeitgerecht zugreifen können, da auch diese sehr knapp sein werden, insbesondere in den ersten zehn Jahren.
- Onshore-Speicherung würde geringere Transportkosten verursachen, da eine Verladestruktur in Häfen und der Transport durch die Nordsee vermieden würden.
- Ein durchgängiger Leitungstransport in der dichten Phase ohne zusätzlichen Umschlag an einem Hafen würde den Energieaufwand für die CO₂-Konditionierung vermeiden.
- Die Risiken, die bei jedem Transport von Gasen bestehen, könnten aufgrund der geringeren Transportdistanz vermindert werden.
- Onshore-Speicher dürften erheblich kostengünstiger zu erschließen sein als Offshore-Speicher, da Erkundung, Bau und Monitoring auf hoher See (wie auch bei der Offshore-Windkraft) erheblicher aufwändiger sind als an Land.

Rahmenbedingungen und Herausforderungen bei der CO₂-Speicherung

Eine Reihe von Herausforderungen sollten bei der Planung und Umsetzung von CCS-Vorhaben in Deutschland berücksichtigt werden. Sie zeigen, dass die CO₂-Speicher das eigentlich kritische Element der gesamten CCS-Kette darstellen, das schlussendlich die Verfügbarkeit und Umsetzung von CCS bestimmen dürfte.

a) Zeitbedarf zum Erschließen von CO₂-Speichern

Selbst wenn mögliche CO₂-Speicherformationen von geologischen Diensten als „untersuchungswürdig“ kartiert wurden, stehen diese zunächst noch nicht für die Speicherung zur Verfügung. Die potentiellen Speicher müssen alle einzeln exploriert und getestet werden, da jeder Speicher andere geologische Begebenheiten hat (Hauber, 2023). Die Zero Emissions Platform (ZEP) geht bei Aquiferspeichern, basierend auf der EU-Speicherrichtlinie 2009/31/EG, von bis zu 10 Jahren bis zur Speichergenehmigung (storage permit) aus. Dies beinhaltet die Vorerkundung, das Beantragen und Prüfen der Erkundungslizenz (storage license), die Erkundungsphase, den Antrag auf und schließlich den Erhalt der „Speichergenehmigung“ (ZEP, 2022). Hinzu kommt mindestens ein Jahr für den Aufbau der Infrastruktur, so dass mindestens 11 Jahre Dauer bis zum Start der ersten Injektion angesetzt werden sollten. Nimmt man an, dass das novellierte KSpTG 2025 in Kraft tritt und Unternehmen zeitnah Erkundungslizenzen beantragen, dann dürfte der erste deutsche CO₂-Speicher frühestens 2036 einsatzbereit sein. Das wäre zu spät, um bis 2039 alle Zement- und Kalkwerke sowie TAB-Anlagen an deutsche CO₂-Speicher anschließen zu können – darüber hinaus wäre es auch zu spät, um zusätzlich schwer vermeidbare Emissionen zu speichern.

b) Große Unsicherheiten bei der Exploration neuer Speicher

Mit rund 20 Speicherprojekten sind Deutschlands Nachbarländer schon erheblich weiter (CATF, 2024; VDZ, 2023). Eine kritische Auseinandersetzung mit den Kapazitätsangaben ist jedoch zwingend erforderlich, da eine Vielzahl an Unsicherheiten besteht. Zu nennen sind hier unter anderem unklare finale „drill or drop“ Entscheidungen, die tatsächlich zu erwartenden Injektionsraten der Speicher, optimistisch angepeilte Speicherexpansionen zukünftiger Speicher, die Abhängigkeit von Erdgasunternehmen bei der Datenerhebung oder die Performance der Pionierspeicher. Erfahrungen mit CO₂-Speicherprojekten verdeutlichen, dass die realen Speicherbedingungen

erst nach Beginn der Speicherung genau eingeschätzt werden können. So musste im weltweiten größten Speicherprojekt Gorgon (Australien) die Injektionsrate aufgrund von Druckausgleichproblemen in den ersten fünf Jahren um 50 Prozent reduziert werden (Cames et al., 2024). Projekte wie Gorgon, Sleipner und Snøhvit zeigen, dass bei der CO₂-Speicherung mit unvorhergesehenen Entwicklungen gerechnet werden muss – und deshalb ab Injektionsstart Verzögerungen eingeplant werden sollten (Hauber, 2023). Insgesamt besteht daher große Unsicherheit, ob und wann CO₂-Speicher im europäischen Ausland von Deutschland genutzt werden können.

c) Rolle der Onshore-Speicherung in Deutschland offen

Bisher fehlt eine vergleichende, ergebnisoffene und ganzheitliche (multidimensionale) Bewertung der Onshore-Speicherung im Vergleich zur Offshore-Speicherung in Deutschland, die Politik und Stakeholdern Orientierung bieten und zur Weiterentwicklung der CMS beitragen könnte. In einer Orientierungsstudie sollten daher partizipativ, unter Einbeziehung der Zivilgesellschaft, die zentralen Fragestellungen in Bezug auf die Onshore-Speicherung identifiziert werden. Eine solche Analyse sollte zeitnah in Angriff genommen werden, da sonst mit der Entwicklung eines initialen Pipelinesetzes nicht mehr änderbare Tatsachen geschaffen werden – und mögliche Vorteile einer Onshore-Speicherung nicht mehr zum Tragen kämen.

Handlungsempfehlungen

CO₂ aus Deutschland auch in Deutschland speichern: Speicheroptionen in Deutschland sollten dem Export ins Ausland vorgezogen werden, um der eigenen Verantwortung gerecht zu werden und knappe Kapazitäten von Offshore-Speichern im Ausland für die Zukunft freizuhalten.

Meeresschutz bei der Erschließung der AWZ beachten: Die ökologischen Bedenken hinsichtlich der Nutzung der AWZ für Offshore-Speicher sowie der dort geltende Vorrang der dringend benötigten Offshore-Windkraft sollten berücksichtigt werden.

Onshore-Speicherung ergebnisoffen bewerten: Es sollten Forschungsgelder zur Verfügung gestellt werden, um die potenzielle Rolle von Onshore-Speichern ergebnisoffen, ganzheitlich und partizipativ zu bewerten, als Alternative zur Offshore-Speicherung in der AWZ oder im EU-Ausland.

Knappheit und Dauer der Erschließung von CO₂-Speichern beachten: Aufgrund des absehbar hohen Zeitaufwands für die Erschließung von CO₂-Speichern, der Konkurrenzsituation in der EU sowie der Tatsache, dass der Speicherbedarf möglicherweise weit höher ist als derzeit angenommen, sollten schwer vermeidbare Emissionen nur einbezogen werden, wenn die entsprechenden Anlagen später zum Erzielen negativer Emissionen genutzt werden können.

5.3 CO₂-Abscheidung und Speicherung im Vergleich zur CO₂-Nutzung

Anstatt das abgetrennte CO₂ geologisch zu speichern, kann es auch zur Herstellung neuer Produkte genutzt werden, etwa für Polymere oder synthetische Kraftstoffe (so genanntes CCU). In einem post-fossilen Zeitalter wird CCU, neben Biomasse und Kunststoffabfällen, eine wesentliche Säule der Kohlenstoffversorgung darstellen. Eine der Hauptanwendungen von CCU wird in der chemischen Industrie gesehen.

Der Verband der Chemischen Industrie hat in seiner Roadmap zur Klimaneutralität (VCI, 2019) die technischen Größenordnungen und die erforderlichen Rahmenbedingungen dargelegt: Unter Annahme der prognostizierten Rohstoffbedarfe der chemischen Industrie in Deutschland in 2045 zeigen die Szenarien des Programms Chemistry-4-Climate (VCI und VDI, 2023), dass etwa zwei Drittel der benötigten Rohstoffe aus Biomasse und mechanischem sowie chemischem Kunststoffrecycling gewonnen werden könnten, während etwa ein Drittel durch synthetische Rohstoffe (z. B. Methanol) auf Basis von CCU-Anwendungen gedeckt werden müsste.

Abhängig von der Kohlenstoffquelle und der Verwendung der Produkte kann der Beitrag zum Klimaschutz hierbei sehr unterschiedlich ausfallen. Abb. 3 zeigt am Beispiel der Herstellung von synthetischen Polymeren und Kraftstoffen die Auswirkungen auf die atmosphärische CO₂-Konzentration in Abhängigkeit von der Kohlenstoffquelle. Dabei werden die Herkunft des CO₂ und der letztendliche Umgang mit dem in den Produkten gebundenen Kohlenstoff berücksichtigt.

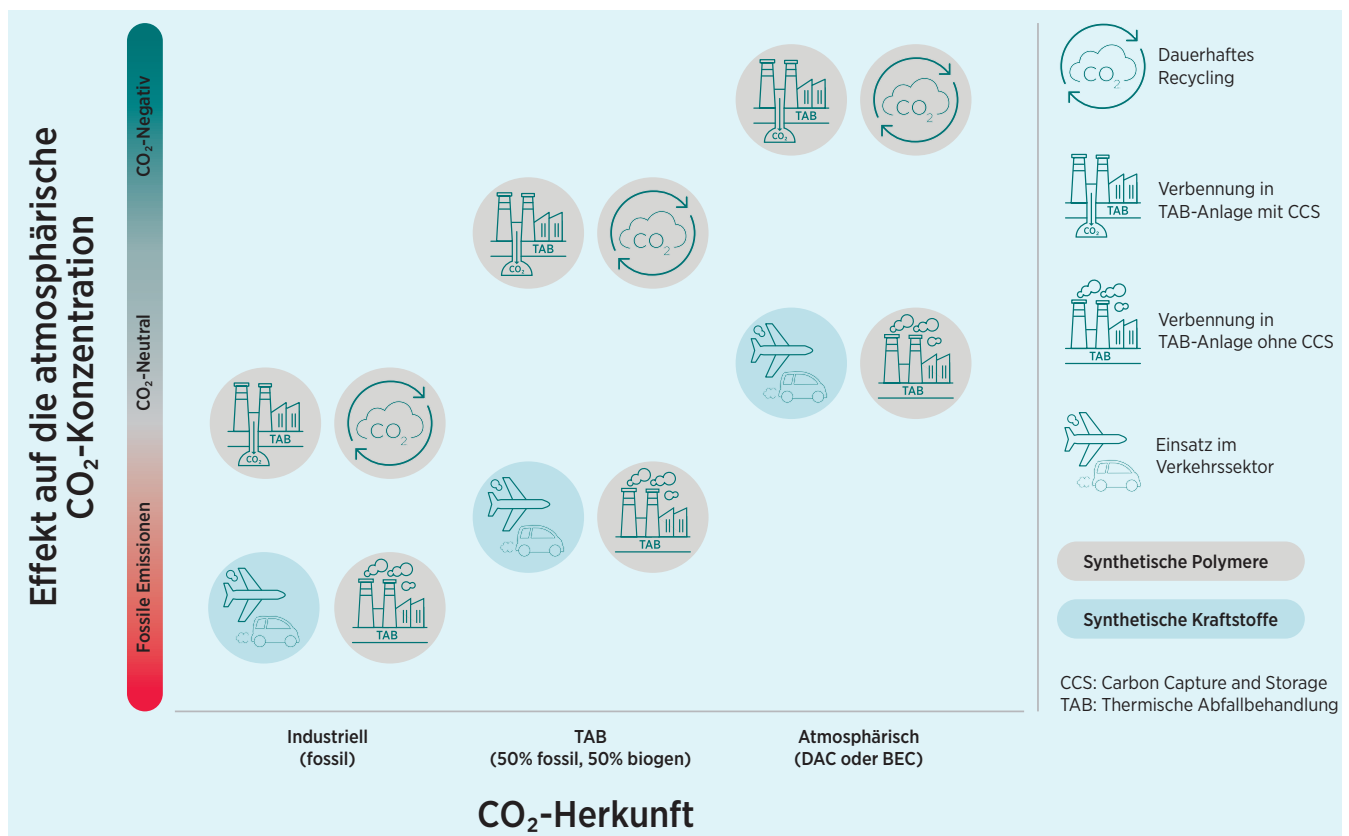


Abb. 3 Klimawirkung von CCU am Beispiel synthetischer Polymere und Kraftstoffe aus heutiger Perspektive

Quelle: eigene Darstellung

Beispielsweise führt die Nutzung synthetischer Kraftstoffe, die mit fossilem CO₂ aus industriellen Quellen, beispielsweise aus der Stahl- oder Zementindustrie, hergestellt werden, wieder zu fossilen Emissionen. Beim Einsatz von CO₂ aus TAB-Anlagen verbessert sich der Effekt auf die atmosphärische CO₂-Konzentration dagegen, denn bei Abfällen wird mit etwa 50 Prozent fossilen und 50 Prozent biogenen Anteilen gerechnet (Arnold et al. 2022). Durch den höheren biogenen CO₂-Anteil wird der fossile CO₂-Anteil im daraus hergestellten synthetischen Kraftstoff oder Polymer reduziert.

Mit der fortschreitenden Transformation zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise wird auch der Anteil nachhaltiger Rohstoffe in der Abfallverbrennung steigen, wodurch die fossilen CO₂-Mengen weiter reduziert werden. Die Verbrennung von Polymeren in einer TAB-Anlage mit CCS sowie das mechanische oder chemische Recycling der Polymere – insofern das gebundene CO₂ aus DAC und BEC stammt – führt zu Negativemissionen.

Zur Nutzbarmachung des CO₂ für die synthetischen Rohstoffe sind jedoch enorme Mengen an Energie nötig. Eine solche Nutzbarmachung ist also in erheblichen Maßen von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und von deren Bereitstellungskosten abhängig, so dass die Frage nach einer Verlagerung dieser energieintensiven Prozessschritte in Regionen außerhalb Deutschlands und Europas mit wesentlichen geringeren Energiekosten (vergleiche Renewables Pull) diskutiert wird. (VCI und VDI, 2023)

Aktuell steht die Versorgung mit synthetischen Rohstoffen in Konkurrenz zu fossilen Ressourcen. Seit mehr als 150 Jahren werden fossile Wertschöpfungsketten technisch optimiert und ihre Effizienz kontinuierlich gesteigert, während die CCU-Technologie noch in den Kinderschuhen steckt. Um diese Herausforderungen synthetischer Rohstoffversorgung überwinden zu können, bedarf es unterstützender regulatorischer Rahmenbedingungen, die den Ausstieg aus fossilen Ressourcen forcieren. Eine solche regulatorische Bedingung ist in Europa mit dem EU-ETS gegeben. Wie in Kapitel 4 angemerkt, wird die Ausgabe von CO₂-Zertifikaten ab 2039 beendet. Das bedeutet, dass die europäische Energiewirtschaft und die Industriesektoren de facto klimaneutral wirtschaften müssen (gültig für die direkten Emissionen: Scope 1). CCU kann hierbei, wie in Abb. 3 gezeigt – unter gewissen Voraussetzungen – die Emissionsminderung unterstützen.

Um zu einer Einschätzung der Marktentwicklung der CCU-Technologie zu gelangen, müssen die volkswirtschaftlichen Perspektiven gegen die betriebswirtschaftlichen Aspekte abgewogen werden. Für die Industrie bestehen grundsätzlich verschiedene technische Möglichkeiten, um der politischen Forderung nach Emissionsminderung in Europa nachzukommen:

- Elektrifizierung von Industrieprozessen auf Basis erneuerbarer Energien
- Verwendung alternativer Energie und Rohstoffe (biogen und synthetisch; CCU)
- Abscheidung und Speicherung von CO₂ (CCS)

Auf Grundlage derzeit vorliegender Abschätzungen (Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE, 2024) ist die Anwendung von CCS aus Sicht der Industrie mit Abstand die günstigste und wahrscheinlichste Lösung, selbst vor dem Hintergrund der noch nicht vorhandenen Infrastruktur für Transport und Speicherung des CO₂. Beispielsweise wird die Elektrifizierung von Prozessen in der Petrochemie – dem größten Emittenten innerhalb der Chemieindustrie – im Vergleich zu CCS-Lösungen mit mindestens den doppelten Kosten beziffert; zudem befindet sich die Technologie noch in der Phase der Pilotierung/Demonstration und ist großtechnisch noch nicht verfügbar. Die Verwendung nachhaltiger alternativer Rohstoffe beträgt noch einmal ein Vielfaches dessen (VCI, 2019). Neben den Abschätzungen der Kosten, die es zu validieren gilt, bedarf es jedoch einer umfassenden prospektiven ganzheitlichen Bewertung der verschiedenen Alternativen, um systematisch ihre Vor- und Nachteile aufzuzeigen.

Neben dem Primärenergiebedarf und dem Ressourcenbedarf sollten dabei unter anderem die zeitliche Verfügbarkeit von Infrastrukturen (siehe Kapitel 5.1), die zeitliche Verfügbarkeit und die absehbare Knappheit von CO₂-Speichern (siehe Kapitel 5.2), die Akzeptanz von CCS (siehe Kapitel 5.4), der alternative Bezug von grünen Rohstoffen aus dem Ausland, die Konkurrenz verschiedener Sektoren hinsichtlich erneuerbarer Energien und Wasserstoff sowie Risiken und Pfadabhängigkeiten evaluiert werden.

Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive dürfte die europäische Industrie eine solche CCS-Lösung zur Minderung der THG-Emissionen präferieren. Um Lock-In-Effekte fossiler Produktionsketten für zukünftige Szenarien zu verhindern, bedarf es weiterer politischer Rahmenbedingungen. Dazu gehören im Wesentlichen eine Maximierung der Kreislaufwirtschaft, die Definition und Ermöglichung „Grüner Märkte“ sowie klare Kriterien für die Verwendung nachhaltiger Rohstoffe. Als ein positives Beispiel aus der jüngsten Vergangenheit für die Verwendung nachhaltiger Rohstoffe kann die Quotierung synthetischer Treibstoffe für den Flugsektor (Synthetic Aviation Fuel, SAF) angesehen werden. Die Ankündigung von SAF-Quoten hat den Bau von Syntheseproduktionen angestoßen, trotz der erheblichen Kostennachteile gegenüber fossilem Kerosin.

Die bisher fehlende Synchronisation der industriellen Transformation (auf Basis des EU-ETS) und der Transformation der Produktmärkte in Europa erfordert eine Brückenlösung. Die derzeitigen Marktbeobachtungen seitens Expert*innen deuten darauf hin, dass klimaneutrale Produkte bei erhöhten Produktionskosten - bis auf wenige Nischenmärkte - keine Akzeptanz bei den Verbraucher*innen finden⁷. Das bedeutet, dass Lösungen zur Emissionsminderung so kostengünstig wie möglich gestaltet werden müssen. Daneben ist aus volkswirtschaftlicher Perspektive zu bewerten, wie im Fall (zeitlich) limitierter Speicherpotenziale der Einsatz von CCS in den einzelnen Industriesektoren zu priorisieren ist. Als ein notwendiges Kriterium für das Mandat der Einspeicherung kann gesehen werden, dass nach Ablauf einer Überbrückungsphase in der Transformation die Möglichkeit zum Erzielen von Negativemissionen gegeben sein muss. Für die Petrochemie könnte das bedeuten, dass mit einem Voranschreiten der Transformation der Produktmärkte und einem dementsprechenden Hochlauf nachhaltiger, nicht-fossiler Rohstoffe die als Brückenlösung installierte CCS-Infrastruktur für zukünftig dringend erforderliche negative Emissionen weitergenutzt wird.

Handlungsempfehlungen:

Energiebedarf der Nutzbarmachung von CO₂ berücksichtigen: Die Nutzung von CO₂ ist mit einem hohen Energieaufwand verbunden, insbesondere mit einem direkten oder indirekten Strombedarf. Aufgrund der in Deutschland begrenzten Potentiale erneuerbarer Energien erscheint es folgerichtig, einen erheblichen Teil der für die industrielle Produktion in Deutschland notwendigen synthetischen Rohstoffe aus Regionen außerhalb Deutschlands und Europas zu importieren, in denen die

⁷ Einschätzung basierend auf Experteninterviews für Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (2024).

Energiekosten wesentlich geringer sind. Dem entgegen stehen geopolitische Erwägung und die Verringerung von Abhängigkeitsrisiken.

„Grüne Märkte“ müssen definiert und ermöglicht werden: Um einen Lock-In-Effekt fossiler Produktionsketten zu verhindern, bedarf es unter anderem klarer Kriterien für die Verwendung nachhaltiger Rohstoffe, einer Maximierung der Kreislaufwirtschaft sowie einer Strategieplanung, wie bisher fossil basierte Prozesse zur Erzeugung von Negativemissionen umgebaut werden können.

Ganzheitliche Bewertung des CCS-Prozesses: Der Einsatz von CCS könnte eine Übergangslösung hin zu einer defossilisierten chemischen Industrie sein und zur Sicherung der Zukunftsfähigkeit beitragen– falls CCS im geplanten Umfang zur Verfügung steht. Für die Einsatzentscheidung ist, neben den zu validierenden Kostenabschätzungen, eine umfassende vergleichende ganzheitliche Bewertung der Optionen Elektrifizierung, CCU und CCS erforderlich.

Aufbau eines Monitoringsystems für die stoffliche Kohlenstoffnutzung: Es braucht eine kontinuierliche Betrachtung und Überwachung der Klimawirkung von Kohlenstoffnutzungspfaden. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge von Kohlenstoffherkunft und Verbleib der Produkte nach der Nutzung existiert in diesem Bereich ein hohes Potential für Greenwashing. Um die Klimaschutzwirkung von Kohlenstoffnutzungspfaden sicher zu stellen und fehlende Akzeptanz für Zusatzkosten von Produkteigenschaften bei Kunden zu vermeiden, braucht es in dem Bereich passende Monitoringsysteme.

5.4 Akzeptanz von Carbon Capture and Storage

Wie zuvor beschrieben, wurde CCS als energiepolitische Strategie in Deutschland auch aufgrund fehlender gesellschaftlicher Akzeptanz zunächst nicht weiterverfolgt. Anlässlich der in den letzten Jahren neu aufgekommenen Debatte um CCS, bei der im Gegensatz zu früher keine Kraftwerke, sondern industrielles CCS im Vordergrund steht, führte das Wuppertal Institut in den vergangenen Jahren verschiedene Studien durch, um die Akzeptanz der Gesellschaft und verschiedener Stakeholdergruppen gegenüber CCS zu erforschen.

Im Projekt *Protanz.NRW*⁸ wurde die soziale Akzeptanz von industriellem CCS erforscht (Witte et al., 2023). Eine quantitative Studie, repräsentativ für Alter, Geschlecht und Bildung, untersuchte die Akzeptanz von Bürger*innen in NRW für industrielles CCS. In der Studie gaben 62,6 Prozent der Befragten an, nichts über industrielles CCS zu wissen (siehe Abb. 4). Die Kenntnis der Technologie in der Gesellschaft ist entsprechend gering ausgeprägt. Nach einer Einstiegsfrage erhielten die Befragten kurze, neutral-formulierte Informationen über industrielles CCS. Im Anschluss gaben 52,8 Prozent an, der Technologie gegenüber positiv eingestellt zu sein (siehe grüne Balken in Abb. 5). 12 Prozent lehnten CCS ab und 26 Prozent gaben an, industriellem CCS gegenüber neutral eingestellt zu sein.

Im Projekt *Protanz.NRW* wurde außerdem eine qualitative Studie durchgeführt, die auf 28 Interviews mit Vertreter*innen aus Industrieunternehmen,

⁸ Projektwebsite abrufbar unter: <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/1953>

Industrieverbänden, Gewerkschaften und Umweltschutzorganisationen basiert. Die Interviews machten deutlich, dass die industrienahen Akteur*innen industriellem CCS gegenüber positiv eingestellt waren. Die Einstellungen der Umweltschutzorganisationen gegenüber industriellem CCS waren heterogen. Einige lehnten den Einsatz von industriellem CCS in Deutschland in Gänze ab (BUND et al., 2024a; BUND, 2023). In Teilen war hingegen eine Öffnung gegenüber der Technologie zu erkennen. Aber: Zeigten sich Umweltschutzorganisationen industriellem CCS gegenüber offen, dann nur unter der Prämisse einer strengen Definition unvermeidbarer Emissionen als Grundlage für zulässige Anwendungsbereiche von industriellem CCS – eine Grundlage, die erst noch geschaffen werden müsse. Auch öffentliche Positionierungen der Umweltschutzorganisationen, die im Nachgang des *Protanz.NRW*-Projekts veröffentlicht wurden, zeichnen ein ähnliches Bild. (BDI et al., 2024; NABU et al., 2023)

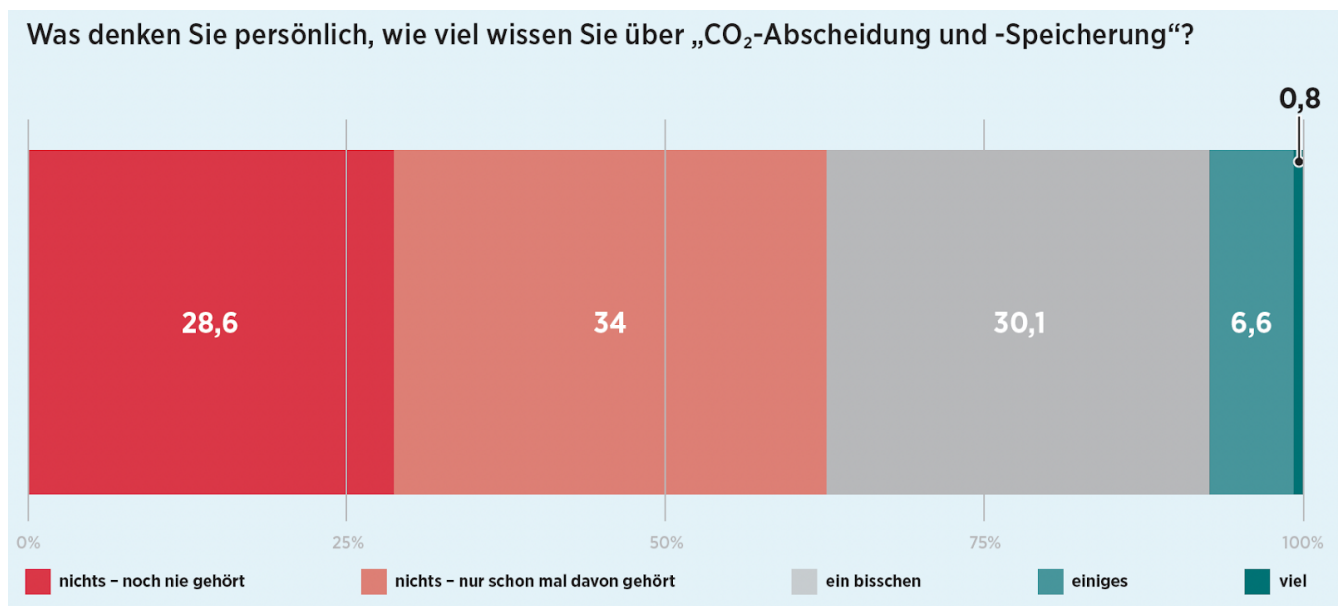


Abb. 4 Wissen über CO₂-Abscheidung und -Speicherung

Quelle: eigene Darstellung

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Definition unvermeidbarer und schwer vermeidbarer Emissionen ein zentraler Aspekt für die Akzeptanz ist. CCS soll gemäß CMS sowohl für unvermeidbare Emissionen als auch für gewisse schwer vermeidbare Emissionen gestattet sein. Bei einer Öffnung in Richtung schwer vermeidbarer Emissionen ist mit Widerständen verschiedener Stakeholder zu rechnen. Insbesondere wird hierfür relevant sein, für welche Anwendungsfälle CCS tatsächlich eingesetzt wird.

In diesem Zuge ist besonders der Einsatz von CCS an Gaskraftwerken als kritisch für die Akzeptanz der CMS zu bewerten: Umweltschutzorganisationen positionierten sich stets ausdrücklich gegen den Einsatz von CCS im fossilen Kraftwerksbereich. Die in den letzten Jahren neu angestoßene gesellschaftliche Debatte zu CCS konzentrierte sich nahezu ausschließlich auf Emissionen aus der Industrie. Auch die Forschung zur Ermittlung der gesellschaftlichen Akzeptanz zu CCS war darauf ausgerichtet. Die nun erlaubte Nutzung an Gaskraftwerken birgt die Gefahr, die bisher

eher neutral bis positiv konnotierte Wahrnehmung von CCS wieder in eine negative Tendenz kippen zu lassen. So positionierten sich jüngst zahlreiche Umweltschutzorganisationen in einer öffentlichen Stellungnahme gemeinschaftlich gegen den Einbezug von Gaskraftwerken. (BUND et al., 2024b)

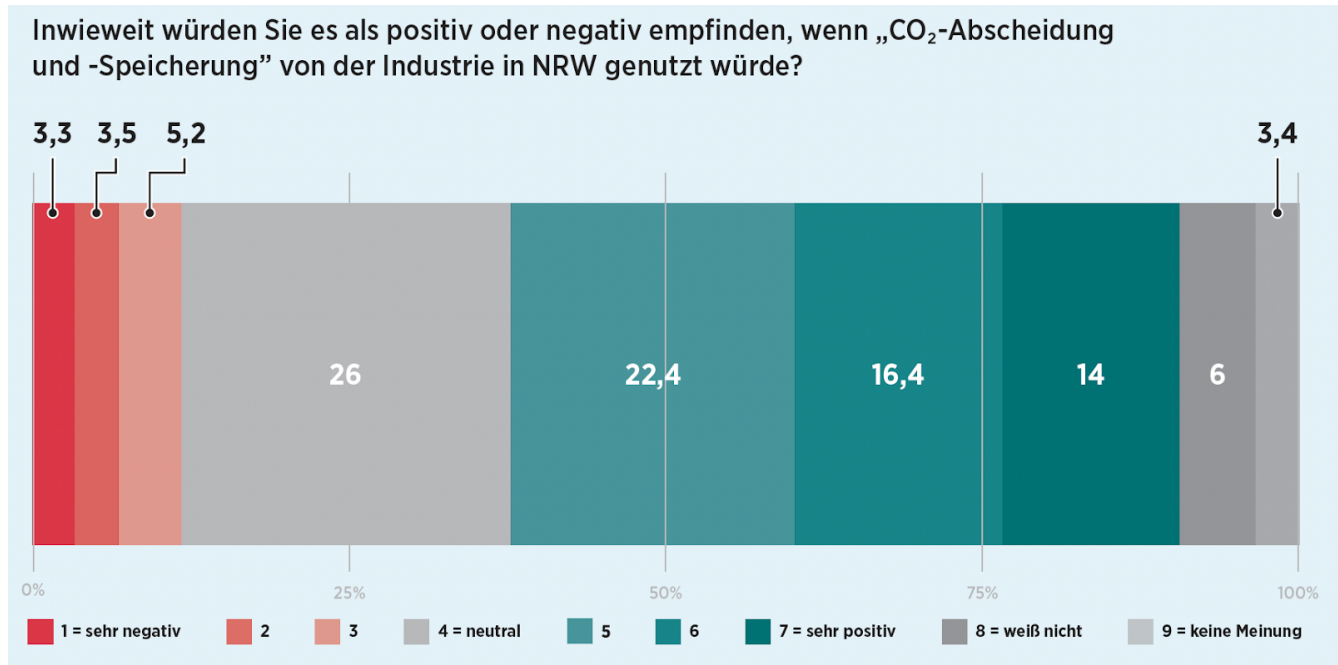


Abb. 5 Akzeptanz der industriellen Nutzung von CCS in NRW

Quelle: eigene Darstellung

Ein weiterer kritischer Aspekt im Hinblick auf die gesellschaftliche Akzeptanz ist die Speicherung von CO₂ unter dem Meer auf deutschem Hoheitsgebiet sowie an Land. Die Speicherung unter dem Meer wird von Umweltschutzorganisationen kritisch betrachtet: Sie äußerten im Projekt *Protanz.NRW*, aber auch in öffentlichen Stellungnahmen, Bedenken hinsichtlich des Schutzes der ohnehin belasteten Meere. Sie fürchten beispielsweise, dass Leckagen zu einer Versauerung der Meere führen könnten, mit negativen Konsequenzen für Flora und Fauna. (Witte et al., 2023; BUND, 2023b; DUH, 2024; BUND, 2024a; WWF, 2024; NABU, 2024)

Die Speicherung von CO₂ an Land weckt ebenfalls gesellschaftliche Ängste. Die quantitative Studie aus *Protanz.NRW* zeigt, dass 18,7 Prozent der befragten Personen gegen den Bau einer CO₂-Speicherstätte in ihrer Nachbarschaft protestieren würden. Diesen Sorgen gilt es rechtzeitig zu begegnen und Aufklärung zu betreiben. Es gilt die Potenziale sicherer Speicherung, Speicherstandards und Monitoring-Verfahren in die Gesellschaft zu kommunizieren, da Ängste ansonsten zur Hürde werden können, insbesondere bei der lokalen Umsetzung. Aufgrund der in Kapitel 5.2 dargelegten möglichen Vorteile der Onshore-Speicherung könnte die Akzeptanz von Onshore-Speicherung höher sein als bei der Offshore-Speicherung, hierzu besteht allerdings Forschungsbedarf. Ähnlich wie bei Windparks könnte die lokale Bevölkerung zudem an den Einnahmen aus der CO₂-Speicherung beteiligt werden, während die Erlöse bei einer Offshore-Speicherung vermutlich ausschließlich den Konzernen zugute käme. Die zusätzlichen Kosten dürften sich im Vergleich zu den erheblich höheren Transport- und Speicherkosten einer Offshore-Variante in Grenzen halten.

Im Projekt *Protanz.NRW* wurde darüber hinaus eine ausgeprägte Risikowahrnehmung für den Transport von CO₂ festgestellt. Auch im Projekt *In4climate.RR*⁹ konnten Bedenken in der Gesellschaft hinsichtlich des CO₂-Transports per Pipeline nachgewiesen werden (Kolde et al. o. J.). Die CMS muss daher im Prozess des Infrastruktur-Rollouts konkret auf die Beteiligung verschiedener Stakeholder sowie der Gesellschaft eingehen. Hierbei muss die Beteiligung über eine kontinuierliche und transparente Kommunikation hinausgehen – denn Kommunikation allein ist noch keine Partizipation. Partizipation sollte zumindest die Möglichkeit zur Mitbestimmung bieten. (Arnstein, 1969; Strasburger und Rieger, 2019) Die Projektergebnisse aus *Protanz.NRW* und *IN4climate.RR* zeigen, dass es insbesondere auf lokaler Ebene einer frühzeitigen Partizipation der relevanten Stakeholder sowie der Gesellschaft bedarf.

Die Förderung von Wissen, Transparenz, Kommunikation und gesellschaftlichem Verständnis für die Technologien sowie die Notwendigkeit des Engagements zum Erreichen der Klimaziele und für eine resiliente Industrie sollten daher im CMS als Erfolgsfaktor für das Carbon Management hervorgehoben werden¹⁰: Konkret sollte die CMS einen aktiven Austausch mit Stakeholdern und relevanten Akteur*innen aus verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen vorsehen.

Handlungsempfehlungen

Weitere Forschungsbedarfe identifizieren und finanzieren: Es gilt zu analysieren und zu verstehen, welche Einstellungen und Vorbehalte es in welchem Kontext seitens verschiedener Stakeholder gegenüber der CMS gibt und auf welche Weise diese zur stabilen Wissens- und Meinungsbildung in der Gesellschaft beitragen. Hierfür sollten zeitnah Forschungsmittel für entsprechende Studien bereitgestellt werden.

Wissens- und Meinungsbildung in der Gesellschaft anstoßen: Für eine robuste Wissens- und Meinungsbildung in der Gesellschaft bedarf es spezifischer institutionalisierter Verantwortlichkeiten, die im Rahmen der CMS festgelegt werden müssen. Denn erst auf Basis einer robusten Meinungsbildung in der Gesellschaft können die mit der Technologie verbundenen Ängste und Sorgen, insbesondere auf lokaler Ebene, hinreichend und langfristig adressiert werden.

Partizipation auf lokaler Ebene organisieren: Die organisierte Zivilgesellschaft (Vereine, Verbände etc.) und Bürger*innen sollten bereits in einem frühen Stadium der Planungsprozesse konkreter Umsetzungsmaßnahmen transparent und umfangreich beteiligt werden, über die rechtlichen Vorgaben hinausgehend. Hierbei gilt es zwischen geeigneten Formaten für organisierte Zivilgesellschaft und Bürger*innen zu unterscheiden. Kommunikation und Partizipation an den Vorhaben sollten nicht allein Aufgabe der Unternehmen sein – hier sind insbesondere Akteur*innen gefordert, denen von der Gesellschaft das notwendige Vertrauen entgegengebracht wird.

⁹ Projektwebsite abrufbar unter: <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/1962>

¹⁰ *Protanz.NRW* zeigt, dass der Einsatz von industriellem CCS zum Erreichen der Klimaziele ein wichtiges Akzeptanzkriterium des Technologiepfades ist (Große-Kreul et al., 2024).

5.5 Schnittstellen mit der Langfriststrategie Negativemissionen

Nach derzeitigem Kenntnisstand wird es auch bei einer Ausschöpfung aller verfügbaren Maßnahmen zur Vermeidung von THG-Emissionen sowie einer weitgehenden Kreislaufführung von Kohlenstoff nicht möglich sein, THG-Neutralität zu erreichen, ohne dass relevante Mengen an CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden (siehe Kapitel 3). Zudem wurde das 2015 in Paris vereinbarte Ziel, die globale Temperaturerhöhung bis zum Ende des Jahrhunderts auf möglichst 1,5 °C zu begrenzen, bereits 2024 erstmals überschritten (Copernicus Climate Change Service, 2025). Um dieses Ziel bis zum Ende des Jahrhunderts dennoch einhalten zu können, wird es nötig sein, nach Erreichen der THG-Neutralität den atmosphärischen CO₂-Gehalt mittels Netto-Negativemissionen¹¹ auf ein verträgliches Maß zu begrenzen (IPCC, 2023).

Die Bundesregierung hat entsprechend im KSG festgelegt, dass nach 2050 Netto-Negativemissionen erreicht werden sollen. Außerdem wurde im Februar 2024 mit der Veröffentlichung eines Eckpunktepapiers der Erarbeitungsprozess für die *Langfriststrategie Negativemissionen* gestartet (BMWK, 2024a). Diese Strategie verfolgt eine Reihe von Zielsetzungen: Einerseits soll ein Verständnis dafür entwickelt werden, welche Bedarfe für Negativemissionen bestehen. Dem wird gegenübergestellt, welche Potenziale für Negativemissionen verfügbar sind und welche Rolle der CO₂-Entnahme für den Klimaschutz in Deutschland insgesamt zukommt. Andererseits sollen konkrete Zielgrößen für technische Senken¹² für die Jahre 2035, 2040 und 2045 definiert werden, sowie ein Ziel für resultierende Netto-Negativemissionen im Jahr 2060. Da viele Technologien zur Realisierung von Negativemissionen jedoch noch nicht im industriellen Maßstab verfügbar sind, wird im LNe-Eckpunktepapier ebenfalls Forschung und Entwicklung als wichtiges Element aufgegriffen. Noch nicht in der LNe berücksichtigt sind allerdings die Negativemissionen, die nach 2060 in erheblich größerem Maßstab nötig sein werden (IPCC, 2023).

Aufgrund ihrer thematischen Verflechtung mit Themen der THG-Bilanzierung, der Emissionsminderung sowie des Naturschutzes weist die LNe eine Reihe von Anknüpfungspunkten zu anderen (geplanten) deutschen und europäischen Strategien auf. Im Folgenden werden insbesondere Schnittstellen und Abgrenzungen der LNe zur CMS herausgestellt. Technologien wie das Abscheiden von CO₂-Emissionen an Punktquellen, die Speicherung in geologischen Formationen und der Transport werden in der CMS adressiert, betreffen aber genauso die Umsetzung der LNe. Auch wenn sie dort erwähnt werden, wird im Folgenden auf mehrere Aspekte hingewiesen, die zu Fehlplanungen führen können, falls sie nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Zeithorizont

Die CMS und die LNe haben unterschiedliche zeitliche Horizonte, die vor allem mit Blick auf die Infrastrukturplanung aktuell noch Fragen offenlassen: Die CMS

¹¹ Netto-Negativemissionen beschreiben die Emissionen, die bilanziell zusätzlich zur Klimaneutralität entzogen und dauerhaft gespeichert werden. Demgegenüber stehen Brutto-Negativemissionen, die eine bilanzielle CO₂-Neutralität gewährleisten. (Block, 2022)

¹² Technische CO₂-Senken sind Methoden und Technologien, die aktiv CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und langfristig speichern, um negative Emissionen zu erzeugen, wie zum Beispiel DACCS.

fokussiert auf das Erreichen der Klimaneutralität bis 2045, der Zeitraum danach findet jedoch keine Berücksichtigung. In der LNe wird sowohl der Ausgleich von Residualemissionen im Zeitraum bis 2045 als auch der Ausbau von Senkenleistungen zum Erreichen von Netto-Negativemissionen bis 2060 betrachtet. Der Teil der Senkenleistung, der mittels technischer Methoden erzielt wird, bringt auch einen Transport- und Speicherbedarf mit sich. Die in der CMS vorgesehene Infrastrukturplanung sollte daher auch den Transport- und Speicherbedarf eines Netto-Negativ-Ziels berücksichtigen, das über den zeitlichen Horizont der CMS hinausgeht. Hier sollten zudem längerfristige Ziele für die Zeit nach 2060 berücksichtigt werden, zumindest in Form von Szenarioanalysen.

Residualemissionen

Eine weitere Wechselwirkung besteht darin, in welchem Maße CCU/S eingesetzt wird, was in erster Linie Gegenstand der CMS ist. Bei Anlagen zur CO₂-Abscheidung an Punktquellen wie Zementwerken oder TAB rechnet man mit Abscheideraten von 90 Prozent (Post-Combustion) bis 95 Prozent (Oxyfuel) (Wuppertal Institut, 2010). Die restlichen Emissionen müssen durch Negativemissionen ausgeglichen werden. Sollte CCS neben unvermeidbaren Emissionen auch für schwer vermeidbare Emissionen ermöglicht werden, könnte dies zu einer längeren Nutzung fossiler Energieträger führen – und damit zu einem erhöhten Bedarf an Negativemissionen. Diese Wechselwirkung zwischen dem Umfang des Einsatzes von CCU/S und der Auswirkung auf den Bedarf an Negativemissionen sollte bei der Abstimmung der Prozesse berücksichtigt werden.

Aktive CO₂-Entnahme durch natürliche Senken

Die Leistung natürlicher Senken sowie der im KSG §3a geltend gemachte „Beitrag des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft“ (LULUCF) mit seinen Ökosystemen sind zum Erreichen der Klimaneutralität unerlässlich. Im Allgemeinen werden unter Senken Prozesse, Aktivitäten oder Mechanismen verstanden, die CO₂ aus der Atmosphäre entnehmen (vgl. Jörß et al., 2024). Das New Climate Institute (Jeffery et al., 2020) definiert natürliche Senken als CO₂-Aufnahme durch Photosynthese in Pflanzen und die anschließende Speicherung in Biomasse. Climate Analytics (2022) merkt zudem in ihrer Definition an, dass natürliche Senken keine Garantie für eine dauerhafte Speicherung bieten.

Das KSG legt für die natürliche Netto-Entnahmeleistung¹³ konkrete Ziele fest: Ökosysteme sollen bis 2030 mindestens 25 Mt, bis 2040 mindestens 35 Mt und im Jahr 2045 mindestens 40 Mt CO₂-Äquivalente binden und so zur THG-Neutralität beitragen. Auch die LNe benennt die CO₂-Entnahme durch natürliche Senken. Hierzu spricht sie als erstes biologische und landbasierte Methoden wie Wälder und Aufforstung, Moore, Bodenmanagement und maritime Ökosysteme an, die laut LNe bisher die einzigen relevanten Senkenleistungen darstellen. Darüber hinaus nennt die LNe

¹³ Unter der Netto-Entnahmeleistung des LULUCF-Sektors ist die Differenz der CO₂-Entnahme und CO₂-Abgabe im gleichen Zeitraum zu verstehen.

weitere konventionelle¹⁴, aber auch neuartige Entnahme-Methoden mit bisher weniger großer Entnahmeleistung wie

- Erzeugung von Biomasse: Kohlenstoff wird in Form von Biomasse aus dem Ökosystem entnommen, statt direkt aus der Atmosphäre
- Marine Biomasse: Erhaltung und Renaturierung von Seegraswiesen, Algenwäldern und Salzwiesen zur Stärkung der CO₂-Speicherkapazitäten
- Stoffliche Nutzung von Biomasse: Nutzung kohlenstoffhaltiger Materialien wie Holz in langlebigen Produkten wie Holzbau oder Dämmmaterialien, um den Kohlenstoff langfristig zu binden
- Biokohle: Langfristige Bindung des Kohlenstoffs durch pyrolytische Verkohlung
- Beschleunigte Gesteinswitterung: Technisch beschleunigte Verwitterung von zementhaltigen Produkten oder silikatischem Gestein zur Bindung von CO₂ in mineralischer Substanz (Carbonat)

Die LNe bekräftigt, die konventionellen Entnahme-Methoden dauerhaft erhalten und systematisch stärken zu wollen. Sie weist jedoch darauf hin, dass durch den Klimawandel zunehmende Unsicherheiten bezüglich der natürlichen Senken bestehen. Die jüngste Bundeswaldinventur bestätigt diese Annahme: Durch die Trockenheit in den Jahren 2018 bis 2021 und weitere Schadensfaktoren, wie dem Borkenkäfer, ist der deutsche Wald erheblich geschwächt. In den letzten Jahren ist er aufgrund abgestorbener Monokulturen zunehmend selbst zu einer Kohlenstoffquelle geworden: Der in Wäldern gebundene Kohlenstoffvorrat hat sich seit 2017 um 41,5 Mt verringert (BMEL, 2024). Vor diesem Hintergrund erscheinen die in zahlreichen Klimaneutralitätsszenarien zugrunde gelegten Senkenleistungen des Waldes sowie des LULUCF-Sektors im Allgemeinen sehr optimistisch. Der wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik fordert daher sogar eine Abkehr von den gesteckten Zielen (WBW, 2024). Agora Think Tanks (2024) berücksichtigt dies bereits in der Langfriststudie für ein klimaneutrales Deutschland, indem der LULUCF-Sektor lediglich 4 Mt CO₂ (statt der möglichen 35 Mt CO₂) zum Erreichen der Klimaneutralität bereitstellen muss. Um dem Worst-Case-Szenario eines emittierenden LULUCF-Sektors in Deutschland zu entgehen, ist die Erhaltung, Renaturierung und Ausweitung von Wäldern, die laut einer aktuellen Studie sogar große Mengen Methan aufnehmen (Gauci et al., 2024), Mooren und weiteren Ökosystemen essentiell.

Um zukünftig eine positive Netto-Entnahmeleistung des LULUCF-Sektors zu gewährleisten, stellt die LNe heraus, dass das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) des BMUV und die Nationale Biomassestrategie (NABIS) von BMEL, BMWK und BMUV entscheidend seien. Während sich das ANK stark für die Renaturierung, den Erhalt und die Ausweitung von Ökosystemen einsetzt, erwähnt das NABIS-Eckpunkt Papier keine direkten Maßnahmen zu natürlichen Senken. Dies ist jedoch unbedingt zu empfehlen. Werden der Erhalt, die Renaturierung und die Ausweitung der land- und ozeanbasierten Ökosysteme – und damit eine Stabilisierung und Steigerung ihrer Netto-Entnahmeleistung – nicht entsprechend umgesetzt,

¹⁴ Die oben genannten natürlichen Senken werden als „konventionelle Entnahme“ bezeichnet, wohingegen Technologien zur Schaffung von Kohlenstoffsinken wie BECCS, DACCS und die beschleunigte Gesteinswitterung zur „neuartigen Entnahme“ zählen. (Smith et al., 2023)

bedeutet dies einen erhöhten Bedarf an technischen Senken zum Erreichen der THG-Neutralität. Hiervon ist dann wiederum der Infrastrukturbedarf abhängig.

Governance – was sind negative Emissionen?

Im Rahmen der LNe sollen jene kohlenstoffhaltigen Ströme betrachtet werden, die zu Negativemissionen führen, während die CMS sich vorwiegend mit dem Verbleib anfallender fossiler CO₂-Mengen befasst. Für die Abgrenzung, welche Prozesse und Kohlenstoffströme in den Wirkungsbereich der LNe fallen und welche von der CMS adressiert werden, ist eine über beide Strategien hinweg einheitliche Definition von Negativemissionen nötig. Hier gilt es insbesondere die Frage zu klären, welche Nutzungsoptionen von abgeschiedenem CO₂ tatsächlich als dauerhafte Speicherung anerkannt werden. Bei dieser Regelung sollte bedacht werden, dass Anreize für die Kreislaufführung von Kohlenstoff aus Klimaschutzperspektive sinnvoll sind, wenn dadurch zusätzliche fossile Emissionen vermieden werden. Bei der Speicherung in kurzlebigen Produkten, wie Kunststoffen oder synthetischen Treibstoffen, kann es sich jedoch nicht um Netto-Negativemissionen handeln.

Marktformen für Negativemissionen

Eine zentrale Unsicherheit besteht aktuell in der Ausgestaltung eines Marktrahmens, unter dem sich die Methoden und Technologien für Negativemissionen wirtschaftlich betreiben lassen. Fossile Emissionen unterliegen in der EU teils bereits seit 2005 dem EU-ETS, wodurch eine Vermeidung dieser Emissionen wirtschaftlich angereizt wird. Würden Technologien für Negativemissionen in diesen Handel integriert, könnten langfristig neue Zertifikate generiert werden. Netto-Negativemissionen könnten in diesem Fall durch Aufschläge auf Zertifikatspreise oder den staatlichen Ankauf von Zertifikaten finanziert werden. In der Übergangsphase könnte dieses Modell jedoch dazu führen, dass Anstrengungen zur CO₂-Vermeidung durch Negativemissionen untergraben werden. In jedem Fall ist es entscheidend, frühzeitig Anreize für den Hochlauf von Negativemissionen zu setzen, während die CO₂-Vermeidung prioritär ist. In diesem Punkt sollten CMS und LNe eng miteinander verzahnt werden. (CEPA, 2024; Bodirsky et al. 2024)

Handlungsempfehlungen

Unsicherheit in der Rolle der natürlichen Senken berücksichtigen: Im Fall einer verringerten Leistung der natürlichen Senken würden technischen Senken eine größere Rolle zukommen als bislang angenommen. Der damit einhergehende Mehrbedarf an Energie sowie Transport- und Speicherinfrastruktur sollte bei deren Planung von vornherein mitgedacht werden. Gleichzeitig sollten der Erhalt, die Renaturierung und die Ausweitung der land- und ozeanbasierten Ökosysteme vorangetrieben werden, um ihre Netto-Senkenleistung zu stabilisieren oder sogar zu erhöhen.

Einheitliche Definition negativer Emissionen: Als Basis eines einheitlichen Verständnisses negativer Emissionen sollten diese in CMS und LNe gleichermaßen definiert werden.

Weitere relevante Forschung initiieren: Die Skalierbarkeit technischer Senken zur Erzeugung negativer Emissionen bedarf der Unterstützung durch weitere Forschung.

6 Resümee und Ausblick

In diesem Zukunftsimpuls diskutieren die Autor*innen die Entwicklung der CMS auf Bundesebene, die auf den Themenbereich CCU/S fokussiert. Der Strategieprozess ist derzeit noch nicht abgeschlossen, aber die politischen Bemühungen zeigen, dass die Notwendigkeit einer strategischen Planung erkannt wurde. Verschiedene Klimaneutralitätsszenarien zeigen, dass CCU/S eine zentrale Rolle beim Erreichen der deutschen Klimaneutralität zukommt. Ab 2045 müssen danach mindestens 45 Mt CO₂ pro Jahr durch CCS und CDR abgeschieden und dauerhaft gespeichert werden. Der Hochlauf beginnt jedoch bereits in 2030 und nimmt laufend zu. Insofern ist ein strategischer Rahmen zur kurzfristigen Etablierung von Strukturen für Abtrennung, Transport, Speicherung und Nutzung von CO₂ notwendig. Die CMS hat damit die Chance, zu einem wirkungsvollen Gestaltungsinstrument der deutschen Industrietransformation zu werden. Hierfür ist es notwendig, zügig richtungsweisende Entscheidungen zu treffen und eine breite gesellschaftliche Beteiligung zu ermöglichen.

Das Wuppertal Institut begrüßt daher die Planung der CMS und empfiehlt,

- die Anwendung von CCS auf unvermeidbare Emissionen aus Zement- und Kalkwerken sowie TAB-Anlagen zu fokussieren;
- CCS für schwer vermeidbare Emissionen nur dann zuzulassen, wenn alle denkbaren Alternativen durch eine ganzheitliche (multidimensionale) Bewertung auf deren Vor- und Nachteile hin evaluiert wurden. Neben den Kosten sollten dabei insbesondere der Primärenergiebedarf, der Ressourcenbedarf, die zeitliche Verfügbarkeit der einzelnen Elemente der CCS-Kette, die Knappheit von CO₂-Speichern, die Akzeptanz von CCS, der alternative Bezug von grünen Rohstoffen aus dem Ausland, die Konkurrenz verschiedener Sektoren hinsichtlich erneuerbarer Energien und Wasserstoff sowie Risiken und Pfadabhängigkeiten evaluiert werden;
- bei Anwendung von CCU zusätzlich auch die Herkunft des CO₂, die Dauer der Kohlenstoffbindung sowie die Möglichkeit der Kreislaufführung in die Bewertung einzubeziehen.

Der zeitlichen Dimension kommt beim Etablieren von CCU/S eine zentrale Bedeutung zu, da im EU-ETS bereits ab 2040 keine THG-Zertifikate mehr ausgegeben werden und die Industrie somit ab dem Zeitpunkt de facto klimaneutral sein muss. Es besteht daher im nächsten Jahrzehnt ein hoher Handlungsdruck zum Etablieren der kompletten CCS-Kette. Während die einzelnen Abscheideverfahren, der CO₂-Transport und die Speicherung technisch erprobt sind, ist die gesamte Prozesskette bisher nur in wenigen Projekten demonstriert worden. In den meisten Fällen wird das CO₂ dabei für Enhanced Oil Recovery (EOR) genutzt. Somit stimmen die Erwartungshaltungen nicht mit der realen Nutzbarkeit von CCU/S überein.

Für die Realisierung eines schnellen und effizienten Hochlaufs ist entscheidend, dass Abscheidung, Transport und Speicherung des CO₂ in aufeinander abgestimmten Zeithorizonten umgesetzt werden. Abb. 6 zeigt Zeitstrahlen für die frühestmögliche Umsetzung der einzelnen Elemente in Deutschland. Die zeitlichen Annahmen basieren auf Unternehmensangaben, die von Overberg (2025) aufbereitet und ausgewertet wurden. Dazu wurden aktuelle Pionierprojekte der Industrie zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung analysiert und Angaben zur Transportinfrastrukturplanung

von OGE (o. J.) und VDZ (2024) übernommen. Die Entwicklung der CO₂-Abscheidung, des CO₂-Transports und der CO₂-Speicherung lassen sich in einzelne Prozessschritte aufteilen, deren Gelingen mit verschiedenen Unsicherheiten behaftet sind.

Es zeigt sich, dass gerade bei der *CO₂-Speicherung* hohe Unsicherheiten bestehen: Während der Start erster europäischer Speicher für industrielles CO₂ bevorsteht, werden in Deutschland aufgrund der ungeklärten Rechtssicherheit und der langen Vorlaufzeiten Speicherkapazitäten frühestens in 11 Jahren nach Start der Vorerkundungen verfügbar sein (siehe Kapitel 5.2). In Europa gibt es heute bereits aktive Speicher (Sleipner, Snøhvit) sowie einige nahezu betriebsbereite Speicher, die fertiggestellt sind und nur noch auf die behördliche Genehmigung und den Beginn der CO₂-Anlieferungen warten (Greensand, Northern Lights). Die Erfahrungen mit in Betrieb befindlichen CO₂-Speichern zeigen jedoch, dass die Startphase der Speicherung besonders kritisch ist: Erst hier zeigt sich, wie gut das Monitoring im Vorfeld funktioniert hat. Während die Inbetriebnahme der ersten europäischen Speicher zur Sammlung von Erfahrungen als weitgehend gesichert gilt, wurde die Inbetriebnahme weiterer Speicher als kritischer Punkt identifiziert. Zudem sind aufgrund von Druckschwankungen in den Speichern zum Teil Änderungen (d. h. vor allem Reduktionen) der Injektionsmengen erforderlich, weshalb auch die großtechnische Speicherexpansion ab 2030 als kritisch identifiziert wurde.

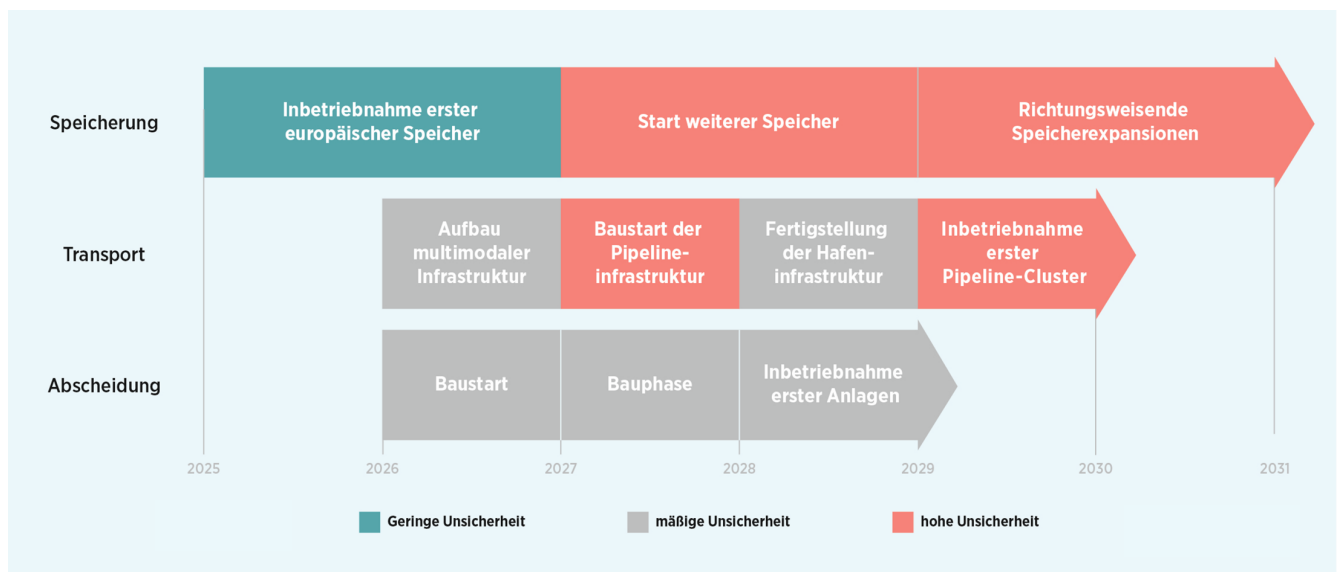


Abb. 6 Darstellung der zeitlichen Entwicklung sowie der Unsicherheiten der CCS-Kette

Quelle: eigene Darstellung, basierend auf Overberg (2025)

Beim *CO₂-Transport* besteht eine hohe Unsicherheit hinsichtlich des Baubeginns des Pipelinesetzes sowie der Inbetriebnahme der ersten Pipeline-Cluster. Das liegt an der zeitlichen Unsicherheit bezüglich der rechtlichen Rahmenbedingungen, der langen Vorlaufzeit durch Genehmigungsverfahren sowie noch ungeklärter Finanzierungsfragen¹⁵. Hinzu kommt die hohe Komplexität bei der Errichtung und dem

¹⁵ Das Kapital für den Bau der Pipelineinfrastruktur muss jetzt aufgebracht werden, die Infrastruktur wird aber erst sukzessive ausgelastet werden und daher (zumindest anfänglich) nur langsam Einnahmen generieren.

Betrieb der multi-modalen Hubs. Der Umgang mit CO₂ unterschiedlicher thermodynamischer Phasen und Reinheiten muss an den Verladepunkten sicher und ohne große Verluste gewährleistet werden, hierzu liegen wenige Erfahrungen vor.

Die Technologie zur *CO₂-Abscheidung* an den Punktquellen wird sowohl von der Politik als auch von den Projektbetreibern als bis 2030 realisierbar eingeschätzt. Als volatilstes Glied bei der CO₂-Abscheidung wurde die Bauphase identifiziert: Die zentralen Unsicherheiten dieses Schritts sind insbesondere die Verfügbarkeit von Fachkräften in allen essentiellen Sektoren (Planung, Bau, Zulieferern etc.) sowie etwaige unvorhergesehene Kostensteigerungen. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise die TAB Hafslund Oslo von Celsio zu nennen, deren Bau aufgrund steigender Kosten pausiert wurde. Nach Angaben des Unternehmens ergab eine aktualisierte Schätzung, dass der Investitionsrahmen nicht einzuhalten sei, unter anderem aufgrund der Inflation, eines schwachen Währungskurses der norwegischen Krone sowie geopolitischer Instabilität (BusinessPortal Norwegen, 2023).

Insgesamt zeigt sich, dass sowohl die Finalisierung der CMS als auch die Verabschiedung des KSpTG als Teil der rechtlichen Rahmenbedingungen nun schnellstmöglich erfolgen müssen, um die Herausforderungen entlang der CCS-Kette zu adressieren und damit Planungssicherheit für die Unternehmen zu schaffen. Dabei gilt es, die Speichererschließung, den Infrastrukturaufbau sowie die Planung und den Bau von CO₂-Abscheidungsanlagen schnellstmöglich voranzutreiben und Umsetzungshindernisse bestmöglich zu antizipieren. Dies erfordert auch eine frühzeitige und ergebnisoffene Beteiligung der Gesellschaft und eine Abstimmung mit europäischen und anderen deutschen Strategien, insbesondere mit der LNe.

7 Literaturverzeichnis

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung waren alle Internetquellen in der hier zitierten Form abrufbar.

- Agora Think Tanks (2024). Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung. Studie erstellt durch Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, Universität Kassel. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_344_Klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf
- Arnold, K., Scholz, A., Taubitz, A., Witts, H. (2022). Unvermeidbare Emissionen aus der Abfallbehandlung – Optionen auf dem Weg zur Klimaneutralität. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 72. Heft 6.
- Arnstein, S. R. (1969). A Ladder Of Citizen Participation. *Journal of the American Institute of Planners*, 35(4), 216–224. <https://doi.org/10.1080/01944366908977225>
- Bauhus J., Dieter M., Meyer P., Knoke T., Endres E., Farwig N. et al. (2024). Einordnung wichtiger Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2022 in Bezug auf walddpolitische Handlungsfelder. Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik (Hrsg.), Dezember 2024. Berlin, 25 S.
- BDI, DGB, NABU, WWF (2024). Industrietransformation aus einem Guss – Gemeinsames Thesenpapier zur Einordnung von Carbon Management als Teil einer umfassenden Klimastrategie. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/Thesenpapier-Industrietransformation-aus-einem-Guss.pdf>
- BGR (2005). Speichermöglichkeiten in Nordrhein-Westfalen. Kurzstudie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und des Geologischen Dienstes NRW im Auftrag des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal, Hannover.
- BGR (2011). Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Projekte/CO2-Speicherung+Nutzungspotenziale/Abgeschlossen/speicherkataster.html
- Block, S. (2022). Auslegung, Analyse und Bewertung von Direct Air Capture (DAC)-Anlagen zur Nutzung für Power-to-X-Prozesse und zur Erzielung „negativer Emissionen“ in Deutschland. Wuppertaler Studienarbeiten zur nachhaltigen Entwicklung Nr. 25, 03/2022, Wuppertal.
- Block, S., Viebahn, P., Jungbluth, C. (2024). Analysing direct air capture for enabling negative emissions in Germany: An assessment of the resource requirements and costs of a potential rollout in 2045. *Frontiers in Climate*, 6. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1353939>
- BMEL (2024). Bundeswaldinventur: Deutscher Wald durch Klimakrise erheblich geschädigt. 08.10.2024. Pressemitteilung. Nr. 108/2024. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/108-bundeswaldinventur.html>
- BMWK (2024a). Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie. Berlin. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-cms.pdf>
- BMWK (2024b). Auftaktveranstaltung Langfriststrategie Negativemissionen (LNe). Berlin. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/Negativemissionen-Dokumente/240528-l-ne-auftakt-prasentationen.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bodirsky, B. L., Gawel, E., Hartmann, J., Havermann, F., Kuse, K., May, M., et al. (2024). Die Bedeutung einer gezielten CO₂-Entnahme für die Zukunft des Europäischen Emissionshandelssystems (ETS). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14411048>
- BUND, Greenpeace, DUH, Bürger Energie Altmark, Bürgerinitiative gegen CO₂ Endlager (2023a). Carbon Management Strategie: Wirtschaftsministerium will gesellschaftliche

- Debatte über Wege zur Klimaneutralität unterdrücken. <https://www.bund.net/service/presse/pressemitteilungen/detail/news/carbon-management-strategie-wirtschaftsministerium-will-gesellschaftliche-debatte-ueber-wege-zur-klimaneutralitaet-unterdruecken/>
- BUND (2023b). CCS: Falsche Weichenstellung verhindern. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/bilder/klimawandel/falsche-weichenstellung-vermeiden-standpunkt-ccs.pdf
- BUND, Greenpeace, DUH, Bürgerinitiative gegen CO₂-Endlager (2024a). CCS: Breites Umweltbündnis warnt vor gefährlichem Irrweg. <https://www.bund.net/service/presse/pressemitteilungen/detail/news/ccs-breites-umweltbuendnis-warnt-vor-gefaehrlichem-irrweg>
- BUND, DUH, Deutscher Naturschutzring, Germanwatch, Greenpeace, NABU, Umweltinstitut München, WWF (2024b). Umweltverbände: Einigung zur Kraftwerksstrategie öffnet Büchse der Pandora durch CCS an Gaskraftwerken. <https://www.germanwatch.org/de/90266>
- BusinessPortal Norwegen (2023). Kosten für CCS-Projekt bei Klemetsrud wachsen Betreiber über den Kopf – Celsio legt Vorhaben auf Eis. <https://businessportal-norwegen.com/2023/04/26/kosten-fuer-ccs-projekt-bei-klemetsrud-wachsen-betreiber-ueber-den-kopf-celsio-legt-vorhaben-auf-eis/>
- BVK (2023). Klimaziele erreichen – das geht in der Kalkindustrie nur mit CCU und CCS. Pressemitteilung. Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie. <https://www.kalk.de/wissensportal/pressemitteilungen/2023/klimaziele-erreichen-das-geht-in-der-kalkindustrie-nur-mit-ccu-und-ccs>
- BW (2024). Positionspapier der Landesregierung Baden-Württemberg zu Carbon Management. https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/dateien/PDF/Anlagen_PMs_2024/241015_Positionspapier-Carbon-Management-BW-2024.pdf
- Cames, M., Krob, F., Hermann, H., Kurth, S., von Vittorelli, L. (2024). Securing the Underground. Managing the Risks of Carbon Storage through Effective Policy Design. Study on behalf of the NABU Deutschland e. V. Berlin, Darmstadt.
- CATF (2024). Tracking CO₂ storage project capacity in Europe. Clean Air Task Force. https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2024/01/18105138/CATF_TrackingCO2ProjectEurope_Brief.pdf
- CEPA (2024). Emissions Trading with Clean-up Certificates: Deterring Mitigation or Increasing Ambition? Center for Economic Policy Analysis. Potsdam. <https://doi.org/10.25932/publishup-64136>
- Climate Analytics (2022). 1.5°C National Pathways Explorer. <https://1p5ndc-pathways.climateanalytics.org/countries/european-union/ambition-gap/>
- Copernicus Climate Change Service (2025). Copernicus: 2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>
- Deutscher Bundestag (2018). Evaluierungsbericht der Bundesregierung über die Anwendung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes sowie die Erfahrungen zur CCS-Technologie. Drucksache 19/6891.
- DUH (2024). Deep-Trouble: Risiken von Offshore-Carbon Capture and Storage – Deutsche Kurzfassung. Deutsche Umwelthilfe. https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Naturschutz/20240130_Deep_Trouble_Kurzfassung_DE_final.pdf
- Europäische Kommission (2024a). Impact Assessment Report, Part 1. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52024SC0063>
- Europäische Kommission (2024b). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Unsere Zukunft sichern. Europas Klimaziel für 2040 und Weg zur Klimaneutralität bis 2050 für eine nachhaltige, gerechte und wohlhabende

- Gesellschaft. COM(2024)63. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52024DC0063>
- Europäische Kommission (2024c). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Auf dem Weg zu einem ehrgeizigen industriellen CO₂-Management in der EU. COM(2024)62. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A62%3AFIN>
- Europäische Union (2023). Delegierte Verordnung (EU) 2024/1041 der Kommission vom 28. November 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2022/869 des europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Unionsliste der Vorhaben von gemeinsamem Interesse und Vorhaben von gegenseitigem Interesse. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1041>
- Europäische Union (2024). Verordnung (EU) 2024/1735 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für Maßnahmen zur Stärkung des europäischen Ökosystems der Fertigung von Netto-Null-Technologien und zur Änderung der Verordnung (EU). 2018/1724. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401735
- FfE (2024). Beitragsreihe Carbon Management: Wie kann CO₂ transportiert werden? Forschungsstelle für Energiewirtschaft. <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/beitragsreihe-carbon-management-ccs-wie-kann-CO2-transportiert-werden/>
- Fuss, S., Candell, G. C., Glen, P. P., Tavoni, M., Andrew, R. M., Yamagata, Y., et al. (2014). Betting on negative emissions. *Nature Clim Change* 4, 850–853 (2014). <https://doi.org/10.1038/nclimate2392>
- Fraunhofer-Institut ISI, Consentec, ifeu, TU Berlin (2022). Treibhausgasneutrale Szenarien 2045 – Industriesektor. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAs-sets/docs/LFSIII_Webinar16.11.2022_Industrie_final.pdf
- Gauci, V., Pangala, S.R., Shenkin, A. et al. (2024). Global atmospheric methane uptake by upland tree woody surfaces. *Nature* 631, 796–800. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07592-w>
- Große-Kreul, F., Altstadt, L., Reichmann, A., Weber, N., Witte, K. (2024). Understanding public acceptance amidst controversy and ignorance: The case of industrial Carbon Capture and Storage in Germany, *Energy Research & Social Science*, Volume 118, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103838>
- Hauber, G. (2023). Norway's Sleipner and Snøhvit CCS: Industry models or cautionary tales? Lakewood: Institute for Energy Economics & Financial Analysis. <https://ieefa.org/resources/norways-sleipner-and-snohvit-ccs-industry-models-or-cautionary-theses>
- Heidelberg Materials (o. J.). GeZero: Auf dem Weg zum ersten vollständig dekarbonisierten Zementwerk Deutschlands. <https://www.heidelbergmaterials.de/de/zement/zementwerke/geseke/gezero-projekt>
- Höller, S., Viebahn, P. (2010). Kritische Abschätzung der CO₂-Lagerkapazitäten in Deutschland: ein Beitrag für den öffentlichen Diskurs um CCS als Klimaschutzoption. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis (TATuP)* 19(2)53–58.
- bIPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). Geneva, 184.
- Jeffery, L., Höhne, N., Moisisio, M., Day, T., Lawless, B. (2020). Options for supporting Carbon Dioxide Removal: Discussion paper. New Climate Institute. https://newclimate.org/sites/default/files/2020/07/Options-for-supporting-Carbon-Dioxide-Removal_July_2020.pdf
- Jörß, W., Gores, S., Siemons, A., Liste, V., Lübbers, S., Lengning, S. (2024). Herausforderungen zur separaten Ausweisung von Klimazielen für natürliche und technische Senken. *Öko-Institut Working Paper 1/2024*. Berlin: Öko-Institut, Prognos AG.
- Kolde, L.; Weber, N.; Zeiss, C.; Voigt, S.; Pattberg, L. (o. J.): Frühzeitige Ermittlung des Bedarfs an Partizipation und Empowerment im Rahmen industrieller

Transformationsprojekte: Entwicklung eines systematischen Vorgehens. Unveröffentlichtes Manuskript.

- Luderer, G., Kost, C., & Sörgel, D. (2021). Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam. Potsdam Institute for Climate Impact Research. 359.
- Müller, C., Reinhold, K. (Hrsg.) (2011). Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland – Speicher-Kataster Deutschland. – Schriftenr. dt. Ges. Geowiss., Heft 74; Hannover. ISSN 1860-1782.
- NABU (2024). Stellungnahme: Carbon Management-Strategie und KSPTG. Naturschutzbund Deutschland. <https://www.nabu.de/imperia/md/content/240330-nabu-stellungnahme-cms-ksptg.pdf>
- OECD, IEA (2009). Technology Roadmap – Carbon Capture and Storage 2009, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-carbon-capture-and-storage-2009>
- OGE (o. J.). CO₂-Transportnetz. Open Grid Europe. <https://oge.net/de/CO2/CO2-netz>
- Overberg, M. (2025). Realisierung von Carbon Capture and Storage (CCS) im Rahmen der Carbon Management Strategie in Deutschland – Entwicklung und Anwendung eines multikriteriellen Bewertungsrasters. Masterarbeit an der Universität Osnabrück und am Wuppertal Institut, Entwurf.
- Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G. F., Gidden, M. J., Lamb, W. F., Powis, C. et al. (2023). The State of Carbon Dioxide Removal – 1st Edition. <https://www.stateofcdr.org>
- SRU (2024). CCS in Deutschland rechtlich auf unvermeidbare Restemissionen begrenzen: Stellungnahme zur KSpG-Novelle. Impulspapier des Sachverständigenrats für Umweltfragen vom Oktober 2024. Berlin.
- Stiftung Arbeit und Umwelt der IGBCE (Hrsg.) (2024). Stabilität durch Transformation. Wirtschaftliche und politische Strategien für widerstandsfähige Wertschöpfungsketten in der Kunststoffindustrie. Berlin. https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/2024/1204_StAuU_Brosch_Kunststoffe.pdf
- Straßburger, G., Rieger, J. (Hrsg.) (2019). Partizipation kompakt: Für Studium, Lehre und Praxis sozialer Berufe (2., überarbeitete Auflage). Beltz Juventa.
- TotalEnergies (o. J.). Northern Lights: The first major carbon capture and storage project. <https://totalenergies.com/company/projects/carbon-capture-and-storage/northern-lights-first-major-carbon-capture-and-storage>
- UBA (2009). CCS – Rahmenbedingungen des Umweltschutzes für eine sich entwickelnde Technik. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3804.pdf>
- UBA (2023). Carbon Capture and Storage. Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien. Position des Umweltbundesamts. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/230919_uba_pos_ccs_bf.pdf
- VCI (2019). Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland: Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den Verband der Chemischen Industrie. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-road-map-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>
- VCI (2024). Nutzung von CCUS-Technologien braucht sinnvolle Förderung und Hilfe beim Aufbau eines CO₂-Netzes. Position. Verband der Chemischen Industrie. <https://www.vci.de/themen/energie-klima/klimaschutz/kabinettsbeschluss-zur-speicherung-und-nutzung-von-kohlendioxid.jsp>
- VCI, VDI (Hrsg.) (2023). Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Verband der Chemischen Industrie. Verein Deutscher Ingenieure. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschue-langfassung.pdf>
- VDZ (Hrsg.) (2024). Anforderungen an eine CO₂-Infrastruktur in Deutschland – Voraussetzung für Klimaneutralität in den Sektoren Zement, Kalk und Abfallverbrennung.

- Verein Deutscher Zementwerke. Düsseldorf. https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_CO2-Infrastruktur-Deutschland.pdf
- Viebahn, P. (2019). Exploring the Potential Role of Carbon Capture and Storage (CCS) for Power Plants in the German and the International Context – a Multi-Dimensional Assessment Approach. Habilitationsschrift. Universität Osnabrück, Fachbereich 06 Mathematik / Informatik, Fachgebiet Systemwissenschaften. <https://osnadocs.ub.uni-osnabrueck.de/handle/urn:nbn:de:gbv:700-202103114093>
- Wallmann, K., Löschke, S. (2024). CDRmare Update: Neue Abschätzung der CO₂-Speicherkapazität unter der deutschen Nordsee, pp. 1-4, <https://doi.org/10.3289/CDRmare.43>
- Witte, K., Große-Kreul, F., Reichmann, A., Weber, N., Altstadt, L. (2023). Akzeptanz von industriellem CCS in Nordrhein-Westfalen—Empfehlungen für Politik und Industrie. In Brief 11/2023. Wuppertaler Impulse zur Nachhaltigkeit.
- Wuppertal Institut, DLR, ZSW, PIK (2007). RECCS. Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS). Ökologische Einordnung und strukturell-ökonomischer Vergleich regenerativer Energietechnologien mit anderen Optionen zum Klimaschutz, speziell der Rückhaltung und Speicherung von Kohlendioxid bei der Nutzung fossiler Primärenergien. Projektbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Wuppertal, Stuttgart, Potsdam.
- Wuppertal Institut (2010). RECCS plus. Regenerative Energien (RE) im Vergleich mit CO₂-Abtrennung und -Ablagerung (CCS). Update und Erweiterung der RECCS-Studie. Projektbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Wuppertal.
- WWF (2024). CCS: WWF warnt vor Folgen für Nord- und Ostsee. Weltweiter Fonds für die Natur. <https://www.wwf.de/2024/maerz/meeresschutz-im-abseits>
- Zauner, D. (2024). Ist das Wasserstoffkernnetz zu groß oder zu klein? Klimareporter. <https://www.klimareporter.de/technik/ist-das-wasserstoffkernnetz-zu-gross-oder-zu-klein>
- ZEP (2022). Experience in developing CO₂ storage under the Directive on the geological storage of carbon dioxide. Zero Emissions Platform. [https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Experience-in-developing-CO₂-storage-under-the-CCS-Directive-ZEP-report.pdf](https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Experience-in-developing-CO2-storage-under-the-CCS-Directive-ZEP-report.pdf)
- Zukunft Gas (o.J.). CO₂-Netz: Infrastruktur für den CO₂-Transport. [https://gas-h2.de/transformation-energiesystem/carbon-management/CO₂-netz/](https://gas-h2.de/transformation-energiesystem/carbon-management/CO2-netz/)