



POSITION // SEPTEMBER 2023

Carbon Capture and Storage

**Diskussionsbeitrag zur Integration in
die nationalen Klimaschutzstrategien**

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet V 1.2
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

Autorinnen und Autoren:

Katja Purr und Joris Spindler
unter Mitarbeit von
Jens Brieschke, Hans-Peter Damian,
Jörg Frauenstein, Harald Ginzky,
Bianca Herrmann, Andreas Kahrl,
Dana Ruddigkeit,
sowie
Dirk Messner, Carsten Alsleben, Juliane Berger,
Susanne Dröge, Ling He, Larissa Kleiner, Mathias Ulrich,
Jens Tambke, Karlotta Schultz

Redaktion:

Katja Purr, Joris Spindler, Kirsten op de Hipt
und Susanne Kambor

Satz und Layout:

Atelier Hauer+Dörfler GmbH

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

S. 8, Abb. 1: Susanne Kambor, Umweltbundesamt
S. 11: Shutterstock/ Kaisn
S. 14: Shutterstock/ WDG Photo

Stand: September 2023

ISSN 2363-8273

POSITION // SEPTEMBER 2023

Carbon Capture and Storage

Diskussionsbeitrag zur Integration in
die nationalen Klimaschutzstrategien

Abbildungen

Abbildung 1	
Vereinfachte Darstellung der Abwägung bei der Integration von technischen Senken	8
Abbildung 2	
Mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt insbesondere auf das Schutzgut Boden entlang der CCS-Prozesskette	10
Abbildung 3	
Treibhausgasemissionen 2021 und Szenarien für 2045 für Deutschland	13
Abbildung 4	
Vereinfachter Überblick zu verschiedenen Arten von Kohlenstoffsinken und deren Treibhausgaswirkung beim Einsatz ausschließlich erneuerbarer Energie	15
Abbildung 5	
Treibhausgasemissionen 2021 und Szenarien für 2045 in Deutschland sowie die Integration von BECCS und CCS in der Abfallwirtschaft	18

Inhalt

Carbon Capture and Storage – Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien	6
1 Abwägungen zur Integration der CCS-Technologie	8
2 Die potentiellen Auswirkungen von CCS:	
Umwelt, menschliche Gesundheit und Nutzungskonkurrenz	9
Auswirkung der CO ₂ -Speicherung auf Wasser, Boden und Luft sind möglich	9
Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sind möglich	11
Die Schädigung von Sachgütern ist nicht ausgeschlossen	11
Es treten Konkurrenzen zwischen CO ₂ -Speicherung und anderen Nutzungen auf	11
3 Leitplanken für eine nachhaltige Treibhausgasneutralität bei Integration von CCS	12
CCS ist kein Ersatz für die notwendige Treibhausgasminderung	12
Auch mit CCS können konventionelle und fossile Prozesse nicht treibhausgasneutral werden	14
Der Beitrag von CCS und technischen Senken sollte an den natürlichen Senken ausgerichtet werden	15
Die Architektur der Klimaschutzpolitik muss auf eine klare Hierarchie ausgerichtet sein und robust gestaltet werden	16
4 Leitplanken zur Technikintegration und Technologieförderung von CCS	17
WACCS – CCS an thermischen Abfallbehandlungsanlagen erfolgt am Ende der Wertschöpfungskette, verursacht geringe Lock-in-Effekte und bietet Potential für Negativemissionen	17
Techniken zur Kohlenstoffgewinnung aus der Atmosphäre fördern	19
Förderung zur Kohlenstoffspeicherung breit und technologieoffen aufstellen	19
5 Leitplanken – Für ein Monitoring und Risikoversorge als Grundvoraussetzungen für eine dauerhafte CO₂-Speicherung	20
Ein unabhängiges, genaues und stetig den Stand der Technik umfassendes Monitoring für CO ₂ -Speicher ist erforderlich	21
Die Langzeit-Speichersicherheit ist nicht vorhersagbar	21
Die langfristige Verantwortlichkeit für CO ₂ -Speicher beinhaltet erhebliche Risiken – diese sind von Beginn an zu berücksichtigen	22
6 Zusammenfassung	23
Grundsätze für die Wahrung einer ambitionierten Klimaschutzpolitik	23
Grundsätze für die Integration von CCS und technischen Senken in die Klimapolitik	23
Vorschläge für die nationale Integration von CCS	24
7 Quellen	26

Carbon Capture and Storage – Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien

Mit dem Übereinkommen von Paris hat sich die Weltgemeinschaft das Ziel gesetzt, die globale Erwärmung deutlich unter 2°C zu begrenzen und Anstrengungen zu unternehmen, den Temperaturanstieg möglichst bei 1,5°C zu stoppen. Die Europäische Union will bis 2050 erster treibhausgasneutraler Kontinent werden (Fras 2019) und hat mit dem Fit-for-55-Gesetzespaket erste Weichen dafür gestellt. Deutschland strebt an, bereits bis 2045 netto-treibhausgasneutral zu werden (§ 3 Absatz 2 KSG) und nach 2050 sektorübergreifend negative Treibhausgasemissionen zu erreichen.

Zur Einhaltung dieser Ziele sind massive Anstrengungen zur Minderung des Treibhausgasausstoßes unabdingbar. Jedoch werden selbst bei ambitionierter Umsetzung aller realisierbarer Minderungsoptionen in einzelnen Sektoren unvermeidbare fossile Restemissionen bestehen bleiben, insbesondere der Landwirtschaft, aber auch einzelnen Teilen der Industrie (Kalk- und Zementindustrie) (Purr et al. 2019, Warszawski et al. 2021). Dies bedeutet, dass der Ausstoß unvermeidbarer Restemissionen ausgeglichen werden muss. Hierfür stellen natürliche CO₂-Speicher wie Wälder, Moore, aber auch verstärkte Holznutzung Optionen dar. Eine mögliche zusätzliche Option könnten technische Maßnahmen mit Senkenwirkung sein. Zum einen Maßnahmen um den Ausstoß entstandener fossiler Emissionen an Punktquellen in die Atmosphäre zu verhindern, diese abzuscheiden und einzuspeichern z. B. durch Carbon Capture Storage (CCS). Zum anderen technische Senken, hier wird CO₂ direkt der Atmosphäre entzogen (Direct Air Capture Storage- DACCS) oder biogener Kohlenstoff genutzt (Bioenergy Carbon Capture Storage- BECCS) und eingespeichert. Für diesen Ausgleich braucht es regulatorische Priorisierungen, die den Kriterien der Nachhaltigkeit, des Naturschutzes und der Risikominimierung folgen.

Gleichzeitig zeichnet sich auf globaler Ebene ab, dass mit einem Überschreiten („Overshooting“) des 1,5°C-Ziels in den 2030er Jahren zu rechnen ist, wenn die globalen CO₂-Emissionen bis 2030 nicht um 48 % und bis 2050 um 99 % reduziert werden, jeweils bezogen auf das Niveau von 2019 (IPCC 2023). Darüber hinaus müssen auch verschiedene Kippunkte des Erd-Klimasystems in Risikomanagementstrategien berücksichtigt werden (IPCC 2021). Zu den Kippelementen, die bereits bei einer Erwärmung von mehr als 1,5°C bedroht wären, zählen z. B. die Eisschilde Grönlands und der Antarktis sowie die borealen Permafrostböden.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Frage, wie schnell Maßnahmen zur Minderung des Treibhausgasausstoßes umsetzbar sind, aber auch in welcher Form und Höhe natürliche und technische Senken sowie technische Maßnahmen zum reduzierten Treibhausgasausstoß (CCS) zu einer sektorübergreifenden nachhaltigen negativen Treibhausgasbilanz beitragen müssen. Mit Blick auf die globalen Trends geht es zudem um Weichenstellungen für Investitionen in Senken und angrenzende Technologien, ohne dass die Minderungsanstrengungen unterlaufen werden. Um hierfür Prioritäten zu setzen, Risiken abzuwägen sowie Planbarkeit für Investitionen und beteiligte Akteursgruppen herzustellen, braucht es eine verbindliche Senkenstrategie – sowohl in Deutschland als auch in der EU.

Im Koalitionsvertrag 2021-2025 (SPD; BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN; FDP 2021) bekennen sich die Regierungsparteien zu dieser Herausforderung und benennen neben dem natürlichen Klimaschutz auch technische Negativemissionen als notwendige Ergänzung. Mit einer „Carbon Management Strategie“ (BT-Drs. 20/5145) und der Förderrichtlinie zur Dekarbonisierung der Industrie stellt die Bundesregierung erste Weichen, trifft auch internationale Verabredungen zur Einlagerung von CO₂ im Ausland (deutsch-norwegische Kooperation (PM 2023)) und beteiligt sich an den Debatten zur Ratifizierung des London-Protokolls (Polansky 2023).

Das Potenzial, die Kosten, die Klimabilanz und die Umweltauswirkungen technischer Senken sind offen. Zahlreiche Faktoren, wie die technologischen Entwicklungsdynamiken in diesem Feld, die technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen, die Gesetzgebung und Treibhausgasberichterstattung für CCS und technische Senken, sind zu klären. Mit diesem Papier werden für die Nutzung von CCS eine Einschätzung und mit Blick auf diese Aspekte Empfehlungen mit dem Fokus auf Deutschland gegeben.

Definition CCS

Unter Carbon Capture and Storage (CCS) wird nachfolgend verstanden, dass CO₂-Emissionen aus dem Abgasstrom von Punktquellen abgeschieden und „eingefangen“, anschließend zum Speicherort transportiert und dort in den Untergrund eingebracht werden. Denkbare Speicher sind teilweise oder ganz ausgeförderte Öl- oder Gaslagerstätten oder saline Aquifere. Die Speicherung kann sowohl terrestrisch als auch im Meeresuntergrund erfolgen. Wenn das Kohlendioxid bei der energetischen Nutzung nachhaltig erzeugter Biomasse entsteht und mittels CCS „eingefangen“ wird (BECCS) oder CO₂ direkt aus der Atmosphäre entnommen wird, kann CCS auch negative Emissionen bewirken. Diese Anwendungen von CCS fallen dann in die Kategorie technische Senken.

1 Abwägungen zur Integration der CCS-Technologie

Bei Entscheidungen über die Anwendung, die Regulierungen und Anreize für CCS müssen die Grundsätze und Leitplanken für die Wahrung einer ambitionierten Klimaschutzpolitik differenziert berücksichtigt werden. Einerseits wird CCS als ein notwendiger Teil der globalen Klimapolitik der Zukunft angesehen, um möglichst schnell Treibhausgasneutralität zu erreichen und bisherige Versäumnisse auszugleichen. Das Erreichen der Kippunkte sowie drastische Folgen für unsere Ökosysteme und unsere Gesellschaften sollen verhindert werden. Andererseits erfolgen kurzfristig (nationale und europäische) Weichenstellungen für verminderten Treibhausgasausstoß mittels CCS und technische Senken bei gleichzeitig nicht annähernd ausgeschöpften THG-Vermeidungs- und Minderungsstrategien und der damit bestehenden Gefahr des Festhaltens an fossilen Wirtschaftsmustern und Verhindern der Transformation. Darüber hinaus sollte bedacht werden, wie zukünftige Generationen die heutigen Entscheidungen bewerten würden, auch in Bezug auf die Einschränkung ihrer Handlungsspielräume. Denn die

begrenzten CO₂-Speicherkapazitäten würden bei CCS-Anwendung für vermeidbare fossile Emissionen bereits heute genutzt und verbraucht, die zukünftig dauerhaft benötigt werden.

Die CCS-Diskussion ist eine Gratwanderung und bedarf einer Abwägung, welche auf eine nach wie vor unzureichende Klimaschutzpolitik zurückzuführen ist. CCS in Kombination mit dem Festhalten an bekannten fossilen Techniken, Wirtschaftsmodellen und Konsumverhalten würde zu einer stetigen Verschärfung dieser Herausforderungen führen. Sofern CCS in die heutige Klimaschutzpolitik integriert würde, bedarf es Anwendungen, welche dieses Dilemma nicht verschärfen. Es dürfen also keine der Natur neu entnommenen fossilen Energieträger genutzt werden und gleichzeitig müssen die größten Synergien gehoben werden: **Am Ende einer langen Wertschöpfungskette bei der Kombination von CCS mit thermischen Abfallbehandlungsanlagen (WACCS).**

Abbildung 1

Vereinfachte Darstellung der Abwägung bei der Integration von technischen Senken



Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

2 Die potentiellen Auswirkungen von CCS: Umwelt, menschliche Gesundheit und Nutzungskonkurrenz

Neben den Aspekten des Klimaschutzes treten bei der Abscheidung von CO₂, dem Transport und der Speicherung in geologischen Formationen potenzielle Umweltwirkungen auf Ökosysteme, wie das Meer, und auf die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft auf.

Maßgebliche Freisetzungsszenarien und Zielrichtung des Monitorings (siehe Kapitel 5) zur Bewertung von Umweltrisiken bei der Einspeicherung von CO₂ sind:

- ▶ Bohrungsleckagen (aktive Bohrungen oder Altbohrungen),
- ▶ Freisetzungen über geologische Störungszonen und
- ▶ zumeist diffuse Freisetzungen mit relevanten Wirkungen auf Gebäude und historische sowie kulturelle Schutzgüter.

Auswirkung der CO₂-Speicherung auf Wasser, Boden und Luft sind möglich

Oberflächennahes Grundwasser kann bei untertägiger Einspeicherung von CO₂ durch Leckagen verunreinigt werden und **versalzen**. Dies kann durch verdrängte (hoch)mineralisierte Formationswässer, die Nebenbestandteile des zu speichernden Gasmischtes sowie weitere Reaktionsprodukte und verfahrenstechnische Begleitstoffe geschehen (Li et al. 2018).

Im Meer wird bei Leckagen das CO₂ im Wasser gelöst und trägt zur Versauerung des Meerwassers bei (Cai et al. 2020). Das Risiko für Leckagen bei der CO₂-Speicherung steigt mit der eingebrachten Menge und den dadurch erzeugten Druckdifferenzen in der Speicherschicht. Diese können die Dichtungsfunktion der Deckschicht beeinträchtigen.

Beim Austritt von gespeichertem CO₂ können deutliche Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme auftreten. Eine zusätzliche Gefahr besteht, wenn durch die CO₂-Einleitung toxische Stoffe in der Speicherformation mobilisiert werden. Durch Änderungen des pH-Wertes und der CO₂-Konzentration **im Meer können Meeresalgen, Fische und weitere Organismengruppen erheblich beeinträchtigt werden.** Die Entwicklung von Tiefseeorganismen verläuft eher langsam, da ihre Stoffwechselraten niedriger sind und ihre Lebensdauer höher ist als in anderen Meeresschichten (IPCC 2005). Bei großen Leckagen können Ökosysteme sehr stark geschädigt werden und voraussichtlich sehr lange brauchen, um sich zu erholen (IPCC 2005). Hier besteht dringender Forschungsbedarf hinsichtlich der Auswirkungen (z. B. eines Blow-outs als plötzliches Entweichen größerer Mengen CO₂ aus dem Speicher) auf die Meeresumwelt.

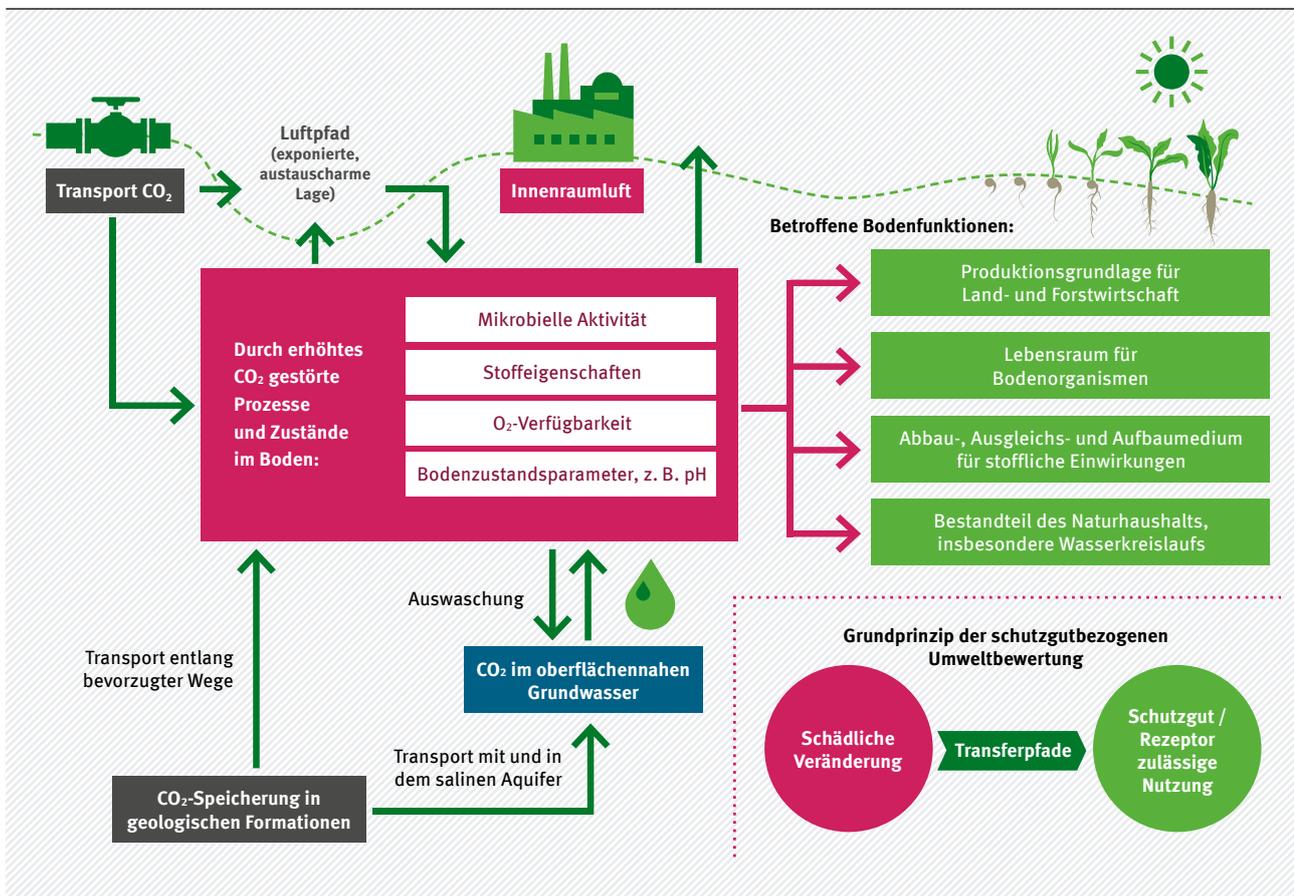
An Land geht in der oberflächennahen Bodenschicht nach Austritt von CO₂ aus einem tiefer gelegenen Speicher **die Sauerstoffkonzentration zurück** und es kann zu einer Absenkung des pH-Werts kommen. Dies beeinträchtigt den Stoffhaushalt sowie die Milieubedingungen im Boden, kann zu einer Mobilisierung von Schwermetallen führen **und wirkt sich zudem nachteilig auf Mikroorganismen und das Pflanzenwachstum aus.** Dies wurde nachgewiesen an natürlich vorkommenden Mofettenstandorten mit vergleichbaren CO₂-Strömen (Stange und Duijnsveld 2013, Maček et al. 2009). So zeigen sich bereits bei einer Erhöhung um nur 0,7 % CO₂ beispielsweise in Folge einer CCS-Speicherleckage in der Zusammensetzung der Bodenluft Anzeichen einer signifikant geringeren Wurzelatmung, die die Ertragsfähigkeit bei landwirtschaftlicher Bodennutzung sukzessive reduziert und sich nachteilig auf Mikroorganismen und Bodendiversität auswirkt (Stange und Duijnsveld 2011). Daraus können Hindernisse zur Erreichung der EU-Bodenschutzziele, bis 2050 einen gesunden Bodenzustand erreichen zu wollen, entstehen.

Die spontane Freisetzung einer großen CO₂-Menge in die Luft durch Leckagen des Speichers bzw. in der Abdichtung zur Oberfläche **kann nicht vollständig ausgeschlossen werden**. Steht sie in Verbindung mit den technischen Installationen der Speicher ist sie gut detektierbar und gezielt zu beheben. Ein Kollaps des untertägigen Speichers ist mit gebirgsmechanischen Signalen klar lokalisierbar. Eine Reparatur ist regelmäßig nicht möglich. Gleichfalls kann es zu einer kontinuierlichen Freisetzung von CO₂ durch Leckage des Speichers oder beim

Transport kommen. Diese Leckagen hängen maßgeblich von geologischen Anomalien, Störungszonen, Klüften und Rissen ab und sind auch mit Erkundung und Monitoring hoher Auflösung weder auszuschließen noch unverzüglich lokalisierbar. Kohlendioxid ist als Gas geruch- und farblos und schwerer als Luft. **Abhängig von der örtlichen Gegebenheit des Austritts können durch Verdrängung des Luftsauerstoffs Bereiche erhöhter CO₂-Konzentrationen auftreten.**

Abbildung 2

Mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt insbesondere auf das Schutzgut Boden entlang der CCS-Prozesskette



Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (www.bgr.bund.de/)



Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sind möglich

CO₂ ist schwerer als Luft und **kann** bodennah in tiefergelegene Bereiche abfließen oder **sich** in luftaustauscharmen Zonen (z. B. Senken bei Windstille, Keller, geschlossene Räume) **sammeln**. **Beim Menschen kann eine erhöhte CO₂-Konzentration** in der Atemluft zahlreiche Symptome hervorrufen, die in Abhängigkeit von der jeweiligen Konzentration **zu Bewusstlosigkeit oder bis zum Tod führen** können. Grenz- oder Richtwerte für CO₂-Konzentrationen im Außenbereich fehlen. Für Innenräume wurden gesundheitlich-hygienische Leitwerte für CO₂ für die Gesamtbevölkerung entwickelt. Um Restrisiken für den Menschen zu verringern, sind On-shore-CCS-Speicher nicht unter Siedlungen zu planen und zuzulassen. Das Konfliktpotenzial zwischen CCS-Speichern und der gleichzeitigen Nutzung als bewohnter Bereich ist so hoch, dass beide Nutzungsformen streng zu trennen sind. Zudem wären bei einer räumlichen Überschneidung von Speichern und Siedlungsbereichen erhebliche Akzeptanzprobleme in der betroffenen Bevölkerung zu erwarten.

Die Schädigung von Sachgütern ist nicht ausgeschlossen

Besonders bei der Einspeicherung, aber auch während der anschließenden Verwahrung des CO₂ kann es zu seismischen Ereignissen kommen (Zoback 2012). Es wird eine geringe Magnitude erwartet. An Land ist eine Auswirkung insbesondere auf Gebäude dennoch nicht vollständig auszuschließen.

Es treten Konkurrenzen zwischen CO₂-Speicherung und anderen Nutzungen auf

Die für CCS in Anspruch genommene geologische Struktur ist dauerhaft belegt; sie steht zukünftig für andere Nutzungen nicht mehr zur Verfügung. **CCS konkurriert an Land mit der Tiefengeothermie**, der Speicherung von Erdgas, der Speicherung von regenerativ erzeugtem Methan und Wasserstoff sowie der Speicherung von Wärme. Auswirkungen von CCS auf die benachbarten Nutzungen (vertikal und horizontal) im Untergrund und die bereits dargestellte Schutzgutbetroffenheit an der Oberfläche sind zu beachten.

Im marinen Bereich ist eine Konkurrenz zwischen der Speicherung von CO₂ und dem Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen möglich.

Weiterhin erfordert das notwendige umfassende Monitoring der CCS Projekte mit verschiedenen Messverfahren besondere Vorkehrungen gegenüber anderen Meeresnutzungen (z. B. Fischerei, Ankern von Schiffen). Vor der Umsetzung von Speicherprojekten müssen die verschiedenen meeresbodennahen Nutzungsansprüche abgestimmt und priorisiert werden (CDRmare 2023).

3 Leitplanken für eine nachhaltige Treibhausgasneutralität bei Integration von CCS

CCS ist kein Ersatz für die notwendige Treibhausgasreduzierung

Treibhausgasemissionen zu vermeiden, stellt das oberste Leitprinzip für eine nachhaltige Klimaschutzpolitik im Sinne der Vorsorge dar. Das ist auch die Kernbotschaft eines Sonderberichts des Weltklimarats von 2018 (IPCC 2018). **CCS und die Rückhaltung bereits entstandener Treibhausgase darf dabei nicht als Lösung für energiebedingte fossile Treibhausgasemissionen genutzt werden. Insbesondere dürfen die Rahmenbedingungen zur Kohlenstoffentnahme und -nutzung zu keinen Lock-in-Effekten von fossilen Techniken führen.** Vielmehr müssen umfassende Maßnahmen zur Emissionsminderung ergriffen werden. Dies erfordert viele, tiefe und rasche Veränderungen in Wirtschaft und Gesellschaft, bei der Produktion von Gütern und auch beim Konsum. Verbesserte Effizienz, Einsparungen, erneuerbare Energien, alternative treibhausgasarme oder -neutrale Produkte und Dienstleistungen bis hin zur Suffizienz sind wichtige Steuerungsmechanismen, deren Potenziale in Gänze auszuschöpfen sind.

Technische Maßnahmen (CCS) sollten daher in jedem Fall nur für die langfristig unvermeidbaren Restemissionen zum Einsatz kommen. Diese sogenannten Residualemissionen werden vornehmlich in der Landwirtschaft bestehen bleiben, aber auch in der Industrie bei Prozessen der Kalk- und Zementherstellung sowie der Abfall- und Abwasserwirtschaft. Hier gilt es, technologische und soziale Innovationen zu entwickeln und stetig voranzutreiben, um das technische und sozialverträgliche Minimum der unvermeidbaren Emissionen, kontinuierlich und nach dem neuesten Stand des Wissens und der Forschung, zu reduzieren. In vielen Bereichen sind Alternativen bereits bekannt, bspw. in der Stahlindustrie, durch Umstellung auf die Direct Reduced Iron (DRI)-Technologie oder bei der Wasserstoffproduktion der Einsatz der Wasserelektrolyse unter Verwendung von erneuerbarem Strom. An anderen Stellen bedarf es noch intensiver Forschung und Entwicklung, bspw. bei

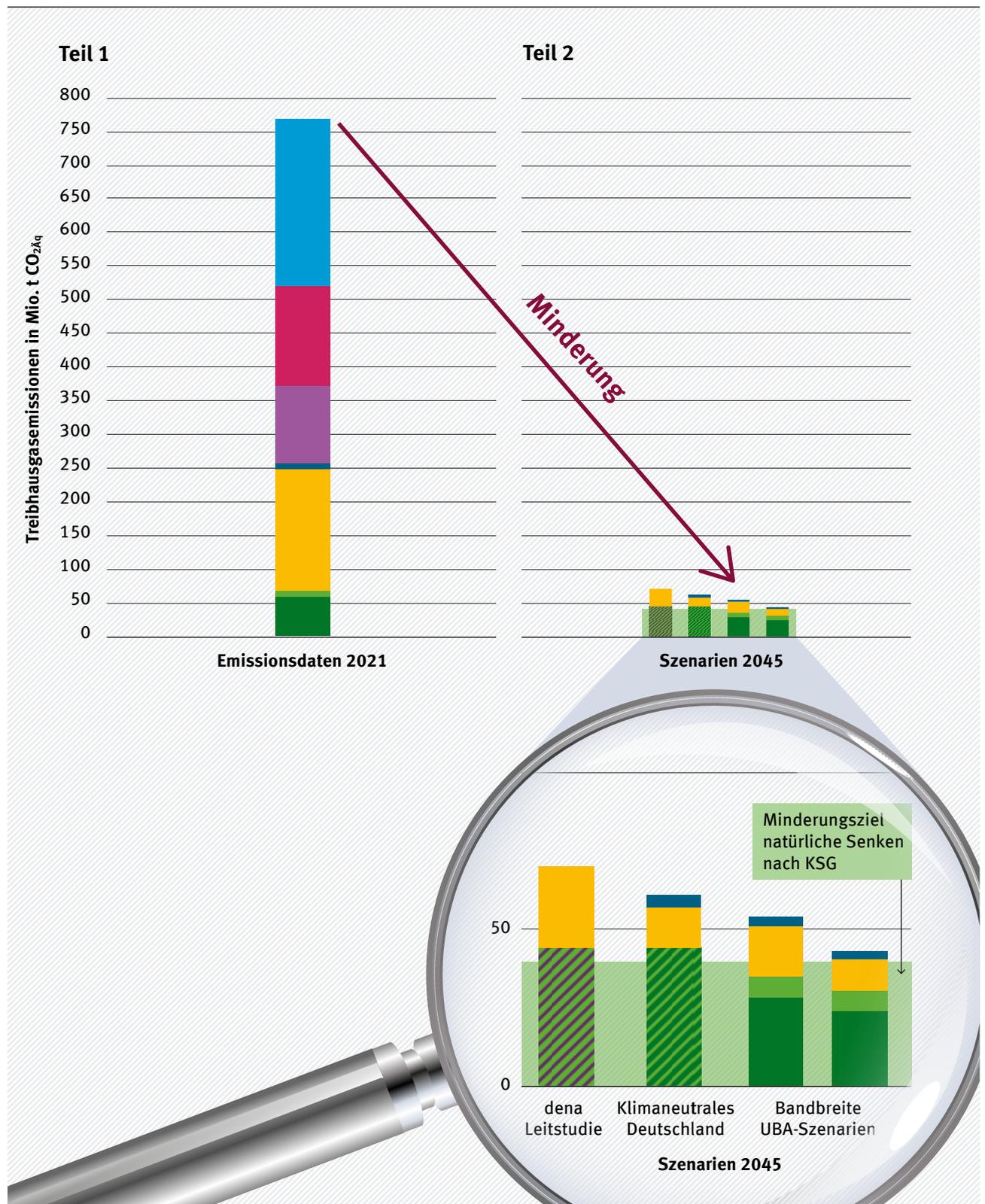
der Reduktion prozessbedingter Emissionen in der Zement- und Kalkbranche durch Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette bspw. alternative Bindemittel anstelle des Zements, Holzbau, veränderte Bauweisen u. ä. Trotz technologischer Entwicklungspotenziale werden langfristig unvermeidbare Emissionen bestehen bleiben.

Bei einer sehr ambitionierten Klimaschutzpolitik in allen Sektoren Deutschlands sowie einer sehr ambitionierten Biodiversitätsschutzpolitik können die natürlichen Senken die Residualemissionen in 2045 größtenteils ausgleichen. Je nach Anstrengungsniveau zeigen die wissenschaftlichen Studien eine große Bandbreite der unvermeidbaren Emissionen für Deutschland in Höhe von 43 bis 70 Mio. t CO₂-Äq (Purr et al. 2019, dena 2021). Demgegenüber steht das im Bundes-Klimaschutzgesetz verankerte, verbindliche Sektorziel im Bereich LULUCF von mindestens -40 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045, die sektorübergreifend zum Ausgleich zur Verfügung stehen (Abbildung 3). **Dementsprechend könnte der Bedarf an technischen Senken und dem Einsatz von CCS unter idealen Bedingungen, sehr gering sein oder sogar auf Null reduziert werden.**

Das Potenzial der natürlichen Senken ist jedoch genauso wie das der technischen Senken begrenzt. Die Umsetzung von erfolgreichen Klimaschutzmaßnahmen hält derzeit nicht Schritt mit den Erfordernissen und den gesetzlichen Zielen – siehe dazu bspw. den Projektionsbericht der Bundesregierung (UBA 2021), das Treibhausgasemissionsinventar (UBA 2023a) oder die Einschätzung des Expertenrats für Klimafragen (ERK 2022). **Es bedarf daher einer robusten Senkenstrategie, welche die (gesellschaftlichen und politischen) Umwelt- und Klimafolgen und die notwendigen Ausgleichstechniken für nachhaltige negative Emissionen berücksichtigt und abwägt.**

Abbildung 3

Treibhausgasemissionen 2021 und Szenarien für 2045 für Deutschland



- Landwirtschaft
- LULUC
- Sonstige (Abfall & Abwasser)
- Landwirtschaft, LULUC, weitere Sektoren
- Industrie
- Verkehr
- Energiewirtschaft
- Landwirtschaft mit LULUC
- Gebäude

Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt



Auch mit CCS können konventionelle und fossile Prozesse nicht treibhausgasneutral werden

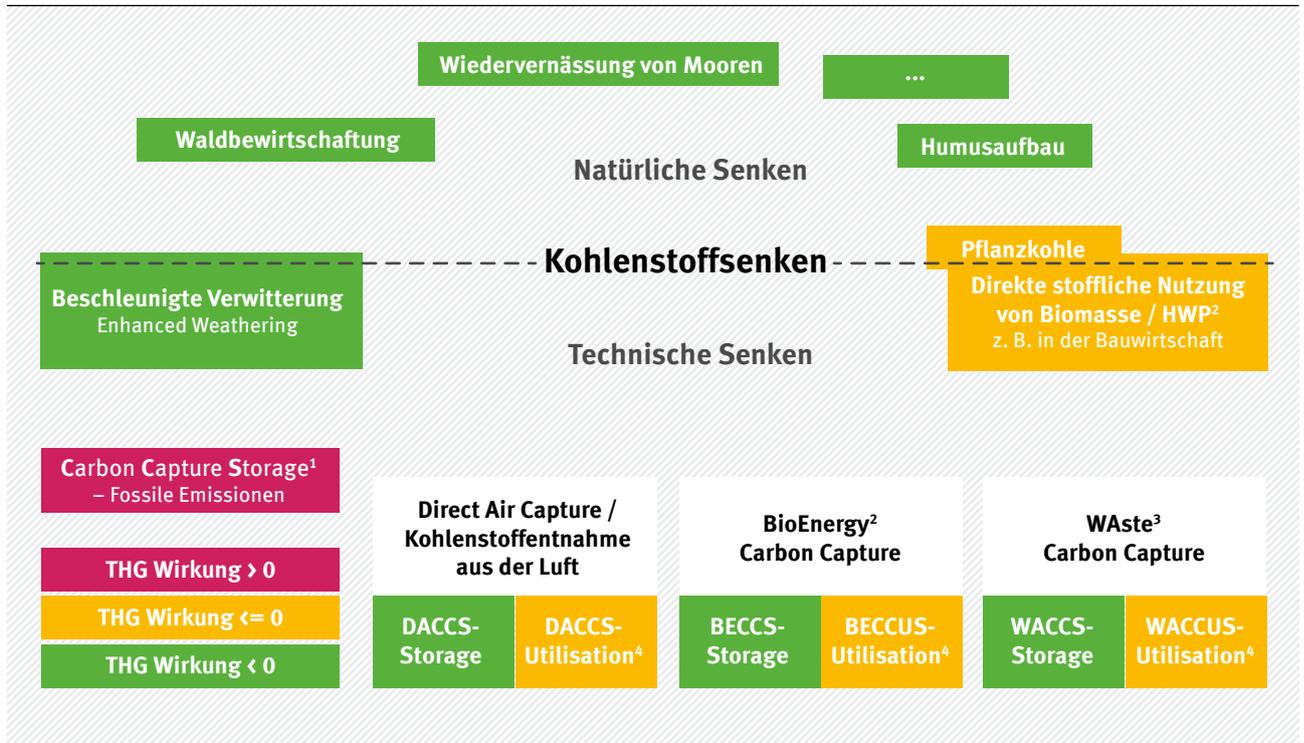
In den momentanen industrie- und klimapolitischen Debatten scheint CCS oft der Hoffnungsträger zu sein, der sowohl die Herausforderungen der unvermeidbaren Emissionen als auch die Transformation der fossilen Wirtschaft meistern könne. Zwar wird CCS in der Gas- und Ölindustrie zur Erhöhung der Förderausbeute („Enhanced Oil Recovery“, EOR) angewendet, ist aber in großskaligen Projekten kaum erprobt (Harvey & House, 2022). Plausible oder detaillierte Kostenberechnungen für CCS ohne EOR sind nicht öffentlich zugänglich. **Mit Blick auf die Prozesskette zeigt sich, dass CCS in Kombination mit fossilen Energieträgern, bspw. dem blauen Wasserstoff, der aus Erdgas erzeugt wird, oder CCS mit prozessbedingten Treibhausgasemissionen an industriellen Anlagen, bspw. der Zementindustrie, nicht komplett treibhausgasneutral umgesetzt werden kann.**

Entlang der Prozesskette entstehen energetische Mehraufwendungen: bei der Abscheidung, bei der Verdichtung, beim Transport, bei der Einspeicherung des CO₂ sowie bei der Errichtung und beim Betrieb der Infrastruktur an Land und auf dem Meer. Werden hierfür keine erneuerbaren Energien eingesetzt, fällt ein erhöhter CO₂-Ausstoß an. Weitere Treibhausgasemissionen treten in der Vorkette auf, bspw. bei der Erdgasförderung für blauen Wasserstoff, die unmittelbar mit diffusen Methanemissionen einhergeht.

Aber selbst unter den Prämissen, dass ausschließlich erneuerbare Energien verwendet und unvermeidbare Emissionen eingespeichert werden sollen, kann bei prozessbedingten Emissionen keine Treibhausgasneutralität der Wirtschaft erreicht werden. **Bei Verfahren zur Kohlenstoffabscheidung kann ein Teil des Kohlendioxids nicht aufgefangen werden. Es werden Abscheidungsraten um 85 % erreicht, so dass etwa 15 % des CO₂ weiterhin in die Atmosphäre gelangen (Bisinella et al. 2021).** Außerdem entstehen, neben Leckagen im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb, auch im Regelbetrieb entlang der Prozesskette Emissionen: durch Undichtigkeiten beim Umgang und dem Transport des CO₂. Wird hingegen CCS mit atmosphärischem Kohlenstoff aus der Umgebungsluft (DACCS) oder mit nachhaltig erzeugter Biomasse (BECCS) kombiniert, wird CO₂ dem Kohlenstoffkreislauf der Atmosphäre vorübergehend entzogen und „negative Emissionen“ können erreicht werden (siehe Abbildung 4). **Die Kapazitäten zur Einspeicherung von Kohlendioxid sind begrenzt und sollten sinnvoll genutzt werden.** Selbst nach genauer Vorerkundung eines potentiellen Speicherkomplexes können in der Betriebsphase erhebliche Abweichungen zur prognostizierten Speicherkapazität entstehen (IEEFA 2023), sodass Speicherkapazitäten mit großen Unsicherheiten behaftet sind. **Für den Fall, dass die natürlichen Senken nicht ausreichend oder dauerhaft zum Ausgleich der unvermeidbaren Emissionen beitragen können, sollten diese Speicherkapazitäten als Option erhalten und nicht für vermeidbare fossile Emissionen verschwendet werden.**

Abbildung 4

Vereinfachter Überblick zu verschiedenen Arten von Kohlenstoffsinken und deren Treibhausgaswirkung beim Einsatz ausschließlich erneuerbarer Energie



¹ CO₂-Emissionen können nicht vollständig sequestriert und gespeichert werden.

² Nutzung von nachhaltig produzierter Biomasse / biogenen Reststoffen.

³ Nutzung von nicht recycelbaren biogenen und -fossilen Abfällen.

⁴ CO₂-Nutzung für langlebige Produkte.

Quelle: eigene Darstellung (überarbeitet), Umweltbundesamt

Der Beitrag von CCS und technischen Senken sollte an den natürlichen Senken ausgerichtet werden

Neben der Klimakrise stehen wir an vielen Stellen im Umwelt- und Gesundheitsschutz vor großen Herausforderungen. Im Sinne der Nachhaltigkeit und zur Bewältigung dieser drängenden Herausforderungen gilt es, Synergien von Beginn an mitzudenken, zu heben und zu priorisieren. Natürliche Senken können diese Co-Benefits zum Biodiversitäts- und Ökosystemschutz bieten (Reise et al. 2019). Neben der Kohlenstoffbindung können diese zum Artenschutz sowie zur Verbesserung des Mikroklimas (in Bodennähe) und des Wasserhaushalts beitragen. **Ein etwaiger Beitrag technischer Senken zur Verminderung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre oder CCS zur Rückhaltung von Treibhausgasen sollte sich daher an der vorrangigen und ambitionierten Entwicklung der natürlichen Senkenleistung orientieren.** Dafür bedarf

es einer Konzeption für den Umgang mit CO₂-Emissionen, die sowohl der Priorität zur Reduktion der Entstehung und Freisetzung von Treibhausgasen als auch dem integrierten Umweltschutz gerecht wird. Dazu gibt es einen Vorschlag des Umweltbundesamts aus dem Jahr 2022 „Technische Negativemissionen: Ist die klimapolitische Zielarchitektur der Bundesregierung fit for purpose?“ (Voß-Stemping et al. 2022). **Dabei gilt es, neben dem klaren Benennen und Begrenzen der Residualemissionen** – frei von Partikularinteressen einzelner Branchen und Akteur*innen – **sektorübergreifende Mechanismen zur Verknüpfung von sicheren und langanhaltenden CDR-Maßnahmen einerseits und Treibhausgasemittenten unvermeidbarer Emissionen andererseits zu entwickeln.** Derzeit sind die Instrumente und Überlegungen singular und sektoral geprägt, bspw. zur Förderung von CCS in der Industrie oder Maßnahmen zum natürlichen Klimaschutz.

Die Architektur der Klimaschutzpolitik muss auf eine klare Hierarchie ausgerichtet sein und robust gestaltet werden

Trotz der Dringlichkeit für erfolgreichen Klimaschutz bestehen im Kontext der technischen Maßnahmen und negativen Emissionen mit CCS noch eine Vielzahl von offenen Fragen und Forschungsbedarf. Dies beginnt bereits bei der klaren Benennung und Begrenzung der unvermeidbaren Emissionen sowie deren Adressierung in Instrumenten. Für Planungssicherheit, Verlässlichkeit und Akzeptanz bei den Unternehmen und in der Gesellschaft sollte vor der Implementierung von CCS ein fundiertes Konzept ausgearbeitet werden und ein klares politisches Bekenntnis zur Umsetzung dieses Konzepts auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse erfolgen.

Für die politische Glaubwürdigkeit und eine ambitionierte Klimaschutzpolitik muss die Minderung und Vermeidung bei der CO₂-Entstehung getrennt von Senkenzielen erfolgen. In einem ersten Schritt bedarf es der gesetzlichen Definition, Mengenfestlegung und regelmäßigen Nachsteuerung, welche und wie viel Emissionen als unvermeidbare Emissionen gelten und für die der Einsatz von CCS zum Mindern des Ausstoßes ermöglicht wird. Des Weiteren bedarf es einer regelmäßigen Nachsteuerung, welche und wie viel Negativemissionen zu welchem Zeitpunkt

angestrebt werden. Dies spiegelt sich in der weiterentwickelten Zielarchitektur wieder, welche 1.) die THG-Minderungsziele (ohne CCS) in den einzelnen Sektoren der Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges, 2.) die Ziele für die natürlichen Kohlenstoffbindungen und 3.) die Ziele für die technische Kohlenstoffbindung und Verminderung des Ausstoßes von entstandenen CO₂-Emissionen, festlegt. Allein für die Transparenz und Erfolgskontrolle ist die Separierung der verschiedenen Ziele hilfreich.

Zur Integration von technischen Senken in unser Wirtschaftssystem ist vorab ein gesellschaftlicher und politischer Abwägungsprozess zu den Umwelt- und Klimafolgen sowie gesellschaftlichen Folgen eines über 1,5°C erhöhten, menschenverursachten Treibhausgasausstoßes gegenüber denen der Ausgleichstechniken notwendig. Die CO₂-Einspeicherung und Endlagerung von nationalen residualen Emissionen erfolgt stark regional begrenzt. Die Lasten von Risiken und Folgen sind daher stark lokal konzentriert. Es ist daher für die gesellschaftliche Akzeptanz von besonderer Bedeutung, die Notwendigkeit und Wahl der CO₂-Lagerung transparent und nachvollziehbar zu organisieren.

Klare Kommunikation zu Begrifflichkeiten und deren Hierarchie im Klimaschutz

Eine missverständliche Verwendung von klimapolitischen Begriffen ist zu vermeiden. Es sollte eine sachgerechte, zielgerichtete und akzeptanzschaffende Kommunikation erfolgen. So kann beispielsweise der viel gebrauchte Begriff der „Minderung“ unterschiedlich verstanden und gebraucht werden: die Emissionsreduktion oder die Minderung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre (Minderung umfasst dann auch Carbon Dioxide Removal (CDR), so etwa die Verwendung des Begriffs „Mitigation“ im IPCC) oder die Minderung der Folgen des Klimawandels (Minderung könnte dann sogar das hochproblematische solare Strahlungsmanagement (SRM) umfassen). Gemäß dem Vorsorgegedanken müssen klimapolitische Maßnahmen vorrangig am Anfang der Wirkungskette ansetzen

und auf die Vermeidung der Entstehung von Treibhausgasen gerichtet sein. Nachrangig sind sodann Maßnahmen, die lediglich eine Freisetzung bereits entstandener fossiler Emissionen in die Atmosphäre verzögern oder verhindern sollen (Carbon Capture and Utilization, kurz CCU und Carbon Capture and Storage - CCS) und schließlich jene Maßnahmen, die die Konzentration von Treibhausgasen durch Entnahme aus der Atmosphäre reduzieren sollen (DACCS, BECCS) (Markus et al. 2021). Soweit Sammelbegriffe, wie auch der Begriff der „Klimaneutralität“ verwendet werden, muss diese Abstufung und Hierarchisierung klar kommuniziert und sichergestellt werden, sodass vorrangige Maßnahmen nicht beliebig durch nachrangige Maßnahmen ersetzt oder „ausgeglichen“ werden können.

4 Leitplanken zur Technikintegration und Technologieförderung von CCS

WACCS – CCS an thermischen Abfallbehandlungsanlagen erfolgt am Ende der Wertschöpfungskette, verursacht geringe Lock-in-Effekte und bietet Potential für Negativemissionen

Ein möglicher Einstieg von CCS sollte dort erfolgen, wo die geringsten Lock-in-Effekte hervorgerufen werden und keine Konkurrenz zur Substitution mit erneuerbaren Energien oder alternativen Prozessen entsteht. Dies ist insbesondere bei der thermischen Abfallbehandlung der Fall, wo am Ende einer langen Nutzungskaskade nicht recycelbare Abfälle energetisch verwertet werden. Gleichwohl in der Industrie bekannt ist, welche Prozesse mit unvermeidbaren prozessbedingten Treibhausgasemissionen verbunden sind (Zement- und Kalkindustrie), werden in diesem Bereich auch noch fossile Energieträger verwendet. **Kommt es hier zum Einstieg der CCS-Technik werden zwangsläufig auch fossil vermeidbare Emissionen abgeschieden und gespeichert.**

In der Kalk- und Zementindustrie sind derzeit etwa ein Drittel der CO₂-Emissionen fossil und energiebedingt. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass alternative Entwicklungen beispielsweise entlang der Wertschöpfungskette im Bausektor (siehe Kapitel 3) blockiert werden.

In der thermischen Abfallbehandlung werden kaum zusätzliche und neu entnommene fossile Energieträger genutzt.¹ Im Jahr 2021 wurden rund 20,5 Mio. t CO₂ aus Hausmüll (10,3 Mio. t CO₂ biogen und 10,2 Mio. t CO₂ fossil) bei der energetischen Verwertung in Deutschland emittiert (UBA 2023b). **Die Abscheidung der CO₂-Emissionen an thermischen Behandlungsanlagen und deren Einspeicherung (Waste Carbon Capture and Storage, kurz WACCS) könnte bereits heute zu Negativemissionen führen** (unter den in Kapitel 3 dargestellten Voraussetzungen). Mit der Transformation der chemischen Industrie werden über einen sehr langen Zeitraum auch die grünen Polymere am Ende langer Lebenszyklen die erdölbasierten Polymere verdrängen. Diese sind dann voraussichtlich basierend auf atmosphärischem Kohlenstoff hergestellt und können damit weiter als

Negativemissionen im Anschluss an die thermische Abfallbehandlung systemisch beitragen. **So kann bei diesem Anwendungsfall die langfristige Verfügbarkeit von CCS für technische Senken überprüft und für eine robuste Senkenstrategie mit Negativemissionen gewahrt bleiben.**

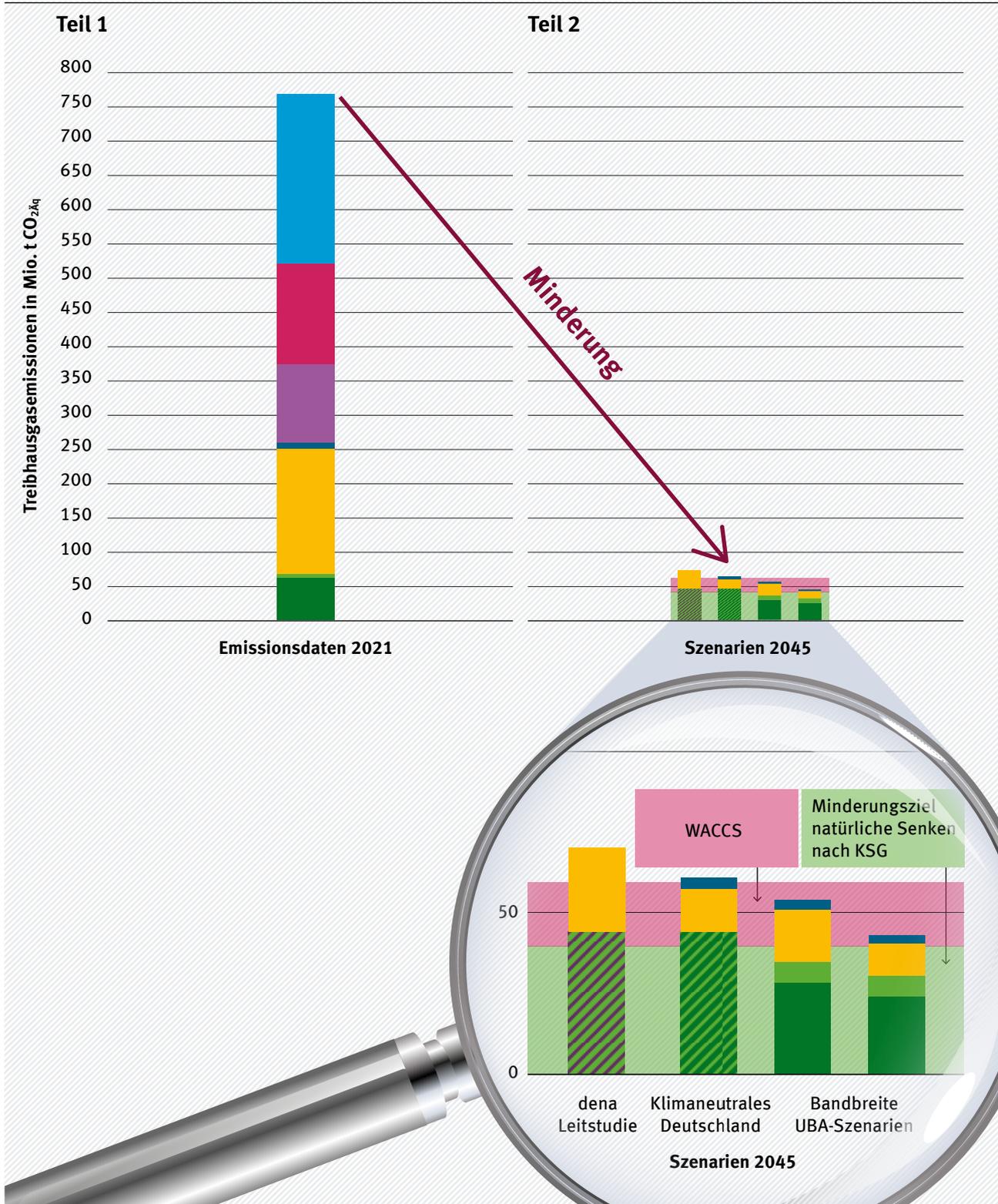
Mit dem Sektorziel von -40 Mio. t CO₂ im Bereich LULUCF ergibt sich mit der Kombination an thermischen Abfallbehandlungsanlagen eine potentielle Einspeicherungsmenge von rund 60 Mio. t CO₂.² Dabei handelt es sich vornehmlich um Negativemissionen (LULUCF und BECCS im Bereich Abfall). Gleichwohl ist zu bedenken, dass sich unter Intensivierung der Kreislaufwirtschaft und zunehmenden Recyclingquoten die CO₂-Emissionen thermischer Abfallbehandlungsanlagen bis 2045 im Vergleich zum Jahr 2021 reduzieren werden. Langfristig kann dennoch von ähnlich großen CO₂-Mengen ausgegangen werden. Zu bedenken ist, dass Kohlenstoff als Rohstoff benötigt wird und mehrfach genutzt werden sollte, sodass sich eine grundsätzliche Konkurrenz zwischen der Einspeicherung und Nutzung von CO₂ ergibt. Mit Blick auf die in Kapitel 3 dargestellte Bandbreite an unvermeidbaren Emissionen in Klimaschutzszenarien für Deutschland (Purr et al. 2019, dena 2021) wird deutlich, dass robuste Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden kann, siehe auch Abbildung 5. Szenarien am oberen Rand, mit weniger ambitionierter Umsetzung der Klimaschutzpolitik bedürfen weiteres Ausgleichs. Im Jahr 2021 entstanden rund 21,9 Mio. t. CO₂ bei der energetischen Nutzung fester Biomasse (vornehmlich Alt- und Restholz) (UBA 2023b). Mit Blick auf steigende Nachhaltigkeit, steigerungsfähige Kaskadennutzung und eine Kohlenstoffkreislaufwirtschaft wird sich dieses Potential möglicherweise verringern. Und dennoch wird auch hier langfristig Potential bestehen, weiteren Ausgleich der unvermeidbaren Emissionen oder Negativemissionen zu realisieren.

¹ Fossile Energieträger werden in der Stützfeuerungs eingesetzt.

² Ohne Berücksichtigung von Biogasanlagen oder der Nutzung von Brennholz.

Abbildung 5

Treibhausgasemissionen 2021 und Szenarien für 2045 in Deutschland sowie die Integration von BECCS und CCS in der Abfallwirtschaft



- Landwirtschaft
- LULUC
- Sonstige (Abfall & Abwasser)
- Landwirtschaft, LULUC, weitere Sektoren
- Industrie
- Verkehr
- Energiewirtschaft
- Landwirtschaft mit LULUC
- Gebäude

Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Gleichwohl sei darauf hingewiesen, dass Netto-Treibhausgasneutralität nur erreicht und dauerhaft erhalten werden kann, wenn alle Elemente einer nachhaltigen Transformation umgesetzt werden. Sektorübergreifende Ansätze zur Effizienz, Lebensstiländerung sowie der Erhalt und die Sicherung der natürlichen Kohlenstoffsenken kombiniert mit dem Ausbau des Holzproduktspeichers und grünen Polymeren in der chemischen Industrie (siehe Purr et al. 2019) sind unumgängliche Bausteine dafür.

Eine der großen Herausforderungen ist die gesellschaftliche Akzeptanz bei der Integration technischer Senken. Diese kann voraussichtlich schneller und mehrheitlich erreicht werden, wenn ergänzend zur transparenten Risikoabwägung (siehe Abbildung 1) glaubhaft das Festhalten am Vorsorgeprinzip und an einer ambitionierten Klimaschutzpolitik aufgezeigt wird.

Techniken zur Kohlenstoffgewinnung aus der Atmosphäre fördern

Auch in einer defossilisierten Wirtschaft wird Kohlendioxid als Rohstoffquelle für synthetische Kraftstoffe, eine treibhausgasneutrale Chemie oder Negativemissionen dauerhaft benötigt. Ein erheblicher Anteil dafür muss aus der Atmosphäre gedeckt werden (Purr und Garvens 2021). **Die Verfügbarkeit und zukünftig erforderliche großtechnische Anwendung von Direct Air Capture-Anlagen muss durch Forschung, Entwicklung sowie Demonstrations- und Pilotprojekte bereits heute erfolgen**, um dies mittel- und langfristig zu gewährleisten.

Förderung zur Kohlenstoffspeicherung breit und technologieoffen aufstellen

In den bisherigen Debatten spielt die Einspeicherung von Kohlendioxid eine dominante Rolle. Die damit einhergehenden Herausforderungen für Mensch und Umwelt sind in den nachfolgenden Kapiteln 2 und 5 aufgezeigt. Dabei bedarf es gerade bei dieser dauerhaften und langfristigen Herausforderung einer breiten und technologieoffen Fortentwicklung. **Die sichersten Kohlenstoffspeicher sind jene, die gar nicht erst der Natur entnommen werden.** Bei der Wiedereinspeicherung sollte auch hier die Natur Vorbild sein und neue Verfahren erforscht, erprobt und entwickelt werden, die feste synthetische Kohlenstoffverbindungen generieren. Generell bietet die Umwandlung von CO₂ in einen festen Aggregatzustand eine erhöhte Speichersicherheit bei der Einlagerung.

In der letzten Dekade lag der Fokus in der Klimapolitik auf der Energiewende, die Notwendigkeit von synthetischen Energieträgern, dort wo erneuerbarer Strom nicht direkt genutzt werden kann, galt es zu etablieren. Hier gilt es anzuknüpfen und vorausschauend für kommende Dekaden den Weg für (komplexe) feste synthetische Kohlenstoffverbindungen (bspw. Kohlenstoffpulver, Graphit u. ä.) mit atmosphärischem Kohlenstoff zu ebnen. Vereinzelt wird dies in der Forschung bereits aufgegriffen (Göbelbecker 2022).

Andere Forschungsaktivitäten bestehen zur sicheren Einlagerung von Kohlenstoff mittels beschleunigter Karbonatisierung in basischen Vulkaniten (Snæbjörnsdóttir et al. 2020, CDRmare 2023). Weiterer Forschungsbedarf besteht aber hinsichtlich der Umweltintegrität bei den Umwandlungsprozessen und hinsichtlich der Verfügbarkeit von Speichersteinen. Basische Vulkanite sind weltweit verbreitet, in Deutschland gibt es allerdings nur sehr kleine Vorkommen, die zum größten Teil schon anderweitig genutzt werden.

Insgesamt gilt es, breit und offen in die Forschung zur Umwandlung von CO₂ in einen festen Aggregatzustand zu investieren, um die Nachteile und Herausforderungen der Permanenz der Kohlendioxideinspeicherung zu meistern.

5 Leitplanken – Für ein Monitoring und Risikovorsorge als Grundvoraussetzungen für eine dauerhafte CO₂-Speicherung

Entlang der gesamten CCS-Prozesskette muss ein genaues Monitoring erfolgen, da bei der Abscheidung, beim Transport und bei der Speicherung CO₂ in die Atmosphäre entweichen kann. Eine geeignete Monitoringstrategie muss gleichermaßen den

Schutzgutbezug (Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit) und den Bilanzbezug (Nationale Treibhausgasinventare und Emissionshandel) beachten und dabei die administrativen und technischen Anforderungen berücksichtigen.

Rechtliche Vorgaben für CCS - Das hohe Schutzniveau der Umweltmedien im Kohlendioxidspeicherungsgesetz ist dringlich zu erhalten!

Für CCS im Meer wurden Anforderungen durch das London Protokoll 2006 und durch OSPAR 2008 (steht für „Oslo“ und „Paris“ und ist ein völkerrechtlicher Vertrag zum Schutz der Nordsee und des Nordostatlantiks) vereinbart. Danach ist das Verpressen von CO₂ in geologische Formationen im Meeresuntergrund zulässig, nicht aber die Speicherung in der Wassersäule. Rechtliche Grundlagen in der EU und in Deutschland sind die EU-CCS-Richtlinie von 2009 (EU-RL 2009/31/EC) und das Kohlendioxidspeicherungsgesetz von 2012. Nach letzterem sollen nur Erprobungs- und Demonstrationsvorhaben bis zu einem bestimmten Volumen zulässig sein. Entsprechende Anträge hätten bis Ende 2016 gestellt werden müssen, was aber – vor allem wegen Widerständen aus der Bevölkerung – nicht erfolgte. Aus dem Ablauf der Frist folgt, dass derzeit in Deutschland keine Erprobungs- und Demonstrationsvorhaben durchgeführt werden dürfen.

Das Kohlendioxidspeicherungsgesetz enthält für CCS angemessene Steuerungsansätze für ein hohes Schutzniveau für Mensch und Umwelt, diese sollte in keinem Fall abgemindert werden:

- ▶ Zunächst sollen nur Erprobungs- und Demonstrationsvorhaben erlaubt sein.
- ▶ Der dauerhafte und vollständige Verbleib von CO₂ in einem Speicher ist Voraussetzung für die Genehmigung und den Betrieb des Speichers.
- ▶ Die Maßnahmen bestimmen sich nach dem Stand von Wissenschaft und Technik.
- ▶ Negative Umweltwirkungen müssen vermieden werden.
- ▶ Es wird ein anspruchsvolles Monitoring vorausgesetzt, insbesondere auch im Hinblick auf die rechtlichen Rahmenbedingungen im Emissionshandel.
- ▶ Durch die Beteiligung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und des Umweltbundesamtes in den Zulassungsverfahren wird die Einbeziehung von Sachverstand sichergestellt.

Ein unabhängiges, genaues und stetig den Stand der Technik umfassendes Monitoring für CO₂-Speicher ist erforderlich

Die langfristige und genaue Überwachung der Speicherdichtigkeit ist Grundlage für eine rechtssichere Klärung der ordnungsrechtlichen Pflichten der Betreiber und der Haftungsfragen bei Havarien und Leckagen. Ein ausreichend genaues Monitoring entsprechend den genannten Anforderungen ist nicht realisierbar. **Die Speichersicherheit (keinerlei Austritt von CO₂ aus dem Speicherkomplex) kann nur indirekt über das Nichtauffinden von Leckagen ermittelt werden**, da die Gesamtmenge an CO₂ in einem geologischen Speicher nur sehr ungenau bestimmt werden kann. Beim Monitoring von Speichern sowie der Quantifizierung möglicher Leckagen sind die rechtlichen Vorgaben im Emissionshandelssystem unbedingt zu beachten.

Eine kontinuierliche Überwachung berücksichtigt mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt im Umfeld des Speicherkomplexes. Maßgeblich für eine umweltfachliche Beurteilung muss eine auf Monitoringdaten gestützte Analyse der Auswirkung der Kohlendioxid-speicherung auf die verschiedenen Schutzgüter sein. Der Einsatz von Tracern kann dabei eine klare Zuordnung von Quellen erleichtern und ermöglicht eine Unterscheidung von der CO₂-Hintergrundkonzentration, um so auch mehrere Kilometer entfernt von Speichern Undichtigkeiten zu erfassen und zuordnen zu können.

Eine Überwachung ist auch über die Stilllegungs- und die Nachsorgephase hinaus fortzuführen und kontinuierlich an den neusten Stand der Technik anzupassen. Mit Blick auf die Verantwortung im Rahmen des Klimaschutzes sollte das Monitoring der Speichersicherheit als hoheitliche Aufgabe geregelt werden. Wobei die Kosten dafür bei der Einspeicherung mit zu generieren sind.

Die Langzeit-Speichersicherheit ist nicht vorhersagbar

Bei der Speicherung von CO₂ besteht aufgrund der außerordentlich langen Einlagerungszeiträume eine große Unsicherheit über den Umfang der Wiederaufnahme von CO₂ in die Umwelt. Die Speicherung von CO₂ erfolgt in geologischen Strukturen, bisher fast ausschließlich unter sehr hohem Druck in einem überkritischen Aggregatzustand, d. h. in fluiden Form. Möglich ist eine Speicherung untertägig an Land

und unter dem Meer. Für die Einspeicherung können salzwasserführende Gesteinsschichten oder ausgeförderte Gas- und Ölfelder genutzt werden. **Die Wahl eines geeigneten Standorts ist von zentraler Bedeutung für die Speichersicherheit.** Das Deckgebirge eines CO₂-Speichers muss als wirksame Barriere funktionieren, Leckagerisiken können dabei nicht ausgeschlossen werden. **Ein Austritt von CO₂ kann durch das Deckgebirge entlang von Störungs-zonen oder Bohrungen erfolgen.** Durch entsprechendes Druckmanagement im Speicher und verbleibender großer Sicherheitsreserven können die Freisetzungsmengen und damit die Folgen eines möglichen Blow-outs, bei dem keine Interventionsmöglichkeiten bestehen, begrenzt werden. Sicherheitsreserven sind daher stets bei der Standortwahl zu berücksichtigen und großzügig zu kalkulieren.

Von der langfristigen Dichtheit von Altbohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie kann nicht sicher ausgegangen werden. Dies gilt auch für kohlenäsureisistente geplante Bohrungen, denn **„bei Anforderungen für die sichere Einlagerung über einen Zeitraum von größer 1.000 Jahren liegen keinerlei Erfahrungswerte vor“** (von Goerne 2010). Bestehende Erfahrungen mit CO₂-Speicherung belegen nicht die Speichersicherheit, da die beteiligten Prozesse sehr langsam ablaufen und wenige Dekaden keinen ausreichenden Beobachtungszeitraum für die Langzeitsicherheit eines Speichers darstellen. **Simulationen, die auch als Grundlage für die Genehmigung eines Speichers dienen, prognostizieren einen Verbleib des Kohlendioxids in geologisch geeigneten Speichern über einen Zeitraum von etwa 10.000 Jahren. Gleichzeitig stellt das Fehlen empirischer Daten über das Verhalten von CO₂ und über das Langzeitverhalten stillgelegter Bohrlöcher als möglicher Austrittspfad für CO₂ die größte Unsicherheit für die Prognose der Speicherdichtigkeit dar** (Alcalde et al. 2018).

Trotz langjähriger Erfahrung ist z. B. die Langzeitsicherheit des norwegischen CO₂-Speichers Sleipner nicht nachgewiesen. Als Speicherschichten werden hier geologisch gesehen sehr junge „Lockersedimente“ genutzt, die ein hohes Risiko für Leckagen haben. Messungen zur Mengenbestimmung können bei Sleipner nur ca. 80 bis 85 % des eingespeicherten CO₂ nachweisen und mathematische Modelle können diese Ungenauigkeit nicht ausgleichen.

Global und generationsübergreifend bei der Kohlenstoffspeicherung denken

Angesichts der globalen und gemeinschaftlichen Aufgabe des Klimaschutzes ist der Einstieg in die technischen Senken bei gleichzeitig fortwährender Vernichtung des globalen natürlichen Senkenpotenzials und Entnahme von CO₂ aus dem Boden in Form der fossilen Energieträger zu hinterfragen. Eine gesamtsystemische Lösung für weltweit nachhaltigen Klimaschutz ist anzustreben.

Die derzeit in den politischen Debatten zu CCS favorisierte Einspeicherung von Kohlenstoffdioxid außerhalb Deutschlands und die damit einhergehende Verlagerung sämtlicher Herausforderungen und Probleme ins Ausland entbinden Deutschland nicht von seiner Verantwortung. Zumal ggf. eine große räumliche Distanz bis zum Speicherort bestehen würde, was die Kosten zusätzlich erhöht und die Machbarkeit senkt (IPCC 2022). Im Umgang mit der Einspeicherung deutscher Residualemissionen im Ausland müssen daher auch dort die hohen Anforderungen des nationalen Schutzniveaus entsprechend dem Kohlendioxidspeicherungsgesetz gewährleistet werden, beispielsweise durch zusätzliche verbindliche Vereinbarungen mit den Partnerländern.

Wenig Berücksichtigung findet in den bisherigen politischen Debatten die gesellschaftliche Akzeptanz vorort zu CCS-Projekten an sich, aber noch viel mehr zur Einspeicherung ausländischer Residualemissionen. Bei den Projekten in Deutschland kam es zu großem lokalem Widerstand sowohl bei Bürger*innen der Region als auch bei Vertreter*innen verschiedener gesellschaftlicher Gruppen (BT-Drs. 19/6891). Und auch im 6. Sachstandsbericht des IPCC wird darauf hingewiesen, dass Befragte, denen neutrale Informationen zu CCS vorgelegt wurden, andere Klimaschutzmaßnahmen wie Erneuerbare Energien und Energieeffizienzmaßnahmen präferierten (IPCC 2022). Für eine robuste Senkenstrategie ist daher die gesellschaftliche Akzeptanz zwingend kritisch zu berücksichtigen.

Mit Blick in die weite Zukunft und die Dauerhaftigkeit von anthropogenen unvermeidbaren Treibhausemissionen gilt es auch, Freiheitsgrade für zukünftige Generationen zu erhalten und mögliche Speicherpotenziale nicht für leicht vermeidbare fossile Emissionen zu verschwenden.

Die langfristige Verantwortlichkeit für CO₂-Speicher beinhaltet erhebliche Risiken – diese sind von Beginn an zu berücksichtigen

Die Verantwortung für einen Speicher geht nach den gegenwärtigen Regelungen nach der Betriebsphase und anschließender Stilllegung sowie einem Ablauf von 40 Jahren auf das jeweilige Bundesland über, wenn „nach dem Stand von Wissenschaft und Technik die Langzeitsicherheit des Kohlendioxidspeichers gegeben ist und der Betreiber einen Nachsorgebeitrag [...] geleistet hat.“ (§ 31 Abs. 2 KSpG). Damit ist **die Dauer der Verantwortung durch den Betreiber in Relation zur gesamten Verwahrungszeit**

sehr kurz bemessen. Potenzielle Risiken können aber erst nach Ablauf langer Zeiträume hinreichend eingeschätzt werden, liegen dann bei der Allgemeinheit und bergen für zukünftige Generationen eine erhebliche Unsicherheit, wie z. B. finanzielle Sanierungsrisiken. Diese Risiken sind bereits frühzeitig beim Erschließen und Genehmigen zu berücksichtigen und die möglichen Kosten zukünftiger Generationen als Preisbestandteil der Einspeicherungskosten zu berücksichtigen.

6 Zusammenfassung

Die Hoffnungen, die von einigen Akteur*innen mit der CCS-Technologie verbunden werden, können klimapolitische Versäumnisse kaschieren, aber nicht reparieren. Es besteht die Gefahr, dass das Potenzial von CCS erheblich überschätzt, Alternativen vernachlässigt und dadurch die sonstigen generationsübergreifenden Aufgaben und Herausforderungen im Klimaschutz unterschätzt werden.

Daher sollte der etwaige Beitrag von CCS zur Rückhaltung von Treibhausgasen oder als Technologie für technische Senken zur Verminderung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre (CDR) entlang einer ambitionierten Klimaschutzpolitik und einer ambitionierten Entwicklung der natürlichen Senkenleistung ausgerichtet werden.

Bei ambitionierter sektorübergreifender Klimaschutzpolitik wird CCS in den nächsten Dekaden in Deutschland nur im geringen Maße oder gar nicht benötigt, aber es kann durchaus langfristig als Baustein im Ausgleich der residualen Emissionen und Negativemissionen relevant werden. Gleichwohl werden mit Blick auf die aktuelle Umsetzungsgeschwindigkeit beim Klimaschutz mit der Gefahr eines „Overshootings“ und auf das Zusteuern auf globale Kippunkte die Debatten über die Negativemissionen und technischen Senken intensiv geführt werden müssen. Dazu kann Deutschland einen konstruktiven Beitrag leisten.

Grundsätze für die Wahrung einer ambitionierten Klimaschutzpolitik

- ▶ Die Reduktion der Entstehung und der Freisetzung von Treibhausgasen muss oberste Priorität bleiben. Das folgt auch aus den Empfehlungen des Weltklimarats (IPCC 2023). Natürliche und technische Senken können global im besten Fall im Jahr 2050 4 Gigatonnen CO₂ aufnehmen. Der Rest der jährlichen CO₂-Emissionen in der aktuell zehnfachen Höhe von etwa 40 Gt CO₂ muss von vornherein verhindert werden. Technisch vermeidbare Emissionen dürfen also nicht durch scheinbar großzügig erscheinende Kompensationsmöglichkeiten (CCS-Kapazitäten) unterminiert werden. Daraus folgt ebenfalls, dass CCS aufgrund der beschränkten Speicherpotentiale nicht als Alternative zum Ausstieg aus den fossilen Energien fungieren kann.

- ▶ Verbleibende unvermeidbare Emissionen aus Landwirtschaft und Industrie müssen primär durch den Erhalt, die Sicherung und den Ausbau der natürlichen Senken ausgeglichen werden. CCS und technische Senken sollten nur ergänzend eingesetzt und auf unvermeidbare Prozessemissionen beschränkt werden.

Grundsätze für die Integration von CCS und technischen Senken in die Klimapolitik

- ▶ CCS ist kein Ersatz für Treibhausgasreduzierungen: Technische Maßnahmen zum reduzierten Treibhausgasausstoß und technische Senken können als Teil des Klimaschutzes verstanden werden, deren Einsatz gezielt und planvoll erfolgen muss, da ihre Verfügbarkeit knapp und Bereitstellung kostspielig ist. CCS kann als Baustein in den Klimaschutz integriert werden in dem Maße, wie zusätzlich zur Emissionsminderung und natürlicher Senkenkapazität Restemissionen ausgeglichen werden müssen. Lock-in-Effekte, Festhalten an fossilen Energien und fossilen Wirtschaftsmustern sowie verminderte Anreize zur Substitution durch alternative Prozesse und Produkte entlang der Wertschöpfungskette müssen dabei unterbunden werden.
- ▶ Getrennte Zielerfassung: In der Gesetzgebung ist eine getrennte Erfassung von sektorenbezogenen Zielen zur Minderung und Vermeidung bei der CO₂-Entstehung sowie von natürlichen und technischen Senkenzielen notwendig. Dies ist nicht nur für Treibhausgasneutralität, sondern auch mit Blick auf Ziele von Negativemissionen nach 2050 erforderlich. Die Zieltrias lautet wie folgt: 1. THG-Minderungsziele (ohne CCS) für die Sektoren der Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft sowie Abfall-, Abwasserwirtschaft und Sonstiges, 2. Ziele für die natürlichen Kohlenstoffbindungen und 3. Ziele für die technische Kohlenstoffbindung und Verminderung des Ausstoßes von residualen CO₂-Emissionen. Der Grundsatz der getrennten Erfassung dieser Ziele ist auch bei der Ausgestaltung klimapolitischer Instrumente zu beachten. Diese Zielarchitektur muss ermöglichen, eine transparente Erfolgskontrolle der Minderungs politik im natürlichen Klimaschutz sowie der Integration der technischen Senken zu erfassen.

- ▶ **Unvermeidbare Emissionen definieren:** Es bedarf einer klaren Definition der unvermeidbaren Emissionen, um die Notwendigkeit des Ausgleichs dieser residualen Emissionen zu ermitteln. Das muss gesetzlich geregelt werden, beispielsweise im Bundes-Klimaschutzgesetz. Mit Blick auf die stetigen Erkenntnisgewinne der Forschung muss bei der Regelung eine regelmäßige Nachsteuerung erfolgen, die dem technischen Fortschritt gerecht wird.
- ▶ **Speicherung von Kohlenstoff:** Mögliche Speicherkapazitäten für Kohlenstoffdioxid sollten effektiv für Negativemissionen genutzt werden. Die Einspeicherung von Kohlenstoff sollte nicht wie bisher nur auf Kohlendioxid ausgerichtet werden, sondern breiter und technologieoffen auch (komplexere) feste Kohlenstoffverbindungen einbeziehen, z. B. synthetisch gebundenen Kohlenstoff.
- ▶ **Wettbewerb um die beste Lösung:** Es sollten sektorübergreifende Mechanismen entwickelt werden, die eine Verknüpfung von sicheren und langanhaltenden natürlichen und technischen Senken einerseits und Treibhausgasemittenten unvermeidbarer Emissionen andererseits gewährleisten. Es braucht den Wettbewerb für die beste ökologische und ökonomische Lösung für den Ausgleich mit residualen Emissionen. Es ist stets ein integrierter Klimaschutz, d. h. die Hebung von Synergien mit anderen Umweltzielen zu verfolgen. Über ein gemeinsames Ausschreibungsmodell von natürlichen und technischen Senken könnte einerseits die dynamische Ausrichtung der technischen Maßnahmen nachrangig zu natürlichen Senken und andererseits eine sichere Zielerreichung der Treibhausgasneutralität ermöglicht werden.
- ▶ **Rechtsrahmen entwickeln:** Es bedarf eines „Genehmigungsfahrplans“, der die Anpassung des Rechtsrahmens für Genehmigung, Verantwortung und Haftung sowie Erfolgskontrolle für Klimaschutz, Sicherheit- & Anlagentechnik entlang der Prozesskette von CCS (Abscheidung, Transport und Lagerung) garantiert.

Vorschläge für die nationale Integration von CCS

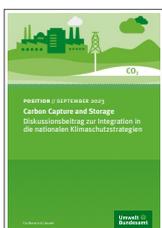
- ▶ **„Use Case“ WACCS:** CCS sollte dort integriert werden, wo keine der Natur neu entnommenen fossilen Energieträger genutzt und die größten Synergien gehoben werden. Dies ist am Ende einer langen Wertschöpfungskette der Fall und wo bereits heute, aber potenziell auch langfristig große Mengen Negativemissionen entstehen: an thermischen Abfallbehandlungsanlagen (WACCS). Die entstehenden Lock-in-Effekte sind gering und sind nicht mit dem Festhalten an fossilen Energien und fossilen Wirtschaftsmustern verbunden.
- ▶ **Erprobung:** CCS sollte an thermischen Abfallbehandlungsanlagen zeitnah erprobt werden. Bei diesem Anwendungsfall kann die langfristige Verfügbarkeit von CCS für technische Senken überprüft und für eine robuste Senkenstrategie mit Negativemissionen gewahrt bleiben. Da insbesondere die Klimawirkung unter besonderer Berücksichtigung dauerhafter Einspeicherung (Permanenz), möglicher Leckagen sowie des Energieaufwandes nachzuweisen ist, müssen sehr lange Beobachtungszeiträume vorgesehen werden.
- ▶ **Größenordnung:** In Kombination mit dem nationalen LULUCF-Sektorziel von 40 Mio. t CO₂ für 2045 ergibt sich eine mögliche Einspeicherungsperspektive in der Größenordnung von rund 60 Mio. t CO₂ (darunter auch Negativemissionen). Mit Intensivierung der Kreislaufwirtschaft und zunehmenden Recyclingquoten können die CO₂-Emissionen aus den thermischen Abfallbehandlungsanlagen bis 2045 im Vergleich zu heute geringer ausfallen. Langfristig kann dennoch von ähnlichen Größenordnungen ausgegangen werden.

- ▶ **Schutzstandards:** Der hohe Schutzstandard bestehender Regelungen in der europäischen CCS-Richtlinie (EU-RL 2009/31/EC) und dem deutschen Kohlendioxid-Speichergesetz (KSpG) muss erhalten bleiben, um negative Effekte auf Menschen und Umwelt sicher ausschließen zu können. Das Verbot der CO₂-Verbringung in die Wassersäule der Meere nach dem London Protokoll und OSPAR ist sinnvoll und notwendig, weil ein dauerhafter Verbleib im Wasser nicht gegeben ist. Eine sorgfältige Vorerkundung und ein wirksames langfristiges Monitoring (Überwachung und Speicherbilanzierung) müssen integraler Bestandteil der Implementierung von CCS sein. Es bedarf einer kontinuierlichen Überwachung möglicher Auswirkungen auf Menschen und Umwelt im Umfeld des Speicherkomplexes. Dabei sollte das Monitoring hoheitlich und unabhängig erfolgen, sowie über die Stilllegungs- und die Nachsorgephase hinaus fortgeführt werden.
- ▶ **Ausländische Einspeicherung:** Es darf nicht zu einer Verlagerung der umwelt- und klimapolitischen Herausforderungen ins Ausland kommen. Die Anforderungen für eine sichere und umweltgerechte Kohlenstoffspeicherung müssen auch für Speicherstätten deutscher Residualemissionen im Ausland gelten.
- ▶ **Speichermanagement:** Das Druckmanagement im Speicher ist so zu gestalten, dass große Sicherheitsreserven bleiben, da im Falle eines Blow-outs keine unmittelbaren Interventionsmöglichkeiten mehr bestehen. Für die eigentliche Überwachung während des Betriebes müssen standortspezifisch geeignete charakteristische Parameter bestimmt werden, anhand derer sich Migration, erhebliche Unregelmäßigkeiten oder Leckagen zweifelsfrei feststellen lassen. Dabei sind nicht nur Kohlendioxid bzw. seine Nebenbestandteile und die Verdrängung von Formationsfluid zu überwachen, sondern auch die Bildung neuer Stoffe und mögliche sonstige Sekundärwirkungen. Für das schutzgutbezogene Monitoring ist vorab großflächig der Ausgangszustand zu erfassen.
- ▶ **Haftung:** Es bedarf klarer Regelung der Haftungsfragen sowie einer konservativen Kalkulation der Kosten von CCS. Das Monitoring und ggf. Maßnahmen im Havariefall entlang der Prozesskette und für die gesamte Lagerungsdauer sind bereits als Preisbestandteil der CO₂-Einlagerung mit zu berücksichtigen. Für Ausgleichszahlungen von CO₂-Mengen, die nicht dauerhaft im Speicher nachgewiesen werden können, sind die Kosten zum Zeitpunkt des möglichen Entweichens anzusetzen.

7 Quellen

- Alcalde, J; Flude, S; Wilkinson, M; Johnson, G; Edlmann, K; Bond, C E; Scott, V; Gilfillan, S M V; Ogaya, X; Haszeldine, R S (2018): Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation. *Nature Communications*, 2018, 9:2201. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04423-1>
- Bisinella, V; Hulgaard, T; Riber, C; Damgaard, A; Christensen, T H (2021): Environmental assessment of carbon capture and storage (CCS) as a post-treatment technology in waste incineration. *Waste Management*, 2021, 128, S. 99–113
- BT-Drs. – Bundestagsdrucksache 19/6891 (21.12.2018): Evaluierungsbericht der Bundesregierung über die Anwendung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes sowie die Erfahrungen zur CCS-Technologie. Download unter: dserver.bundestag.de/
- BT-Drs. – Bundestagsdrucksache 20/5145 (22.12.2022): Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG). Download unter: dserver.bundestag.de/
- Cai, W-J; Xu, Y-Y; Feely, R A; Wanninkhof, R; Jönsson, B; Alin, S R; Leticia Barbero, L; Cross, J N; Azetsu-Scott, K; Fassbender, A J; Carter, B R; Jiang L-Q; Pepin, P; Chen, B; Hussain, N.; Reimer, J J; Xue, L; Salisbury, J E; Hernández-Ayón, J M; Langdon, C; Li, Q; Sutton, A J; Chen, C-T A; Gledhill, D K (2020): Controls on surface water carbonate chemistry along North American ocean margins. *Nature Communications* 11, 2691 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16530-z>
- CDRmare (2023): Policy Brief, Chancen und Hürden der marinen geologischen CO₂-Speicherung. CDRmare Research Mission, 14 pp. Download unter: <https://doi.org/10.3289/CDRmare.15>
- Deutsche Energie-Agentur (dena) (Hrsg.) (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Download unter: www.dena.de/
- ERK (2022): Zweijahresgutachten 2022. Gutachten zu bisherigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen, Trends der Jahresemissionsmengen und Wirksamkeit von Maßnahmen (gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz). Hrsg. v. Expertenrat für Klimafragen (ERK). Download unter: <https://expertenrat-klima.de/>
- EU-RL - Richtlinie 2009/31/EC über die geologische Speicherung von Kohlendioxid
- Fras, D (2019): So soll Europa bis 2050 erster klimaneutraler Kontinent werden. In: RedaktionsNetzwerkDeutschland. www.rnd.de/, Stand: 10.12.2019, Abgerufen am: 28.02.2023
- Göbelbecker, J (2022): Neue Versuchsanlage produziert Kohlenstoff aus Luft. Download unter: www.chemietechnik.de/ Stand: 06.12.2022, Abgerufen am: 08.05.2023
- Harvey, C; House, K (2022): Every Dollar Spent on This Climate Technology Is a Waste. In: MIT News, 17.08.2022. <https://cee.mit.edu/every-dollar-spent-on-this-climate-technology-is-a-waste/> Abgerufen am 09.05.2023
- IEEFA (2023): Norway's Sleipner and Snøhvit CCS: Industry models or cautionary tales? Hauber, G. Download unter: <https://ieefa.org/resources/norways-sleipner-and-snohvit-ccs-industry-models-or-cautionary-theses>. Abgerufen am 03.07.2023
- IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B; Davidson, O; de Coninck, H C; Loos, M; Meyer, L A (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp. Download unter: www.ipcc.ch/
- IPCC (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Masson-Delmotte, V; Zhai, P; Pörtner, H.-O; Roberts, D; Skea, J; Shukla, P.R; Pirani, A; Moufouma-Okia, W; Péan, C.; Pidcock, R.; Connors, S; Matthews, J.B.R; Chen, Y; Zhou, X; Gomis, M.I.; Lonnoy, E; Maycock, T; Tignor, M; Waterfield T (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V; Zhai, P; Pirani, A; Connors, S L; Péan, C; Berger, S; Caud, N; Chen, Y; Goldfarb, L; Gomis, M I; Huang, M; Leitzell, K; Lonnoy, E; Matthews, J B R; Maycock, T K; Waterfield, T; Yelekçi, O.; Yu, R; Zhou, B (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, [doi:10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).
- IPCC (2022): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Shukla, P R; Skea, J; Slade, R; Al Khouradje, A; van Diemen, R; McCollum, D; Pathak, M; Some, S; Vyas, P; Fradera, R; Belkacemi, M; Hasija, A; Lisboa, G; Luz, S; Malley, J (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- IPCC (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team; Lee, H; Romero, J (eds.) IPCC, Geneva, Switzerland
- KSG – Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019, zuletzt geändert durch Art. 1 G v.18.8.2021 I 3905 (Nr. 59). Download unter: [KSG.pdf \(gesetze-im-internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de/ksg.pdf)
- KSpG – Kohlendioxid-Speicherungsgesetz vom 17. August 2012 (BGBl. I S. 1726), das zuletzt durch Artikel 22 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist. Download unter: [KSpG.pdf \(gesetze im internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de/kspg.pdf)

- Li, Z; Fall, M; Ghirian, A (2018): CCS Risk assessment: Groundwater contamination caused by CO₂. *Geosciences*, 2018, 8, S. 397. <https://doi.org/10.3390/geosciences8110397>
- Maček, I V U; Kastelec, D; Stopar, D; Vodnik, D (2009): Geological CO₂ affects microbial respiration rates in Stavešinci mofette soils. *Acta Biologica Slovenica*, 2009, 52, S.41-48
- Markus, T; Schaller, R; Gawel, E; Korte, K (2021): Negativemissionstechnologien als neues Instrument der Klimapolitik: Charakteristiken und klimapolitische Hintergründe. *Natur und Recht*, 2021, 43, S. 90–99. <https://doi.org/10.1007/s10357-021-3804-8>
- PM – Pressemitteilung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz vom 05.01.2023: Norwegen und Deutschland verstärken Energiekooperation auf dem Weg zur Klimaneutralität. www.bmwk.de/, Abgerufen am: 23.02.2023
- Polansky, M (2023): CO₂ speichern wie Norwegen? In: tagesschau, Online. www.tagesschau.de/, Stand: 05.01.2023, Abgerufen am: 28.02.23
- Purr, K; Garvens H-J (2021): Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization. Hintergrund. Dessau-Roßlau. Download unter: www.umweltbundesamt.de/
- Purr, K; Günther, J; Lehmann, H; Nuss, P (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. Studie. Dessau-Roßlau. Download unter: [Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung. Download unter: www.umweltbundesamt.de/](http://www.umweltbundesamt.de/)
- Reise, J; Siemons, A; Böttcher, H; Herold, A; Urrutia, C; Schneider, L; Iwaszuk, E; McDonald, H; Freluh-Larsen, A; Duin, L; Davis, M (2019): Nature-based solutions and global climate protection - Assessment of their global mitigation potential and recommendations for international climate policy. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. *Climate Change 01/2022*. Dessau-Roßlau. Download unter: www.umweltbundesamt.de/
- Snæbjörnsdóttir, S Ó; Sigfússon, B; Marieni, C; Goldberg, D; Gislason, S R; Oelkers, E H (2020): Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1, S. 90-102. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>
- SPD; BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag zwischen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP. Berlin. Download unter: www.bundesregierung.de/
- Stange, C F; Duijnisveld, W H M (2011): Mediale Anforderungen des Bodenschutzes an die Speicherung von CO₂ bei CCS-Maßnahmen. Im Auftrag des Umweltbundesamts. FKZ 370972204
- Stange, C F; Duijnisveld, W H M (2013): Entwicklung von praktikablen Schwellenwerten für das Schutzgut Boden bei der untertägigen Speicherung von CO₂. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ 3711 72 226
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Dessau. Download unter: [Projektionsbericht 2021 für Deutschland \(umweltbundesamt.de\)](http://www.umweltbundesamt.de/)
- Umweltbundesamt (2023a): Emissionsübersichten in Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes aus dem Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2021 zur Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2023; Umweltbundesamt; Stand EU-Berichterstattung 15.01.2023. Download unter: www.umweltbundesamt.de/, Abgerufen am: 23.02.2023
- Umweltbundesamt (2023b): Sonderauswertung zu Kohlendioxid aus Biomasse basierend auf der Treibhausgasemissionsberichterstattung an die Europäische Kommission unter der EU Governance Verordnung 1990-2021; Stand 15.03.2023
- von Goerne, G; Weinlich, F H; May, F (2010): Anforderungen und Vorschläge zur Erstellung von Leitfäden und Richtlinien für eine dauerhafte und sichere Speicherung von CO₂. Im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR. Hannover. Download unter: [stability-abschlussbericht.pdf \(www.bgr.bund.de/\)](http://www.bgr.bund.de/)
- Voß-Stemping, J; Schultz, K; Purr, K (2022): Technische Negativemissionen: Ist die klimapolitische Zielarchitektur der Bundesregierung fit for purpose?. Dessau-Roßlau. Download unter: www.umweltbundesamt.de/
- Warszawski, L; Kriegler, E; Lenton, T M; Gaffney, O; Jacob, D; Klingensfeld, D; Koide, R; Máñez Costa, M; Messner, D; Nakicenovic, N; Schellnhuber, H J; Schlosser, P; Takeuchi, K; Van Der Leeuw, S; Whiteman, G; Rockström, J (2021): All options, not silver bullets, needed to limit global warming to 1.5 °C: a scenario appraisal. *Environmental Research Letters* 2021, 16 (9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfeec>
- Zoback, M D; Gorelick, S M (2012): Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Science* 2012, 109 (26), S. 10164-10168. <https://doi.org/10.1073/pnas.1202473109>



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/