



75 Jahre
Demokratie
lebendig



Deutscher Bundestag
Wissenschaftliche Dienste

Dokumentation

Methoden des Kohlenstoffmanagements

Kohlenstoffabscheidung, -wiederverwendung und -speicherung

Methoden des Kohlenstoffmanagements

Kohlenstoffabscheidung, -wiederverwendung und -speicherung

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 111/24
Abschluss der Arbeit: 11.09.2024
Fachbereich: WD 5: Wirtschaft, Energie und Umwelt

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
2.	Kohlenstoffmanagement	5
2.1.	Technologien und Methoden	8
2.1.1.	Abscheidung	8
2.1.2.	Wiederverwendung	9
2.1.3.	Speicherung	9
3.	Ausgewählte Literatur	11
3.1.	A. M. Bukar, M. Asif: Technology readiness level assessment of carbon capture and storage technologies, in: Science Direct, Vol. 200, 114578 (2024).	11
3.2.	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024).	11
3.3.	A. Kharissova et al.: Carbon negative footprint materials: A review, in: Nano-Structures & Nano-Objects, Vol. 37, 101100 (2024).	12
3.4.	A. Goren, D. Erdemir, I. Dincer: Comprehensive review and assessment of carbon capturing methods and technologies: An environmental research, in: Environmental Research, Vol. 240, 117503 (2024).	12
3.5.	K. Zhao et al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023).	13
3.6.	B. Dziejarski, R. Krzyżyńska, K. Andersson: Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment, in: Fuel, Vol. 342, 127776 (2023).	14
3.7.	T. Wich, W. Lueke, G. Deerberg, M. Oles: Carbon2Chem® – CCU as a Step Toward a Circular Economy, in: Frontiers in Energy Research, 7:162 (2020).	14
3.8.	J. M. Matter et al.: Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions, in: Science, Vol. 352, Issue 6291 (2016).	15
3.9.	G. Rochelle: Amine Scrubbing for CO ₂ Capture, in: Science, Volume 325, S. 1652 – 1654 (2009).	15
3.10.	Weiterführende Literaturhinweise	15
4.	Anwendung und Forschung	16
4.1.	Forschungsprojekte	16
4.2.	Kommerzielle Anwendungen	17

5.	Informationen aus Publikationen des Deutschen Bundestages und Ministerien	17
5.1.	Parlamentarische Vorgänge	17
5.2.	Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages	17
5.3.	Publikationshinweise der Bundes- und Landesministerien und ihnen untergeordnete Behörden	17
6.	Verbände: ausgewählte Internethinweise	18

1. Einleitung

Mit dem Ziel, möglichst wenig CO₂ in die Atmosphäre zu bringen, wird neben Strategien der Energieeffizienzsteigerung und der Substitution durch erneuerbare Energieträger auch auf Kohlenstoffmanagement-Technologien zur Abscheidung und Speicherung oder stofflichen Nutzung von CO₂ gesetzt (sogenannten CCUS-Technologien: Carbon Capture, Usage and Storage).¹

Die vorliegende Arbeit listet Literatur zu Verfahren der Kohlenstoffabscheidung, -wiederverwendung und -speicherung auf. Die Technologien werden zu Beginn überblicksartig dargestellt und Kernaussagen ausgewählter Quellen zusammengefasst. Zudem werden für ausgewählte Technologieformen Projekte vorgestellt und der Stand der Entwicklung angegeben.

Nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist der Transport von CO₂. Ebenfalls nicht im Detail behandelt wird Carbon Dioxide Removal (CDR). Die wissenschaftlichen Dienste haben sich bereits im Jahr 2018 mit den technischen Aspekten von CCS beschäftigt.² Der rechtliche Rahmen der Kohlenstoffspeicherung wird in einer weiteren Arbeit der wissenschaftlichen Dienste dargelegt.³

2. Kohlenstoffmanagement

Kohlenstoffmanagement (auch „Carbon Management“) ist der Oberbegriff für Verfahren, die verhindern, dass entstandenes CO₂ in die Atmosphäre gelangt, oder CO₂ aus der Atmosphäre entfernen, oder Kohlenstoffdioxid zur Produktherstellung klimaneutral bereitstellen.⁴ Somit umfasst das Kohlenstoffmanagement die drei Bausteine

- (1) der CO₂-Abscheidung und Speicherung,
- (2) der Entnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre sowie

¹ Werden CO₂-Emissionen in bestimmten Bereichen bzw. Prozessen abgeschieden und anschließend genutzt spricht man von engl. Carbon Capture and Utilization, CCU, werden sie hingegen nach Abscheidung dauerhaft gespeichert, bspw. in tiefliegenden geologischen Gesteinsschichten, spricht man von engl. Carbon Capture and Storage, CCS.

² Wissenschaftliche Dienste: Erkenntnisse aus der Erprobung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und CO₂-Speicherung (CCS) in Deutschland, WD 8 – 3000 – 055/18 (2018), <https://www.bundestag.de/resource/blob/567342/f356ac5bb411dca92e8a18c8c3037c28/WD-8-055-18-pdf-data.pdf>.

³ Wissenschaftliche Dienste : Rechtlicher Rahmen für die Abscheidung, den Transport und die Speicherung von Kohlendioxid (CO₂), WD 5 – 3000 – 113/24 (2024).

⁴ Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024), S. 9 https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_E-SYS_Impuls_Kohlenstoffmanagement.pdf.

(3) der Nutzung von CO₂.⁵

Die Abscheidung und Speicherung von CO₂ wird auch **Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS)** genannt.⁶ Mit **CCS** wird das Ziel verfolgt, das beim Einsatz fossiler Energieträger im Kraftwerk sowie das aus Industrieprozessen prozessbedingt entstehende CO₂ nicht in die Atmosphäre gelangen zu lassen, um zu verhindern, dass es als Treibhausgas maßgeblich auf den Klimawandel wirken kann.⁷

Die **Entnahme** von CO₂ aus der Atmosphäre wird auch als **Carbon Dioxide Removal (CDR)** bezeichnet.⁸ Dabei können im Verbund mit der Kohlenstoff- oder Kohlendioxidspeicherung sogenannte negative Emissionen entstehen.⁹

Carbon Dioxide Capture and Utilization (CCU) bezeichnet die **Nutzung** von CO₂.¹⁰ Genutzt wird CO₂, das von Anlagen abgedehnt oder aus der Atmosphäre entnommen wurde.¹¹ Es wird bei

-
- 5 Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024), S. 9 https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_E-SYS_Impuls_Kohlenstoffmanagement.pdf.
- 6 Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024), S. 9 https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_E-SYS_Impuls_Kohlenstoffmanagement.pdf.
- 7 Wissenschaftliche Dienste: Erkenntnisse aus der Erprobung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und CO₂-Speicherung (CCS) in Deutschland, WD 8 – 3000 – 055/18 (2018), S. 4, <https://www.bundestag.de/resource/blob/567342/f356ac5bb411dca92e8a18c8c3037c28/WD-8-055-18-pdf-data.pdf>.
- 8 Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024), S. 9 https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_E-SYS_Impuls_Kohlenstoffmanagement.pdf.
- 9 Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024), S. 9 https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_E-SYS_Impuls_Kohlenstoffmanagement.pdf.
- 10 Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024), S. 9 https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_E-SYS_Impuls_Kohlenstoffmanagement.pdf.
- 11 Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024), S. 9 https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_E-SYS_Impuls_Kohlenstoffmanagement.pdf.

der Herstellung kohlenstoffhaltiger Produkte anstelle von neu geförderten fossilen Ressourcen (bspw. Erdöl oder Erdgas) verwendet.¹²

In seinem neuesten Bericht geht der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, **IPCC**) davon aus, dass CCS und CDR in Sektoren mit schwer oder gar nicht vermeidbaren Emissionen ergänzend zu Minderungsmaßnahmen angewandt werden müssten, um die CO₂-Emissionen auf netto-null zu begrenzen.¹³ Insbesondere die Anwendung von CDR sei in allen 1,5 Grad Celsius-Szenarien notwendig, um die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen; was dem Pariser Klimaziel¹⁴ entspräche.

Mit dem Ziel, Treibhausgase zu vermeiden und aus der Nutzung fossiler Energien auszusteigen, beschloss die Bundesregierung 2024 in ihrer **Carbon-Management-Strategie**¹⁵ die Ermöglichung von CCS und CCU. Die Anwendung der Technologien soll in den Fällen schwer oder nicht vermeidbarer Prozessemissionen zugelassen werden. Betroffen seien insbesondere die sogenannten no-regret-Sektoren Kalk, Zement und thermische Abfallbehandlung. In diesen Bereichen sei die CO₂-Neutralität ohne die Anwendung von CCS und CCU auch dann nicht denkbar, wenn bereits ambitionierte Ansätze zur Kreislaufwirtschaft, Recycling, Nutzung alternativer Baustoffe und Abfallvermeidung angenommen würden. Für die Kohleverstromung solle die Anwendung von CCS und CCU aufgrund des gesellschaftlichen Konsenses zum Kohleausstieg nicht ermöglicht werden.

Hinsichtlich der Herausforderungen, die sich bei der Einführung einer CO₂-Abscheidungs- und Filterungstechnologie ergeben verweist Prof. Deerberg insbesondere darauf, dass aufgrund der Tatsache, dass industriellen Abgase Gasgemische seien, zunächst eine Aufreinigung erfolgen müsse, da ansonsten Filter verstopften. Insgesamt sei eine derartige Filteranlage eine eigene Industrieanlage, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden müsse. Prinzipiell könne CO₂ zwar auch der Atmosphäre entnommen werden, die Konzentration betrage dort aber nur 0,04 %, während sie in Schornsteinen bei 10-20% liege.¹⁶

-
- 12 Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024), S. 9 https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_E-SYS_Impuls_Kohlenstoffmanagement.pdf.
- 13 IPCC: Climate Change 2023, Synthesis Report (2023), S. 21, https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf.
- 14 BT-Drs. 19/9650 v. 20. September 2016, Art. 2 Abs. 1 lit. a des Übereinkommens von Paris, S. 8, <https://dserver.bundestag.de/btd/18/096/1809650.pdf>.
- 15 BT-Drs. 20/11585 v.- 03. Juni 2024, <https://dserver.bundestag.de/btd/20/115/2011585.pdf>.
- 16 Persönliche Informationen Prof. Dr.-Ing. Görge Deerberg. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Ergonomie UMSICHT vom 1. August 2024.

2.1. Technologien und Methoden

Zur Abscheidung, Wiederverwendung und Speicherung von CO₂ wurden verschiedene Technologien und Methoden entwickelt. Eine Auswahl dieser wird überblicksartig dargestellt.

2.1.1. Abscheidung

Eine Technologie zur **Abscheidung** von CO₂ ist **Pre-Combustion** Carbon Capture. Darunter versteht man den Prozess der Abscheidung von Kohlendioxid mit physikalischen Wäschen aus einem Brenngas, bevor es bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre gelangt.¹⁷

Post-Combustion Carbon Capture ist eine Technologie, die Kohlendioxid aus den Abgasen eines Energieerzeugungs- oder Industrieprozesses durch eine chemische Wäsche entfernt, nachdem der fossile Brennstoff verbrannt wurde.¹⁸

Unter dem **Oxyfuel-Combustion**-Verfahren wird die Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen unter einer Sauerstoffatmosphäre verstanden, wodurch sich ein Rauchgas aus CO₂ und Wasserdampf ergibt, aus dem lagerfähiges CO₂ durch einfache Trocknung gewonnen wird.¹⁹ Gegenüber Rauchgasen aus konventionellen Kohlekraftwerken liegt der Anteil des CO₂ im Rauchgas bei Oxyfuel-Anlagen bei knapp 90 %.²⁰

Die **Chemical-Looping**-Verbrennung ist eine Technologie zur Kohlenstoffabscheidung, bei der ein fester Sauerstoffträger verwendet wird, um Sauerstoff von einem Luftstrom auf einen Brennstoffstrom zu übertragen und so die Verbrennung zu erleichtern, während der direkte Kontakt zwischen Luft und Brennstoff verhindert wird. Das Verfahren führt zu getrennten Strömen von Kohlendioxid und Stickstoff, was die CO₂-Abscheidung vereinfacht, und eine effiziente Trennung ermöglicht.²¹

Bei der direkten Abscheidung von Kohlendioxid aus der Luft (**Direct Air Capture**, DAC) wird Kohlendioxid in der Regel mit Hilfe von Gebläsen in das Direktabscheidungssystem gesaugt und

17 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 5, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.

18 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 6, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.

19 Wissenschaftliche Dienste: Erkenntnisse aus der Erprobung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und CO₂-Speicherung (CCS) in Deutschland, WD 8 – 3000 – 055/18 (2018), S. 11, <https://www.bundestag.de/resource/blob/567342/f356ac5bb411dca92e8a18c8c3037c28/WD-8-055-18-pdf-data.pdf>.

20 Wissenschaftliche Dienste: Erkenntnisse aus der Erprobung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und CO₂-Speicherung (CCS) in Deutschland, WD 8 – 3000 – 055/18 (2018), S. 11, <https://www.bundestag.de/resource/blob/567342/f356ac5bb411dca92e8a18c8c3037c28/WD-8-055-18-pdf-data.pdf>.

21 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 6, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.

so direkt aus der Umgebungsluft entfernt.²² Das Hauptziel von DAC ist es, die Gesamtkonzentration von CO₂ in der Atmosphäre zu verringern.²³

2.1.2. Wiederverwendung

Eine **Wiederverwendung** von CO₂ kann insbesondere in der Landwirtschaft auf verschiedene Weisen stattfinden. Bei der beschleunigten Verwitterung wird zerkleinertes Silikatgestein auf landwirtschaftliche Böden aufgebracht, das mit CO₂ aus der Atmosphäre reagiert und stabile Karbonatminerale bildet.²⁴ Praktiken wie die regenerative Landwirtschaft setzen auf Anbaumethoden wie Permakultur und ganzheitliches Weidemanagement.²⁵

Zur Herstellung von **Kraftstoffen** und **Chemikalien** können CO₂-Emissionen mit Hilfe von Katalysatoren, Enzymen oder Strom in chemische Verbindungen und Kraftstoffe umgewandelt werden.²⁶

In der **Bauindustrie** können entweder alternative Baumaterialien wie Biokohle eingesetzt werden, oder die Zusammensetzung von Baumaterialien verändert werden. Herkömmliche Bestandteile des Betons können bspw. durch Karbonate ersetzt werden, die durch die Umsetzung von abgeschiedenem CO₂ mit natürlichen Mineralien wie Olivin entstehen.

2.1.3. Speicherung

Bei der **geologischen** Speicherung wird Kohlendioxid in geologische Formationen eingeleitet, z. B. erschöpfte Öl- und Gaslagerstätten, salzhaltige Aquifere oder tiefe unterirdische Kohleflöze und dort dauerhaft gespeichert.²⁷

-
- 22 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 6, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.
- 23 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 6, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.
- 24 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 18, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.
- 25 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 17, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.
- 26 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 6, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.
- 27 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 20, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.

Unterschiedliche Verfahren der **Kohlenstoffmineralisierung** ermöglichen die Umwandlung von CO₂ in stabile Mineralien auf Karbonatbasis, wodurch dieses Gas aus der Luft gebunden und in eine geologische Form umgewandelt wird, die für unbestimmte Zeit bestehen kann.²⁸

Die **terrestrische** Speicherung, auch terrestrische Kohlenstoffsequestrierung genannt, ist ein Prozess der Abscheidung von CO₂-Emissionen aus industriellen Quellen und die Speicherung von Kohlendioxidemissionen in terrestrischen Ökosystemen wie Wäldern, Grasland und Feuchtgebieten.²⁹ Die Bindung von CO₂ erfolgt durch das Wachstum und die Speicherung von Pflanzen und wird mittels Landnutzungspraktiken wie Aufforstung, nachhaltige Waldbewirtschaftung und Wiederherstellung von Feuchtgebieten erreicht, die die Menge an Biomasse und gespeichertem Kohlenstoff in terrestrischen Ökosystemen erhöhen.³⁰

Bei der „**CO₂ enhanced oil recovery**“ (CO₂-EOR) und der „**CO₂ enhanced gas recovery**“ (CO₂-EGR) handelt es sich um Technologien, bei denen Kohlendioxid in Kohlenwasserstofflagerstätten injiziert wird, um die Gewinnung von Öl bzw. Erdgas zu verbessern. Zugleich wird CO₂ im Untergrund gespeichert.³¹

Die Kohlenstoffbindung im **Ozean** erfolgt durch Injektion von CO₂ in die Tiefsee und Speicherung in Form von flüssigen CO₂-Seen.³² Andere Varianten der Kohlenstoffbindung im Ozean erfolgen mittels gelöstem Gas oder festen Hydraten.³³ Momentan ist die Kohlenstoffbindung im Ozean nach deutschem Recht weder auf deutschem Hoheitsgebiet noch in den Küstenmeeren anderer Staaten oder auf Hoher See zugelassen.³⁴

-
- 28 A. Kharissova, O. Kharissova, B. Kharisov et al.: Carbon negative footprint materials: A review, in: Nano-Structures & Nano-Objects, Vol. 37, 101100 (2024), S. 6, <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101100>.
- 29 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 22, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.
- 30 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 22, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.
- 31 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 6, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.
- 32 B. Dziejarski, R. Krzyżyńska, K. Andersson: Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment, in: Fuel, Vol. 342, 127776, S. 31 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>.
- 33 K. Zhao, C. Jia, Z. Li et. al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023), S. 23, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.
- 34 Siehe dazu Wissenschaftliche Dienste: Rechtlicher Rahmen für die Abscheidung, den Transport und die Speicherung von Kohlendioxid (CO₂), WD 5 – 3000 – 113/24 (2024), S. 7 ff., 14.

3. Ausgewählte Literatur

Im Folgenden wird in chronologischer Reihenfolge nach dem Zeitpunkt ihres Erscheinens eine Auswahl an Literatur aufgeführt, die sich mit den Technologien und Methoden von CCS und CCU beschäftigt und sowohl Erfahrungen als auch geplante Projekte weltweit vorstellt. Für jede Literaturquelle erfolgt eine kurze Zusammenfassung des Inhalts. Die Auswahl der Literatur dient dem Überblick und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

- 3.1. A. M. Bukar, M. Asif: Technology readiness level assessment of carbon capture and storage technologies, in: Science Direct, Vol. 200, 114578 (2024).³⁵

In der Überblicksarbeit werden verschiedene CCS-Technologien verglichen und bewertet. Dabei werde die Bewertung des **Technology Readiness Levels** (TRL) der Technologien mit Hilfe eines vielschichtigen Ansatzes durchgeführt, der eine Literaturrecherche, Technologieidentifizierung, Datensammlung, TRL-Zuordnung, Expertenbefragung und vergleichende Analyse umfasse. Zu diesem Zweck seien 79 CCS-Projekte aus der Literatur analysiert worden, um Trends der CCS-Industrie zu erkennen.

Als Ergebnis der Analyse hielten die Autoren fest, dass Pre- und Post-Combustion Capture mit einem TRL von 9 ausgereifte Technologien zur Kohlenstoffabscheidung seien. Die „enhanced oil recovery“ (EOR) sowie die Speicherung in salinen Aquiferen seien kommerziell einsetzbare CO₂-Speicherungstechnologien mit einem TRL 9. Weiterhin ziehen die Autoren das Fazit, dass Post-Combustion Capture und EOR die jeweils **beliebtesten** Technologien zur Abscheidung und Speicherung seien.

- 3.2. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Kohlenstoffmanagement integriert denken (2024).³⁶

In der Arbeit wird die **CMS** der Bundesregierung (siehe 2 oben) untersucht und bewertet. Aufgrund des Eckpunktecharakters der CMS könne allerdings keine abschließende Beurteilung vorgenommen werden. Im Verbund mit der CMS betrachten die Autoren zudem die Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) der Bundesregierung. Die Arbeit enthält außerdem Grafiken mit Metaanalysen, u.a. des Beitrages verschiedener CCS-Verfahren in Klimaneutralitätsszenarien in Deutschland.

Insgesamt bewerten die Autoren CCS, CCU und CDR als **notwendig**, um Klimaneutralität zu erreichen. Dies gelte insbesondere deshalb, weil die ohne CCS notwendigen Emissionsreduktionen noch weitreichendere Verhaltensänderungen z.B. in den Bereichen Ernährung, Mobilität und Wohnen erfordern würden, als ohnehin notwendig und damit ein hohes Risiko fehlender gesellschaftlicher Akzeptanz berge.

35 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114578>.

36 https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024_ESYS_Impuls_Kohlenstoffmanagement.pdf.

Gesellschaftlich fehle es bei der CMS an ausreichender Information und Verständigung zu Kohlenstoffmanagement, den Handlungsoptionen sowie abzuwägenden Risiken. Der Handlungsdruck zum Kohlenstoffmanagement sei dennoch so groß, dass ein weiteres Aufschieben nicht zielführend erscheine. Dabei führen die Autoren an, dass Technologien, die nicht sehr zeitnah entwickelt und einsatzreif seien, voraussichtlich kaum einen Beitrag zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2024 leisten könnten. Die Autoren halten es daher für richtig, jetzt den regulatorischen Rahmen für den Aufbau der CO₂-Transportinfrastruktur und der geologischen Speicherung sowie wirtschaftliche Anreize für den Einsatz von CCS, CCU und CDR zu schaffen. Die Autoren berufen sich zudem auf einen breiten Konsens in Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft über die Notwendigkeit des Einsatzes von CCS in bestimmten Bereichen.

Die Arbeit gibt zudem weitere Literatur an zu den Themen CCS und CCU sowie der Carbon-Management-Strategie der Bundesregierung.

- 3.3. A. Kharissova et al.: Carbon negative footprint materials: A review, in: Nano-Structures & Nano-Objects, Vol. 37, 101100 (2024).³⁷

Die Autoren besprechen die Ansätze des negativen **Kohlenstoffdioxid-Fußabdrucks** zur Verringerung der Treibhausgasemissionen und zur Erreichung ihrer „Netto-Null“. Sie erörtern die Bedeutung neuartiger Technologien zur Erreichung von CO₂-Negativität oder -neutralität. Dabei konzentrieren sie sich auf Strategien zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung. Sie unterstreichen die Notwendigkeit von technologischen Fortschritten, politischer Unterstützung und Zusammenarbeit, um den Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck effektiv zu reduzieren.

In der Arbeit werden verschiedene **Materialien** mit negativem CO₂-Fußabdruck wie Biokohle, CO₂-negativer Beton, Biomasse und Nanomaterialien für den Bau hervorgehoben. Zu den Strategien zur Erreichung der CO₂-Neutralität gehören grüne Chemie, effiziente Materialverarbeitung und die Verwendung erneuerbarer und recycelbarer Materialien. Es werden Marktmechanismen, politische Maßnahmen und globale Strategien zur Förderung der Entwicklung und Einführung von CO₂-negativen Materialien für eine nachhaltige Zukunft skizziert.

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine Kombination aus verschiedenen Strategien, Technologien und Kooperationen unerlässlich sei, um den Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck der Menschen zu verringern. Sie betonen das **Potential**, die Durchführbarkeit und die Nachhaltigkeit dieser Ansätze im Kampf gegen den Klimawandel.

- 3.4. A. Goren, D. Erdemir, I. Dincer: Comprehensive review and assessment of carbon capturing methods and technologies: An environmental research, in: Environmental Research, Vol. 240, 117503 (2024).³⁸

Die Autoren der Arbeit sehen die CO₂-Abscheidung, -Verwendung und -Speicherung als zuverlässig zur Bewältigung der globalen Umweltprobleme an. Sie unterscheiden zwischen *direkten* und *indirekten* Technologien. Unter die **direkte** Kohlenstoffabscheidung fallen Pre-Combustion,

37 <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101100>.

38 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117503>.

Post-Combustion und Oxy-Fuel-Combustion. **Indirekte** Kohlenstoffabscheidung seien Wiederaufforstung, landwirtschaftliche Praktiken sowie die beschleunigte Verwitterung. Anhand einer Grafik vergleicht die Arbeit den Energieverbrauch für die verschiedenen Technologien der direkten Kohlenstoffabscheidung.

Die Autoren sehen bereits große Fortschritte bei den CCS- und CCU-Technologien, erkennen zugleich weiterhin großes Entwicklungspotential und **Entwicklungsdruck** an. Als Vorteil von Pre-Combustion wird deren höhere Energieeffizienz im Vergleich zur Post-Combustion angeführt. Die Direct Air Capture (DAC) wird wegen ihres hohen Energieverbrauches von mindestens 1,5-3,0 MJ/kg kritisiert, während die Post-Combustion mit Amininen aufgrund ihres Energieverbrauches von 0,1 – 0,3 MJ/kg CO₂ als besonders energieeffizient hervorgehoben wird. Neben dem Energieverbrauch werden in der Arbeit die verschiedenen Technologien zur CO₂-Abscheidung auch in folgenden Punkten verglichen: Kosten für die verschiedenen Technologien pro Tonne CO₂, Umweltauswirkungen (GWP, Global Warming Potential; ODP, Ozone Depletion Potential; AP, Acidification potential), CO₂-Abscheidungspotential, TRL (Technology Readiness Level).

3.5. K. Zhao et al.: Recent Advantages and Future Perspectives in Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage (CCTUS) Technologies: A Comprehensive Review, in: Fuel, Vol. 351, 128913 (2023).³⁹

Die Autoren der Übersichtsarbeit stellen die verschiedenen Technologien zu CCS und CCU dar und bewerten diese in ihren **Vor- und Nachteilen**. Sie gehen auch auf neue Entwicklungen sowie mögliche Zukunftsaussichten ein. Die Autoren bewerten die Technologien des CCS und CCU als entscheidend für die Bewältigung der anthropogenen CO₂-Emissionen und deren Auswirkungen auf den Klimawandel.

Im Bereich der CO₂-Abscheidung bewerten die Autoren insbesondere die Technologien des Pre-Combustion und Post-Combustion als kommerziell verfügbar. Für den **Erfolg** aller Abscheidungs-technologien entscheidend sei die kontinuierliche Weiterentwicklung, Kostensenkung sowie industrielle Integration. Auch die Ebene der Wiederverwendung von Kohlenstoffdioxid wird besprochen. Die „CO₂ enhanced oil and gas recovery“ sei sehr effizient und biete eine gleichzeitige CO₂-Speicherung. Diese Technologie könne allerdings die Nutzung fossiler Brennstoffe verlängern und hänge langfristig vom globalen Übergang zu erneuerbaren Energiequellen ab. Ausgereift sei die Technologie der Kohlenstoffnutzung in der Landwirtschaft z. B. durch Carbon Farming. Diese Methode habe positive Zukunftsaussichten, da staatliches Interesse und Unterstützung zunehmen. Bei der CO₂-Speicherung wird die geologische und terrestrische Speicherung als ausgereift beschrieben. Trotz aufgeführter Umweltrisiken wird das besondere Potential der CO₂-Speicherung in Ozeanen hervorgehoben. Aufgrund der Umweltrisiken sowie mangelnder Forschung sei die Zukunft der Technologie aber ungewiss. Insgesamt sei die Wahl der CCS- und CCU-Technologien abhängig von Umweltauswirkungen, Kosten, Skalierbarkeit und regionaler Eignung.

39 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128913>.

- 3.6. B. Dziejarski, R. Krzyżyńska, K. Andersson: Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment, in: Fuel, Vol. 342, 127776 (2023).⁴⁰

In der Arbeit wird der aktuelle **Entwicklungsstand** verschiedener Aspekte der Technologien zur Abscheidung, Nutzung und Speicherung von Kohlendioxid im Rahmen einer allgemeinen technischen Bewertung zusammengefasst und diskutiert. Erläutert und beleuchtet wird TRL, wodurch der Reifegrad der Technologien bestimmt wird. Außerdem werden Daten aus verschiedenen Anlagen ausgewertet und die Funktionsweisen einzelner Verfahren behandelt. Zudem wird ein Überblick über die Literatur zu Herausforderungen von CCS und CCU gegeben, die zu überwinden seien, um das TRL der Technologien zu verbessern und ihre kommerzielle Nutzung zu ermöglichen.

- 3.7. T. Wich, W. Lueke, G. Deerberg, M. Oles: Carbon2Chem® – CCU as a Step Toward a Circular Economy, in: Frontiers in Energy Research, 7:162 (2020).⁴¹

Die Arbeit enthält eine **Meta-Analyse** aktueller Veröffentlichungen zum Stand der Technik von CO₂-Reduktionsstrategien. Ausgewählte Studien zu den Strategien wurden qualitativ analysiert. Zudem wurden die Veröffentlichungen quantitativ und qualitativ untersucht, wobei der Fokus auf den Begriffen Kreislaufwirtschaft, Sektorkopplung, Substitution fossiler Energieträger und soziale Auswirkungen lag. Weiterhin wurden die verschiedenen Minderungsstrategien unter ökologischen, ökonomischen, technologischen und sozialen Kriterien verglichen. Zudem wurden die veröffentlichten Daten in konsistente Systemgrenzen umgewandelt. Dazu wird die Methode der „Systemerweiterung“ angewandt, die aus der Ökobilanz abgeleitet wurde.

Kriterien wie das TRL, die Substitution fossiler Energieträger und der sozialen Akzeptanz wurden vorgestellt und analysiert. Von besonderem Interesse seien die Kriterien des **Energiebedarfs** und des **CO₂-Minderungspotentials** der Technologien, was sich aus einer Kriterienanalyse gängiger Technikfolgenabschätzungen ergebe. Mit dem „Systemerweiterungsansatz“ analysieren und vergleichen die Autoren die Energie- und CO₂-Bilanzen von CCU, CCS und Carbon Direct Avoidance (CDA)⁴².

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass für einen ganzheitlichen Vergleich der verschiedenen CO₂-Reduktionsstrategien - CDA, CCS und CCU - eine allgemeine Methodik erforderlich sei, die über die CO₂-Reduktion und den Energiebedarf hinausgehe. Insbesondere zeige die jüngste Literatur Lücken in der stringenten Methodik und bei der Berücksichtigung technologischer, wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Aspekte. Die in der Arbeit eingeführten Kriterien wie Wiederverwendungspotentiale und die Substitution fossiler Energieträger seien noch weiter zu analysieren, in Fallstudien anzuwenden und von Experten zu validieren.

40 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>.

41 <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00162>.

42 CDA sei bspw. zu erreichen durch erhöhte Energieeffizienz oder die Substitution konventioneller fossiler Ressourcen durch erneuerbare Alternativen, vgl. T. Wich, W. Lueke, G. Deerberg, M. Oles: Carbon2Chem® – CCU as a Step Toward a Circular Economy, in: Frontiers in Energy Research, 7:162 (2020), S. 1 m. W. n.

- 3.8. J. M. Matter et al.: Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions, in: Science, Vol. 352, Issue 6291 (2016).⁴³

Die Arbeit stellt die Ergebnisse des Pilotprojekts CarbFix in Island vor. Das Projekt prüfte die in-situ CO₂-**Mineralisierung** in Basaltgestein für die dauerhafte Entsorgung von anthropogenen CO₂-Emissionen. Hintergrund des Projekts war das Leckagerisiko bei der geologischen CO₂-Speicherung. Die mineralische Karbonatisierung (d.h. die Umwandlung von CO₂ in Karbonatminerale) durch CO₂-Fluid-Gesteins-Reaktionen in der Lagerstätte solle das Leckagerisiko minimieren und damit die langfristige und sichere Speicherung von CO₂ erleichtern. Dies solle zudem die öffentliche Akzeptanz steigern. Das Potential für die Karbonatisierung in konventionellen CO₂-Lagerstätten ist aufgrund fehlender Mineralien begrenzt, die für die Bildung von Karbonatmineralen erforderlich seien. Stattdessen könne CO₂ in Basaltgestein injiziert werden.

In der Arbeit werden der Projektablauf sowie die Resultate beschrieben. Die Studie zeige, dass eine in-situ CO₂-Mineralisierung in **Basaltgestein** in bereits weniger als zwei Jahren erfolgen könne. Danach bestehe kein Leckagerisiko mehr, was den Überwachungsaufwand reduzieren und die Akzeptanz in der Öffentlichkeit erhöhen könne. Die Ausweitung der basaltischen Kohlenstoffspeicherung benötige erhebliche Mengen Wasser und poröses Basaltgestein. Beides sei an den Kontinentalrändern in großem Umfang vorhanden.

- 3.9. G. Rochelle: Amine Scrubbing for CO₂ Capture, in: Science, Volume 325, S. 1652 – 1654 (2009).⁴⁴

Rochelle stellt die **Aminwäsche** vor – eine Post-Combustion-Methode, die bereits seit 1930 zur Abtrennung von CO₂ aus Erdgas und Wasserstoff verwendet wird. Der Autor bewertet die Aminwäsche als robuste Technologie, die in großem Maßstab zur CO₂-Abscheidung aus Kohlekraftwerken getestet und genutzt werden könne. Mit weiteren Prozess- und Lösungsmittelverbesserungen könne der Energieverbrauch auf 0,2 MWh/Tonne CO₂ gesenkt werden. Der Autor bewertet die Aminwäsche als die wahrscheinlich einzige Post-Combustion-Technologie, die die CO₂-Emissionen von Kohlekraftwerken senken könne, ohne dass die Kraftwerke stillgelegt werden müssten.

3.10. Weiterführende Literaturhinweise

P. Kelemen, Jürg Matter: In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage, in: Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), Vol. 105, No. 45, 17295 (2008).⁴⁵

H. Hekmatmehr et al.: Carbon capture technologies: A review on technology readiness level, in: Fuel, Vol. 363, 130898 (2024).⁴⁶

43 <https://doi.org/10.1126/science.aad8132>.

44 <https://doi.org/10.1126/science.1176731>.

45 <https://doi.org/10.1073/pnas.0805794105>.

46 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130898>.

4. Anwendung und Forschung

Eine interaktive Übersichtskarte über aktuelle, vergangene und geplante Projekte sowie Anwendungen weltweit unterhält die Forschungsgruppe Scottish Carbon Capture & Storage.⁴⁷

4.1. Forschungsprojekte

Die folgenden Projekte forschen zu CCS und CCU. Die dargestellten Projekte dienen lediglich dem Überblick. Die Darstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

CDRmare: Forschungsmission bestehend aus sechs Konsortien, die verschiedene Methoden der marinen CO₂-Entfernung und Speicherung (Alkalinisierung, Blue Carbon, künstlicher Auftrieb, CCS) untersuchen und ihr Potential, ihre Risiken und ihre Zielkonflikte in einem Bewertungsrahmen zusammenführen.

GEOSTOR: Forschungsverbund innerhalb der Forschungsmission CDRmare zur Untersuchung, ob und wie es möglich ist, Kohlendioxid in geologischen Formationen der deutschen Nordsee im industriellen Maßstab zu speichern. Die Projektlaufzeit war von August 2021 bis Juli 2024.⁴⁸

carbon2chem: Das Projekt erforscht, wie aus Hüttengasen der Stahlproduktion Vorprodukte für Kraftstoffe, Kunststoffe und Düngemittel hergestellt werden können.⁴⁹

LEILAC2 - Low Emission Intensity Lime and Cement: Projekt zur Entwicklung einer Technologie zur Senkung der CO₂-Emissionen der europäischen Zement- und Kalkindustrie.⁵⁰

Entwicklung einer Pipeline zum Transport von CO₂ vom europäischen Festland in die norwegische Nordsee zur Untergrundspeicherung.⁵¹

Carbon Engineering: Forschungs- und Entwicklungsplattform für Direct Air Capture in Kanada.⁵²

47 <https://www.geos.ed.ac.uk/sccs/projects-map>.

48 <https://geostor.cdrmare.de/>. Die ersten Erkenntnisse der Forschungsarbeit sind in folgendem Dokument zusammengefasst: https://cdrmare.de/wp-content/uploads/2024/06/insights_GEOSTOR_240626.pdf.

49 <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/carbonmanagement/kohlenstoffkreislauf.html> und <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/carbon2chem.php>.

50 https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Projekte/CO2Speicherung/Laufend/LEILAC2.html?nn=7932046.

51 <https://wintershaldea.com/de/newsroom/wintershall-dea-und-equinor-entwickeln-gemeinsam-ccs-infrastruktur-der-nordsee>.

52 <https://carbonengineering.com/direct-air-capture-and-storage/>.

4.2. Kommerzielle Anwendungen

Ein Beispiel für die kommerzielle Anwendung der CO₂-Speicherung ist das **Sleipner Projekt**. Das vor der norwegischen Küste gelegene Sleipner Projekt führt kommerzielle CO₂-Speicherung im Gestein unter dem Seeboden durch. Das CO₂ wird durch Aminwäschen abgeschieden und in den salinen Aquifer Utsira injiziert. Das Sleipner Projekt läuft bereits seit 1996.⁵³

5. Informationen aus Publikationen des Deutschen Bundestages und Ministerien

Die Publikationen aus dem Deutschen Bundestag sowie der Ministerien stellen eine Auswahl dar und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zudem sind im Dokumentations- und Informationssystem für Parlamentsmaterialien (DIP) zahlreiche weitere Einträge zum Thema Kohlenstoffmanagement verzeichnet (schriftliche und mündliche Fragen, kleine Anfragen, Anträge, Berichte und Gesetzesentwürfe).⁵⁴

5.1. Parlamentarische Vorgänge

Deutscher Bundestag, Unterrichtung durch die Bundesregierung: Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon-Management-Strategie.⁵⁵

5.2. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages

Speicherung von CO₂ in Böden, WD 8 – 3000 – 061/21 (5. Juli 2021).⁵⁶

Erkenntnisse aus der Erprobung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und CO₂-Speicherung (CCS) in Deutschland, WD 8 – 3000 – 055/18 (11. Juli 2018).⁵⁷

5.3. Publikationshinweise der Bundes- und Landesministerien und ihnen untergeordnete Behörden

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: FAQ zu CCS und CCU (29. Mai 2024).⁵⁸

53 <https://www.equinor.com/energy/sleipner>.

54 <https://dip.bundestag.de/>.

55 BT-Drs. 20/11585 vom 03.06.2024, <https://dserver.bundestag.de/btd/20/115/2011585.pdf>.

56 <https://www.bundestag.de/resource/blob/854488/90e6d18844960c5aa81dfc675afec5a3/WD-8-061-21-pdf.pdf>.

57 <https://www.bundestag.de/resource/blob/567342/f356ac5bb411dca92e8a18c8c3037c28/WD-8-055-18-pdf-data.pdf>.

58 https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/faq-ccs-ccu.pdf?__blob=publicationFile&v=40.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe): Eckpunkte (Februar 2024).⁵⁹

Umweltbundesamt: Technische Kohlenstoffsinken (25. September 2023).⁶⁰

Umweltbundesamt: Carbon Capture and Storage: Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien (September 2023).⁶¹

6. Verbände: ausgewählte Internethinweise

Die alphabetische Auflistung der folgenden Verbände stellt eine Auswahl an Verbänden dar, die sich zu CCS und CCU positioniert haben oder sich in den Bereichen engagieren. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND): Standpunkt: CCS (Carbon Capture and Storage): Falsche Weichenstellung verhindern!⁶²

Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF): Monitoring Progress of the Technology Roadmap (TRM): Update on progress of Recommended Priority Actions to meet the TRM (13. Oktober 2022).⁶³

Global CCS Institute: State of the Art.: CCS Technologies 2024 (August 2024).⁶⁴

Verband kommunaler Unternehmen e. V. (VKU): VKU bezieht Stellung zu den Eckpunkten der Carbon-Management-Strategie (21. März 2024).⁶⁵

59 https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.pdf?__blob=publicationFile&v=8.

60 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/technische-kohlenstoffsinken>.

61 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/230919_uba_pos_ccs_bf.pdf.

62 https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/bilder/klimawandel/falsche-weichenstellung-vermeiden-standpunkt-ccs.pdf.

63 https://fossil.energy.gov/archives/cslf/sites/default/files/documents/Traffic_light_TRM_monitoring_2022_final.pdf.

64 <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/08/CCS-Technologies-Compendium-2024-08-16-1.pdf>.

65 <https://www.vku.de/themen/daseinsvorsorge/artikel/default-c9ccc6deba04842a0d8b600f194a33b1/>.

Anlage

Ausgewählte Presseartikel, die mit Stand 3. September 2024 recherchiert wurden. Gesucht wurde mit den Stichworten „CCS“, „CCU“, „CO₂-Speicherung“ und „Kohlenstoffmanagement“. Die Presseauswahl soll nur einen Überblick geben und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.
