

Carbon Capture and Storage (CCS): Eine Schlüsseltechnologie zur Erreichung von Net Zero-Emissionen

Tobias Orthen, Franz Josef Radermacher

4. April 2025

Vorbemerkung:

Franz Josef Radermacher und Tobias Orthen (beide GES und FAW/n) sind in die Arbeiten des Council of Engineers for the Energy Transition (CEET) eingebunden. Dieser Artikel fasst die wichtigsten Erkenntnisse des CEET-Policy Briefs zu Carbon Capture and Usage/Storage (CCUS) zusammen, der in Kürze offiziell veröffentlicht wird. Erste Ergebnisse wurden bereits in einer von T. Orthen moderierten Podiumsdiskussion auf der 29. UN-Klimakonferenz in Baku 2024 vorgestellt.

Der CEET ist ein „globales hochrangiges Gremium aus Ingenieuren und Experten für Energiesysteme“, das zur Erreichung des Ziels des UN-Generalsekretärs beiträgt, eine Koalition zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen bis 2050 aufzubauen. Der CEET wurde im September 2021 [gegründet](#) und wird von Dr. Gerd Müller, Generaldirektor der Organisation der Vereinten Nationen für industrielle Entwicklung (UNIDO), und Professor Jeffrey Sachs, Präsident des UN Sustainable Development Solutions Network (SDSN), gemeinsam geleitet.

Einleitung: Der wachsende Bedarf an CCS

Die Welt steht an einem entscheidenden Wendepunkt im Kampf gegen den Klimawandel. Allein im Jahr 2022 erreichten die globalen Kohlendioxidemissionen (CO₂) aus Energie und Industrie alarmierende 37 Gigatonnen, wobei der größte Beitrag aus der Stromerzeugung, den Prozessindustrien und dem Transportsektor kam. Trotz schneller Fortschritte bei erneuerbaren Energien wie Wind- und Solarenergie bleibt die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen hoch, insbesondere in der Schwerindustrie, wo Alternativen noch in der Entwicklung sind.

Energieeffizienz und Elektrifizierung sind essenziell, reichen aber nicht aus, um die Emissionen auf das für die globalen Klimaziele erforderliche Niveau zu senken. Die Technologie der Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) ist eine entscheidende Lösung zur Schließung dieser Lücke, indem sie Emissionen an der Quelle einfängt und entweder weiterverwendet oder sicher unterirdisch speichert. Viele Klima- und Energieexperten sind sich einig, dass ohne den großflächigen Einsatz von CCS die Erreichung von Netto-Null-Emissionen bis zur Mitte des Jahrhunderts nahezu unmöglich ist.

Was ist CCS und wie funktioniert es?

CCS ist ein Verfahren zur Abscheidung von CO₂-Emissionen aus Kraftwerken, Industrieanlagen und anderen großen Punktquellen, bevor sie in die Atmosphäre gelangen. Der Prozess besteht aus drei Hauptschritten:

- **Abscheidung:** CO₂ wird von den Gasen getrennt und abgeschieden, die bei industriellen Aktivitäten oder der Stromerzeugung entstehen. Hierbei kommen verschiedene Methoden zum Einsatz, darunter chemische Absorption, Membrantrennung und kryogene Verfahren.
- **Transport:** Das abgeschiedene CO₂ wird komprimiert und über Pipelines, Schiffe oder Lastwagen zu vorgesehenen Speichereinrichtungen transportiert.
- **Speicherung:** Das CO₂ wird dauerhaft in geologischen Formationen wie erschöpften Öl- und Gasfeldern oder tiefen Salzwasseraquiferen gespeichert.

Zusätzlich gibt es Carbon Capture and Utilization (CCU), bei dem abgeschiedenes CO₂ für industrielle Anwendungen wie synthetische Kraftstoffe, Chemikalien oder die Betonproduktion wiederverwendet wird. Wenn das CO₂ jedoch nicht dauerhaft gebunden wird, kann es letztlich wieder in die Atmosphäre gelangen.

Aktueller Stand von CCS: Globale Entwicklungen und Branchenakzeptanz

Die CCS-Technologie hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Im Jahr 2024 gab es weltweit 50 betriebsbereite CCS-Anlagen, weitere 44 waren im Bau und über 500 Projekte befanden sich in verschiedenen Entwicklungsstadien. Dieser Anstieg an Projekten zeigt das wachsende Vertrauen in CCS als praktikable Klimaschutzlösung.

Bestimmte Branchen sind besonders auf CCS angewiesen, da ihre Emissionen unvermeidbar sind und es kaum praktikable Alternativen gibt:

- **Zement- und Stahlproduktion:** Diese Industrien verursachen fast 15 % der globalen CO₂-Emissionen. Da ihre Emissionen aus chemischen Prozessen stammen, ist es nicht ausreichend, einfach auf erneuerbare Energien zu wechseln. Stattdessen muss der gesamte Produktionsprozess angepasst oder CCS als Alternative an die existierende Prozesskette angefügt werden. Siehe hier auch die „CEET-Policy Briefs“ zur Zementherstellung und zur Stahlherstellung. Letzteres wird ebenfalls in Kürze offiziell erscheinen. Hauptautoren des CEET sind F. J. Radermacher und T. Orthen zusammen mit N. Ahlawat von Jindal Steel, Indien.

- **Chemische Industrie:** Die Produktion von Wasserstoff und Ammoniak erzeugt erhebliche Mengen an CO₂. CCS ermöglicht die Herstellung von „blauem Wasserstoff“, indem es die Emissionen aus dem Herstellungsprozess auffängt.
- **Energiesektor:** Fossile Kraftwerke, insbesondere Kohle- und Gaskraftwerke, können ihre Emissionen mit CCS erheblich reduzieren, wodurch Länder eine verlässliche Energieversorgung bei gleichzeitigem Klimaschutz sicherstellen können.

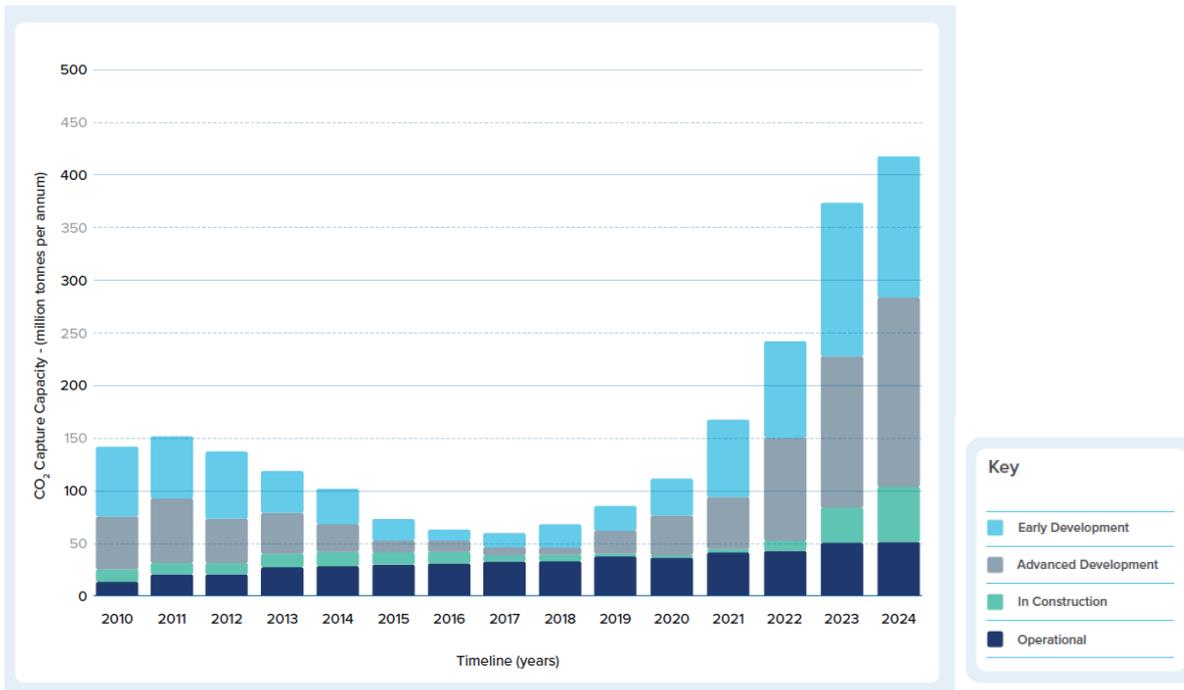


Abbildung 1: Wachstum an CCS-Projekten von 2010 bis 2024.ⁱ

Herausforderungen für CCS

1. Kosten und finanzielle Hürden

Eine der größten Herausforderungen für CCS sind die Kosten. Die Abscheidung und Speicherung von CO₂ kann (muss aber nicht) teuer sein, wobei die Kosten je nach CO₂-Konzentration, Transportstrecke und Lagerstättenmerkmalen variieren. Derzeit wird geschätzt, dass CCS zwischen 50 und 100 US-Dollar pro vermiedener Tonne CO₂ kostet. Zudem verschlechtert sich der technische Wirkungsgrad der Basisprozesse um 5-10 Prozentpunkte, was ebenfalls die Wirtschaftlichkeit der Projekte beeinflusst.

Zur wirtschaftlichen Förderung von CCS arbeiten Regierungen und Organisationen an finanziellen Anreizen, wie z. B.:

- **CO₂-Bepreisung**, die Unternehmen für Emissionen zur Kasse bittet und CCS wirtschaftlich attraktiver macht.
- **Steuergutschriften und Subventionen** (z. B. bietet der US-amerikanische Inflation Reduction Act 85 USD pro gespeicherter Tonne CO₂).

- **Investitionen in CCS-Hubs**, bei denen mehrere Unternehmen eine gemeinsame Infrastruktur nutzen, um Kosten zu senken.

FIGURE 7.5

Cost of carbon capture and storage for selected sectors

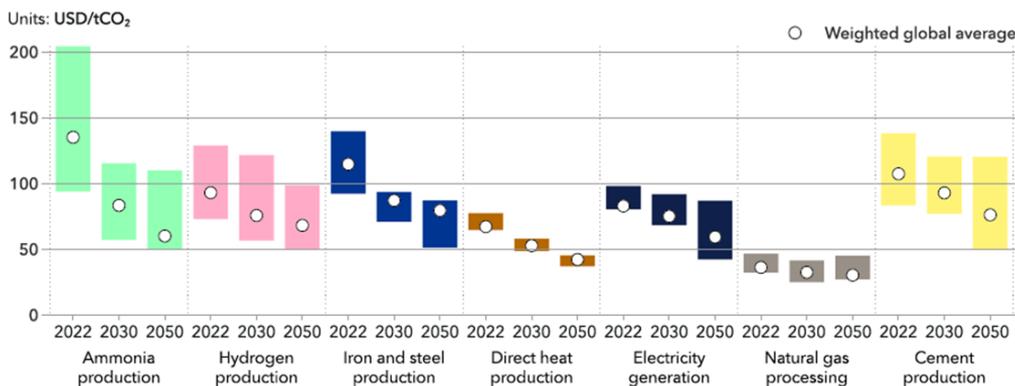


Abbildung 2: CCS-Kosten für unterschiedliche Sektoren.ⁱⁱ

2. Öffentliche Wahrnehmung und Skepsis

CCS stößt auf Skepsis, da einige es als Strategie der fossilen Brennstoffindustrie sehen, um ihre Geschäfte zu verlängern, anstatt auf saubere Alternativen umzusteigen. Dabei ist zu bedenken, dass derzeit noch mehr als 75 Prozent der weltweit eingesetzten Energie auf fossilen Energieträgern beruht und es in globalem Massstab aufgrund der wirtschaftlichen Interessen von Erzeugern und Verbrauchern auf Jahrzehnte nicht möglich ist, auf diese Energieträger zu verzichten. Zudem argumentieren Experten, dass CCS für Industrien mit unvermeidbaren Emissionen unverzichtbar ist. Eine effektive Kommunikation und Einbindung der Öffentlichkeit sind entscheidend, um Vertrauen in CCS-Projekte zu schaffen.

3. Regulatorische und rechtliche Hürden

Der rechtliche Rahmen für CO₂-Speicherung und -Transport entwickelt sich noch. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, dass CO₂-Quellen und Speicherstätten oft in verschiedenen Ländern liegen, was grenzüberschreitende Abkommen erfordert. Beispielsweise plant Deutschland, abgeschiedenes CO₂ nach Norwegen zur Offshore-Speicherung zu exportieren, aber bestehende EU-Regelungen erschweren solche internationalen Kooperationen. Dennoch gewinnt CCS in Deutschland an Bedeutung, insbesondere durch die Einführung der **Carbon-Management-Strategie** der Bundesregierung Anfang 2024.

Die Rolle von CCS in Kohlenstoffmärkten (Artikel 6 des Pariser Abkommens)

Eine vielversprechende Finanzierungsquelle für CCS sind die Märkte für CO₂-Zertifikate. Artikel 6 des Pariser Abkommens erlaubt den internationalen Handel mit Emissionsminderungen, wodurch CCS-Projekte als handelbare Klimaschutzmaßnahmen genutzt werden können.

- **Artikel 6.2:** Ermöglicht den Handel mit Emissionsgutschriften zwischen Staaten.

- **Artikel 6.4:** Erlaubt Unternehmen und Einzelpersonen, in CCS-Projekte zu investieren und im Gegenzug CO₂-Zertifikate zu erhalten.

Es gibt jedoch noch weitere Herausforderungen, z. B. die Frage, wie CO₂, das in einem Land abgeschieden, aber in einem anderen Land gespeichert wird, ordnungsgemäß verbucht werden kann. Es bedarf einer internationalen Zusammenarbeit, um klare Anrechnungsregeln und Marktanreize für CCS zu entwickeln.

Innovationen und Zukunftsaussichten

Um die Einführung von CCS zu beschleunigen, machen technologische Innovationen das Verfahren kostengünstiger und effizienter. Erstens verbessern fortschrittliche Materialien, z. B. neue Lösungsmittel- und Membrantechnologien, die Effizienz der CO₂-Abscheidung und verringern gleichzeitig den Energiebedarf. Zweitens gewinnen CCS-Hubs und -Cluster an Bedeutung, d. h. groß angelegte CCS-Netze wie die im Vereinigten Königreich und in Norwegen, die durch die gemeinsame Nutzung der Infrastruktur durch die Industrie die Kosten senken.

Fazit: Der Weg in die Zukunft

CCS wird eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung schwerer Industrien aber wohl auch bei der Stromerzeugung spielen. Mit wachsender globaler Dynamik, politischen Anreizen und technologischen Fortschritten entwickelt sich CCS mehr und mehr von einer experimentellen Technologie zu einer zentralen Lösung der Energiewende.

ⁱ Source: Global CCS Institute, 2024. Global status of CCS 2024. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/10/Global-Status-Report-2024-Interactive.pdf>

ⁱⁱ Source: DNV Energy transition outlook 2023. <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download>