CCUS-Markthochlauf in Deutschland

Wo steht der CCUS-Markthochlauf in Deutschland zum Jahresende 2025?

Impressum

Herausgeber

Am Blütenanger 71
80995 München
+49 (0)89 158121-0
info@ffe.de
www.ffe.de

Adhoc-Analyse aus dem Projekt
CCUS-Entwicklungspfade: Welche Rolle spielen zukünftig Carbon Management und CO_2-Entnahme?

Veröffentlicht im
Januar 2026

Projektleitung & Bearbeitung
Hannes Kracht
Amanda Pleier

Qualitätsmanagement
Dr. Andrej Guminski

Geschäftsleitung
Dr.-Ing. Serafin von Roon
Dr.-Ing. Anna Gruber
Dr.-Ing. Andrej Guminski

Projektpartner
Bayernwerk AG
Gunvor Raffinerie Ingolstadt GmbH
RWE Generation SE
Stadtwerke Rosenheim GmbH & Co. KG

Bitte zitieren als
FfE (2026): CCUS-Markthochlauf in Deutschland. – Wo steht der CCUS-Markthochlauf in Deutschland zum Jahresende 2025?

Analyse aus dem Projekt: CCUS-Entwicklungspfade: Welche Rolle spielen zukünftig Carbon Management und CO_2-Entnahme?

DOI: http://doi.org/10.34805/ffe-02-26

Versionsnummer Vorlage: TL20230613

Inhaltsverzeichnis

CCUS-Markthochlauf – Erste Schritte auf dem Weg zur Skalierung der Technologie 5

1 Der CCUS-Markthochlauf als sektorübergreifende Aufgabe 6

2 Netto-Negativ: Zielbild des CCUS-Markthochlaufs in Deutschland und der EU 7

2.1 Carbon Management: Strategien und Zielmarken 8

2.1.1 Die EU strebt ein Marktvolumen von 450 Mt CO_2 in 2050 an. 8

2.1.2 Deutschland hat Eckpunkte, aber noch keine finalen Strategien 9

3 Realitäts-Check: Status quo des CCUS-Hochlaufs in Deutschland 10

3.1 CO_2-Abscheidung 10

3.1.1 Industriesektor 10

3.1.2 Energiewirtschaft 13

3.2 Transport 14

3.3 Speicherung 15

3.4 Nutzung 15

4 Treiber des CCUS-Hochlaufes aus Akteursperspektive 16

4.1 EU-ETS 16

4.2 Förderprogramme für CCUS-Pilotprojekte 16

4.3 Information, Verständnis, Akzeptanz 17

4.4 Rechtliche Sicherheit 17

4.5 Infrastruktur & Cluster 17

5 CCUS gewinnt an Relevanz – aber ist noch kein Selbstläufer 19

Glossar 20

Literaturverzeichnis 22

CCUS-Markthochlauf – Erste Schritte auf dem Weg zur Skalierung der Technologie

1

CCUS-Technologien sind ein unverzichtbarer Bestandteil zur Erreichung der Klimaziele, müssen sich aber noch etablieren.

Die Technologien zur CO_2-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung sind für schwer vermeidbare Emissionen essenziell, insbesondere in der Zement- und Kalkindustrie sowie bei thermischer Abfallbehandlung. Dennoch befindet sich der Hochlauf erst in einer frühen Phase mit geförderten Pilotprojekten und fehlender flächendeckender Infrastruktur.

2

Die Zementindustrie ist die treibende Branche des CCUS-Markthochlaufes in Deutschland.

Die Zementindustrie nimmt eine führende Rolle in der Erprobung von CCUS-Technologien ein. Während frühzeitige Pilotanlagen zunächst die Aminwäsche zur CO_2-Abscheidung einsetzen, werden mittel- bis langfristig verstärkt auf Oxyfuel-Verfahren und andere innovative Ansätze weiterentwickelt und umgesetzt. Diese Projekte liefern wichtige Erkenntnisse für Skalierung und Kostenreduktionspotenziale, zeigen aber auch, dass sich bisher keine Technologie eindeutig durchsetzen konnte und es weiterhin Entwicklungspotenziale gibt.

3

Die Treiber für den CCUS-Markthochlauf sind erkennbar, könnten aber durch eine konsequente Umsetzung stärker wirken.

Regulatorische Instrumente wie der EU-Emissionshandel, Förderprogramme für Pilotprojekte, aber auch die Schaffung von rechtlicher Sicherheit bspw. durch das KSpTG, sind entscheidende Faktoren im CCUS-Markthochlauf. Ebenso sind der Aufbau einer CO_2-Infrastruktur sowie die Wahrung gesellschaftlicher Akzeptanz für diese Technologien wichtig. Das Zusammenspiel dieser unterschiedlichen Treiber kann den Übergang zu einem funktionierenden CCUS-Markt ermöglichen.

1 Der CCUS-Markthochlauf als sektorübergreifende Aufgabe

Maßnahmen zur Abscheidung (Carbon Capture) und Nutzung (CCU) bzw. Speicherung (CCS) von CO_2 sind ein wichtiger – und in einigen Sektoren ein notwendiger – Bestandteil von Klimaschutzstrategien. Die entsprechenden Technologien entlang der CCUS-Wertschöpfungskette sind jedoch bisher industriell kaum bis gar nicht erprobt. Daher kommt es aktuell zu einem CCUS-Markthochlauf, welcher sich an politischen Zielbildern orientiert.

Der Markthochlauf von Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) in Deutschland und Europa ist ein zentraler Bestandteil zur Erreichung der Klimaziele und ist notwendig, um auch ansonsten schwer bis unvermeidbare Emissionen zu reduzieren. Die CO_2-Abscheidung ermöglicht Prozessen, die sich technisch oder wirtschaftlich nur schwer vollständig dekarbonisieren lassen, CO_2-Emissionen zu senken und eröffnet Optionen für die Nutzung oder dauerhafte Speicherung des CO_2. Diese Technologien werden daher zunehmend als Schlüsseltechnologien für die Dekarbonisierung betrachtet.

Dabei entstehen neue Wertschöpfungsketten und Märkte, da die Technologien bisher nicht etabliert sind. Die Einführung von CCUS ist dabei kein isolierter Vorgang einzelner Akteure, sondern steht in enger Wechselwirkung mit angrenzenden Sektoren wie der Energie- und Wasserstoffwirtschaft, den betroffenen Industrieunternehmen und den Infrastrukturbetreibern. Der Ausbau von CO_2-Transportinfrastrukturen beeinflusst die Standortwahl und Investitionsentscheidungen für CCUS-Maßnahmen. Hinzu kommen regulatorische Rahmenbedingungen, gesellschaftliche Akzeptanz und internationale Wettbewerbsfaktoren, die den Markthochlauf maßgeblich bestimmen.

Um diese Zusammenhänge greifbar zu machen, verfolgt die vorliegende Analyse einen dreistufigen Ansatz:

1. Zunächst wird das **Zielbild** für den CCUS-Markthochlauf in Deutschland und Europa aufgezeigt. Dieses basiert auf den nationalen Klimaschutzzielen, sektoralen Dekarbonisierungsstrategien und den erwarteten Emissionsminderungsbeiträgen aus CCUS. Das Zielbild dient als Referenzrahmen, um den erforderlichen Technologiehochlauf, Infrastrukturen und zeitlichen Meilensteine zu skizzieren.
2. Im zweiten Schritt erfolgt ein **Realitäts-Check** zum Abgleich dieser Zielbilder mit aktuellen Projektentwicklungen. Hierbei werden konkrete Pilotprojekte und Initiativen entlang der gesamten Wertschöpfungskette betrachtet – von der CO_2-Abscheidung über Transportlösungen bis hin zur Nutzung oder Speicherung. Dieser Realitätscheck zeigt, wo Deutschland heute steht, welche technologischen und infrastrukturellen Fortschritte erzielt wurden und wo die größten Lücken zwischen Zielbild und Umsetzung bestehen.
3. Ein abschließender Perspektivwechsel auf die Akteurssicht zeigt auf, welche **Treiber** existieren bzw. notwendig sind, um den weiteren Hochlauf voranzutreiben und den erfolgreichen Aufbau eines CCUS-Marktes entlang der gesamten Wertschöpfungskette sicherzustellen.

Ziel der Analyse ist es, ein kompaktes, faktenbasiertes Bild des CCUS-Markthochlaufs in Deutschland zu zeichnen, die zentralen Herausforderungen und Chancen zu identifizieren und Impulse für den weiteren Hochlauf zu liefern.

2 Netto-Negativ: Zielbild des CCUS-Markthochlaufs in Deutschland und der EU

Europäische und deutsche Klimaschutzgesetze geben die Zielmarken der Klimaneutralität vor. Für die Industrie und Energiewirtschaft ist diese Zielsetzung durch den EU-Emissionshandel noch ambitionierter ausgestaltet. Die Rolle von CCUS ist in begleitenden Strategien festgehalten, die das Zielbild weiter ausgestalten.

Die übergeordneten Rahmenbedingungen für den CCUS-Markthochlauf sind durch die europäischen bzw. deutschen Gesetze festgelegt und werden durch spezifische Strategien, Instrumente und Verordnungen begleitet.

Übergeordnete Klimaschutzziele

Sowohl in der EU [1] als auch in Deutschland [2] leitet sich der CCUS-Hochlauf von den übergeordneten Klimaschutzgesetzen ab, die jeweils Zwischenziele der THG-Reduktion gegenüber dem Jahr 1990 sowie ein Zieljahr für THG-Neutralität vorschreiben (siehe Abbildung 2-1:).

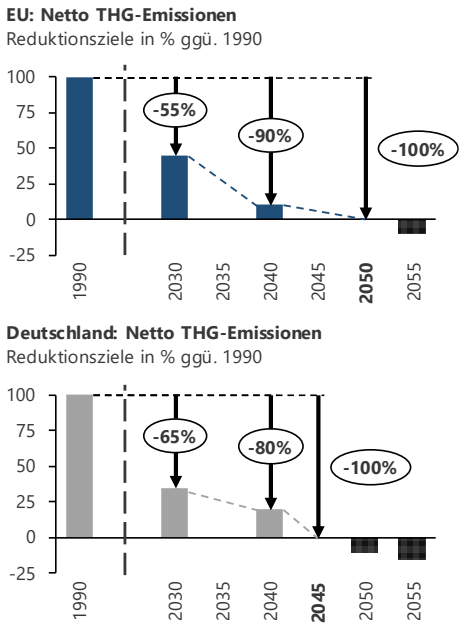

Abbildung 2-1: Vergleich der relativen Emissionsreduktionspfade der EU (oben) und Deutschlands (unten).

Die Zielsetzungen für die Emissionen unterschieden sich in der EU und in Deutschland: Für das Jahr 2030 sollen die Emissionen in der EU um 55 % gegenüber 1990 sinken, in Deutschland um 65 % gegenüber 1990. Im Jahr 2040 ist das (vorgeschlagene) EU-Klimaziel mit einer Emissionsreduktion um 90 % wiederrum ambitionierter als die deutsche Zielsetzung mit 80 % Emissionsminderung. Dennoch soll in Deutschland bereits 2045 Netto-THG-Neutralität erreicht werden, in der EU erst 2050. Im Anschluss geben beide Klimaschutzgesetzte die Erzielung von (Netto-)Negativemissionen vor.

EU-Emissionshandelssystem (EU ETS)

Das EU-Emissionshandelssystem I (EU ETS I, siehe Abbildung 2-2) ist das zentrale Instrument zur Erreichung der EU-Klimaschutzziele in den Sektoren Industrie und Energiewirtschaft. Das EU-ETS I erfasst die Emissionen von ca. 9.000 Anlagen der europäischen Industrie und Energiewirtschaft. Diese Unternehmen müssen jährlich Emissionsberechtigungen (Zertifikate) für jede ausgestoßenen Tonne CO_2 nachweisen. Die Anzahl der ausgegeben Zertifikate ist begrenzt (Cap). Sie werden versteigert oder frei zugeteilt und können auf dem Markt gehandelt werden (Cap-and-Trade). [7]

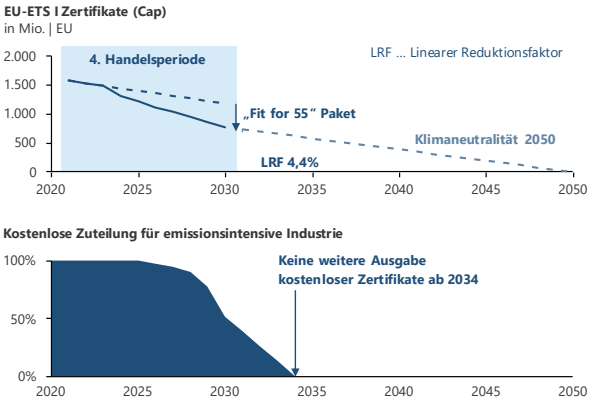

Abbildung 2-2: Entwicklung der ausgegebenen Zertifikate und freien Zuteilungen im EU-ETS I.

Seit 2021 befindet sich der EU ETS in der bis Ende 2030 laufenden vierten Handelsperiode. In dieser Handelsperiode wurde die Obergrenze ausgegebener CO_2-Emissionszertifikate zunächst jährlich um 2,2 % gesenkt. Dieser linearer Reduktionsfaktor (LRF) wurde im Rahmen des „Fit for 55" Pakets auf 4,3 % (ab 2024) bzw. 4,4 % (ab 2028) erhöht. Bei linearer Projektion werden damit um das Jahr 2040 herum keine neuen Zertifikate im EU ETS herausgegeben. Parallel dazu wird ab 2026 die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten für die emissionsintensive Industrie kontinuierlich zurückgefahren.

Ab 2034 erfolgt keine weitere Ausgabe kostenloser Zertifikate für diese Industriezweige.

Sowohl die sinkende Obergrenze an Zertifikaten als auch der Rückgang an frei zugeteilten Zertifikaten sind damit Treiber des CCUS-Markthochlaufes insbesondere für nicht oder schwer vermeidbare Emissionen, bspw. der Kalk- und Zementindustrie, die zunächst mit steigenden Kosten für Zertifikate und dem Auslaufen der ausgegebenen Zertifikate umgehen müssen. Das entspricht dem Verbot weiterer Emissionen sodass Industrien mit unvermeidbaren Prozessemissionen auf CO_2-Abscheidung und eine funktionierende CCUS-Wertschöpfungskette angewiesen sind.

2.1 Carbon Management: Strategien und Zielmarken

Neben den übergeordneten Klimaschutzzielen sollen Carbon Management Strategien die Leitplanken des CCUS-Hochlaufes in der EU bzw. Deutschland vorgeben. Diese werden durch Verordnungen, Gesetze und weitere Strategien flankiert. Im Folgenden ist eine Auswahl der wichtigsten Dokumente dargestellt.

2.1.1 Die EU strebt ein Marktvolumen von 450 Mt CO_2 in 2050 an.

Auf europäische Ebene gibt die Industrial Carbon Management Strategy (Februar 2024) [8] das Zielbild für einen CCUS Hochlauf vor, und ist auch im Net Zero Industrial Act (vorgestellt am 16. März, in Kraft Juni 2024) [9] aufgegriffen.

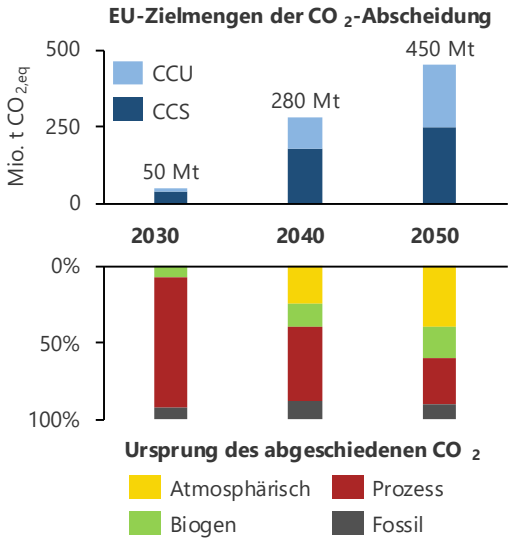

Abbildung 2-3: Zielmengen der CO_2-Abscheidung (oben) und Ursprung des abgeschiedenen CO_2 (unten) nach der EU Industrial Carbon Management Strategy.

EU Industrial Carbon Management Strategy

Die EU Industrial Carbon Management Strategy (EU ICMS) setzt auf Pipelines als Haupttransportmittel, ergänzt durch Schiffs-, Straßen- und Schienenverkehr, und gibt drei Phasen des CCUS-Markthochlaufs vor (Abbildung 2-3).

- **Bis 2030** sollen die CO_2-Speicherkapazitäten auf mindestens 50 Mt CO_2 jährlicher Einspeicherkapazität ausgebaut werden um den Großteil des – hauptsächlich prozessbedingten – abgeschiedenen CO_2 langfristig speichern zu können. Zum Transport des abgeschiedenen CO_2 soll eine entsprechende Pipelineinfrastruktur mit ca. 7.300 km aufgebaut werden. CCU spielt eine untergeordnete Rolle.
- **Bis 2040** sollen schließlich wirtschaftlich tragfähige regionale CO_2-Wertschöpfungsketten mit CO_2 als handelbarer Ware im EU-Binnenmarkt etabliert werden. Das Pipelinetransportnetz soll eine Gesamtlänge von ca. 19.000 km haben. Etwa ein Drittel des insgesamt 280 Mt abgeschiedenen CO_2 soll als Rohstoff für CCU eingesetzt werden.
- **Ab 2040** entwickelt sich biogenes bzw. atmosphärisches CO_2 als Hauptquelle für kohlenstoffbasierte industrielle Prozesse und Kraftstoffe. Ziel für 2050 ist, dass ca. 450 Mt CO_2 gespeichert oder als Rohstoff für CCU-Anwendungen eingesetzt werden.

Net-Zero Industry Act

Der Net Zero Industry Act (NZIA) [9] ist das zentrale industriepolitische Instrument der EU zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2050. Dabei schafft er auch verbindliche Rahmenbedingungen für den Ausbau von CO_2-Abscheidung, Transport und Speicherung, indem das Ziel von 50 Mt CO_2 jährlicher Speicherkapazität in 2030 aufgegriffen wird. Die Speicher sollen mindestens über fünf Jahre betrieben werden müssen und einen freien und fairen Zugang der Marktakteure ermöglichen. Die Mitgliedsstaaten werden aufgefordert, jährliche Fortschrittsberichte zu erstellen und eine CO_2-Transportinfrastruktur aufzubauen.

In einem begleitenden Rechtsakt wurden derweil Öl- und Gasunternehmen identifiziert, die anteilig an der europäischen Öl- und Gasproduktion (im Zeitraum von 2020 bis 2023) Kapazitäten für die CO_2-Speicherlösungen bis 2030 bereitstellen sollen. [70]

2.1.2 Deutschland hat Eckpunkte, aber noch keine finalen Strategien

In Deutschland sollen zwei Strategien den CCUS-Markthochlauf begleiten. Die Carbon Management Strategie (CMS) beschäftigt sich mit der Abscheidung von CO_2 aus Punktquellen sowie der weiteren Verarbeitung (Transport, Nutzung, Speicherung). Die Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) zielt auf den Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen und der Rolle von CO_2-Entnahme zum Ausgleich dieser Restemissionen und der langfristigen Rolle von CO_2-Entnahme über die Treibhausgasneutralität hinaus ab. Für beide Strategien sind bisher lediglich Eckpunkte aus der Legislaturperiode 2021 bis 2025 veröffentlicht. Die finalen Strategien sollen sowohl auf Modellierungsergebnissen [10] [11] [71] als auch Stakeholdereinbindungen basieren.

Carbon Management Strategie der Bundesregierung (Eckpunkte)

Die deutsche Bundesregierung hat unter der Ampelkoalition Eckpunkte für eine Carbon Management Strategie (CMS, Stand: 26. Februar 2024) [12] veröffentlicht. Der Entwurf einer daraus abgeleiteten vollständigen Strategie wurde im September 2024 geleakt [13], wurde jedoch bisher – auch aufgrund des Regierungswechsels – noch nicht offiziell veröffentlicht.

Die Eckpunkte der Strategie enthalten keine CO_2-Mengenschätzungen oder -Zielvorgaben, sondern spezifizieren lediglich die Anwendungsbereiche von CCUS. CCUS-Maßnahmen sollen grundsätzlich ermöglicht werden, insbesondere wenn eine Elektrifizierung oder der Einsatz von grünem Wasserstoff absehbar nicht kosteneffizient ist. Unvermeidbare Emissionen, die den Einsatz von CO_2-Abscheidung erfordern sieht die Strategie in der Kalk- & Zementherstellung und der thermischen Abfallbehandlung. Die Förderinstrumente sollen sich auf diese Sektoren fokussieren. Im Bereich der Stromproduktion wird CO_2-Abscheidung für Biomasse- und Gaskraftwerke ermöglicht – lediglich die CO_2-Abscheidung an Kohlekraftwerken wird faktisch untersagt.

Analog zur europäischen Strategie wird auf eine privatwirtschaftliche Pipelineinfrastruktur als Haupttransportmodalität gesetzt. Die Speicherung soll vorrangig in internationalen und eigenen offshore CO_2-Speicherregionen umgesetzt werden. Eine onshore Speicherung soll nur nach ziehen einer opt-in Klausel auf dem Gebiet einzelner Bundesländer erlaubt werden.

Langfriststrategie Negativemissionen (Eckpunkte)

Obwohl die tiefgreifende Senkung der THG-Emissionen in der deutschen Klimastrategie höchste Priorität hat, wird es dennoch notwendig sein, CO_2 aus der Atmosphäre zu entnehmen und dauerhaft zu speichern. Damit werden Negativemissionen erzeugt, die dazu dienen, unvermeidbare Restemissionen auszugleichen bzw. langfristig netto-negativ zu werden.

Nach den Eckpunkten der Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe) [14] ist geplant, eigene Ziele für sogenannte technische Senken in den Jahren 2035, 2040 und 2045 aufzustellen, sowie eine Zielgröße für die netto-negative THG-Emissionen Deutschlands in 2060 zu bestimmen. Dafür sollen der erwartete Bedarf, der Umfang derzeit bereitgestellter Negativemissionen und das mögliche Potenzial erhoben werden.

Die LNe soll dabei alle relevanten Methoden und Technologien zur Erzeugung von Negativemissionen umfassen. Diese sind nach den Eckpunkten:

- Wald und die Potenziale der Erstaufforstung,
- Moore,
- Bodenmanagement,
- Erzeugung von Biomasse,
- Marine Biomasse,
- Stoffliche Nutzung von Biomasse,
- Biokohle,
- Bioenergienutzugn mit CO_2-Abscheidung und -Speicherung bzw. -Nutzung (BECCU/S),
- Thermische Abfallbehandlung mit CO_2-Abscheidung und -Speicherung bzw. -Nutzung (WACCU/S),
- Direkte CO_2-Abscheidung aus der Luft und-Speicherung bzw. -Nutzung (DACCU/S),
- CO_2-Nutzung, Bindung in Produkten (CCU) (Langfristige Nutzung und Kreislaufführung bei temporärer Nutzung), und
- Beschleunigte Verwitterung.

Diese Methoden sollen systematisch bewertet werden und anschließend einen Governancerahmen (insbesondere zu Monitoring und Zertifizierung) erarbeitet, ein Marktrahmen entwickelt und FuE-Projekte vorangetrieben werden.

Übergreifendes Ziel der Strategie ist es, die Methoden und Technologien zur Erzielung von Negativemissionen rechtzeitig und bedarfsgerecht zu entwickeln und skalieren.

Die im November 2025 verabschiedete Novelle des Kohlendioxidspeicher- und Transportgesetzes (KSpTG) wird als Treiber in Abschnitt 4 behandelt.

3 Realitäts-Check: Status quo des CCUS-Hochlaufs in Deutschland

Der Hochlauf zum Erreichen der deutschen Zielvorgaben im Bereich Carbon Management wird durch die Umsetzung erster Pilotprojekte in der Praxis vorangetrieben [3] [15]. Dabei ist insbesondere die Zementbranche Vorreiter, die bis 2030 Projekte mit einer jährlichen Abscheidekapazität von > 4 Mt CO_2 in Betrieb nehmen will.

3.1 CO_2-Abscheidung

Erster Schritt der CO_2-Wertschöpfungskette ist die CO_2-Abscheidung – in der Regel aus dem Rauchgas von Verbrennungsprozessen. Insbesondere für die Zement- und Kalkindustrie ist die CO_2-Abscheidung für das Erreichen der Klimaneutralität notwendig, da circa zwei Drittel der aktuellen Emissionen in diesen Branchen aus den eingesetzten Rohstoffen stammen und daher nicht anderweitig vermieden werden können.

Weitere Anwendungsfälle der CO_2-Abscheidung werden derzeit nur vereinzelt verfolgt. Im Folgenden sind die öffentlich bekannten Projekte aus Industrie und Energiewirtschaft jeweils choronolgisch kompakt in Steckbriefen dargestellt.

3.1.1 Industriesektor

Im Industriesektor treibt insbesondere die **Zementindustrie** (Abbildung 3-1) die Entwicklung von CO_2-Abscheidetechnologien voran und setzt dabei zunächst auf die Aminwäsche, jedoch zukünftig zunehmend auf Oxyfuel-Verfahren (Abbildung 3-2).

1

Zementwerk Rohrdorf (Rohrdorf, BY)
[16] [17] [18] [19]

- **Unternehmen:** Rohrdorfer Zement
- **Technologie:** Aminwäsche
- **Projektpartner:** Andritz
- **Größe:** kleinskaliger Demonstrator
- **Zielmenge:** 600 t CO_2/a (Erste Phase) (perspektivischer Ausbau auf 1.500 t CO_2/a)
- **IBN:** 2023 (laufend)
- **Investitionen:** 3 Mio. € (Erste Phase)
- **Förderungen:** keine
- **Transport:** k.A., Partner im südbayerischen CO_2peline-Projekt
- **Weiterverwertung:** CCU zu Ameisensäure (2 t CO_2 bzw. 20 Kg Ameisensäure pro Tag)
- **Sonstiges:** Erste CO_2-Rückgewinnungsanlage in der deutschen Zementindustrie. Bis 2038 will Rohrdorfer seine Zementproduktion klimaneutral gestalten.

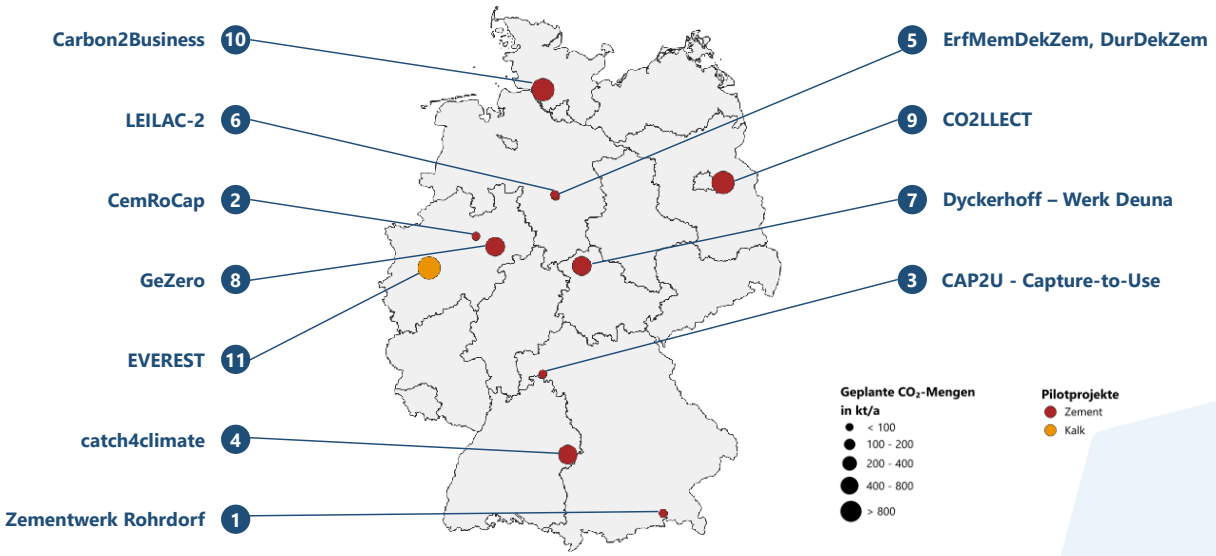

Abbildung 3-1: Standorte der CCUS-Pilotprojekte in der deutschen Zement- und Kalkindustrie

2

CemRoCap (Beckum, NRW) [20] [21] [22]

- **Unternehmen:** Holcim
- **Technologie:** Aminwäsche
- **Projektpartner:** thyssenkrupp Uhde, TU Berlin
- **Größe:** kleinskaliger Demonstrator
- **Zielmenge:** k.A.
- **IBN:** 2024 (laufend)
- **Investitionen:** k.A.
- **Förderung:** 492,9 Mio. € (BMWE)
- **Transport:** k.A.
- **Weiterverwertung:** k.A.
- **Sonstiges:** ---

3

CAP2U Capture-to-Use (Lengfurt, BY) [23] [24] [25]

- **Unternehmen:** Heidelberg Materials
- **Technologie:** Aminwäsche (90 % Abscheiderate; inkl. Reinigung, Verflüssigung, Zwischenlagerung und Verladeeinrichtung)
- **Projektpartner:** Linde Engineering
- **Größe:** Großtechnischer Maßstab
- **Zielmenge:** 70.000 t/a (Verringerung der Gesamtemissionen um 10 %)
- **IBN:** 2025 (geplant)
- **Investitionen:** k.A.
- **Förderung:** ca. 15 Mio. € (Dekarbonisierung in der Industrie (BMWK))
- **Transport:** k.A.
- **Weiterverwertung:** Nutzung als Rohstoff mit 100%iger Reinheit in der Chemie- & Lebensmittelindustrie (geplant)
- **Sonstiges:** Die CO_2-Abscheidung erfolgt nur an einem Teil des Abgasstroms des Zementklinkerofens. Das CO_2 wird überwiegend durch Linde vermarket und zum kleineren Teil durch Heidelberg Materials zur Rekarbonatisierung genutzt.

4

catch4climate (Mergelstetten, BW) [26] [27]

- **Unternehmen:** „CI4C – Cement Innovation for Climate GmbH" (Heidelberg Materials, SCHWENK, Dyckerhoff, Vicat)
- **Technologie:** Pure-Oxyfuel-Verfahren inkl. CPU
- **Projektpartner:** tyssenkrupp Polysius, Linde
- **Größe:** Forschungsprojekt
- **Zielmenge:** 160.000 t CO_2/a (450 t CO_2/d)
- **IBN:** 2025 (geplant)
- **Investitionen:** 130 Mio. €
- **Transport:** k.A.
- **Weiterverwertung:** CCU oder CCS
- **Sonstiges:** Bau einer eigenen Drehofenlinie, die ausschließlich der Forschung und Entwicklung dient. Am Standort von Schwenk können Synergien im Bezug von Steinkohlestaub und Alternativbrennstoffen genutzt werden.

5

ErfMemDekZem, DurDekZem (Höver, NS) [28] [29]

- **Unternehmen:** Holcim
- **Technologie:** PolyActive Membrantechnik
- **Projektpartner:** Helmholtz-Zentrum hereon GmbH, Cool Planet Technologies Ltd (CPT)
- **Größe:** Industrielle Forschung
- **Zielmenge:** 5.750 t CO_2/a (Nächste Ausbaustufe: ca. 10.000 t CO_2/a)
- **IBN:** 2026 (Förderungsende)
- **Investitionen:** k.A.
- **Förderung:** 1,3 Mio. € Dekarbonisierung in der Industrie, zweite Förderung: ca. 292.000 €
- **Transport:** k.A.
- **Weiterverwertung:** k.A.
- **Sonstiges:** Die erste Phase läuft bis 2026. Anschließend sind zwei weitere Phasen ab 2026 bzw. 2030 geplant, sodass perspektivisch bis zu 800.000 t CO_2 /a und damit ca. 90% der Emissionen abgeschieden werden.

6

LEILAC-2 (Hannover, NS) [30] [31] [32]

- **Unternehmen:** Heidelberg Materials
- **Technologie:** LEILAC-Verfahren (indirekte Erhitzung)
- **Projektpartner:** Calix, Lhoist, Cemex, und weitere
- **Größe:** Demonstrator
- **Zielmenge:** 100.000 t CO_2/a
- **INB:** 2026 (geplant)
- **Investitionen:** 34,7 Mio. €
- **Förderung:** 16 Mio. € (HORIZON 2020)
- **Transport:** k.A.
- **Weiterverwertung:** Nutzung oder Speicherung (angestrebt sind > 95% Reinheit)
- **Sonstiges:** Das Vorgängerprojekt LEILAC-1 hat 5 % der Prozessemissionen der Zementanlage abgeschieden, in LEILAC-2 sind 20% angestrebt. Das genutzte Modul soll skalierbar und geeignet für Multi-Fuel (Biomasse, Alternativbrennstoffe) und perspektivisch elektrische Beheizung sein.

7

Dyckerhoff – Werk Deuna (Deuna, TH) [33]

- **Unternehmen:** Dyckerhoff
- **Technologie:** k.A.
- **Projektpartner:** k.A.
- **Größe:** Industrieller Maßstab
- **Zielmenge:** 620.000 t CO_2/a
- **IBN:** 2029 (geplant)
- **Investitionen:** 350 Mio. €
- **Förderung:** k.A.
- **Transport:** Bahntransport
- **Weiterverwertung:** k.A.
- **Sonstiges:** Ziel des Projektes ist die Herstellung von netto-emissionsfreiem Zement am Standort.

8

GeZero (Geseke, NRW) [34] [35] [72]

- **Unternehmen:** Heidelberg Materials AG
- **Technologie:** Oxyfuel (2. Generation) inkl. kryogener Aufreinigung/Verflüssigung (CPU) sowie ASU und Zwischenspeicherung am Standort
- **Projektpartner:** thyssenkrupp Polysius
- **Größe:** Full Industrial Scale
- **Zielmenge:** 700.000 t CO_2/a
- **IBN:** 2029 (geplant)
- **Investitionen:** > 0,5 Mrd. €
- **Förderung:** ca. 191 Mio. € (EU-Innov.fonds)
- **Transport:** Bahntransport (ca. 300 Zugladungen mit je 40 Waggons pro Jahr) als Überbrückung bis zum Anschluss an eine CO_2-Pipeline
- **Weiterverwertung:** Offshore-Speicherung in der Nordsee über den CO2nnectNOW Hub in Wilhelmshaven von Wintershall Dea.
- **Sonstiges:** Die Zwischenspeicherung soll auch weiteren (kleineren) Akteure aus der Umgebung zugänglich gemacht werden. Ziel des Projektes ist es, das erste Net-Zero Zementwerk in Binnenlage in Deutschland zu betreiben (Baubeginn: 2026). Der zusätzlicher Energiebedarf soll ausschließlich aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden (u.a. Strom aus eigener PV-Anlage, Wärme aus Biomasse, ...) und es können potenziell Negativemissionen erzielt werden.

9

CO2LLECT (Rüdersdorf, BB) [36] [37] [38]

- **Unternehmen:** Cemex
- **Technologie:** HISORP (adsorptiv + kryogen) (inkl. Zwischenlagerung des verflüssigten CO_2)
- **Projektpartner:** Linde
- **Größe:** Kommerzieller Maßstab (FOAK für diese Technologie)
- **Zielmenge:** 1,3 Mio. t CO_2/a (12,6 Mio. t CO_2 in den ersten zehn Jahren)
- **IBN:** 2030 (vollständiger Betrieb) (Baubeginn für 2028 geplant)
- **Investitionen:** k.A.
- **Förderung:** 157 Mio. € (EU-Innovationsfonds)
- **Transport:** Bahntransport (täglich zwei Ganzzüge mit jeweils 36 Waggons) zu einem CO_2-Hub an der Küste in Norddeutschland, anschließend per Schiff zur Speicherung. Langfristig wird der Transport per CO_2-Pipeline angestrebt.
- **Weiterverwertung:** Offshore-Speicherung (Nordsee)
- **Sonstiges:** Der Energiebedarf des Standortes wird ca. verdreifacht und u.a. mittels grünem H_2 aus eigener Elektrolyse gedeckt. Das Ziel ist die Herstellung von kohlenstoffnegativem Zement im größten deutschen Zementwerk.

10

Carbon2Business (Lägerdorf, SH) [39] [40] [41]

- **Unternehmen:** Holcim
- **Technologie:** Oxyfuel (2. Generation), CPU
- **Projektpartner:** Linde Engineering, thyssenkrupp Polysius
- **Größe:** Industrieller Maßstab
- **Zielmenge:** 1,2 Mio. t CO_2/a
- **IBN:** 2030 (geplant)
- **Investitionen:** mittlerer 3-stelliger Mio.-Betrag
- **Förderung:** 109,8 Mio. € (EU-Innov.fond)
- **Transport:** Pipelinetransport (Partner: OGE)
- **Weiterverwertung:** Ursprünglich geplant Nutzung als Rohstoff; aber bisher noch keine finalen Abnehmer. Daher wird auch eine (Zwischen-)Speicherung betrachtet.
- **Sonstiges:** Es wurden zusätzlich Lieferverträge mit Offshore Windparks abgeschlossen und selber ein Onshore Windpark in eröffnet, um den ca. verdreifachten Energiebedarf zu decken.

In der **Kalkherstellung** gibt es derzeit ein einziges Pilotprojekt zur CO_2-Abscheidung in Deutschland, welches am größten Kalkwerk Europas durchgeführt wird.

11

EVEREST (Flandersbach, NRW) [42] [43]

- **Unternehmen:** Lhoist (Rheinkalk GmbH)
- **Technologie:** Oxyfuel + Cryocap-Technologie (Bau von drei neuen Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativ (GGR)-Oxyfuel Öfen mit Cryocap-FG bzw. Cryocap-Oxy-Technologie) inkl. Verflüssigung
- **Projektpartner:** Air Liquide
- **Größe:** Industrieller Maßstab
- **Zielmenge:** 1,4 Mio. t CO_2/a (insgesamt 9,3 Mio. t CO_2 über zehn Jahre)
- **IBN:** 2029 (geplant)
- **Investitionen:** k.A.
- **Förderung:** 228,7 Mio. € (EU-Innov.fonds)
- **Transport:** Pipeline-Transport mit anschließender Verschiffung zur Offshore Speicherung
- **Weiterverwertung:** Offshore-Speicherung
- **Sonstiges:** Die Abscheidung erfolgt sowohl an Bestands- als auch neuen GGR-Oxyfuel-Öfen und führt zu einer 89 %igen CO_2-Vermeidung an Europas größtem Kalkstandort. Für das abgeschiedene CO_2 wird eine Reinheit von 99,99 % angestrebt.

Die energieintensiven Branchen **Stahl, Papier, Glas** und **Chemie** sind aufgrund ihrer schwer bis teilweise unvermeidbaren Emissionen ebenfalls potenzielle Kandidaten für eine CO_2-Abscheidung und nennen die Technologie zum Teil als Möglichkeit in ihren Dekarbonisierungs-Roadmaps. Allerdings gibt es in Deutschland derzeit noch keine nennenswerten Pilotprojekte.

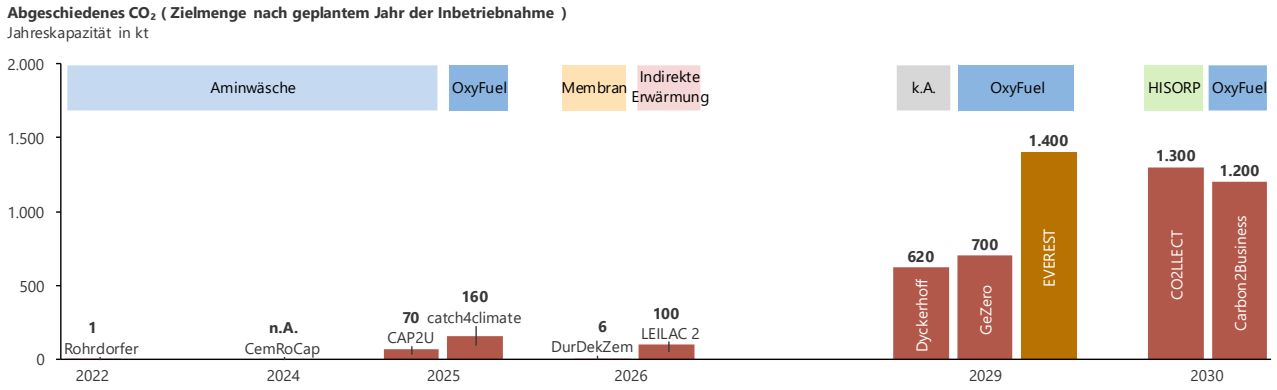

Abbildung 3-2: Zielmengen der CO_2-Abscheidung (inkl. eingesetzter Technologie) in der Zement- und Kalkindustrie.

3.1.2 Energiewirtschaft

In der Energiewirtschaft besteht künftig voraussichtlich für Anlagen zur **thermischen Abfallbehandlung (TAB)**, die Notwendigkeit für eine CO_2-Abscheidung. Trotz der Erhöhung von Recyclingquoten und weiteren Maßnahmen zur Abfallreduktion, verbleiben Abfallströme, die thermisch verwertet werden müssen. Für das dabei entstehende CO_2 ist die CO_2-Abscheidung die einzige Verminderungsmaßnahme, die bei sinkendem Zertifikate-Cap im ETS gezogen werden kann. [44] [45] [46] Während beispielsweise in Twence oder Duiven in den Niederlanden erste TAB-Anlagen mit einer CO_2-Abscheidung in Betrieb sind, wurden Pläne für deutsche Vorreiterprojekte zunächst wieder auf Eis gelegt [47]. So hatte eine Machbarkeitsstudie in Zella-Mehlis die Kosten für eine CO_2-Abscheidung mittels Aminwäsche auf 23 Mio. € geschätzt. In der detaillierten Planung erhöhten sich diese Kosten auf > 80 Mio. €, sodass das Projekt trotz der Zusage von 7,9 Mio. € Förderung gestoppt wurde. [48]

Anders als fossile Kraftwerke, sind **Biomassekraftwerke** aufgrund der biogenen Emissionen bilanziell CO_2-neutral. Damit fällt der zwingende Treiber für eine CO_2-Abscheidung an diesen Anlagen weg. Dennoch besteht die Möglichkeit, dieses biogene CO_2 abzuscheiden und somit bilanziell Negativemissionen zu erzeugen und diese als Negativzertifikate zu vermarkten, oder das abgeschieden CO_2 als Rohstoff für CCU-Anwendungen bereitzustellen. Aufgrund der vorhandenen Kosten- bzw. Förderlücke von BECCS und dem damit bisher nicht wirtschaftlichen Business Case gibt es noch keine öffentlichen bekannten BECCS-Projekte in Deutschland. [4]

Da es nach den gesetzlichen Vorgaben im Kohlendioxidspeicherungs- und -transportgesetz (KSpTG) nicht ausgeschlossen ist, wird auch das Thema CCS an **Gaskraftwerken** regelmäßig diskutiert. Aufgrund der zukünftig zu erwartenden niedrigen Volllaststunden, wird CCS an Gaskraftwerken in der Praxis jedoch nicht als kostengünstige Dekarbonisierungsmaßnahme gesehen [49]. Daher sind derzeit keine Pläne zum Einsatz von CO_2-Abscheidung an Gaskraftwerken Deutschland bekannt.

Bioabfallvergärungs- bzw. Biogasanlagen stellen ebenfalls CO_2-Quellen für eine potenzielle Abscheidung biogener Emissionen dar. In der Aufreinigung von Biogas zu Biomethan wird biogenes CO_2 abgeschieden, welches für CCU-Anwendungen genutzt oder als Negativemissionen vermarktet werden kann. Erste Projekte dazu werden beispielsweise in Mannheim durch die MVV (ca. 1.000 t CO_2 pro Jahr, die in Abbruchbeton mineralisiert werden) [50] oder die AVA in Augsburg [51] [52] durchgeführt.

Ein weiteres Einsatzgebiet für die CO_2-Abscheidung in der Energiewirtschaft stellt die Herstellung von **blauem Wasserstoff** dar, welcher eine ergänzende Rolle zum grünen Wasserstoff einnehmen könnte. Dabei wird die klassische Wasserstoffherstellung aus Kohlenwasserstoffen per Dampfreformierung durch eine nachgelagerte CO_2-Abscheidung und -Speicherung ergänzt. Derzeit sind zwei deutsche Projekte zur Produktion von blauem Wasserstoff angekündigt:

H2GE (Rostock, MV) [53] [73]

- **Unternehmen:** VNG, Equinor
- **Zielmenge:** 2 Mio. t CO_2/a
- **IBN:** 2032
- **Investitionen:** k.A.
- **Transport:** Verschiffung zur Offshore-Speicherung in Norwegen
- **Sonstiges:** Die Anlage soll jährlich ca. 8 bis 9 TWh (230.000 t H_2) erzeugen.

BlueHyNow (Wilhelmshaven, NS) [54]

- **Unternehmen:** Wintershall Dea, Nord-West Oelleitung (NWO)
- **Zielmenge:** 1,3 Mt CO_2/a
- **IBN:** 2028
- **Investitionen:** k.A.
- **Transport:** Schiff oder (Offshore) Pipelines zu Offshore-Speichern
- **Sonstiges:** Das Projekt soll eine jährliche Produktionskapazität von 5,6 TWh Wasserstoff haben und ist Teil des Energy-Hubs Wilhelmshaven.

3.2 Transport

Während die oben aufgeführten Pilotprojekte zum Teil auf Zugtransport zur zeitlichen Überbrückung setzen, wird langfristig ein Pipelinenetz als Haupttransportmittel angestrebt. Dies ist sowohl in der deutschen als auch in der europäischen Carbon Management Strategie festgehalten.

In der Planung für ein deutsches CO_2-Pipelinenetz positioniert sich insbesondere die **Open Grid Europe (OGE)** in Deutschland. Ausgehend von den Exporthäfen in Wilhelmshaven, Rotterdam, Ellund und Antwerpen/Zeebrügge soll ein CO_2-Transportnetz als Pipeline-Neubau von Nord nach Süd entstehen [55]. Zu Beginn des Hochlaufes stehen vier Pilotregionen in Nordwesten Deutschlands im Fokus (Abbildung 3-4):

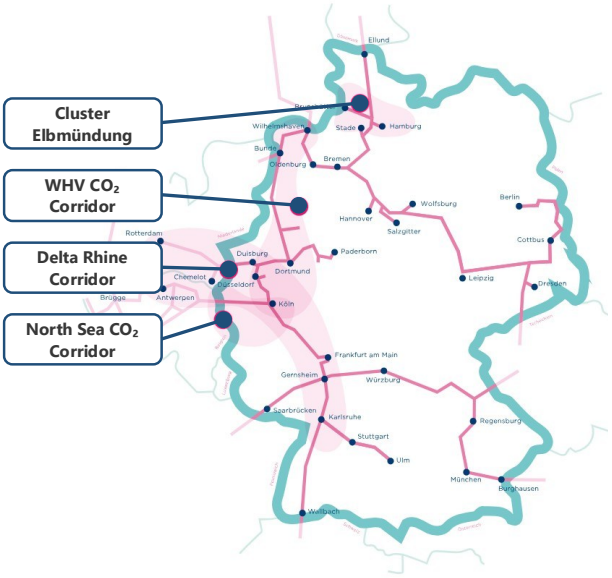

Abbildung 3-4: Entwurf eines CO_2-Netzes und Fokusregionen der OGE [55].

- **Cluster Elbmündung:** Ende der 2020er Jahr sollen die Standorte des Zementwerkes Lägerdorf, Heide und Brunsbüttel über ca. 70 km Pipelines verbunden werden.
- **WHV CO_2 Corridor:** Zur Erschließung des Exportpunktes in Wilhelmshaven werden beispielsweise Bremen, sowie die Ruhrregion um Dortmund, Essen und Düsseldorf angebunden.
- **Delta Rhine Corridor:** In einer Kooperation mit BASF, Gasuni und Shell soll das Projekt eine Verbindung von Ludwigshafen bis zum Hafen in Rotterdam schaffen.
- **North Sea CO_2 Corridor:** Die deutschen CO_2-Quellen im Raum Aachen, Köln und dem Rheinischen Revier sollen mit dem belgischen CO_2-Netz von Fluxys verbunden werden, wodurch ein Transport bis zum Exporthafen Zeebrugge ermöglicht wird.

Im Süden Deutschlands zeigt die **bayernets** unter dem Namen **CO_2peline** (Abbildung 3-3) einen möglichen CO_2-Leitungsverlauf auf, der zunächst zwischen dem Zementwerk Rohrdorf und dem Chemiedreieck Burghausen verläuft [5]. Mögliche Optionen zur Verwertung des CO_2 sind eine Nutzung als Rohstoff im Chemiedreieck (CCU), eine (Zwischen-)Speicherung (CCS) falls dies durch Aktivierung der Opt-in Klausel ermöglicht wird, oder die Umladung auf alternative Transportmittel zu Offshore-Exportterminals. Perspektivisch kann dieser Leitungsabschnitt erweitert werden, um den Anschluss an ein überregionales Netz zu schaffen.

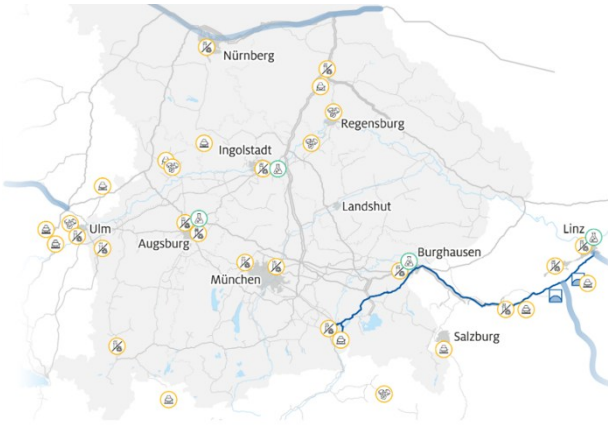

Abbildung 3-3: Entwurf eines Leitungsverlaufes im CO2peline-Projekt [5].

Als Projekt- bzw. assoziierte Partner sind die VNG und Ontras an der Machbarkeitsstudie **CapTransCO$_2$** für den Aufbau einer CO_2-Transportinfrastruktur in Mitteldeutschland beteiligt [56] [57] [58]. Eine Inbetriebnahme der Untersuchten Trassen kann demnach bereits im Jahr 2033 (± 2 Jahre) erfolgen und ist mit Investitionen von über 1 Mrd. Euro verbunden.

Für den Export bzw. die Offshore-Speicherung von CO_2 positionieren sich aktuell drei deutsche **Häfen:**

- **Bremerhaven:** In einer Pre-Feed-Studie für Ambrian Energy hat der Industriegasespezialist Messer die Anlieferung von CO_2 per Zug (inkl. Tanklager, Ent- & Beladeinfrastruktur, usw.) sowie den Weitertransport per Schiff betrachtet. Geplant wird, dass Schiffe mit einer Kapazität von bis zu 40 kt CO_2 pro Schiff den Export von bis zu 2 Mt CO_2 pro Jahr ermöglichen. [59]
- **Brunsbüttel:** Der Hafen Brunsbüttel positioniert sich, auch aufgrund des anliegenden Chemieparks, ebenfalls als möglicher CO_2-Exporthafen und Umschlagpunkt. [60] [61] [62]
- **Wilhelmshaven:** Tree Energy Solutions (TES) und Ramboll konnten eine technische Studie für ein Exportterminal abschließen, welche ein Schienen-Terminal zur Anlieferung von CO_2 sowie ein CO_2-Exportterminal für den Schiffstransport inklusive Entladung per Bahn und Pufferspeicherung betrachtet. Dabei sollen in einer ersten Phase 3 bis 5 Mt CO_2 jährlich umgeschlagen werden. In der darauffolgenden Ausbaustufe sollen nach Anbindung an die Pipeline-Infrastruktur bis zu 10 Mt CO_2 pro Jahr exportiert werden können. [63]

3.3 Speicherung

Die Novellierung des Kohlendioxid Speicher- und Transportgesetztes (KSpTG) [64] ermöglicht erstmals die „dauerhafte Speicherung von Kohlendioxid in unterirdischen Gesteinsschichten des Festlandsockels und der ausschließlichen Wirtschaftszone zu kommerziellen Zwecken im industriellen Maßstab". Bisher sind jedoch keine konkreten Projektideen bekannt.

Auch die Onshore-Speicherung wird nach dem KSpTG über landesgesetzliche Regelungen (Opt-in-Klausel) ermöglicht. Die Bundesländer halten sich bisher mit einer Positionierung zurück. Lediglich Bayern, Baden-Württemberg und Thüringen haben erklärt, die Nutzung der Klausel in einem ersten Schritt prüfen zu wollen.

- So heißt es im **bayerischen** CCUS-Aktionsplan [65]: "Bayern wird die Nutzung der Opt-In gemäß der KSpG-Novellierung prüfen und dabei die Möglichkeiten einer Speicherung auf dem Landesgebiet auf wissenschaftlicher, technischer und ökonomischer Basis sowie unter Berücksichtigung der industriepolitischen Bedeutung abwiegen."
- Die **baden-württembergische** Landesregierung betont in ihrem Positionspapier [66]: "Für Baden-Württemberg liegt aktuell keine fundierte Bewertung der Potenziale der CO_2-Speicherung vor. [...] Das Land ist weiteren Untersuchungen gegenüber aufgeschlossen und wird die Ermittlung der tatsächlich vorhandenen Potenziale schnellstmöglich anstoßen. [...] Damit geht jedoch keine Vorfestlegung über eine potenzielle Onshore-Speicherung in Baden-Württemberg einher."
- Aus **Thüringen** gibt es bisher keine veröffentlichten Papiere, jedoch hat der Wirtschaftsminister sich verhalten offen für eine Prüfung gezeigt [67]: "Wir haben in Thüringen durchaus ehemalige Erdgasförderstätten, die sich vielleicht eignen würden. [...] [D]eshalb schließen wir [die CO_2-Speicherung] grundsätzlich nicht aus. Aber ich sehe es wirklich als eine Ausnahme."

3.4 Nutzung

Eine Anlage im industriellen Maßstab zur Nutzung von CO_2 als Rohstoff zur Herstellung von Chemikalien ist derzeit nicht bekannt. Bisherige Projekte zur Herstellung von Grundchemikalien und synthetischen Flugzeugtreibstoffen (e-SAFs) beschränken sich auf den Forschungsbetrieb und werden hier aufgrund der geringen CO_2-Aufnahmekapazitäten nur exemplarisch dargestellt. Eine Demonstrationsanlage stellt beispielsweise ein DAC-to-SAF Reallabor am Flughafen Düsseldorf dar, wo mit CO_2 aus einer DAC Anlage von Greenlyte sowie grünem Wasserstoff eine jährliche Produktionskapazität von 250 t nachhaltigen Flugkerosin (e-SAF) produziert werden soll [74]. Auch im H_2-Realllabor Burghausen soll im Containermaßstab die Produktion von Methanol aus CO_2, welches per Aminwäsche aus Rauchgas gewonnen wird, und grünem Wasserstoff erprobt werden, um Erfahrungen im PtX-Bereich zu sammeln [68].

Hinzu kommen Pilotanlagen zur Nutzung bzw. Speicherung von CO_2 in Abbruchbeton. So hat das Schweizer Unternehmen Neustark bereits 2023 eine Anlage in Berlin in Betrieb genommen, welche jährlich über 1.000 t CO_2 in Abbruchbeton mineralisieren und somit dauerhaft speichern kann. Das CO_2 wird aus der in Abschnitt 3.1.2 genannten Bioabfallvergärungsanlage der MVV bereitgestellt. [69]

4 Treiber des CCUS-Hochlaufes aus Akteursperspektive

Für den CCUS-Markthochlauf wirken ausgewählte Aspekte bereits heute als Treiber bzw. könnten bei entsprechender Ausgestaltung den Hochlauf beschleunigen. Besonders relevant sind dabei der EU-ETS, Förderprogramme für CCUS-Pilotprojekte, Information/Verständnis der Öffentlichkeit und Akzeptanz in der Bevölkerung sowie rechtliche Sicherheit und infrastrukturelle Voraussetzungen.

Nach dem übergeordneten Blick auf Zielbilder und den aktuellen Stand des CCUS-Markthochlaufs, werden im Folgenden exemplarische Bereiche aufgezeigt, die aus Akteurssicht als Treiber wirken und damit den CCUS-Markthochlauf unterstützen können.

4.1 EU-ETS

Der EU-Emissionshandel (EU-ETS) ist derzeit der bedeutendste regulatorische und ökonomische Treiber für die Einführung von CO_2-Abscheidungstechnologien. Dies betrifft insbesondere emissionsintensive Branchen wie die Kalk- und Zementindustrie sowie thermische Abfallbehandlungsanlagen (TAB), die aufgrund der eingesetzten Rohstoffe unvermeidbare Prozessemissionen verursachen. Die kontinuierliche Reduktion der insgesamt ausgegebenen und frei zugeteilten Emissionszertifikate am EU-ETS führt zu einem steigenden CO_2-Preis. Dieser erwartbare zukünftige Preisanstieg erhöht den Druck, unvermeidbare oder nur schwer vermeidbare Emissionen durch CO_2-Abscheidung zu reduzieren.

Für Investitionsentscheidungen in CCUS-Technologien ist ein verlässlich festgelegter Zertifikate-Cap im EU-ETS von zentraler Bedeutung. Ein stabiler und transparenter Rahmen im ETS schafft das notwendige Vertrauen und damit die Planungssicherheit, die Unternehmen benötigen, um langfristige Investitionen in CO_2-Abscheidung und -Speicherung tätigen zu können. Ohne diese Sicherheit besteht das Risiko, dass Investitionen verzögert oder ganz unterbleiben.

Die Integration von Carbon Dioxide Removal (CDR) in den EU-ETS könnte zusätzliche Anreize schaffen, um die Entwicklung von Negativemissionstechnologien voranzutreiben (siehe auch: Kompensation vs. Reduktion - In welchem Umfang kann CO_2-Entnahme eine Alternative zu klassischen CO_2-Verminderungsmaßnahmen darstellen? [6]). Die Integration solcher Negativemissionszertifikate ist derzeit in Diskussion, ist aber bislang nicht umgesetzt. Technische Methoden zur CO_2-Entnahme sind ebenso wie CO_2-Abscheidung an fossilen Quellen auf eine funktionierende CO_2-Infrastruktur und -Wertschöpfungskette angewiesen.

4.2 Förderprogramme für CCUS-Pilotprojekte

Die ersten Pilotprojekte im industriellen Maßstab werden derzeit überwiegend mithilfe von Förderprogrammen realisiert. Für die CO_2-Abscheidung bietet insbesondere der EU-Innovationsfonds eine geeignete Fördermöglichkeit. Auf Bundesebene sollen in der anstehenden in der zweiten Runde auch CCUS-Maßnahmen der Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Difference, CCfDs) berücksichtigt werden, um Investitionen in Transformationsmaßnahmen finanziell abzusichern. CCfDs sind staatliche Förderinstrumente, die den Unternehmen über vertraglich garantierte Ausgleichszahlungen die Mehrkosten von CO_2-Verminderungstechnologien erstatten.

Als weiteres Förderinstrument steht derzeit auf Bundesebene die Bundesförderung Industrie und Klimaschutz (BIK) zur Verfügung. Die BIK unterstützt Unternehmen bei der Dekarbonisierung ihrer Produktionsprozesse durch Investitionszuschüsse für Technologien, die zu einer signifikanten Reduktion von Treibhausgasemissionen führen.

Für die Produkte der Kalk- und Zementindustrie könnten sogenannte „grüne Leitmärkte" eine zusätzliche Nachfrage schaffen, da die Produktionskosten durch CO_2-Abscheidung beim Produktionsprozess steigen. Die Idee grüner Leitmärkte besteht darin, durch gezielte politische Rahmenbedingungen und Anreize eine bevorzugte Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten zu schaffen. Dies kann beispielsweise über öffentliche Beschaffung, verbindliche Quoten und/oder Zertifizierungssysteme erfolgen. Ziel ist es, die höheren Kosten für emissionsarme Produkte auszugleichen und so Investitionen in klimafreundliche Technologien – wie z. B. die CO_2-Abscheidung an Zementwerken – wirtschaftlich attraktiver zu gestalten.

Bei der CO_2-Abscheidung von biogenen Emissionen können Negativemissionen erzielt werden und die daraus resultierenden Negativemissionszertifikate verkauft werden. Trotz dieser Erlösquelle können die Mehrkosten für CO_2-Abscheidung und Speicherung absehbar nicht kompensiert werden. Die fehlende absehbare Wirtschaftlichkeit stellt daher ein Hemmnis für die Umsetzung von BECCS-Projekten dar [4]. Mittelfristig könnten CCfDs (s. o.) die entstehenden Mehrkosten ausgleichen, während kurzfristig schnell umsetzbare Investitionszuschüsse ein Instrument zum Anschieben von Maßnahmen entlang der gesamten Prozesskette darstellen.

4.3 Information, Verständnis, Akzeptanz

Neben technischen und regulatorischen Faktoren spielt die **gesellschaftliche Akzeptanz** eine Schlüsselrolle. Fehlendes Wissen über Technologien, Risiken und Nutzen von CCUS führt häufig zu Vorbehalten in der Öffentlichkeit. Andersherum kann die Wissensbildung zu höherer Akzeptanz führen. Transparente Kommunikation, Beteiligung relevanter Stakeholder und die Vermittlung von Vorteilen – etwa für die Erreichung der Klimaziele, als Standortfaktor und zur Stärkung der regionalen Wertschöpfung – sind notwendig, um Vertrauen aufzubauen. Fehlende Akzeptanz und Aktivitäten von Bürgerinitiativen kann die Umsetzung von CCUS-Maßnahmen stoppen und ist daher in den entsprechenden Projekten immer mitzudenken.

Ebenso zentral wie die Sensibilisierung der breiten Öffentlichkeit ist der gezielte **Aufbau von Fachwissen** bei relevanten Akteuren. Ein wesentliches Handlungsfeld ist die Analyse potenzieller Onshore-Speicheroptionen, um eine fundierte Entscheidung zur Opt-In-Regelung treffen zu können. Während vereinzelte Bundesländer sich ohne weitere Voruntersuchungen gegen die Opt-In Klausel ausgesprochen haben, haben sowohl Bayern als auch Baden-Württemberg angekündigt, geologische Speicherpotenziale analysieren zu wollen und die ökonomischen und industriepolitischen Auswirkungen umfassend zu bewerten. Solche Untersuchungen können sowohl für Akteure den Aufbau von regionalen Cluster fördernd wirken und stärken auf der anderen Seite die Akzeptanz für politische Entscheidungsfindungen zu der Umsetzung von Onshore-Speicherung.

4.4 Rechtliche Sicherheit

Ohne klare Rahmenbedingungen ist eine Umsetzung von CCUS-Maßnahmen nicht möglich. Daher ist die Schaffung klarer rechtlicher Rahmenbedingungen Voraussetzung und Treiber eines CCUS-Markthochlaufes.

Das im November verabschiedete **KSpTG** schafft die gesetzlichen Grundlagen in Deutschland und klärt damit zahlreiche offene Fragen. Das Gesetz schafft die rechtliche Grundlage für den pipelinegebundenen Transport von CO_2 und stellt das überragende öffentliche Interesse für die Errichtung und den Betrieb von CO_2-Speichern und -Leitungen fest. Ebenso schafft das Gesetz die Grundlage dafür, dass im Sinne des Verursacherprinzips auch eine CO_2-Speicherung auf deutschen Gebieten ermöglicht wird. Die Offshore-Speicherung wird in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) und im Gebiet des Festlandssockels erlaubt. Meeresschutzgebiete sind für die CO_2-Speicherung explizit ausgeschlossen. Bei der zunächst nicht zugelassenen Onshore-Speicherung erhalten die Bundesländer die Möglichkeit, sich mittels "Opt-In"-Klausel aktiv für eine Speicherung auf ihrem Bundesgebiet zu entscheiden. Die einzige CO_2-Quelle, die per Gesetz vom Zugang zu einer CO_2-Infrastruktur ausgeschlossen wird, sind in Übereinstimmung mit dem beschlossenen Kohleausstieg Kohlekraftwerke.

Trotz finalem KSpTG sind weitere, verbindliche Regelungen notwendig, bspw. zur Anrechnung von CCU-Maßnahmen, dem Hohe-See-Einbringungsgesetz sowie die Anpassung internationalen Vereinbarungen wie dem London-Protokoll zur Ermöglichung von CO_2-Export zur Offshore-Speicherung. Eine Ausformulierung der bereits verabschiedeten Eckpunkte der Carbon Management Strategie bzw. der Langfriststrategie für Negativemissionen (LNe) zu einer ganzheitlichen, mit konkreten Maßnahmen unterfütterten Strategie könnte dem Thema ebenso weiter Auftrieb verschaffen und durch die Vorgabe von Zielgrößen für Orientierung und Planungssicherheit sorgen.

4.5 Infrastruktur & Cluster

Die genannten Beispielprojekte zur CO_2-Abscheidung zeigen: Insbesondere für größere CO_2-Mengen ist langfristig der Transport per Pipeline als günstigste Möglichkeit angestrebt. Daher sind konkrete Pläne und der Aufbau einer CO_2-Infrastruktur erforderlich und könnte die Umsetzung weiterer CCUS-Projekte anreizen. Der Infrastrukturaufbau sollte dabei integriert zwischen Strom, Wasserstoff und CO_2 gedacht werden, um beispielsweise Synergien in der Trassenplanung nutzen zu können. Außerdem müssen entsprechende

Energiemehrbedarfe für die CO_2-Abscheidung im Ausbau der Energieinfrastruktur berücksichtigt werden. Die Umsetzung von CCU-Projekten erfordert sowohl eine Versorgung mit Wasserstoff als auch mit Strom und CO_2, sodass auch der Ausbau von Erneuerbaren Energien mitgedacht werden muss.

Nachdem im KSpTG bereits das überragende öffentliche Interesse festgestellt wurde, ist im nächsten Schritt ein Finanzierungsmodell zur verlässlichen Kostenumlage des Infrastrukturaufbaus zu entwickeln, um das Risiko bei Investitionen in die Infrastruktur zu senken.

Bereits heute sind einige der Pilotprojekte in CCUS-Clustern zu finden, bei denen mehrere Schritte der CCUS-Wertschöpfungskette gemeinsam umgesetzt werden – bspw. die Abscheidung, der Transport und die Offshore-Speicherung. Diese Cluster können als Ausgangspunkte für den Ausbau der Infrastruktur bis hin zu einem überregionalen Netz dienen, wie es ähnlich auch in der Strategie der EU vorgegeben ist. Insbesondere in der Hochlaufphase des CCUS-Markts ermöglichen Cluster und Pilotregionen die Erprobung der neuen Technologien, um Erfahrungen im praktischen Betrieb zu sammeln und bspw. CO_2-Abscheidetechnologien für die verschiedenen Rauchgaszusammensetzungen in der Kalk- bzw. Zementindustrie oder an TAB-Anlagen anzupassen, weiterzuentwickeln und zu optimieren.

5 CCUS gewinnt an Relevanz – aber ist noch kein Selbstläufer

Die Analyse zeigt, dass ein Zielbild zur Orientierung des CCUS-Markthochlaufes in Deutschland und Europa erkennbar ist und sich die ersten Projekte in der Umsetzung befinden. Die identifizierten Treiber bieten die Möglichkeit, den CCUS-Markthochlauf weiter zu beschleunigen und dem Zielbild näher zu kommen.

Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) hat sich in den vergangenen Jahren zu einem **zentralen Bestandteil** der europäischen und deutschen Klimastrategien entwickelt. Die Analyse zeigt, dass CCUS insbesondere für Sektoren mit unvermeidbaren Prozessemissionen – wie Zement- und Kalkindustrie sowie der thermischen Abfallbehandlung – eine entscheidende Rolle spielt. Ohne diese Technologien lassen sich die Klimaziele nicht erreichen. Dennoch ist der Hochlauf von CCUS kein Selbstläufer, sondern erfordert weitere Anstrengungen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft.

Die zunehmende **Relevanz von CCUS** ergibt sich aus mehreren Faktoren. Zum einen setzen regulatorische Rahmenbedingungen wie der EU-Emissionshandel klare Anreize: Mit sinkenden Zertifikateobergrenzen (Cap) und steigenden CO_2-Preisen im EU-ETS I steigt der Druck auf emissionsintensive Branchen, Lösungen für unvermeidbare Emissionen zu finden. Zum anderen geben europäische Strategien wie die Industrial Carbon Management Strategy und der Net-Zero Industry Act ambitionierte Zielbilder vor, die den Ausbau von CO_2-Abscheidung, Transport und Speicherung bis 2050 skizzieren. Erste Pilotprojekte in Deutschland – vor allem in der Zementindustrie – zeigen, dass die Technologien technisch umsetzbar sind und liefern wertvolle Erfahrungen für die weitere Skalierung.

Dennoch bestehen **erhebliche Hemmnisse.** Die Wirtschaftlichkeit der Pilotprojekte ist derzeit nicht gegeben. Hohe Investitions- und Betriebskosten sowie fehlende Erlösmodelle verhindern, dass CCUS ohne Förderung marktfähig ist. Förderprogramme wie der EU-Innovationsfonds oder nationale Initiativen sind wichtige Impulse, reichen aber nicht aus, um einen flächendeckenden Hochlauf zu ermöglichen. Die Umsetzung von CO_2-Abscheidemaßnahmen ist derzeit noch mit hohen, zum Teil schwer vorhersehbaren Kosten entlang der gesamten Prozesskette verbunden. Gleichzeitig führt das weitere Abschmelzen der freien Zuteilung an CO_2-Zertifikaten zu Kostensteigerungen in den im internationalen Wettbewerb stehenden, emissionsintensiven Industriebereichen mit schwer bzw. unvermeidbaren CO_2-Emissionen.

Hinzu kommt, dass die notwendige **Infrastruktur** für Transport und Speicherung erst im Aufbau ist. Ohne ein verlässliches CO_2-Pipelinenetz und zugängliche Speicheroptionen bleiben viele Projekte Insellösungen. Auch rechtliche und gesellschaftliche Unsicherheiten wirken bremsend: Zwar schafft das novellierte Kohlendioxid-Speicherungs- und -Transportgesetz (KSpTG) erstmals verbindliche Grundlagen, doch bestehen weiterhin offene Fragen zu internationalen Regelungen, zur Anrechnung von CCU-Maßnahmen und zur Akzeptanz in der Bevölkerung. Schließlich befinden sich viele Technologien noch im Pilotstadium; Skalierung und Standardisierung sind notwendig, um Kosten zu senken und Betriebserfahrungen zu sammeln.

Die Analyse verdeutlich: CCUS ist eine notwendige Ergänzung zu klassischen Dekarbonisierungsmaßnahmen. Damit der Hochlauf gelingt, müssen rechtliche Rahmenbedingungen weiter konkretisiert, Infrastrukturprojekte beschleunigt und wirtschaftliche Anreize geschaffen werden. Ein steigender CO_2-Preis reizt zunehmend die Umsetzung von CO_2-Verminderungsmaßnahme an. Jedoch müssen auch die Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Umsetzung gegeben sein, um Abwanderungsrisiken zu minimieren. Dazu gehören beispielsweise wirtschaftliche und planungssichere Preise für grüner Energieträger (Strom und Moleküle), eine ausreichend verfügbare Energie- und CO_2-Infrastruktur sowie Kostendregression der CO_2-Abscheidetechnologien. Zur Erreichung der Zielsetzungen sollten daher Anreize und Rahmenbedingungen regelmäßig einer realistischen Bestandsaufnahmen, um gegebenenfalls notwendige Anpassungen vornehmen zu können.

Ebenso wichtig ist eine transparente Kommunikation, um **gesellschaftliche Akzeptanz** zu fördern. Ohne diese Voraussetzungen bleibt CCUS ein Thema für wenige Vorreiter, anstatt sich zu einer tragenden Säule der Klimastrategie zu entwickeln.

Glossar

ASU	**Air Separation Unit** Luftzerlegungsanlage zur Trennung von Luft in ihre Hauptbestandteile (Sauerstoff, Stickstoff, Argon) für industrielle Anwendungen.
BIK	**Bundesförderung Industrie und Klimaschutz** Deutsches Förderprogramm zur Unterstützung von Industrieunternehmen bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen.
BECCUS	**Bioenergy with Carbon Capture and Utilization and/or Storage** Bioenergie (z. B. Biomassekraftwerke) mit CO_2-Abscheidung und -Nutzung und/oder -Speicherung.
CCfD	**Carbon Contracts for Difference** Klimaschutzverträge: Förderinstrument, welches die Kostendifferenz zwischen einer fossilen Referenz-technologie und einer CO_2-Verminderungstechnologien ausgleicht.
CCS	**Carbon Capture and Storage** CO_2-Abscheidung und geologische Speicherung.
CCU	**Carbon Capture and Utilization** CO_2-Abscheidung und Nutzung.
CCUS	**Carbon Capture, Utilization and/or Storage** Übergeordnete Beschreibung von CO_2-Nutzung und/oder -Speicherung.
CDR	**Carbon Dioxide Removal** Methoden zur Netto-CO_2-Entnahme aus der Atmosphäre.
CMS	**(Deutsche) Carbon Management Strategie** Strategie der Bundesregierung zur Reduktion und zum Management von schwer vermeidbaren CO_2-Emissionen in Industrie und Wirtschaft.
CPU	**Cryogenic Processing Unit** Einheit zur kryogenen (Tieftemperatur-) Gasverflüssigung, -trennung bzw. -aufreinigung.
DAC/DACCUS	**Direct Air Capture / Direkt Air Carbon Capture and Utilization and/or Storage** Direkte CO_2-Abscheidung aus der Luft mit anschließender Nutzung und/oder Speicherung.
EU ETS	**European Union Emissions Trading System** EU-Emissionshandelssystem. Der ETS I (Start: 2005) betrifft die Sektoren Energieerzeugung, Industrie und innereuropäische Luftfahrt. Der ETS II (Start: 2027) enthält die Sektoren Gebäude, Straßenverkehr und kleinere Industrieanlagen.
EU ICMS	**EU Industrial Carbon Management Strategy** Europäische Strategie für industrielles CO_2-Management.
FOAK	**First of a Kind** Erste Anlage zur Demonstration einer neuen Technologie im entsprechenden Maßstab.

GGR	**Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativ-Ofen** Energieeffizienter Ofentyp mit zwei Schächten, von denen abwechselnd jeweils ein Schacht im Brennbetreib läuft und im anderen Schacht durch ein verbindenden Überstromkanal im Regenerativbetrieb Rohstoffe (in der Regel Steine) mit dem entstehenden Abgas vorgewärmt werden.
IBN	**Inbetriebnahme** Phase, in der eine Anlage oder ein System erstmals in Betrieb genommen wird.
KSpTG	**Kohlendioxid-Speicherung-und-Transorpt-Gesetz** Novellierung des Kolendioxid-Speicherungs-Gesetz (KSG). Gesetzliche Grundlage für CO_2-Speicherung und Transport in Deutschland.
LNe	**Langfriststrategie Negativemissionen** Deutsche Strategie zur Erreichung von Netto-Negativemissionen in der Klimapolitik.
LRF	**Linearer Reduktionsfaktor** Faktor zur jährlichen Reduktion der Emissionsobergrenze im EU-Emissionshandel.
NZIA	**Net Zero Industry Act** EU-Gesetz zur Förderung einer klimaneutralen Industrieproduktion.
PtX	**Power-to-X** Sammelbegriff für Technologien zur Nutzung von Strom für die Herstellung von Chemikalien (z. B. Methanol) oder zur Speicherung in anderen Energieformen (z. B. Wärme).
TAB	**Thermische Abfallbehandlung** Abfallverbrennung zur Strom- und/oder Wärmeerzeugung.
THG	**Treibhausgase** Gesamtheit der klimawirksamen Gase (z. B. Kohlendioxid CO_2, Methan CH_4, Lachgas N_2O).
WACCUS	**Waste Carbon Capture and Utilization and/or Storage** CO_2-Abscheidung und Nutzung/Speicherung aus Abfallbehandlungsprozessen.

Literaturverzeichnis

[1] Verordnung (EU) 2021/1119 des europäischen Parlaments und des Rates - zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz"). Brüssel: Das Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, 2021.

[2] Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Ausgefertigt am 2019-12-12, Version vom 2024-07-15; Berlin, Deutschland: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024.

[3] Europe Carbon Capture Activity and Project Map. In www.catf.us/ccsmapeurope/. (Abruf am 2025-11-20); Boston: Clean Air Task Force, 2025.

[4] Wagner, Johannes; Schimmel, Matthias; Dertinger, Andrea; Manych, Niccolo; Irmak, Cem; Pleier, Amanda; Amer, Nora; Guminski, Andrej: Wege zur Skalierung von Negativemissionstechnologien - Empfehlungen für Marktdesign, Infrastruktur und Finanzierung. Mannheim: MVV, 2025.

[5] co2peline - carbon dioxid transport. In https://www.co2peline.com/. (Abruf am 2023-08-18); München: Bayernets GmbH, 2023.

[6] Kracht, Hannes; Pleier, Amanda; Amer, Nora: Kompensation vs. Reduktion - In welchem Umfang kann CO_2-Entnahme eine Alternative zu klassischen CO_2-Verminderungsmaßnahmen darstellen?. München: FfE, 2025.

[7] Der Europäische Emissionshandel. In www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#entwicklung-der-treibhausgasemissionen-im-stationaren-eu-ets-1-eu-weit. (Abruf am 2025-11-12); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2025.

[8] Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU. Strasbourg: European Commission, 2024.

[9] Verordnung (EU) 2024/1735 des europäischen Parlaments und des Rates (NZIA). Ausgefertigt am 2024-6-13; Brüssel: Europäisches Parlament und Rat, 2024.

[12] Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 2024.

[13] Carbon Management Strategie der Bundesregierung - Entwurf BMWK. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024.

[14] Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe) - Eckpunkte. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 2024.

[15] Projects selected for grant preparation. In https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/calls-proposals/large-scale-calls/projects-selected-grant-preparation_en?prefLang=de. (Abruf am 2025-11-20); Brüssel: European Commission, 2025.

[16] Pilotanlage zur CO2-Abscheidung und Rückgewinnung - Fact Sheet. Rohrdorf: Rohrdorfer, 2025.

[17] Rohrdorfer baut als erstes Zementwerk in Deutschland CO2-Abscheideanlage. In https://www.rohrdorfer.eu/rohrdorfer-baut-als-erstes-zementwerk-in-deutschland-co2-abscheideanlage/. (Abruf am 2025-11-14); Rohrdorf: Rohrdorfer, 2022.

[18] Rohrdorfer will mehr CO2 aus Zementproduktion abscheiden. In https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/rohrdorfer-will-mehr-co2-aus-zementproduktion-abscheiden-010323/. (Abruf am 2025-11-14); Gernsbach: EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH, 2023.

[19] ANDRITZ-Technologie: Start für Deutschlands erste CO2-Abscheideanlage bei Rohrdorfer. In https://www.andritz.com/newsroom-de/envrionmental-solutions/2023-02-22-rohrdorfer-group. (Abruf am 2025-11-14); Graz: ANDRITZ AG, 2023.

[20] Thyssenkrupp, Holcim und TU Berlin starten Forschungsprojekt zur CO2-Reduktion. In https://www.holcim.de/thyssenkrupp-holcim-und-tu-berlin-starten-forschungsprojekt-zur-co2-reduktion. (Abruf am 2025-11-14); Hamburg: Holcim (Deutschland) GmbH, 2022.

[21] Anlagenbetrieb von Pilotanlagen gestartet. In https://www.tu.berlin/dbta/nachrichtendetails/anlagenbetrieb-von-pilotanlagen-gestartet. (Abruf am 2025-11-20); Berlin: Technische Universität Berlin, 2024.

[22] EnArgus: Verbundvorhaben: CemRoCap - Innovatives CO2-Abscheideverfahren (Aminwäsche) mittels rotierender Packungsabsorber (RPB); Teilvorhaben: Untersuchung der Eignung von RPB-Maschinen als kosteneffektive Alternative zu Packungskolonnen zur Effizienzsteigerung der CO2-Abscheidung. In www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=thyssenkrupp%20AG&v=10&p=1&s=1&id=8864310. (Abruf am 2025-11-14); Jülich: Projektträger Jülich | Forschungszentrum Jülich GmbH, 2025.

[23] Lengfurt: CO2 abscheiden und wiederverwerten. In https://www.heidelbergmaterials.de/de/zement/zementwerke/lengfurt/cap2u-projekt. (Abruf am 2025-11-13); Heidelberg: Heidelberg Materials AG, 2025.

[24] CO2 als Rohstoff: Cap2U-Großanlage im Zementwerk Lengfurt. Triefenstein: Heidelberg Materials AG, 2024.

[25] Linde und Heidelberg Materials bauen weltweit erste CCU-Großanlage. In https://www.linde-gas.de/shop/de/de-ig/linde-und-heidelberg-materials-bauen-weltweit-erste-ccu-grossanlage. (Abruf am 2025-11-13); Pullach: Linde GmbH, 2023.

[26] Forschungsprojekt „catch4climate": Große Fortschritte beim Bau der CO_2-Abscheide-Anlage in Mergelstetten. In https://www.heidelbergmaterials.de/de/media/baufachpresse/baufortschritt-catch4climate. (Abruf am 2025-11-14); Heidelberg: Heidelberg Materials AG, 2024.

[27] Das Projekt catch4climate - FAQs. In https://catch4climate.com/faqs/. (Abruf am 2025-11-14); Heidenheim: CI4C GmbH & Co. KG, 2024.

[28] Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie - ErfMemDekZem. In https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/dekarbonisierung-in-der-industrie/projekt/erfmemdekzem/. (Abruf am 2025-11-13); Cottbus: Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH, 2023.

[29] Förderprogramm Dekarbonisierung in der Industrie - DurDekZem. In https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/dekarbonisierung-in-der-industrie/projekt/durdekzem/. (Abruf am 2025-11-13); Cottbus: Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH, 2024.

[30] Grünes Licht für Abscheideprojekt LEILAC 2 im Werk von HeidelbergCement in Hannover. In https://www.heidelbergmaterials.de/de/media/baufachpresse/abscheideprojekt-leilac-2. (Abruf am 2025-11-14);
Heidelberg: Heidelberg Materials AG, 2022.
[31] LOW EMISSIONS INTENSITY LIME AND CEMENT 2: DEMONSTRATION SCALE. In https://cordis.europa.eu/project/id/884170. (Abruf am 205-11-13);
Brüssel: European Commision, 2020.
[32] Leilac-2. In https://www.leilac.com/project-leilac-2/. (Abruf am 2025-11-13); N/A: Leilac, 2025.
[33] Dyckerhoff plant Großinvestition in CO2-Abscheideanlage. In https://www.dyckerhoff.com/w/co2-abscheideanlage-im-werk-deuna. (Abruf am 2025-11-15);
Wiesbaden: Dyckerhoff GmbH, 2024.
[34] GeZero: Wegbereiter für die dekarbonisierte Zementindustrie. In https://www.heidelbergmaterials.de/de/zement/zementwerke/geseke/gezero-projekt. (Abruf am 2025-11-13);
Heidelberg: Heidelberg Materials AG, 2024.
[35] Innovation Fund - GeZero: First German inland cement plant Geseke becomes net carbon negative by implementing a full CCS chain.
Germany: Heidelberg Materials AG, 2023.
[36] Innovation in Kohlenstoffabscheidung und -transport. In https://www.linde-gas.de/shop/de/de-ig/co2llect-kohlenstoffabscheidung-und-transport. (Abruf am 2025-11-13);
Pullach: Linde GmbH, 2025.
[37] CO2LLECT - CO2 Capture and Storage.
In https://www.co2llect.de/. (Abruf am 2025-11-15);
Rüdersdorf: CEMEX Deutschland AG, 2025.
[38] EU backs pioneering CO_2 capture project at Cemex's Rüdersdorf cement plant. In https://www.cemex.com/w/eu-backs-pioneering-co2-capture-project-at-cemexs-rudersdorf-cement-plant. (Abruf am 2025-11-13); Rüdersdorf: CEMEX Deutschland AG, 2024.
[39] Spatenstich für das CO2-neutrale Zementwerk: Holcim Deutschland baut die klimafreundliche Zukunft. In https://www.holcim.de/spatenstich-fuer-das-co2-neutrale-zementwerk. (Abruf am 2025-11-13);
Hamburg: Holcim (Deutschland) GmbH, 2024.
[40] Projekt Lägerdorf - Zahlen & Fakten zum Projekt. In https://carbon2business.de/projekt-laegerdorf/zahlen-und-fakten-zum-projekt. (Abruf am 2025-11-13);
Hamburg: Holcim (Deutschland) GmbH, 2025.
[41] Innovation Fund - C2B: Carbon2Business - Project Factsheet. Germany: Holcim Deutschland GmbH, 2023.
[42] EVEREST: Decarbonizing Europe's Largest Lime Plant.
In www.lhoist.com/de-DE/everest. (Abruf am 2025-11-14);
Wülfrath: Lhoist Germany, Rheinkalk GmbH, 2024.
[43] Innovation Fund - EVEREST: Improved calcination and carbon capture for the largest lime plant in Europe - Project Factsheet. Germany: Rheinkalk GmbH, 2025.
[44] Perspektiven der thermischen Abfallbehandlung - Roadmap 2040. Düsseldorf: Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V., 2020.
[45] Dietz, Wolfram; Schönemann, Michael; Seitz, Matthias; Thiel, Nina; Rommel, Wolfgang: Nutzungsmöglichkeiten und Potenziale bei Abfallbehandlungsanlagen zur Sektorkopplung, Energiebereitstellung und CO2-Abscheidung.
Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2024.
[46] Dietz, Wolfram; Schipf, Roland; Rommel, Wolfgang: CO2-Minderungspfade der thermischen Abfallbehandlung in Bayern - bifa-Text Nr. 75. Augsburg: bifa Umweltinstitut GmbH, 2025.
[47] Methanol-Projekt in Zella-Mehlis wegen Kostenexplosion gestoppt. In https://www.mdr.de/nachrichten/thueringen/sued-thueringen/schmalkalden-meiningen/methanol-muellverbrennung-zella-mehlis-100.html. (Abruf am 2025-11-13); Leipzig: Mitteldeutscher Rundfunk, 2025.
[48] Kein Methanol aus Müllverbrennungs-anlage. In https://www.klimareporter.de/technik/kein-methanol-aus-muellverbrennungsanlage. (Abruf am 2025-11-13); Berlin: Klimawissen e.V., 2025.
[49] CCS an Gaskraftwerken – Gefahren, Kosten und Bottlenecks - Und wie grüner Wasserstoff Resilienz, Wertschöpfung und Systemintegration stärken kann.
Bonn: Germanwatch e.V., 2025.
[50] Bioabfallvergärung in Dresden. In https://www.mvv.de/ueber-uns/unternehmensgruppe/mvv-umwelt/erneuerbare-energien/bioabfallvergaerung/bioabfallvergaerung-dresden. (Abruf am 2025-11-20);
Mannheim: MVV Energie AG, 2025.
[51] CO2-Abscheidung - AVA Augsburg. In www.ava-augsburg.de/erde/co2-abscheidung/. (Abruf am 2025-11-20);
Augsburg: AVA Abfallverwertung Augsburg Kommunalunternehmen, 2025.
[52] Ökobilanz zur CO2-Abscheidung aus dem Rauchgas einer Müllverbrennungsanlage. In https://www.bifa.de/aktuelles/pressemitteilungen/oekobilanz-zur-co2-abscheidung-aus-dem-rauchgas-einer-muellverbrennungsanlage/. (Abruf am 2015-11-20);
Augsburg: bifa Umweltinstitut GmbH, 2022.
[53] H2GE Rostock. In https://www.equinor.de/wasserstoff/h2ge-rostock. (Abruf am 2025-11-20);
Friedeburg-Etzel: Equinor Deutschland GmbH, 2025.
[54] Energy Hub Projekte. www.energyhub-wilhelmshaven.de/en/projects. (Abruf am 2025-11-14); Wilhelmshaven: Wirtschaftsförderungsgesellschaft Wilhelmshaven mbH, 2025.
[55] CO2-Transportnetz. In https://vgp.oge.net/de/co2/co2-netz. (Abruf am 2025-11-17);
Essen: Open Grid Europe GmbH (OGE), 2025.
[56] Nitzsche, Jörg; Rockmann, Rico: CapTransCO2 - Verbundvorhaben: CapTransCO2 – Machbarkeit einer klimaneutralen mitteldeutschen Industrie durch den Aufbau einer vernetzten CO_2-Transportinfrastruktur für CCU/CCS; Teilvorhaben: Wissenschaftliche Begleitung zur Machbarkeitsstudie CapTransCO2 - Abschlussbericht.
Leipzig: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, 2023.
[57] Nitzsche, Jörg: CapTransCO2 - Machbarkeit einer klimaneutralen mitteldeutschen Industrie durch den Aufbau einer vernetzten CO2 -Transportinfrastruktur für CCU/CCS.
Freiberg: DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH, 2024.
[58] Nitzsche, Jörg; Rockmann, Rico: CapTransCO2 - Machbarkeit einer klimaneutralen mitteldeutschen Industrie durch den Aufbau einer vernetzten CO_2-Transportinfrastruktur für CCU/CCS. : DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, 2025.
[59] Messer schließt Pre-FEED-Studie für CO_2-Terminal von Ambrian Energy im Hafen Bremen positiv ab. In https://newsroom.messergroup.com/de/messer-schliesst-pre-feed-studie-fuer-co-terminal-von-ambrian-energy-im-hafen-bremen-positiv-ab/. (Abruf am 2025-11-13); Krefeld: Messer SE & Co. KGaA, 2025.
[60] Realisierungsvereinbarung zur klimaneutralen Transformation der Industrie an der Westküste. Schleswig-Holstein: Landesregierung Schleswig-Holstein, 2024.
[61] Schnegulau, Silvia: Energy hub and port location with a future. In https://www.hafen-hamburg.de/en/port-of-hamburg-magazine/future-energy/energy-hub-and-port-location-with-a-future/. (Abruf am 2025-11-17); Hamburg: Hafen Hamburg Marketing e. V., 2024.

[62] Hafenstandort Brunsbüttel positioniert sich als bedeutender Hub für CO2-Export. In https://www.chemcoast-park.de/de/news/hafenstandort-brunsbuttel-positioniert-sich-als-bedeutender-hub-fur-co2-export/. (Abruf am 2025-11-17); Brunsbüttl: egw:wirtschaftsförderung, 2024.
[63] Laugwitz, Alexander: TES und Ramboll prüfen CO_2-Infrastruktur für Wilhelmshavens Green Energy Hub. In https://www.ramboll.com/de-de/news/tes-und-ramboll-prufen-co2-infrastruktur-fur-wilhelmshavens-green-energy-hub. (Abruf am 2025-11-17); Hamburg: Ramboll Deutschland GmbH, 2025.
[64] Gesetz zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes (KSpTG). Ausgefertigt am 2025-11-25; Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2025.
[65] Aktionsplan CCU/CCS zum Carbon Management in Bayern. München: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, 2025.
[66] Positionspapier der Landesregierung Baden-Württemberg zu Carbon Management. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2024.
[67] CO2-Speicherung: Kein Bundesland sagt bislang "ja" zu CCS. In www.zdfheute.de/politik/deutschland/ccs-bundeslaender-lagerung-co2-100.html. (Abruf am 2025-11-17); Mainz: Zweites Deutsches Fernsehen, 2025.
[68] Meilenstein für das H_2 Reallabors Burghausen: Erste Schlüsselkomponente für Power-to-Methanol-Anlage eingetroffen. In https://www.mep.tum.de/mep/startseite/article/meilenstein-fuer-das-h2-reallabors-burghausen-erste-schluesselkomponente-fuer-power-to-methanol-anlage-eingetroffen/. (Abruf am 2025-11-13); München: Technische Universität München, 2025.
[69] Neustark eröffnet die erste kommerzielle Anlage für permanente CO2-Speicherung in der Europäischen Union. In https://www.neustark.com/de/news/neustark-er%C3%B6ffnet-die-erste-kommerzielle-anlage-f%C3%BCr-permanente-co2-speicherung-in-der-europ%C3%A4ischen-union. (Abruf am 2025-11-14); Bern: neustark AG, 2023.
[70] Commission Decision (EU) 2025/1479 of 22 May 2025 specifying the pro rata contributions to the Union CO2 injection capacity objective by 2030 from entities holding an authorisation as defined in Article 1, point 3, of Directive 94/22/EC of the European Parliament and of the Council (EU 2025/1479). Ausgefertigt am 2025-5-22; Brüssel: Europäische Komission, 2025.
[71] Szenarioanalyse für die Langfriststrategie Negativemissionen. In www.prognos.com/de/projekt/szenarioanalyse-fuer-die-langfriststrategie-negativemissionen. (Abruf am 2025-11-19); Berlin: Prognos AG, 2024.
[72] thyssenkrupp cooperates with Heidelberg Materials for the GeZero carbon capture project. In https://insights.thyssenkrupp-polysius.com/redaktion/story/thyssenkrupp-cooperates-with-heidelberg-materials-for-the-gezero-carbon-capture-project/. (Abruf am 2025-11-14); Beckum: thyssenkrupp Polysius GmbH, 2024.
[73] Projekt H2GE Rostock. In https://www.vng-handel.de/de/projekt-h2ge-rostock. (Abruf am 2025-11-20); Leipzig: VNG Handel & Vertrieb GmbH, 2025.
[74] Düsseldorfer Flughafen plant Anlage für nachhaltigen Flugkraftstoff. In https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/duesseldorfer-flughafen-plant-anlage-fuer-nachhaltigen-flugkraftstoff/. (Abruf am 2025-11-14); Essen: H2News, Vulkan-Verlag GmbH, 2025.

www.ffe.de