

# **GAP-Analyse: CCUS-Technologien Österreich**

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 80/2025

Wien, 2025

## Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren: Dr. Philipp Korntner (BioBase GmbH), Arthur Oehler, BSc  
(Institut für Industrielle Ökologie), Dr. Bernhard Windsperger, Dr. Andreas Windsperger,  
(BioBASE GmbH, Institut für Industrielle Ökologie)

Wien, 2025. Stand: 15. Oktober 2025

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an [iii3@bmimi.gv.at](mailto:iii3@bmimi.gv.at).

## **Rechtlicher Hinweis**

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

## Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem FTI-Schwerpunkt „Energiewende“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) und Klima- und Energiefonds (KLIEN). Ziel dieses Schwerpunkts ist es, durch gezielte Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsaktivitäten die Transformation zu einem klimaneutralen Energie- und Wirtschaftssystem in Österreich wesentlich zu unterstützen.

Im Fokus stehen dabei technische, organisatorische und gesellschaftliche Innovationen entlang von Wirkungspfaden und Innovationszielen, die systemisch wirken und über eine rein technologische Perspektive hinausgehen. Gefördert werden insbesondere Lösungen, die einen konkreten Beitrag zur Verfügbarkeit, Skalierung und Integration klimafreundlicher Technologien leisten und dabei Aspekte wie Kreislaufwirtschaft, Digitalisierung, soziale Teilhabe und Resilienz berücksichtigen.

Projekte im FTI-Schwerpunkt Energiewende sind angehalten, bedarfsorientierte, interdisziplinäre und praxisnahe Fragestellungen zu adressieren. Sie sollen die Innovationskraft österreichischer Akteur:innen stärken, internationale Anschlussfähigkeit ermöglichen und Transformationsimpulse für eine nachhaltige Energiezukunft setzen.

Die Verfügbarkeit und Sichtbarkeit von Projektergebnissen ist dabei ein zentraler Bestandteil des Programmdesigns. Durch begleitende Maßnahmen wie Open Access-Publikation, Kommunikation und Stakeholder-Einbindung sollen Ergebnisse skalierbar, replizierbar und in den Umsetzungsprozess überführbar gemacht werden. Daher Projekte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at) frei zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

## **Inhalt**

<b>Impressum</b> .....	<b>2</b>
<b>Rechtlicher Hinweis</b> .....	<b>3</b>
<b>Vorbemerkung</b> .....	<b>4</b>
<b>Inhalt</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Kurzfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Abstract</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Einleitung</b> .....	<b>11</b>
<b>4 CO<sub>2</sub>-Abscheidung</b> .....	<b>14</b>
<b>5 Bewertungsmatrix Technologien</b> .....	<b>19</b>
<b>6 Carbon Capture and Storage (CCS)</b> .....	<b>22</b>
<b>7 Carbon Dioxide Removal (CDR) – Überblick</b> .....	<b>29</b>
<b>8 DACCS</b> .....	<b>33</b>
<b>9 BECCS</b> .....	<b>40</b>
<b>10 Pyrolyse (Biochar, Biokohle)</b> .....	<b>46</b>
<b>11 Carbon Capture and Utilization (CCU) - Überblick</b> .....	<b>53</b>
<b>12 Mineralisierung</b> .....	<b>65</b>
<b>13 Förderung und Finanzierung</b> .....	<b>72</b>
<b>14 Fazit</b> .....	<b>78</b>
<b>15 Referenzen &amp; Weiterführende Literatur</b> .....	<b>81</b>
<b>Anhang A – aktuelle CCUS-Projekte in Österreich</b> .....	<b>91</b>
<b>Anhang B – CCUS- Start-Ups in Österreich</b> .....	<b>102</b>
<b>Anhang C – Dokumentation Workshop</b> .....	<b>106</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>116</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>117</b>



# 1 Kurzfassung

Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) gewinnt im europäischen und internationalen Kontext zunehmend an Bedeutung, da es als eine von wenigen technologischen Optionen gilt, schwer vermeidbare Emissionen zu mindern und in längerfristigen Klimastrategien auch negative Emissionen zu ermöglichen. Für Österreich ergeben sich spezifische Chancen und Herausforderungen aus der industriellen Struktur mit hohen prozessbedingten Emissionen etwa in der Stahl- und Zementindustrie, aus dem hohen Anteil erneuerbarer Energien im Stromsektor sowie aus einer stark ausgeprägten biobasierten Industrie. CCUS wird in dieser Analyse in die politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen der Europäischen Union eingeordnet, die durch Instrumente wie den Net-Zero Industry Act, den EU-Emissionshandel und das Carbon Removal Certification Framework geprägt sind. Diese Vorgaben schaffen sowohl neue Anreize als auch Unsicherheiten für die Umsetzung von Projekten in Österreich.

Die GAP-Analyse verfolgt das Ziel, bestehende Entwicklungen systematisch zu bewerten und Lücken zwischen dem Stand der Technik, den regulatorischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie den praktischen Umsetzungsoptionen sichtbar zu machen. In diesem Fall wurden verschiedene Technologien betrachtet, die von punktuellen basierter CO<sub>2</sub>-Abscheidung über Direct Air Capture bis hin zu biogenen Verfahren wie BECCS oder Pyrolyse reichen. Ergänzt wird dies durch Pfade der CO<sub>2</sub>-Nutzung in Chemikalien oder synthetischen Kraftstoffen sowie durch Speicheroptionen im europäischen Kontext. Auch regulatorische Vorgaben, Finanzierungsmechanismen und Infrastrukturanforderungen wurden in die Analyse einbezogen. Ein wichtiger Bestandteil ist zudem die Darstellung von Best-Practice-Beispielen, etwa internationale Pilot- und Demonstrationsprojekte, die zeigen, wie technische, organisatorische und rechtliche Hürden in anderen Ländern eine Rolle spielen. Solche Beispiele sind für Österreich von Bedeutung, um eigene Handlungsspielräume und Kooperationsmöglichkeiten im europäischen Rahmen besser einschätzen zu können.

Die Chancen liegen insbesondere in der Möglichkeit, unvermeidbare Restemissionen in energieintensiven Sektoren zu verringern, Kohlenstoffflüsse in Kreisläufen zu führen, zusätzliche Wertschöpfung durch CO<sub>2</sub>-basierte Produkte und Märkte zu schaffen und so die industrielle Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu stützen. Technologische Ansätze wie Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung (BECCS), direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus

der Luft mit geologischer Speicherung (DACCS), Pyrolyseverfahren oder CO<sub>2</sub>-basierte Synthesewege in der Chemie und bei Kraftstoffen stehen hier stellvertretend für eine breite Palette möglicher Pfade. Ihr Potenzial liegt nicht nur in der Emissionsminderung, sondern auch in der Verbindung mit bestehenden Stärken der österreichischen Industrie und der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien.

Gleichzeitig bestehen erhebliche Hemmnisse. Dazu zählen hohe spezifische Kosten vieler Verfahren, erheblicher zusätzlicher Energiebedarf, die noch unzureichende Infrastruktur für Transport und Speicherung von CO<sub>2</sub> sowie regulatorische Einschränkungen, etwa das nationale Verbot der geologischen Speicherung. Ergänzt werden diese durch Unsicherheiten bei Marktmechanismen, fehlende langfristige Geschäftsmodelle, Investitionsrisiken sowie Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz. Diese Faktoren erschweren den Übergang von Pilot- und Demonstrationsprojekten in eine breite industrielle Umsetzung.

Die GAP-Analyse verdeutlicht, dass für eine erfolgreiche Implementierung in Österreich mehrere Lücken geschlossen werden müssen. Auf technologischer Ebene bestehen Defizite bei Effizienz und Skalierbarkeit. Ökonomisch ist eine Diskrepanz zwischen den Kosten von Abscheidung, Nutzung oder Speicherung und den derzeitigen Preisen im Emissionshandelssystem erkennbar, was ohne zusätzliche Fördermechanismen eine großtechnische Umsetzung hemmt. Regulatorisch sind fehlende Verknüpfungen zwischen neuen Zertifizierungssystemen und bestehenden Märkten sowie nationale Beschränkungen von Relevanz. Infrastrukturell fehlen Pipeline- und Speicherlösungen, die eine Einbindung in europäische Netze ermöglichen würden.

CCUS eröffnet erhebliche Chancen zur Erreichung der Klimaneutralität und zur Transformation von Industrieprozessen, stößt jedoch auf substanzielle Barrieren. Die Einbindung internationaler Best-Practice-Beispiele zeigt, dass technologische, ökonomische und regulatorische Herausforderungen lösbar sind, wenn geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden. Für Österreich ist daher entscheidend, durch koordinierte europäische und nationale Strategien, gezielte Förder- und Investitionsanreize sowie durch internationale Kooperationen einen Rahmen zu schaffen, der eine schrittweise Schließung der bestehenden Lücken ermöglicht. Nur so kann sich das volle Potenzial von CCUS entfalten und zugleich die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und die Glaubwürdigkeit der Klimaziele langfristig gesichert werden.

## 2 Abstract

Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) is gaining increasing importance in the European and international context, as it is regarded as one of few technological options to mitigate hard-to-abate emissions and to enable negative emissions within long-term climate strategies. For Austria, specific opportunities and challenges arise from its industrial structure with significant process-related emissions in sectors such as steel and cement, from the high share of renewable energy in the power sector, and from a strong bio-based industry. In this analysis, CCUS is placed within the political and regulatory framework of the European Union, shaped by instruments such as the Net-Zero Industry Act, the EU Emissions Trading System, and the Carbon Removal Certification Framework. These instruments create both new incentives and uncertainties for the implementation of projects in Austria.

The gap analysis aims to systematically assess existing developments and to identify discrepancies between the state of the art, the regulatory and economic frameworks, and practical implementation options. In this case, a range of technologies were considered, spanning from point-source capture and direct air capture to biogenic approaches such as BECCS or pyrolysis. This is complemented by pathways for CO<sub>2</sub> utilization in chemicals or synthetic fuels, as well as storage options within the European context. Regulatory requirements, financing mechanisms, and infrastructure needs were also included in the analysis. An important element is the presentation of best-practice examples, such as international pilot and demonstration projects, which illustrate how technical, organizational, and legal challenges play a role in other countries. Such examples are relevant for Austria to better evaluate its own scope for action and cooperation opportunities within the European framework.

Opportunities can be seen particularly in the potential to reduce unavoidable residual emissions in energy-intensive sectors, to support circular carbon flows, to generate additional value through CO<sub>2</sub>-based products and markets, and to strengthen industrial competitiveness in the long term. Technological approaches such as bioenergy with carbon capture and storage (BECCS), direct air capture with geological storage (DACCS), pyrolysis, or CO<sub>2</sub>-based synthesis routes in chemicals and fuels serve as representative examples of a wide range of potential pathways. Their potential lies not only in reducing

emissions but also in linking to Austria's industrial strengths and the availability of renewable energy.

At the same time, significant barriers remain. These include high specific costs of many processes, substantial additional energy requirements, insufficient infrastructure for CO<sub>2</sub> transport and storage, and regulatory restrictions such as the national ban on geological storage. These are compounded by uncertainties in market mechanisms, the absence of long-term business models, investment risks, and questions of public acceptance. Together, these factors hinder the transition from pilot and demonstration projects to widespread industrial deployment.

The gap analysis highlights that several gaps need to be closed for successful implementation in Austria. At the technological level, shortcomings exist in efficiency and scalability. Economically, there is a discrepancy between the costs of capture, utilization, or storage and current prices in the emissions trading system, which hinders large-scale deployment without additional support mechanisms. From a regulatory perspective, missing links between new certification systems and existing markets, as well as national restrictions, are of particular relevance. Infrastructurally, pipeline and storage solutions are lacking that would enable integration into European networks.

CCUS presents considerable opportunities to contribute to climate neutrality and to the transformation of industrial processes, but also faces substantial barriers. The inclusion of international best-practice examples demonstrates that technological, economic, and regulatory challenges can be addressed if appropriate framework conditions are established. For Austria, it will therefore be crucial to create such a framework through coordinated European and national strategies, targeted support and investment incentives, and international cooperation. Only under these conditions can the full potential of CCUS be realized, while safeguarding industrial competitiveness and the credibility of climate goals in the long term.

# 3 Einleitung

## 3.1 Carbon Capture Utilization and Storage

Im Zuge der globalen Anstrengungen zur Erreichung der Klimaneutralität rücken Technologien zur Abscheidung, Nutzung und Speicherung von Kohlendioxid (Carbon Capture, Utilization and Storage – CCUS) zunehmend in den Fokus von Politik, Wissenschaft und Industrie. Die Europäische Union (EU) hat mit dem European Green Deal und dem Ziel der Klimaneutralität bis 2050 eine klare Richtung vorgegeben. Die sektorübergreifende Transformation erfordert erhebliche Emissionsreduktionen in allen Wirtschaftsbereichen – insbesondere dort, wo Emissionen technisch oder wirtschaftlich schwer vermeidbar sind. CCUS-Technologien bieten hierfür ein wesentliches Instrument, um Restemissionen zu reduzieren oder negative Emissionen zu generieren.

Im Zuge des Green Deal sowie im „Fit for 55“-Paket und dem EU-Klimagesetz wird CCUS als komplementäre Maßnahme zu Energieeffizienz, erneuerbaren Energien und Verhaltensänderungen eingeordnet. Besonders in der Industrie (z. B. Zement, Stahl, Chemie) und bei der Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen (insbesondere für die Luftfahrt) werden CCUS und verwandte Technologien als strategisch wichtige Optionen verstanden. Die Rolle von Carbon Dioxide Removal (CDR) mittels Technologien wie Direct Air Capture and Storage (DACCS), Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) oder auch der Biokohle (Bio-Char) gewinnt im Rahmen der Netto-Null-Strategien ebenfalls an Bedeutung.

Für Österreich als Industriestandort mit starker Stahl- und Zementproduktion, begrenzt fossilem Energiemix, aber hohem Erneuerbaren-Anteil im Stromsektor und einer starken biobasierten Industrie ergeben sich spezifische Herausforderungen und Chancen im Umgang mit CCUS. Gleichzeitig besteht eine enge Verzahnung mit europäischen Infrastrukturen und regulatorischen Rahmenwerken – etwa im Bereich CO<sub>2</sub>-Transport, Speicherinfrastruktur oder Zertifizierung von Negativemissionen. Vor diesem Hintergrund zielt dieser Bericht darauf ab, den Stand der Technik, regulatorische Bedingungen, Forschungsschwerpunkte sowie bestehende Lücken (Gaps) für die relevanten CCUS-Technologien in Österreich zu identifizieren und darzustellen.

### 3.2 Rahmenbedingungen für CCUS in Österreich im Kontext der EU

Die politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für CCUS-Technologien in Österreich sind maßgeblich durch europäische Vorgaben geprägt. Die EU-Richtlinie über die geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> (CCS-Richtlinie 2009/31/EG) bildet die gesetzliche Grundlage für die Genehmigung und Überwachung von CO<sub>2</sub>-Speicherstandorten. In Österreich wurde diese Richtlinie zwar in nationales Recht überführt, jedoch erlaubt das CCS-Gesetz aus 2011 derzeit keine geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> im Inland – ein Umstand, der die nationale Umsetzung von CCS bislang stark limitiert. Für CCU-Technologien bestehen hingegen weniger spezifische Einschränkungen, jedoch starke Konkurrenz mit klassischen fossilen Produkten und Unsicherheiten bei der Anrechenbarkeit im CO<sub>2</sub>-Emissionshandel.

Im Rahmen der „EU Industrial Carbon Management Strategy“ wird jedoch zunehmend auf eine integrierte europäische Infrastruktur für CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung gesetzt. Diese Strategie unterstützt auch den Aufbau grenzüberschreitender Pipelines und die Schaffung eines CO<sub>2</sub>-Marktes für negative Emissionen. Österreich kann hiervon profitieren – etwa durch Anbindung an Speicherprojekte in der Nordsee oder Kooperationen mit Nachbarländern wie Deutschland, Italien oder Kroatien.

Gleichzeitig etabliert die EU mit dem Emissionshandelssystem (EU ETS) einen wirtschaftlichen Rahmen, der die Abscheidung und Vermeidung von CO<sub>2</sub> monetär bewertet. Projekte, die CO<sub>2</sub> effektiv vermeiden oder dauerhaft speichern, können in diesen Mechanismus eingebunden werden. Ab 2026 soll zudem ein Carbon Removal Certification Framework (CRCF) zur Anwendung kommen, welches die Standardisierung und Verifikation von CDR-Technologien vorantreibt. Dies ist besonders relevant für BECCS, DACCS und andere Negativemissionstechnologien, die langfristig in den Emissionsausgleich einfließen sollen.

In Österreich existieren zahlreiche Forschungsinitiativen, Pilotprojekte und Kooperationsplattformen im Bereich CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Nutzung und -Management. Programme wie „NEFI“ (New Energy for Industry) oder die nationale FTI-Strategie im Energiebereich fördern relevante Forschungsvorhaben. Dennoch fehlen bislang umfassende Fördermechanismen für großtechnische Umsetzung und langfristige Investitionssicherheit – insbesondere im Hinblick auf Speicherung und Transportinfrastruktur.

Die Bewertung und Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen ist entscheidend, um Österreichs Industriesektor zukunftsfähig zu gestalten und die nationalen sowie europäischen Klimaziele zu erreichen.

Die folgende GAP-Analyse ist in eine Reihe technologiebezogener Steckbriefe gegliedert, die zentrale technische, wirtschaftliche und regulatorische Aspekte betrachten und vorhandene Gaps aufzeigen sollen. Neben klassischen CCS-Technologien (Post-/Pre-Combustion Capture, Oxy-Fuel, Transport und geologische Speicherung) werden auch kombinierte Ansätze wie BECCS, DACCS und weitere CDR-Technologien betrachtet. Ebenso werden CO<sub>2</sub>-Nutzungspfade (CCU), insbesondere im Bereich synthetischer Kohlenwasserstoffe und der Zementindustrie, systematisch beleuchtet. Ziel ist es, eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Forschung, Politik und Investitionen im Bereich CO<sub>2</sub>-Management in Österreich zu unterstützen.

### **3.3 Workshop**

Im Rahmen der Analyse wurde auch ein Workshop zum Thema „GAPs, Treiber und Hemmnisse für CCUS in Österreich“ durchgeführt. Der Workshop fand im Zuge des 12. Carbon Capture Forums (CCF) statt und brachte Vertreter:innen aus Industrie, Forschung, Verwaltung, Start-ups und Politik zusammen. Diskutiert wurden zentrale Herausforderungen für die breite Umsetzung von CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung in Österreich – darunter genannte regulatorische Unsicherheiten (z. B. das nationale Speicherverbot), fehlende Anreize und Fördermechanismen, technologische Lücken sowie infrastrukturelle Engpässe bei CO<sub>2</sub>-Transport, Energieversorgung und Wasserstoffbereitstellung. Auch innovative Nutzungspfade und Start-up-Perspektiven wurden eingebracht. Der Workshop knüpfte an die Ergebnisse einer Online-Kurzumfrage, die im Vorfeld beim 11. Carbon Capture Forum durchgeführt wurde, an und diente der vertieften Diskussion priorisierter Handlungsfelder entlang der gesamten CCUS-Wertschöpfungskette.

Die Ergebnisse flossen in die Steckbriefe mit ein. Ein Ergebnisprotokoll findet sich in Anhang C.

# 4 CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung bildet die Grundlage für Speicherung und Nutzung von CO<sub>2</sub>.

## 4.1 Industrielle Punktquellen

Die Abscheidung von CO<sub>2</sub> an industriellen Punktquellen bildet den klassischen Anwendungsbereich von Carbon Capture-Technologien und stellt eine zentrale Maßnahme zur Reduktion industrieller Treibhausgasemissionen dar. Punktquellen sind Anlagen, bei denen CO<sub>2</sub> konzentriert und kontinuierlich in großen Mengen emittiert wird – etwa Zement- und Stahlwerke, Chemieanlagen oder fossile Kraftwerke. In diesen Prozessen entsteht CO<sub>2</sub> entweder durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe oder als prozessbedingtes Nebenprodukt, das sich nicht allein durch Umstellung auf erneuerbare Energien vermeiden lässt. Durch den relativ hohen CO<sub>2</sub>-Gehalt in den Abgasströmen sind diese Quellen technisch besonders geeignet für eine effiziente Abscheidung.

Verschiedene Verfahren wurden entwickelt, um CO<sub>2</sub> in diesen Anwendungen gezielt zu trennen – darunter die Nachverbrennungs-abscheidung (Post-Combustion), die Abscheidung vor der Verbrennung (Pre-Combustion) sowie die Verbrennung unter Sauerstoffatmosphäre (Oxy-Fuel). Diese Technologien sind gut in bestehende industrielle Prozesse integrierbar und gelten als technisch erprobt, wenngleich sie je nach Anwendung unterschiedliche Anforderungen an Infrastruktur, Energiebedarf und Anlagendesign stellen. Die punktquellenbasierte CO<sub>2</sub>-Abscheidung wird deshalb als Schlüssel zur Dekarbonisierung sogenannter „hard-to-abate“-Sektoren angesehen – insbesondere dort, wo keine kurzfristigen Substitutionslösungen zur Verfügung stehen.

## 4.2 Post-Combustion Capture (nach der Verbrennung)

Die Post-Combustion-Technologie ist derzeit am weitesten verbreitet und wird in bestehenden Industrie- und Kraftwerksanlagen eingesetzt. Hierbei wird CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas entfernt, nachdem der fossile Brennstoff mit Luft verbrannt wurde. Typische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen liegen zwischen 4 und 14 %.

Hauptsächlich kommt die chemische Absorption mit Aminen (wie Mono-ethanolamin, MEA) zum Einsatz, bei der CO<sub>2</sub> in der Lösung gebunden und durch Erhitzung wieder freigesetzt wird. Physikalische Absorber oder feste Sorbentien wie aminmodifizierte Silikate befinden sich ebenfalls in Entwicklung.

**Vorteile:** Gut erprobte, nachrüstbare Technologie; geeignet für bestehende Industrieanlagen (Retro-Fitting).

**Herausforderungen:** Hoher Energiebedarf für die Lösungsmittelregeneration; Korrosion, Lösungsmittelverluste und Skalierungseffekte.

### 4.3 Pre-Combustion Capture (vor der Verbrennung)

Pre-Combustion-Verfahren eignen sich insbesondere für neue Kraftwerks-konzepte und die Produktion von Wasserstoff. Hier wird der Brennstoff zunächst in ein Synthesegas umgewandelt, das hauptsächlich aus Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlenmonoxid (CO) besteht. Über die Wassergas-Shift-Reaktion wird CO in CO<sub>2</sub> umgewandelt, das anschließend – oft physikalisch – abgetrennt werden kann.

**Vorteile:** Hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration und -Druck ermöglichen effiziente Abtrennung; ideal für integrierte Prozesse (z. B. Wasserstoffproduktion).

**Herausforderungen:** Komplexe Anlagentechnik; weniger geeignet zur Nachrüstung bestehender Anlagen.

### 4.4 Oxy-Fuel-Verbrennung

Bei der Oxy-Fuel-Technologie wird der Brennstoff nicht mit Luft, sondern mit nahezu reinem Sauerstoff (>95 %) verbrannt. Dadurch entstehen Abgase, die fast ausschließlich aus Wasserdampf und CO<sub>2</sub> bestehen. Nach Kondensation des Wassers bleibt hochreines CO<sub>2</sub> zurück.

**Vorteile:** Hohe Reinheit des CO<sub>2</sub>; vereinfachte Abtrennung; keine Stickoxidbildung.

**Herausforderungen:** Energieintensive Luftzerlegung zur Sauerstoffbereitstellung; Rückführung von CO<sub>2</sub> zur Temperaturregelung erforderlich.

## 4.5 Membranverfahren

CO<sub>2</sub> kann auch selektiv mithilfe von Membranen abgeschieden werden. Diese trennen Gaskomponenten basierend auf unterschiedlichen Diffusions-geschwindigkeiten oder Löslichkeiten. Zum Einsatz kommen polymerbasierte Membranen sowie hybride Systeme mit eingebetteten MOFs (Metal Organic Frameworks) oder Zeolithen.

**Vorteile:** Modular einsetzbar; potenziell niedriger Energieverbrauch; geringer Platzbedarf.

**Herausforderungen:** Begrenzte Trennschärfe bei niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen; Materialalterung und Druckverluste.

## 4.6 Sorbentienbasierte Feststoffverfahren

Feste Sorbentien – etwa poröse Trägermaterialien, beschichtet mit Aminen oder MOFs – binden CO<sub>2</sub> physikalisch oder chemisch und geben es durch Temperatur-, Druck- oder Feuchtigkeitswechsel wieder ab.

**Vorteile:** Hohe Selektivität; gute Wiederverwendbarkeit; geeignet für modulare oder dezentrale Anwendungen.

**Herausforderungen:** Sorbensdegradation bei Zyklenbetrieb; Herausforderungen bei der Wärmeführung und Regeneration.

## 4.7 Kryogene Abscheidung

Bei hochkonzentrierten CO<sub>2</sub>-Strömen kann CO<sub>2</sub> durch starke Abkühlung direkt auskristallisiert und anschließend hochrein gewonnen werden.

**Vorteile:** Hohe Produktreinheit; besonders geeignet für spezielle Anwendungen mit reinem oder fast reinem CO<sub>2</sub> (z.B.: Lebensmittel).

**Herausforderungen:** Hoher Energiebedarf; technischer Aufwand für Kühlung und Handhabung; limitiert auf spezielle Anwendungsfälle.

## 4.8 Carbonate Looping (Karbonat-Kreislauf)

In diesem zyklischen Verfahren wird CO<sub>2</sub> bei mittleren Temperaturen mit Calcium-oxid zu Calciumcarbonat gebunden und bei höheren Temperaturen wieder freigesetzt. Es eignet sich insbesondere für die Integration in Zement- oder Kalkprozesse.

**Vorteile:** Gute Einbindung in Hochtemperaturprozesse; günstige Sorbens-materialien; hohe CO<sub>2</sub>-Ausbeute.

**Herausforderungen:** Materialermüdung des Sorbens durch Sinterung; hoher thermischer Energiebedarf bei der Regeneration.

## 4.9 Direct Air Capture (DAC) – CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Atmosphäre

DAC ist eine Technologie zur Entfernung von CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft. Im Gegensatz zu klassischen CCUS-Verfahren, die CO<sub>2</sub> an konzentrierten Punktquellen wie Industrieanlagen oder Kraftwerken abscheiden, zielt DAC auf das diffuse CO<sub>2</sub> der Atmosphäre ab – ein Ansatz, der insbesondere im Kontext langfristiger Klimastrategien zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen an Bedeutung gewinnt. DAC kann damit zur aktiven Reduktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre beitragen und ist eine der wenigen derzeit verfügbaren technischen Optionen für sogenannte negative Emissionen.

Technologisch basiert DAC auf zwei grundlegenden Ansätzen: der Absorption mit Flüssigkeiten und der Adsorption an festen Sorbentien. Flüssigbasierte Systeme arbeiten meist mit alkalischen Lösungen, die CO<sub>2</sub> chemisch binden und in einem nachgeschalteten Prozess wieder abgeben. Feststoffbasierte Systeme nutzen poröse Materialien, die CO<sub>2</sub> aus der Luft anlagern und durch Temperatur-, Druck- oder Feuchtigkeitswechsel wieder freisetzen. Beide Verfahren sind prinzipiell skalierbar und lassen sich modular gestalten – allerdings sind sie derzeit noch mit hohem Energieaufwand und vergleichsweise hohen Kosten verbunden.

Ein großer Vorteil von DAC ist seine Standortflexibilität – die Technologie kann nahezu überall betrieben werden, vorausgesetzt es stehen ausreichend erneuerbare Energiequellen zur Verfügung. In Kombination mit geologischer Speicherung (DACCS) lässt sich das abgeschiedene CO<sub>2</sub> dauerhaft entfernen. Alternativ kann das gewonnene CO<sub>2</sub> auch in der Industrie, etwa zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe, weiter-verwendet werden.

Trotz wachsender internationaler Pilotprojekte befindet sich DAC noch in einem frühen Entwicklungs- und Markthochlaufstadium. Die Technologie ist technisch anspruchsvoll, sehr energieintensiv und wirtschaftlich bislang nur unter speziellen Rahmenbedingungen tragfähig. Dennoch gilt sie als wichtige Ergänzung zu anderen Klimaschutzmaßnahmen – insbesondere dort, wo Emissionen nicht vollständig vermieden werden können.

**Vorteile:** DAC ermöglicht aktive CO<sub>2</sub>-Entnahme und negative Emissionen; Standortunabhängiger Betrieb ohne industrielle Punktquelle ergänzt bestehende Dekarbonisierungsstrategien und kann (muss) unvermeidbare Rest-emissionen kompensieren

**Herausforderungen:** Hoher Energiebedarf und derzeit hohe Kosten pro Tonne abgeschiedenem CO<sub>2</sub>; Begrenzte Skalierung und Infrastruktur für CO<sub>2</sub>-Transport und Speicherung erforderlich.

# 5 Bewertungsmatrix Technologien

Nachfolgend ist eine Bewertungsmatrix dargestellt, welche die Inhalte der einzelnen Streckbriefe in Form einer qualitativen Einordnung zusammenfasst. Dabei sind für die jeweiligen Technologien (in den Zeilen) die wesentlichen Kriterien qualitativ beschrieben.

Tabelle 1: Bewertungsmatrix CCUS Technologien

Hauptkategorie	Technologien	Produkt	Prozesse	Policy	CO <sub>2</sub> -Quelle	kritische/bedeutende Prozessschritte notwendig Down-/Up-stream	TRL	spezifischer Energiebedarf (kWh/t CO <sub>2</sub> )	THG - Wirkung	Herausragendes Alleinstellungsmerkmal	Herausragende Herausforderung	(Infrastruktur) CO <sub>2</sub> -Transport-Transportnetz	Logistik
					grün: leicht integrierbar oder prozessbedingt integriert orange: mehrere Optionen rot: sehr spezialisierte Anwendung	grün: unabhängig, orange: 1 Prozessschritt rot: mehrere Prozessschritte	grün: max. 8-9 orange: max. <8 rot max. 1-3	relative Größe in Abhängigkeit höchster, niedrigster rot: hoch gelb: mittel, aber abhängig von energieintensivem Reaktionspartner orange: energieintensiv, aber effizienter grün: niedrig	rot: keine permanente/langfristige Speicherung von CO <sub>2</sub> orange: langfristige Speicherung mancher Produkte (CRCF) grün: Speicherung von atmosphärischem CO <sub>2</sub> oder Nutzung von nicht recyclebaren/nutzbaren Rohstoffen	grün: vorhanden, gelb: nicht vorhanden	grün: nicht vorhanden rot: vorhanden	CO <sub>2</sub> -Transport-Transportnetz Pipeline grün: unabhängig, leicht integrierbar, gelb: abhängig aber etabliertes Netz orange: durch Invest integrierbar rot: abhängig von Netz, nicht vorhanden oder Cluster notwendig	Schiff Tankwagen LKW grün: unabhängig, leicht integrierbar, gelb: abhängig, aber etabliertes Netz rot: abhängig von Netz nicht vorhanden oder Cluster notwendig
CCU	direkte Verwendung	CO <sub>2</sub>	physikalisch	NZIA, keine Speicherung, kein ETS	point source, DAC, CO <sub>2</sub> Bezug über Pipeline	CO <sub>2</sub> Abscheidung / Reinigung / Transport	6-9	direkte Nutzung	keine Speicherung,	keine aufwendige Umwandlung		dit. Transport per Logistik abgedeckt	für spezialisierte Anwendung zB.: Lebensmittel
	Methanisierung	Methan	chemisch	NZIA, kein ETS (keine permanente Speicherung), RFNBO	point source, DAC, CO <sub>2</sub> transport infrastructure	H <sub>2</sub> Erzeugung / CO <sub>2</sub> Abscheidung / Reinigung	6-8	hoher Energieaufwand, H <sub>2</sub> abhängig	kurzfristige Speicherung			integrierbar, aber abhängig von Invest	wenn CO <sub>2</sub> Pipeline vorhanden, sonst sehr ineffizient umsetzbar
	katalytische Hydrierung	Methanol	chemisch	NZIA, kein ETS (keine permanente Speicherung), RFNBO	point source, DAC, CO <sub>2</sub> transport infrastructure	H <sub>2</sub> Erzeugung / CO <sub>2</sub> Abscheidung / Reinigung	6-8	hoher Energieaufwand, H <sub>2</sub> abhängig	kurzfristige Speicherung			integrierbar, aber abhängig von Invest	wenn CO <sub>2</sub> Pipeline vorhanden, sonst sehr ineffizient umsetzbar
	RWGS, FT-Synthese	Chemikalien, SAFs	chemisch	NZIA, kein ETS (keine permanente Speicherung), CRCF haltbare Produkte, RFNBO	point source, DAC, CO <sub>2</sub> transport infrastructure	H <sub>2</sub> Erzeugung / CO <sub>2</sub> Abscheidung / Reinigung	6-9	hoher Energieaufwand, H <sub>2</sub> abhängig	kurzfristige Speicherung, (mittelfristige) Speicherung in langlebigen Produkten möglich	ermöglicht Drop-In für umfassende fossile Wertschöpfungsketten		integrierbar, aber abhängig von Invest	wenn CO <sub>2</sub> Pipeline vorhanden, sonst sehr ineffizient umsetzbar

	Urea Synthese	Urea	chemisch	NZIA, kein ETS (keine permanente Speicherung)	point source (integriert)	NH3 Produktion (Haber-Bosch), H2 Erzeugung	8-9	hoher Energieaufwand Haber-Bosch, H2 abhängig	kurzfristige Speicherung			normalerweise voll integriert	normalerweise voll integriert
	elektrochemische Reduktion	Chemikalien	(elektro-) chemisch	NZIA, kein ETS (keine permanente Speicherung), CRCF haltbare Produkte, RFNBO	point source, DAC, CO2 transport infrastructure	CO2 Abscheidung / elektrochemische Reduktion (elektrische Energie) / Reinigung	4-6	Energieintensiv, benötigt nur elektrische Energie	kurzfristige Speicherung, (mittelfristige) Speicherung in langlebigen Produkten möglich	kein externer H2, etablierte Netze gut nutzbar (E-Netz)		integrierbar, aber abhängig von Invest	wenn CO2 Pipeline vorhanden, sonst sehr ineffizient umsetzbar
	mikrobielle Reduktion	Chemikalien/Polymere	biologisch	NZIA, kein ETS (keine permanente Speicherung), CRCF haltbare Produkte, RFNBO	point source, DAC, CO2 transport infrastructure	CO2 Abscheidung / Transport	4-6	biologischer Prozess, Edukte entscheiden	kurzfristige Speicherung, (mittelfristige) Speicherung in langlebigen Produkten möglich	mit geringer Konzentration möglich		integrierbar, aber abhängig von Invest	wenn CO2 Pipeline vorhanden, sonst sehr ineffizient umsetzbar
	Mineralisierung (Karbonatisierung)	Bauprodukte (Karbonate/Mineralien)	chemisch	NZIA, CRCF, permanente Speicherung (siehe Schäfer Kalk)	point source (Zementwerk, integriert)	CO2 Abscheidung (Rauchgasabscheidung)	6-7	Benötigt wenig zusätzliche Energie, keine Vorbehandlung nötig	permanente Speicherung	mit geringer Konzentration möglich, keine besondere Reinheit nötig		Produkt kann direkt vor Ort verwendet werden	Betonabbruch muss angeliefert werden
	Methanisierung (Archaea)	Methan	biologisch	NZIA, nicht permanent, CCU	DAC, CO2 transport infrastructure	CO2 Abscheidung / Transport	7-8	biologischer Prozess, H2 Abhängig	kurzfristige Speicherung	Umwandlung in Lagerstätte möglich	keine direkte Kontrolle über den Prozess (geologisch)	Transport zur Lagerstätte notwendig	wenn CO2 Pipeline vorhanden, sonst sehr ineffizient umsetzbar
CCS	EOR (enhanced oil recovery)	fossile Produkte	physikalisch	kein ETS, nicht reguliert in CCS directive	point source, CO2 transport infrastructure	CO2 Abscheidung / Transport	8-9	Abscheidung	keine vollständige Speicherung, dient zur Produktion von Erdöl		teilweise reemittiert, dient zur Produktion von Erdöl	oft durch Cluster abgedeckt	oft durch Cluster abgedeckt
	fossil CCS	Karbonate, Mineralien	physikalisch - chemisch (CO2 Abtrennung, Mineralisierung)	ETS, gelten als nicht verursacht	point source, CO2 transport infrastructure	CO2 Abscheidung / Transport	7-9	Abscheidung	permanente Speicherung			Transport zur Lagerstätte notwendig	wenn CO2 Pipeline vorhanden, sonst sehr ineffizient umsetzbar
	WasteCCS	Energie	physikalisch - chemisch (CO2 Abtrennung, Mineralisierung)	ETS derzeit keine Negativemissionen, ETS sieht keine Zertifikate vor	point source (waste incineration), CO2 infrastructure	CO2 Abscheidung / Transport	5-7	Abscheidung	Nutzung von nicht recycelbaren Abfällen, permanente Speicherung			Transport zur Lagerstätte notwendig	wenn CO2 Pipeline vorhanden, sonst sehr ineffizient umsetzbar
	DACCS (Direct Air Carbon Capture)	CO2	physikalisch - chemisch (CO2 Abtrennung, Mineralisierung)	CRCF, ETS derzeit keine Negativemissionen, ETS sieht keine Zertifikate vor	DAC	CO2 Abscheidung / Konzentration / Sorbentregeneration	5-6	Abscheidung, geringe CO2 Konzentration	direkte Speicherung von atmosphärischem CO2, permanente Speicherung			integrierbar, aber abhängig von Invest	wenn CO2 Pipeline vorhanden, sonst sehr ineffizient umsetzbar
	BECCS (Bioenergie Carbon Capture)	Energie	physikalisch - chemisch (CO2 Abtrennung, Mineralisierung)	CRCF, ETS derzeit keine Negativemissionen, ETS sieht keine Zertifikate vor	point source (biogenic), CO2 infrastructure (mass balance)	CO2 Abscheidung / Transport	7-9	Abscheidung, Trennung Energie/CO2, Abscheidung	Nutzung von nicht nutzbaren biogenen Reststoffen, permanente Speicherung			Transport zur Lagerstätte notwendig	Schiffsterminals, abhängig von Pipelinennetz
CDR	Enhanced Weathering (Mineralisierung)	Karbonate	chemisch - geologisch	CRCF, ETS derzeit keine Negativemissionen, ETS sieht keine Zertifikate vor	atmospheric	Mineralienvorbereitung (Mahlung)	4-5	benötigt wenig zusätzliche Energie, keine Vorbehandlung nötig	direkte Speicherung von atmosphärischem CO2		Eingriff in andere komplexe Systeme	unabhängig	Mineralientransport notwendig
	Ozeandüngung	Biomasse	biologisch	CRCF, ETS derzeit keine Negativemissionen, ETS sieht keine Zertifikate vor	atmospheric	Chemikalienproduktion	3	Biomasseaufbau	direkte Speicherung von atmosphärischem CO2, bedingt permanente Speicherung		Eingriff in andere komplexe Systeme	unabhängig	Chemikalentransport evtl. Notwendig
	Ozean-Alkalinisierung	Karbonate, Mineralien	chemisch	ETS derzeit keine Negativemissionen	atmospheric	Chemikalienproduktion	5-6	geochemische Prozesse, Produktion Chemikalien	direkte Speicherung von atmosphärischem CO2, permanente Speicherung			unabhängig	Chemikalentransport evtl. Notwendig
	Pyrolyse	(Bio)kohle/Energie/Wasserstoff	chemisch	CRCF, ETS derzeit keine Negativemissionen, ETS sieht keine Zertifikate vor	atmospheric/fossil	Biomasseproduktion	7-8	nutzt Biomasse	Nutzung von nicht nutzbaren biogenen/fossilen Reststoffen, permanente Speicherung	Energie und permanente C-Speicherung		unabhängig	je nach Einsatz Rohstofftransport
	Biomethan Pyrolyse	(Bio)kohle/Energie/Wasserstoff	chemisch	CRCF, ETS derzeit keine Negativemissionen, ETS sieht keine Zertifikate vor	point source (Biogas)	Biogasproduktion	6-8	nutzt Biogas	Nutzung von nicht nutzbaren biogenen/fossilen Reststoffen, permanente Speicherung	CO2 Abscheidung vor Verbrennung, bei biogenen Quellen pot. C-negativ		Gasnetz vorhanden	Gaslogistik gut ausgebaut
	Biomass sinking	Biomasse	biologisch	CRCF, ETS derzeit keine Negativemissionen, ETS sieht keine Zertifikate vor	atmospheric	Biomasseproduktion / permanente Einlagerung	3	nutzt Biomasse	direkte Speicherung von atmosphärischem CO2, permanente Speicherung		Eingriff in andere komplexe Systeme	unabhängig	je nach Art evtl. Biomassetransport

	Haltbare Holz/Nawaro Produkte	Produktspezifisch	biologisch	CRCF, ETS derzeit keine Negativemissionen, ETS sieht keine Zertifikate vor	atmospheric	Herstellung / Nutzungsphase	variabel	produktspezifisch	langlebige Produkte		Definition der Langlebigkeit (CRCF)	unabhängig	je nach Art evtl. Rohstofftransport
<b>natürliche Senken</b>	landwirtschaftliche Flächen (Humusaufbau)	Humus	biologisch	LULUCF, EU Climate Law	atmospheric	landwirtschaftliche Praxis, passiv	/	Biomasseaufbau	temporär Speicherung von atmosphärischem CO <sub>2</sub>	zusätzlicher Nutzen durch ökologischen Landbau, gute landwirtschaftliche Praxis		unabhängig	Landwirtschaftliche Logistik
	Wälder	Biomasse	biologisch	LULUCF, EU Climate Law	atmospheric	forstwirtschaftliche Praxis, passiv	/	Biomasseaufbau	temporär Speicherung von atmosphärischem CO <sub>2</sub>	zusätzlicher ökologischer Nutzen, Schutzfunktion, Wasserhaushalt		unabhängig	
	Feuchtgebiete	Biomasse	biologisch	LULUCF, EU Climate Law	atmospheric	Renaturierungsmaßnahmen / Pflege, passiv	/	Biomasseaufbau	temporär Speicherung von atmosphärischem CO <sub>2</sub>	zusätzlicher ökologischer Nutzen, Schutzfunktion, Wasserhaushalt		unabhängig	
	Mineralisierung natürl.	Karbonate/Mineralien	biologisch	LULUCF, EU Climate Law	atmospheric	passiv	/	geochemische Prozesse	temporär Speicherung von atmosphärischem CO <sub>2</sub> , permanente Speicherung			unabhängig	

Abkürzungen:

EU-ETS – European Union Emissions Trading System  
LULUCF – Land Use, Land-Use Change and Forestry  
CRCF – Carbon Removal Certification Framework  
CCS – Carbon Capture and Storage Directive

NZIA – Net Zero Industry Act  
EU Climate Law – European Climate Law

Strategien:  
CMS AT – Carbon Management Strategy – Austria  
ICMS EU – Industrial Carbon Management Strategy – European Union

# 6 Carbon Capture and Storage (CCS)

## 6.1 Beschreibung der Technologie

Carbon Capture and Storage (CCS) bezeichnet ein Verfahren zur Abscheidung, zum Transport und zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), das bei industriellen Prozessen oder der Energieerzeugung entsteht. Es handelt sich dabei nicht um eine einzelne Technologie, sondern um ein Zusammenspiel verschiedener technischer Komponenten entlang einer Infrastrukturlinie.

Typischerweise besteht CCS aus drei Hauptschritten:

**CO<sub>2</sub>-Abscheidung (Capture):** Dabei wird CO<sub>2</sub> mithilfe unterschiedlicher Verfahren aus Abgasströmen entfernt. Am weitesten verbreitet ist die chemische Absorption, bei der das CO<sub>2</sub> zum Beispiel durch Waschlösungen – wie beschrieben häufig auf Aminbasis – gebunden und anschließend in reiner Form wieder freigesetzt wird.

**Transport:** Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird in komprimierter oder verflüssigter Form zum Speicherort transportiert. Dies erfolgt meist über Pipelines, kann aber auch per Schiff oder Tanklastwagen geschehen – je nach Standort und Infrastruktur.

**Speicherung:** Das CO<sub>2</sub> in geeigneten geologischen Formationen dauerhaft eingelagert. Dazu zählen beispielsweise ausgeförderte Öl- und Gasfelder oder tiefe salzhaltige Gesteinsschichten (Saline Aquifere). Solche Speicher gelten nach Stand der Technik bei Einhaltung technischer und geologischer Sicherheitsstandards als langfristig stabil und sicher.

## 6.2 Rolle der Erreichung der Emissionsziele

CCS spielt eine zentrale Rolle bei der Erreichung der Klimaziele des Pariser Abkommens. Laut IPCC sind Technologien zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung notwendig, um das 1,5°C- oder 2°C-Ziel zu erreichen. Die EU betrachtet CCS als Schlüsseltechnologie im „Net-Zero Industry Act“ und strebt bis 2030 eine jährliche CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität von 50 Millionen Tonnen an.

CCS ist vor allem für unvermeidbare Emissionen in industriellen Prozessen essenziell: In der Zementindustrie entfallen rund zwei Drittel der direkten Emissionen auf die Kalzinierung von Kalkstein, ein chemischer Prozess, der technisch nicht vermeidbar ist. Die Internationale Energieagentur geht davon aus, dass CCUS-Technologien bis 2030 weltweit mehr als 1.000 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Reduktion jährlich ermöglichen können.

### 6.3 Technology Briefing

Tabelle 2: Technologieübersicht CCS

Technologie	CCS
<i>Produkt</i>	
<i>Prozesse</i>	Chemisch (Mineralisierung)
<i>CO<sub>2</sub>-Quelle (Rohstoff)</i>	variabel
<i>CO<sub>2</sub>-Abscheidung</i>	Punktquelle/DAC
<i>Kritische Prozessschritte</i>	Abscheidung Transport
<i>TRL</i>	7-9
<i>spezifischer Energiebedarf Wh/kg (CO<sub>2</sub>)</i>	Mittel bis Hoch
<i>THG – Wirkung</i>	hoch
<i>Kritische Infrastruktur</i>	Transportnetz (Pipelines, Bahn, LKW) Schiffsterminals Geol. Lagerstätte
<i>ETS – fähig</i>	JA
<i>CRCF – fähig</i>	Nein
<i>Kosten [€/t]</i>	50- 400 €/t

### 6.4 Stand der Implementierung

Derzeit werden global etwa 50 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr durch laufende CCS-Projekte gespeichert. Weltweit sind über 19 große CCS-Anlagen in Betrieb, wobei das Sleipner-Projekt in der Nordsee als Pionier gilt und seit 1996 CO<sub>2</sub> speichert.

Um die Klimaziele zu erreichen, muss die CCS-Kapazität bis 2030 etwa auf das Acht-fache steigen, was einen erheblichen Investitionsbedarf bedeutet. In Europa wurden 2024 rund 4,8 Milliarden Euro durch den EU-Innovationsfonds für insgesamt 85 Projekte bereitgestellt, darunter 16 spezifische CCS-Projekte.

## TRL

Der technologische Reifegrad von CCS-Technologien variiert je nach Anwendungsbereich. Die geologische Speicherung hat einen hohen TRL von 9 und gilt als kommerziell verfügbar. Post-Combustion-Capture mit Amin-Technologie erreicht ebenfalls TRL 9, während neuere Technologien wie Oxyfuel-Verbrennung und Pre-Combustion-Capture TRL-Werte zwischen 7 und 8 aufweisen. Der CO<sub>2</sub>-Transport über Onshore-Pipelines ist etabliert (TRL 9), während der Schiffstransport (für CO<sub>2</sub>) noch nicht im erforderlichen Maßstab umgesetzt ist (TRL 4 bis 7). Direct Air Capture (DAC) befindet sich noch in frühen Entwicklungsstadien mit aktuellen Projekten von weniger als 50.000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.

## 6.5 Regulatorischer Status

### Europäische Union

Die **CCS-Richtlinie (2009/31/EG)** legt seit 2009 Vorgaben für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung und deren Genehmigung fest. Sie wurde in allen Mitgliedstaaten umgesetzt.

Der **Net-Zero Industry Act** (Verordnung (EU) 2024/1735) stuft CCS als strategische Netto-Null-Technologie ein und schreibt ambitionierte Kapazitätsziele für gespeichertes CO<sub>2</sub> bis 2030 vor. Gleichzeitig stellt der Act Anforderungen an den EU-weiten Technologieausbau.

Mit der **Industrial Carbon Management Strategy** (COM/2024/62) wird ein politischer Rahmen geschaffen, der CCS, CO<sub>2</sub>-Entnahme (CDR) und CCU umfasst.

**Delegierte Rechtsakte** nach Art. 23(5) der Verordnung (EU) 2024/1735 verpflichten führende Öl- und Gasunternehmen, CO<sub>2</sub>-Speicherinfrastruktur auszubauen und individuelle Umsetzungspläne vorzulegen – **C(2025) 3218**.

Der **EU-Zertifizierungsrahmen für CO<sub>2</sub>-Entnahmen** (Verordnung (EU) 2024/3012, CRCF) schafft erstmals EU-Standards für die Zertifizierung von dauerhaften CO<sub>2</sub>-Entnahmen, Produktspeicherung und Carbon Farming.

Das **EU-Emissionshandelssystem** (Richtlinie 2003/87/EG) sieht bereits vor, dass emissionszertifikatpflichtige Unternehmen gespeichertes CO<sub>2</sub> von der Abgabepflicht ausnehmen können. Die Integration von Negativemissionen wird geprüft.

Das **London-Protokoll** ermöglicht seit Änderungen von 2006 und 2009 die grenzüberschreitende CO<sub>2</sub>-Speicherung im Meeresuntergrund (Annex 1, Resolution LP.3(4)), sofern bilaterale Vereinbarungen auf Basis von Resolution LP.5(14) vorliegen. Erste Abkommen wurden geschlossen; Deutschland plant eine Anpassung der nationalen Gesetzgebung.

## Österreich

### CCS-Richtlinie (2009/31/EG)

In Österreich ist die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung seit 2011 verboten, mit Ausnahme von Forschungsprojekten bis 100.000 Tonnen. Der Evaluierungsbericht 2024 der Bundesregierung empfiehlt jedoch, das Verbot aufzuheben und entsprechende Bundesgesetze bis Mitte 2025 zu ändern.

Die österreichische **Carbon Management Strategie** wurde 2024 verabschiedet und definiert „schwer vermeidbare Emissionen“ als prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, die trotz Optimierung nicht verhindert werden können.

## 6.6 Best-Practice

### Europa (EU, EWR)

#### Northern Lights – Norwegen

Das Northern Lights-Projekt ist das erste grenzüberschreitende CO<sub>2</sub>-Transport- und Speicherprojekt in Europa. Ab 2025 beginnt die Einlagerung von mindestens 1,5 Millionen

Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr, die Kapazität wird bis 2028 auf mehr als 5 Millionen Tonnen jährlich ausgebaut. Northern Lights ist Teil des norwegischen Longship-Programms und nimmt CO<sub>2</sub> aus verschiedenen europäischen Industriestandorten auf.

### **Ravenna CCS – Italien**

Ravenna CCS ist Italiens größtes CCS-Projekt und dient als Dekarbonisierungs-Hub für die Industrie Norditaliens. Mittels moderner Abscheidetechnologie wird CO<sub>2</sub> aus Industrieanlagen abgetrennt, per Pipeline zu Offshore-Plattformen transportiert und dauerhaft etwa 3.000 Meter tief in erschöpften Gasfeldern unter der Adria gespeichert. Nach einer Pilotphase mit rund 25.000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr soll die Kapazität schrittweise auf 4 Millionen Tonnen jährlich steigen, mit langfristigem Potenzial für bis zu 16 Millionen Tonnen pro Jahr. Das Projekt gilt als Vorbild für industrielle CCS-Anwendungen in Südeuropa und ist offen für CO<sub>2</sub>-Lieferungen aus anderen Ländern.

## **Österreich**

### **C-CED (Carbon-Cycle Economy Demonstration)**

Das C-CED-Projekt ist ein technologieübergreifendes Reallabor zur Demonstration verschiedener CO<sub>2</sub>-Abscheide-, Speicher- und Verwertungsverfahren. Hier werden CO<sub>2</sub> aus unterschiedlichen Quellen abgeschieden und zu erneuerbarem synthetischem Erdgas (Methan) umgesetzt. Kernziel ist der Aufbau von Kompetenzen und Infrastrukturen entlang der gesamten CCS/CCU-Wertschöpfungskette im österreichischen Kontext.

## **6.7 Identifizierte Lücken (GAPS)**

### **Technologische Lücken**

#### **Energieverbrauch**

Der Energieverbrauch aktueller CCS-Technologien liegt in der Praxis deutlich über dem thermodynamischen Minimum. Moderne Post-Combustion-Verfahren bei Kohle-Kraftwerken benötigen typischerweise 200 – 400 kWh pro abgeschiedener Tonne CO<sub>2</sub>.

Direct Air Capture (DAC) ist noch einmal deutlich energieintensiver: Kommerzielle Anlagen wie Climeworks und Heirloom verbrauchen derzeit rund 2.000–3.000 kWh je Tonne CO<sub>2</sub>, also etwa das 10- bis 20-Fache von Post-Combustion-Verfahren. Zum Vergleich: Das Minimum liegt bei Post-Combustion-CCS (Punktquellen) zwischen 100–130 kWh/t CO<sub>2</sub>, bei DAC (aus der Luft) bei etwa 140–210 kWh/t CO<sub>2</sub>. Die Differenz zu diesen physikalischen Untergrenzen sowie anhaltend hohe Energy Penalty zeigen, dass in der praktischen Umsetzung noch erheblicher Effizienz- und Verbesserungsbedarf besteht.

### **Langfristige Speicherung**

Die Sicherheit und Überwachung unter-irdischer CO<sub>2</sub>-Speicherstätten ist technisch und regulatorisch anspruchsvoll. Es müssen Dichtheit, Kapazität und Injektivität über Jahrzehnte bis Jahrhunderte gewährleistet werden –Monitoring und Haftungsfragen bei möglichen Leckagen müssen geklärt sein.

### **Wirtschaftliche Lücken**

Die Kosten für CCS (Carbon Capture and Storage) in Europa bleiben wirtschaftlich herausfordernd, mit Schätzungen zwischen 100 und 400 € pro Tonne CO<sub>2</sub>. Dies liegt meist deutlich über den aktuellen Preisen im EU ETS, die sich auf etwa 67 bis 100 € pro Tonne belaufen, wodurch eine erhebliche wirtschaftliche Lücke entsteht, die staatliches Eingreifen erfordert.

### **Infrastruktur Lücken**

Derzeit verfügt Europa nur über eine minimale CO<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur, mit lediglich begrenzten Pipeline-Netzen im Vergleich zu den umfangreichen Systemen, die für eine großflächige Umsetzung erforderlich wären. Bis 2050 könnten in der EU 15.000 - 19.000 km CO<sub>2</sub>-Pipelines benötigt werden – eine enorme infrastrukturelle Herausforderung.

Regionale Ungleichgewichte bei der Entwicklung von Speicherprojekten verschärfen die Infrastrukturproblematik zusätzlich. Vorgeschlagene Speicherstandorte außerhalb der Nordsee-Region verfügen bis 2030 nur über eine geschätzte Kapazität von etwa 12 Mt CO<sub>2</sub> pro Jahr, während Projekte in der Nordsee über 100 Mt pro Jahr erreichen könnten. Diese

geografische Konzentration erfordert möglicherweise ein weit verzweigtes Transportnetz, um industrielle Cluster im Binnenland zu bedienen.

# 7 Carbon Dioxide Removal (CDR) – Überblick

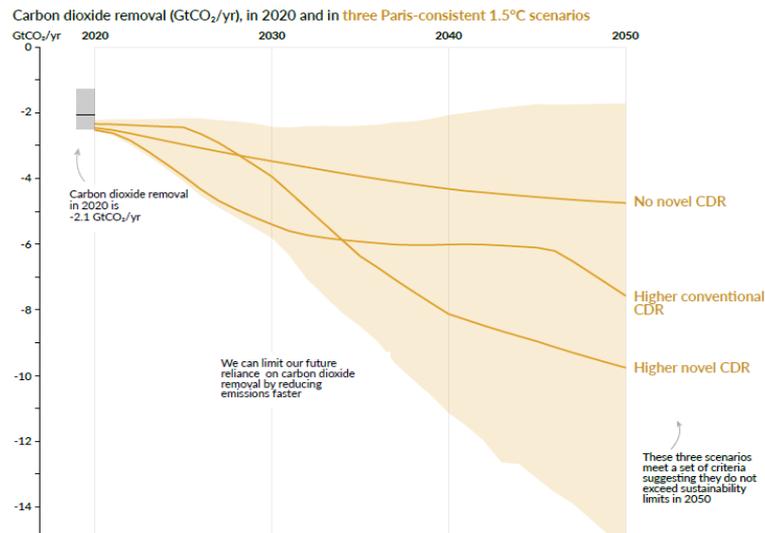


Abbildung 1: Smith et al, 2024. Entwicklung der Kohlendioxid-Entnahme (CDR) in Gigatonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr von 2020 bis 2050 in drei mit dem 1,5 °C Ziel des Pariser Abkommens konformen Szenarien.

Während CCS vorrangig Emissionen aus industriellen Punktquellen vermeidet, richtet sich der Fokus nun auf eine komplementäre, zunehmend unverzichtbare Strategie: CDR. Diese zielt nicht auf die Vermeidung neuer Emissionen, sondern auf die Entnahme von bereits emittiertem CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre. Beide Ansätze teilen technische Komponenten wie Abscheidung, Transport und Speicherung. Doch während CCS schwerpunktmäßig emissionsintensive Industrien adressiert, ist CDR essenziell für das Erreichen von Netto-Null und potenziell sogar negativen Emissionen – insbesondere zur Kompensation unvermeidbarer Restemissionen aus Landwirtschaft, Industrie oder Luftverkehr.

Die Bedeutung von CDR nimmt kontinuierlich zu: Laut aktuellen Analysen wird der globale CDR-Bedarf in „nachhaltig orientierten“ Klimaszenarien im Jahr 2050 auf 7-9 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr geschätzt – mit einem unteren Korridor von 4 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr. Kumulativ müssten demnach bis zur Netto-Null etwa 170-190 Gt CO<sub>2</sub> entnommen werden. Aktuell liegt die

weltweite CDR-Leistung bei nur 2,1 Gt CO<sub>2</sub> jährlich, davon fast ausschließlich durch konventionelle, biologisch basierte Methoden, wie die Wiederaufforstung.

## 7.1 Konventionelle CDR-Verfahren

### Aufforstung und Wiederaufforstung

Mit etwa 2 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr machen diese Maßnahmen den Löwenanteil heutiger CDR aus. Sie gelten als kosteneffizient (0 bis 225 EUR/t CO<sub>2</sub>), technisch etabliert und sozial breit akzeptiert. Allerdings sind sie flächenintensiv, in der Speicherstabilität begrenzt (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) und anfällig für Störungen wie Feuer oder Entwaldung. Aktuelle Studien zur Senkenwirkung von Wäldern zeigen Problemfelder auf.

### Boden-Kohlenstoff-Sequestrierung

wird auf landwirtschaftlich genutzten Flächen praktiziert und macht derzeit ca. 0,1–0,2 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr aus. Die Praktiken sind kostengünstig (40 bis 95 EUR/t CO<sub>2</sub>) und gut skalierbar, aber reversibel und oft schwer zu verifizieren.

### Renaturierung von Feuchtgebieten

Diese Methoden bieten hohe Speicherstabilität und Biodiversitätsvorteile. Ihr Beitrag ist noch begrenzt, zeigt aber zunehmende Dynamik in nationalen Strategien (v. a. Kanada, Skandinavien, Südostasien).

### Holzprodukte mit langer Lebensdauer

Ein kleiner, aber wachsender Sektor: Die Integration in die CO<sub>2</sub>-Bilanz hängt stark vom Produktlebenszyklus ab. Relevanz vor allem im Bausektor.

Diese Verfahren dominieren die nationale Berichterstattung und Klimastrategien der Länder. Allerdings sind sie nur begrenzt skalierbar. Im Vergleich zu den 7–9 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr, die notwendig wären, klafft eine signifikante CDR-Lücke – sowohl quantitativ als auch qualitativ.

## 7.2 Neuartige CDR-Technologien

### Direct Air Capture with Carbon Storage (DACCS)

Etwa 0,01 Mt CO<sub>2</sub> wurden, 2023 durch DACCS entfernt – ein verschwindend kleiner Anteil, aber mit hohem Innovationspotenzial. DACCS bietet besonders hohe Speicherstabilität (Jahrtausende) bei geologischer Speicherung. Die Technologie ist in der Demonstrationsphase, etwa durch das US-amerikanische „Regional Direct Air Capture Hubs“-Programm. Die Kosten liegen derzeit bei bis zu 2.000 Euro und mehr pro Tonne CO<sub>2</sub>, sollen aber bis 2050 auf unter 280 EUR/t sinken.

### Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (BECCS)

Bisherige Demonstrationen von BECCS bleiben unter 0,5 Mt CO<sub>2</sub> pro Jahr. Dennoch ist BECCS fester Bestandteil fast aller Modellpfade zur Erreichung der Klimaziele. Es kombiniert Energieproduktion mit CO<sub>2</sub>-Entnahme, benötigt aber große Mengen nachhaltiger Biomasse sowie Speicherinfrastruktur. Die geschätzten Kosten liegen derzeit zwischen 15 und 400 EUR/t CO<sub>2</sub> (je nach Quelle und Szenario auch 100 – 250 EUR/t genannt).

### Biochar (Biokohle)

2023 wurden etwa 0,2–0,3 Mt CO<sub>2</sub> über Biochar entfernt. Die Methode ist relativ kostengünstig (ca. 90–230 EUR/t, technisch niederschwellig, gut regional skalierbar und liefert positive Nebeneffekte für Böden. Ein wachsendes Forschungsfeld: Über 30 % aller CDR-Forschungsprojekte seit 2000 beschäftigen sich mit Biochar.

### Enhanced Rock Weathering

Reaktion von zerkleinertem Gestein (z. B. Basalt) mit CO<sub>2</sub> zu karbonatischen Produkten. Das technische Potenzial liegt laut IPCC bei immerhin mehreren Gt CO<sub>2</sub>/Jahr, doch praktische Anwendungen stecken noch in den Kinderschuhen. Nur 5 % der Forschungsprojekte beziehen sich aktuell auf diese Methode.

### Ozeanbasierte Verfahren

Methoden wie Ozeandüngung, Alkalinisierung und direkte CO<sub>2</sub>-Entnahme aus Meerwasser zeigen hohes theoretisches Potenzial, sind aber ökologisch riskant, schwer messbar und

regulatorisch nicht etabliert. Aktuell entfallen nur 1–2 % der CDR-Forschungsförderung auf ozeanbasierte Ansätze.

### **Kohlenstoffbindung in Industrieprodukten**

Mineralisierung von CO<sub>2</sub> in Baustoffen (Beton, Zementersatz) bietet langlebige Speicherformen. In der Pilotierung, jedoch abhängig von Bauwirtschaft und Normungsprozessen.

## **7.3 Reifegrad, Forschungsdynamik und politische Einbettung**

Die Reifegrade der Technologien sind heterogen: Konventionelle Verfahren erreichen Technologiereifegrade (TRL) von 8–9, neuartige Verfahren meist 5–7. Forschungs- und Innovationsindikatoren zeigen aber deutliches Wachstum

Die freiwilligen Kohlenstoffmärkte leisten einen frühen Beitrag zur Nachfrageentwicklung. 2023 stiegen CDR-bezogene Kaufvereinbarungen für neuartige Verfahren im Vergleich zum Vorjahr um das Siebenfache, obwohl ihr absoluter Anteil weiter gering bleibt.

# 8 DACCS

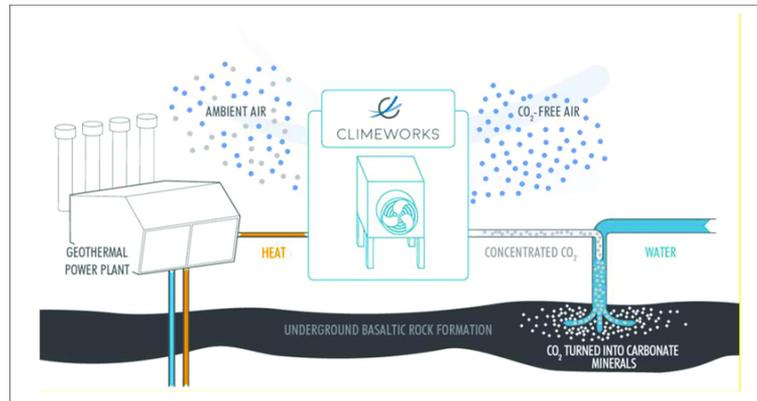


Abbildung 2: Beuttler et al 2019. Climeworks-Carbfix process, Hellisheidi, Island.

DACCS bezeichnet ein Verfahren zur direkten Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft (ca. 400 ppm CO<sub>2</sub>), das dauerhaft geologisch gespeichert wird.

DAC-Technologien umfassen Solid-DAC (S-DAC), Liquid-DAC (L-DAC) und neu aufkommende Ansätze mit niedrigem TRL. Das Unternehmen Carbon Engineering ist Vorreiter bei der Nutzung von flüssigen Lösungsmitteln, während Climeworks und Global Thermostat führend im Einsatz fester Sorbentien sind. Darüber hinaus befinden sich neue Technologien in der Entwicklung, die das Potenzial haben, den Energiebedarf und die Kosten zu senken. Eine Übersicht über den Energieverbrauch und das CO<sub>2</sub>-Entfernungspotenzial dieser neuen Ansätze bietet Tabelle 1

Tabelle 3: Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Abscheidung DACCS Technologien (Williams, 2023, Negative Emissions Technologies (Nets): Feasibility Study

Company	Heat (MWh/tCO <sub>2</sub> )*	Electrical (kWh/tCO <sub>2</sub> )	Carbon removal efficiency
Carbon Engineering	1.46 <sup>23</sup> -2.45 <sup>**</sup>	0 <sup>23</sup> -1,535 <sup>52</sup>	10-92% <sup>49</sup>
Climeworks	1.5-2.0 <sup>52</sup>	200-300 <sup>52</sup>	9-97% <sup>50</sup>
Global Thermostat	1.17-1.41 <sup>52</sup>	150-260 <sup>52</sup>	N/A
Antecy	2.08 <sup>52</sup>	694 <sup>52</sup>	N/A
MSA	0 <sup>52</sup>	316-326 <sup>52</sup>	N/A
Molecular filters	N/A	333 <sup>52</sup>	N/A

\*Units transposed to MWh from varying sources

\*\* In this instance natural gas is burnt in a NGCC unit and electricity is generated onsite.

## 8.1 Technology Briefing

Tabelle 4: Technologieübersicht DACCS

<b>Technologie</b>	<b>DACCS</b>
<i>Produkt</i>	
<i>Prozesse</i>	pyhsikalisch
<i>CO<sub>2</sub>-Quelle (Rohstoff)</i>	Atmosphäre
<i>CO<sub>2</sub>-Abscheidung</i>	Direct air
<i>Kritische Prozessschritte</i>	Abscheidung Transport
<i>TRL</i>	4-7
<i>spezifischer Energiebedarf Wh/kg (CO<sub>2</sub>)</i>	hoch (für Abscheidung niedriger Konzentrationen)
<i>THG – Wirkung</i>	hoch
<i>Kritische Infrastruktur</i>	kann an geol. Lagerstätten platziert werden
<i>ETS – fähig</i>	Nein (keine Negative-Allowance)
<i>CRCF – fähig</i>	Ja (Zertifikate)
<i>Kosten [€/t]</i>	Hoch (siehe oben)

## 8.2 Rolle bei der Erreichung negativer Emissionen

DACCS gilt als eine Form der CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre (CDR). Der Weltklimarat (IPCC) sieht Technologien wie DACCS als wichtigen Baustein, um Netto-Null-Emissionen zu erreichen und die globale Erwärmung zu begrenzen. Sie werden oft gemeinsam mit anderen Methoden wie BECCS (Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung) diskutiert.

## 8.3 Aktueller Stand der DACCS-Implementierung

Der aktuelle TRL von DACCS liegt bei etwa 4 bis 7, was bedeutet, dass die Technologie bereits in relevanten Umgebungen demonstriert wurde, sich aber noch im Pilot- oder frühen Demonstrationsstadium befindet und noch keine großflächige kommerzielle Anwendung erreicht ist.

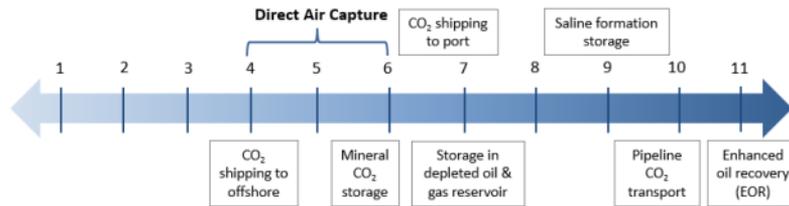


Abbildung 3: IEAGHG, 2021. Technology readiness levels of DACCS value chain technologies

Der aktuelle Beitrag von DACCS zur globalen CO<sub>2</sub>-Entnahme ist noch sehr gering, aber das Wachstumspotenzial wird hoch eingeschätzt. Von den derzeit jährlich etwa 2 Gt durch CDR entnommenes CO<sub>2</sub> stammen weniger als 0,0013 Gt (1,3 Mt) aus allen neuartigen Methoden zusammen – darunter auch DACCS.

## 8.4 Regulatorischer Status

Einigung des europäischen Rates zu Carbon Removals Certification Framework (CRCF), ein freiwilliger EU-weiter Rahmen zur Zertifizierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen. Die Verordnung definiert Qualitätsstandards auf EU-Ebene und regelt Verfahren zur Überwachung und Berichterstattung, um die Finanzierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien wie BECCS zu fördern.

## 8.5 Best-Practice

### Europa (EU, EWR)

#### Climeworks Mammoth (Island)

Das weltweit größte DACCS-Projekt startete im Mai 2024 mit einer geplanten Kapazität von 36.000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr. Die Anlage ist etwa zehnmal größer als die Vorgängeranlage Orca und nutzt geothermische Energie von ON Power Island. Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird durch Carbfix permanent in Basaltgestein mineralisiert und (lt. eigenen Angaben) über 10.000 Jahre sicher gespeichert.

## **RepAir Carbon/C-Questra (Frankreich)**

Das erste onshore DACCS-Projekt der EU bei Grandpuits nahe Paris verwendet eine wärmefreie, ultra-modulare elektrochemische Technologie, die den Energieverbrauch um 70% gegenüber konventionellen DAC-Lösungen reduziert.

## **Österreich**

Österreich verfügt über erhebliches Potenzial für geologische CO<sub>2</sub>-Speicher mit einer geschätzten theoretischen Kapazität von 300 Mt und einem leicht erschließbaren Potenzial von 120 Mt der größeren Gasfelder. Die bestehende Infrastruktur kann mit DACCS-Technologie ergänzt werden. Durch die Kombination mit anderen Industriesektoren ergeben sich zusätzliche Synergien<sup>fn10</sup>.

## **DACworx Engineering (Start-Up)**

Ein 2023 gegründetes österreichisches Start-up mit Sitz in Wien, das aus Forschungsprojekten der TU Wien hervorging und innovative Direct Air Capture (DAC) Technologie zur Kohlenstoffabscheidung aus der Atmosphäre entwickelt und produziert. Das Unternehmen entwickelt modulare DAC-Systeme für verschiedene Anwendungsgrößen – von Pilotanlagen bis zu potenziell großskaligen DAC-Farmen – und betreibt bereits eine funktionstüchtige Pilotanlage in Wien (die besichtigt werden kann)

DACworx' USP liegt in der besonders hohen Energieeffizienz mit 30% weniger Energieverbrauch und 80% Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme unter 100°C, einem patentierten entkoppelten Prozessdesign, das CO<sub>2</sub>-Adsorption und -Desorption räumlich und zeitlich trennt, sowie einem modularen, standardisierten Ansatz mit vorgefertigten Komponenten für kosteneffiziente Fertigung und flexible Skalierung

## **8.6 Identifizierte Lücken**

### **Technologische Lücken**

#### **Hoher Energiebedarf**

Modellrechnungen zeigen, dass die Energieversorgung der entscheidende Faktor für die Umsetzung von DACCS ist. Da sowohl die CO<sub>2</sub>-Abscheidung selbst energieintensiv ist als auch die Energiekosten die Hauptkostenquelle darstellen, hängt die Wirtschaftlichkeit stark vom Energiezugang ab.

Die Entfernung von rund 288 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr – etwa 5 % der europäischen Emissionen von 1990 – würde den Strombedarf bis 2050 um bis zu 495 TWh erhöhen. Das entspricht einem notwendigen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung um 5 % bis 8 %, vor allem durch Windkraft und Photovoltaik. In dicht besiedelten Regionen wie Deutschland, Dänemark oder der Benelux sind die Ausbaupotenziale jedoch bereits nahezu ausgeschöpft.

Günstige Wärmequellen wie Abwärme oder Geothermie könnten die DACCS-Kosten senken und den zusätzlichen Strombedarf reduzieren.

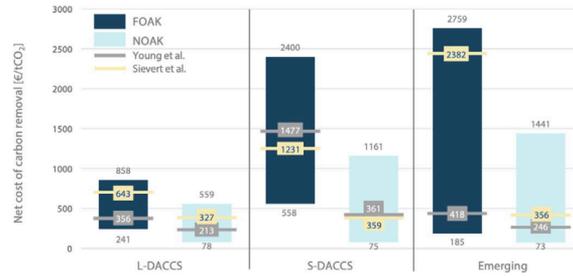
Standortoptimierungen bevorzugen Länder wie Finnland, Schweden, Norwegen und die Iberische Halbinsel – dank verfügbarer CO<sub>2</sub>-Speicher und günstiger, ungenutzter erneuerbarer Energieressourcen. Diese Faktoren sind zentral für den künftigen Erfolg von DACCS in Europa.

Ein wesentlicher Vorteil der Direct Air Capture (DAC)-Technologie liegt in ihrer flexiblen Platzierbarkeit: Grundsätzlich lässt sich eine DAC-Anlage an jedem Ort errichten, an dem CO<sub>2</sub>-arme Energiequellen sowie Möglichkeiten zur Speicherung oder Nutzung von CO<sub>2</sub> vorhanden sind. Zwar konnten DAC-Anlagen bislang bereits unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen – vor allem in Europa und Nordamerika – erfolgreich betrieben werden, doch besteht weiterhin Forschungsbedarf, insbesondere in Regionen mit extremen Trocken- oder Feuchtgebieten oder stark belasteter Luft.

## **Wirtschaftliche Lücken**

### **Hohe Kosten**

Die Kosten für DACCS liegen aktuell typischerweise im Bereich von mehreren hundert bis über 2.000 Euro pro Tonne entferntem CO<sub>2</sub>. Hauptkostentreiber sind der hohe Energiebedarf für die Abscheidung und die Notwendigkeit, das CO<sub>2</sub> dauerhaft zu speichern. Es sind noch erhebliche technologische Innovationen und Skaleneffekte erforderlich, um die Kosten deutlich zu senken.



Source: Authors' own elaboration using cost data gathered from Bouaboula et al., 2024; IEAGHG, 2021; Küng et al., 2023; Sievert et al., 2024; Young et al., 2023. Median cost values by Young et al. and Sievert et al. shown within the cost range bars.

Abbildung 4: Trompoukis, C. et al., 2025. spezifische Kosten [Euro/tCO<sub>2</sub>] von DACCS Technologien

## Regulatorische Lücken

### Keine Integration in EU-ETS

DACCS-Zertifikate aus dem CRCF können bislang nicht im EU-Emissionshandelssystem angerechnet oder gehandelt werden. Das CRCF bleibt ein freiwilliges System ohne verbindliche Verknüpfung mit bestehenden Klimazielsystemen.

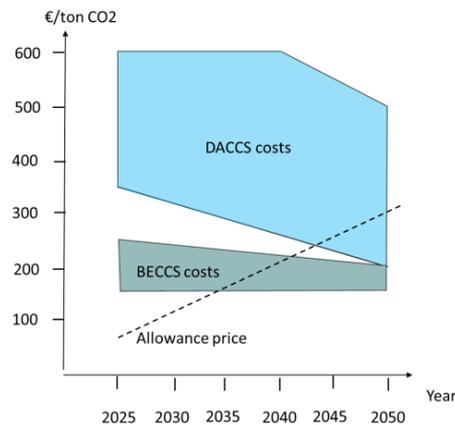


Abbildung 5: Zetterberg, L. 2025. Vergleich zwischen Kosten von BECCS und DACCS gegen den Anstieg des Emissionszertifikatpreises („Allowance price“) von 2025 bis 2050

### Speicherverbot in Österreich

Das derzeitige Verbot der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung in Österreich verhindert die

Entwicklung von DACCS-Projekten. Eine Ausnahme gilt nur für Forschungsvorhaben bis 100.000 Tonnen CO<sub>2</sub>fn10.

Im Rahmen der **Carbon Management Strategie** plant Österreich, CCS/CCU gezielt in „hard-to-abate“-Industrien (wie Zement, Stahl, Abfall) einzusetzen und empfiehlt eine Änderung des Gesetzes.

## Infrastruktur-Lücken

### Transportnetzwerk fehlt

DAC-Anlagen benötigen gegebenenfalls CO<sub>2</sub>-Transport-Infrastruktur zu geologischen Speicherstätten, ist aber grundsätzlich eine der unabhängigeren Capture Technologien. Europa benötigt ein integriertes CO<sub>2</sub>-Pipeline-Netz und grenzübergreifende Anbindung an Häfen für Schiffstransportfn10. Die Entwicklung eines Single-Market für CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung ist bis 2030 geplant.

Entscheidend ist hier aber mehr die Versorgung mit erneuerbarer Energie, da DAC-Anlagen derzeit sehr energieintensiv sind und das Konzept vollständig von der Versorgung mit nachhaltiger Energie abhängt.

# 9 BECCS

## 9.1 Beschreibung der Technologie

BECCS ist eine Technologie zur Kohlenstoffentfernung, die Biomasse-Energieerzeugung mit der Abscheidung und dauerhaften geologischen Speicherung von Kohlendioxid kombiniert.

Der Prozess umfasst drei Schritte: Zunächst die Biomasseproduktion, bei der Pflanzen durch Photosynthese  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre aufnehmen. Danach folgt die Energieerzeugung, etwa durch Verbrennung oder Verarbeitung der Biomasse zu Strom, Wärme oder Biokraftstoffen. Schließlich werden die entstehenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen abgeschieden und dauerhaft in unterirdischen geologischen Formationen gespeichert, anstatt in die Atmosphäre zu gelangen.

### **Rolle bei der Erreichung negativer Emissionen**

Dieser doppelte Ansatz ermöglicht es BECCS, gleichzeitig erneuerbare Energie bereitzustellen und negative Emissionen zu erzielen, indem atmosphärisches Kohlendioxid dauerhaft entfernt wird.

## 9.2 Aktueller Stand der Implementierung

BECCS-Technologien weisen unterschiedliche Reifegrade auf. Die Biomasseerzeugung und  $\text{CO}_2$ -Abscheidung sind separat auf kommerziellem Niveau erprobt. Die postverbrennungstechnische  $\text{CO}_2$ -Abscheidung mittels Monoethanolamin (MEA) gilt als etablierte Technologie, während neuere Verfahren wie die Abscheidung mit heißem Kaliumkarbonat sich noch in Demonstrationsphasen befinden. Die Integration von Bioenergie mit CCS befindet sich überwiegend auf Pilot- und Demonstrationsniveau (TRL 6-7), die kombinierten Methoden besitzen im Idealfall aber TRL 8-9. Transport- und Speicherinfrastruktur sind äquivalent zu CCS-Anwendungen für fossile Ressourcen.

### 9.3 Technology Briefing

Tabelle 5: Technologieübersicht BECCS

Technologie	CCS
<i>Produkt</i>	Energie
<i>Prozesse</i>	Chemisch (Verbrennung)
<i>CO<sub>2</sub>-Quelle (Rohstoff)</i>	Biogen
<i>CO<sub>2</sub>-Abscheidung</i>	Punktquelle (nicht integriert)
<i>Kritische Prozessschritte</i>	Abscheidung Transport
<i>TRL</i>	7-9
<i>spezifischer Energiebedarf Wh/kg (CO<sub>2</sub>)</i>	Mittel (durch Abscheidung)
<i>THG – Wirkung</i>	hoch
<i>Kritische Infrastruktur</i>	Transportnetz (Pipelines, Bahn, LKW) Schiffsterminals Geol. Lagerstätte
<i>ETS – fähig</i>	Nein (keine Negativ- Allowance)
<i>CRCF – fähig</i>	Ja (Zertifikate)
<i>Kosten [€/t]</i>	100- 250 €/t

### 9.4 Regulatorischer Status

Carbon Removals Certification Framework (CRCF), zur Zertifizierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen. Die Verordnung definiert Qualitätsstandards auf EU-Ebene und regelt Verfahren zur Überwachung und Berichterstattung, auch um die Finanzierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien wie BECCS zu fördern.

In Österreich besteht derzeit ein Verbot der geologischen Speicherung von Kohlendioxid.

## 9.5 Bestehende Projekte und Kapazitäten

### 9.6 Europa (EU, EWR)

#### Stockholm Exergi (Schweden)

Ab 2028 sollen jährlich bis zu 800.000 Tonnen biogenes CO<sub>2</sub> abgeschieden und per Schiff zur dauerhaften Speicherung in das Northern-Lights-Projekt in der Nordsee (Norwegen) transportiert werden. Dieses Vorhaben wird unter anderem durch die schwedische Regierung sowie durch die *European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency* (CINEA) in Kombination mit dem *European Investment Fund* (EIF) finanziert.

#### Ørsted Kalundborg Hub (Dänemark)

dänisches Bio-CCS-Projekt zur jährlichen Abscheidung von 430.000 Tonnen biogenem CO<sub>2</sub>. Ørsted erhielt einen 20-Jahres-Vertrag von der dänischen Energieagentur und übernimmt die gesamte Wertschöpfungskette. Der Bau der CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen begann 2024, der Betrieb soll im Januar 2026 starten. Aker Carbon Capture liefert die Technologie zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Verdichtung und -Verflüssigung, während Northern Lights das CO<sub>2</sub> speichert. Microsoft ist erster Abnehmer von CO<sub>2</sub>-Entnahmezertifikaten im Rahmen eines großangelegten Vertrags. Als Brennstoffe werden hauptsächlich Stroh und Hackschnitzel eingesetzt. Das Projekt wurde durch die Danish Energy Agency durch einen 20 Jahre Vertrag über 1 Milliarde Euro abgesichert, finanziert.



Abbildung 6: Transportkette Orsted Kalundborg Hub (DK) (Quelle: <https://orsted.com/>)

## 9.7 Österreich

Österreich verfügt über zahlreiche große Biomassekraftwerke und Heizwerke sowie weitere bedeutende Punktquellen, wie die Papier- und Faserindustrie. Zusätzlich gibt es erhebliches Potenzial an geologischen Speichern (siehe CCS).

Tabelle 6: Beispiele großer inländischer Punktquellen biogenes CO<sub>2</sub> (Quelle: Projekt CaCTUS 2025)

Quelle	CO <sub>2</sub> [kt] 2019
Biomasseheizkraftwerk Klagenfurt Ost	318
Austrocel Hallein GmbH	418
Sappi Gratkorn	472
Mondi Frantschach St. Gertraud	835
Lenzing Papier GmbH	950
Zellstoff Pöls	1045

Durch die Kombination mit anderen Sektoren wie Zementindustrie, Müllverbrennung und Eisenproduktion ergeben sich zusätzliche Synergien.

## 9.8 Identifizierte Lücken

### Technologische Lücken

#### Energiebedarf

Die CO<sub>2</sub> Abscheidungsprozesse sind technisch etablierte Prozesse, die jedoch 20-25% der generierten Energie und bis zu 75% der Kosten des Gesamtprozesses ausmachen.

Der Energieaufwand für BECCS ist beträchtlich. In Österreich könnte der zusätzliche Energiebedarf 7–15 % des gesamten Endenergieverbrauchs ausmachen, was einen massiven Ausbau erneuerbarer Energien oder Importe erfordern würde.

### Wirtschaftliche Lücken

#### Hohe Kosten und fehlende Skaleneffekte

Die Kosten für BECCS sind derzeit hoch, insbesondere wegen kleiner Anlagengrößen, zusätzlichem Energiebedarf für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und fehlender Markthochlauf von CCS-Technologien. Studien beziffern die zusätzlichen Kosten auf 100 - 250 € pro Tonne CO<sub>2</sub>, wobei Infrastruktur und Transport wesentliche Kostentreiber sind.

#### Langfristige Investitionen und Amortisationszeiten

Der Aufbau von BECCS-Infrastruktur erfordert hohe Anfangsinvestitionen und bringt lange Amortisationszeiten mit sich. Dies erhöht das Investitionsrisiko, insbesondere da die zukünftige Nachfrage nach Negativemissionen noch unklar ist. Regulatorische Lücken

#### Keine Integration in das EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS)

BECCS-Zertifikate aus dem CRCF können bislang nicht im EU-ETS angerechnet oder gehandelt werden. Es fehlt eine verbindliche Verknüpfung mit bestehenden Klimazielsystemen und Marktmechanismen

#### Freiwilligkeit

Das CRCF ist bislang ein freiwilliges Zertifizierungssystem. Die Teilnahme bleibt den Betreibern und Zertifizierungsstellen überlassen

## **Speicherverbot**

### **Speicherverbot in Österreich**

Das derzeitige Verbot der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung in Österreich verhindert die Entwicklung von DACCS-Projekten. Eine Ausnahme gilt nur für Forschungsvorhaben bis 100.000 Tonnen CO<sub>2</sub>fn10.

Im Rahmen der **Carbon Management Strategy** plant Österreich, CCS/CCU gezielt in „hard-to-abate“-Industrien (wie Zement, Stahl, Abfall) einzusetzen und empfiehlt eine Änderung des Gesetzes.

## **Infrastruktur Lücken**

### **Transportnetzwerk**

Die einzelnen Schritte in der BECCS-Wertschöpfungskette – also die Biomassebereitstellung, die Aufbereitung des Ausgangsmaterials, Bioenergieanlagen und CO<sub>2</sub>-Speicherstätten – befinden sich nur selten am selben Ort. Daher ist zusätzliche, spezialisierte Infrastruktur, wie ein Pipelinenetz notwendig, um diese Komponenten effizient miteinander zu verbinden. Österreich verfügt über geeignete geologische Lagerstätten. Es muss allerdings auch eine grenzübergreifende Infrastruktur zur Anbindung an Häfen und Schiffsterminals zur Verfügung stehen.

# 10 Pyrolyse (Biochar, Biokohle)

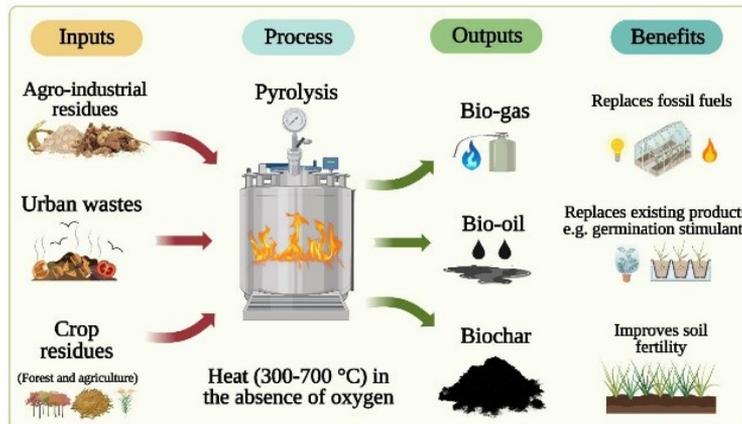


Abbildung 7: Zulfiqar, 2021. Übersicht Biokohle aus Abfallmaterialien und Pyrolyseprozess

## 10.1 Beschreibung der Technologie

Biochar ist ein kohlenstoffreicher Feststoff, der durch Pyrolyse – die thermochemische Zersetzung organischer Biomasse unter Sauerstoffausschluss bei Temperaturen von 300–700 °C – entsteht. Dabei werden Rohstoffe wie Holzreste, Ernterückstände oder andere Biomasseformen in feste, flüssige und gasförmige Produkte umgewandelt. Die zurückbleibende Biochar zeichnet sich durch hohe Porosität, eine große spezifische Oberfläche (bis zu 1.400 m<sup>2</sup>/g), hohe chemische Stabilität (Verweilzeiten bis zu 1.000 Jahre), eine ausgeprägte Kationenaustauschkapazität (CEC) sowie eine pH-puffernde Wirkung aus. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften hängen wesentlich vom Ausgangsmaterial und den Prozessbedingungen wie der Pyrolysetemperatur ab – je höher die Temperatur, desto höher sind Kohlenstoffgehalt und Stabilität.

## 10.2 Rolle der Erreichung der Emissionsziele

Durch die Pyrolyse von Biomasse entsteht ein stabiler, kohlenstoffreicher Feststoff, der im Boden über Hunderte, bis Tausende Jahre nahezu unverändert verbleibt. Pro

eingebrachter Tonne Biochar werden netto etwa 2,8 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent aus der Atmosphäre entfernt und dauerhaft gebunden. Sowohl Skalierbarkeit als auch die technische Reife ermöglichen bereits heute relevante Beiträge: 2024 wurden allein in Europa etwa 150.000 Tonnen CO<sub>2</sub> in Form von Biochar fixiert.

Neben dieser dauerhaften Kohlenstoffsенke hat Biochar wichtige Co-Benefits für das Klimasystem: Die Beimischung zu Böden reduziert Methan- und Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft, erhöht die landwirtschaftliche Produktivität und kann fossile Brennstoffe durch die Nutzung der bei der Herstellung entstehenden Prozesswärme substituieren. Durch diese Mehrfachnutzung wird Biochar nicht nur zu einer technisch praktikablen, sondern auch klimawirksam besonders attraktiven CDR-Option

### 10.3 Technology Briefing

Tabelle 7: Technologieübersicht Pyrolyse

<b>Technologie</b>	<b>Pyrolyse</b>
<i>Produkt</i>	Biochar
<i>Prozesse</i>	Thermo-chemisch
<i>CO<sub>2</sub>-Quelle (Rohstoff)</i>	Biogen
<i>CO<sub>2</sub>-Abscheidung</i>	Atmosphäre
<i>Kritische Prozessschritte</i>	Trocknung Transport
<i>TRL</i>	7-9
<i>spezifischer Energiebedarf Wh/kg (CO<sub>2</sub>)</i>	gering
<i>THG – Wirkung</i>	hoch
<i>Kritische Infrastruktur</i>	Biomasseproduktion
<i>ETS – fähig</i>	Nein (keine Negative-Allowance)
<i>CRCF – fähig</i>	Ja (Zertifikate)
<i>Kosten [€/t]</i>	Gering (Biomasse)

## 10.4 Aktueller Stand der Implementierung

Zur Herstellung kommen vor allem drei Verfahren zum Einsatz: Die slow pyrolysis arbeitet mit niedrigen Heizraten und langen Verweilzeiten und erzielt die höchsten Biochar-Ausbeuten (25–50 %). Die fast pyrolysis verwendet sehr hohe Heizraten und kurze Reaktionszeiten und produziert vorrangig Biooil, während Biochar nur als Nebenprodukt anfällt. Bei der Gasification, die unter Zugabe von Sauerstoff bei Temperaturen über 750 °C abläuft, entstehen primär Syngas (Synthesegas) und kleinere Mengen Biochar (2–15 %). Eine neuere Technologie ist die hydrothermal carbonization (HTC), bei der Biomasse in Wasser unter autogenem Druck bei 180–250 °C verarbeitet wird. HTC ermöglicht die Verwertung feuchter Reststoffe und erzeugt ein kohlenstoffreiches Produkt mit ähnlichen Eigenschaften wie junge Kohle.

Tabelle 8: TRLs verschiedener thermochemischer Konversionstechnologien

<b>Technologie</b>	<b>TRL</b>	<b>Erläuterung / Stand</b>
<i>Pyrolyse</i>	7–9	Kommerziell erprobt, es gibt industrielle Großanlagen weltweit
<i>Gasifizierung</i>	6–8	Industrieller Standard, für verschiedene Anwendungen vollständig technisch erprobt
<i>Hydrothermale Karbonisierung</i>	5–7	Technologie im Pilot- bis frühen Demonstrationsmaßstab, viele Pilot- und Demonstrationsprojekte in Europa

## 10.5 Regulatorischer Status

### Europäische Union

**EU-Düngemittelverordnung (2019/1009, gültig seit Juli 2022)**

Die Verordnung regelt Biochar als CMC 14-Pyrolyseprodukt und erlaubt EU-weiten Einsatz als Düngemittel bei Einhaltung definierter Qualitätsstandards (u.a. Ausnahmen bei Rostoffen)

### **Carbon Removal Certification Framework (CRCF, in Kraft seit Dez. 2024)**

Freiwilliger Zertifizierungsrahmen für technische CDR, inkl. Biochar, basierend auf QU.A.L.ITY-Kriterien (Quantität, Zusätzlichkeit, Dauerhaftigkeit, Nachhaltigkeit).

### **Delegierte Rechtsakte für Biochar-Methodik (erwartet Q4 2025)**

Konkrete Vorgaben zur Anrechenbarkeit und CO<sub>2</sub>-Bindung sollen 2026 erste Zertifizierungen ermöglichen.

## **Österreich**

### **Zulassung im Biolandbau (seit 2018)**

EBC-zertifizierte Pflanzenkohle darf offiziell im Biolandbau eingesetzt werden – ein bedeutender Schritt für landwirtschaftliche Anwendungen.

### **Einstufung als Bodenhilfsstoff nach Düngemittelrecht**

Biochar unterliegt nationalen Qualitätsnormen (u. a. ÖNORM S 2211) und ist als Bodenhilfsstoff gesetzlich geregelt.

### **Carbon Management Strategie (CMS, 2024)**

Biochar wird als eine der prioritären CDR-Technologien genannt, mit Fokus auf Potenzialanalyse, Inventurfähigkeit und Förderintegration.

## 10.6 Best-Practice

### Weltweit

#### **Exomad Green – Weltgrößte Biochar-Anlage (in Bau)**

Exomad Green errichtet in Guarayos (Bolivien) die künftig größte Biochar-Anlage der Welt mit einer geplanten Jahresproduktion von bis zu 128.000 t Pflanzenkohle, was jährlich 320.000 t CO<sub>2</sub> binden soll. Die Anlage setzt auf moderne Pyrolysetechnologie, wird in zwei Phasen ausgebaut und durch CO<sub>2</sub>-Zertifikate (Puro.earth) sowie dMRV-Systeme vollständig rückverfolgbar gemacht. Sie markiert einen Meilenstein für industrielle Skalierung von Biochar-CDR.

### Europa (EU, EWR)

#### **Carbo Culture – Industrielle Biochar-CDR aus Finnland**

Carbo Culture betreibt in Finnland eine skalierbare Biochar-Anlage („R3“) mit patentierter Carbolysis™-Technologie, die aus Restbiomasse stabile Pflanzenkohle erzeugt und jährlich bis zu 20.000 t CO<sub>2</sub> binden kann. Die Biochar hat eine hohe Langzeitstabilität (>1.000 Jahre) und wird u.a. in klimaneutralen Baustoffen eingesetzt. Nach einer €18 Mio.-Finanzierungsrunde plant das Unternehmen die Errichtung mehrerer Anlagen in Europa.

#### **Arigna Fuels – Irland**

Arigna Fuels betreibt seit 2025 eine der größten Biochar-Anlagen Europas mit einer Kapazität von bis zu 70.000 Tonnen Biokohle pro Jahr. Die Anlage verwendet ein modernes, kontinuierliches Pyrolyseverfahren für verschiedene biogene Reststoffe und ermöglicht so eine effiziente und saubere Kohlenstoffbindung. Das Unternehmen vollzog den Wandel vom klassischen Kohleproduzenten zum Anbieter erneuerbarer Energieträger und fördert die regionale Kreislaufwirtschaft. Die erzeugte Biokohle wird in der Landwirtschaft, Gartenbau und für nachhaltige Energieanwendungen eingesetzt.

## Österreich

### Sonnenerde - Burgenland

Die neue Anlage „Kohloss“ von Sonnenerde verarbeitet jährlich über 5.000 t feuchten Bioabfall zu rund 1.000 t Pflanzenkohle und bindet dabei ca. 2.500 t CO<sub>2</sub>. Mit ihrer innovativen PyroDry®-Technologie kombiniert sie Trocknung und Pyrolyse in einem energieautarken Prozess. Die Biochar wird als CO<sub>2</sub>-Senke zertifiziert und vielseitig genutzt – etwa in Böden, Futtermitteln und Baustoffen. Die Anlage dient als skalierbares Modell für klimapositive Kompostwirtschaft in Europa. Partner war der Anlagenanbieter NGE (next generation elements)

### EnergieWerk Ilg – Vorarlberg

Das EnergieWerk Ilg in Dornbirn betreibt eine klimapositive Pyrolyseanlage, die aus Waldrestholz gleichzeitig Strom, Wärme und stabile Pflanzenkohle erzeugt. Die Anlage erreicht eine Jahreskapazität von bis zu 2.000 t Biochar, die zur dauerhaften CO<sub>2</sub>-Bindung sowie in Landwirtschaft, Tierhaltung und Baustoffen genutzt wird. Sie gilt als Pionierprojekt für dezentrale Biochar-Nutzung in Österreich und zeigt, wie regionale Reststoffe in klimapositive Wertschöpfungsketten integriert werden können.

## 10.7 Identifizierte Lücken (GAPS)

### Technologische Lücken

Noch begrenzte industrielle Skalierung – viele Pyrolyseanlagen arbeiten im Pilotmaßstab

Herausforderung bei der Anpassung der Technologie an verschiedene Inputstoffe (Feuchtigkeit, Herkunft der Biomasse).

Langzeitwirkungen und spezifische Anwendungsszenarien (z.B. in Kombination mit anderen Bodenverbesserern, in Bauanwendungen) sind weiterhin Gegenstand intensiver Forschung.

## **Wirtschaftliche Lücken**

### **Investitionsunsicherheit**

Hohe Anfangsinvestitionen und Unsicherheiten hinsichtlich des Marktvolumens erschweren den Einstieg. Hinzu kommen Preisvolatilität und Abhängigkeiten von den Carbon-Credit-Märkten. Es fehlt bislang eine Integration in den verpflichtenden Emissionshandel.

Die Nachfrage bleibt schwankend, und auch die Erlösmodelle sind unsicher.

## **Regulatorische Lücken**

### **Regulatorische Vielfalt und Fragmentierung**

Es bestehen große Unterschiede zwischen Ländern hinsichtlich der Zulassung (Abfall, Produkt), Regulierung und Anwendung von Biokohle in der Landwirtschaft. Diverse Qualitätsstandards wie EBC sind teils freiwillig und nicht vollständig harmonisiert, was derzeit zu Inkonsistenzen bei CO<sub>2</sub>-Bilanz und Produktreinheit führt. Aktuelle Measurement, Reporting, and Verification (MRV) Systeme nicht vollständig geeignet für Biochar Bewertung. Diese Unterschiede führen zu Marktverzerrungen und regulatorischer Unsicherheit. Zusätzlich fehlen Standards für Anwendungsfälle, wie zum Beispiel Baustoffzusätze.

## **Infrastrukturlücken**

Industrielle Lieferketten (z. B. für Baustoffe, Metallurgie) fehlen derzeit.

# 11 Carbon Capture and Utilization (CCU) - Überblick

Carbon Capture and Utilization (CCU) Die Abscheidung und Nutzung von CO<sub>2</sub> stellt einen entscheidenden Baustein zur Erreichung der Dekarbonisierungsziele Europas dar. CCU ermöglicht die Umwandlung von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> in hochwertige Produkte wie synthetische Kraftstoffe, Plattformchemikalien, Alkohole und Spezialchemikalien. Bis 2050 sollen CCU-Technologien über 111 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> an Emissions-einsparungen ermöglichen, insbesondere in schwer zu dekarbonisierenden Verkehrssektoren durch den Einsatz von E-Fuels. Darüber hinaus könnte bis zu zwei Drittel der Primärolefinerzeugung auf abgeschiedenem Kohlenstoff basieren und damit fossile Rohstoffe ersetzen. Die technologische Bandbreite reicht von etablierten Verfahren wie der Methanol-synthese bis hin zu neuartigen elektro-chemischen Prozessen, wobei bereits mehrere Projekte im industriellen Maßstab in Europa in Betrieb sind.

## 11.1 Methanisierung

Carbon Capture and Utilization Methanation (CCU Methanation) bezeichnet Verfahren, bei denen abgeschiedenes CO<sub>2</sub> (aus Punktquellen oder der Luft) mit Wasserstoff (H<sub>2</sub>) zu Methan (CH<sub>4</sub>) umgewandelt wird. Das Methan kann als erneuerbarer Energie-träger in bestehende Gasinfrastrukturen eingespeist oder als Kraftstoff mit geringerer Emissionsintensität genutzt werden. Die Umwandlung erfolgt entweder katalytisch (Sabatier-Reaktion), biologisch (durch Mikroorganismen) oder bio-elektrochemisch (niedriger TRL).

## Prozesstypen

### Katalytische Methanisierung

Meist durch nickelbasierte Katalysatoren zur Umsetzung der Sabatier-Reaktion bei Temperaturen von 250–550 °C und Drücken von 1–100 bar. Der Prozess erfordert eine effektive Schwefelentfernung, Kompression und Kühlung, hat jedoch selbst eine relativ geringe Umweltwirkung.

## Biologische Methanisierung

Die biologische Methanisierung wandelt CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> mithilfe von Mikro-organismen (hauptsächlich methanogene Archaeen) bei moderaten Temperaturen (35–70 °C) und atmosphärischem Druck in Methan um. Sie kann direkt im Fermenter einer Biogasanlage (in-situ) erfolgen, indem Wasserstoff eingeleitet wird, oder in einem separaten Bioreaktor (ex-situ), in dem CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> gezielt umgesetzt werden. Biologische Methanisierung ist robust gegenüber Verunreinigungen und flexibel, hat aber niedrigere Reaktionsraten und benötigt größere Reaktorvolumina als die katalytische Methanisierung

Tabelle 9: TRL von Methanisierungstechnologien

<b>Technologie</b>	<b>TRL</b>
<i>chemisch (katalytisch)</i>	8-9
<i>elektrochemisch</i>	3-5
<i>biologisch</i>	6-8

## Integration

Methanisierung kann mit erneuerbarem Wasserstoff (Power-to-Gas) gekoppelt werden und ermöglicht so die saisonale Speicherung von Überschussstrom.

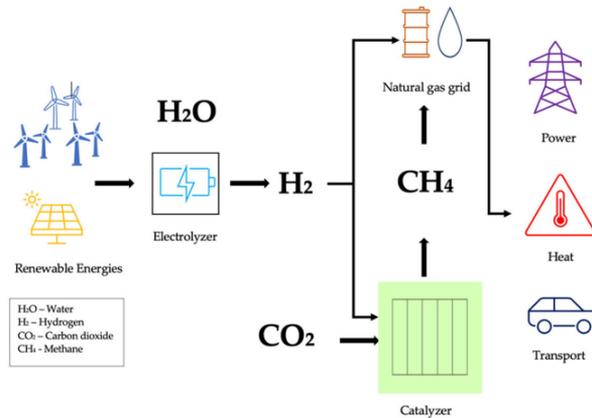


Abbildung 8: Younas 2016. Schematische Darstellung Methanisierung von CO<sub>2</sub> (Power-to-Gas)

## 11.2 Chemische Basischemikalien

Die Erzeugung chemischer Grundbausteine („Chemical Building Blocks“) und Plattformchemikalien auf CO<sub>2</sub>-Basis stellt – vor allem bei Verwendung von biogenem CO<sub>2</sub> – einen vielversprechenden Ansatz zur Defossilisierung der chemischen Industrie dar. Unter Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff und Strom lassen sich zentrale Zwischenprodukte wie Methanol, Ethanol, Ameisensäure und Dimethylcarbonat (DMC) durch verschiedene thermo-, elektro- und biokatalytische Verfahren synthetisieren. Diese Produkte dienen als Ausgangsstoffe für eine Vielzahl chemischer Folgeprodukte und Anwendungen, unter anderem in der Kunststoff-, Kraftstoff- und Textilindustrie.

Ein wesentlicher Prozesspfad ist die direkte CO<sub>2</sub>-Hydrierung zu **Methanol (e-Methanol)**. Hierbei wird CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff meist über kupferbasierte Katalysatoren bei moderaten Bedingungen von 200–300 °C und Drücken zwischen 20–50 bar in Methanol und Wasser umgesetzt. Im Vergleich zu Synthesegasbasierten Verfahren bietet dieser Ansatz Vorteile hinsichtlich Reaktionsführung, Selektivität und Nebenproduktvermeidung. Das gewonnene Methanol kann vielfältig weiterverwendet werden – etwa zur Herstellung von Formaldehyd, Methyl-tert-butylether (MTBE), Essigsäure, Methylmethacrylat und Dimethylether (DME).

**Ethanol auf CO<sub>2</sub>-Basis** kann über verschiedene Routen hergestellt werden. Neben thermokatalytischen Verfahren, wird in der elektrochemischen Umsetzung CO<sub>2</sub> an Katalysatoren selektiv zu Ethanol reduziert. Alternativ existieren biotechnologische Pfade, bei dem z. B.:

acetogene Bakterien  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  in einem Fermentationsprozess umsetzen – ein Ansatz, der bereits industriell, zur Anwendung kommt.

**Ameisensäure (HCOOH)** lässt sich durch direkte elektrochemische Reduktion von  $\text{CO}_2$  gewinnen, wobei je nach eingesetztem Metallkatalysator unterschiedliche Strom-Ausbeuten und Selektivitäten erreicht werden. Eine alternative Herstellroute stellt die homogene Hydrierung von  $\text{CO}_2$  mit Wasserstoff unter basischen Bedingungen dar. Ameisensäure findet unter anderem Anwendung als chemischer Zwischenträger, als potenzieller Wasserstoffspeicher sowie in der Textilveredelung.

**Dimethylcarbonat (DMC)** wird durch direkte Reaktion von  $\text{CO}_2$  mit Methanol synthetisiert. Hierbei ist die kontinuierliche Wasserabtrennung entscheidend, um das thermodynamische Gleichgewicht zugunsten der Produktbildung zu verschieben. Zusätzlich werden harnstoffbasierte Alternativrouten untersucht. DMC dient als phosgenfreier Baustein zur Polycarbonatproduktion und als umweltfreundliches Lösungsmittel in der chemischen Industrie.

### 11.3 Weitere synthetische Kohlenwasserstoffe und E-Fuels

E-Fuels sind synthetisch hergestellte Kohlenwasserstoffe, die durch die sogenannte Power-to-Liquid (PtL)-Technologie unter Einsatz von erneuerbarem Strom, Wasser und Kohlendioxid erzeugt werden. Die zentrale Prozesskette umfasst die Elektrolyse zur Wasserstofferzeugung, die Umwandlung von  $\text{CO}_2$  zu Synthesegas und die anschließende Kraftstoffsynthese durch verschiedene katalytisch-chemische Verfahren.

Ein zentraler technischer Ansatz zur Erzeugung flüssiger Kohlenwasserstoffe ist die **Fischer-Tropsch-Synthese**. Hierbei wird zunächst  $\text{CO}_2$  mittels der Reverse Water-Gas Shift-Reaktion (RWGS) bei Temperaturen von 300–700 °C in Kohlen-monoxid umgewandelt. Das daraus resultierende Synthesegas ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) wird anschließend über metallische Katalysatoren (Cobalt oder Eisen) bei Temperaturen zwischen 200 und 350 °C und Drücken von 1–25 bar zu langkettigen Kohlenwasserstoffen umgesetzt. Die Reaktionsparameter sowie die Katalysatorwahl beeinflussen gezielt die Produktverteilung.

Eine alternative Herstellroute ist die **Methanol-basierte Kraftstoff-synthese**. In einem ersten Schritt wird Methanol synthetisiert, indem  $\text{CO}_2$  und Wasserstoff in einem kupferbasierten Katalysatorsystem bei 220–280 °C reagieren. Anschließend erfolgt über den sogenannten Methanol-to-Olefins (MTO)-Prozess eine Umwandlung zu kurzkettigen

Olefinen. Diese Olefine werden durch Oligomerisierung und gezielte Molekülsteuerung in flüssige Kohlenwasserstoffe überführt, die insbesondere als Flugkraftstoff einsetzbar sind (Methanol-to-Jet, MtJ, sustainable aviation fuel, SAF).

## 11.4 Technology Briefing

Tabelle 10: Technologieübersicht CCU

Technologie	CCU
<i>Produkt</i>	Kohlenwasserstoffe
<i>Prozesse</i>	chemisch, biologisch, elektrochemisch
<i>CO<sub>2</sub>-Quelle (Rohstoff)</i>	variabel
<i>CO<sub>2</sub>-Abscheidung</i>	Punktquellen, DAC
<i>Kritische Prozessschritte</i>	Abscheidung, erneuerbare Energie, Wasserstoff, Transport (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , elektrische Energie)
<i>TRL</i>	4-9
<i>spezifischer Energiebedarf Wh/kg (CO<sub>2</sub>)</i>	hoch (Wasserstoff)
<i>THG – Wirkung</i>	Gering, keine permanente Speicherung
<i>Kritische Infrastruktur</i>	Transportnetz (Pipelines) LKW, Bahn Schiffsterminals
<i>ETS – fähig</i>	Bedingt (keine Negativ-Allowance) RFNBO zertifizierbar
<i>CRCF – fähig</i>	Nein
<i>Kosten [€/t]</i>	nicht konkurrenzfähig mit fossilen Produkten

## 11.5 Rolle bei der Erreichung von Klimazielen

Methanisierung gilt als eine Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung des Energiesektors, insbesondere für Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen (z. B. Industrie, Verkehr, Wärme). Sie ermöglicht:

- **Kreislaufführung von CO<sub>2</sub>:** Nutzung von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> als Rohstoff statt Emission.
- **Speicherung erneuerbarer Energie:** Umwandlung von Überschussstrom in speicherbares Methan.
- **Defossilierung der Gasinfrastruktur:** Einspeisung von „grünem“ Methan in bestehende Netze.

Synthetische Kraftstoffe, insbesondere SAF spielen eine zentrale Rolle in der Dekarbonisierung des (Luft)verkehrs und sind eines der wichtigsten Instrumente, um die klimapolitischen Ziele in diesem Sektor zu erreichen. Da insbesondere der Langstrecken-Flugverkehr technisch nur sehr begrenzt elektrifizierbar ist, gelten nachhaltige Flugkraftstoffe als Schlüsseltechnologie. Sie ermöglichen eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen, ohne dass bestehende Flugzeugflotten oder Infrastrukturen verändert werden müssen – sie sind „drop-in-fähig“ und können fossiles Kerosin direkt ersetzen.

CCU bietet der chemischen Industrie im Allgemeinen die Möglichkeit, ihre starke Abhängigkeit von fossilen Kohlenstoffquellen wie Erdöl und Erdgas zu verringern, indem CO<sub>2</sub> als alternativer Rohstoff genutzt wird (neben Recycling und biobasierten Rohstoffen).

Im Gegensatz zu CCS (dauerhafte Speicherung) steht bei CCU die Nutzung und Kreislaufführung von Kohlenstoff im Vordergrund.

## 11.6 Beitrag zur Emissionsminderung

Der Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion hängt von der Herkunft des CO<sub>2</sub> und des Wasserstoffs ab. Nur bei Nutzung von erneuerbarem H<sub>2</sub> und biogenem oder abgeschiedenem CO<sub>2</sub> (z.B.: Biogasanlagen, DAC) ist die Klimawirkung signifikant. Außerdem ist der Einsatz von erneuerbaren Energiequellen notwendig, da alle Technologien, inklusive Abscheidung sehr energieintensiv (thermisch und elektrisch) sind.

## 11.7 Regulatorischer Status

### Europäische Union

#### EU Renewable Energy Directive (RED II/III)

In der überarbeiteten RED III, die 2023 in Kraft trat, wurden die Ziele für erneuerbare Energien weiter erhöht, wobei Renewable fuels of non-biological origin (RFNBO) eine wichtige Rolle spielen

#### EU Emissionshandel (EU-ETS)

Derzeit existiert keine direkte Anrechnung von CCU-Produkten, mit der Ausnahme SAF für Fluggesellschaften, mit dem Zweck Preisunterschiede zu fossilen Produkten auszugleichen.

#### Carbon Removal Certification Framework (CRCF)

Fokus auf dauerhafte Speicherung, CCU-Produkte werden aktuell nicht als „Entnahme“ bzw. Speicherung zertifiziert. Langlebige Produkte (>35 Jahre) werden aber anerkannt.

## 11.8 Best-Practice (Methan)

### Europa (EU, EWR)

#### GrønGas Hjørring A/S & Grøn Brint A/S (DK)

Die Anlage von GrønGas Hjørring und Grøn Brint in Dänemark verbindet Biogasproduktion mit grüner Wasserstofferzeugung und CO<sub>2</sub>-Methanisierung. Zwei 1 MW PEM-Elektrolyseure liefern ca. 900 kg Wasserstoff pro Tag, der mit biogenem CO<sub>2</sub> zu e-Methan umgewandelt wird. Die erzeugte e-LNG-Menge liegt bei rund 17 t pro Tag. Der Betrieb erfolgt vollständig mit Windstrom, die CO<sub>2</sub>-Einsparung beträgt ca. 41.000 t pro Jahr.

#### Hy2Gen Atlantis (Werlte, DE)

Die ATLANTIS-Anlage in Werlte, Niedersachsen, produziert seit 2013 grünen Wasserstoff und erneuerbares Methan, seit 2023 unter neuer Betriebsführung. Mit einer Elektrolyseleistung von 6,3 MW, gespeist durch Wind- und Solarstrom, erzeugt sie jährlich rund 900 Tonnen Wasserstoff und 1.800 Tonnen e-Methan. Das Power-to-Gas-Verfahren nutzt CO<sub>2</sub> als Rohstoff. Der Transport erfolgt per Pipeline und Straße. Eine Erweiterung um 5 Megawatt ist geplant.

### **P2X solutions (Harjavalta, FI)**

Die 2025 in Betrieb genommene Anlage verfügt über eine Elektrolysekapazität von 20 Megawatt und nutzt erneuerbaren Strom zur Wasserstoffproduktion. Geliefert wurde der Elektrolyseur vom deutschen Unternehmen Sunfire GmbH. Zusätzlich ist der Aufbau einer Anlage zur Herstellung von synthetischem Methan (ex-situ, biologisch) am Standort vorgesehen, wobei die Methanisierungseinheit vom finnischen Unternehmen Q Power Oy stammt.

## **Österreich**

### **Renewable Gasfield**

Im Forschungsprojekt Renewable Gasfield wird Sonnenstrom durch eine Photovoltaikanlage genutzt, um mittels Elektrolyse Wasserstoff zu erzeugen.

Zum Einsatz kommen eine Biogasanlage, eine PEM-Elektrolyse mit einer Leistung von 1 Megawatt sowie eine katalytische Methanisierungsanlage. Die Elektrolyse liefert rund 40 Normkubikmeter Wasserstoff pro Stunde, woraus etwa 21,5 Normkubikmeter Methan mit einem Methangehalt von über 90 % erzeugt werden. Das Projekt wird innerhalb der Kanadevia Inova-Gruppe umgesetzt.

## **11.9 Best-Practice (Chemikalien, e-fuels)**

### **Europa (EU, EWR)**

#### **Interatec (Frankfurt, DE)**

Die ERA ONE-Anlage von INERATEC ist Europas größte kommerzielle Power-to-Liquid-Anlage zur Herstellung von klimaneutralen E-Fuels und E-Chemikalien. Sie nutzt biogenes CO<sub>2</sub> aus einer Biogasanlage und grünen Wasserstoff aus der regionalen Chlorproduktion am Standort Frankfurt-Höchst. Mit einer Kapazität von 2.500 Tonnen pro Jahr produziert sie synthetisches Rohöl, das zu E-Kerosin, E-Diesel und chemischen Grundstoffen weiterverarbeitet wird – insbesondere für die Luftfahrt, Schifffahrt und Chemieindustrie.

### **Carbon Recycling International (Grindavik, Island)**

Die George Olah Renewable Methanol Plant von Carbon Recycling International (CRI) bei Grindavík in Island produziert jährlich rund 4.000 Tonnen erneuerbares Methanol (Vulcanol®) durch die Umwandlung von industriellem CO<sub>2</sub> (etwa 5.500–5.600 Tonnen pro Jahr aus dem Svartsengi-Geothermalkraftwerk) und grünem Wasserstoff, der per Elektrolyse mit erneuerbarem Strom erzeugt wird. Das nachhaltige Methanol wird als Kraftstoff, Chemiegrundstoff und zur Energiespeicherung verwendet. Die Anlage erreichte diese Produktionskapazität nach Ausbau und ist damit ein internationales Vorzeigeprojekt der CO<sub>2</sub>-zu-Methanol-Technologie

### **Steelanol (Ghent, Belgien)**

Die CCU-Anlage am ArcelorMittal-Stahlwerk wurde in Kooperation mit LanzaTech realisiert. Sie nutzt innovative Gasfermentation, um CO<sub>2</sub>-haltige Abgase aus der Stahlproduktion mithilfe von Mikroben direkt zu Bioethanol umzuwandeln. Die Produktionskapazität beträgt jährlich 80 Millionen Liter Bioethanol – das entspricht etwa der Hälfte des aktuellen Gesamtbedarfs für nachhaltigen ethanolbasierten Kraftstoff in Belgien. Die Anlage kann damit bis zu 125.000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr einsparen. Das Bioethanol findet Anwendung in Transport, Chemie und Kosmetik. Steelanol ist das erste Projekt dieser Art in Europa und wird durch die EU, die EIB sowie Interreg unterstützt.

## **Österreich**

### **C2PAT+**

Ist CCUS-Pilotprojekt von Holcim in Mannersdorf zur Abscheidung und Nutzung von bis zu 750.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr bis 2030. Zum Einsatz kommt eine Kombination aus PSA-Technologie und kryogener Gastrennung – erstmals in dieser Größenordnung in einem Binnenland.

Geplant sind CO<sub>2</sub>-Speicherung in Österreich oder alternativ Transport nach Ravenna. Mittelfristig ist die CO<sub>2</sub>-Nutzung zur Kunststoff- und Chemikalienproduktion mit OMV, Borealis und Verbund vorgesehen.

## Österreich-Potenzial

### Biogasaufwertung

Aufgrund der Anlagendichte besteht großes Potential einer Integration biologischer Methanisierung in bestehende Biogasanlagen. – auch kleiner skalierte Integration möglich.

### Industriecluster

Potenzielle Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Industrieprozessen (Zement, Stahl, Papier) für CCU und wiederholte Nutzung – Kreislaufführung CO<sub>2</sub> – durch die starke Erdöl- und Kunststoffindustrie (auch zum Teil Düngemittelindustrie)

## 11.10 Identifizierte Lücken

### Technologische Lücken

#### TRL (in der gesamten Wertschöpfungskette)

Viele Technologien zur Produktion von synthetischen Kohlenwasserstoffen und zum Transport von Wasserstoff befinden sich noch in der Demonstrations- oder frühen Einführungsphase. Sie sind noch nicht ausgereift, was Investitionen hemmt und den großflächigen Einsatz erschwert

Damit Wasserstoff einen bedeutenden Beitrag zur Dekarbonisierung leisten und die angestrebten Ziele der Wasserstoffwirtschaft erreicht werden können, muss die notwendige Infrastruktur zur Erzeugung rasch ausgebaut werden. Während kleinere Elektrolyseanlagen bereits umgesetzt wurden, befinden sich zentrale Projekte großtechnische Elektrolyse noch in der Vorbereitung.

#### CO<sub>2</sub> – Reinheit und Katalysatorstabilität

Die meisten Katalysatoren – wie zum Beispiel Nickel – sind empfindlich gegenüber Schwefelvergiftungen, also der Deaktivierung durch Schwefelverbindungen. Die aktive Oberfläche des Katalysators kann außerdem durch mechanisches Mahlen oder chemische Reaktionen mit anderen Stoffen verringert werden. Auch thermische Einflüsse können zur Deaktivierung führen.

## **Wirtschaftliche Lücken**

### **Grüner Wasserstoff**

Die Kosten für CCU-Anwendungen sind sehr stark von der Verfügbarkeit und dem Preis von erneuerbarem Wasserstoff abhängig (diese wiederum von den Preisen grüner Energie). Grüner Wasserstoff bleibt bis 2030 voraussichtlich teurer als blauer, dessen Kosten sogar weiter sinken könnten – trotz seiner langfristig problematischen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## **Regulatorische Lücken**

### **Entwicklung von Märkten, Konkurrenz zu fossilbasierten Produkten**

Beispiele wie SAF (Regulation (EU) 2023/2405 , ReFuel Aviation) haben gezeigt, dass Vorgaben für zirkulären Kohlenstoff in Produktengruppen aus fossilen Rohstoffen notwendig sind.

### **CO<sub>2</sub> – Bepreisung und Carbon Contracts for Difference**

Es benötigt weitere Instrumente, um einen garantierten Preis für vermiedene CO<sub>2</sub>-Emissionen zu sichern. Wenn der CO<sub>2</sub>-Marktpreis unter diesem garantierten Preis liegt, gleicht der Staat die Differenz aus – so wird die Wirtschaftlichkeit klimafreundlicher Technologien wie CCU abgesichert.

## **Infrastrukturücken**

### **CO<sub>2</sub> - Transport**

Für CO<sub>2</sub> bestehen erhebliche Defizite in der Infrastruktur, insbesondere beim Transport und der temporären Speicherung. Derzeit gibt es nur wenige Pipelines und Verbindungen, die CO<sub>2</sub> von den verarbeitenden Industrien verbinden. Für viele CCU-Technologien ist Clusterbildung sinnvoll.

### **H<sub>2</sub> - Transport**

Die Wasserstoff-Infrastruktur in Europa befindet sich noch im Aufbau. Es gibt erste Pilotprojekte und Planungen für länderübergreifende Pipelines

### **Stromnetze**

Der Ausbau der Stromnetze und die Flexibilisierung sind dringend erforderlich, um die Integration von Wind- und Solarenergie zu ermöglichen, da sich die effizientesten Produktionsstandorte von Energie, Wasserstoff und (biogenem) CO<sub>2</sub> oft nicht überschneiden.

# 12 Mineralisierung

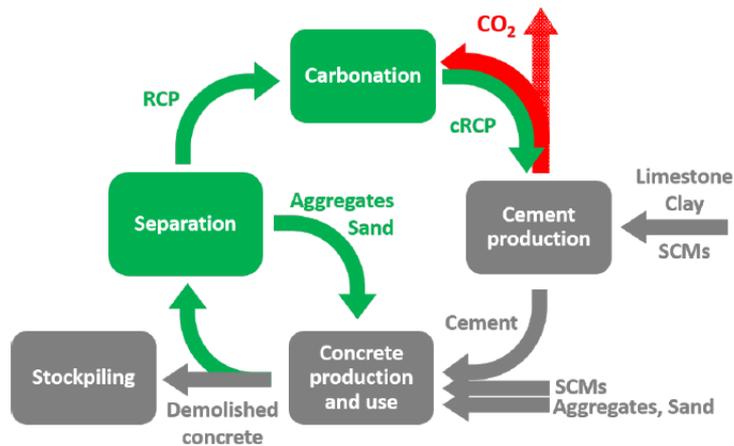


Abbildung 9: Zajac, 2021. Lebenszyklus von Zement und Beton unter Einbeziehung von Betonrecycling und Recarbonatisierung feiner Betonanteile. Grau: konventionelle Herstellung und Nutzung; Grün: verbesserte Recyclingprozesse und Recarbonatisierung gemäß dem vorgeste

## 12.1 Beschreibung der Technologie

Die Technologie nutzt das Prinzip der Kohlenstoff-Mineralisierung („Carbon Mineralization“) gezielt für die Dekarbonisierung der Zement- und Betonindustrie – sowohl bei der Herstellung von Frischbeton als auch im Umgang mit Betonabbruch.

### Grundprinzip der Mineralisierung

Bei der Mineralisierung wird abgeschiedenes  $\text{CO}_2$  – aus industriellen Quellen oder direkt aus Abgasströmen der Zementproduktion – in ein Medium eingebracht, das reich an Kalzium- oder Magnesiumverbindungen ist, typischerweise Zement oder Betonabbruch. Durch die Reaktion entsteht stabiles Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), in dem das  $\text{CO}_2$  langfristig und sicher gebunden ist. Dieser Prozess gilt als „dauerhafte“ Senke, weil der Kohlenstoff auf Zehntausende Jahre gespeichert wird und nicht mehr in die Atmosphäre entweicht. Lediglich ein geringer Teil könnte z.B. über sauren Regen entweichen.

## Anwendung bei Frischbeton

Hier wird das abgeschiedene CO<sub>2</sub> direkt beim Mischen in die Betonmischung injiziert. Das CO<sub>2</sub> reagiert unmittelbar mit dem Kalziumoxid (aus Zementklinker) zu Nano-Kalziumkarbonat.

Vorteile: Das Verfahren kann einfach in bestehenden Betonwerken nachgerüstet werden, es erhöht oft die Frühfestigkeit und Haltbarkeit von Beton und ermöglicht die Reduktion von Zementanteilen im Mix.

## 12.2 Technology Briefing

Tabelle 11: Technologieübersicht Mineralisierung

Technologie	CCU
<i>Produkt</i>	Baumaterialien, Mineralische Materialien
<i>Prozesse</i>	chemisch
<i>CO<sub>2</sub>-Quelle (Rohstoff)</i>	hauptsächlich geogen
<i>CO<sub>2</sub>-Abscheidung</i>	Punktquellen
<i>Kritische Prozessschritte</i>	Abbruchrecycling und -transport
<i>TRL</i>	7-8
<i>spezifischer Energiebedarf Wh/kg (CO<sub>2</sub>)</i>	Gering, keine Vorbehandlung
<i>THG – Wirkung</i>	Hoch, permanente Speicherung
<i>Kritische Infrastruktur</i>	LKW, Bahn (Abbruchmaterial)
<i>ETS – fähig</i>	Permanente Speicherung
<i>CRCF – fähig</i>	Nein
<i>Kosten [€/t]</i>	Kosten derzeit höher als Zertifikatspreise pro Tonne CO <sub>2</sub>

### **Anwendung bei Betonabbruch (recyceltem Beton und Zement)**

Bei der Aufbereitung von Betonabbruch werden feine Fraktionen mit hohem Zement (aus Altbeton) abgetrennt. Diese zementreichen Feinstoffe werden gezielt mit CO<sub>2</sub> behandelt („enforced carbonation“), sodass sie vollständig karbonisieren.

Resultat: Es entsteht neben Kalziumkarbonat ein amorphes Alumosilikat-Gel mit puzzolanischen Eigenschaften – dies kann als hochwertiges Bindemittel oder Zusatzstoff in neuen Zementen und Betonen genutzt werden („circular economy“).

Das Verfahren kann bei Umgebungs-temperatur und -druck sowie mit relativ niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen durchgeführt werden (z.B. direkt mit Abgasen einer Zementanlage). Die gesamte CO<sub>2</sub>-Menge, die bei der Klinkerherstellung ursprünglich aus dem Kalkstein freigesetzt wurde, kann damit theoretisch wieder aufgenommen werden.

## **12.3 Rolle der Erreichung der Emissionsziele**

### **Dekarbonisierung**

Die Technik senkt den Emissionsausstoß der Zementklinker-Herstellung und bietet eine dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs. Die Anwendung auf Massensbasis ist kostengünstiger als konventionelle CCS-Maßnahmen und stimuliert Recyclingströme und Ressourcenschonung. Die Materialverfügbarkeit (insbesondere von feinstoffreichem Betonabbruch) ist die entscheidende Limitierung für das globale Potenzial.

Im Vergleich zu anderen CCU-Technologien benötigt die Carbonatisierung von Calciumoxid (CaO) zu Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>) keinen Wasserstoff. Die Reaktion mit CO<sub>2</sub> ist unter Normalbedingungen exotherm und spontan.

## 12.4 Stand der Implementierung und TRL

Die Technologie befindet sich 2025 im Übergang von späten Pilot- und Demonstrationsphasen (TRL 7-8) zu großtechnischer, kommerzieller Anwendung (TRL 9) im Zementsektor. Kommerzielle Anlagen sind im Bau oder bereits in Betrieb. Die Technologie ist grundsätzlich marktreif, die großflächige Umsetzung hängt aber noch von staatlicher Unterstützung, Rohstoffverfügbarkeit und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab.

## 12.5 Regulatorischer Status

### Europäische Union

#### Emissionshandel & Zertifikate

Mit der Novellierung der EU-Emissionshandelsrichtlinie besteht eine Ausnahme für abgeschiedenes und dauerhaft in Produkten (wie durch CO<sub>2</sub>-Mineralisierung im Beton) gebundenes CO<sub>2</sub>. Diese gebundenen Emissionen müssen keine Zertifikate abgeben.

### Österreich

In Österreich besteht derzeit (Stand Juli 2025) ein gesetzliches Verbot für die geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung, das auch große CCUS-Projekte einschränkt. Abscheidung und Nutzung (CCU/Mineralisierung) sind jedoch – mit Einschränkungen – erlaubt. Das generelle Speicherverbot wird voraussichtlich 2026 fallen. Durch diese Sonderstellung der ETS-Einbindung unter den CCUS-Methoden bietet diese Technologie starke Anreize für die Zementindustrie.

## 12.6 Best-Practice

### Europa (EU, EWR)

#### Carbon2Business-Projekt

Holcim zielt in Lägerdorf (Deutschland) auf eine vollständig CO<sub>2</sub>-neutrale Zementproduktion ab 2029. Dabei sollen jährlich rund 1,2 Mio. t CO<sub>2</sub> mittels einer Oxyfuel-Kilnlinie der 2. Generation und einer nachgeschalteten Carbon Processing Unit abgeschieden, gereinigt und verflüssigt werden. Das gewonnene CO<sub>2</sub> soll industriell genutzt werden, etwa zur Herstellung von Methanol. Das Projekt erhielt rund 110 Mio. € Förderung aus dem EU-Innovationsfonds und gilt als europäisches Vorzeigeprojekt für CCUS in der Zementindustrie.

### **Anthemis**

Das Projekt von Heidelberg Materials in Antoing (Belgien) soll ab 2029 jährlich rund 800.000 t CO<sub>2</sub> abscheiden – über 97 % der Emissionen des Standorts. Zum Einsatz kommt ein Hybridverfahren aus Oxyfuel- und Amin-technologie (OxyCal). Das CO<sub>2</sub> wird per Pipeline zu Speicherstätten in der Nordsee transportiert. In den ersten zehn Jahren sollen damit über 15 Mio. t CO<sub>2</sub>-reduzierter Zement produziert werden.

## **Österreich**

### **C2PAT+**

Ist CCUS-Pilotprojekt von Holcim in Mannersdorf zur Abscheidung und Nutzung von bis zu 750.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr bis 2030. Zum Einsatz kommt eine Kombination aus PSA-Technologie und kryogener Gastrennung – erstmals in dieser Größenordnung in einem Binnenland.

Geplant sind CO<sub>2</sub>-Speicherung in Österreich oder alternativ Transport nach Ravenna. Mittelfristig ist die CO<sub>2</sub>-Nutzung zur Kunststoff- und Chemikalienproduktion mit OMV, Borealis und Verbund vorgesehen.

### **CCUpScale**

RHI Magnesita errichtet in Hochfilzen (Tirol) ab 2028 eine CCU-Demonstrationsanlage zur Bindung von rund 50.000 t CO<sub>2</sub>/Jahr mithilfe der MCI Carbon Mineralizer-Technologie. Ziel ist die Umwandlung von Abgas-CO<sub>2</sub> in mineralische Produkte. Das Projekt wurde 2025 mit 3,8 Mio. € gefördert und auf der COP29 als „Outstanding Project“ ausgezeichnet.

## 12.7 Identifizierte Lücken (GAPS)

### Technologische Lücken

#### Normung

Leistungsdaten mineralisierter SCMs oder Recyclingbaustoffen (Festigkeit, Dauerhaftigkeit) fehlen in heutigen Normen – daher kein gesicherter Produkteinsatz.

### Wirtschaftliche Lücken

#### Marktdurchdringung und Finanzierung

Es fehlen klare Geschäftsmodelle, wie sich CO<sub>2</sub> mineralisierende Anlagen nachhaltig betreiben lassen. Bislang sind fast alle Pilotprojekte auf öffentliche Beihilfen angewiesen.

#### CO<sub>2</sub> Bepreisung

Karbonatisierung in vielen Anwendungen noch nicht wirtschaftlich ohne Förderung aufgrund derzeit noch zu niedriger CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise.

#### Strom & Energieversorgung

Für die Dekarbonisierung der Zementindustrie ist eine sichere und wettbewerbsfähige Strom- und Energieversorgung entscheidend, da der Energiebedarf steigen wird.

### Regulatorische Lücken

#### CO<sub>2</sub> Grenzausgleich (CBAM)

Die Dekarbonisierung der Zementindustrie erfordert ein internationales Level Playing Field bei CO<sub>2</sub>-Kosten. Der Start des CBAM ab 2026 ist dafür entscheidend, da mit dem Ende der kostenlosen Emissionszertifikate das Risiko der Verlagerung von Emissionen außerhalb der EU steigt. Notwendig ist ein robuster, aber unbürokratischer CO<sub>2</sub>-Grenzausgleich für

importierte Zemente, Klinker und calcinierte Tone, der Umgehungen wie Resource Shuffling verhindert.

### **Abfallverordnung – Recyclingbaustoffverordnung**

Es sind klare und harmonisierte Regelungen zu Abfallende und Produkt für mineralisierte Baustoffe in der ganzen EU notwendig (Österreich hat eine relativ gute Regelung).

## **Infrastrukturücken**

### **Verfügbarkeit von geeigneten Mineralstoff-Strömen**

Für großskalige Karbonatisierung braucht es kontinuierliche Anfallmengen an Schlacke, Asche oder Betonschutt. Diese müssen gesammelt, aufbereitet und zum Karbonisierungsreaktor gebracht werden. Hier sind die nötigen Kreislaufwirtschafts-Systeme nicht ausreichend etabliert – etwa die Verbindung der Bau- und Recyclingbranche mit CO<sub>2</sub>-Lieferanten.

# 13 Förderung und Finanzierung

Auf EU-Ebene wie auch in Österreich zeigt sich, dass unterschiedliche Organisationstypen jeweils über spezifische Förderkanäle erreicht werden können.

Großunternehmen und industrielle Konsortien erhalten vorrangig Unterstützung für Demonstrations- und Skalierungsprojekte mit hohem Investitionsbedarf, etwa über den EU-Innovationsfonds oder Infrastrukturprogramme (z. B. CO<sub>2</sub>-Netze). Diese Vorhaben verbinden häufig mehrere Akteure entlang der Wertschöpfungskette.

Forschungsinstitutionen und Universitäten sind überwiegend in kooperativen F&E-Projekten verankert (z. B. Horizon Europe, nationale Energieforschung). Sie übernehmen oft Koordinationsrollen und adressieren Grundlagen- bis anwendungsnahe Forschung, inklusive MRV-Methodik und Systemintegration.

Start-ups und KMU werden gezielt über Innovations- und Wachstumsinstrumente angesprochen (z. B. EIC Accelerator, LIFE-Pilotprojekte, nationale Start-up-Programme). Hier stehen technologiegetriebene Ansätze, frühe Demonstration und Markteintritt im Vordergrund; häufig in Partnerschaft mit Industrie und Forschung.

In Österreich verstärkt sich der Schwerpunkt in jüngerer Zeit von überwiegend forschungsgetriebenen Aktivitäten hin zu ersten industriellen Demonstrationen, parallel zu weiterhin laufender F&E-Förderung. Öffentlich geförderte Projekte werden dabei als Konsortien umgesetzt, um Technologie, Anwendungspraxis und wissenschaftliche Begleitung zu verbinden.

Die Instrumente sind meist komplementär und es stehen grundsätzlich für alle Sparten spezialisierte Kanäle zur Verfügung – Forschung fördert Wissensaufbau, Start-up/KMU-Programme adressieren Innovation und frühe Skalierung, und großvolumige Industrieprogramme ermöglichen Umsetzung in emissionsintensiven Sektoren. Erfolgreiche Vorhaben kombinieren diese Ebenen oft innerhalb eines Portfolios oder Konsortiums, sodass technologische Reife, wirtschaftliche Tragfähigkeit und Systemanschluss gemeinsam weiterentwickelt werden können.

## 13.1 Europäische Union

### Akteure

European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA)

CINEA setzt zentrale EU-Förderprogramme für Klimaschutz, Infrastruktur und Umwelt um, darunter das LIFE-Programm, den Innovation Fund und die Connecting Europe Facility, und verwaltet gezielte Calls für CCUS- und CDR-Projekte; so wurden allein über den Innovation Fund 2024 rund 4,6 Mrd. Euro für großskalige Dekarbonisierungsprojekte, zahlreiche CDR-Innovationen und mehrere Dutzend CCUS-/CDR-Demonstrationsanlagen vergeben

#### **European Investment Bank (EIB)**

Die EIB ist die weltweit größte multilaterale Klimafinanzierungsbank und finanziert CCUS- und CDR-Großprojekte ab ca. 25 Mio. Euro durch Kredite, Garantien und Beratungsleistungen; für das Jahr 2024 wurden insgesamt 44,8 Mrd. Euro für Klimaprojekte zugesagt, wobei Schwerpunkte auf Projektentwicklung, industrielle Demonstration und Infrastruktur für CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung liegen

#### **European Investment Fund (EIF)**

Der EIF ist auf Beteiligungs-, Venture Capital- und Risikoteilungsinstrumente spezialisiert und zielt auf die Unterstützung junger Unternehmen und KMU im Bereich grüner Technologien, darunter CCUS/CDR-Innovationen, etwa über die InvestEU Sustainability Guarantee und andere Venture-Finanzierungsinstrumente; das Volumen für Green Investments lag 2024 bei ca. 6,1 Mrd. Euro

#### **European Innovation Council (EIC)**

Der EIC unterstützt technologische Durchbrüche im CCUS-/CDR-Bereich mit drei Instrumenten: Pathfinder (TRL 1-4), Transition (TRL 4-6) und Accelerator (TRL 6-9);

## **Förderinstrumente & Programme**

### **Innovationsfonds (IF)**

Mit einem Volumen von 40 Milliarden Euro ist der EU-Innovationsfonds eines der weltweit größten Programme für CCS-Technologien. Er fördert bis zu 60% der Projektkosten und bewilligte 2024 rund 4,8 Mrd. Euro für 85 Projekte – darunter 16 mit CCS.

### **InvestEU**

Das zentrale EU-Investitionsprogramm (2021-2027) mit einem EU-Budgetgarantierahmen von 26,2 Mrd. Euro, das über 372 Milliarden Euro an öffentlichen und privaten Investitionen mobilisieren soll und explizit CCUS- und CDR-Projekte als strategische Klimaschutzmaßnahmen unterstützt.

### **Connecting Europe Facility (CEF):**

CEF ist das zentrale EU-Finanzierungsinstrument für den Ausbau und die Modernisierung grenzüberschreitender Infrastrukturen in den Bereichen Energie, Verkehr und Digitalisierung, wobei im Energiebereich insbesondere strategische Vorhaben wie Strom-, Wasserstoff- oder CO<sub>2</sub>-Transportleitungen unterstützt werden;

### **LIFE-Programm:**

Das LIFE-Programm fördert Klimaschutz-, Umwelt- und Biodiversitätsprojekte und zielt im Klimabereich speziell darauf ab, Demonstrations- und Pilotvorhaben für Treibhausgasreduzierung und Anpassung an den Klimawandel umzusetzen, wobei jüngste Ausschreibungen explizit auch Carbon Capture and Storage (CCS) in energieintensiven Branchen wie Zement, Chemie oder Stahl adressieren

### **Horizon Europe**

Horizon Europe ist das Forschungs- und Innovationsprogramm der EU für 2021–2027 mit etwa 100 Mrd. Euro Budget, das exzellente Wissenschaft, globale Herausforderungen (Klima, Gesundheit, Digitalisierung) und Innovation branchenoffen fördert.

### **Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE JU)**

Ein europäisches Public-Private Partnership im Rahmen von Horizon Europe zwischen der EU und der biobasierten Industrie. Budget ca. 2 Mrd. Euro (2021–2030). Fördert Projekte zur zirkulären Bioökonomie, u. a. Nutzung biogener CO<sub>2</sub>-Ströme für CCU, Biochar/Pyrolyse oder BECCS.

#### **Just Transition Fund (JTF):**

Der Just Transition Fund (JTF) stellt Österreich rund 135 Mio. Euro für Projekte zum nachhaltigen Strukturwandel und zur Dekarbonisierung in besonders betroffenen Regionen bereit, darunter auch CCS-relevante Maßnahmen. Ziel ist es, klimafreundliche Technologien und neue Beschäftigung zu fördern sowie emissionsintensive Branchen bei der Transformation zu unterstützen

## **13.2 Österreich**

### **Akteure**

#### **Bundesministerien (v. a. BMIMI/BMWET/BMLUK)**

Nehmen vor allem die Rolle als Mitfinanzierer vieler Programme (z. B. Energieforschung, Transformation der Industrie) ein

#### **Kommunalkredit Public Consulting (KPC)**

Kommunalkredit Public Consulting (KPC) verwaltet in Österreich zentrale Förderprogramme im Umwelt- und Klimaschutzbereich. Im Kontext von CCUS und CDR unterstützt die KPC-Investitionen in erneuerbare Energien, Klimaschutztechnologien und CO<sub>2</sub>-Reduktion durch direkte Zuschüsse, Beratungsleistungen und die Förderung von Pilotprojekten.

#### **Austria Wirtschaftsservice (AWS)**

Die Austria Wirtschaftsservice (AWS) ist die staatliche Förderbank für Unternehmen, Start-ups und KMU in Österreich. Mit Instrumenten wie aws Preseed, Seedfinancing, Gründerfonds sowie der InvestEU Sustainability Guarantee fördert die AWS Investitionen und Innovationen in den Bereichen Klimaschutz, Deep-Tech und Clean-Tech

## **Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG)**

Die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) ist zentrale Ansprechpartnerin und Förderstelle für angewandte Forschung, Entwicklung und Innovation in Österreich. CCUS- und CDR-Projekte werden durch spezifische Programme wie Energieforschung, Basisprogramm, COMET-Kompetenzzentren und Bridge adressiert – mit Förderquoten von bis zu 85 % und einer Projektförderhöhe, die bei Leitprojekten in den zweistelligen Millionenbereich reichen kann. Die FFG betreut zudem internationale Forschungsk Kooperationen, Technologietransfer sowie die Einbindung in EU-Fördermechanismen

## **Förderinstrumente & Programme**

### **FTI-Initiative:**

Die FTI-Initiative zur Transformation der Industrie Österreichs verfügt bis 2027 über ein Budget von 320 Millionen Euro und richtet sich an Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Technologieanbieter der Produktion und Energiewirtschaft. Förderfähig sind Pilot- und Demonstrationsprojekte, die innovative Wege zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse erproben

### **Klima und Energiefonds (KLIEN)**

Der Klima- und Energiefonds ist ein staatlicher Fonds Österreichs (seit 2007) zur Förderung von Klimaschutz, Energiewende und Innovation.

Finanziert wird er durch Bundesmittel – 2025 hauptsächlich von BMWET, BMIMI und BMLUK

Programme werden thematisch gesteuert (z. B. Energieforschung) und über FFG (F&E/Demo) und KPC (Umweltprogramme) abgewickelt.

## **Clean Energy Transition Partnership (ECTP)**

Eine europäische Initiative unter Horizon Europe, die EU- und nationale Mittel bündelt. In Österreich fließen Gelder über den Klima- und Energiefonds, abgewickelt von der FFG.

Gefördert werden grenzüberschreitende F&E-Projekte zu Energiewende-Technologien, inkl. CCUS/CDR, als Ergänzung zu nationalen Programmen wie Energieforschung und FTI-Initiative.

### **Energieforschung:**

Das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) und der Klima- und Energiefonds stellen für die Energieforschung 2025 mindestens 17 Mio. Euro bereit – unter anderem mit Fokus auf Wasserstoff und CCUS (inkl. CCS-Hubs und -Cluster in Österreich, Schwerpunkt 2).

### **Austrian Climate Research Programme (ACRP)**

Ein Förderprogramm des Klima- und Energiefonds, abgewickelt durch die FFG. Fokus auf klimawissenschaftliche Forschung zu Klimawandel, Anpassung und Treibhausgasreduktion. Im Kontext von CCUS/CDR behandelt ACRP vor allem Systemanalysen, MRV-Methoden und Governance-Fragen, weniger technische Pilotierung.

### **Transformation der Industrie**

Das Programm ist Österreichs zentrales Förderprogramm zur Dekarbonisierung der energieintensiven Industrie bis 2040. Es bietet sowohl Investitionsförderung (bis zu 80% der Kosten, maximal 30 Millionen Euro) als auch den Transformationszuschuss für Betriebskosten (bis zu 10 Jahre, maximal 200 Mio. Euro) und wird durch die Kommunal Credit Public Consulting GmbH (KPC) abgewickelt

### **Umweltförderung im Inland (UFI):**

Die Umweltförderung im Inland (UFI) ist seit 1993 ein Instrument der österreichischen Umwelt- und Klimaschutzförderung. Das UFG wird ebenfalls durch die KPC abgewickelt und schafft den rechtlichen Rahmen für alle nationalen Umweltförderungen.

Die letztgenannten Programme ergänzen sich mit dem EU-Innovationsfonds (40 Milliarden Euro, 2020-2030), wobei die KPC seit 2023 ein Begleitprogramm für österreichische Antragsteller anbietet und Synergien zwischen nationalen und europäischen Förderungen schafft.

# 14 Fazit

## CCUS in Österreich im europäischen Vergleich

### Chancen

Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) ist entscheidend, um schwer vermeidbare Emissionen aus Sektoren wie Stahl, Zement und Chemie einzufangen und europäische sowie österreichische Klimaziele (EU 2050, Österreich 2040) zu erreichen. CCUS-Technologien ermöglichen zusätzlich Negative Emissionen, unerlässlich zur Erreichung von Netto-Null. Österreich kann aufgrund seiner Industriestruktur (Stahlproduktion, hoher Biomasseanteil) und Anbindung an EU-Infrastruktur-projekte (z.B. Northern Lights in Norwegen, Carbfix in Island) stark profitieren. CCUS fördert zudem industrielle Wertschöpfung und Innovation, eröffnet neue Märkte durch CO<sub>2</sub>-basierte Produkte und ermöglicht die langfristige Sicherung energieintensiver Industrien.

### Treiber

Die verbindlichen Klimaziele der EU und Österreichs sowie das steigende CO<sub>2</sub>-Preisniveau im EU-Emissionshandel treiben die Umsetzung von CCUS stark voran. Politische Instrumente wie der EU Net-Zero Industry Act und das CRCF-Zertifizierungssystem erhöhen Planungs-sicherheit und fördern Investitionen. Hinzu kommen technologische Fortschritte, Pilotprojekte und ein wachsendes Interesse aus der Industrie (v.a. Stahl, Zement, Öl- und Gassektor), die CCUS als strategisches Instrument für Wettbewerbsfähigkeit und Emissions-vermeidung betrachten.

### Hemmnisse

Die größten Herausforderungen liegen aktuell in hohen Kosten und der Unsicherheit wirtschaftlicher Modelle, insbesondere bei neuen Technologien wie DACCS. Fehlende CO<sub>2</sub>-Transport- und Speicherinfrastruktur erschwert die Umsetzung, vor allem in Binnenländern wie Österreich. Regulatorische Hürden (z.B. das CCS-Verbot in Österreich seit 2011) sowie unklare rechtliche Rahmen-bedingungen behindern Investitionen. Technische Herausforderungen bestehen weiterhin bezüglich Energieaufwand und Effizienz. Zudem herrscht teils erhebliche Skepsis in der Öffentlichkeit hinsichtlich

Sicherheitsrisiken und möglicher Verlängerung fossiler Abhängigkeiten, was die Akzeptanz erschwert.

## Handlungsempfehlungen

Regulatorische Klarheit schaffen: Österreich sollte das CCS-Verbot aufheben und eindeutige rechtliche Rahmenbedingungen für CO<sub>2</sub>-Transport und Speicherung schaffen. Umsetzung einheitlicher EU-Standards (CRCF-Verordnung) und verbindlicher Sicherheitsrichtlinien zur Qualitäts-sicherung und Vertrauens-erhöhung.

Marktanreize schaffen: Zusätzlich zur Angebotsförderung braucht es wirksame Nachfrageimpulse, um CO<sub>2</sub>-arme Produkte marktfähig zu machen. Analog zu Beimischungspflichten bei Bioethanol oder nachhaltigen Flugkraftstoffen (SAF) sollten Quotenregelungen für CO<sub>2</sub>-basierte Materialien in Industrieprozessen (z. B. Kunststoffe, Bindemittel) geprüft werden. Auch markt-basierte Instrumente wie Contracts for Difference (CfDs) können für CO<sub>2</sub>-Entfernungsleistungen (z. B. DACCS, BECCS) eingesetzt werden, um Preisstabilität und Investitionssicherheit zu schaffen. Darüber hinaus zeigen internationale Beispiele – etwa steuerliche Anreize zur CO<sub>2</sub>-Speicherung und -Nutzung in den USA (z. B. im Rahmen von 45Q) – wie gezielte Fördermechanismen zur Etablierung eines CCUS-Marktes beitragen können. Solche Instrumente fördern die Entwicklung eines verlässlichen Marktes für klimafreundliche CCUS-Produkte und stärken die Investitionsbereitschaft in emissionsintensiven Industriezweigen.

Infrastruktur gezielt aufbauen: Aufbau transnationaler CO<sub>2</sub>-Netze und Pipelines (z.B. Anschluss an Northern Lights), unterstützt durch bilaterale Abkommen mit Speicherländern (Norwegen, Island, auch Nachbarländer wie Italien).

Industrie einbinden und Risiken teilen: Staatliche Garantien, Versicherungslösungen und Verpflichtungen großer Industrieunternehmen zur CCUS-Nutzung erhöhen Investitionsbereitschaft.

Akzeptanz fördern: Transparente Kommunikation und frühzeitige Einbindung der Öffentlichkeit, Aufzeigen lokaler Mehrwerte und klare Positionierung von CCUS als zum Teil notwendige Ergänzung zu Emissionsvermeidung (nicht als Ersatz).

Internationale Kooperation fördern: Durch europäische und internationale Kooperation können Österreich und die EU die vorhandenen Chancen von CCUS nutzen, bestehende Hemmnisse überwinden und CCUS in die breite Umsetzung führen.

# 15 Referenzen & Weiterführende Literatur

## Förderung und Finanzierung

Martinez Castilla, G., Tumara, D., Mountraki, A., Letout, S., Jaxa-Rozen, M., Schmitz, A., Ince, E., & Georgakaki, A. (2024) *Clean Energy Technology Observatory: Carbon Capture, Utilisation and Storage in the European Union – 2024 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

CarbonGap (2025) Funding CDR research, development & innovation for a net zero competitive EU, <https://carbongap.org/eu-carbon-removal-funding/> (letzter Zugriff, 4.9.2025)

European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (2025), [https://cinea.ec.europa.eu/index\\_en](https://cinea.ec.europa.eu/index_en) (letzter Zugriff, 4.9.2025)

BMIMI (2025), Klima und Energiefonds, <https://www.bmimi.gv.at/en/topics/climate-environment/climate-protection/national/climate-energy-fund.html> (letzter Zugriff, 4.9.2025)

KPC (2025), Klima- und Umweltschutz-förderungen des Bundes, <https://www.umweltfoerderung.at/> (letzter Zugriff, 4.9.2025)

Vicky Duscha (2022), Regulatory framework for CCUS in the EU and its Member States, Regulatory framework for CCUS in the EU and its Member States. An analysis for the EU, six Member States and the UK.

Lockwood, T., & Bertels, T. (2022) *A European Strategy for Carbon Capture and Storage: Key policy recommendations for commercialisation of carbon capture and storage and carbon removal and storage technologies*. Clean Air Task Force.

BMIMI (2025), Leitfaden Energieforschung 2025

## Mineralisierung

Zajac, M., Skocek, J., Skibsted, J., & Ben Haha, M. (2021) CO<sub>2</sub> mineralization of demolished concrete wastes into a supplementary cementitious material – a new CCU approach for the cement industry. (Abbildung)

Zajac, M., Skocek, J., Ben Haha, M., & Deja, J. (2022) CO<sub>2</sub> mineralization methods in cement and concrete industry. *Energies*, 15(10), 3597.  
<https://doi.org/10.3390/en15103597>. (Technologie)

Carbon Cure, <https://www.carboncure.com/blog/concrete-corner/concrete-decarbonization-will-feature-carbon-mineralization/> (letzter Zugriff 31.07.2025)  
(Technologie)

J.G. Driver, E. Bernard, P. Patrizio, P.S. Fennell, K. Scrivener, & R.J. Myers. (2024) Global decarbonization potential of CO<sub>2</sub> mineralization in concrete materials, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 121 (29) e2313475121, <https://doi.org/10.1073/pnas.2313475121>  
(Technologie, Potenzial)

J. Monteiro, S. Roussanaly, CCUS scenarios for the cement industry: Is CO<sub>2</sub> utilization feasible? 2022. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 61, 102015,  
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102015>. (TRL)

Clean Air Task Force, <https://www.catf.us/resource/recasting-future-policy-approaches-drive-cement-decarbonization/> (letzter Zugriff 31.07.2025) (Regulatory, Technology)

Veseli, A., Böhm, H., Fazeni-Fraisl, K., Fleischhacker, J., Sachs, N., & Kapfer, M. 2025. CCUS in Österreich – Einordnung der rechtlichen Rahmenbedingungen und Perspektive der emissionsintensiven Industrie.

BMIMI (2025) Energieforschung Potenziale nutzen & Zukunft gestalten, Ausschreibung 2025

Klima und Energie Fonds (2025), Clean Energy Transition Partnership,  
<https://www.klimafonds.gv.at/foerderung/clean-energy-transition-partnership-2025/>  
(letzter Zugriff 31.07.2025)

Kommunal Kredit Public Consulting,

<https://www.umweltfoerderung.at/betriebe/transformation-der-industrie-juli-2025>

(letzter Zugriff, 31.07.2025)

Holcim (2024) KLIMANEUTRAL IM BINNENLAND MIT C2PAT+,

[https://www.holcim.at/sites/austria/files/docs/holcim\\_leaflet\\_c2patplus\\_mannersdorf\\_de\\_20241212.pdf](https://www.holcim.at/sites/austria/files/docs/holcim_leaflet_c2patplus_mannersdorf_de_20241212.pdf) (letzter Zugriff, 31.07.2025)

Heidelberg Materials, <https://www.anthemis-ccs.com/en> (letzter Zugriff, 31.07.2025)

RHI Magnesita, <https://www.rhimagnesita.com/de/ccupscale-project-rhim-and-mci-carbon/> (letzter Zugriff, 31.07.2025)

Holcim, <https://carbon2business.de/projekt-laegerdorf/zahlen-und-fakten-zum-projekt> (letzter Zugriff, 31.07.2025)

## **Carbon Capture & Utilization (CCU) - Kohlenwasserstoffe**

Marques, L., Vieira, M., Condeço, J., Sousa, H., Henriques, C., & Mateus, M. (2024). Review of Power-to-Liquid (PtL) Technology for Renewable Methanol (e-MeOH): Recent Developments, Emerging Trends and Prospects for the Cement Plant Industry.

CO<sub>2</sub>value, [https://CO<sub>2</sub>value.eu/dedicated-policy-instruments-and-incentives-are-needed-for-ccu-to-reduce-europes-industrial-emissions-by-20-in-2050/](https://CO2value.eu/dedicated-policy-instruments-and-incentives-are-needed-for-ccu-to-reduce-europes-industrial-emissions-by-20-in-2050/), (letzter Zugriff 31.07.2025)

Mebrahtu, C., Krebs, F., Abate, S., Perathoner, S., Centi, G., & Palkovits, R. 2019. CO<sub>2</sub> methanation: Principles and challenges. In S. Albonetti, S. Perathoner & E. A. Quadrelli (Eds.), *Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol. 178, pp. 85–103. Elsevier.

P2X solutions, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64127-4.00005-7https://p2x.fi/en/project/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

HY2GEN, <https://www.hy2gen.com/de/plants-atlantis> (letzter Zugriff 31.07.2025)

H2News (2025) Erster deutscher Produzent erhält RFNBO-Zertifikat für E-Methan, <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/erster-deutscher-produzent-erhaelt-rfnbo-zertifikat-fuer-e-methan-aus-gruenem-h2/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Nieß, S.; Dietrich, S.; Klemm, M.; Etzold, H.; Oehmichen, K. (2023). Methanisierung: Bereitstellung von erneuerbarem Methan aus Biogas und Wasserstoff. Fokusheft im Projekt Pilot-SBG. Leipzig: DBFZ. 41 S. ISBN: 978-3-946629-99-3. DOI: 10.48480/rm3g-ej31

Institute of Energy Economics at the University of Cologne, <https://www.ewi.uni-koeln.de/en/news/h2-reality-check-eu-targets-for-2030-probably-not-achievable/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

[European Biogas Association \(2024\), Mapping e-methane plants and technologies \(Technologie, Best-Practice\)](#)

Euronews (2025) Warum kann Europa seine Kapazitäten im Bereich der erneuerbaren Energien nicht ausschöpfen?, <https://de.euronews.com/business/2025/02/10/warum-kann-europa-seine-kapazitaeten-im-bereich-der-erneuerbaren-energien-nicht-ausschopfen> (letzter Zugriff 31.07.2025)

STORE&GO EU-Projekt <https://www.storeandgo.info/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

European Commission, ReFuelEU Aviation – Key Facts: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation\\_en?](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en?) (letzter Zugriff 31.07.2025)

EASA, Fit for 55 and ReFuelEU Aviation, <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/fit-55-and-refueleu-aviation> (letzter Zugriff 31.07.2025)

European Commission, What is the innovation Fund? [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en) (letzter Zugriff 31.07.2025)

European Commission, Renewable Energy Directive Key-Facts, [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en) (letzter Zugriff 31.07.2025)

SkyNRG, <https://skynrg.com/refueeu-how-it-will-shape-the-saf-market> (letzter Zugriff 31.07.2025)

## Pyrolyse (Biochar)

Zulfiqar, F., Moosa, A., Nazir, M. M., Ferrante, A., Ashraf, M., Nafees, M., Chen, J., Darras, A., & Siddique, K. H. M. 2022. Biochar: An emerging recipe for designing sustainable horticulture under climate change scenarios.

Soja, G., Baumgarten, A., Tintner-Olifiers, J., Hofmann, A., Wopienka, E., Pfeifer, C., Prohaska, T., Obenaus-Emler, R., Puschenreiter, M., Pfundtner, E., Spiegel, H., Götzinger, S., Bohner, A., Dunst, G., Bruckman, V. J., Huber, M., Kössler, W., Jost, E., Schmid, E., Zehetner, F., Keiblinger, K., Kitzler, B., Sigmund, G., Hölzl, F. *Biokohle – Potential und Grenzen der Anwendung in der Land- und Forstwirtschaft*. BMLRT, Wien

ICF (2024) Support to the development of methodologies for the certification of industrial carbon removals with permanent storage

Smith, S. M., Geden, O., Gidden, M. J., Lamb, W. F., Nemet, G. F., Minx, J. C., Buck, H., Burke, J., Cox, E., Edwards, M. R., Fuss, S., Johnstone, I., Müller-Hansen, F., Pongratz, J., Probst, B. S., Roe, S., Schenuit, F., Schulte, I., Vaughan, N. E. (eds.) *The State of Carbon Dioxide Removal 2024 - 2nd Edition*. DOI 10.17605/OSF.IO/F85QJ (2024)

Delegierte Verordnung (EU) 2021/2088 der Kommission vom 7. Juli 2021, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32021R2088> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Carbon Gap. Funding CDR research, development & innovation for a net zero competitive EU, <https://carbongap.org/eu-carbon-removal-funding/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

European Bioenergy Day (2024) <https://europeanbioenergyday.eu/transitioning-from-black-to-green-ireland-unveils-one-of-europes-largest-biochar-plants/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Exomad Green (2025) <https://www.exomadgreen.com/post/exomad-green-breaks-ground-on-the-world-s-largest-biochar-facility-in-bolivia-s-guarayos-region> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Biocha Zero, <https://biochar-zero.com/de/unternehmen/energiwerk-ilg-gmbh/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Regulation (EU) 2024/3012 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 establishing a Union certification framework for permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products

Luka Štrubelj, (2022) Waste, Fertilising Product, or Something Else? EU Regulation of Biochar, *Journal of Environmental Law*, Volume 34, Issue 3, Pages 529–540, <https://doi.org/10.1093/jel/eqac013>

EBC (2012) 'European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.' European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. (<http://european-biochar.org>). Version 9.5E of 1st August 2021 (Bewertung)

BIOCHARm - Assessing the Potential of Biochar in Construction as a Contribution to Climate Neutrality, <https://tugraz.elsevierpure.com/en/projects/biocharm-potential-analysis-of-the-use-of-biochar-in-the-construc> (letzter Zugriff 31.07.2025) BIOCHARm - Assessing the Potential of Biochar in Construction as a Contribution to Climate Neutrality, <https://klimanetralestadt.at/en/projects/tiks/biocharm-assessing-the-potential-of-biochar-in-construction.php> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Günther, P., Garske, B., Heyl, K. *et al.* (2024) Carbon farming, overestimated negative emissions and the limits to emissions trading in land-use governance: the EU carbon removal certification proposal. *Environ Sci Eur* **36**, 72. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00892-y>

## **Carbon Capture & Storage (CCS)**

Global CCS Institute, 2023. The Global Status of CCS: 2023. Australia

Ott H (2023) Carbon Capture and Storage (CCS) - CCCA Fact Sheet #43, [https://ccca.ac.at/fileadmin/00\\_DokumenteHauptmenue/02\\_Klimawissen/FactSheets/43\\_carbon\\_capture\\_storage\\_202304.pdf](https://ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/FactSheets/43_carbon_capture_storage_202304.pdf) (letzter Zugriff 30.9.2025)

Simader G (2024) Carbon Capture in Austria: Zukünftige F & E Schwerpunkte angesichts europäischer und weltweiter Trends. BMK

Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., Heidel, K. A Process for Capturing CO<sub>2</sub> from the Atmosphere. *Joule*, 2(8), 1573–1594. DOI: 10.1016/j.joule.2018.05.006 (2018)

Zhang, X., Singh, B., He, X., Gundersen, T., Deng, L., Zhang, S. Post-combustion carbon capture technologies: Energetic analysis and life cycle assessment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27, 289–298. DOI: 10.1016/j.ijggc.2014.06.016 (2014).

BAFU (2023) Carbon Capture & Storage (CCS) Kostenschätzung für ein CCS-System für die Schweiz bis 2050

Clean Air Task Force (2022) A European Strategy for Carbon Capture and Storage

## DACCS

Beuttler, C., Charles, L., & Wurzbacher, J. (2019) The role of direct air capture in mitigation of anthropogenic greenhouse gas emissions.

Zetterberg, L., 2025, An EU Removals Target and Trading System (RTTS) for CarbonDioxide – Concept paper for discussion, IVL Swedisch Environmental Research Institute

Trompoukis, C. et al., 2025, The role of Direct Air Capture technologies in the EU's decarbonisation effort, Publication for the Committee on Industry, Research and Energy, Policy Department for Transformation, Innovation and Health, European Parliament, Luxembourg.

Wolf-Zoellner, P., Böhm, H., Veseli, A. et al. CaCTUS – Carbon Capture & Transformation, Utilization and Storage. *Berg Huettenmaenn Monatsh* 170, 230–237 (2025).

<https://doi.org/10.1007/s00501-025-01571-y>

Smith, S. M., Geden, O., Gidden, M. J., Lamb, W. F., Nemet, G. F., Minx, J. C., Buck, H., Burke, J., Cox, E., Edwards, M. R., Fuss, S., Johnstone, I., Müller-Hansen, F., Pongratz, J., Probst, B. S., Roe, S., Schenuit, F., Schulte, I., Vaughan, N. E. (eds.) (2024) *The State of Carbon Dioxide Removal 2024 - 2nd Edition*. DOI 10.17605/OSF.IO/F85QJ

IEA (2025) direct air capture <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Climeworks, <https://climeworks.com/direct-air-capture> (letzter Zugriff 31.07.2025)

EAGHG, Global Assessment of Direct Air Capture Costs, 2021-05, December 2021.

Regulation (EU) 2024/3012 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 establishing a Union certification framework for permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products

Williams, C., Leishman, R., Jenevzian, A., Zenon, S., Meek, D., Stevenson, R. (2023) *Negative Emissions Technologies (NETs): Feasibility Study*. Scottish Government

EU Funding & Tenders Portal, DACCS and BECCS for CO<sub>2</sub> removal/negative emissions (letzter Zugriff 23.7.2025)

Lux, B., Schneck, N., Pfluger, B., Männer, W., & Sensfuß, F. (2023) Potentials of direct air capture and storage in a greenhouse gas-neutral European energy system.

Sebastian Manhart (Blog) <https://www.sebastianmanhart.com/post/15m-eu-daccs-and-beccs-funding-opportunity> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Carbon Credits (2023) <https://carboncredits.com/heirloom-leilac-partner-to-advance-direct-air-capture-solution/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Ramboll (Climeworks), <https://www.ramboll.com/lets-close-the-gap/world-s-largest-direct-air-capture-project> ((letzter Zugriff 31.07.2025)

Climeworks <https://climeworks.com/plant-orca> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Lux, B., Schneck, N., Pfluger, B., Männer, W., Sensfuß, F. (2023) Potentials of direct air capture and storage in a greenhouse gas-neutral European energy system. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101012. DOI: 10.1016/j.esr.2022.101012

## **BECCS**

Tatarewicz, I., Lewarski, M., Skwierz, S., Krupin, V., Jeszke, R., Pyrka, M., Szczepański, K., & Sekuła, M. (2021). The Role of BECCS in Achieving Climate Neutrality in the European Union. *Energies*, 14(23), 7842. <https://doi.org/10.3390/en14237842> (Grafik)

IEA (2025) Bioenergy with Carbon Capture and Storage <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage#tracking> (letzter Zugriff 31.07.2025)

EU Funding & Tenders Portal (HORIZON-CL5-2024-D3-02-12) <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/horizon-cl5-2024-d3-02-12> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Project CaCTUS (Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz), <https://project-cactus.at/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

BECCS Stockholm, <https://beccs.se/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Österreichischer Biomasse-Verband (2024) <https://www.biomasseverband.at/beccs-schluesselechnologie-fuer-den-klimaschutz/> (letzter Zugriff 31.07.2025)

Österreichischer Biomasse-Verband, BECCS – eine Option für Österreich?, [https://eventmaker.at/oesterreichischer\\_biomasse-verband/beccs\\_eine\\_option\\_fur\\_oesterreich/nachbericht.html](https://eventmaker.at/oesterreichischer_biomasse-verband/beccs_eine_option_fur_oesterreich/nachbericht.html) (letzter Zugriff 31.07.2025)

Carbon Market Watch (2025), Overview of the Carbon Removals and Carbon Farming Certification process

Parlament Österreich, Geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid: Verbot könnte 2025 aufgehoben werden, Parlamentskorrespondenz Nr. 870 vom 13.08.2024, [https://www.parlament.gv.at/aktuelles/pk/jahr\\_2024/pk0870](https://www.parlament.gv.at/aktuelles/pk/jahr_2024/pk0870) (letzter Zugriff 31.07.2025)

Weyerstraß, K., Getzner, M., Gugele, B., Laa, E., Müller, H. L., Niedertscheider, M., Plank, K., Plank, L., Schieder, W., Schindler, I., Schmidtner, D., Zenz, H. (2024)

Gesamtwirtschaftlicher Investitionsbedarf in Österreich zur Erreichung der Klimaziele. Institut für Höhere Studien (IHS), Wien

Smith, S. M., Geden, O., Gidden, M. J., Lamb, W. F., Nemet, G. F., Minx, J. C., Buck, H., Burke, J., Cox, E., Edwards, M. R., Fuss, S., Johnstone, I., Müller-Hansen, F., Pongratz, J.,

Probst, B. S., Roe, S., Schenuit, F., Schulte, I., Vaughan, N. E. (eds.) *The State of Carbon Dioxide Removal 2024 - 2nd Edition*. DOI 10.17605/OSF.IO/F85QJ (2024)

# Anhang A – aktuelle CCUS-Projekte in Österreich

Projektname	Beteiligte Unternehmen	Standort	Projekttatus	Technologieart	Zeitraumen	Finanzierung	Beschreibung
<b>C2PAT+</b>	OMV, Borealis, Verbund, Holcim	Mannersdorf (NÖ)	laufend	Nutzung	2020–2030	Industrie-Konsortium EU (Horizon 2020/Europae)	CO <sub>2</sub> aus Zementwerk wird mit Wasserstoff über ein chemisches Verfahren in Chemikalien, synthetische Kraftstoffe umgewandelt.
<b>CO<sub>2</sub> - Valorisierung</b>	GIG Karasek, JKU	Linz (OÖ)	abgeschlossen	Nutzung	2021–2024	FFG (Bridge)	CO <sub>2</sub> aus industriellen Abgasen wird mit elektrischer Energie über ein elektrochemisches Verfahren in Chemikalien, synthetische Kraftstoffe (Ethanol, Methanol) umgewandelt.
<b>CO<sub>2</sub>Valuere</b>	GIG Karasek	Linz / Gloggnitz (OÖ/NÖ)	laufend	Nutzung	2024 – 2027	FFG-Förderung (IWI, Frontrunner)	CO <sub>2</sub> aus Abgasquelle wird mit elektrischer Energie über ein elektrochemisches Verfahren in Chemikalien, synthetische Kraftstoffe (Ethanol, Methanol, Ameisensäure) umgewandelt.

<b>Humus+</b>	Öko-region Kaindorf	Kaindorf (Stmk)	laufend	Speicherung	seit 2007 (laufend)	Klima- und Energiefonds (KEM)	CO <sub>2</sub> wird durch Humusaufbau landwirtschaftlich im Boden gespeichert.
<b>Renewable Gas field</b>	Energie Steiermark, MUL, HyCentA Research, Energieinstitut JKU, WIVA P&G	Gabersdorf (Stmk)	abgeschlossen	Speicherung	bis 2023	Klima- & Energiefonds	Power-to-Gas Ansatz, bei dem aus erneuerbarem Strom durch Elektrolyse grüner Wasserstoff erzeugt wird
<b>CCUpScale</b>	RHI Magnesia, MCI-Carbon	Hochfilzen (T)	laufend	Nutzung	laufend (Pilot)	Klima- & Energiefonds (KPC, FFG)	CO <sub>2</sub> aus industriellen Abgasen wird mineralisiert und in Baustoffe gebunden. (Karbonatisierung)
<b>Underground sun conversion</b>	RAG, MUL, IFA Tulln, ACIB, Energieinstitut JKU, Axiom	Pilsbach (OÖ)	abgeschlossen	Speicherung	2017–2021	Klima- und Energiefonds (Leuchtturmpjekt)	CO <sub>2</sub> wird abgeschieden und geologisch bzw. in Produkten dauerhaft gespeichert (in-situ Methanisierung in Erdgaslagertätte).
<b>EcoFuel</b>	AVL List, Oxford University, TU Berlin, BME Budapest, Fraunhofer IGB, Axiom, Siemens Energy u.a.	Graz (Stmk)	abgeschlossen	Nutzung	2021–2023	EU Horizon 2020	CO <sub>2</sub> aus Umgebungsluft wird mit erneuerbarem Strom (Direktluftabscheidung + elektrokatalytische Konversion) zu synthetischen Kraftstoffen (Olefine, Benzin) umgewandelt

<b>ZEUS (Zero Emissions Through Sectorcoupling)</b>	K1-MET, GIG Karasek, JKU Linz, TU Wien, Verbund, MUL, TU Wien, WIVA P&G voestalpine Stahl, Rohrdorfer u.a.	Linz & Gmunden (OÖ)	laufend	CCUS	2023–2027	Klima- und Energiefonds (Energieforschung, FFG)	Sektorübergreifendes CCUS-Demoprojekt in Stahl- und Zementindustrie (grüner Wasserstoff, CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Nutzung zur Herstellung chemischer Grundstoffe)
<b>Waste CCUS</b>	BEST, BOKU Wien	Wien	abgeschlossen	Quelle - Abscheidung	2024 - 2025	Klima- und Energiefonds (Energieforschung, FFG)	CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus Abgas der Müllverbrennung; Untersuchung der Weiterverwendung (z.B. in Treibstoffen oder Baustoffen).
<b>CaCTUS</b>	Energieinstitut JKU MUL, denkstatt CCCA	Linz (OÖ)	abgeschlossen	Policy/Strategie	2022 – 2025	Klima- und Energiefonds (ACRP, FFG)	Strategische Untersuchung von CO <sub>2</sub> -Abscheide-, Transport-, Speicher- und Nutzungsoptionen in Österreich.
<b>C-Ced</b>	ACIB GmbH, Axiom, Energie Steiermark	Graz (Stmk)	Abgeschlossen	Nutzung	2021-2025	Klima- und Energiefonds (Vorzeigeregion Energie, FFG)	CO <sub>2</sub> aus Biogas wird mit biologisch-chemischen Verfahren (Mikroben + Wasserstoff) zu Methan umgewandelt (Bio-CCUS).
<b>SB2DAC</b>	TU Wien	Wien (TU Wien Labor)	laufend	DAC	2024 – 2025	Klima- und Energiefonds (Energieforschung)	Direktabscheidung von CO <sub>2</sub> aus der Luft (Direct Air Capture) mittels neuer sorbierender Materialien (Entwicklung von

							„Superbase“ - Adsorbentien).
<b>dmCO2 (deCO2_P roto)</b>	TU Wien, Kleinkraft OG	Wien	abgeschl ossen	Nutzung	2024 – 2025	FFG (IWI, Basisprogra mm)	CO <sub>2</sub> -Nutzung für chemische Synthese: Entwicklung eines Prototyps zur Umwandlung von CO <sub>2</sub> (z.B. aus Methanol) in Dimethylcar bonat (DMC) mittels chemischer Verfahren.
<b>CERI</b>	Andritz AG	Graz (Stmk)	Abgeschl ossen	Abscheidu ng	2023 – 2024	FFG (IWI, Basisprogra mm)	CO <sub>2</sub> - Abscheidung mittels chemischer Wäscher (Aminwäsch e) bei industriellen Abgasen (Pilotanlage).
<b>BioResCC S</b>	TU Wien, Agro Innovatio n Lab, AIT u.a.	Wien	laufend	Speicheru ng (BECCS)	2024 - 2027	Klima- und Energiefons (e!MISSION )	Bioenergy with CCS: Abscheidung von CO <sub>2</sub> aus Biomasse- Verbrennung prozessen und geologische Speicherung (Labor- und Pilotversuch e, Chemical Looping Combustion) .

<b>IEA IETS Task 21</b>	Energieinstitut JKU Linz	International (Netzwerk)	laufend	Policy/Strategie	laufend	IEA-Kooperation	Internationale Arbeitsgruppe (IEA IETS) zu CCUS-Strategien in energieintensiven Industriesektoren (Wissensaustausch, Best Practices).
<b>aDvAnCe</b>	TU Wien, DACwork engineering, JOANNEUM RESEARCH	Wien	laufend	DAC	2025 – 2027	Klima- und Energiefonds (e!MISSION)	Validierung eines neuartigen Direct-Air-Capture-Verfahrens im Pilotmaßstab mit effizienter Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme (getrennte Adsorptions- und Regenerationszonen).
<b>Scale-Cat</b>	MUL, RHP Technology, Kompetenzzentrum Holz	Leoben (Stmk)	laufend	Nutzung	2025 - 2028	FFG	Katalytische CO <sub>2</sub> -Nutzung: Entwicklung eines chemischen Prozesses (RWGS – Reverse Water Gas Shift) zur Produktion von Methanol aus CO <sub>2</sub> und grünem Wasserstoff (Labormaßstab).

<b>BioMeFilm</b>	TU Wien, CHASE	Wien	laufend	Nutzung	2023	Klima- und Energiefonds (e!MISSION)	CO <sub>2</sub> -Bio-Nutzung: Biotechnologische und chemische Umwandlung von CO <sub>2</sub> (z.B. mittels Mikroorganismen und Katalysatoren) zu Methan
<b>CryoCEM</b>	Rohrdorfer Zement	Gmunden (OÖ)	abgebrochen	Nutzung	abgebrochen (2023)	Klima- und Energiefonds (Transformation der Industrie, KPC)	CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus Zementwerk-Abgas mittels kryogenem Verfahren und Nutzung des gereinigten CO <sub>2</sub> zur Herstellung chemischer Produkte; Projekt wurde nach Pilotphase abgebrochen.
<b>directCCE</b>	TU Wien, GIG Karasek, UIB, Wien Energie, MUL, Scheuch, ENRAG, NOVAPEC C	Wien	laufend	CCUS	2023–2026	Klima- und Energiefonds (e!MISSION, NEFI)	CO <sub>2</sub> -Abscheidung direkt aus Zement-Rauchgas mit anschließender elektrochemischer Umwandlung zu Kohlenwasserstoffen (Pilotanlage ~1 Tonne CO <sub>2</sub> /Tag, kombiniert Absorption + Elektrolyse).

<b>ViennaGreenCO<sub>2</sub></b>	TU Wien, BOKU, Shell, LGV, Wien Energie	Wien	abgeschlossen	Direkte Nutzung	2015–2020	Klima- und Energiefonds (Leitprojekt)	Pilotanlage zur Abscheidung von CO <sub>2</sub> aus dem Rauchgas eines Biomasse-Kraftwerks (Wien-Simmering) mittels Feststoffsorbent (Nutzung des CO <sub>2</sub> u.a. in Gewächshäusern)
<b>Sulzer - Messer - Donauchemie (Landeck)</b>	Sulzer, Messer, Donauchemie	Landeck (T)	In Betrieb (?)	Abscheidung	Ab 2022 (?)	Industrie (Unternehmen)	Aufbau einer großtechnischen CO <sub>2</sub> -Abscheidungsanlage (BASF OASE® blue) beim Calciumcarbid-Werk Landeck: ~50.000 t CO <sub>2</sub> /Jahr werden erfasst und für Lebensmittel- und Industriezwecke aufbereitet (CCU).
<b>HydroMetha</b>	AVL List, MUL, Energieinstitut JKU Linz	Leoben (Stmk)	abgeschlossen	Nutzung	2018 - 2023	Klima- und Energiefonds (Energieforschung, FFG)	Demonstrationsanlage zur biologischen Methanisierung: Im Biogasfermenter wird zugeführter Wasserstoff mit dem CO <sub>2</sub> aus dem Biogas zu Methan (synthetisches Erdgas) umgewandelt (Power-to-Gas).

<b>CarboRat e</b>	Vereinigung der Zementindustrie (VÖZ), smart minerals	Wien	Abgeschlossen	Policy/Strategie	2023 – 2023	FFG (IWI, Basisprogramm)	Studie zur CO <sub>2</sub> -Bindung in Recycling-Beton mittels mineralischer Karbonatisierung
<b>BIOCHAR m</b>	TU Graz, BEST, CR-Systems, RENOWAVE.AT, einzueinsarchitektur, natürlich bauen LM Holzcluster Stmk	Graz (Stmk)	laufend	Speicherung		2025 -2028	BECCS Konzept durch Pflanzenkohle in Bauprodukten
<b>H2toPipe</b>	MUL, Pipelife AT, ÖVGW, Borealis, DBI, PCCL, Agru	Leoben (Stmk)	laufend	Infrastruktur	laufend	Klima- und Energiefonds (e!Mission)	Entwicklung und Test von Kunststoff-Pipelines und Materiallösungen für den Transport von Wasserstoff (Erhöhung der H <sub>2</sub> -Tauglichkeit des Erdgasnetzes, Demonstrationsprojekte)
<b>CO<sub>2</sub> Verflüssigung</b>	Bright Renewables, Energiewerk Ilg	Dornbirn (Vbg)	laufend	Abscheidung (Nutzung geplant)	in Betrieb seit 2023	Klima- und Energiefonds (Transformation der Wirtschaft)	Errichtung einer CO <sub>2</sub> -Rückgewinnungs- und Verflüssigungsanlage bei einer Biogasanlage in Dornbirn: Abscheidung von CO <sub>2</sub> aus Biogas und Verflüssigung zur regionalen Nutzung

							(z.B. in Getränken, Gewächshäusern).
<b>Carbon4Value</b>	BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies	Graz (Stmk)	Laufend		2025 – 2027	FFG (FORPA, Industrienahe Dissertation)	Nutzung von CO <sub>2</sub> in der Fischer-Tropsch- und Mixed-Alcohol-Synthese zur Herstellung von Sustainable Aviation Fuel (SAF).
<b>BEES-4-CO2RR</b>	AIT, Profactor, Luxinergy	Wien/Werks (W/OÖ)	laufend	Nutzung	2025 – 2028	FFG (DST)	Elektrochemische CO <sub>2</sub> -Umwandlung: Entwicklung eines CO <sub>2</sub> -zu-Kraftstoff-Prozesses (CO2RR – CO <sub>2</sub> -Reduktion zu z.B. Methan oder Methanol) im Labormaßstab; Fokus auf neuartige Elektrodenmaterialien
<b>CO2inLOOP</b>	4ward Energy Research, Reiterer & Scherling, Prozess Optimal CAP	Graz (Stmk)	laufend	direkte Nutzung	2022 - 2026	Klima- und Energiefonds (Energie der Zukunft)	Direkte Nutzung von CO <sub>2</sub> als Arbeitsmedium: Entwicklung eines Kreislaufsystems zur Nutzung von flüssigem CO <sub>2</sub> als Kältemittel für Wärme-/Kälteanwendungen

<b>AeroFibC AP</b>	V-TRION GmbH, Grabher Group	Lustenau (Vbg)	laufend	Abscheidung	2025 – 2027	FFG (DST), Chinese Academy of Science	Erforschung eines neuartigen CO <sub>2</sub> -Absorbers auf Faserbasis: Entwicklung einer Aerogel-Faserstruktur zur effizienten Abscheidung von CO <sub>2</sub> aus Abgas oder Umgebungsluft (Laborentwicklung).
<b>CCS on Ships</b>	LEC (Large Engines Competence Center)	Graz (Stmk)	Abgeschlossen	CCUS	2022 – 2024	FFG (IWI, Basisprogramm)	Konzeptentwicklung für CO <sub>2</sub> -Abscheidung auf Schiffen: Untersuchung, wie Schiffs-Abgase an Bord durch CCS-Technologien gereinigt und das CO <sub>2</sub> an Land entsorgt oder weiterverwendet werden kann.
<b>BC4I</b>	BIOS Bioenergiesysteme, Catator AB, MUL, Polytechnik Luft- und Feuerungstechnik	Graz (Stmk)	abgeschlossen	Speicherung	2021– 2024	Klima- und Energiefonds (e!MISSION)	BECCS-Pilotprojekt: CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus Biomasse-Kraftwerken mittels Chemical-Looping-Combustion (CLC) und Umwandlung in Biokohle (Biochar) zur langfristigen Kohlenstoffspeicherung (TRL 5–6 erreicht).

<b>DAC- Impact</b>	TU-Wien, DACworx, DACLab	Wien	Laufend	DAC	2021 - offen	<b>Dharma Karma Foundation</b>	Entwicklung einer DAC Technologie, die einen geringeren Energieverbr auch als vergleichbar e, momentan verfügbare Technologie n aufweist.
------------------------	--------------------------------	------	---------	-----	-----------------	--	---

# Anhang B – CCUS- Start-Ups in Österreich

Name	Website (bzw. Pressemeldung) und Beschreibung	Kategorie	Technologie
Everest Carbon	<p>Everest Carbon ist ein Carbon-Removal-Technologieunternehmen, das Hardware und Software entwickelt, um die CO<sub>2</sub>-Entfernung durch Enhanced Rock Weathering (beschleunigte Verwitterung von Gestein) zu messen. Ein spezieller Ionenaustauscher-Sensor erfasst Veränderungen der Bodenalkalität und ermöglicht eine Echtzeit-Überwachung der gebundenen CO<sub>2</sub>-Mengen. Durch diese automatisierte, um über 90 % günstigere MRV-Methode soll Enhanced Rock Weathering als skalierbare CDR-Lösung vorangetrieben werden.</p> <p><a href="https://www.everestcarbon.com/">https://www.everestcarbon.com/</a></p>	CDR	enhanced rock weathering (Sensoren, Messung)
Carbony	<p>Carbony ist ein Startup aus Steyr (Österreich), das mittels Enhanced Rock Weathering (Aufbringung von Basaltgesteinsmehl auf Böden) atmosphärisches CO<sub>2</sub> langfristig im Boden speichern will. Das fein gemahlene Basaltmehl fördert eine natürliche biogeochemische Reaktion, bei der CO<sub>2</sub> im Boden als Carbonat gebunden wird. Für dieses Verfahren erhielt Carbony eine FFG-Förderung; das Ziel ist eine skalierbare CO<sub>2</sub>-Entnahme mit Zusatznutzen für Böden und Biodiversität.</p> <p><a href="https://brutkasten.com/artikel/carbony-ffg-foerderung?ref=articletext">https://brutkasten.com/artikel/carbony-ffg-foerderung?ref=articletext</a></p>	CDR	enhanced rock weathering
sisyphus	<p>sisyphus (eine Ausgründung der Montanuniversität Leoben) fokussiert sich auf die Revolutionierung des Reverse Water-Gas Shift-(RWGS)-Prozesses, um CO<sub>2</sub> zusammen mit grünem Wasserstoff effizient in Synthesegas (CO/H<sub>2</sub>) umzuwandeln. Durch eine neuartige Katalysator-Technologie gelingt die RWGS-Reaktion bereits bei etwa halb so hohen Temperaturen wie herkömmlich (~450–600 °C statt ~900 °C) – dies spart erhebliche Energie ein. Mit diesem skalierbaren Verfahren will sisyphus kostengünstiges, nachhaltiges Synthesegas bereitstellen und so klimaneutrale Kraftstoffe und Chemikalien ermöglichen</p> <p><a href="https://sisyphus.energy/">https://sisyphus.energy/</a></p>	CCU	RWGS
DACworx	<p>DACworx ist ein österreichisches Startup (TU Wien-Spin-off), das eine neuartige Direct-Air-Capture-Technologie entwickelt. Das Team hat in Wien bereits eine Pilotanlage in Betrieb, die 50 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr aus der Umgebungsluft abscheiden kann – und plant, diese Kapazität bald auf 1000 t/Jahr zu steigern. DACworx setzt auf technologische Durchbrüche, um</p>	DAC	Abscheidung (Energieeffizienz Steigerung DAC, TSA)

	<p>CO<sub>2</sub> effizient direkt aus der Luft zu filtern und damit einen Beitrag zur großskaligen Kohlendioxid-Entnahme (DACCS) zu leisten.</p> <p><a href="https://dacworx.eu/">https://dacworx.eu/</a></p>		
Sequestra	<p>Sequestra ist ein Wiener Climate-Tech-Startup, das sich auf die dauerhafte CO<sub>2</sub>-Nutzung in der Schwerindustrie spezialisiert hat. Die firmeneigene Technologieplattform ermöglicht es, CO<sub>2</sub> permanent in industriellen Rückständen wie Stahlwerk-Schlacke, Verbrennungsrückständen oder Bauschutt zu binden, indem diese zu karbonatisierten Baustoffen verarbeitet werden. So wird Industrieabfall in Produkte (z.B. Zuschlagstoffe) umgewandelt und CO<sub>2</sub> dauerhaft als Mineral im Material eingeschlossen.</p> <p><a href="https://www.sequestra.tech/">https://www.sequestra.tech/</a></p>	CCUS	Karbonisierung (Baustoffe, Industrieschlacken)
CO <sub>2</sub> -ol Catalyst (cool catalyst)	<p>CO<sub>2</sub>OL Catalyst (CO<sub>2</sub>ol) ist ein österreichisches Startup, das einen neuartigen Katalysator zur CO<sub>2</sub>-Verwertung entwickelt hat. Der schwefelresistente MoS<sub>2</sub>-Katalysator ermöglicht die direkte Umwandlung von CO<sub>2</sub> (selbst aus unreinen Abgasströmen mit Schwefel) in Methanol, ohne aufwändige Gasreinigung. Industrielle CO<sub>2</sub>-Emissionen werden zu Methanol verarbeitet – eine CCU-Lösung, die einen sehr wichtigen technologischen Aspekt behandelt</p> <p><a href="https://co2ol-catalyst.com/">https://co2ol-catalyst.com/</a></p>	CCU	CO <sub>2</sub> - CH <sub>3</sub> OH (Katalysatoren)
Arkeon	<p>Arkeon Biotechnologies ist ein Wiener Biotech-Startup, das mittels Gasfermentation aus CO<sub>2</sub> und grünem Wasserstoff Lebensmittelzutaten herstellt. Spezielle Archaeen-Mikroorganismen wandeln die Gase in alle 20 proteinogenen Aminosäuren um, welche als Grundbausteine für klimafreundliche Proteinprodukte dienen. So nutzt Arkeon das Treibhausgas CO<sub>2</sub> als Rohstoff für klimaneutrale „Air Protein“ und bietet eine Lösung, um Ernährung unabhängig von landwirtschaftlichen Flächen und Emissionen zu gestalten.</p> <p><a href="https://arkeon.bio/products/">https://arkeon.bio/products/</a></p>	CCU	microbial CO <sub>2</sub> to AS
Terraformer	<p>Terraformer ist ein österreichisches Startup, das landwirtschaftliche Abfälle in Bioenergie und permanente CO<sub>2</sub>-Speicherung umwandelt. Konkret wird Biogas aus Agrarreststoffen gewonnen und das dabei freigesetzte biogene CO<sub>2</sub> anschließend in ausgeförderten Erdöl-Lagerstätten unterirdisch verpresst. Dieses BECCS-Konzept entzieht der Atmosphäre CO<sub>2</sub>, liefert zugleich erneuerbare Energie und ermöglicht Unternehmen, unvermeidbare Emissionen durch zertifizierte Negativemissionen auszugleichen.</p> <p><a href="https://www.linkedin.com/in/harald-bartsch/">https://www.linkedin.com/in/harald-bartsch/</a></p>	BECCS	agricultural residue (CCS from biogas CO <sub>2</sub> )
Econutri	<p>Econutri ist ein Grazer Biotech-Startup, das mittels Gasfermentation aus Kohlendioxid nachhaltige Proteine produziert. Spezielle Mikroorganismen verwerten CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle und erzeugen eine eiweißreiche Single-Cell-Protein-Biomasse (bis zu 80 % Proteinanteil), die als alternative Proteinquelle für Tierfutter oder Lebensmittel dienen kann. Durch Anlagen direkt an industriellen CO<sub>2</sub>-Quellen ermöglicht</p>	CCU	microbial CO <sub>2</sub> to AS (gas fermentation)

	Econutri, Treibhausgas-Emissionen in Proteine umzuwandeln und gleichzeitig den Ausstoß der Industrie zu senken.  <a href="https://econutri.com/">https://econutri.com/</a>		
Krajete	Krajete GmbH ist ein österreichischer Technologiefirma, die eine biologische Methanisierung von CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> entwickelt. In einem speziellen Bioreaktor wandeln Archaeen-Mikroben CO <sub>2</sub> und erneuerbaren Wasserstoff direkt in Methan (CH <sub>4</sub> ) und Wasser um – analog zum Sabatier-Prozess, jedoch bei milden Bedingungen und mit sich selbst regenerierenden Biokatalysatoren. Diese Power-to-Gas-Technologie erlaubt es, CO <sub>2</sub> -Emissionen (z.B. aus Biogas oder Industrie) vor Ort in erneuerbares Methan zu konvertieren und somit speicherbare klimaneutrale Energie zu gewinnen.  <a href="https://www.krajete.com/expertise/bio-methanation/">https://www.krajete.com/expertise/bio-methanation/</a>	CCU	Biomethanisierung
Circular Carbon Technologies	Circular Carbon Technologies ist ein österreichisches Startup, das neuartige CO <sub>2</sub> -Abscheidungssysteme für Industrieanlagen entwickelt. Die Post-Combustion-Capture-Technologie von CCT arbeitet elektrochemisch statt durch klassische Wärmezufuhr, wodurch CO <sub>2</sub> direkt am Schornstein energieeffizient abgeschieden wird. Die elektrochemische CO <sub>2</sub> -Abscheidung lässt sich mit erneuerbarem Strom betreiben und reduziert den Energieaufwand der CO <sub>2</sub> -Abtrennung  <a href="https://www.circularcarbon.tech/">https://www.circularcarbon.tech/</a>	CCUS	Abscheidung (electrochemical swing adsorption)
Tree.ly	Tree.ly ist eine Plattform für Wald-Klimaschutzprojekte, die Unternehmen CO <sub>2</sub> -Zertifikate aus regionalen europäischen Wäldern anbietet. Durch eine verbesserte Waldbewirtschaftung (z.B. längere Umtriebszeiten und selektive Nutzung) wird zusätzliches CO <sub>2</sub> in lebenden Bäumen und Waldböden gebunden und dieser Carbon Removal als zertifizierte Klimaleistung vermarktet. Tree.ly vernetzt Waldbesitzer und Firmen, hilft Waldeigentümern, die CO <sub>2</sub> -Speicherleistung ihrer Wälder zu monetarisieren, und ermöglicht es Unternehmen, ihre Emissionen durch lokale Negativemissionen aus europäischen Wäldern auszugleichen.  <a href="https://tree.ly/de/sustainability-strategy-net-zero">https://tree.ly/de/sustainability-strategy-net-zero</a>	CDR	Biomasseaufbau (Wald)
Carbo Earth	Carbo Earth ist ein Grazer Startup, das Biomasse in Biokohle und grüne Energie umwandelt, um CO <sub>2</sub> dauerhaft zu binden. In einem eigenen Holzvergaser-Kraftwerk werden zu Strom und Wärme verarbeitet; als Nebenprodukt entsteht bis zu 2.500 Tonnen hochreine Biokohle (≈92 % C). Diese wird als Bodenverbesserer, Futtermittel-Zusatz etc. eingesetzt. Pro Tonne erzeugter Biokohle bietet Carbo Earth CO <sub>2</sub> -Zertifikate über ca. 3,2 Tonnen eingespartes CO <sub>2</sub> an, die auf Plattformen wie Puro.earth gehandelt werden.  <a href="https://www.trendingtopics.eu/carbo-earth-grazer-startup-verspricht-carbon-capture-durch-biokohle/">https://www.trendingtopics.eu/carbo-earth-grazer-startup-verspricht-carbon-capture-durch-biokohle/</a>	CDR (biochar)	Pyrolyse (Pflanzenkohle)
Sonnenerde	Sonnenerde ist ein österreichisches Unternehmen mit Sitz in Riedlingsdorf (Burgenland), spezialisiert auf die Herstellung Biokohle aus regionalen organischen Reststoffen. Durch Pyrolyse wird Biomasse wie Grünschnitt, Hackschnitzel oder	CDR (biochar)	Pyrolyse (Pflanzenkohle)

	Pflanzenreste verarbeitet. Diese Biokohle wird hauptsächlich als Bodenverbesserer verkauft unter eigener Marke verkauft		
next generation elements (NGE)	<p>Next Generation Elements (NGE) ist ein österreichischer Anlagenbauer, der schlüsselfertige Pyrolyseanlagen zur Verwertung von Biomasse und Abfällen entwickelt. Die firmeneigene Technologie (u.a. der elektrisch beheizte T:CRACKER-Reaktor) wandelt biogene Reststoffe in Biokohle und erneuerbare Energie um.</p> <p><a href="https://nge.at/de/">https://nge.at/de/</a></p>	CDR (biochar)	Pyrolyse (Anlagen)
SynCraft	<p>SynCraft ist ein österreichisches Greentech-Unternehmen, das klimapositive Holzkraftwerke baut. Die Anlagen nutzen forstliche Rest-Biomasse, um daraus gleichzeitig Strom, Wärme und Biokohle zu erzeugen. Diese patentierte „Floating Bed“-Technologie kombiniert Bioenergie mit Kohlenstoffspeicherung: die entstehende Biokohle wird als Carbon Sink im Boden oder in Produkten eingebracht, wodurch jede SynCraft-Anlage netto negative CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht. SynCraft demonstriert damit eine skalierbare Lösung, um Energieerzeugung und CO<sub>2</sub>-Entnahme zu koppeln.</p> <p><a href="https://www.syncraft.at/">https://www.syncraft.at/</a></p>	CDR (biochar)	Pyrolyse (Anlagen)

# Anhang C – Dokumentation Workshop

## Ergebnisdokumentation Workshop: CCUS – Gap-Analyse

Veranstaltung: 13. Carbon Capture Forum,

Datum: 26. Juni 2025

Ort: Klima- und Energiefond, Leopold-Ungar-Platz 2, 1190 Wien

An Teilnehmer per E-Mail versandt am 22.9.2025

## Einleitung

Im Rahmen des 13. Carbon Capture Forums in Wien, durchgeführt von der BioBASE GmbH, wurden technologische, infrastrukturelle und regulatorische Fragestellungen rund um Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) sowie Carbon Dioxide Removal (CDR) diskutiert. Ziel des Workshops war es, bestehende Lücken („Gaps“) und Handlungsbedarf zu identifizieren, die für die Entwicklung einer klimaneutralen Industrie von entscheidender Bedeutung sind.

## Ergebnisse des Workshops

### CCU (Carbon Capture & Utilization)

- Fehlender Zugang zu kostengünstigem, grünem Wasserstoff
- Nutzungskonflikte zwischen stofflicher und energetischer Nutzung von H<sub>2</sub>
- Notwendigkeit von H<sub>2</sub>-Kernnetz, Speichern und Importstrategien
- Preisangleichung zwischen grünem und grauem Wasserstoff erforderlich
- Offene Fragen zu Produktionsvolumen und Ressourceneinsatz (Kosten, Material, Personal)
- Einsatzmöglichkeiten alternativen Reduktionsmittel, etwa in der Stahlindustrie

### CCS (Carbon Capture & Storage)

- Unklare Verfügbarkeit von Speicherfeldern (Lage, Kapazität, Quantifizierung)

- Fehlende Daten zu salinen Aquiferen
- Risiken und Unsicherheiten bei On-Shore-Storage
- Akzeptanzprobleme in der Gesellschaft, Bedarf an Bewusstseinsbildung
- Unklare rechtliche Rahmenbedingungen, etwa zu Speicherverboten oder zur Umsetzung der CCS-Richtlinie
- Fehlende Transport- und Netzinfrastruktur für CO<sub>2</sub>

### **CDR (Carbon Dioxide Removal)**

- Herausforderungen bei Skalierbarkeit und Energiebedarf (z. B. DAC)
- Fehlende Märkte für Produkte wie Biokohle
- Akzeptanzprobleme, etwa bei landwirtschaftlicher Anwendung

### **Querschnittsthemen**

- Niedriger Reifegrad vieler Technologien (TRL)
- Bedarf an systemischen Ansätzen und großtechnischen Demonstrationsanlagen
- Offene Fragen zu thermodynamischem Aufwand, Spurenstoffen und Zielkonflikten mit „Zero Pollution“
- Hohe Unsicherheiten durch Zeitdruck und Risikoabschätzungen
- Infrastrukturbedarf für den CO<sub>2</sub>-Transport (Pipeline vs. Schiene, ‚First & Last Mile‘)

### **Regulatorische Aspekte**

- Unklare Anrechenbarkeit von CCU/CCS/CDR im Emissionshandelssystem (ETS)
- Fehlende Standards und Methoden für Accounting in Kreislauf- und Wertschöpfungsnetzwerken
- Förderbedarf für den Aufbau einer H<sub>2</sub>-Infrastruktur
- Zusätzliche Unsicherheiten durch das Auslaufen der freien Zuteilungen im ETS

## **Fazit**

Die Diskussionen haben gezeigt, dass CCUS und CDR als unverzichtbare Bausteine einer klimaneutralen Industrie anerkannt sind. Die größten Herausforderungen liegen jedoch

nicht in der grundsätzlichen technischen Machbarkeit, sondern in der wirtschaftlichen Umsetzung, Infrastrukturentwicklung und gesellschaftlichen Akzeptanz.

Für CCU ist die Verfügbarkeit von (kostengünstigem) grünem Wasserstoff der entscheidende Engpass. Es fehlen bisher sowohl Skalierungsmöglichkeiten als auch funktionierende Märkte für entstehende Produkte. Sie sind wirtschaftlich meist nicht konkurrenzfähig gegenüber etablierten Produkten. Bei CCS werden insbesondere fehlende Speicheroptionen, regulatorische Unsicherheiten und geringe Akzeptanz (auch aufgrund unzureichend kommunizierter Risiken) als Hemmnisse wahrgenommen. Bei CDR wurden insbesondere fehlende Akzeptanz und Absatzmöglichkeiten für Produkte in den Zielmärkten, insbesondere in der Landwirtschaft, angesprochen. Bei Direct-Air-Technologien steht die Frage der Skalierbarkeit aufgrund des hohen Bedarfs an (grüner) Energie zur Debatte.

Übergreifend wurde festgehalten: Ohne klare politische Rahmenbedingungen, verbindliche Standards, gezielte Fördermaßnahmen und den Aufbau von Demonstrationsprojekten können diese Technologien ihr Potenzial nicht ausschöpfen. Die nächsten Schritte müssen daher in Investitionen, Regulierungssicherheit und Bewusstseinsbildung bestehen, damit CCUS und CDR einen wirksamen Beitrag zum Klimaschutz leisten können.

## Flipchart Protokoll

### Technologie & Forschung

Kategorie	Gap / Handlungsbedarf	Text	Kommentar
CCU	G	Fehlender Wasserstoff (für CCU-Produkte, Kohlenwasserstoffe)	
	G	Nutzungskonkurrenz beim H <sub>2</sub> (stofflich vs. energetisch)	
	H	H <sub>2</sub> – Kernnetz schaffen	

		H <sub>2</sub> – Importe Ausbau erneuerbarer Strom (Erzeugung + Netze)	
	G	Kostengünstiger H <sub>2</sub> (bzw. Reduktionsmittel)	
	G	Wieviel H <sub>2</sub> werden wir mit welchem Aufwand zusätzliche (maximal) herstellen können	
	G	Aufwand: -Geld -Material -Personen	H <sub>2</sub> Herstellung (Anm.)
	H	Angleichung Preise grüner und grauer Wasserstoff	
	H	CO als Reduktionsmittel in Punktquellen	vorrangig Stahlherstellung (Anm.)
	H	Überschussstrom nutzen → H <sub>2</sub> Speicher	
CCS	G	Speicherfelder Wo/welche/wieviel?	Geologische CO <sub>2</sub> Speicher
	G	Rahmenbedingungen Hard-to-abate → wirtschaftlich	
	G	H <sub>2</sub> & grüner Strom für CCU/CCS	
	G	Woher kommt der grüne Strom?	
	g	Karbonatisierung Einsatzpotenzial Energiebedarf Bindungskapazität	

	G	Train Transport wirtschaftlich	Eisenbahntransport (Anm.)
	G	Quantifizierung von Speicherpotenzialen in salinen Aquiferen	
	G	On-shore Storage Risiken	
	H	Technologie Akzeptanz	
	H	Bewusstseinsbildung für gesell Akzeptanz	
	H	Gesellschaftliche Akzeptanz	
	G	Vollständiges Wissen über Speicherstätten in AT	
CDR	G	Skalierbarkeit	
	G	Energiebedarf DAC CCU	
	G	Abnehmer für Biokohle fehlen	
	H	Akzeptanz bei landw. Anwendung schaffen	
Alle / Querschnitt	H	Reifegrad (TRL) wirtschaftl. Technologien	
	H	Pipelinevergleich vs. Schienenkilometer	Preisvergleich Schiene vs. Pipeline (Anm.)
	G	Optimierte Integration	
	G	First & Last Mile CO <sub>2</sub> Netz	
	G	Thermodynamik vs. Aufwand	
	H	Systemgrenzen erweitern = systemische Ansätze denken !!	
	H	Demo-Anlagen bauen	

	G	Unsicherheit / Risiko d Verhaltens von Spuren- / problematis. Stoffen → Zielkonflikt Zero Pollution	
	G	Faktor Zeit → Unsicherheit	
	G	Infrastruktur Transport Netze Versorgung	
	h	Beforschen, wie sich die Aufkonzentrierung von problematis. Spurenstoffen in Produkten auswirken	

## Regulatorik & Policies

Kategorie	Gap / Handlungsbedarf	Text	Kommentar
CCU	G	Regulatorik für lokale Netzprovider	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> Netze (Anm.)
	H	Förderung für H <sub>2</sub> Netz Infrastruktur	
	G	Anrechenbarkeit v. Kreislaufführung	
	H	Implementierung von Kreislaufführung = ETS	
	G	Bei Industriesymbiosen, Wertschöpfungsnetzwerken: Anrechenbarkeit, Accounting, wie?	
	H	Standards, Methoden für Anrechenbarkeit im Rahmen ETS, CRCF	
	G	Nicht-Anrechnung von CCU im ETS, Speicherung von CO <sub>2</sub> in	
CCUS	G	Anrechenbarkeit in Emissionshandel klären – Rechtssicherheit	
	G	Auslaufen der freien Zuteilungen, CCS / H <sub>2</sub> Infrastruktur	
CCS	G	Geografische Gegebenheiten	
	H	Umwidmungen	Von Flächen (Anm)
	H	Aufhebung von CCS-Verbot – Umsetzung der CCS-Richtlinie	

	G	Rechtssicherheit	
	G	CO <sub>2</sub> - Speicherverbot	
	G	CCS nur geogen oder auch fossil erlaubt	Frage durch CCS-Richtlinie zu beantworten (Anm.)
CDR			
Alle /Querschnitt	G		Leitmärkte

**Fotodokumentation Flipcharts**

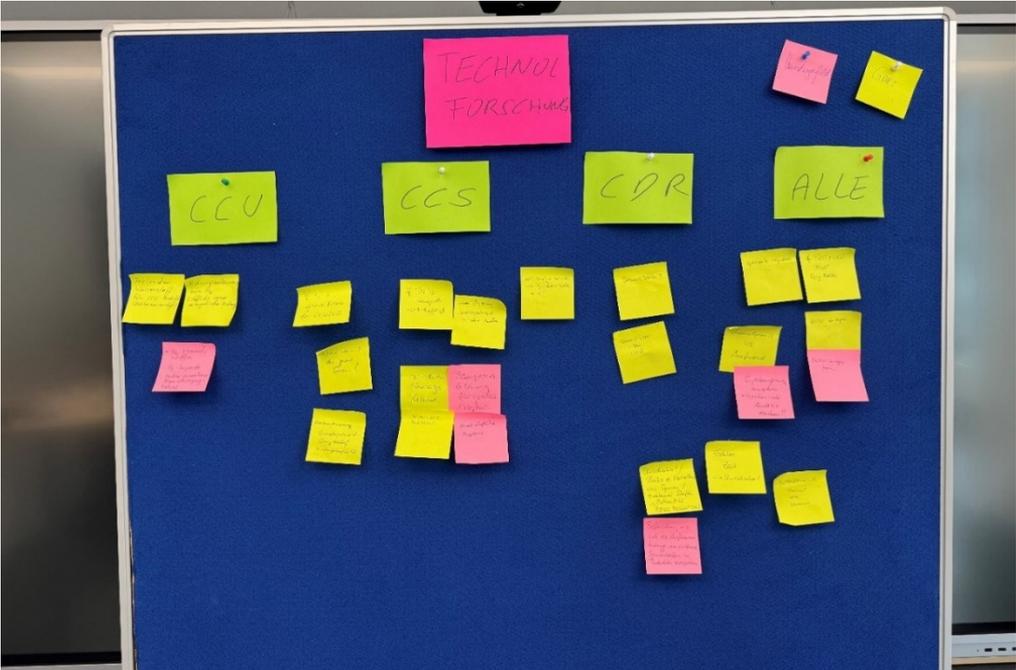


Abbildung 10: Gruppe 1 - Technologie & Forschung

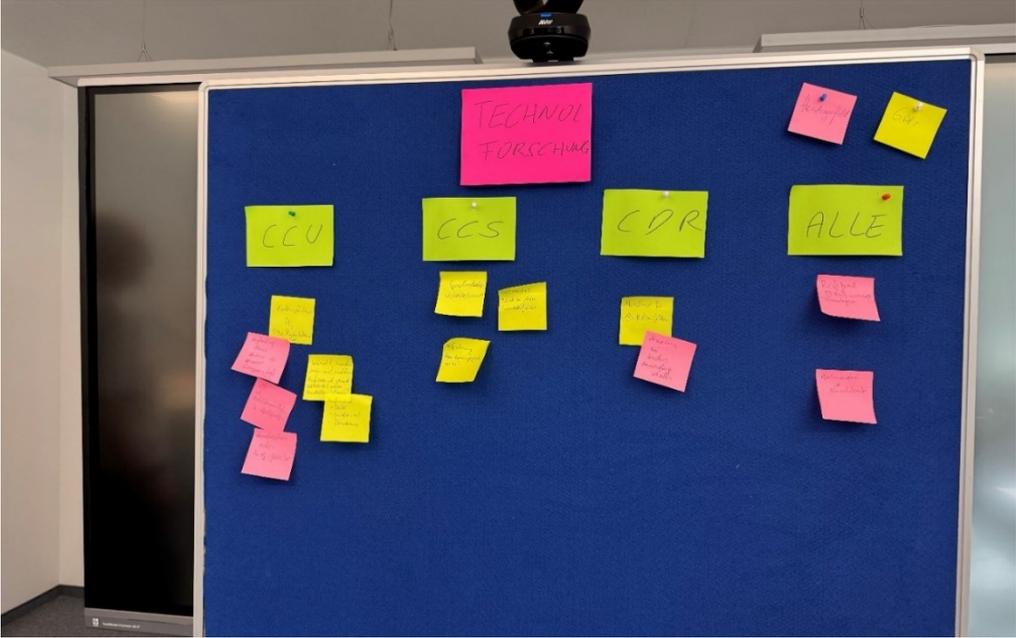


Abbildung 11: Gruppe 2 - Technologie & Forschung



Abbildung 12: Gruppen 1 & 2 - Regulatorik & Policies

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewertungsmatrix CCUS Technologien .....	19
Tabelle 2: Technologieübersicht CCS .....	23
Tabelle 3: Energieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Abscheidung DACCS Technologien (Williams, 2023, Negative Emissions Technologies (Nets): Feasibility Study .....	33
Tabelle 4: Technologieübersicht DACCS.....	34
Tabelle 5: Technologieübersicht BECCS .....	41
Tabelle 6: Beispiele großer inländischer Punktquellen biogenes CO <sub>2</sub> (Quelle: Projekt CaCTUS 2025) .....	43
Tabelle 7: Technologieübersicht Pyrolyse.....	47
Tabelle 8: TRLs verschiedener thermochemischer Konversionstechnologien .....	48
Tabelle 9: TRL von Methanisierungstechnologien .....	54
Tabelle 10: Technologieübersicht CCU.....	57
Tabelle 11: Technologieübersicht Mineralisierung.....	66

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Smith et al, 2024. Entwicklung der Kohlendioxid-Entnahme (CDR) in Gigatonnen CO <sub>2</sub> pro Jahr von 2020 bis 2050 in drei mit dem 1,5 °C Ziel des Pariser Abkommens konformen Szenarien. ....	29
Abbildung 2: Beuttler et al 2019. Climeworks-Carbfix process, Hellisheidi, Island. ....	33
Abbildung 3: IEAGHG, 2021. Technology readiness levels of DACCS value chain technologies .....	35
Abbildung 4: Trompoukis, C. et al., 2025. spezifische Kosten [Euro/tCO <sub>2</sub> ] von DACCS Technologien .....	38
Abbildung 5: Zetterberg, L. 2025. Vergleich zwischen Kosten von BECCS und DACCS gegen den Anstieg des Emissionszertifikatpreises („Allowance price“) von 2025 bis 2050.....	38
Abbildung 6: Transportkette Orsted Kalundborg Hub (DK) (Quelle: <a href="https://orsted.com/">https://orsted.com/</a> ). 43	
Abbildung 7: Zulfiqar, 2021. Übersicht Biokohle aus Abfallmaterialien und Pyrolyseprozess .....	46
Abbildung 8: Younas 2016. Schematische Darstellung Methanisierung von CO <sub>2</sub> (Power-to-Gas).....	55
Abbildung 9: Zajac, 2021. Lebenszyklus von Zement und Beton unter Einbeziehung von Betonrecycling und Recarbonatisierung feiner Betonanteile. Grau: konventionelle Herstellung und Nutzung; Grün: verbesserte Recyclingprozesse und Recarbonatisierung gemäß dem vorgeste.....	65
Abbildung 10: Gruppe 1 - Technologie & Forschung .....	114
Abbildung 11: Gruppe 2 - Technologie & Forschung .....	114
Abbildung 12: Gruppen 1 & 2 - Regulatorik & Policies .....	115

