dena



Projektbericht

Grundlagendokument zur Langfriststrategie Negativemissionen

Fachlicher Hintergrund und Empfehlungen

Impressum

Herausgeber:
Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel: +49 30 66 777-0
Fax: +49 30 66 777-699
E-Mail: info@dena.de
Internet: www.dena.de

Autorinnen und Autoren der dena:
Martin Albicker (Projektleitung)
Pascal Hader-Weinmann (Projektleitung)
Thea Barnitzke
Katharina Fischer
Leon Flöer
Elisabeth Gebhard
Nicole Herold
Oliver Jorzik
Martje Köppen
Hannah Langmaack
Leon Podehl
Joshua Reichert
Kilian Rützel
Christin Schmidt
Tibor Siering
Timo Velthaus

Modellierung durch Prognos AG und Öko-Institut:
Sebastian Lübbers, Prognos AG
Dr. Fabian Muralter, Prognos AG
Dr. Klaus Hennenberg, Öko-Institut
Kirsten Wiegmann, Öko-Institut

Weitere wissenschaftliche Unterstützung:
Matthias Poralla, Perspectives Climate Research
Dr. Malte Winkler, Perspectives Climate Research
Dr. Tobias Heimann, Perspectives Climate Research

Bildnachweis:
Titelbild: dena
Inhaltlicher Stand:
09/2025

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der dena.

Bitte zitieren als:
Deutsche Energie-Agentur (dena, 2026) „Grundlagendokument zur Langfriststrategie Negativemissionen“, Fachlicher Hintergrund und Empfehlungen. Berlin

Im Auftrag des:

Bundesministerium
für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

Inhalt

1 Zusammenfassung 6

2 Summary 15

3 Einleitung 22

3.1 Definitionen und Begriffsverständnis 24

3.2 Einbettung in andere Strategien und Rechtsakte 28

4 Bewertung von CO_2-Entnahmemethoden 31

4.1 Forstwirtschaft 33

4.2 Aufforstung 37

4.3 Holzprodukte / Stoffliche Biomassenutzung 42

4.4 Agroforstsysteme 45

4.5 Humusanreicherung im Boden 49

4.6 Wiedervernässung von Mooren 53

4.7 Beschleunigte Verwitterung von Gesteinen 56

4.8 Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle 59

4.9 Bioenergie mit Carbon Capture and Storage (BECCS) 62

4.10 Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) 67

4.11 Künstliche Photosynthese 70

4.12 Bioenergie / Direct Air Carbon Capture and Utilisation (BECCU/DACCU) 71

4.13 Beschleunigte Karbonatisierung 75

4.14 Alkalinitätserhöhung im Ozean 77

4.15 Künstlicher Auftrieb 80

4.16 Kultivierung und Nutzung von Makroalgen 82

4.17 Stärkung küstennaher Ökosysteme (Blue Carbon Enhancement) 85

5 Bedarfe und Potenziale der CO_2-Entnahme 90

5.1 Modellierungsdesign und Ergebnisse in den Sektoren 90

5.2 Modellierungsergebnisse und Schlussfolgerungen 93

6 Governance der CO_2-Entnahme 102

6.1 Gesetzlicher Anpassungsbedarf für CO_2-Entnahmemethoden 102

6.2 Ziel- und Ressourcenkonflikte zwischen CO_2-Entnahme und anderen Prioritäten 109

6.3 CO_2-Entnahmen im Klimaschutzgesetz 112

6.3.1 Zielverankerung von CO_2-Entnahmen im Klimaschutzgesetz 112

6.3.2 Zielüberprüfung und MRV auf Inventarebene 113

6.3.3 Zuordnung der CO_2-Entnahmemethoden zu §§ 3a und 3b KSG 117

6.3.4 Zielerreichung durch CO_2-Entnahmen im Ausland 123

6.3.5 Ableitung der Zielwerte für technische Senken 125

6.4 CO_2-Entnahmen in Projekten 129

6.4.1 Projektbasiertes MRV in Zertifizierungssystemen 129

6.4.2 Anforderungen an CO_2-Entnahmeprojekte 132

7 Ökonomische Anreize und Marktrahmen 143

7.1 Problemstellung und Zielbild 143

7.2 Bewertung von Anreizinstrumenten 145

7.2.1 Staatliche Zertifizierungsstandards 147

7.2.2 Reporting-Vorgaben, Labels, Kompetenz- und Kapazitätsaufbau 149

7.2.3 Forschungs- und Entwicklungsförderung 151

7.2.4 Klimaneutrale öffentliche Verwaltung und Beschaffung 154

7.2.5 Ergebnisbasierte Förderung 156

7.2.6 Aktivitätsbasierte Förderung 162

7.2.7 Öffentlich-private Vereinbarungen / Private Abkommen 164

7.2.8 Integration in den EU-ETS 166

7.2.9 Entnahmeverpflichtungen 171

7.3 Erkenntnisse und Empfehlungen 173

7.3.1 Maßnahmen zur Marktvorbereitung 173

7.3.2 Öffentliche Investitionen für die Skalierung von CO_2-Entnahmen 175

7.3.3 Langfristige Finanzierung durch marktfinanzierte Instrumente 179
7.3.4 Weitere Empfehlungen 181
7.4 Rolle der Instrumente in einem Phasenmodell 182
7.4.1 Phase 1: Grundlagen schaffen 183
7.4.2 Phase 2: Skalierung 184
7.4.3 Phase 3: Marktreife 185
7.4.4 Phase 4: Netto-Negativität 185
Abbildungsverzeichnis 187
Tabellenverzeichnis 188
Literaturverzeichnis 189
Abkürzungen 203
Glossar 206

1 Zusammenfassung

Das vorliegende Dokument wurde von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) erstellt und bildet die fachliche Grundlage für die Festlegungen der Langfriststrategie Negativemissionen (LNe). Die Bundesregierung hat mit Unterstützung der dena einen mehrmonatigen Beteiligungsprozess zur Rolle von Negativemissionen für den Klimaschutz in Deutschland durchgeführt. Die Prognos AG und das Öko-Institut haben zudem Szenarien für Restemissionen und CO_2-Entnahmen für die LNe modelliert. Perspectives Climate Research hat eine Analyse ökonomischer Anreize für CO_2-Entnahmen beigesteuert.

Dieses Dokument soll die unterschiedlichen wissenschaftlichen Analysen und Modellierungen sowie die intensiven Diskussionen mit Stakeholdern in verschiedenen Arbeitsgruppen zusammenführen. Mit Blick auf die Erreichung der deutschen Klimaziele leitet die dena hieraus Handlungsbedarfe und Empfehlungen für eine effiziente, zielgerichtete und nachhaltige Entwicklung der CO_2-Entnahme ab.

Die CO_2-Entnahme ist notwendig für die Erreichung der nationalen Klimaziele

Vom Menschen verursachte Treibhausgas (THG)-Emissionen haben in einer beispiellosen Geschwindigkeit zu einem deutlichen Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen geführt. Die tiefgreifende Minderung von THG-Emissionen bleibt angesichts der hohen Kosten und der begrenzten und unsicheren Potenziale für technische Senken die oberste Priorität des Klimaschutzes in Deutschland. Alle nationalen Klimaneutralitätsszenarien lassen jedoch erkennen, dass trotz ambitionierter Minderungsbemühungen unvermeidbare Emissionen im Zieljahr der THG-Neutralität 2045 verbleiben werden (etwa aus der Landwirtschaft oder Prozessemissionen der Industrie). Diese Emissionen müssen über Methoden zur CO_2-Entnahme ausgeglichen werden.

Die Notwendigkeit der CO_2-Entnahme spiegelt sich bereits heute in der deutschen und europäischen Klimaschutzgesetzgebung wider. Sowohl das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) als auch das Europäische Klimagesetz sehen vor, dass nach dem Jahr 2050 netto-negative THG-Emissionen erreicht werden sollen. Das bedeutet, dass dann mehr CO_2 aus der Atmosphäre entnommen und gespeichert werden muss, als gleichzeitig an Treibhausgasen freigesetzt werden. Im KSG sind zudem Zielwerte für den netto-negativen Beitrag des Landnutzungssektors (engl. Land Use, Land Use-Change and Forestry, LULUCF) definiert. Darüber hinaus sind gemäß § 3b KSG separate Ziele für technische Senken festzulegen, die zusätzlich zu den bereits bestehenden Minderungszielen und dem LULUCF-Sektorziel gelten.

Die Langfriststrategie Negativemissionen soll die Rolle der CO_2-Entnahme für den Klimaschutz in Deutschland klären

Mit der LNe soll ein gemeinsames Verständnis der Rolle der CO_2-Entnahme in Deutschland geschaffen werden. Über die Entwicklung einer gemeinsamen Strategie kann Deutschland zu einem internationalen Vorreiter im Bereich der CO_2-Entnahme werden und wirtschaftliche Potenziale entlang der Wertschöpfungskette erschließen. Das Wirtschaftspotenzial der deutschen CO_2-Entnahme-Industrie könnte gemäß einer Veröffentlichung der Boston Consulting Group von Juni 2024 bis 2050 auf 70 Mrd. Euro pro Jahr anwachsen und bis zu 190.000 Arbeitsplätze, vor allem beim Anlagen- und Maschinenbau sowie bei Systemen zur Messung und Berichterstattung, schaffen.

Die LNe ist eingebettet in die gesamte deutsche und europäische Klimaschutzarchitektur und bildet gemeinsam mit der Carbon Management-Strategie (CMS) die Grundlage für den Umgang mit schwer vermeidbaren Emissionen. Das vorliegende Dokument fasst die Analysen und Ergebnisse

des durchgeführten Beteiligungsverfahrens zusammen und spricht Empfehlungen für den Hochlauf der CO_2-Entnahme in Deutschland aus. Die wichtigsten Empfehlungen sind in dieser Zusammenfassung aufgeführt. Thematisch lässt sich das Dokument wie folgt untergliedern:

- Einführung in Definitionen und Begrifflichkeiten und Einordnung der LNe in den Gesamtkontext des Klimaschutzes (Kapitel 3)
- Umfassende und systematische Bewertung aller relevanten CO2-Entnahmemethoden (Kapitel 4)
- Modellierung der LNe und Schlussfolgerungen für die Modellierungsergebnisse (Kapitel 5)
- Rechtlich-regulatorische Anpassungsbedarfe für einzelne CO2-Entnahmemethoden (Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2)
- Zielüberprüfung und Zuordnung der Entnahmemethoden zu §§ 3a und 3b KSG sowie Ableitung von Zielwerten für technische Senken (Kapitel 6.3)
- Anforderungen an CO2-Entnahmen auf Projektebene (Kapitel 6.4)
- Ökonomische Anreize und Marktrahmen (Kapitel 7)

Die Methodenbewertung der LNe zeigt, dass ein Portfolio an Entnahmemethoden benötigt wird

Die Methodenbewertung der LNe zeigt auf, dass alle CO_2-Entnahmemethoden Vor- und Nachteile mit sich bringen. Die Bewertung von Entnahmemethoden ist übergeordnet nur schwer möglich, da eine Einschätzung zu Vor- und Nachteilen immer auch von der konkreten Umsetzung der einzelnen Entnahmeprojekte abhängt.

Die Ergebnisse der Methodenbewertung zeigen: Das höchste theoretische CO_2-Entnahmepotenzial für Deutschland im Jahr 2045 weist Bioenergie mit CO_2-Abscheidung und -Speicherung (engl. Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) (20 bis 60 Mio. Tonnen CO_2) auf. Danach folgen Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle (15 bis 25 Mio. Tonnen CO_2), Agroforstsysteme (8 bis 24 Mio. Tonnen CO_2) und die direkte CO_2-Abscheidung und -Speicherung (engl. Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) (mehr als 10 Mio. Tonnen CO_2). Das theoretische Potenzial von DACCS ist dabei sehr stark abhängig von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energie.

Das Potenzial für die einzelnen Methoden und die möglichen ökologischen Auswirkungen sind im Wesentlichen von der Verfügbarkeit von Flächen- und Speicherstätten, biogenen Rest- und Abfallstoffen sowie erneuerbarer Energie abhängig. Durch diese Einschränkungen fallen die Potenziale in der Realität teilweise deutlich geringer aus, als das theoretische Potenzial indiziert. Zudem gibt es Wechselwirkungen zwischen den Entnahmemethoden. Zum Beispiel können biogene Reststoffe immer nur entweder für BECCS oder aber für Pflanzenkohle verwendet werden.

Methoden, bei denen die Speicherung des CO_2 im Untergrund (BECCS, DACCS), über eine chemische Bindung in Mineralen (beschleunigte Karbonatisierung, beschleunigte Verwitterung) oder die Umsetzung in Pflanzenkohle unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen oder in Bikarbonat- und Karbonat-Ionen im Ozean erfolgt, weisen nach aktuellen Erkenntnissen eine hohe Dauerhaftigkeit auf.

Insbesondere natürliche Senken (Wiedervernässung von Mooren, Stärkung küstennaher Ökosysteme oder Humusanreicherung im Boden u. a.) können positive Auswirkungen auf die Umwelt haben und stellen wertvolle Ökosystemdienstleistungen bereit. Bei einigen dieser Methoden besteht ein erhöhtes Risiko für den Verlust des Kohlenstoffs durch natürliche Prozesse und den Klimawandel.

Eine Reduktion von Landnutzungskonflikten kann durch flächeneffiziente Entnahmemethoden wie Agroforstsysteme oder beschleunigte Verwitterung von Gesteinen erfolgen, aber auch durch marine Methoden wie die Alkalinitätserhöhung in Ozeanen. Letztere Methoden sind jedoch zumeist noch nicht hinreichend erforscht. Die praktische Forschung daran ist in Deutschland zudem durch das Hohe-See-Einbringungsgesetz (HSEG) verboten.

Die CO_2-Entnahmekosten unterscheiden sich zwischen den Methoden erheblich. Die höchsten Kosten liegen nach Abschätzungen in den nächsten Jahren (bis ca. 2030) bei Bioenergie mit CO_2-Abscheidung und -Nutzung (engl. Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation, BECCU) / direkter CO_2-Abscheidung und -Nutzung (engl. Direct Air Carbon Capture and Utilisation, DACCU) (200 bis 1.200 Euro/t CO_2). Danach folgen die Kosten für DACCS (650 bis 830 Euro/t CO_2), beschleunigter Verwitterung von Gesteinen (bis zu 400 Euro/t CO_2), Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle (120 bis 250 Euro/t CO_2) sowie BECCS (140 bis 365 Euro/t CO_2). Die Kosten von natürlichen Senken (10 bis 320 Euro/t CO_2)[1] sind aufgrund ihrer Flächenbedarfe sowie der unterschiedlichen Dauerhaftigkeit der CO_2-Speicherung nur schwer vergleichbar.

Empfehlung: Keine Entnahmemethode hat allein das Potenzial, die bis 2045 zu erwartenden Restemissionen vollständig auszugleichen. Kombiniert man verschiedene Verfahren, lassen sich Risiken, die mit der Abhängigkeit von wenigen Methoden einhergehen, reduzieren.

Die Modellierung zeigt den Bedarf an CO_2-Entnahmen auf, auf dessen Grundlage sich Zielwerte für technische Senken ableiten lassen

Eine im Rahmen des Projekts durchgeführte Modellierung analysiert mögliche Transformationspfade zur THG-Neutralität und entsprechende Bedarfe für die CO_2-Entnahme. Dabei wurden Szenarien mit einer Emissionsminderung von rund 93 Prozent, 95 Prozent und 97 Prozent untersucht. Die Höhe der jeweiligen Restemissionen liegt bei 94, 57 bzw. 40 Mio. Tonnen CO_2äq, von denen ein Großteil auf den Landwirtschaftssektor entfällt. Ein weiterer Teil stammt aus Prozessemissionen der Industrie.

Das Potenzial an CO_2-Entnahmen ist begrenzt, für die meisten Methoden durch die Kosten sowie die Flächen- und Energiebedarfe. Daher kann die THG-Neutralität in Deutschland nur mit tiefgreifender Emissionsminderung und ergänzender CO_2-Entnahme erreicht werden - entsprechend sollten die Ziele für technische Senken nicht auf reduzierten Minderungsbemühungen (LNe93-Szenario) beruhen. Gleichzeitig ist eine Minderung auf nur 3 Prozent Restemissionen im LNe97-Szenario vor dem Hintergrund aktueller Emissionsentwicklungen, geplanter Maßnahmen und auch technischer Limitationen als äußerst ehrgeizig zu sehen. Im Sinne einer resilienten Erreichung der Klimaschutzziele sollten sich die Entnahmeziele daher nicht an diesem Szenario ausrichten.

Die Bundesregierung sollte Ziele für technische Senken nach § 3b KSG so festlegen, dass sie unter Berücksichtigung von Unsicherheiten zu einer resilienten Erreichung der übergeordneten THG-Neutralität gemäß § 3 Abs. 1 KSG beitragen. Das Ziel für technische Senken sollte sich für das Jahr

[1] Agroforstsysteme: 70 bis 154 Euro/t CO2, Aufforstung: 10 bis 120 Euro/t CO2, Forstwirtschaft: bis 35 Euro/t CO2, Holzprodukte / Stoffliche Biomassenutzung: bis 320 Euro/t CO2, Humusanreicherung im Boden: 20 bis 170 Euro/t CO2.

2045 daher am mittleren Szenario LNe95 der Modellierung orientieren. Es ergibt sich eine Bandbreite von 17 bis 28 Mio. Tonnen CO_2 für die Zielfestlegung der Bundesregierung.

Der untere Wert der Bandbreite basiert auf dem LNe95-Szenario unter Annahme der LULUCF-Zielerreichung. Der obere Wert beinhaltet einen Sicherheitsaufschlag. Dieser gründet sich auf der Modellierung eines Szenarios mit hohen Störungen im LULUCF-Sektor, die insbesondere auf den Klimawandel zurückzuführen sind.

Mit dem Sicherheitsaufschlag kann das Ziel für technische Senken die Anfälligkeit des LULUCF-Sektors berücksichtigen und sicherstellen, dass auch im Falle einer leichten Verfehlung der LULUCF-Sektorziele nach § 3a KSG die übergeordneten Klimaziele erreicht werden können.

Empfehlung: Ziele für technische Senken sollten sich an einer sehr ambitionierten, aber nicht zu optimistischen Erwartung zur Höhe der Restemissionen ausrichten. Die Orientierung am Szenario LNe95 stellt ein hohes Ambitionsniveau der Minderung sicher und sollte daher Grundlage der Empfehlung für die Zielwerte sein.

Empfehlung: In der Rechtsverordnung gemäß § 3b KSG sollte die Bundesregierung Zielwerte für technische Senken festlegen. Die durchgeführten Analysen, basierend auf der Modellierung der LNe, legen folgende Bandbreite als realistische Orientierung nahe:

- Mindestens 5 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme durch technische Senken im Jahr 2035
- 10 bis 15 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme durch technische Senken im Jahr 2040
- 17 bis 28 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme durch technische Senken im Jahr 2045

Zur Ermöglichung der verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden sollte der regulatorische Rahmen angepasst werden

Der breite Einsatz von CO_2-Entnahmemethoden wird derzeit durch verschiedene gesetzliche und regulatorische Hürden erschwert. Der bestehende Rechtsrahmen behindert sowohl die praktische Durchführung von Projekten als auch die Forschung. Zudem fehlen einheitliche Standards zur Messung, Berichterstattung und Verifizierung (engl. Monitoring/Measurement, Reporting and Verification, MRV), was die Vergleichbarkeit und Transparenz von Entnahmeprojekten einschränkt.

Der Zweck der CO_2-Entnahme ist in vielen Gesetzen nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Dadurch bestehen Unklarheiten und Inkonsistenzen, welche die Planungssicherheit für Entnahmeprojekte beeinträchtigen. Eine besondere Bedeutung haben rechtliche Anpassungen zur Ermöglichung von auf CO_2-Abscheidung und -Speicherung (engl. Carbon Capture and Storage, CCS) basierenden CO_2-Entnahmen sowie eine Vereinfachung und Beschleunigung von Entnahmeprojekten im LULUCF-Sektor.

Empfehlung: Um den Einsatz von CCS-basierten CO_2-Entnahmemethoden in Deutschland zu ermöglichen, sollten das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) und das Hohe-See-Einbringungsgesetz (HSEG) angepasst und das London-Protokoll ratifiziert werden. Im HSEG sollte zur Ermöglichung der Forschung zu marinen Entnahmemethoden der Katalog zulässiger Maßnahmen des marinen Geoengineering erweitert werden.

Empfehlung: Für einige terrestrische Entnahmemethoden wie die Stärkung küstennaher Ökosysteme oder die Wiedervernässung von Mooren sollten Anpassungen im Bundesnaturschutzgesetz, im Bundesbodenschutzgesetz sowie im Wasserhaushaltsgesetz die Umsetzung vereinfachen und

bestehende rechtliche Unsicherheiten verringern. Dies gilt insbesondere für weitreichende Eingriffsverbote für Wiederherstellungs- und Erweiterungsmaßnahmen von Küstenökosystemen.

Empfehlung: Zur Vereinfachung der Genehmigung und Umsetzung von BECCS und der Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle sollten Anpassungen und Klarstellungen im Bundes-Immissionsschutzgesetz und in der Bundes-Immissionsschutzverordnung vorgenommen werden.

Die Überprüfung der KSG-Ziele erfordert Inventar-Berichterstattungsmethodiken und eine eindeutige Zuordnung der Entnahmemethoden zu §§ 3a und 3b KSG

Die Ziele des KSG werden anhand des deutschen THG-Inventars überprüft. Im Inventar kann aktuell jedoch nur ein Teil der CO_2-Entnahmemethoden abgebildet werden: entweder als sogenannte Rückgewinnung im Falle von BECCS oder indirekt über den jeweiligen Effekt auf die Flächen- und Speicherkategorien des LULUCF-Sektors. Für die restlichen Entnahmemethoden existieren noch keine Inventar-Berichterstattungsmethodiken. Diese sind jedoch Grundvoraussetzung dafür, dass eine Entnahmemethode zur Erreichung der Ziele nach §§ 3a und 3b KSG beitragen kann.

Berichterstattungsmethodiken unterscheiden sich in ihrer Logik und Funktionsweise von Methodiken zur Projektzertifizierung, beispielsweise im Rahmen der europäischen Verordnung zur Zertifizierung von dauerhaften CO_2-Entnahmen, kohlenstoffspeichernder Landbewirtschaftung und der CO_2-Speicherung in Produkten (engl. Carbon Removal and Carbon Farming Regulation, CRCF).

Es bedeutet daher nicht automatisch, dass eine CO_2-Entnahmemethode zur Erreichung der Ziele nach §§ 3a und 3b KSG beitragen kann, nur weil eine CRCF-Methodik existiert. Ausschlaggebend hierfür sind die Berichterstattungsmethodiken. Diese werden aktuell durch den Weltklimarat (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) erarbeitet und den Nationalstaaten in einem neuen Methodikbericht bereitgestellt (siehe Kapitel 6.3.2).

Da CO_2-Entnahmen sowohl zu den LULUCF-Zielen nach § 3a KSG als auch zu den Zielen für technische Senken nach § 3b KSG beitragen können, muss eindeutig festgelegt werden, welche CO_2-Entnahmemethode in Zukunft zu welchem der beiden Ziele beiträgt. Im Gegensatz zu den technischen Senken ist der Anwendungsbereich der LULUCF-Ziele bereits definiert und international etabliert. Da jede CO_2-Entnahme nur auf eines der Ziele angerechnet werden kann, muss der Anwendungsbereich von § 3b KSG in Abgrenzung zum Anwendungsbereich von § 3a KSG definiert werden (siehe Kapitel 6.3.3). Hierfür sollte die Bundesregierung folgendermaßen vorgehen:

Empfehlung: CO_2-Entnahmemethoden sollten nur dann auf die Ziele nach §§ 3a und 3b KSG angerechnet werden, wenn für sie entweder bereits eine Berichterstattungsmethodik existiert oder der IPCC plant, sie im neuen Methodikbericht zu berücksichtigen. Alle Entnahmemethoden, die bereits jetzt oder gemäß IPCC-Scoping Report voraussichtlich in Common Reporting Table (CRT)-Kategorie 4 (LULUCF) zu berichten sind, tragen zum LULUCF-Ziel nach § 3a KSG bei. Die restlichen Entnahmemethoden sollten als technische Senken definiert werden und zum Ziel nach § 3b KSG beitragen.

Ob die Ziele nach §§ 3a und 3b KSG in Zukunft auch über staatenübergreifende Mechanismen erreicht werden können, beispielsweise im Rahmen von Artikel 6 des Übereinkommens von Paris (ÜvP), ist sowohl von europäischem Recht abhängig als auch von der konkreten Ausgestaltung des § 3 Abs. 3 KSG. Die Bundesregierung sollte sich daher, je nach den politischen Zielen, für eine der beiden Optionen entscheiden:

Empfehlungsoption 1: Die Bundesregierung sollte den Wortlaut des § 3 Abs. 3 so anpassen, dass Minderung und Entnahme gleichermaßen umfasst sind. Dies würde eine rechtssichere Möglichkeit

für die Nutzung staatenübergreifender Mechanismen zum Zwecke der CO_2-Entnahme schaffen. Dadurch kann theoretisch ein volkswirtschaftlich effizienter Klimaschutz erreicht werden, indem CO_2-Entnahmen dort durchgeführt werden, wo sie am günstigsten sind.

Empfehlungsoption 2: Die Bundesregierung sollte klarstellen, dass die Ziele nach §§ 3, 3a und 3b KSG in Bezug auf CO_2-Entnahmen rein territorial erreicht werden müssen. Staatenübergreifende Mechanismen zum Zwecke der CO_2-Entnahme fallen nicht unter den Anwendungsbereich des § 3 Abs. 3 KSG, da hiervon lediglich Mechanismen „zur Minderung von Treibhausgasemissionen" abgedeckt sind. Dies bewahrt das hohe nationale Ambitionsniveau und vermeidet mögliche Risiken beim Monitoring und bei der Anerkennung international erbrachter Klimaschutzleistungen.

Die präzise Erfassung und Standards für qualitativ hochwertige CO_2-Entnahmen auf Projektebene sind Grundlagen für die wirksame Steuerung des Hochlaufs

Um klimawirksame Entnahmen anzureizen, ist es essenziell, dass die Entnahmeleistung einzelner Projekte zuverlässig gemessen und quantifiziert werden kann. Dabei sollten Projekte nachweisen, dass die CO_2-Entnahme ohne sie nicht erfolgt wäre und sie zugleich Anforderungen an Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit erfüllen. Zertifizierungssysteme, die auf MRV-Systemen beruhen, nehmen dabei eine zentrale Rolle bei der Erfassung der Auswirkungen einzelner Entnahmeprojekte ein.

In der Vergangenheit ist es wiederholt zu Problemen bei der Integrität von zertifizierten Entnahmeprojekten gekommen, wobei unter anderem zentrale Anforderungen an die Zusätzlichkeit nicht erfüllt wurden. Staatliche Zertifizierungssysteme wie unter dem CRCF oder Artikel 6 ÜvP sollen dem entgegenwirken. Gleichwohl ist noch unklar, ob diese Standards ausreichen, um den Herausforderungen der Zertifizierung von Entnahmen, insbesondere mit Blick auf Zusätzlichkeit, Reversibilität und Nachhaltigkeit, gerecht zu werden.

Empfehlung: Es sollten Anstrengungen zur Verbesserung von Zertifizierungen und Standards, insbesondere auf europäischer Ebene, unternommen werden. Darüber hinaus kann die Bundesregierung im Rahmen nationaler Anreizsysteme oder Förderinstrumente zusätzliche Anforderungen an die Zusätzlichkeit, Dauerhaftigkeit oder Nachhaltigkeit von CO_2-Entnahmeprojekten stellen, die über jene von etablierten oder zukünftigen Zertifizierungsstandards (z. B. dem CRCF) hinausgehen. Dies kann erforderlich sein, um politische Ziele der Bundesregierung zu erreichen. Hierzu zählen beispielsweise der Erhalt der Entnahmeleistung natürlicher Senken oder die Nachhaltigkeit von Biomassenutzung.

Empfehlung: Die EU-Richtlinie über Umweltaussagen (engl. Green Claims Directive, GCD) soll festlegen, für welche Zwecke Unternehmen CRCF-Zertifikate einsetzen können. Die Bundesregierung sollte sich in diesem Prozess dafür einsetzen, dass Unternehmensangaben zu diesen Zertifikaten möglichst transparent und glaubwürdig sind. Dies ist gerade vor dem Hintergrund der Möglichkeit der gleichzeitigen Anrechnung von zertifizierten CO_2-Entnahmen auf Unternehmensziele und national festgelegte Beiträge im Rahmen des ÜvP (engl. Nationally Determined Contributions, NDCs) relevant.

Für den möglichst effizienten Hochlauf der CO_2-Entnahme benötigt es adäquate Anreize

Während Maßnahmen zur Emissionsminderung in vielen Ländern durch Emissionshandelssysteme (engl. Emissions Trading System, ETS), CO_2-Steuern oder ordnungsrechtliche Vorgaben angereizt bzw. reguliert werden, gibt es bislang nur geringe Anreize und wenige Geschäftsmodelle zur CO_2-Entnahme. Freiwillige Kohlenstoffmärkte (engl. Voluntary Carbon Markets, VCM) leisten aufgrund des Mangels an Vertrauen und Zahlungsbereitschaft bislang nur einen begrenzten Beitrag zum Hochlauf von Negativemissionen.

Empfehlung: Die Bundesregierung sollte Maßnahmen ergreifen, um adäquate Anreize für einen effizienten und fairen Marktrahmen für CO_2-Entnahmen zu schaffen. Dieser sollte Investitionen in CO_2-Entnahmen auslösen, Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigen und dabei möglichst geringe staatliche Unterstützung erfordern. Dafür sollte unter anderem auf einen effizienten Einsatz staatlicher Mittel, eine möglichst verursachergerechte Finanzierung der CO_2-Entnahme, einen geringen Verwaltungsaufwand und eine einfache Umsetzbarkeit geachtet werden.

Der Weg zu einem tragfähigen Marktrahmen besteht aus einer Kombination verschiedener Instrumente

Die Analyse der verschiedenen Anreizinstrumente zeigt, dass ein ausgewogener Instrumentenmix am besten dazu geeignet ist, die Herausforderungen in den unterschiedlichen Phasen des Markthochlaufs zu adressieren. Dabei sollten die verschiedenen Instrumente kombiniert werden bzw. sich in zeitlicher Abfolge ablösen, um sich in ihrer Wirkung zu ergänzen.

Maßnahmen zur Marktvorbereitung sind No-Regret-Maßnahmen

Maßnahmen zur Marktvorbereitung („Enabler") bilden die Grundlage für einen funktionierenden Markt für die CO_2-Entnahme. Dazu gehören die Förderung der Forschung und Entwicklung (F&E) sowie die Entwicklung von Zertifizierungsstandards, Labels und Reporting-Verpflichtungen. Zertifizierungsstandards und MRV-Systeme bilden dabei auch die Grundlage für staatliche Förderung und Verpflichtungen. Speziell in der ersten Phase des Hochlaufs der CO_2-Entnahmen können gezielte Investitionen in die technologische Entwicklung und die wissenschaftliche Begleitforschung zu einem früheren Hochlauf von CO_2-Entnahmen beitragen.

Empfehlung: Die Bundesregierung sollte die Etablierung geeigneter Labels und Reporting-Standards sowie robuster Zertifizierungs- und MRV-Systeme unterstützen bzw. die entsprechenden Prozesse auf europäischer Ebene begleiten und eine harmonisierte, kohärente Ausgestaltung sicherstellen.

Empfehlung: Die Bundesregierung sollte geeignete Förderprogramme etablieren, um in einem öffentlichen Raum praxistaugliche und breit akzeptierte CO_2-Entnahmemethoden, Pilotprojekte und Monitoring-Konzepte zu entwickeln und zu testen. Für natürliche Senken sollten zudem bestehende Programme etwa im Rahmen des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz weitergeführt und ausgebaut werden.

Öffentliche Investitionen sind erforderlich, um die Skalierung von CO_2-Entnahmen anzuschieben

Einige Instrumente beruhen auf einer staatlichen Förderung von CO_2-Entnahmen. Dazu zählen die klimaneutrale öffentliche Verwaltung sowie ergebnis- und aktivitätsbasierte Förderungen. Sie können den Hochlauf der CO_2-Entnahme beschleunigen, indem sie gezielt in konkrete Projekte investieren. Dadurch können weitere Innovationen und Kostenreduktionen erreicht werden.

Für ausgereifte neuartige CO_2-Entnahmemethoden, für die bereits robuste MRV-Möglichkeiten bestehen, wird die ergebnisbasierte Förderung empfohlen. Ein wettbewerbliches Ankaufsprogramm (z. B. Rückwärtsauktionen, engl. Reverse Auctions) mit späterem Verkauf auf dem VCM oder Verpflichtungsmärkten bzw. die Ausgestaltung der Förderung als Carbon Contract for Difference (CCfD) sind dabei effiziente und haushaltsschonende Förderansätze.

Empfehlung: Die Bundesregierung sollte bereits frühzeitig die Anschubfinanzierung von CO_2-Entnahmen anstoßen. Dafür sollte sie möglichst zeitnah erste Reverse Auctions vorbereiten, die später ausgebaut werden können. Dabei sollten sowohl technologiespezifische Auktionen zur gezielten

Förderung einzelner Entnahmemethoden als auch technologieoffene Auktionen zur Hebung von Kostenvorteilen durch verstärkten Wettbewerb abgehalten werden. Nach Anbindung an das EU-Emissionshandelssystem (engl. European Union Emissions Trading System, EU-ETS) sollten CCfDs für CO_2-Entnahmen zum Einsatz kommen.

Kurzfristige Entnahmepotenziale bestehen auch bei der Abscheidung von biogenen CO_2-Strömen an Industrieanlagen mit schwer vermeidbaren Emissionen (insbesondere Kalk, Zement und thermische Abfallbehandlungsanlagen), an denen ohnehin CCS zur Emissionsvermeidung geplant ist. Für die Abscheidung von biogenem CO_2 besteht aktuell bisher jedoch kein Anreiz, weshalb diese Potenziale nicht gehoben werden.

Empfehlung: Auf nationaler Ebene sollten Anreize für BECCS an Industrieanlagen mit schwer vermeidbaren Emissionen geschaffen werden, um bereits kurzfristig positive Investitionssignale zu senden und die Planung geeigneter Abscheideanlagen zu vereinfachen.

Im LULUCF-Sektor und für natürliche Senken bestehen mit der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP), dem Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) und der Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes (GAK) bereits wichtige Anreizinstrumente. Diese Förderungen leisten einen wichtigen Beitrag zum Natur- und Klimaschutz, sind aber bislang nur begrenzt auf CO_2-Entnahmen ausgerichtet. Zudem werden die Gelder mangels Überprüfbarkeit und Vergleichbarkeit der Klimaschutzleistung bislang noch nicht ergebnisbasiert vergeben.

Grundsätzlich ist eine ergebnisbasierte Förderung im Sinne des Klimaschutzes effizienter. Voraussetzungen sind jedoch geeignete MRV-Methodiken und Zertifizierungsansätze zur Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit der Entnahme.

Empfehlung: Bestehende Förderinstrumente im LULUCF-Bereich (wie GAP und GAK) sollten mit dem Ziel der aktiven Förderung der CO_2-Entnahme weiterentwickelt werden. Darüber hinaus sollte eine ergebnisbasierte Förderung von natürlichen Entnahmemethoden entwickelt und mit der Förderung weiterer Ökosystemdienstleistungen abgestimmt werden. Die Bundesregierung sollte zudem auf europäischer Ebene zusätzliche Anreize für klimafreundliche Landnutzungspraktiken, beispielsweise durch die Bepreisung von Emissionen im LULUCF-Sektor und der Landwirtschaft prüfen.

Langfristig sollte eine verursachergerechte Finanzierung der CO_2-Entnahme durch marktfinanzierte Instrumente angestrebt werden

Das langfristige Zielbild eines effizienten, sich selbst tragenden Marktrahmens erfordert zunehmend auch „marktfinanzierte Instrumente", die nicht mit öffentlichen Ausgaben verbunden sind. Dies sind die Integration in den EU-ETS, Entnahmeverpflichtungen (engl. Carbon Removal Obligation, CRO) außerhalb des EU-ETS sowie öffentlich-private Vereinbarungen. Sie können dafür sorgen, dass die Kosten für CO_2-Entnahmen möglichst verursachergerecht von den verantwortlichen Emittenten gedeckt werden und eine sich selbst tragende Marktstruktur entsteht.

Permanente technische Senken sollten mittelfristig in den EU-ETS integriert werden

Mittelfristig sollten permanente technische Senken in den EU-ETS integriert werden, um eine stabile und nachhaltige Nachfrage nach CO_2-Entnahmen zu schaffen. Eine solche Marktintegration wird dazu beitragen, dass technische Senken nicht ausschließlich auf freiwillige Nachfrage oder staatliche Förderung angewiesen sein werden, und kann auch die Funktionsweise des EU-ETS stärken. So wird ihre Finanzierung schrittweise auf ein verursachergerechtes System umgestellt, bei dem Emittenten ihre Restemissionen ausgleichen. Nicht-permanente Entnahmen sollten hingegen

nicht in den ETS integriert werden, weil bei ihnen die Berechnung der Negativemissionen hohen Unsicherheiten unterliegt.

Eine Integration von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS könnte perspektivisch von intermediären Institutionen begleitet werden. Über eine Institution wie eine unabhängige Europäische Kohlenstoff-Zentralbank (engl. European Carbon Central Bank, ECCB) könnten zudem bereits frühzeitig Entnahmen angereizt werden, die nicht direkt in den EU-ETS integriert, sondern in einer Reserve gehalten werden, beispielsweise um Preisschwankungen auszugleichen und der Verzögerung von Emissionsminderungen (engl. Mitigation Deterrence) vorzubeugen.

Empfehlung: Die Bundesregierung sollte auf EU-Ebene auf eine Integration von permanenten technischen Senken in den EU-ETS hinarbeiten. Dabei sollte auf den Beibehalt eines hohen Ambitionsniveaus bei der Minderung geachtet werden.

Für die netto-negative Phase sind neue Finanzierungsmodelle nötig

Nach der Erreichung von Netto-Treibhausgasneutralität wird eine weitere verursacherfinanzierte Entwicklung der CO_2-Entnahme schwierig. Daher sollten neue Finanzierungsinstrumente entwickelt werden, die das Erreichen einer netto-negativen Bilanz erlauben und dabei eine zumindest teilweise Verursachergerechtigkeit ermöglichen.

Empfehlung: Die Einführung von verpflichtenden CO_2-Entnahmeregelungen wie zum Beispiel sogenannten Clean-up-Zertifikaten (siehe Kapitel 7.2) sollte frühzeitig geprüft werden, wobei auf die Verzahnung mit bestehenden Instrumenten wie dem EU-ETS geachtet werden sollte. Das Ambitionsniveau kann über die richtige Ausgestaltung dieser Instrumente beibehalten oder gar gestärkt werden.

Ein Phasenmodell kann die Entwicklung des Marktrahmens strukturieren

Die Entwicklung von Anreizsystemen für die CO_2-Entnahme lässt sich in verschiedene Phasen einteilen. In einer ersten Phase, der „Marktvorbereitung", werden notwendige regulatorische und technische Rahmenbedingungen gesetzt. In der Phase der „Skalierung" beginnt die großskalige Implementierung von CO_2-Entnahmemethoden, die vor allem durch staatliche Investitionen getrieben wird. Gleichzeitig werden erste (permanente) Entnahmen in den EU-ETS integriert und weitere Vorbereitungen für marktfinanzierte Instrumente getroffen. In der „Marktreife"-Phase sind zumindest permanente Entnahmemethoden vollständig in den EU-ETS integriert, um eine verursachergerechte Finanzierung zu ermöglichen und staatliche Förderungen reduzieren zu können. Die letzte Phase, die „Netto-Negativität", erfordert schließlich die möglichst frühzeitige Einführung neuer Finanzierungsmodelle wie Carbon Takeback Obligations (CTBO), um auch die Erreichung von Netto-Negativität möglichst verursachergerecht finanzieren und den Bedarf der staatlichen Finanzierung minimieren zu können.

2 Summary

This document was prepared by Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) and contains background information and recommendations for the Long-Term Strategy on Negative Emissions (Langfriststrategie Negativemissionen, LNe). The LNe will clarify the role of carbon dioxide removal (CDR) for climate action in Germany.

With dena's support, the Federal Government conducted a multi-month participation process. Prognos AG and the Öko-Institut additionally modelled scenarios for residual emissions and required removals. Perspectives Climate Research contributed an analysis of economic incentives for CDR. This document brings together the results of these processes as well as dena's recommendations for the efficient, targeted and sustainable deployment of CDR in order to reach Germany's climate targets.

CDR is necessary to achieve the national climate targets

Anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions have caused a significant increase in the global average temperature at an unprecedented rate. Given the high costs and the limited and uncertain potentials of technical removal methods, the deep reduction of GHG emissions remains the top priority of climate action in Germany. However, all national net-zero scenarios indicate that, despite ambitious efforts, unavoidable residual emissions from agriculture or industrial processes, inter alia, will remain in 2045, the target year for GHG neutrality.[2] These emissions must be offset by removals.

The necessity of CDR is already reflected in current German and European climate legislation

Both the Federal Climate Protection Act (Klimaschutzgesetz, KSG) and the European Climate Law provide that net-negative GHG emissions are to be achieved after 2050. This means that more CO_2 must then be removed from the atmosphere and stored than greenhouse gases are emitted. § 3(1) KSG sets economy-wide emission reduction targets for 2030 and 2040 and requires Germany to achieve GHG neutrality by 2045. § 3a establishes specific targets for the land-use sector (Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF). In addition, § 3b KSG requires the Federal Government to define targets for "technical sinks" (technische Senken). The Long-Term Strategy on Negative Emissions (LNe) will propose specific targets for these technical sinks.

By developing a joint strategy, Germany can become a global leader in the field of CDR and unlock economic potential along the value chain. The LNe, together with the Carbon Management Strategy (CMS), forms the policy framework for addressing hard-to-abate emissions and achieving long-term climate neutrality goals.

[2] In this document, „climate neutrality", "GHG neutrality", and "net-zero" are generally considered synonyms.

The LNe method assessment shows that a portfolio of removal methods is needed

The LNe method assessment shows that all CDR methods entail advantages and disadvantages. The results indicate that the highest theoretical CDR potential for Germany in 2045 is held by Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) (20 to 60 million tonnes of CO_2). This is followed by Biochar Carbon Removal (BCR) (15 to 25 million tonnes of CO_2), agroforestry systems (8 to 24 million tonnes of CO_2) and Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) (more than 10 million tonnes of CO_2). The theoretical potential of DACCS, however, depends very strongly on the availability of renewable energy.

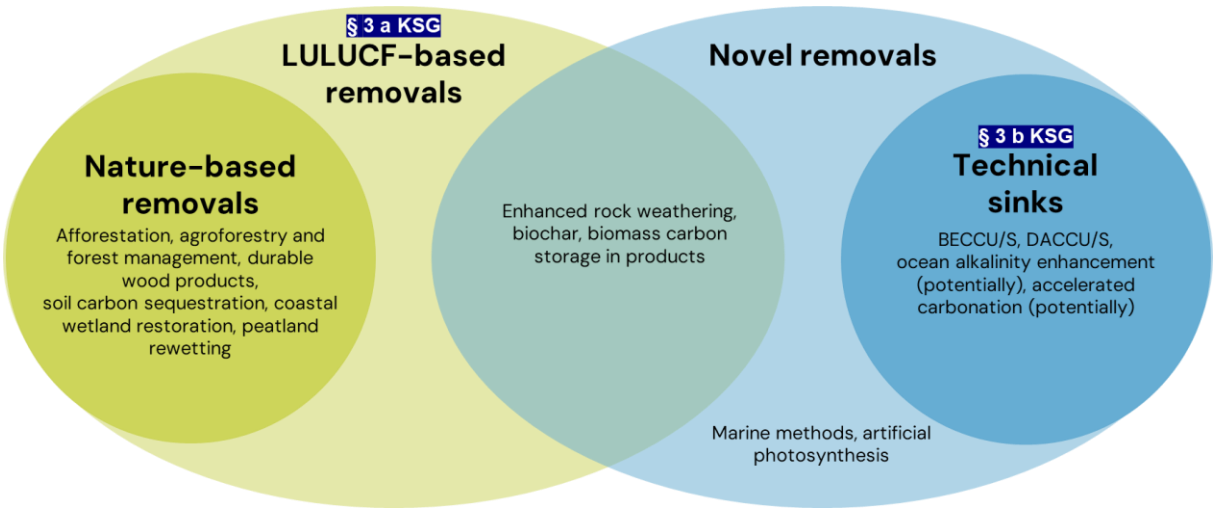


Figure Classification of CDR methods

The removal potential and environmental impact of individual methods depend on the availability of land, storage sites, biomass (especially biogenic residues and waste), and renewable energy. Consequently, the actual potential is sometimes lower than the theoretical potential suggests. Furthermore, there are interdependencies between the removal methods. For instance, a given amount of biomass can only be used for BECCS or biochar production.

Methods of storing CO_2 underground (BECCS, DACCS), or through chemical binding in minerals (accelerated carbonation, enhanced rock weathering), through conversion into biochar under specific pressure and temperature conditions, or in bicarbonate and carbonate ions in the ocean, exhibit high durability according to current knowledge.

Nature-based removal methods in particular (rewetting of peatlands, strengthening of coastal ecosystems, or soil humus enrichment, among others) can have positive environmental effects and provide valuable ecosystem services. For some of these methods, there is an increased risk of carbon loss through natural processes and climate change.

A reduction of land-use conflicts can be achieved through land-efficient removal methods such as agroforestry systems or enhanced rock weathering, but also through marine methods such as ocean alkalinity enhancement (OAE). However, the latter methods are mostly not yet sufficiently researched.

Costs differ considerably between the methods. According to estimates, the highest costs over the coming years (until around 2030) are for Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation (BECCU) / Direct Air Carbon Capture and Utilisation (DACCU) (EUR 200 to 1,200 per tonne of CO_2). This is followed by the costs for DACCS (EUR 650 to 830 per tonne of CO_2), enhanced rock

weathering (up to EUR 400 per tonne of CO_2), biochar (EUR 120 to 250 per tonne of CO_2), and BECCS (EUR 140 to 365 per tonne of CO_2). The costs of nature-based removals (EUR 10 to 320 per tonne of CO_2) are difficult to compare owing to their land requirements and the differing durability of the CO_2 storage.

Recommendation: No single removal method alone has the potential to fully offset the residual emissions expected by 2045. Combining different methods reduces the risks associated with dependence on only a few methods.

Modelled residual emissions serve as a basis for target values for technical sinks

Modelling carried out within the project analyses transformation pathways to GHG neutrality and the corresponding needs for CDR. Scenarios with emission reductions of around 93 per cent, 95 per cent and 97 per cent were examined. The level of residual emissions is 94, 57 and 40 million tonnes CO_2eq respectively, a large share of which is attributable to the agricultural sector. A further part stems from industrial process emissions.

The potential for CDR is limited – for most methods by the costs as well as the land and energy requirements. GHG neutrality in Germany can therefore only be achieved through deep emission reduction and complementary CDR. Accordingly, the targets for technical sinks should not be based on reduced mitigation efforts (LNe93 scenario). At the same time, a reduction to only 3 per cent residual emissions in the LNe97 scenario would be extremely ambitious against the background of current emission trends, planned measures and technical limitations.

The Federal Government is tasked with setting targets for technical sinks under § 3b KSG, taking account of uncertainties and supporting the resilient achievement of GHG neutrality as required under § 3(1) KSG. For 2045, the target should therefore be based on the middle scenario (LNe95) of the modelling. This results in a recommended target range of 17–28 million tonnes of CO_2 removal.

The lower value of the range is based on the LNe95 scenario assuming the LULUCF target is met. The upper value includes a safety margin, considering the vulnerability of the LULUCF sector. This should ensure that the overarching climate targets can still be achieved in the event of a shortfall against the LULUCF sector targets under § 3a KSG.

Recommendation: Technical sink targets should be set at an ambitious, yet realistic, level of residual emissions. The LNe95 scenario represents a high level of ambition in terms of mitigation and therefore forms the basis for the target value recommendation.

dena recommendation for LNe target values: Based on the LNe modelling, dena suggests the following target ranges for technical sinks (according to § 3b KSG):

- At least 5 million tonnes of CO_2 in 2035
- 10 to 15 million tonnes of CO_2 in 2040
- 17 to 28 million tonnes of CO_2 in 2045

The regulatory framework should be amended to enable the various CDR methods

The implementation of CDR methods is currently constrained by various legal and regulatory obstacles. The existing legal framework impedes both the practical implementation of projects and research. Of particular importance are legal amendments to enable CDR based on Carbon Capture and Storage (CCS), as well as a simplification and acceleration of removal projects in the LULUCF

sector. In addition, uniform standards for Monitoring, Reporting and Verification (MRV) are lacking, which limits the comparability and transparency of removal projects.

Recommendation: Amendments to the Federal Nature Conservation Act, the Federal Soil Protection Act and the Federal Water Act should simplify the implementation of some terrestrial removal methods, such as the strengthening of coastal ecosystems or the rewetting of peatlands, and reduce legal uncertainties.

Recommendation: To simplify the permitting and implementation of BECCS and Biochar Carbon Removal (BCR), the Federal Immission Control Act and the Federal Immission Control Ordinance should be amended and clarified.

Reviewing the KSG targets requires the use of inventory reporting methodologies and an unambiguous assignment of removal methods to §§ 3a and 3b KSG

Whether KSG targets are met or not is evaluated based on the German GHG inventory. Currently, only some of the CDR methods can be included in the inventory. This is the case for BECCS and for most of the natural sinks as their effect on the respective land categories in the LULUCF sector is being reported. For the remaining removal methods, no inventory reporting methodologies have been developed yet.

Inventory reporting methodologies differ from methodologies for project certification. The former are currently being developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and made available to national governments in a new methodology report (see Chapter 4.3.2). The latter are already available and used on the VCM.

Since removals can contribute to both the LULUCF targets pursuant to § 3a KSG and the targets for technical sinks under § 3b KSG, it must be clearly determined which removal method will contribute to which target in the future. Whereas the scope of the LULUCF target is already defined and established internationally, this is not the case for technical sinks. As each removal can only count towards one of the targets, the scope of § 3b KSG must be defined in relation to the scope of § 3a KSG (see Chapter 4.3.3). The Federal Government should take the following approach:

Recommendation: Removal methods should only count towards the targets of §§ 3a and 3b KSG if there is a respective inventory reporting methodology, or if the IPCC plans to provide one in its new methodology report. All removal methods that are, or are expected to be, reported under Common Reporting Table (CRT) category 4 (LULUCF) contribute to the LULUCF target in § 3a KSG. The remaining removal methods should be defined as technical sinks and contribute to the target under § 3b KSG.

Whether these targets can also be achieved via cross-border mechanisms in the future, for example under Article 6 of the Paris Agreement, depends both on European law and on the concrete design of § 3(3) KSG. Depending on its political objectives, the Federal Government should therefore decide in favour of one of the two options.

Recommendation option 1: The Federal Government should amend the wording of § 3(3) so that both mitigation and removals are covered equally. This would create a legally secure possibility for the use of cross-border mechanisms for the purpose of CDR. In theory, this could achieve economically efficient climate action by carrying out removals where they are cheapest.

Recommendation option 2: The Federal Government should clarify that the targets under §§ 3, 3a and 3b KSG must be achieved purely territorially with respect to removals. Cross-border mechanisms for CDR do not fall within the scope of § 3(3) of the KSG since it covers only mechanisms 'for reducing greenhouse gas emissions'. This preserves the high level of national ambition and avoids risks in monitoring and recognising international climate action achievements.

Accurate accounting and standards for high-quality removals at project level are essential for effectively governing the ramp-up

In order to incentivise climate-effective removals, it is essential that the removal performance of individual projects can be reliably measured and quantified. In the past, there have been recurring issues with the integrity of certified removal projects, including the failure to meet central additionality requirements. State certification systems, such as those under the CRCF or Article 6 of the Paris Agreement, aim to address this issue. However, it remains unclear whether these standards are sufficient to address the challenges of certifying removals, particularly with regard to additionality, reversibility, and sustainability.

Recommendation: Efforts should be undertaken to improve certifications and standards, particularly at the European level. In addition, within the framework of national incentive systems or funding instruments, the Federal Government can impose additional requirements on the additionality, durability or sustainability of removal projects that go beyond those of established or future certification standards (e.g. the CRCF). This may be necessary to achieve the Federal Government's policy objectives.

Recommendation: The EU Green Claims Directive (GCD) should determine for which purposes companies may use CRCF certificates. During this process, the Federal Government should ensure that company claims regarding these certificates are transparent and credible. This is particularly relevant given the possibility of simultaneously counting certified removals towards both corporate targets and Nationally Determined Contributions (NDCs) under the Paris Agreement.

An efficient ramp-up of CDR requires adequate incentives

While many countries incentivise or regulate emission reductions through Emissions Trading Systems (ETS), carbon taxes or regulatory requirements, incentives and viable business models for CDR remain limited. Voluntary Carbon Markets (VCMs) have so far made only a modest contribution to scaling removals.

Recommendation: The Federal Government should establish an efficient and fair market framework for CDR that stimulates investment, ensures environmental integrity, and minimises the need for public support. Key principles should include efficient use of public funds, polluter-based financing, low administrative burden and ease of implementation.

A phase model can structure the development of the market framework

The development of a CDR market framework can be divided into several phases:

- In a first phase, 'market preparation', the necessary regulatory and technical framework conditions are set.
- In the 'scaling' phase, the large-scale implementation of CDR methods begins, driven primarily by government investment. At the same time, first (permanent) removals are integrated into the EU ETS and further preparations are made for market-financed instruments.

- In the 'market maturity' phase, at least permanent removal methods are fully integrated into the EU ETS in order to enable polluter-based financing and to allow state funding to be reduced.
- The final phase, 'net negativity', requires the introduction of new financing models, such as Carbon Take-Back Obligations (CTBOs), as early as possible in order to enable the financing of net negativity on a polluter-based footing as much as possible, minimising the need for state subsidies.

Market enablers are no-regret measures

Market enablers are essential for a functioning market for CDR. These include the funding of research and development (R&D), developing certification standards and labels, and introducing reporting obligations. In the initial phase, targeted investment in technological development and accompanying scientific research can contribute to an accelerated ramp-up.

Recommendation: The Federal Government should support the establishment of suitable labels and reporting standards as well as robust certification and MRV systems or accompany the corresponding processes at European level to ensure a harmonised, coherent design.

Recommendation: The Federal Government should establish funding programmes to develop and test practicable and accepted removal methods, pilot projects, and monitoring concepts in a public setting. For nature-based removals, existing programmes, such as those within the Natural Climate Protection Action Programme (Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz), should be continued and expanded.

Public investment is required to kick-start the scaling of CDR

Public funding can accelerate the early deployment of CDR through instruments such as climate-neutral public administration, results-based and activity-based funding. Results-based approaches are generally preferable where robust MRV systems are available.

Recommendation: The Federal Government should provide initial financing for CDR at an early stage. To this end, it should launch reverse auctions as soon as possible and expand them over time. Both technology-specific auctions for the targeted funding of individual removal methods and technology-agnostic auctions for capturing cost advantages through increased competition should be held. Following connection to the European Union Emissions Trading System (EU ETS), CCfDs should be used to fund removals.

There is also significant near-term potential for BECCS at industrial facilities with hard-to-abate emissions, such as cement, lime and thermal waste treatment plants. Currently, however, there is no incentive to capture biogenic CO_2, which is why these opportunities are not being realised.

Recommendation: At the national level, incentives for BECCS at industrial plants with hard-to-abate emissions should be created in order to encourage investment in the short term and simplify the planning of suitable capture facilities.

Existing instruments in the LULUCF sector, including the Common Agricultural Policy (CAP), the Natural Climate Protection Action Programme (Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz, ANK) and the Joint Task for the Improvement of Agricultural Structures and Coastal Protection (Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes, GAK) could play a

greater role in promoting removals. So far, they have only accounted for removals to a limited extent. Furthermore, due to the lack of verifiability and comparability of climate impact, funds are not yet awarded on a results basis.

Recommendation: Existing funding instruments in the LULUCF sector (such as the CAP and GAK) should be developed further to support CDR. In addition, results-based funding for nature-based removal methods should be developed and coordinated alongside funding for other ecosystem services. Additional incentives for climate-friendly land use should also be explored at European level.

In the long term, polluter-based financing of CDR should be pursued through market-financed instruments

The long-term vision of an efficient, self-sustaining market framework requires market-financed instruments that are not linked to public spending. Examples of such instruments include integration into the EU ETS, Carbon Removal Obligations (CRO) outside the EU ETS, and public-private agreements. Specifically, integrating permanent technical removals into the EU ETS would create stable demand for CDR and gradually shift financing towards a polluter-based model. Such integration of removals into the EU ETS could be accompanied by intermediary institutions. By contrast, non-permanent removals should not be integrated into the ETS, as the calculation of negative emissions is subject to high levels of uncertainty.

Recommendation: The Federal Government should work at the EU level towards an integration of permanent technical removals into the EU ETS. In doing so, attention should be paid to maintaining a high level of mitigation ambition.

New financing models are needed for the net-negative phase

Once GHG neutrality has been achieved, further polluter-based development of CDR becomes difficult. Therefore, new financing instruments should be developed that allow a net-negative balance to be achieved while ensuring at least partial fairness based on pollution.

Recommendation: The introduction of mandatory CDR arrangements – such as so-called clean-up certificates (see Chapter 5.2) – should be examined at an early stage, with attention paid to interlocking with existing instruments such as the EU ETS. The right design of these instruments can maintain or even strengthen the level of ambition.

3 Einleitung

Neben tiefgreifender Emissionsminderung ist für Treibhausgasneutralität auch die CO_2-Entnahme erforderlich

Vom Menschen verursachte Treibhausgas (THG)-Emissionen haben in einer beispiellosen Geschwindigkeit zu einer Klimaveränderung mit einem deutlichen Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen geführt. Gleichzeitig werden die weltweiten THG-Emissionen nicht schnell genug reduziert, um die globale Erwärmung im erforderlichen Maß abzubremsen bzw. anzuhalten, damit die 2015 in Paris vereinbarten Klimaziele erreicht werden. So entwickelt zum Beispiel der IPCC Szenarien, in denen aufgrund zu langsamer THG-Minderung die zu viel freigesetzten Treibhausgase wieder aus der Atmosphäre entnommen werden müssen (Overshoot). Grundsätzlich ist die weitestgehende, dauerhafte Vermeidung von THG-Emissionen in Deutschland und weltweit über alle Sektoren hinweg für einen wirksamen Klimaschutz unerlässlich. Sie bleibt oberste Priorität des Klimaschutzes.

Die Bundesregierung hat daher im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) ambitionierte Minderungsziele festgeschrieben: Die THG-Emissionen in Deutschland sollen bis zum Jahr 2030 um mindestens 65 Prozent und bis zum Jahr 2040 um mindestens 88 Prozent gegenüber 1990 gemindert werden. Bis zum Jahr 2045 ist Netto-THG-Neutralität zu erreichen. Das KSG ist ein wesentliches Instrument zur Umsetzung des Übereinkommens von Paris (ÜvP) und der europäischen Vorgaben zum Klimaschutz.

Darüber hinaus sehen sowohl das KSG (§ 3 Abs. 2) als auch das Europäische Klimagesetz vor, dass nach dem Jahr 2050 netto-negative THG-Emissionen erreicht werden sollen. Dies bedeutet, dass dann mehr CO_2 aus der Atmosphäre entnommen und gespeichert werden soll, als im selben Zeitraum Treibhausgase freigesetzt werden. Hierzu müssen unvermeidbare Restemissionen ausgeglichen werden, um die THG-Neutralität zu erreichen.[3] Zum anderen muss durch CO_2-Entnahmen und daraus resultierende Negativemissionen die Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre wieder gesenkt werden, um das 1,5-°C-Ziel einzuhalten und einen Overshoot und so die Risiken für schwerwiegende und irreversible Folgen für Mensch und Ökosysteme auf der Erde zu mindern.

Die Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) soll die Rolle der CO_2-Entnahme für den Klimaschutz in Deutschland klären

Mit der LNe wird ein gemeinsames Verständnis der Rolle der CO_2-Entnahme für den Klimaschutz in Deutschland geschaffen. Zur Vorbereitung der LNe hat die Bundesregierung mit Unterstützung der Deutschen Energie-Agentur (dena) einen Beteiligungsprozess durchgeführt. Die Ergebnisse aus dem Beteiligungsverfahren sind in diesem Dokument zusammengefasst und dienen der Bundesregierung als eine Grundlage für die LNe. Die LNe verfolgt dabei folgende Ziele:

[3] Unter unvermeidbaren Restemissionen wird der Anteil der Emissionen verstanden, der nach tiefgreifender THG-Minderung und einer Transformation der verschiedenen Sektoren sowie nach dem Einsatz von CO2-Abscheidetechnologien im Zieljahr der THG-Neutralität noch verbleibt. Diese Emissionen stammen vorrangig aus der Landwirtschaft und aus Prozessemissionen der Industrie. Die Definition von unvermeidbaren Restemissionen hat neben einer technischen jedoch auch eine ökonomische und eine politische Komponente.

- Auf Basis der LNe sollen Zielwerte für technische Senken festgelegt werden. In § 3b KSG werden Ziele für technische Senken für die Jahre 2035, 2040 und 2045 angekündigt, die die Bundesregierung unter Berücksichtigung der besonderen Bedeutung des LULUCF-Sektors und auf Basis der LNe per Rechtsverordnung erlassen wird. Der Bedarf an und das Potenzial von negativen Emissionen werden anhand von Szenarien ausgelotet.
- Um die langfristige Bedeutung von Negativemissionen stärker in den Blick zu nehmen, wird in der LNe der Zeitraum bis zum Jahr 2060 betrachtet.
- Die LNe soll einen verlässlichen Governance-Rahmen für CO_2-Entnahmen aufzeigen und eine tragfähige und international anschlussfähige Integration von Negativemissionen in die nationale Klimaschutzarchitektur ermöglichen.
- In der LNe sollen verschiedene Anreizinstrumente und Optionen für den Hochlauf von CO_2-Entnahmen dargestellt und bewertet sowie Empfehlungen für die Etablierung eines langfristig tragfähigen Marktrahmens ausgesprochen werden.

Grundlage der LNe sind eine breite Stakeholder-Beteiligung sowie detaillierte wissenschaftliche Analysen

Die ressortabgestimmten Eckpunkte[4], die am 26. Februar 2024 durch das (damalige) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) veröffentlicht wurden, bilden den Rahmen für die Ausarbeitung der LNe. Das vorliegende Grundlagenpapier wurde durch die dena erarbeitet. In dieses Dokument sind die wissenschaftlichen Analysen und Modellierungen der Gutachter des Öko-Instituts und der Prognos AG sowie von Perspectives Climate Research eingeflossen. Die Bewertung von Entnahmemethoden ist in enger Zusammenarbeit mit der Wissenschaft entstanden. Im gesamten Prozess erfolgte eine breit angelegte Beteiligung von Mai 2024 bis März 2025, die eine Vielzahl an Akteuren aus Wirtschaft, Zivilgesellschaft, Politik und Wissenschaft einbezogen hat und ihre Perspektiven zusammenführen sollte. Viele der hier dargestellten Inhalte und Empfehlungen wurden fachlich von der dena erarbeitet und im Beteiligungsprozess mit den Stakeholdern diskutiert und weiterentwickelt. Der Beteiligungsprozess hat auch internationale Best Practices sowie laufende EU-Prozesse und -Gesetzgebungsverfahren berücksichtigt. Er bestand aus drei zentralen Elementen:

- Fachlich fokussierte Arbeitsgruppen, um den Arbeitsstand der Strategie zu diskutieren und weiterzuentwickeln sowie spezifische Bedarfe für Forschung und Entwicklung zu identifizieren
- Plenumsveranstaltungen zur Diskussion der Arbeitsergebnisse aus den Arbeitsgruppen mit der Möglichkeit zum Feedback durch die Stakeholder
- Online-Beteiligungen, um zentrale Fragestellungen der LNe zu kommentieren und Arbeitsergebnisse weiterzuentwickeln

Die Arbeitsgruppen (AG) haben sich mit folgenden spezifischen Themenbereichen befasst:

- Die AG1 „Bewertung von Methoden und Technologien“ hat verschiedene Methoden zur CO_2-Entnahme definiert und bewertet sowie Kriterien für ihre Bewertung entwickelt.

[4] (BMWK, 2024).

- Die AG2 „Governance und Rechtsrahmen“ hat Vorschläge für Regelungen und rechtliche Rahmenbedingungen zur Integration von Negativemissionen in die Klimaschutzarchitektur erarbeitet.
- Die AG3 „Ökonomische Anreize und Marktrahmen“ hat mögliche ökonomische Anreizmodelle und Ausgestaltungsoptionen des Marktrahmens analysiert.

Im Projektverlauf erarbeitete Präsentationen, Hintergrundmaterialien und Berichte wurden während der Projektlaufzeit auf einer BMWK/BMWE-Projektseite zur Verfügung gestellt.

Folgende Ministerien wurden ebenfalls beteiligt: Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN), Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) sowie Bundesministerium der Finanzen (BMF).

3.1 Definitionen und Begriffsverständnis

Der Begriff **Senke** (engl. Sink) bezeichnet nach dem United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) einen „Vorgang, eine Tätigkeit oder ein[en] Mechanismus, durch die ein THG, ein Aerosol oder eine Vorläufersubstanz eines THG aus der Atmosphäre entfernt wird“. Kohlenstoffsenken entnehmen der Atmosphäre CO_2 durch den Transfer in andere Reservoirs (terrestrisch, ozeanisch oder geologisch) und wirken damit invers zu CO_2-Quellen, die durch die Freisetzung von CO_2 dessen Menge in der Atmosphäre vergrößern. Angelehnt an dieses Verständnis ist im KSG die Netto-THG-Neutralität definiert als „das Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken“. „Abbau“ bezeichnet dabei ebenfalls die THG-Entnahme aus der Atmosphäre.

Der Begriff der **CO_2-Entnahme** (engl. Carbon Dioxide Removal, CDR) bezeichnet in diesem Dokument die Aktivität der anthropogenen Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre durch Senken. Damit lehnt es sich an die Definition der IPCC-Berichte an. Demnach sind CO_2-Entnahmen definiert als „anthropogene Aktivitäten, bei denen Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus der Atmosphäre entnommen und langfristig in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten gespeichert wird“[5]. Eine CO_2-Entnahme kann durch biologische, chemische oder physikalische Prozesse erfolgen. Dazu gehört die CO_2-Bindung durch Photosynthese genauso wie die technische Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre. Im Begriff CO_2-Entnahme sind alle Treibhausgase eingeschlossen, auch wenn bislang lediglich die Entnahme von CO_2 als praxisrelevant angesehen wird. Alternativ kann daher auch der Ausdruck „Treibhausgas-Entnahme“ (THG-Entnahme, engl. Greenhouse Gas Removal) genutzt werden. Eine Übersicht über aktuelle Definitionen des Begriffs CO_2-Entnahme kann Infobox 1 entnommen werden.

Methoden und Technologien zur CO_2-Entnahme, im Folgenden „**CO_2-Entnahmemethoden**“ oder kurz „Methoden“ lassen sich anhand verschiedener Merkmale gruppieren. Folgende Begriffe werden

[5] (IPCC, 2023).

im vorliegenden Dokument verwendet, um unterschiedliche Gruppen von Entnahmemethoden zu bezeichnen:

Gruppierung basierend auf dem KSG

- **Technische Senken** bzw. technische CO_2-Entnahmemethoden:
  Alle Methoden, die nicht in CRT-Kategorie 4 (LULUCF) berichtet werden (siehe Kapitel 6.3.2 und 6.3.3).
- **LULUCF-basierte Senken** bzw. LULUCF-basierte CO_2-Entnahmemethoden:
  Methoden, die nach den aktuellen Inventar-Berichterstattungsmethodiken des IPCC in Common Reporting Table (CRT)[6] -Kategorie 4 (LULUCF) berichtet werden, oder für die eine solche Zuordnung zu erwarten ist (siehe Kapitel 6.3.2 und 6.3.3). Die CRT-Kategorie 4 entspricht dem KSG-Sektor 7 (LULUCF) in Deutschland.

Weitere Möglichkeit der Gruppierung

- **Natürliche Senken** bzw. natürliche CO_2-Entnahmemethoden:
  Untergruppe der LULUCF-basierten Senken, für die Berichterstattungsmethodiken für CRT-Kategorie 4 bestehen und die von Staaten bereits in THG-Inventaren berichtet werden. Die meisten dieser Entnahmemethoden werden bereits in großem Umfang praktiziert. Meist entnehmen sie der Atmosphäre per Photosynthese CO_2, das sie durch Pflanzenwachstum als Biomasse binden. Die Speicherung des Kohlenstoffs erfolgt im Allgemeinen in der Biosphäre: in lebender und toter Biomasse, in organischen und mineralischen Böden aber auch in Holzprodukten. Natürliche Senken weisen eine Schnittmenge mit dem natürlichen Klimaschutz auf, da sie mitunter weitere Funktionen im natürlichen Ökosystem erfüllen, zum Beispiel indem sie zur Biodiversität beitragen.[7]
- **Neuartige Senken** bzw. neuartige CO_2-Entnahmemethoden:
  Alle weiteren Methoden, die nicht unter das Verständnis von natürlichen Senken fallen. Diese Entnahmemethoden weisen technische Prozessschritte auf (z. B. die CO_2-Abscheidung, die Pyrolyse oder das Mahlen von Gestein). Anders als die meisten natürlichen Senken speichern neuartige Senken Kohlenstoff in der Regel nicht in der Biosphäre, sondern in geologischen Formationen (Lithosphäre), in Gewässern (Hydrosphäre) oder in Produkten (Technosphäre). Im Allgemeinen sind neuartige Senken weniger ausgereift und entsprechend weniger verbreitet. Für neuartige Senken bestehen oft noch keine IPCC-Berichterstattungsmethodiken. Sie werden daher üblicherweise noch nicht durch die Staaten in THG-Inventaren berichtet.

[6] Die CRTs sind standardisierte Berichtstabellen unter dem ÜvP, die (fast ausschließlich) quantitative Informationen zu nationalen THG-Emissionen beinhalten. Anhand ihrer und des Nationalen Inventarberichts berichten Staaten über ihre THG-Emissionen an die UNFCCC. Die CRT geben Aufschluss über Emissionswerte nach THG, Sektor bzw. Kategorie, Aktivitätsdaten und implizierten Emissionsfaktoren.

[7] Dieses Begriffsverständnis lehnt sich an den "State of Carbon Dioxide Removal" Bericht an (Smith, et al., 2023). Dieser unterscheidet zwischen konventioneller (engl. conventional) und neuartiger (engl. novel) CO_2-Entnahme.

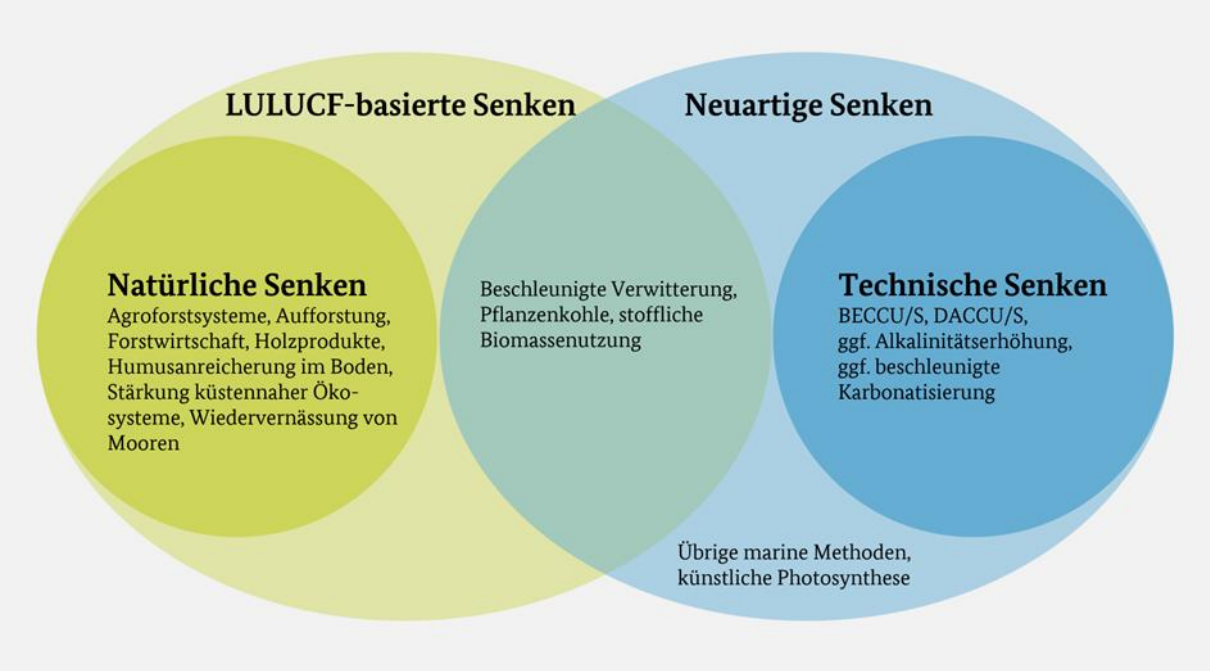


Abbildung 1 Schematische Darstellung der Gruppierung von CO_2-Entnahmemethoden (für die Zuordnung der einzelnen Methoden siehe Kapitel Zuordnung der CO_2-Entnahmemethoden zu §§ 3a und 3b KSG6.3.3) (eigene Abbildung)

(Netto-)Negativemissionen (in Inventaren) werden wie folgt verstanden: In der jährlichen Berichterstattung in nationalen THG-Inventaren gemäß den Vorgaben der UNFCCC werden sowohl THG-Emissionen als auch CO_2-Entnahmen berichtet. Eine Verrechnung pro CO_2-Entnahmeaktivität findet nicht statt. Stattdessen wird jede Emission oder Entnahme einer einzigen Quelle oder Senke zugeordnet (siehe auch Infobox 2). Werden in einer Unterkategorie des nationalen THG-Inventars oder in seiner Gesamtbilanz mehr Entnahmen als Emissionen berichtet, so spricht man von (Netto-)Negativemissionen. Dies entspricht dem Zielbild nach § 3 Abs. 2 Satz 2 KSG, wonach in Deutschland ab dem Jahr 2050 negative THG-Emissionen erreicht werden sollen.

Ein anderes Verständnis von Negativemissionen (in Projekten) gilt bei der Zertifizierung von CO_2-Entnahmeprojekten. Negativemissionen können hier das Ergebnis einer CO_2-Entnahmeaktivität sein, wenn im Zusammenhang mit der Aktivität mehr Treibhausgase aus der Atmosphäre entnommen als freigesetzt werden. Dies hängt von der Gesamtbilanz der direkten und indirekten Brutto-Emissionen und -Entnahmen der betrachteten Prozesskette ab. Dieser Ansatz wird im Rahmen von projektbasierten Zertifizierungen von CO_2-Entnahmeaktivitäten verfolgt (siehe Kapitel 6.4).

Das Verständnis der Dauerhaftigkeit von CO_2-Entnahmen unterscheidet sich ebenfalls zwischen der Inventar-Berichterstattung und der Zertifizierung von Projekten. In Inventaren wird die relevante Menge des außerhalb der Atmosphäre gebundenen Kohlenstoffs durch den jährlichen Abgleich von Bestandsänderungen in Kohlenstoffspeichern (engl. Carbon Stock Changes) bzw. durch die Analyse von Aktivitätsdaten zu CO_2-Flüssen ermittelt. Dies erfasst den Zustand am Ende einer jeweiligen Berichtsperiode (ein Kalenderjahr), und ermöglicht einen Vergleich mit vorangegangen Jahren. Die Dauer der CO_2-Speicherung einzelner CO_2-Entnahmen lässt sich so jedoch nicht erfassen. Bei der projektbasierten Zertifizierung von CO_2-Entnahmen oder der Ausgestaltung von Anreizsystemen kann die Dauer der Speicherung der CO_2-Entnahmeaktivität hingegen berücksichtigt werden. Welche Speicherdauer als "permanent" gilt, hängt von den jeweiligen Vorgaben (eines Zertifizierungssystems) ab (siehe auch Kapitel 6.4).

Unter **Restemissionen** (auch Residualemissionen) sind jene Emissionen zu verstehen, die aus technischen, wirtschaftlichen oder politischen Gründen zum Zeitpunkt des Zieljahres der Netto-THG-Neutralität verbleiben. Zum Erreichen der Netto-THG-Neutralität müssen diese Restemissionen durch eine entsprechende Menge an CO_2-Entnahmen ausgeglichen werden.

Unter **fossilem CCS** (foCCS) wird die CO_2-Abscheidung und -Speicherung (engl. Carbon Capture and Storage, CCS) von fossilem CO_2 an Punktquellen verstanden. Diese wird in der LNe grundsätzlich nicht betrachtet, da sich damit keine negativen Emissionen erzielen lassen. Fossiles CCS verhindert lediglich größtenteils, dass fossiles CO_2 überhaupt erst in die Atmosphäre gelangt. Dies ist daher Gegenstand der Carbon Management-Strategie (CMS), ebenso wie der Transport und die Speicherung von CO_2. Einige technische Komponenten der CCS-Prozesskette, insbesondere die geologische Speicherung, kommen sowohl bei fossilem CCS als auch bei den CO_2-Entnahmemethoden Bioenergie mit Carbon Capture and Storage (BECCS) und Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) zum Einsatz. Darüber hinaus erfordern auch einige Entnahmemethoden vorab die Abscheidung fossiler CO_2-Mengen: beispielsweise die Abscheidung bei Kalzinierung von Kalkstein für die beschleunigte Karbonatisierung oder bevor dieser zur Alkalinitätserhöhung ausgebracht wird.

Solar Radiation Management bzw. Modification (**SRM**) beschreibt im Allgemeinen anthropogene Eingriffe zur Steigerung des Albedos der Erde beziehungsweise der Reduktion der einfallenden Sonnenstrahlung. SRM ist klar von der CO_2-Entnahme zu unterscheiden, auch wenn die Konzepte von SRM und einigen CO_2-Entnahmemethoden in der Vergangenheit beide unter dem Oberbegriff „Geoengineering" geführt wurden. Durch SRM wird der Atmosphäre kein CO_2 entnommen und daher ist es nicht Gegenstand der LNe.

Weitere bestehende Definitionen von CO_2-Entnahme[8]

CDRmare / CDRterra

"1. Das entnommene Kohlendioxid muss aus der Atmosphäre stammen.
2. Die anschließende Speicherung muss sicher und dauerhaft sein.
3. Die Kohlendioxidentnahme muss durch menschliche Aktivitäten und zusätzlich zu den natürlichen Aufnahmeprozessen der Erde erfolgen."

DIN SPEC 91458

„Anthropogene Handlung der langfristigen Bindung von CO_2 in anthropogen erschlossenen oder verstärkten Senken, die den Gehalt an CO_2 in der Erdatmosphäre reduziert."

State of CDR

„Abscheidung von CO_2 aus der Atmosphäre und dessen Speicherung für Jahrzehnte bis Jahrtausende. Das abgeschiedene CO_2 muss aus der Atmosphäre stammen, nicht aus fossilen Quellen. Das CO_2 kann direkt oder indirekt aus der Atmosphäre entnommen werden, z. B. über Biomasse oder Meerwasser. Die anschließende Speicherung muss dauerhaft sein, so dass [sic] das CO_2 nicht bald wieder in die Atmosphäre gelangt. Die Entnahme muss die Folge eines menschlichen Eingriffs sein, zusätzlich zu den natürlichen Prozessen der Erde. Es ist wichtig, CDR von anderen

[8] (Pongratz, Geneuss, Hoppe, & Miller, 2024; Smith S. , et al., 2024).

verwandten Begriffen und Konzepten wie der CO_2-Abscheidung und -Nutzung (engl. Carbon Capture and Utilisation, CCU) bzw. -Speicherung (engl. Carbon Capture and Storage, CCS) zu unterscheiden."

Verordnung (EU) 2024/3012 zur Zertifizierung von dauerhaften CO_2-Entnahmen, kohlenstoffspeichernder Landbewirtschaftung und der CO_2-Speicherung in Produkten – (CRCF-Verordnung)
„Die anthropogene Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre und dessen dauerhafte Speicherung in geologischen, terrestrischen Speichern sowie in den Speichern der Ozeane oder in langlebigen Produkten" (Art. 2 Abs. 1).

Infobox 1: Weitere bestehende Definitionen von CO_2-Entnahme

3.2 Einbettung in andere Strategien und Rechtsakte

Relevante Prozesse, die die Inhalte der Entscheidungsgrundlage direkt oder indirekt beeinflussen, finden sich sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene. Teilweise handelt es sich dabei um verbindliche rechtliche Vorgaben, teilweise um Strategien, die politische Ziele abbilden. Beides zusammen definiert den Handlungsspielraum der Regierung in Bezug auf Aspekte der CO_2-Entnahmen, die in der Entscheidungsgrundlage adressiert werden.

Das KSG ist dabei das zentrale, rechtlich verbindliche Rahmeninstrument, in dem Deutschland seine völkerrechtlichen Verpflichtungen aus dem ÜvP in nationales Recht umsetzt. Das übergeordnete Ziel des KSG ist die Erreichung von Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 und das Erreichen negativer Emissionen nach dem Jahr 2050. Das KSG adressiert die CO_2-Entnahme in zwei separaten Vorgaben: In § 3a KSG werden Ziele für die Netto-Senkenleistung des LULUCF-Sektors definiert. Ihm wird per Gesetz eine besondere Bedeutung für den Klimaschutz in Deutschland beigemessen. Demnach soll er bis zum Jahr 2030 im vierjährigen Mittel eine Netto-Entnahmeleistung von mindestens 25 Mio. Tonnen CO_2äq, bis 2040 von mindestens 35 Mio. Tonnen CO_2äq und im Jahr 2045 von mindestens 40 Mio. Tonnen CO_2äq erreichen. Durch die Novelle vom 26. April 2024 wurde mit § 3b KSG vom Gesetzgeber vorgegeben, dass auch technische Senken zum Erreichen von Treibhausgasneutralität und negativen Emissionen ab 2050 beitragen sollen. Dabei ist die Definition von Zielwerten noch offen.

Das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) stellt einen Förderrahmen für Projekte zur Stärkung der natürlichen Senkenleistung von Ökosystemen bereit. Es umfasst beispielsweise Wiederherstellungsprojekte sowie eine Moorschutz- und Wasserstrategie. Die vorgesehenen Maßnahmen haben direkten Einfluss auf die CO_2-Entnahme im LULUCF-Sektor. Das ANK beinhaltet jedoch keine nähere Betrachtung möglicher Potenziale und Nutzungskonflikte, sodass im Rahmen der Methodenbewertung in der LNe eine Bewertung natürlicher Senken vorgenommen wird. Auch Herausforderungen bei der Kategorisierung natürlicher und technischer Senken nach §§ 3a und 3b KSG werden betrachtet.

Mit der CMS erarbeitet das BMWE eine Strategie zum Einsatz von CCU/S in der Industrie und bei Abfallbehandlungsanlagen. Ein Schwerpunkt dieser Strategie wird sein, die erforderlichen rechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen für die Nutzung von CCU/S und den notwendigen Infrastrukturaufbau zu schaffen. Die CMS ist damit Anknüpfungspunkt für alle CO_2-Entnahmemethoden, die die technische Abscheidung oder Speicherung von CO_2 als einen Prozessschritt enthalten und deshalb auf eine CO_2-Infrastruktur angewiesen sind. In der vorliegenden Entscheidungsgrundlage wird deshalb die Analyse der CCS-basierten CO_2-Entnahme vertieft und auf den Abstimmungsbedarf zwischen den beiden Strategien, insbesondere beim Infrastrukturhochlauf und der Abschätzung der zu speichernden CO_2-Mengen, hingewiesen. Es sind keine Maßnahmen zum begleitenden Infrastrukturaufbau, zur geologischen Speicherung oder Ähnlichem enthalten.

EU-Rechtsakte haben maßgeblichen Einfluss auf die nationalen Klimaschutzambitionen

Unter dem ÜvP sind die Vertragsparteien dazu verpflichtet, nationale Beiträge zum internationalen Klimaschutz zu definieren, sogenannte Nationally Determined Contributions (NDCs). Im aktuellen NDC werden CO_2-Entnahmen bislang nicht explizit erwähnt, jedoch steht bis September 2025 die Aktualisierung der NDCs an, in die Negativemissionen gegebenenfalls aufgenommen werden. Für die Mitgliedstaaten der EU besteht dabei die Besonderheit, dass die EU als supranationale Organisation ebenfalls Vertragspartei ist. Anstelle eigener, nationaler NDCs reichen die Mitgliedsstaaten der EU gemeinsam einen EU-NDC ein.

Relevant ist ferner das Europäische Klimagesetz (Verordnung (EU) 2021/1119), nach dem die EU bis zum Jahr 2050 „Klimaneutralität" erreichen muss. Derzeit laufen auf europäischer Ebene Verhandlungen über das EU-weite Ziel zur Emissionsreduktion für das Jahr 2040. Sollte im Rahmen des EU-Klimaziels für das Jahr 2040 auch die Rolle von Negativemissionen geklärt sowie der Beitrag der CO_2-Entnahme festgelegt werden, hätte dies für nationale Entnahmeziele womöglich Anpassungsbedarf zur Folge. Bislang liegt lediglich eine Empfehlung der Kommission vor: Das empfohlene Netto-Treibhausgas-Reduktionsziel von 90 Prozent bis 2040 sieht unter anderem den Einsatz industrieller CO_2-Entnahmen vor. In den zugrunde liegenden Berechnungen ist dabei ein Beitrag von CO_2-Entnahmen zur Zielerreichung von ca. 400 Mio. Tonnen CO_2äq enthalten. Dieser Vorschlag ist nicht rechtsverbindlich, zeigt jedoch, dass ein europäisches CO_2-Entnahmeziel für technische Senken zukünftig denkbar ist. Die EU-Kommission dürfte aufbauend darauf eine Überarbeitung des EU-Klimagesetzes und ein Ziel der THG-Minderung für 2040 vorschlagen sowie die Rolle von CO_2-Entnahmen hierbei klären.

Umgesetzt wird das Europäische Klimagesetz durch eine Reihe von Rechtsakten. Die dabei für die LNe besonders relevanten Rechtsakte werden im Folgenden erläutert.

Im Rahmen der LULUCF-Verordnung wird auf europäischer Ebene ein CO_2-Entnahmeziel für den LULUCF-Sektor von -310 Mio. Tonnen CO_2äq im Jahr 2030 festgelegt, wobei nur eine geringere Menge von bis zu -225 Mio. Tonnen CO_2äq durch den Sektor auf das europäische Klimaziel angerechnet werden soll. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen EU-weit 42 Mio. Tonnen mehr CO_2 durch Senken im LULUCF-Sektor entnommen werden als im Jahresdurchschnitt des Referenzzeitraums 2016 bis 2018. Für Deutschland ergibt sich aus der Verordnung die Vorgabe, bis zum Jahr 2030 die Senkenleistung des LULUCF-Sektors um 3,8 Mio. Tonnen CO_2äq gegenüber dem Zeitraum 2016 bis 2018 zu verbessern. Diese Zielsetzung ist in § 3a KSG berücksichtigt.

Während das EU-ETS als wichtigstes Klimaschutzinstrument auf EU-Ebene die absolute Begrenzung der fossilen Emissionsmenge vorsieht, ist noch offen, inwieweit die Entnahme durch den LULUCF-Sektor oder verschiedene technische Methoden als Kompensation verbleibender Emissionen anerkannt bzw. in den EU-ETS integriert werden kann. Die Einbeziehung von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS wird aktuell für permanente Entnahmemethoden geprüft. Einen entsprechenden Bericht soll die Kommission bis Ende Juli 2026 dem Europäischen Parlament und Rat gemäß Artikel 30 Abs. 5a der Europäischen Emissionshandelsrichtlinie vorlegen. Die Entscheidungsgrundlage wird daher, soweit vorliegend, die Vorschläge der EU-Kommission zur möglichen Integration von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS berücksichtigen.

Am 27. November 2024 haben das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union eine Verordnung zur Schaffung eines Unionsrahmens für die Zertifizierung von dauerhaften CO_2-Entnahmen, kohlenstoffspeichernder Landbewirtschaftung und der CO_2-Speicherung in Produkten erlassen (engl. Carbon Removals and Carbon Farming Regulation, CRCF). Damit soll die Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre durch land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen,

die Speicherung in langlebigen Produkten sowie technische Maßnahmen in Verbindung mit CCU/S einheitlich zertifiziert und verstärkt angereizt werden. Es handelt sich um einen freiwilligen Zertifizierungsrahmen, der EU-weite Standards setzen soll. Noch nicht geklärt sind die Einsatzmöglichkeiten für CRCF-Zertifikate. Neben einem möglichen Handel im Freiwilligen Kohlenstoffmarkt (engl. Voluntary Carbon Market, VCM) ist auch denkbar, dass der CRCF-Standard im Falle einer Integration von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS für die Zertifizierung genutzt wird.

Unabhängig von der Frage einer ETS-Integration von CO_2-Entnahmezertifikaten werden derzeit auf europäischer Ebene Regelungen erarbeitet, unter welchen Voraussetzungen Unternehmen umwelt- und klimabezogene Werbeaussagen tätigen dürfen. Die „Richtlinie über Nachweisbarkeit und Kommunikation umweltbezogener Produktangaben" (engl. Green Claims Directive, GCD) soll das Verbraucherschutzrecht ergänzen und unter anderem regeln, wann Unternehmen Produkte als „klimaneutral" bezeichnen dürfen. Es werden über die GCD somit Einsatzmöglichkeiten für CO_2-Entnahmezertifikate definiert, sofern Unternehmen auf diese Zertifikate gestützte, freiwillige klimabezogene Produktaussagen tätigen wollen. Nach Verabschiedung der Richtlinie auf europäischer Ebene muss binnen 18 Monaten eine Umsetzung in nationales Recht erfolgen.

Auf europäischer Ebene sieht der Net Zero Industry Act (NZIA) ein Ziel zum Aufbau von europaweit insgesamt 50 Mio. Tonnen jährlicher CO_2-Einspeicherkapazität bis zum Jahr 2030 vor. Dies ist auch relevant für CCS-basierte CO_2-Entnahmemethoden, da CCS als eine von 19 strategischen „Netto-Null-Technologien" definiert ist. Zielsetzungen für CCS-basierte CO_2-Entnahmemethoden in der LNe sind damit auch für die zu berücksichtigenden Mengen von abgeschiedenem CO_2 im Sinne des NZIA von Relevanz.

Damit verbunden werden in der EU Industrial Carbon Management Strategy, EU-ICMS) verschiedene Maßnahmen zur Ermöglichung von CCU/S und CCU/S-basierten CO_2-Entnahmemethoden eingeleitet bzw. angekündigt. Sie sollten in der LNe berücksichtigt werden. Beispielsweise wird in der EU-ICMS eine zukünftige Bewertung des europaweiten Abscheidebedarfs angestrebt. Dieser europaweite Abscheidebedarf muss im Rahmen der LNe und der CMS auf die nationale Ebene heruntergebrochen und in den Nationalen Energie- und Klimaplan (NEKP) aufgenommen werden.

4 Bewertung von CO_2-Entnahmemethoden

Im Rahmen der Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) werden relevante CO_2-Entnahmemethoden bewertet, um Aussagen über ihre Effektivität, Effizienz und Nachhaltigkeit ableiten zu können. Im Fokus stehen nicht nur die technische und wirtschaftliche Machbarkeit, sondern auch gesellschaftliche, politische und ethische Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die Akzeptanz von einzelnen CO_2-Entnahmemethoden. Besonders berücksichtigt werden Wechselwirkungen mit anderen Nachhaltigkeitszielen, der bestehende institutionelle Rahmen sowie erste Ableitungen für zukünftiges Handeln.

Die Methodenauswahl und die Bewertungslogik basieren auf aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen, insbesondere aus den Forschungsverbünden CDRmare und CDRterra, sowie den Ergebnissen des Bewertungsprozesses unter Leitung des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung (siehe Abbildung 2).[9] Weiterhin sind die Erkenntnisse aus der Online-Beteiligung eingeflossen.

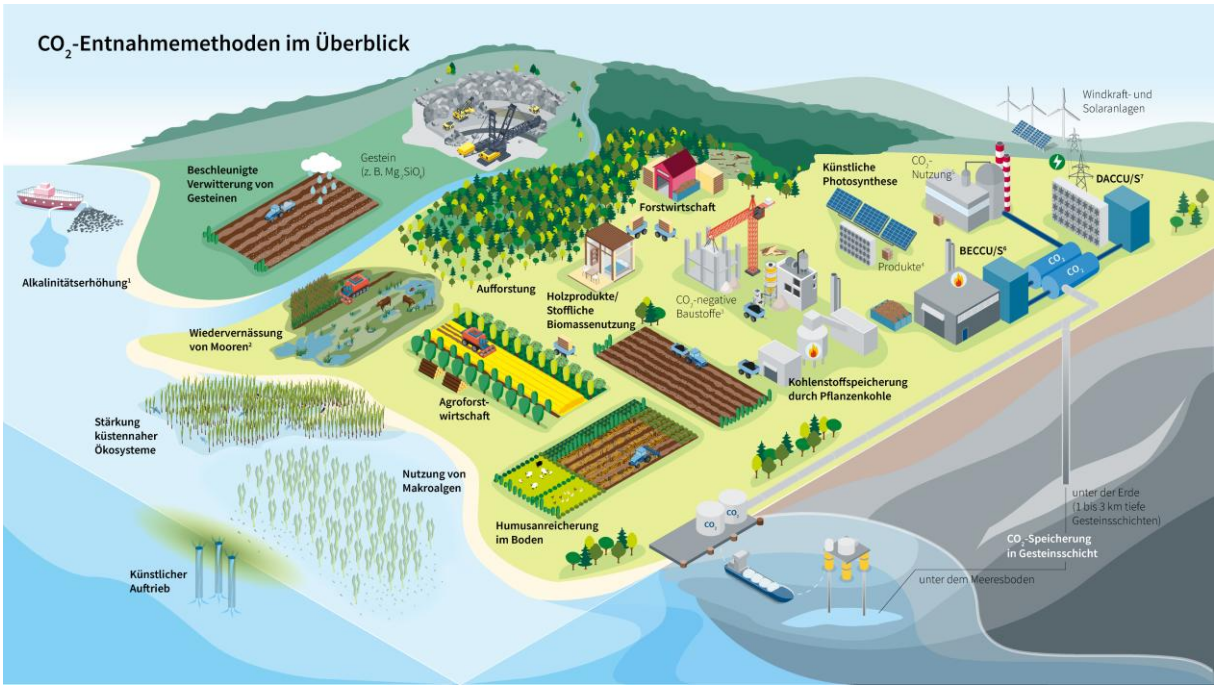


Abbildung 2 Übersicht über die verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden der LNe (eigene Abbildung)

1. Eintrag von gemahlenen Silikat- oder Karbonatgesteinen, Kalziumoxidlösungen oder Löschkalk
2. Paludikulturen werden bei der Methode Wiedervernässung von Mooren berücksichtigt.
3. Unter „CO_2-negative Baustoffe" werden die Methoden Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle (in Bauprodukten), BECCU/DACCU, beschleunigte Karbonatisierung und Erzeugnisse aus Paludikulturen gefasst.

[9] (Borchers, et al., 2024).

4. Produkte der künstlichen Photosynthese können flüssige oder feste Kohlenstoffverbindungen sein, wie beispielsweise Oxalat oder Grafit.
5. Die CO_2-Nutzung umfasst die wasserstoffbasierte Nutzung von CO_2 zur Herstellung von Grundstoffchemikalien sowie die Bindung von CO_2 über Karbonatisierungsprozesse.
6. Bioenergie mit Carbon Capture Utilisation/Storage.
7. Direct Air Carbon Capture and Utilisation/Storage.

Die Auswahl der bewerteten Entnahmemethoden orientiert sich an den wissenschaftlichen Arbeiten der genannten Forschungsverbünde. Dadurch wird sichergestellt, dass die Analyse dem aktuellen Stand der Forschung entspricht. Dies bedeutet jedoch, dass Verfahren, die außerhalb dieses wissenschaftlichen Rahmens betrachtet werden, nicht einbezogen wurden. Die Methodenauswahl ist nicht abschließend – künftig können weitere Entnahmemethoden in die Bewertung aufgenommen werden. Dies betrifft beispielsweise die Entnahmemethode Direct Ocean Capture10. Zur Bewertung der CO_2-Entnahmemethoden wurde eine eigene Bewertungsmethodik entwickelt, die auf dem wissenschaftlichen Ansatz von Förster et al. (2022) basiert.[11]

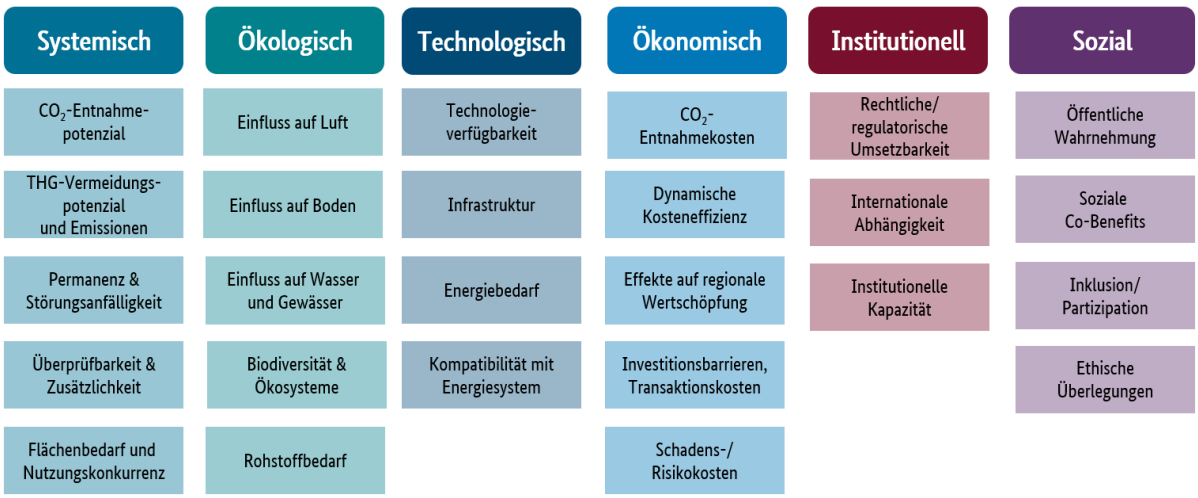


Abbildung 3 Übersicht Kriterienset (eigene Abbildung)

Die Bewertung folgt einem zweistufigen Ansatz: Zunächst wurden die Entnahmemethoden anhand des Kriteriensets analysiert, um ihre zentralen Stärken, Schwächen und Herausforderungen herauszuarbeiten (siehe Abbildung 3). Anschließend wurden diese Erkenntnisse in einen größeren strategischen Kontext eingeordnet.

Die Bewertungsmethodik wurde in einem iterativen Prozess weiterentwickelt, der umfassende Literaturrecherchen, Experteninterviews sowie eine Online-Beteiligung einschloss. Wichtige Stakehol-

[10] Darunter werden Verfahren gefasst, die CO_2 direkt aus dem Meerwasser entfernen. Die Entnahme erfolgt beispielsweise über elektrochemische Prozesse. Das CO_2 kann anschließend einer Speicherung oder Nutzung zugeführt werden.
[11] (Förster, et al., 2022).

der waren vor allem Forscherinnen und Forscher sowie Fachleute aus dem Bereich der CO_2-Entnahme, deren Fachwissen maßgeblich zur Validierung und Verfeinerung der Bewertungsansätze beigetragen hat. Darüber hinaus fand ein Expertenworkshop zu den Methoden statt, um die Kriterien zu diskutieren, anzupassen und abzusichern.

4.1 Forstwirtschaft

Die Forstwirtschaft umfasst alle Tätigkeiten und Funktionen, die dazu beitragen, dass der Wald seine vielfältigen Schutz-, Nutz- und Wohlfahrtsfunktionen erfüllen kann. Dies umfasst die Wiederaufforstung nach § 11 Bundeswaldgesetz (BWaldG).

Grundsätzlich entziehen Bäume der Atmosphäre CO_2 über Photosynthese. Der Kohlenstoff wird anschließend in den Bäumen selbst, im Totholz und im Boden gespeichert. Infolge von Zersetzungsprozessen entweicht ein Teil des Kohlenstoffs als CH_4 (Methan) oder CO_2 in die Atmosphäre. Der Ansatzpunkt für Klimaschutzmaßnahmen bei der Forstwirtschaft ist die gezielte Steuerung des Waldwachstums. In Abhängigkeit von den Ausgangsbedingungen können die Steuerungsmöglichkeiten von der Verkürzung von Umtriebszeiten über Durchforstungsmaßnahmen bis hin zu temporären oder dauerhaften Nutzungsverzichten reichen. Die Form der Bewirtschaftung von Wäldern hat Einfluss auf ihre Klimaresilienz, die Speicherung und Entnahme von CO_2 sowie weitere Leistungen des Waldes für Natur und Gesellschaft.

Der Wald stellt vielfältige Schutz-, Nutz- und Wohlfahrtsfunktionen bereit

Deutschland ist zu etwa 32 Prozent bewaldet: Dies entspricht einer Fläche von rund 11,5 Mio. Hektar.[12] Auf dieser Fläche stellt der Wald verschiedenste Ökosystemdienstleistungen bereit, wie die Filterung von Schadstoffen zur Verbesserung der Luftqualität. Die lokale Kühlfunktion des Waldes führt darüber hinaus zu einer Verbesserung des Mikroklimas. In Abhängigkeit von ihrer Bewirtschaftung sind Wälder zudem wichtig für die Biodiversität. Beispielsweise sind dort 2.900 Pflanzenarten beheimatet. Durch eine naturnahe Waldbewirtschaftung kann die Biodiversität gefördert werden. Dabei sind die positiven Auswirkungen auf die Biodiversität abhängig von der Umsetzung und den Standortbedingungen.[13]

Wälder können regulierende Ökosystemdienstleistungen bereitstellen. Hierzu zählen der Nährstoffrückhalt und der Erosionsschutz, die Abflussregulierung sowie der Schutz vor Hochwasser und Erdrutschen. Dabei ist die Ausprägung abhängig von der Art und Weise der Forstwirtschaft.[14]

Die Konzepte der Forstwirtschaft sind bekannt und etabliert

Die Forstwirtschaft ist eine etablierte Methode zur Entnahme von CO_2. Durch die bestehenden Erfahrungen haben sich im freiwilligen Kohlenstoffmarkt bereits Systeme zur Messung, Berichterstattung und Verifizierung von CO_2-Entnahmen (engl. Monitoring/Measurement, Reporting and Verifica-

[12] Die häufigsten Baumarten sind Kiefer (22 Prozent des Holzbodens), Fichte (21 Prozent), Buche (17 Prozent) und Eiche (12 Prozent) (BMEL, 2024c).
[13] (Wollnik, et al., 2023; BMEL, 2024c).
[14] (Wollnik, et al., 2023).

tion, MRV) etabliert. Auf nationaler Ebene ist Berichterstattung in nationalen THG-Inventaren etabliert. Dazu findet alle 10 Jahre die Bundeswaldinventur (BWI) neben zusätzlichen regelmäßigen Waldzustandserhebungen statt.[15]

Die Holzernte und die Vermarktung von Holzprodukten tragen zur Wirtschaftsleistung bei

Heute arbeiten 700.000 Menschen in der Forst- und Holzwirtschaft. Die Nutzung von Holzprodukten kann zu einer Substitution anderer energieintensiver Produkte führen.[16, 17] Diese Vorteile können sich reduzieren, beispielsweise bei einer temporären Stilllegung von Flächen und dem Verzicht auf die Holzernte.[18]

Das Potenzial ist durch die Art und Weise der Waldnutzung sowie die bestehende Waldfläche begrenzt

Für eine CO_2-Entnahme muss der Zuwachs an Biomasse und somit gebundenem Kohlenstoff höher als die Abgabe sein. Einer der wichtigsten Faktoren hierfür ist die Intensität der Holzentnahme (Holzernte und Durchforstung). In Deutschland fand über die letzten Jahrzehnte ein Zuwachs an Holzvorrat statt, der mit 335 m^3 je Hektar einen der höchsten Werte in Europa darstellt.[19] Zudem kann der Schutz alter Waldbestände zur CO_2-Entnahme beitragen. Beispielsweise können alte Buchenwälder (> 100 Jahre) der Atmosphäre deutlich mehr CO_2 entnehmen als junge Bestände.[20]

Für das zukünftige Potenzial ist auch entscheidend, inwiefern Waldbestände resilient und an den Standort angepasst sind und sich dadurch das Risiko von Verlusten verringert. Eine Orientierung können natürliche Waldgesellschaften geben, die in Deutschland überwiegend durch Laubbäume dominierte Bestände bilden. Hierfür wäre jedoch ein Umbau des bestehenden Waldes notwendig. Im Rahmen der Modellierung der LNe (siehe Kapitel 5) ergibt sich in Abhängigkeit vom Störungsniveau und der Holzentnahme eine CO_2-Entnahme für das Jahr 2030 von 24 bis 39 Mio. Tonnen CO_2 durch die Waldflächen in Deutschland.[21] Für das Jahr 2045 wurde eine CO_2-Entnahme von 25 bis 42 Mio. Tonnen CO_2 ermittelt.[22] Somit besitzt der Wald in Deutschland ein erhebliches Potenzial zur CO_2-Entnahme.

---

[15] (Wollnik, et al., 2023).

[16] Substitutionseffekte in Bezug auf die THG-Emissionen kommen nur so lange zum Tragen, wie es fossile Alternativen gibt. In einem zukünftigen treibhausgasneutralen Energiesystem reduzieren sich diese Effekte erheblich.

[17] Die nachhaltige Nutzung der Wälder und damit verbunden die Nutzung der Ernteproduktesind dem Klimaschutz zuträglich, wenn der Kohlenstoff in Holzprodukten mittel- bis langfristig gespeichert wird und Materialien und fossile Brennstoffe ersetzt werden.

[18] (Wollnik, et al., 2023; BMEL, 2024c).

[19] In Deutschland beträgt der Gesamtvorrat 3,7 Mrd. m^3 Holz (BMEL, 2024c).

[20] (Wollnik, et al., 2023; BMEL, 2024c; Reise, Hennenberg, Benndorf, & Böttcher, 2024).

[21] Annahmen: Laubholzentnahmen um 2 Mio. m^3 reduziert, Entnahme bei Nadelholz bleibt konstant. Die Bandbreite ergibt sich aus der Berücksichtigung hoher und natürlicher Störungen (siehe Kapitel 3 Bedarfe und Potenziale der CO_2-Entnahme).

[22] Annahmen: Laubholzentnahmen um 5 Mio. m^3 reduziert, Entnahme bei Nadelholz bleibt konstant. Die Bandbreite ergibt sich aus der Berücksichtigung hoher und natürlicher Störungen (siehe Kapitel 3 Bedarfe und Potenziale der CO_2-Entnahme).

Die Erschließung der Potenziale für die CO_2-Entnahme ist mit relativ geringen Kosten von 0 bis 35 Euro/t CO_2 verbunden. Hierbei sind die Opportunitätskosten durch entgangene Erlöse aus der Holzernte sowie mögliche CO_2-Einsparungen durch Holzsubstitution nicht berücksichtigt. Es sind für die Forstwirtschaft keine relevanten Gesundheitsgefährdungen durch Aufforstungsmaßnahmen bekannt. Menschen profitieren von Wäldern in vielfältiger Hinsicht, insbesondere durch positive Auswirkungen auf die Gesundheit.[23]

Wälder haben ein erhöhtes Risiko, den gebundenen Kohlenstoff zu verlieren

Die größte Herausforderung bei der Entnahme von CO_2 über die Forstwirtschaft besteht im Risiko des Verlusts des gebundenen Kohlenstoffs durch den Klimawandel und natürliche Prozesse (z. B. Waldbrand oder Schädlingsbefall). Bestandswälder mit einheimischen Baumarten leiden unter den neuen Klimabedingungen. Extreme Trockenperioden und Dürren führen in bestimmten geografischen Regionen zu Trockenstress und Kronenverlichtung. Waldbrände stellen ein allgemeines Risiko dar. Sturmschäden betreffen vor allem ältere Bestände. Darüber hinaus wird die Situation durch Schädlingsbefall erschwert. Die neue Bundeswaldinventur zeigt, dass sich der Wald im Zeitraum von 2017 bis 2022 von einer Senke für Kohlenstoff zu einer Quelle entwickelt hat. Die Altersstruktur des deutschen Waldes hat in der Vergangenheit zu einem Speicheraufbau geführt, der heute jedoch weitgehend beendet ist. Hohe Kalamitäten und Trockenheit haben dem Wald zusätzlich stark zugesetzt und besonders die Fichte hat an Holzvorrat verloren.[24]

Eine verringerte Holzentnahme setzt eine verringerte inländische Holznutzung voraus

Im Rahmen der Modellierung der LNe wird eine verringerte Holzentnahme aus Laubwäldern um 2 Mio. m^3 im Jahr 2030 und um 5 Mio. m^3 im Jahr 2045 angenommen, um die Ziele im LULUCF-Sektor (Land Use, Land Use-Change and Forestry) zu erreichen. Eine extensivere Forstwirtschaft würde den ökonomischen Nutzen des Holzes verringern und somit zu einem Rückgang der Wertschöpfung führen. Die Extensivierung der Forstwirtschaft in Deutschland kann Verlagerungseffekte zur Folge haben, sofern der Holzverbrauch nicht sinkt. Im Jahr 2021 lag der jährliche Holzfußabdruck (d. h. der Inlandsholzverbrauch) von Deutschland bei 104 Mio. m^3, während die inländische Produktion 76 Mio. m^3 betrug. Eine weitere Extensivierung bei gleichbleibendem Verbrauch würde den Holzeinschlag ins Ausland verlagern und dadurch Landnutzungskonflikte aufgrund der globalen Flächenbeanspruchung begünstigen.[25]

Die EU-Biodiversitätsstrategie und die EU-Waldstrategie sind relevant für die Forstwirtschaft

Die EU-Biodiversitätsstrategie sieht vor, Waldökosysteme zu schützen oder wiederherzustellen, die Biodiversität zu fördern sowie die Kohlenstoffspeicherung in Wäldern zu erhöhen. Die EU-Waldstrategie baut auf der EU-Biodiversitätsstrategie auf. Diese Strategie zielt darauf ab, die Quantität und Qualität der Wälder in der EU zu erhöhen und ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber Herausforderungen wie dem Klimawandel, Naturkatastrophen und Schädlingen zu stärken. Im Einklang mit der EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 sollen mindestens 30 Prozent der Landfläche der EU unter

[23] (Wollnik, et al., 2023).
[24] (Wollnik, et al., 2023; BMEL, 2024c).
[25] (WWF, 2022; Wollnik, et al., 2023; BMEL, 2024c).

Schutz gestellt werden, wobei 10 Prozent dieser Flächen streng geschützt werden sollen. Dies umfasst insbesondere die verbliebenen Primär- und Urwälder. Weiterhin ist die Anpflanzung von mindestens 3 Mrd. zusätzlichen Bäumen bis 2030 vorgesehen.

In Deutschland besteht bereits ein gesetzlicher Rahmen für Maßnahmen der Forstwirtschaft. Die Gestaltung der Waldpolitik liegt vorrangig in der Verantwortung der Länder. Zu den forstrechtlichen Anforderungen auf Bundesebene gehören im Wesentlichen die Pflicht zur Erhaltung des Waldes (§ 9 BWaldG) und, soweit erforderlich, zur Wiederaufforstung (§ 11 Abs. 1 Satz 2 BWaldG) sowie die Pflicht zur ordnungsgemäßen und nachhaltigen Bewirtschaftung (§ 11 Abs. 1 Satz 1 BWaldG). Die Verpflichtungen werden vor Ort durch die Waldinventur[26] konkretisiert. Regulatorische Anforderungen bestehen nach Bundes- und Landeswaldgesetzen sowie den entsprechenden Naturschutzgesetzen (insbesondere die speziellen Artenschutzbestimmungen aus § 44 des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG)). Darüber hinaus sind verschiedene weitere Gesetze für die Waldbewirtschaftung relevant – etwa die Jagdgesetze der Länder, das Forstvermehrungsgutgesetz[27] sowie das Waldschadensausgleichsgesetz[28].[29] Zur Erfüllung der Nationalen Biodiversitätsstrategie können Prozessschutzgebiete von den Ländern ausgewiesen werden, in denen die Entwicklung der Wälder dauerhaft der Natur überlassen wird.

Maßnahmen im Rahmen der Forstwirtschaft werden bereits gefördert

Das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) der Bundesregierung zielt darauf ab, Ökosysteme zu schützen, zu stärken und wiederherzustellen, um ihre Klimaschutzleistungen zu verbessern.[30] Dafür stehen bis 2028 insgesamt 3,5 Mrd. Euro zur Verfügung. Die Fördermittel werden für eine klimaangepasste Waldwirtschaft und den Erhalt von Waldökosystemen bereitgestellt. Seit Beginn des Programms wurden Waldbesitzerinnen und -besitzer bei der nachhaltigen und klimaresilienten Bewirtschaftung von rund 1,6 Mio. Hektar Wald unterstützt.[31]

Ein weiteres wesentliches Förderinstrument ist die „Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" (GAK), die gemeinsam von Bund und Ländern getragen wird.

[26] Waldinventur: „Das ist das durch die Landeswaldgesetze vorgeschriebene forstliche Inventur- und Planungssystem für Staats- und Körperschaftsforstbetriebe, zum Teil auch für Privatwaldbetriebe ab einer bestimmten Mindestgröße" (Wollnik et al. 2023).
[27] Dient der Erhaltung der Qualität und genetischen Vielfalt des forstlichen Vermehrungsgutes.
[28] Dient der Eindämmung von Störungen des Holzmarktes bei überregionalen Kalamitäten.
[29] (Wollnik, et al., 2023).
[30] Das Vorgängerinstrument zum ANK war der Waldklimafonds (WKF), der 2013 von den Bundesministerien für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) sowie für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) eingerichtet wurde. Ziel des Fonds war es, Maßnahmen zu fördern, die das CO_2-Minderungspotenzial von Wald und Holz erhalten und ausbauen sowie die Anpassung der Wälder an den Klimawandel unterstützen. Der WKF wurde im Rahmen des überarbeiteten Wirtschaftsplans für den Klima- und Transformationsfonds (KTF) auslaufend gestellt. Neubewilligungen sind nicht mehr möglich und die Mittel im WKF werden bis auf die bereits rechtlich eingegangenen Verpflichtungen gekürzt. Im Jahr 2023 war der Fonds mit 27 Mio. Euro ausgestattet und hatte einen Mittelabfluss von 94 Prozent (Bär & Collmer, 2024).
[31] (BMUV, 2024).

Für das Jahr 2024 standen der GAK rund 1,04 Mrd. Euro an Bundesmitteln zur Verfügung. Zusammen mit der Kofinanzierung der Länder konnten so Fördermittel in Höhe von etwa 1,7 Mrd. Euro mobilisiert werden.[32] Im Rahmen der GAK werden folgende Maßnahmen gefördert:

- naturnahe Waldbewirtschaftung (Waldumbau, Jungbestandspflege u. a.)
- forstwirtschaftliche Infrastruktur (Wegebau, Holzkonservierungsanlagen)
- forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse
- Bewältigung der Folgen von Extremwetterereignissen (Waldschutzmaßnahmen, Wiederaufforstung u. a.).

Viele Maßnahmen der zweiten Säule der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) werden durch GAK-Förderprogramme kofinanziert. Die Fördermittel der GAP werden aus dem Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) finanziert.[33] Dazu zählen forstwirtschaftliche Maßnahmen wie Waldumbau, Aufforstung und Schutz von Schadflächen.[34] Auch auf Länderebene liegen bereits Fördermaßnahmen vor, wie die Unterstützung von Privatwaldbesitzerinnen und -besitzern in Nordrhein-Westfalen über das Waldbaukonzept.

Bei der Forstwirtschaft handelt es sich um eine ausgereifte Methode (Technology Readiness Level (TRL) 9)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie kann der Wald an die zukünftigen Klimabedingungen angepasst werden? Was sind dafür geeignete Bauten (und Baumartenmischungen)?
- Wie kann eine Kombination von Anpassungs- und verschiedenen waldbasierten Kohlenstoffspeicher-Maßnahmen aussehen?
- Wie können zukünftige Monitoringverfahren bei möglichst geringem Ressourceneinsatz eine genaue und örtlich differenzierte Dokumentation erlauben?

4.2 Aufforstung

Unter Aufforstung wird das Pflanzen von Bäumen auf Flächen verstanden, die (wieder) zu Wald werden sollen oder auf denen zuvor eine andere Landnutzungsart (z. B. landwirtschaftliche Nutzung) stattgefunden hat. Im Bundeswaldgesetz wird zwischen Erstaufforstung (§ 10 BWaldG) und Wiederaufforstung (§ 11 BWaldG) unterschieden. Im Rahmen der LNe wird die Wiederaufforstung nach § 11 BWaldG unter die Entnahmemethode Forstwirtschaft gefasst.[35] Der Begriff Aufforstung bezeichnet nur die Erstaufforstung nach § 10 BWaldG. Ausgeschlossen sind nach dieser Definition

[32] (BMEL, 2024b).
[33] Für die Jahre 2021 und 2022 standen Deutschland zusätzliche ELER-Mittel zur Verfügung, einschließlich Mitteln aus dem EU-Wiederaufbaufonds und Umschichtungen von Direktzahlungen. Dies erhöhte die jährlichen ELER-Mittel auf knapp 1,9 Mrd. Euro (BMEL, 2022).
[34] (BMEL, 2024b; BMEL, 2025).
[35] Grundsätzlich ist eine Unterscheidung zwischen Erstaufforstung und Wiederaufforstung historisch in Deutschland schwierig. Dies ist darin begründet, dass Deutschland früher zu weiten Teilen bewaldet war.

Flächen, die bereits Wald waren und die durch Kahlschlag oder nach Kalamitätsschäden[36] wieder bepflanzt werden.

Die Aufforstung kann aktiv durch Pflanzung und Saat oder passiv durch natürliche Sukzession erfolgen. Bei der Sukzession wird die Ausbreitung der Bäume durch natürliche Verjüngung genutzt, in die gegebenenfalls lenkend eingegriffen wird (z. B. Zaunbau zum Schutz vor Wildverbiss, Auslese geeigneter Bäume). Wie auch bei der Forstwirtschaft erfolgt die Entnahme über die Photosynthese und die anschließende Speicherung des Kohlenstoffs in den Bäumen selbst, im Totholz und im Boden (siehe Kapitel 4.1).

Die Aufforstung kann vielfältige positive Auswirkungen auf die Umwelt haben

Aufforstung ist ein bereits vielfach praktizierter Ansatz in Deutschland. Die Wahl der eingesetzten Baumarten (Kiefer, Buche, Eiche u. a.) hängt dabei von örtlichen Standortbedingungen ab. Kiefern gelten als Pionierbaumart, da sie sich durch ihre Vielseitigkeit an unterschiedliche Standortbedingungen anpassen können. In Abhängigkeit von der Umsetzung ergeben sich zahlreiche regulierende Umweltleistungen nach den ersten Jahren der Aufforstung:

- Rückhalt von Nährstoffen sowie Speicherung und Rückhalt von Wasser
- Reduzierter Eintrag von Nitrat ins Grundwasser
- Abflussregulierung
- Erosionskontrolle
- Kühlungseffekte im lokalen Raum
- Schutz vor Überflutung und Erdrutschen

Dabei hängen die Effekte stark von der gewählten Art der Aufforstung sowie der vorherigen Landnutzung ab.[37]

[36] Kalamitätsschäden sind Schäden, die durch außergewöhnliche Naturereignisse oder Katastrophen verursacht werden. Der Begriff wird in der Forstwirtschaft und in der Landwirtschaft verwendet, um großflächige Schäden an Wäldern oder landwirtschaftlichen Flächen zu beschreiben, die durch Stürme, Dürren, Hochwasser, Schädlinge oder Krankheiten entstehen.

[37] (Wollnik, et al., 2023).

Als CO_2-Entnahmemethode zeichnet sich die Aufforstung durch geringe Kosten aus

Die Kosten können in Abhängigkeit von den örtlichen Bedingungen, der Wahl der Baumart sowie der vorherigen Landnutzung erheblich variieren. Sie werden mit rund 10 bis 120 Euro/t CO_2 angegeben.[38, 39] Auf internationaler Ebene werden Kosten von 0 bis 240 USD/t CO_2 genannt. Die Unterschiede resultieren aus regionalen Variationen, etwa beim Klima, sowie aus unterschiedlichen Berechnungsmethoden und einbezogenen Kosten. Zudem zeigt die deutsche Bevölkerung eine größere Zahlungsbereitschaft für Aufforstungsmaßnahmen.[40]

Auf nationaler und internationaler Ebene sind MRV-Methoden vorhanden

Als etablierte Maßnahme zur CO_2-Entnahme stehen bereits verschiedene MRV-Methodiken im Rahmen der Projektzertifizierung des freiwilligen Kohlenstoffmarktes (siehe Kapitel 6.4) zur Verfügung. In den IPCC-Richtlinien zur Inventarberichterstattung (siehe Kapitel 6.3.1 und Kapitel 6.3.2) sind ausdifferenzierte Berichterstattungsmethodiken festgehalten. Auf Ebene der nationalen THG-Inventarberichterstattung wird die Aufforstung bereits im LULUCF-Sektor erfasst.[41]

In Deutschland wird das Potenzial der Aufforstung als gering eingeschätzt

Das Potenzial zur CO_2-Entnahme im Jahr 2045 liegt zwischen 1,7 und 3,5 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr. Das CO_2-Entnahmepotenzial durch Aufforstungen mit unterschiedlichen heimischen Baumarten auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Flächen beträgt zwischen rund 1 und 10 Tonnen CO_2 pro Hektar und Jahr ab einem Alter von 20 Jahren.[42, 43] Für den Zeitraum von 2023 bis 2030 wird ein CO_2-Entnahmepotenzial durch Aufforstung von insgesamt 0,8 Mio. Tonnen CO_2 geschätzt. Das Potenzial ergibt sich aus der Zielsetzung für die jährliche Waldflächenmehrung gemäß der Biodiversitäts- und Waldstrategie der Europäischen Union von 12.500 Hektar jährlich.[44]

In der Modellierung der LNe wird für Deutschland eine CO_2-Entnahme von 0,6 Mio. Tonnen CO_2 im Jahr 2030 und von 1,8 Mio. Tonnen CO_2 im Jahr 2050 ermittelt. Im Jahr 2030 wird dafür eine Fläche von 70.000 Hektar und im Jahr 2050 von 270.000 Hektar benötigt (vgl. heutige Waldfläche: 11,5 Mio. Hektar).

---

[38] Berechnung für die Aufforstung mit Kiefern aus Wollnik et al. (2023): Die Investitionskosten werden mit 3.936 Euro pro Hektar (ohne Flächenerwerbskosten) und die Betriebskosten mit 0 Euro pro Hektar angegeben. Daraus resultieren bei einem kumulierten CO_2-Entnahmepotenzial von 219,9 Tonnen CO_2 Entnahmekosten von 18 Euro/t CO_2.

[39] Berechnung für die Aufforstung mit Eichen aus Wollnik et al. (2023): Die Investitionskosten werden mit 4.891 Euro pro Hektar (ohne Flächenerwerbskosten) und die Betriebskosten mit 1.694 Euro pro Hektar angegeben. Daraus resultieren bei einem kumulierten CO_2-Entnahmepotenzial von 55,8 Tonnen CO_2 Entnahmekosten von 118 Euro/t CO_2.

[40] (Borchers, et al., 2024; Wollnik, et al., 2023) (Wollnik, et al., 2023).

[41] (Wollnik, et al., 2023).

[42] Buche: etwa 3,8 t CO_2/ha und Jahr ab Alter 30, Eiche: ca. 1,1 t CO_2/ha und Jahr ab Alter 20, Kiefer: ca. 4,8 t CO_2/ha und Jahr ab Alter 20, Douglasie: etwa 9,6 t CO_2/a und Jahr ab Alter 20 (Wollnik et al. 2023).

[43] Weiterhin wird in Wollnik et al. (2023) das Potenzial für kontrollierte natürliche Sukzessionsflächen mit 300.000 Hektar auf Konversionsflächen, landwirtschaftlichen Flächen und suburbanen Gebieten in Deutschland angegeben. Dies entspricht etwa 3 Prozent der gesamten Waldfläche (Wollnik et al., 2023).

[44] (Reise, Hennenberg, Benndorf, & Böttcher, 2024; Borchers, et al., 2024; Wollnik, et al., 2023).

Die Flächenintensität kann zu erheblichen negativen Auswirkungen führen

Aufgrund des Flächenbedarfs geht die Aufforstung mit Landnutzungskonflikten einher. Fläche ist in Deutschland ein begrenztes Gut, da kontinuierlich neuer Bedarf entsteht – sei es für die Siedlungsentwicklung, den Ausbau von Solar- und Windkraftanlagen, die Wiedervernässung von Mooren oder die Extensivierung der Landwirtschaft. Dies ist besonders relevant, da einmal aufgeforstete Flächen gemäß § 9 BWaldG nicht in ihre vorherige Nutzung zurückgeführt werden dürfen.

Die Effekte der Landnutzungskonflikte können auch global wirken, wenn die Flächennutzung (z. B. durch die Landwirtschaft) ins Ausland verdrängt wird. Im schlimmsten Fall führt dies zu einer Entwaldung an anderen Orten, wie beispielsweise von tropischen Regenwäldern, und damit auch zu steigenden Emissionen im Ausland.[45]

Aufforstungsmaßnahmen können zu hohen Opportunitätskosten führen

Nach einer Aufforstung kann der Bodenwert für die Eigentümerinnen und Eigentümer sinken, da die Fläche im Vergleich zu Bauland für Wohnraum an Wert verliert. Aufforstungen stehen zudem in einem Wettbewerbsnachteil gegenüber der Landwirtschaft, da diese durch bestehende Subventionen begünstigt wird. Fördermaßnahmen für Aufforstung können diesen Nachteil nur teilweise ausgleichen. Die Eignung der Aufforstung als Methode zur CO_2-Entnahme ist stark vom Einzelfall abhängig, da staatliche und kommunale Flächen begrenzt sind. Zudem können Nutzungskonflikte entstehen, da zusammenhängende Aufforstungsflächen häufig nicht einem einzigen Eigentümer gehören.

Es besteht ein erhöhtes Risiko für den Verlust von Kohlenstoff durch den Klimawandel und natürliche Prozesse

Für junge Aufforstungskulturen besteht das Risiko, dass die Aufforstung nur sehr langsam bzw. gar nicht zustande kommt. So führen extreme Trockenzeiten und Dürren in bestimmten geografischen Regionen zu Trockenstress und Kronenverlichtung. Auch stellen Waldbrände ein generelles Risiko dar. Junge Bäume können durch selektiven Wildverbiss ebenfalls Schäden nehmen. Langfristig können die Faktoren zu einem vollständigen Scheitern von Aufforstungsbemühungen führen. Das Risiko eines Kohlenstoffverlusts durch Aufforstung ist erheblich und hängt maßgeblich davon ab, wie mit den bestehenden Risiken umgegangen wird. Zudem ist die Kohlenstoffspeicherung eines einzelnen Baumes durch den Sättigungseffekt auf Jahrzehnte bis Jahrhunderte begrenzt. Durch eine permanente Bewirtschaftung und Nutzung des Holzes kann es dennoch zu einer langfristigen Entnahme von CO_2 kommen (siehe Kapitel 4.1, Kapitel 4.3). Waldgebiete sind gegen Risiken der Landnutzungsveränderungen und Kahlschläge gesetzlich geschützt, da die Rückumwandlung im Bundeswaldgesetz ausgeschlossen ist. Allerdings tragen Waldbesitzerinnen und -besitzer ein finanzielles Risiko, sobald die Aufforstung scheitert.[46]

Auf europäischer Ebene beeinflussen die EU-Biodiversitätsstrategie und die EU-Waldstrategie die Aufforstung

Die EU-Biodiversitätsstrategie und die EU-Waldstrategie formulieren das Ziel, bis 2030 insgesamt 3 Mrd. Bäume zu pflanzen. Laut ANK würde dies für Deutschland bedeuten, 120 Mio. Bäume neu zu

[45] (WBGU, 2021).

[46] (Borchers, et al., 2024; Wollnik, et al., 2023).

pflanzen, was einer Fläche von 100.000 Hektar entspricht. Entsprechend hätten seit 2023 jährlich 12.500 Hektar[47] neue Waldfläche entstehen müssen bzw. müssten zukünftig entstehen. Bezieht man sich auf das Ziel der Vereinten Nationen zur globalen Waldmehrung von 3 Prozent bis 2030, müssten in Deutschland auf rund 340.000 Hektar neue Waldflächen entstehen, was jährlich 37.300 Hektar seit 2023 bedeutet hätte bzw. in Zukunft bedeuten würde.[48]

In Deutschland ist die Aufforstung bereits rechtlich geregelt

In Deutschland sind nach § 10 BWaldG Erstaufforstungen genehmigungspflichtig. Dabei sind die Voraussetzungen für die Genehmigung so gestaltet, dass grundsätzlich mit einer Genehmigung gerechnet werden kann. Weiterhin sind Waldumwandlungen ab einer Fläche von 10 Hektar einer Umweltverträglichkeitsprüfung zu unterziehen (§ 3b Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung, UVPG i.V.m. Anlage 1 Nr.17.2.1).[49] Regulatorische Anforderungen an die Waldbewirtschaftung ergeben sich aus den Waldgesetzen des Bundes und der Länder sowie den entsprechenden Naturschutzgesetzen (vor allem die besonderen Artenschutzbestimmungen des § 44 BNatSchG). Weitere relevante gesetzliche Rahmenbedingungen zur Forstwirtschaft sind in Kapitel 4.1 Forstwirtschaft aufgeführt.[50]

Aufforstungsmaßnahmen können bereits im Rahmen verschiedener Programme eine Förderung erhalten

Wie auch die Forstwirtschaft ist die Aufforstung im Rahmen der GAK förderfähig. Im GAK-Rahmenplan 2022 bis 2023 wurden für den Förderbereich Forsten insgesamt 219 Mio. Euro zur Verfügung gestellt. Dabei ist die Erstaufforstung (Neuanlage von Wald auf bisher nicht forstwirtschaftlich genutzten Flächen) förderfähig. Die Förderung erfolgt in Form von Zuschüssen, deren Höhe je nach Maßnahme zwischen 30 und 90 Prozent der zuwendungsfähigen Ausgaben liegt. Die genaue Ausgestaltung und Durchführung der Fördermaßnahmen liegen bei den Bundesländern, die eigene Richtlinien und Verfahren festlegen. Weiterhin kann die Aufforstung im Rahmen des ANK gefördert werden. Unter den bereits bewilligten Projekten befinden sich Projekte zur Überlassung der natürlichen Entwicklung von mehr als 70.000 Hektar Wald.[51]

Bei der Aufforstung handelt es sich um eine ausgereifte Methode (TRL 9)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie kann eine an das zukünftige Klima angepasste Aufforstung aussehen (z. B. durch die Auswahl der Baumarten)?

[47] Werden die Daten aus dem nationalen Treibhausgasinventar verwendet, kamen in den Jahren 2016 bis 2020 jährlich etwa 8.000 Hektar netto an neuer Waldfläche hinzu. Dies setzt sich zusammen aus einem Verlust von 5.000 Hektar durch Siedlungsflächen und einer Waldmehrung um 13.000 Hektar jährlich. Die Fläche stammt im Wesentlichen aus Grünland und nur ein sehr geringer Anteil aus Ackerflächen (Reise et al. 2024).
[48] (Reise, Hennenberg, Benndorf, & Böttcher, 2024) (Wollnik, et al., 2023).
[49] „Eine Umweltverträglichkeitsprüfung ist nach dem UVPG ab einer Erstaufforstungsfläche von 50 Hektar vorgeschrieben. Für Flächen unter 50 Hektar kann eine entsprechende Verpflichtung nach Landesrecht bestehen; hier gibt es je nach Bundesland unterschiedliche Schwellenwerte, bei deren Überschreitung zunächst einzelfall- und standortbezogen geprüft wird, ob eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt werden muss."
[50] (Wollnik, et al., 2023).
[51] (Wollnik, et al., 2023; BMEL, 2024b; BMUV, 2024; BMEL, 2025).

- Was sind mögliche Auswirkungen auf andere Ökosystemdienstleistungen (z. B. Lokalklima) und die Biodiversität bei einer klimaangepassten Aufforstung?
- Wie kann durch eine geeignete Ausgestaltung von Anreizsystemen die Akzeptanz für die Erstaufforstungsförderung gesteigert werden?

4.3 Holzprodukte / Stoffliche Biomassenutzung

Eine nachhaltigere Nutzung von Holz und anderen Biomasseprodukten kann zur Emissionsreduktion und Kohlenstoffspeicherung beitragen. Pflanzen (etwa Bäume) nehmen während des Wachstums CO_2 aus der Atmosphäre auf; auch nach der Ernte bleibt ein Teil dieses Kohlenstoffs in Produkten wie Bauholz, Möbeln oder Dämmstoffen gespeichert. Eine Erhöhung der Bestandsmenge dieser Produkte, durch die nachhaltige Steigerung von Produktionsmenge und Nutzungsdauer wirkt als Kohlenstoffsenke, während eine Verringerung – etwa durch Verrottung oder Verbrennung – eine Emissionssteigerung verursacht.

Die stoffliche Biomassenutzung umfasst neben der Verwendung von Holz auch weitere pflanzliche, tierische oder mikrobielle Rohstoffe, die strukturell genutzt werden können. Zu den Produkten zählen beispielsweise biobasierte Kunststoffe, Chemikalien oder Baustoffe wie Holzfaserdämmungen.

Durch Kaskadennutzung kann die Speicherdauer verlängert werden: Biomasseprodukte werden mehrfach verwendet oder recycelt, bevor sie energetisch genutzt werden. Dadurch bleibt das CO_2 über die Dauer der stofflichen Nutzung aus der Atmosphäre entnommen. Wenn am Ende der Nutzungsdauer freiwerdendes biogenes CO_2 zudem abgeschieden und anschließend genutzt (siehe Kapitel 4.12) oder geologisch gespeichert wird (siehe Kapitel 4.9), lässt sich die Entnahmedauer auch darüber hinaus verlängern. Zudem kann Biomasse fossile Energieträger oder emissionsintensive Materialien wie Beton oder Stahl ersetzen und somit die Emissionen bei deren Herstellung vermeiden (Energie- bzw. Materialsubstitution).

Das Potenzial ist jedoch begrenzt: Es bestehen Unsicherheiten in Bezug auf die maximale Lebensdauer bzw. die Recyclingmöglichkeiten von Produkten zur stofflichen Biomassenutzung. Zudem verhindern Landnutzungskonflikte den vermehrten Anbau von Biomasse zur Herstellung langlebiger Produkte. Eine nachhaltige Nutzung erfordert daher eine sorgfältige Abwägung ökologischer und wirtschaftlicher Faktoren.

Die stoffliche Biomassenutzung bietet hohes Potenzial zur Emissionsreduktion

Viele Biomasseprodukte können CO_2-intensive Materialien wie Beton (0,1 bis 0,35 t CO_2/t_{Beton})[52] oder Stahl (1,6 t $CO_2/t_{Rohstahl}$)[53] ersetzen und so zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen. Am Ende ihrer Lebensdauer können Holzprodukte zudem weiterverarbeitet oder thermisch verwertet werden. Wenn sie dabei bestehenden Einsatz fossiler Brennstoffe reduzieren, ergibt sich ein weiterer Substitutionseffekt.

[52] Die Menge hängt vom Zementanteil ab. Bei der Herstellung von Zement entstehen in Deutschland etwa 0,7 t CO_2/t_{Zement}.

[53] (Agora Think Tanks; Prognos AG; Öko-Institut e.V.; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Universität Kassel, 2024).

Studien zufolge könnte in der chemischen Industrie im Jahr 2045 bis zu 22 Mio. Tonnen Biomasse zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs eingesetzt werden. So könnte die Biomasse etwa 50 Prozent des Kohlenstoffbedarfs bereitstellen, während der restliche Bedarf durch mechanisches und chemisches Recycling sowie fossile Rohstoffe gedeckt werden würde.[54]

Das Entnahmepotenzial der stofflichen Biomassenutzung ist abhängig von der Nutzungsdauer

Die Dauerhaftigkeit der stofflichen Biomassenutzung hängt hauptsächlich davon ab, welche Produkte hergestellt und wie sie verwendet werden. Für viele Holzprodukte und manche Kunststoffe liegt sie bei Jahrzehnten bis Jahrhunderten. Für den Verbleib von Holzbaustoffen in der Bausubstanz wird ein Zeitraum von 35 bis 120 Jahren angegeben. Grundsätzlich besteht das Risiko frühzeitiger Entsorgung sowie Emissionsfreisetzung durch Brände.[55]

Durch eine verstärkte Kaskadennutzung können die Nutzungsdauer und damit auch die Dauer der Entnahme erhöht werden. Ein Beispiel hierfür wäre die mehrstufige Nutzung von Holz: zunächst als Konstruktionsmaterial im Hausbau und anschließend für Möbel, danach als Rohstoff für Spanplatten und am Lebensende der Spanplatten deren Umwandlung zur Herstellung von Kunststoffen. Durch Recycling kann der Kohlenstoff über mehrere Lebenszyklen hinweg gebunden bleiben. Bei der thermischen Verwertung lässt sich das biogene CO_2 zudem abscheiden und anschließend nutzen (siehe Kapitel 4.12) oder speichern (siehe Kapitel 4.9).

Die Modellierungsrechnungen zeigen, dass durch einen Anstieg der Nutzung von Holzprodukten im Jahr 2030 etwa 10 bis 12 Mio. Tonnen CO_2 entnommen werden können. Bis 2050 entwickelt sich dieser Wert – abhängig von der Störungsintensität[56] und der entnommenen Holzmenge – auf rund 10 bis 19 Mio. Tonnen CO_2.[57] Die Senkenwirkung bleibt bestehen, solange die Zuflüsse in den Speicher die Abflüsse übersteigen. Weil der Abfluss mit dem Bestand wächst, ist dafür ein stetig steigender Zufluss nötig, dessen Potenzial wiederum durch die nachhaltig verfügbare Holzmenge begrenzt ist. Das Potenzial der stofflichen Biomassenutzung wurde bisher in wenigen Studien quantifiziert.

Die Verwendung von Holzprodukten führt zu inländischer Wertschöpfung

In Deutschland arbeiten etwa 700.000 Menschen in der Holz- und Forstwirtschaft. Holzprodukte werden bereits in großem Umfang produziert und insbesondere im Bauwesen eingesetzt. Modulare Systeme und serieller Holzbau bieten zudem weitere Potenziale für eine effiziente Nutzung. Mit einer Zunahme des Holzbaus wäre auch eine Zunahme der sekundären Verarbeitung verbunden. Dies würde sich sowohl auf die Schaffung von Arbeitsplätzen als auch auf die Wertschöpfung positiv auswirken.[58]

---

[54] (Agora Think Tanks; Prognos AG; Öko-Institut e.V.; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Universität Kassel, 2024).
[55] (Goulouti, Favre, Giorgi, & Padey, 2021).
[56] Die Störungsintensität beschreibt das Ausmaß natürlicher (z. B. Stürme, Schädlinge, Dürren) und menschlicher Einflüsse auf Wälder, die deren Wachstum und Holzvorrat und damit die CO_2-Entnahme beeinflussen.
[57] Für 2030 liegt der zusätzliche Zufluss zum Holzproduktespeicher bei 4,5 bis 6 Mio. m^3 und im Jahr 2045 bei 7 bis 20 Mio. m^3 in Abhängigkeit von der angenommenen Störungsintensität in den Szenarien.
[58] (BMEL, 2024c).

Verstärkte stoffliche Biomassenutzung steht in Konkurrenz zur Extensivierung der Wald- und Landbewirtschaftung

Das Potenzial für die CO_2-Entnahme durch die stoffliche Biomassenutzung ist eng an die Verfügbarkeit von Biomasseressourcen gebunden. Die Verfügbarkeit wird wesentlich durch die Art der Waldbewirtschaftung und die vorhandene Waldfläche bestimmt. Im deutschen Kontext ist es wichtig, zu betonen, dass eine nachhaltige Waldbewirtschaftung sowohl die Holzproduktion als auch die Kohlenstoffspeicherung in den Wäldern beeinflusst. Dabei gilt: Ein stärkerer Verbleib des Holzes im Wald erhöht den Kohlenstoffspeicher dort, reduziert jedoch den Speicher in Holzprodukten (siehe Kapitel 4.1).

Eine Steigerung des Bedarfs an Holzprodukten kann zu negativen Auswirkungen auf Ökosysteme führen. In Deutschland erfolgt die Ernte von Holz auf bestehenden Waldflächen. Abgesehen von aktivem Management im bestehenden Wald gibt es in Deutschland kaum Spielraum für eine wesentliche Vergrößerung der Waldfläche. Bei einem zukünftigen Anstieg der Nutzung von Holzprodukten müsste der zusätzliche Bedarf über andere Quellen (z. B. Agroforstsysteme) oder Importe gedeckt werden und würde mit entsprechenden Umwelt- und Ressourcenkonflikten in anderen Ländern einhergehen.

Die energetische Nutzung kann in Konkurrenz zu einer möglichst langfristigen Nutzung von Holzprodukten und Biomasse stehen

In Deutschland entfiel 2020 nahezu die Hälfte der gesamten Holznutzung auf die energetische Verwertung mit einem Gesamtvolumen von ca. 60 Mio. m³. Die energetische Verwertung ist insbesondere bei Biomasse zu wählen, die nur begrenzt anderweitig verwertbar oder bereits in bestehende Prozesse integriert ist, wie etwa bei der energetischen Nutzung der Schwarzlauge in der Papier- und Zellstoffindustrie. In einzelnen Anwendungsfällen ist jedoch auch hier eine stoffliche Verwertung des enthaltenen Lignins (z. B. für Batterie-Anoden, Ersatz für Industrieruß) oder eine chemische Nutzung durch Umsetzung zu Synthesegas (H_2 + CO) möglich.

Grundsätzlich stellen die möglichen Einkünfte der energetischen Verwertung Opportunitätskosten der weiteren stofflichen Nutzung dar. Einkünfte der stofflichen Nutzung und damit erreichbaren CO_2-Entnahme müssen diese entsprechend übersteigen. In Abhängigkeit der Opportunitätskosten liegen die Entnahmekosten der stofflichen Biomassenutzung zwischen 0 und 320 Euro/t CO_2.[59, 60]

Die Nutzung von Biomasse ist bereits auf europäischer und deutscher Ebene gesetzlich geregelt

Auf europäischer Ebene regelt die EU-LULUCF-Verordnung (2018/841) die Berichterstattung der Kohlenstoffflüsse in Wäldern, Böden und Holzprodukten. Entsprechend der Verordnung muss Deutschland den CO_2-Speicher von Holzprodukten in der nationalen Klimabilanz berücksichtigen. Die wichtigsten Gesetze in Deutschland sind das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und die Altholzverordnung (AltholzV) sowie das Bundeswaldgesetz (BWaldG), Landeswaldgesetze und das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) (siehe Kapitel 4.1). Das BWaldG verpflichtet Waldbesitzerinnen und -besitzer zur nachhaltigen Nutzung und Bewirtschaftung des Waldes gemäß dem Prinzip

[59] (UBA, 2022).
[60] (Wollnik, et al., 2023).

„Schützen und Nutzen“ und soll somit eine mögliche Übernutzung verhindern. In der AltholzV werden die stoffliche und die energetische Verwertung von Altholz geregelt und sie bietet somit einen Ansatz zur Stärkung der Kaskadennutzung.

Im Hinblick auf den internationalen Holzhandel regelt das Holzhandels-Sicherungs-Gesetz (HolzSiG), dass importiertes Holz aus legalen Quellen stammt. Beim Einsatz von Holz als Baustoff greift das Bauordnungsrecht. In DIN-Normen und im Europäischen Bauproduktenrecht werden entsprechende Anforderungen festgehalten. Darüber hinaus hat die Bundesregierung im Juni 2023 die Holzbauinitiative beschlossen. Sie hat zum Ziel, den Einsatz von Holz als nachhaltigem Baustoff im Bauwesen zu fördern.[61] In Bezug auf brandschutztechnische Anforderungen gilt die Muster-Holzbaurichtlinie.

Im Rahmen der Renewable Energy Directive (RED III) werden Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse festgelegt. Darüber hinaus unterliegt die Nutzung von Biomasse aus Abfällen und Reststoffen den Bestimmungen des KrWG. Mit der 2020 beschlossenen nationalen Bioökonomiestrategie wird die stoffliche Biomassenutzung gefördert. Ziel sind die Reduzierung fossiler Rohstoffe und die Förderung biobasierter Produkte. In der Folge wurden verschiedene Forschungsinitiativen durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) umgesetzt, wie die Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier.[62]

Auch wenn bereits Produkte aus Biomasse für viele verschiedene Anwendungen genutzt werden, besteht weiterer Forschungsbedarf (TRL 5-9)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Welche Wechselwirkungen bestehen zwischen der Holz- und Waldnutzung und anderen, möglicherweise konkurrierenden Nachhaltigkeitszielen?
- Welche Effekte hat die Holznutzung auf die regionale Wertschöpfung?
- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der Holznutzung und Nachhaltigkeitszielen, Waldaufforstung, Landnutzungskonflikten, der Holzbau-Offensive und der EU-Bauprodukte-Verordnung?
- Wie kann die Entnahmedauer bei der stoffliche Biomassenutzung zuverlässig gemessen werden?

4.4 Agroforstsysteme

Unter Agroforstsystemen ist die Integration von Nutzgehölzen in landwirtschaftlich genutzte Flächen zu verstehen. Dazu werden Bäume oder Sträucher (Obstgehölze und/oder Energieholz) in Reihen oder Blöcken zwischen landwirtschaftlich genutzten Flächen gepflanzt.

Über den Prozess der Photosynthese wird durch den Aufwuchs der Kulturen einer Agroforstwirtschaft CO_2 aus der Atmosphäre in Holz, in anderen Pflanzenstrukturen und im Boden eingespei-

[61] (FNR, 2024).
[62] (ptj, 2025).

chert. Somit können durch eine Umstellung der traditionellen landwirtschaftlichen Nutzung auf einen agroforstwirtschaftlichen Betrieb die auf den Feldern und in den Böden gespeicherte Menge Kohlenstoff und die Biomasseproduktion erhöht werden. Dabei besteht außerdem die Option, die Biomasse zu ernten und anschließend zu verwenden. Wird die Biomasse für die Herstellung von langlebigen Produkten oder Pflanzenkohle verwendet oder energetisch mit anschließender Abscheidung des CO_2 verwertet, ist ebenfalls eine CO_2-Entnahme möglich (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Agroforstsysteme haben verschiedene positive Co-Benefits

Durch die Kombination aus Gehölzreihen und Feldern entsteht eine symbiotische Beziehung, in der Bäume Schatten spenden, den Windschutz verbessern und den Boden unter anderem durch Humusbildung mit Nährstoffen anreichern. Die tiefreichenden Wurzeln der Bäume holen Nährstoffe aus tieferen Bodenschichten und verbessern die Bodenqualität, während sie gleichzeitig die Erosion verringern und den Wasserhaushalt regulieren. Zudem kann der Aufbau von Agroforstsystemen der Erhöhung der Lufttemperaturen durch lokale Kühleffekte entgegenwirken und zu einer Stabilisierung des Mikroklimas beitragen. Weiterhin können Agroforstsysteme die Artenvielfalt fördern, da die Kombination von Bäumen, Sträuchern und landwirtschaftlichen Kulturen wertvolle Lebensräume für verschiedenste Tier- und Pflanzenarten schafft.[63] Agroforstsysteme bieten demnach nicht nur ökologische Vorteile, sondern können auch die landwirtschaftliche Produktivität steigern.[64]

Agroforstsysteme ermöglichen die CO_2-Entnahme ohne landwirtschaftliche Produktivitätsverluste

In Deutschland existieren aktuell (12.2024) rund 1.700 Hektar etablierte Agroforstfläche.[65] Je nach Ausgestaltung können Agroforstsysteme CO_2-Entnahmen erzielen, ohne den Flächenbedarf für die Produktion von herkömmlichen landwirtschaftlichen Produkten zu vergrößern. Dies ist durch Erhöhung der Flächenproduktivität aufgrund der Synergien zwischen den verschiedenen Pflanzungen möglich. Wie viel CO_2 gebunden wird, hängt stark von der Gehölzart, der Pflanzdichte und den Standortbedingungen ab. Studien zeigen eine hohe Bandbreite auf. In den ersten 20 Jahren könnten Entnahmeraten von bis zu etwa 21 t CO_2/ha und Jahr erreicht werden. Im Mittel ist von einer Senkenwirkung von ca. 10 t CO_2/ha und Jahr auszugehen.[66]

Die jährliche Senkenleistung sinkt im Zeitverlauf. Mit zunehmendem Bestandsalter nimmt der jährliche Biomassezuwachs ab, und der organische Bodenkohlenstoff nähert sich unter konstanten Bedingungen einem Fließgleichgewicht aus Eintrag und Abbau.[67] Eine dauerhaft zusätzliche Entnahmewirkung setzt deshalb voraus, dass Biomasse geerntet und der Kohlenstoff langfristig gebunden

[63] (DeFAF, 2024; Böhm, Tsonkova, Mohr, & al., 2020; Wollnik, et al., 2023).
[64] Im Rahmen der Modellierung der LNe wird eine Verringerung der Düngegabe von etwa 0,11 t Stickstoff pro Hektar durch Agroforstsysteme berücksichtigt.
[65] (DeFAF, 2025).
[66] (DeFaF, 2025a; Wollnik, et al., 2023).
[67] (BonaRes, 2020).

wird, etwa in langlebigen Holzprodukten. Gleichzeitig kann durch neuen Aufwuchs auf Agroforstfläche wieder CO_2 aus der Atmosphäre in Biomasse gebunden werden. Je nach Umständen kann so eine Senkenwirkung von 100 Jahren und mehr erreicht werden (siehe Kapitel 4.3).[68]

In der Modellierung kommen Agroforstsysteme im Jahr 2030 auf 325 Tsd. Hektar landwirtschaftlicher Fläche zum Einsatz. Daraus ergeben sich Entnahmen von 2,5 bis 2,6 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr. Für das Jahr 2045 sieht die Modellierung den Einsatz von Agroforstsystemen auf 1,24 Mio. Hektar vor (etwa 7 Prozent der gesamten landwirtschaftlichen Fläche). Damit können je nach Ernterate zwischen 10 und 16 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme erreicht werden. [69] Der Unterschied im Potenzial ergibt sich aus der Ernterate. [70]

Weiterhin können Agroforstsysteme über die Ernte und Verwendung von Biomasse fossile Energie- und Rohstoffquellen ersetzen. Beispiele hierfür sind der Einsatz als Bauprodukte oder etwa als Substrat in Biogasanlagen (siehe Kapitel 4.3).[71] Durch Agroforstsysteme können sowohl landwirtschaftliche Produkte als auch weitere Produkte wie Früchte, Nüsse oder Holz geerntet werden. Zusammen mit der Möglichkeit des Verkaufs von Zertifikaten auf dem Freiwilligen Kohlenstoffmarkt (engl. Voluntary Carbon Market, VCM) können die Einnahmen für Landwirte somit diversifiziert werden.[72, 73]

Agroforstsysteme führen zu einer erhöhten Komplexität der Landbewirtschaftung und sind Klimawandel und natürlichen Störungen ausgesetzt

Die Bewirtschaftung von Flächen mit Maschinen kann durch Agroforstsysteme erschwert werden. Die Kleinteiligkeit führt zu höheren Kosten (z. B. zusätzliche Maschinen) im Vergleich zum Anbau von Reinkulturen; insbesondere in der Wachstumsphase kommt es zu Ertragseinbußen. Bislang ist auch die Quantifizierung der CO_2-Entnahme zur Vermarktung aufgrund mangelnder Standards noch herausfordernd. In Abhängigkeit von den Lebensräumen können Agroforstsysteme auch negative Auswirkungen auf die Umwelt haben. Beispielsweise können sie in Trockenrasen-Gebieten zu einer Verdrängung von gefährdeten Arten führen. Der Einsatz auf Ackerland ist effektiver als auf Grünland, da Grünlandböden bereits hohe Kohlenstoffvorräte aufweisen.[74]

Agroforstsysteme unterliegen auch Risiken durch Klimaveränderungen und natürliche Störungen wie Bränden oder Schädlingsbefall, die zu einem Verlust des eingespeicherten Kohlenstoffs führen können.

[68] (Wollnik, et al., 2023).
[69] Die Ernterate im Szenario mit hoher Störung liegt bei 10 Prozent und führt zu einem höheren Entnahmepotenzial. In den weiteren Szenarien der Modellierung liegt die Ernterate bei 60 Prozent.
[70] (Wollnik, et al., 2023).
[71] Die Biomasse kann energetisch verwendet werden. Pro Kilogramm und Hektar können 4 bis 5 kWh Energie erzeugt oder pro Hektar 482 bis 702 kg Holzpellets produziert werden (Wollnik et al. 2023).
[72] Vergleichsweise geringe CO_2-Entnahmekosten für Agroforstsysteme von etwa 70 bis 154 Euro/t CO_2.
[73] (Wollnik, et al., 2023).
[74] (Wollnik, et al., 2023).

In Deutschland besteht ein gesetzlicher Rahmen, der noch Unsicherheiten aufweist

Darunter fallen die allgemeinen Verordnungen und Vorschriften zur Bodenbearbeitung[75], zu Düngemitteln[76], zum Pflanzenschutz[77] und zum Grundwasserschutz[78] sowie gegebenenfalls die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie. Darüber hinaus gelten das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), das Nachbarschaftsgesetz (NachbG), das die Abstände zwischen landwirtschaftlich genutzten Flächen regelt, und die Gehölzschutzverordnung für „geschützte Landschaftsbestandteile".[79]

Rechtlich handelt es sich bei Agroforstsystemen um eine landwirtschaftliche Bodennutzung, die nach Ansicht des Deutschen Fachverbands für Agroforstwirtschaft weder dem § 5 Abs. 2 des BNatSchG noch dem § 17 Abs 2. des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG) entgegensteht. Deswegen sind Agroforstsysteme nach Ansicht des Verbandes nicht als Eingriff in die Natur und Landschaft nach § 14 BNatSchG einzuordnen und wären somit nicht genehmigungspflichtig nach § 4 Abs. 2 GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV). In der Praxis führt dies insbesondere in Schutzgebieten häufig zu Unsicherheiten bei den Naturschutzbehörden.

Weitere Unsicherheiten ergeben sich aus den aktuellen Regelungen beim Status als ökologische Vorrangfläche und der geeigneten Baumartenliste sowie aus Pachtverträgen, die Agroforstsysteme verbieten oder eine Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands nach Vertragsende verlangen.

Auf europäischer und deutscher Ebene sind Agroforstsysteme in der GAP als förderfähige landwirtschaftliche Praxis anerkannt

Die GAP der EU zielt darauf ab, eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Landwirtschaft zu fördern. Mit der GAPDZV 2022 wurden Agroforstsysteme erstmals rechtsverbindlich im Agrarförderrecht definiert. Die Bundesregierung hat im GAP-Strategieplan das Ziel formuliert, bis 2027 insgesamt 200.000 Hektar Agroforstgehölzflächen zu etablieren. Im Jahr 2023 wurden zum Vergleich 51 Hektar an Projekten realisiert. In Deutschland kann über die Öko-Regelung Nr. 3 für die „Beibehaltung einer agroforstlichen Bewirtschaftungsweise auf Acker- und Dauergrünland" ein Förderbetrag von 200 Euro je Hektar Agroforstgehölzfläche abgerufen werden. Die Förderung ist jährlich neu zu beantragen. Der Betrag wird dabei als deutlich zu niedrig kritisiert.[80, 81]

Weiterhin können über die zweite Säule der GAP über die Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (AUKM) Agroforstsysteme eine Förderung erhalten. Diese Maßnahmen werden von den Bundesländern angeboten. Das Förderziel ist der Schutz des Klimas und die Teilnahme ist freiwillig. Die Bindungsfrist beträgt zwischen 5 und 7 Jahren. In den Bundesländern liegt die Förderquote derzeit

[75] Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG), Erosionsschutzverordnung.
[76] Düngemittelgesetz, Düngemittelverordnung.
[77] Pflanzenschutzmittelverordnung, Pflanzenschutzsachverständigenverordnung, Pflanzenschutzgesetz, Saatgutverkehrsgesetz.
[78] Wasserhaushaltsgesetz, EG-Wasserrahmenrichtlinien, EU-Grundwasserrichtlinien.
[79] (Wollnik, et al., 2023).
[80] Um für eine Förderung zulässig zu sein, müssen in den meisten Bundesländern Agroforstsysteme eine Mindestgröße von 0,3 Hektar aufweisen (§ 18 Abs. 1 InVeKoSV (Verordnung über die Durchführung von Stützungsregelungen und des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems)). In einigen Bundesländern mit einem hohen Anteil an kleinräumiger Landbewirtschaftung beträgt die Mindestflächengröße nur 0,1 Hektar (Wollnik et al. 2023).
[81] (agrarheute, 2023).

zwischen 40 und 65 Prozent. Über die GAK können die Maßnahmen über den Bund kofinanziert werden. Die Höhe der Zuwendung variiert je nach Ausgestaltung der Agroforstsysteme.[82]

Bei der Agroforstwirtschaft handelt es sich um eine ausgereifte Methode (TRL 9)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Welche Baumarten eignen sich zur Klimaanpassung, um widerstandsfähige Ökosysteme zu fördern?
- Wie kann die Symbiose zwischen Bäumen und landwirtschaftlichen Kulturen optimiert werden, um Erträge zu maximieren?
- Wie kann die Effizienz des MRV gesteigert werden?

4.5 Humusanreicherung im Boden

Böden speichern erhebliche Mengen an Kohlenstoff, der in verschiedenen Formen vorkommt. Er liegt in lebender Biomasse und in abgestorbener organischer Substanz vor, die teilweise zersetzt als Humus eine zentrale Rolle für viele Bodenfunktionen spielt. Die Anreicherung von Humus kann durch gezielte Bodenbewirtschaftung gefördert werden. Da sich der Bodenkohlenstoff in einem dynamischen Gleichgewicht befindet, umfasst dies entweder eine Erhöhung der organischen Einträge oder eine Verringerung der Austräge.[83] Verschiedene landwirtschaftliche Methoden tragen zur Humusanreicherung bei, darunter:

- Ganzjährige Bodenbedeckung: Diese Methode umfasst den Anbau von Pflanzen oder die Verwendung von Mulch, um den Boden das ganze Jahr über bedeckt zu halten.
- Verwendung von Ernterückständen, Kompost, Stallmist etc. als organischer Bodenzusatz: Diese Praxis erhöht den Gehalt an organischer Substanz im Boden. In Deutschland werden diese Stoffströme bereits weitgehend genutzt.
- Flächenumwandlung in Dauergrünland: Die Umwandlung von Ackerland in Dauergrünland steigert die langfristige Kohlenstoffspeicherung im Boden, da Grasland mehr Kohlenstoff bindet als Ackerflächen.
- Diversifizierte Fruchtfolgen: Zwischenfrüchte können vor oder nach der Hauptkultur, aber auch dazwischen gesät werden, wobei die Pflanzen Kohlenstoff binden.

Die Aufforstung ertragsarmer landwirtschaftlicher Flächen, Agroforstsysteme sowie die Wiedervernässung von Mooren können ebenfalls zur nachhaltigen Bodenbewirtschaftung beitragen (siehe Kapitel 4.2, Kapitel 4.4, Kapitel 4.6).[84]

[82] (DeFAF, 2023).
[83] (Bodirsky, et al., 2025).
[84] Auch die Direktsaat wirdals Maßnahme zur Humusanreicherung im Boden diskutiert. Bei dieser Methode werden Kohlenstoffgehalte im Oberboden gesteigert, nehmen jedoch auch im gleichen Maße ab. Dadurch kommt es nicht zu einer CO_2-Entnahme.Dennoch kann die Maßnahme eine positive Klimawirkung haben (Bodirsky, et al., 2025).

Der Humusaufbau hat vielfältige positive Auswirkungen auf den Boden

Durch den Verdunstungseffekt der Pflanzen können ganzjährige Bodenbedeckungen einen positiven Einfluss auf die Lufttemperatur (Kühleffekt) und die Luftfeuchtigkeit haben (Dauergrünland). Zudem können die Maßnahmen, wie Direktsaat und Dauergrünland, die Wasserinfiltration und den Wasserhaushalt verbessern. In Abhängigkeit von der Umsetzung kann es zu einer reduzierten Nitratauswaschung kommen (Dauergrünland und ganzjährige Bodenbedeckung). Beim Anbau von Zwischenfrüchten (insbesondere Leguminosen) können somit auch Düngemittel eingespart werden. Bei der Umwandlung in Dauergrünland wird darüber hinaus die Bodenfruchtbarkeit erhöht und die Nährstoffauswaschung verringert. Zusätzlich können sich die Maßnahmen positiv auf die Biodiversität auswirken. Dies gilt insbesondere bei der Umwandlung in Dauergrünland. Zwischenfrüchte können das Abtragen von Bodenpartikeln (Bodenerosion) durch Wind und Wasser verringern.[85]

Die Resilienz der Landwirtschaft gegenüber dem Klimawandel kann gestärkt werden

Setzt sich die globale Erwärmung ungehindert fort, werden die Agrarflächen flächendeckend Humus und Bodenkohlenstoff verlieren. Die beschriebenen Maßnahmen können dazu beitragen, diese Effekte abzumildern, und werden zukünftig notwendig sein, um diesen Prozessen entgegenzuwirken. Die Humusanreicherung in Böden kann somit zur Erhöhung der Ernährungssicherheit beitragen.[86]

Die einzelnen Verfahren sind bereits technisch ausgereift und werden weitestgehend von der lokalen Bevölkerung unterstützt. Zudem ist die erforderliche Infrastruktur meist vorhanden oder erfordert nur geringe Anpassungen.[87]

Für eine CO_2-Entnahme ist eine dauerhafte Fortführung der Maßnahme notwendig

Der Kohlenstoff wird von den Feinwurzeln der Pflanzen in den Boden eingetragen und erhöht so den Bestand an organischem Kohlenstoff. Nach einer gewissen Zeit stellt sich ein neues Gleichgewicht ein. Der Zeitraum bis zur Erreichung eines neuen Fließgleichgewichts hängt vom Standort und von der Umsetzung ab und kann entsprechend variieren. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Dauer der CO_2-Speicherung im Unterboden bei Dauergrünland mehrere Jahre beträgt (> 100 Jahre).

Wird danach die Bewirtschaftung umgestellt (Eintrag des Kohlenstoffs) oder die Umwandlung in Dauergrünland rückgängig gemacht, verliert der Boden den Kohlenstoff wieder vollständig. Der Klimawandel kann zu zusätzlichem Verlust des Bodenkohlenstoffs führen. Daraus ergibt sich auch eine Herausforderung für eine mögliche Zertifizierung. Die Kosten ohne Einbezug der Versicherung dieses Effekts liegen bei 20 bis 170 Euro/t CO_2.[88, 89]

[85] (Wollnik, et al., 2023).

[86] (Bodirsky, et al., 2025).

[87] (Wollnik, et al., 2023; Bodirsky, et al., 2025).

[88] Ganzjährige Bodenbedeckung: ca. 30 bis 66 Euro/t CO_2, Umwandlung von Acker- in Dauergrünland: 77 bis 170 Euro/t CO_2, organischer Dünger und Kompost: ca. 20 bis 44 Euro/t CO_2.

[89] (Bodirsky, et al., 2025; Wollnik, et al., 2023).

Die Aufnahmefähigkeit des Bodens und die Umsetzung der Verfahren begrenzen das Entnahmepotenzial

Grundsätzlich weisen die Methoden der Humusanreicherung im Boden ein vergleichsweise geringes flächenspezifisches Potenzial zur Entnahme von CO_2 auf. Da die Ansätze unterschiedliche Potenziale besitzen, ist es insgesamt schwierig, das Gesamtpotenzial abzuschätzen.

In Bezug auf die Fläche liegt das Entnahmepotenzial bei 0,8 bis 3,1 Tonnen CO_2 pro Hektar und Jahr.[90] Weiterhin stehen Ansätze wie die Umwandlung in Dauergrünland in stärkerer Konkurrenz zu anderen Flächen. Bei Umwandlung von ca. 1-2 Mio. Hektar Ackerfläche (ca. 10-20 % der Gesamtfläche) bestünde ein jährliches Entnahmepotenzial von 3 bis 6 Mio. Tonnen CO_2. Das Potenzial ist dabei begrenzt durch die tatsächlich verfügbare Fläche und stark standortabhängig. Der Klimawandel könnte zunehmend Einfluss auf das Pflanzenwachstum sowie den mikrobiellen Abbau der Humusschicht haben und sorgt für Unsicherheit bezüglich der möglichen CO_2-Entnahmeleistung. Bei der Umsetzung einiger Verfahren kann es zur Freisetzung von Stickstoffemissionen kommen.[91]

Die Umsetzung kann zum Verlust an ackerbaulicher Nutzfläche sowie zu Verschiebungseffekten führen

Maßnahmen, die die landwirtschaftliche Produktivität stark senken (wie die großflächige Umwandlung von Ackerland in Dauergrünland), können zu indirekten Landnutzungsänderungen (engl. Indirect Land Use Change) führen. Hat dies zur Folge, dass in anderen Regionen der Welt bestehende Ökosysteme (Wälder, Savannen u. a.) in Ackerland umgewandelt werden, führt dies zur Freisetzung von THG-Emissionen. Hierdurch kann die Gesamtbilanz der Maßnahme negativ ausfallen.

Zudem könnte eine intensivere Bodenbewirtschaftung lediglich auf andere Flächen verlagert werden. Bei der Ausbringung von Mist und Kompost besteht die Herausforderung, nachzuweisen, dass der Einsatz zusätzlich erfolgt und nicht ohnehin eine Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen erfolgen würde.[92]

Das MRV ist mit Unsicherheiten verbunden

In Deutschland führt das Thünen-Institut die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft durch. Der erste Bodenzustandsbericht wurde im Dezember 2018 vorgelegt. Weiterhin werden auf Ebene der nationalen THG-Inventare die Böden im LULUCF-Sektor berichtet.

Die THG-Emissionen sind auf Projektebene grundsätzlich vor Ort messbar. Veränderungen des Bodenkohlenstoffbestands können durch regelmäßige Messkontrollen überprüft werden. Dabei kann es aufgrund von Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Baseline-Szenarien zu Unsicherheiten bei Messungen und Herausforderungen beim freiwilligen Kohlenstoffhandel kommen. Messungen können kostenaufwendig sein, da eine anschließende Laboruntersuchung notwendig ist.

[90] Umwandlung in Dauergrünland: ca. 3,1 t CO_2/ha pro Jahr, ganzjährige Bodenbedeckung: ca. 1,2 t CO_2/ha pro Jahr, organischer Dünger und Kompost als Bodenzusatz: 0,8 t CO_2/ha pro Jahr (Wollnik et al. 2023).

[91] (Wollnik, et al., 2023; Bodirsky, et al., 2025).

[92] (Bodirsky, et al., 2025).

Mit der Ackerbaustrategie und der Bio-Strategie unterstützt die Bundesregierung eine langfristige Humusanreicherung in Böden

In Deutschland wird die Humusanreicherung im Boden über das Bundesbodenschutzgesetz geregelt, insbesondere über § 7 BBodSchG (Vorsorgemaßnahmen und Vorsorgepflicht für den Humuserhalt) sowie § 17 („Zu den Grundsätzen […] gehört […], dass der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz oder durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität [sic] erhalten wird."). Weiterhin werden über § 6 BBodSchG strenge Prüfpflichten für Materialien wie Kompost und andere organische Bodenverbesserer vorgegeben. Zudem umfasst der bestehende gesetzliche Rahmen die Einbringung von Düngemitteln[93], den Pflanzenschutz[94] und den Grundwasserschutz[95] sowie gegebenenfalls die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie.

Die Ackerbaustrategie 2035 des BMEL hat das Ziel, Wege zu einem nachhaltigeren Ackerbau in Deutschland aufzuzeigen. Drei der zwölf Handlungsfelder betreffen die Humusanreicherung in Böden:

- Bodenschutz weiter stärken und Bodenfruchtbarkeit erhöhen
- Kulturpflanzenvielfalt erhöhen und Fruchtfolgen erweitern
- Klimaschutz im Ackerbau ausbauen und Synergien nutzen

Zur Erreichung eines Anteils des ökologischen Landbaus von 30 Prozent bis 2030 soll die Zukunftsstrategie ökologischer Landbau zur Bio-Strategie 2030 weiterentwickelt werden. Dies ist besonders relevant für die CO_2-Entnahme, da bei der Umstellung auf Ökolandbau eine dauerhafte Umstellung der landwirtschaftlichen Aktivität erfolgt.[96]

Die Humusanreicherung in Böden wird im Rahmen des ANK und der GAP gefördert

Maßnahmen zum Humusaufbau werden bereits im Rahmen der GAP gefördert. Die Förderung kann über die Öko-Regelungen 1a, 2, 3 und 4 erfolgen.[97, 98] Die Prämienhöhen und Anforderungen können je nach Bundesland und spezifischen Bedingungen variieren. Maßnahmen können im Rahmen der zweiten Säule der GAP über die AUKM gefördert werden. Auch hier können sich die Fördermittel und Spezifikationen je nach Bundesland unterscheiden.

---

[93] Düngemittelgesetz, Düngemittelverordnung.
[94] Pflanzenschutzmittelverordnung, Pflanzenschutzsachverständigenverordnung, Pflanzenschutzgesetz, Saatgutverkehrsgesetz.
[95] Wasserhaushaltsgesetz, EG-Wasserrahmenrichtlinien, EU-Grundwasserrichtlinien.
[96] (BMEL, 2024a; BMEL, 2021).
[97] 1a: Bereitstellung von nichtproduktiven Flächen auf Ackerland mit dem Ziel der Förderung der Biodiversität durch Stilllegung von Ackerflächen.
2: Vielfältige Fruchtfolgen im Ackerbau mit dem Ziel der Erhöhung der Biodiversität und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit durch Anbau verschiedener Kulturen.
3: Anlage von Blühstreifen und -flächen mit dem Ziel der Förderung der Biodiversität durch Schaffung von Lebensräumen für Insekten und andere Tiere.
4: Extensivierung von Dauergrünland mit dem Ziel des Erhalts und der Förderung der Biodiversität auf Grünlandflächen.
[98] (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, 2024).

Die Fördermöglichkeiten der GAP werden durch das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz ergänzt. Im ANK wurde festgehalten, dass das Bundesbodenschutzgesetz evaluiert werden soll und an die Herausforderungen des Klimaschutzes, der Klimaanpassung und des Erhalts der Biodiversität anzupassen ist. Im Dezember 2024 wurde das nationale Bodenmonitoring-Zentrum als eine zentrale Maßnahme des ANK eingeführt. Darüber hinaus hat das BMEL verschiedene Projekte gefördert. Vorgesehen waren im Jahr 2023 Ausgaben in Höhe von 12 Mio. Euro, wovon 3 Mio. Euro abgerufen wurden.

Bei der Humusanreicherung im Boden handelt es sich um eine ausgereifte Methode (TRL 9)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie verändert sich das Potenzial in unterschiedlichen Böden und wie lassen sich Einflussfaktoren genauer bestimmen?
- Wie kann in Zukunft ein vereinfachtes und robustes MRV erfolgen?
- Wie kann ein Marktrahmen aussehen, der die Unsicherheiten in Bezug auf Dauerhaftigkeit und den Beitrag von Ökosystemdienstleistungen berücksichtigt?

4.6 Wiedervernässung von Mooren

Intakte Moore sind kohlenstoffreiche Feuchtgebiete, die durch einen dauerhaft hohen Wasserstand gekennzeichnet sind. Dieser verhindert die vollständige Zersetzung abgestorbener Pflanzenreste, wodurch Torf entsteht – ein Sediment mit hohem Kohlenstoffgehalt. Entwässerte Moore setzen dagegen viel CO_2 frei, da Sauerstoff in den Boden eindringen kann und Mikroorganismen den trockengefallenen kohlenstoffreichen Torfboden zersetzen.[99]

Durch die Wiedervernässung von Mooren kann dies vermieden werden. Hierbei wird durch gezielte Maßnahmen wie den Rückbau oder die Umstrukturierung von Gräben und Dämmen der Wasserstand nahe der Bodenoberfläche angehoben, um die ursprünglichen hydrologischen Bedingungen wiederherzustellen. Diese Maßnahmen stoppen den Kohlenstoffabbau im Torf und ermöglichen langfristig die erneute Kohlenstoffeinlagerung.

Die Wiedervernässung von Mooren dient primär der Vermeidung von THG-Emissionen

Durch die Anhebung des Wasserstands wird der Abbau von Torf gestoppt und die damit verbundenen CO_2-Emissionen vermieden. Daneben kann langfristig auch wieder Torf aufgebaut und damit CO_2 aus der Atmosphäre entnommen werden. In den ersten 10 bis 15 Jahren nach Wiedervernässung könnten Moore kumuliert bis zu 10 t CO_2 pro Hektar pro Jahr aufnehmen, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Langfristig wird von einer maximalen Entnahmerate von 1 t CO_2/ha pro Jahr ausgegangen. Allerdings wird dieser Effekt durch erhöhte Methanemissionen weitgehend ausgeglichen.[100]

[99] (Bauhus, et al., 2025).
[100] (Bauhus, et al., 2025).

Insgesamt führt die Wiedervernässung somit dazu, dass ehemals entwässerte Moore wieder eine annähernd ausgeglichene Treibhausgasbilanz erreichen und die zuvor hohen Emissionen deutlich reduziert oder vollständig vermieden werden können. Damit stellt sie eine wirksame Maßnahme zur Vermeidung von Treibhausgasen dar.

Die deutschen Ziele für den LULUCF-Sektor sind ohne die Wiedervernässung von Mooren nicht erreichbar

Entwässerte Moore in Deutschland setzen große Mengen CO_2 frei. Im Jahr 2021 belief sich der Ausstoß trockengelegter Moore in Deutschland auf 53,7 Mio. Tonnen CO_2äq, mehr als die gesamten industriellen Prozessemissionen in Deutschland. Die Wiedervernässung hat daher ein erhebliches Potenzial zur Vermeidung von Treibhausgasen.

Die Modellierung für die LNe hat ergeben, dass durch umfangreiche Wiedervernässung (ca. 87 Prozent der trockengelegten Moorflächen beziehungsweise 1,1 Mio. Hektar), die Einstellung des Torfabbaus und die Optimierung bestehender Feuchtgebiete die THG-Emissionen Deutschlands im Jahr 2045 gegenüber heute um 43 Mio. Tonnen reduziert werden könnten. Zum Vergleich: Aktuell werden in Deutschland jährlich nur etwa 2.000 Hektar organischer Böden wiedervernässt.

Die Wiedervernässung führt zu positiven Auswirkungen auf die Umwelt sowie zu Chancen für die wirtschaftliche Nutzung

Eine Wiedervernässung von trockengelegten Mooren verbessert den Landschaftswasserhaushalt erheblich. Moore wirken als natürliche Puffer gegen Hochwasser, da sie große Wassermengen speichern und verzögert wieder abgeben. Zudem tragen sie bei Hitzewellen zur Abkühlung der Umgebung bei und reduzieren extreme Temperaturen. Die Wiedervernässung leistet darüber hinaus einen Beitrag zur Wiederherstellung gefährdeter Lebensräume und fördert damit die Biodiversität.[101]

Durch Paludikulturen, der nassen Bewirtschaftung von Mooren, können Feuchtgebietspflanzen wie Schilf, Rohrkolben, Torfmoos oder Erlen angebaut werden. Die dabei angebauten Rohstoffe können zum Beispiel als Substratrohstoff für den Gartenbau, für die Bau- und Möbelindustrie oder als Energieträger verwertet werden. Darüber hinaus bieten die extensive Beweidung (Nassweiden) sowie die Nutzung für Windkraft- und Photovoltaikanlagen weitere wirtschaftliche Perspektiven. Im Idealfall tragen Baustoffe aus Paludikulturen zur CO_2-Entnahme bei, wenn sie langfristig verbaut oder Biomasse aus Paludikulturen in BECCS- und Pflanzenkohle-Prozessen genutzt werden.[102]

Allerdings erfordert eine Umstellung auf Paludikultur erhebliche Investitionen in neue Pflanzenbestände, Maschinen und Infrastruktur. Die wirtschaftliche Rentabilität der Paludikultur ist derzeit nicht durchgängig gegeben, da sowohl optimierte Produktionsprozesse als auch geeignete Techniken fehlen. Daher sind gezielte Subventionen und Investitionen in die Forschung sowie Pilotbetriebe erforderlich, um wirtschaftlich tragfähige Modelle zu entwickeln.[103]

[101] (Martens, et al., 2023).
[102] (Bauhus, et al., 2025).
[103] (Heinrich-Böll-Stiftung, 2023).

Kontinuierliches Monitoring ist erforderlich, um die Treibhausgasbilanz zuverlässig zu erfassen

Die Messung der Treibhausgasflüsse in wiedervernässten Mooren ist technisch anspruchsvoll, arbeitsintensiv und kostspielig. Direkte Messmethoden (Eddy-Kovarianz-Türme oder Gasmesskammern) liefern zwar präzise Daten, sind jedoch für eine flächendeckende Überwachung ungeeignet. Daher greifen Forscherinnen und Forscher auf alternative Verfahren zurück, wie die Analyse von Torfakkumulation oder Bodenprofiluntersuchungen, die eine langfristige Kohlenstoffanreicherung im Torfboden nachweisen können. Allerdings sind diese Verfahren erst nach 10 oder mehr Jahren aussagekräftig, was ihre Anwendung für kurz- und mittelfristige Zertifizierungsmodelle erschwert.[104]

Die Wiedervernässung von Mooren ist mit hohen Kosten verbunden. Laut einer Studie des Greifswald Moor Centrums belaufen sich die durchschnittlichen Kosten auf etwa 3.300 Euro pro Hektar.[105] Ein erheblicher Teil entfällt auf die Flächensicherung und -arrondierung, da die Verfügbarkeit geeigneter Flächen oft erst durch langwierige Verhandlungen mit den Eigentümerinnen und Eigentümern sowie den Nutzerinnen und Nutzern gewährleistet werden kann. Neben finanziellen Herausforderungen stellt auch der Mangel an Fachkräften eine Hürde dar. Eine erfolgreiche Wiedervernässung erfordert stets individuelle Planung, da jedes Moor einzigartige Bedingungen aufweist. Dazu zählen die Betrachtung der Wasserflüsse, die Vermessung der Höhenunterschiede und Bodenproben, um die Eigenschaften der Torfe zu bestimmen. In vielen Planungsbüros und Baufirmen fehlt es jedoch an entsprechenden Fachleuten mit Erfahrung in der Wiedervernässung.

Die Umsetzung ist an die gesellschaftliche Akzeptanz der Landwirtinnen und Landwirte geknüpft

Die Wiedervernässung von Mooren erfordert die Zustimmung der Landwirtinnen und Landwirte, deren Flächen betroffen sind. Viele dieser Gebiete wurden mit erheblichem Aufwand entwässert und in die landwirtschaftliche Nutzung überführt, sodass eine Umstellung auf nasse Bewirtschaftungsformen mit wirtschaftlichen und strukturellen Herausforderungen verbunden ist. Neben der Sorge um Ertragsverluste und sinkende Bodenwerte bestehen oftmals Bedenken hinsichtlich veränderter Landschaftsbilder, steigender Wasserstände und aufwendiger Genehmigungsverfahren.[106]

Die Wiedervernässung erfolgt im Rahmen politischer Vorgaben

Die Nationale Moorschutzstrategie der Bundesregierung verfolgt das Ziel, Moorböden zu erhalten, degradierte Flächen wiederherzustellen und eine nachhaltige Nutzung zu fördern. Dabei setzt sie auf Maßnahmen zur Wiedervernässung, die sowohl den Klimaschutz als auch den Wasserhaushalt und die Artenvielfalt stärken. Ein zentraler Finanzierungsmechanismus ist das ANK, das Renaturierungsprojekte unterstützt und den Moorschutz als Teil einer umfassenden Klimapolitik vorantreibt. Der rechtliche Rahmen für den Moorklimaschutz erstreckt sich über verschiedene Umwelt-, Naturschutz- und Klimaschutzregelungen auf europäischer, Bundes- und Länderebene.

[104] (Bauhus, et al., 2025).
[105] (Greifswald Moor Centrum, 2022).

[106] (Bauhus, et al., 2025).

In den letzten Jahren ist das Bewusstsein für die Klimawirkung von Mooren deutlich gewachsen (TRL 8 bis 9)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie kann die CO_2-Bindungskapazität unter verschiedenen Standort- und Nutzungsbedingungen präzise quantifiziert werden?
- Inwiefern beeinflusst die moortypische Vegetation die Stabilität der Kohlenstoffsenken und welche Wechselwirkungen bestehen zwischen Biodiversität und Kohlenstoffspeicherung?
- Welche Finanzierungsmodelle können entwickelt werden, um wirtschaftliche Anreize für Landnutzerinnen und -nutzer zu schaffen und langfristig tragfähige Konzepte für die Wiedervernässung zu fördern?
- Welche sozioökonomischen Aspekte spielen neben ökologischen Fragestellungen eine zentrale Rolle bei der Wiedervernässung?
- Wie können politische Rahmenbedingungen gestaltet werden, um bestehende Hürden abzubauen und effektive Instrumente zur Förderung der Moornutzung im Einklang mit Klimaschutz- und Biodiversitätszielen zu etablieren?

4.7 Beschleunigte Verwitterung von Gesteinen

Die beschleunigte Verwitterung (engl. Enhanced Weathering, EW) basiert auf der natürlichen Gesteinsverwitterung, bei der durch chemische Reaktionen CO_2 zu stabilen, in Wasser gelösten Bikarbonaten wird. Dieser Vorgang läuft in der Natur normalerweise sehr langsam ab.

Bei der beschleunigten Verwitterung wird dieser Prozess durch das gezielte Zerkleinern und Verteilen bestimmter Gesteine oder Minerale (z. B. Olivin, Basalt oder Peridotit) beschleunigt. Dabei handelt es sich um einen materialintensiven Prozess, der den Abbau von Gesteinen erfordert. Anschließend erfolgt der Transport des gemahlenen Gesteins zu den Einsatzorten. Der Einsatz wird vor allem für die Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen diskutiert. Außerdem könnten Küstengebiete für eine Verteilung von zerkleinertem Gestein genutzt werden, da der direkte und konstante Wasserkontakt die Verwitterung und die CO_2-Bindung beschleunigt. Die Erhöhung der Ozeanalkalinität ist eine Sonderform der beschleunigten Verwitterung und wird separat behandelt (siehe Kapitel 4.14).

Die beschleunigte Verwitterung ermöglicht die gleichzeitige CO_2-Entnahme und fortgesetzte Land- oder Küstennutzung

Für Deutschland ergibt sich auf diesen Flächen ein großes Anwendungspotenzial. Die Ausbringung gemahlener Gesteine und Minerale auf landwirtschaftlichen und küstennahen Flächen verursacht keine Landnutzungskonflikte, da die bestehende Nutzung weiterhin möglich bleibt. Aktuelle Schätzungen prognostizieren für die 2040er Jahre ein CO_2-Entnahmepotenzial von bis zu 10 Mio. Tonnen pro Jahr.[107] Dabei ist zwischen dem eingebrachten Potenzial und dem entnommenen CO_2 pro Jahr zu unterscheiden. Die gemahlenen Gesteine und Minerale nehmen das CO_2 über mehrere Jahre auf.

[107] Experteneinschätzung im Rahmen eines Workshops der LNe am 09.07.2024.

Bei einer eingebrachten Menge von 12 Mio. Tonnen Gestein würden nur 3 bis 4 Mio. Tonnen CO_2 in dem Jahr der Ausbringung der Atmosphäre entnommen werden.[108]

Die beschleunigte Verwitterung ist an den Abbau von Mineralen gebunden

Das Potenzial der Entnahmemethode ist durch das verfügbare Material sowie die Bergbaukapazitäten begrenzt. Der Landbedarf wird für Deutschland als zweitrangig betrachtet. Für bereits bei der Kalksteinverarbeitung anfallende Abbruchprodukte wird das Potenzial auf etwa 2 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr geschätzt.[109]

Für die Bindung von 1 Tonne CO_2 werden zwischen 0,5 und bis zu 5 Tonnen Mineralprodukte benötigt, das wären somit bis zu 5 Mio. Tonnen Mineralprodukte für 1 Mio. Tonnen CO_2. Zum Vergleich: Im Jahr 2024 wurden 44 bis 56 Mio. Tonnen Kalk sowie Dolomit- und Mergelgesteine abgebaut (siehe Kapitel 4.14). Für die Entnahme von 1 Mio. Tonnen CO_2 wären etwa 10 Prozent der gesamten deutschen Basaltproduktion erforderlich.[110]

Ein zusätzlicher Abbau von Gesteinen und Mineralen würde in bestehende Ökosysteme eingreifen. Weiterhin entstünde eine höhere Lärmbelastung durch den Einsatz großer Maschinen für den Abbau, das Mahlen und die Verteilung von Gesteinspulver. Die Einbringung des Gesteins kann zu negativen Auswirkungen auf Oberflächengewässer führen, beispielsweise durch eine verstärkte Trübung und Sedimentation. Es kann auch zu Belastungen des Grundwassers kommen, abhängig von der Mischung der Gesteine mit Sand oder Staub sowie der Reinheit des Gesteinspulver.[111] Auch potenzielle Effekte auf tierische Organismen an Land und im Wasser sowie die Freisetzung von Schwermetallen bei der Verwendung ungeeigneter Gesteine können nicht ausgeschlossen werden. Die (langfristigen) Auswirkungen auf Boden und Gewässer durch den Eintrag zermahlener Gesteine sind noch nicht ausreichend erforscht.[112]

Der Abbau, die Zerkleinerung und der Transport des Gesteins können hohe Mengen an Energie erfordern

Der wesentliche Energiebedarf entsteht beim Mahlen und Verfeinern der Gesteine in Abhängigkeit von der Feinheit der Mahlung. Der Energiebedarf wird zwischen 170 und 2.750 kWh/t CO_2 angegeben und ist ein bedeutsamer Kostentreiber. Nebenprodukte, beispielsweise Abbruchprodukte aus Steinbrüchen, haben einen deutlich geringeren Energiebedarf. Der Einsatz erneuerbarer Energien ist beim Abbau von Mineralen entscheidend für eine effektive CO_2-Entnahme, da sonst erhebliche energiebedingte CO_2-Emissionen entstehen können. Aktuelle Kosten liegen bei um die 400 Euro/t CO_2. Dabei ist der wesentliche Kostentreiber das MRV. Zukünftig werden die Kosten, in Abhängigkeit von den Energiepreisen, der zukünftigen Skalierung[113] und den Materialverfügbarkeiten[114], auf 100 bis 200 Euro/t CO_2 geschätzt.[115]

---

[108] (Borchers, et al., 2024).
[109] Experteneinschätzung im Rahmen eines Workshops der LNe am 09.07.2024.
[110] (BGR, 2023; Yao, et al., 2024).
[111] Experteneinschätzung im Rahmen eines Workshops der LNe am 09.07.2024.
[112] (Edwards, et al., 2017; Borchers, et al., 2024).
[113] Die Skaleneffekte bei Abnahme von Material- und Laborkosten liegen bei bis zu 30 Prozent.
[114] Experteneinschätzung im Rahmen eines Workshops der LNe am 09.07.2024.
[115] (Moosdorf, Renforth, & Hartmann, 2014; Foteinis, Campbell, & Renforth, 2022).

Die beschleunigte Verwitterung kann die Bodeneigenschaften verbessern und als Dünger fungieren

Die Ausbringung von Gesteinen und Mineralen kann den landwirtschaftlichen Ertrag um bis zu 15 Prozent steigern. Dadurch erhöht sich die Produktivität, während gleichzeitig die Emissionen durch den geringeren Einsatz kommerzieller Düngemittel sinken. Je nach lokalen Bedingungen sowie den eingesetzten Gesteinen und Mineralen besteht zudem das Potenzial, der Bodenversauerung durch landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmethoden entgegenzuwirken. Bereits heute wird in Deutschland Kalk ausgebracht, um diesen Effekt zu mindern. Dies könnte durch die beschleunigte Verwitterung ersetzt werden.[116]

Die Speicherung weist eine hohe Dauerhaftigkeit auf

Das CO_2 wird nach aktuellen Erkenntnissen über zehntausend Jahre als stabiles Bikarbonat im Wasser gebunden, wobei das Verlustrisiko gering ist. Allerdings sind die genauen Mechanismen noch nicht abschließend geklärt (siehe Kapitel 4.14). Es wurden bereits verschiedene Feldstudien zur beschleunigten Verwitterung durchgeführt, wie zum Beispiel in Großbritannien mit 185.000 Tonnen ausgebrachtem Material. In Deutschland wurden im Jahr 2024 etwa 10.000 Tonnen Gestein ausgebracht.

Die Planung von MRV kann in der Praxis eine Herausforderung darstellen und ist mit großer Sorgfalt durchzuführen. Ein erstes MRV-Protokoll zur beschleunigten Verwitterung, das Gold Standard Isometric Protocol, wird bereits im VCM eingesetzt. Nach einem einjährigen Prozess hat die gemeinnützige Organisation Cascade Climate ein umfassendes technisches Nachschlagewerk zur präzisen Quantifizierung der Kohlenstoffentnahme durch beschleunigte Verwitterung erstellt.

Beim Abbau von Basalt und Kalkstein in Deutschland sind verschiedene Gesetze und Verordnungen zu beachten

Dabei sind vor allem Faktoren wie die Größe des Abbaugebiets und die angewandten Methoden zu berücksichtigen. Das Ausbringen von Gesteinsmehl auf Ackerflächen ist rechtlich bereits möglich. Hierbei sind jedoch die Grenzwerte der Düngemittelverordnung für Bodenhilfsstoffe einzuhalten. Der mögliche Abbau von Gesteinen und Mineralen wird über das Bundesberggesetz und entsprechende Landesgesetze sowie das Bundes-Immissionsschutzgesetz geregelt. Das Einbringen von gemahlenen Gesteinen auf landwirtschaftlichen Böden wird durch das Bundesbodenschutzgesetz und entsprechende Verordnungen geregelt.

Die beschleunigte Verwitterung hat noch weiteren Forschungsbedarf (TRL 5 bis 6)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie lassen sich Wirksamkeit, Risiken und langfristiges CO_2-Bindungspotenzial der beschleunigten Verwitterung genauer bestimmen?
- Wie können Verwitterungsraten im Feldversuch präziser gemessen werden?
- Welche Synergien bestehen mit anderen CO_2-Entnahmemethoden wie Aufforstung und Pflanzenkohle?

[116] (Edwards, et al., 2017; Borchers, et al., 2024).

- Wie wirkt sich die beschleunigte Verwitterung langfristig auf verschiedene Gesteinsarten, Böden und Ökosysteme aus?
- Wie ist die öffentliche Wahrnehmung der Technologie?

4.8 Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle

Durch die Herstellung von Pflanzenkohle wird Biomasse in ein stabiles, kohlenstoffreiches Produkt umgewandelt und kann langfristig CO_2 binden. Die Entnahmemethode umfasst drei zentrale Prozessschritte:

- CO_2-Entnahme aus der Atmosphäre durch Pflanzen über Photosynthese und Bindung des Kohlenstoffs in Biomasse
- Thermochemische Umwandlung der Biomasse durch Pyrolyse unter Sauerstoffmangel bei hohen Temperaturen (400 bis 750 °C)
- Langfristige Speicherung der Pflanzenkohle durch Bodenausbringung, Einlagerung in unterirdischen Lagerstätten oder Nutzung in langlebigen Produkten wie Baustoffen (z. B. Dämmplatten, Putz und Zusatz für Beton)

Je nach Art der Biomasse und des Pyrolyseverfahrens werden etwa 30 bis 50 Prozent des ursprünglich in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffs in der Pflanzenkohle gespeichert. Der restliche Kohlenstoff befindet sich im Pyrolysegas (25 bis 50 Prozent) und Pyrolyseöl (15 bis 45 Prozent). Diese Produkte können stofflich oder energetisch zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden, wobei das entstehende CO_2 abgeschieden und gespeichert werden kann, um die Entnahmeleistung zu verbessern (siehe Kapitel 4.9).

Pflanzenkohle zeichnet in Deutschland ein theoretisch hohes Potenzial zur CO_2-Entnahme aus

Das CO_2-Entnahmepotenzial durch Pflanzenkohle in Deutschland wird für 2045 auf 15 bis 25 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr geschätzt. Die tatsächlich erreichbare Menge hängt von der Art der eingesetzten Biomasse ab. Die höchste Effizienz bei der CO_2-Entnahme ergibt sich bei der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen, da sie im Vergleich zu nachwachsenden Rohstoffen geringere Vorkettenemissionen aufweisen und sich in Nutzungskaskaden integrieren lassen. Werden nur Abfall- und Reststoffe genutzt, sinkt das Potenzial auf 2,9 bis 12 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr für 2050.[117] Im Rahmen der Modellierung werden der Atmosphäre im Jahr 2045 0 bis 1 Mio. Tonnen CO_2 durch Pflanzenkohle entnommen, da die Biomasse hauptsächlich für die energetische Verwendung in Kombination mit BECCS eingesetzt wird.

Bei optimalen Produktionsbedingungen bindet Pflanzenkohle Kohlenstoff langfristig

Durch Pflanzenkohle kann Kohlenstoff über Hunderte bis Tausende Jahre in einer stabilen und langlebigen Form gebunden werden, sofern die Produktion unter optimalen Bedingungen erfolgt. Dazu

[117] (Lenk & al., 2024).

zählen die passende Temperatur und Dauer sowie ein geeignetes Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnis. Der in der Pflanzenkohle gebundene Kohlenstoff wird nur durch Verbrennung der Pflanzenkohle freigesetzt, womit die Störanfälligkeit gering ist.

Dabei kann Pflanzenkohle die Bodenstruktur stabilisieren, die Wasserhaltekapazität erhöhen und die Verfügbarkeit von Nährstoffen fördern. Sie reduziert darüber hinaus den Düngemittelbedarf, bindet Schadstoffe und erhöht die Resilienz von Pflanzen gegen Extremwetter wie Trockenheit oder Starkregen. Besonders sandige Böden profitieren von Pflanzenkohle. Dennoch kann eine unsachgemäße Anwendung Risiken wie Eutrophierung mit sich bringen, da dann Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor mobilisiert werden.[118]

Die Technologie ist bereit zur Skalierung und zum großflächigen Einsatz

Ende 2023 gab es in Europa 171 Produktionsanlagen mit einer jährlichen Produktionskapazität von 75.000 Tonnen. 26 Prozent dieser Anlagen befanden sich in Deutschland. Damit nimmt Deutschland eine führende Rolle im Bereich der Pyrolysetechnologie ein und zählt zu den wichtigsten Marktakteuren. Zugleich exportieren deutsche Hersteller zunehmend ins Ausland. Insbesondere in der vorgelagerten Wertschöpfungskette sowie im Anlagenbau besteht erhebliches wirtschaftliches Potenzial. Dies gilt ebenfalls für BECCS und DACCS. Auf diese Weise werden Arbeitsplätze gesichert und zusätzliche Wertschöpfung generiert.[119]

Pflanzenkohle ist mit der bestehenden Logistik einfach zu transportieren und benötigt keine zusätzlichen Flächen für die CO_2-Speicherung. Dies erlaubt es, landwirtschaftliche Flächen weiterhin zu bewirtschaften, während die Pflanzenkohle in den Boden eingebracht wird. Die CO_2-Entnahmekosten zwischen 120 und 250 Euro/t CO_2 stellen jedoch eine Herausforderung dar. Auch die Skalierung der Technologie ist komplex, da mit größeren Produktionsmengen höhere Transportdistanzen und ein steigender Biomassebedarf einhergehen. Finanzielle Anreize, wie eine Vergütung für Kohlenstoffsenken oder Umweltleistungen, sind bisher kaum etabliert.[120]

Die ökologische Bilanz von Pflanzenkohle hängt von der Biomasseherkunft ab

Eine intensive Biomassenutzung kann zu Landnutzungskonflikten mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion führen und bestehende Kohlenstoffspeicher in Böden und Wäldern gefährden, wodurch die LULUCF-Sektorbilanz geschwächt wird. Besonders problematisch ist der Einsatz von Energiepflanzen und Primärholz, aufgrund des hohen Flächenbedarfs. Zudem besteht die Gefahr, dass indirekte Effekte wie die Verlagerung der Landwirtschaft auf nicht nachhaltige Flächen im Ausland zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen führen – insbesondere, wenn artenreiche Ökosysteme wie tropische Regenwälder abgeholzt werden. Weitere Umweltbelastungen ergeben sich aus dem hohen Wasser-, Stickstoff- und Phosphorbedarf bestimmter Biomassen sowie aus den Emissionen bei Anbau, Ernte und Verarbeitung. Um diese negativen Effekte zu minimieren, sollten vor-

[118] (BMEL, 2023).
[119] (European Biochar Industry, 2023).
[120] (Herhold, et al., 2024).

rangig Abfall- und Reststoffe genutzt werden, da sie keinen zusätzlichen Rohstoffbedarf verursachen. Zudem bietet Biomasse aus der näheren Umgebung Vorteile durch niedrigere Transportkosten und geringere Emissionen.[121]

Neben pflanzlichen Reststoffen können auch geeignete organische Reststoffe aus Kläranlagen pyrolytisch verwertet werden. Klärschlamm ist häufig mit Schadstoffen belastet und darf daher nicht in Gewässer eingeleitet werden. Er wird daher überwiegend in speziellen Verbrennungsanlagen behandelt, was mit entsprechenden Treibhausgasemissionen verbunden ist. Durch Pyrolyse könnte ein Teil des im Klärschlamm enthaltenen Kohlenstoffs dauerhaft gebunden werden. Zudem ist unter bestimmten Bedingungen gemäß der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) auch die Rückgewinnung von Phosphor vorgesehen bzw. anzustreben, der anschließend wieder als Düngemittel eingesetzt werden kann.

Vor diesem Hintergrund erfordert ein effektiver Einsatz von Pflanzenkohle zur CO_2-Entnahme eine nachhaltige Biomassebereitstellung mit geringen Vorkettenemissionen (Biomasseanbau, Transport, Umwandlung) sowie einen effizienten Anlagenbetrieb auf Basis erneuerbarer Energien.

Schadstoffbelastete Pflanzenkohle kann unterirdisch eingelagert werden

Pflanzenkohle kann Schwermetalle oder Schadstoffe wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) enthalten. So gibt das Europäische Pflanzenkohle-Zertifikat (engl. European Biochar Certificate, EBC) Grenzwerte vor, um diese Stoffe zu minimieren. Auch die Düngemittelverordnung regelt, dass Pflanzenkohle aus belasteten Ausgangsstoffen (z. B. lackiertem Holz) nicht auf Feldern ausgebracht werden darf. Schadstoffbelastete Pflanzenkohle könnte stattdessen unterirdisch eingelagert werden, wofür geeignete Lagerstätten erforderlich wären.

GPS-Tracking sichert die Überwachung der CO_2-Speicherung durch Pflanzenkohle

Herkömmliche Bodenanalysen können organischen Kohlenstoff nicht zuverlässig von Pflanzenkohle-Kohlenstoff unterscheiden. Da regelmäßige Probenahmen und Analysen in großem Maßstab zu aufwendig und wirtschaftlich nicht tragfähig sind, kann auf eine lückenlose Nachverfolgung der Pflanzenkohle-Logistik mit GPS-gestützter Erfassung gesetzt werden, um die CO_2-Speicherung eindeutig zu überwachen.

Die RED III legt verbindliche Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse fest

Die RED III soll sicherstellen, dass die Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung ökologisch verträglich und klimawirksam ist. Hierzu gehören Anforderungen wie die Vermeidung von Landnutzungsänderungen, der Schutz von biologischer Vielfalt sowie der Nachweis einer deutlichen Treibhausgaseinsparung entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Die CRCF-Verordnung ergänzt diesen Rahmen, indem sie einen EU-weiten freiwilligen Rahmen zur Zertifizierung von (unter anderem) dauerhaften CO_2-Entnahmen definiert, so zum Beispiel die Überwachung der Speicherung während des festgelegten Überwachungszeitraums.

[121] (Fajarday & Mac Dowell, 2017).

Die EU-Düngemittelverordnung erleichtert Pflanzenkohlenutzung

Während die deutsche Düngemittelverordnung (DüMV) nur unbehandeltes Holz als Ausgangsstoff für Pflanzenkohle zulässt, ermöglicht die EU-Düngemittelverordnung (2019/1009) seit Juli 2022 die Nutzung von vielen Rest- und Abfallstoffen, darunter Grünschnitt, Reststoffe aus der landwirtschaftlichen Produktion (z. B. Stroh und Getreidespelzen), Kurzumtriebsplantagen (KUP) und perspektivisch Klärschlamm. Dies erhöht die Flexibilität bei der Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle. Allerdings ist für das Inverkehrbringen nach der EU-Verordnung eine CE-Zertifizierung erforderlich. In Deutschland fehlen bislang die notwendigen Konformitätsbewertungsstellen für die Vergabe des CE-Kennzeichens bei Düngeprodukten, was die praktische Umsetzung behindert. Daher wird eine Anpassung der DüMV an die EU-Verordnung diskutiert, um die Nutzung weiterer Ausgangsstoffe zu ermöglichen, etwa durch spezifische Regelungen zum Herstellungsverfahren wie Pyrolysedauer und -temperatur sowie durch festgelegte Grenzwerte für bestimmte Schadstoffe.[122]

Die Genehmigungsverfahren für Pyrolyseanlagen sind in Deutschland aufgrund unklarer rechtlicher Einordnungen oft langwierig. Statt der Einstufung als Feuerungsanlage (1. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, BImSchV) werden viele Anlagen als Abfallverbrennungsanlagen (4. BImSchV 8.1.1) zugelassen, was zu erhöhten Auflagen führt, selbst wenn nur unbelastete holzartige Biomasse verwendet wird. Zudem müssen Betreiber im Rahmen des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) nachweisen, dass sie bei 100 Prozent Biomasseeinsatz keine Emissionszertifikate benötigen. Eine eigene BImSchV für Pyrolyseanlagen oder eine Handreichung für Behörden könnten die Genehmigungsverfahren vereinfachen und bürokratische Hürden abbauen.

Alle Prozesskomponenten von Pyrolyseanlagen befinden sich in marktreifen Anwendungen (TRL 8 bis 9)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie können die CO_2-Entnahmekosten der Pflanzenkohleproduktion gesenkt werden?
- Welche Schadstoffe kann Pflanzenkohle im Boden langfristig stabil binden?
- Wie kann die Temperaturkontrolle bei der Pflanzenkohleproduktion optimiert werden, um Nährstoffverluste zu minimieren und Schadstoffe zu reduzieren?
- Wie kann die Produktion optimal skaliert und in bestehende Wirtschaftssysteme (wie Wärmenetze) integriert werden?
- Inwiefern können Pflanzenkohle und CO_2-Speichertechnologien (z. B. BECCS) synergistisch zusammenwirken?

4.9 Bioenergie mit Carbon Capture and Storage (BECCS)

Bioenergie mit CO_2-Abscheidung und -Speicherung (engl. Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) bezeichnet die energetische Nutzung bzw. Umwandlung von Biomasse unter Abscheidung und geologischer Speicherung des dabei entstehenden CO_2. Die Entnahmemethode umfasst drei Prozessschritte:

[122] (Rupp & Bluhm, 2023).

- Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre durch Pflanzen über Photosynthese und Bindung des Kohlenstoffs in Biomasse
- energetische Nutzung und/oder Umwandlung der Biomasse in Energieträger, wie zum Beispiel Biomethan oder Bioethanol
- Abscheidung und geologische Speicherung des dabei entstehenden CO_2

Biogenes CO_2 kann bei verschiedenen Prozessschritten anfallen wie etwa bei der Verbrennung von Biomasse (z. B. in den Abgasen) oder bei der Gasaufreinigung (z. B. bei der Biomethanaufbereitung) sowie durch biogene Prozesse (z. B. bei der alkoholischen Vergärung in der Bioethanolproduktion). Ein Überblick über einige der grundsätzlich wichtigsten Verfahren, bei denen biogenes CO_2 abgeschieden werden kann, ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.[123]

Tabelle 1 Übersicht möglicher BECCS-Anwendungen

Anwendung	CO_2-Quelle	BECCS möglich?
Biomasseheizkraftwerke	Abgas der Verbrennung	Ja
Biogasverwendung	Abgas der Verbrennung	Ja
Biomethanproduktion	Aufreinigung von Biogas	Ja
Biomethanverwendung	Verbrennung	Ja, außer Kraftstoffeinsatz
Bioethanolproduktion	Gärung	Ja
Bioethanolverwendung	Verbrennung	Ja, außer Kraftstoffeinsatz
Biomassevergasung	(Synthese-)Gasreinigung	Ja
Gasnutzung	Verbrennung des Gases	Ja
Pyrolyse	Abgas der Verbrennung	Ja
Industrieprozesse	Kalzinierung	Nein (fossil)
	Abgas der Verbrennung	Ja
Monoklärschlamm-verbrennungsanlage	Abgas der Verbrennung	Ja
Müllverbrennung	Verbrennung fossiler Abfälle	Nein (fossil)
	Verbrennung biogener Abfälle	Ja

[123] Der Begriff BioCCS umfasst eine Vielzahl von Prozessen, bei denen Biomasse genutzt wird, um CO_2-Emissionen zu reduzieren oder Negativemissionen zu erzielen – unabhängig davon, ob die Biomasse zur Energieproduktion, in industriellen Prozessen oder als Material eingesetzt wird (IEA Bioenergy, 2018). Somit geht der Begriff BioCCS über Energie hinaus und kann als weitreichender als der Begriff BECCS gesehen werden. Die Begriffe werden zumeist synonym verwendet. Im Rahmen der LNe wird der Begriff BECCS genutzt.

BECCS zeichnet ein hohes Potenzial zur CO_2-Entnahme in Deutschland aus

Das CO_2-Entnahmepotenzial in Deutschland wird basierend auf der derzeit energetisch genutzten Biomasse (Endenergieverbrauch 260 TWh im Jahr 2025)[124] für das Jahr 2045 auf 20 bis 60 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr geschätzt. Die tatsächlich erreichbare Menge hängt jedoch von der Art der eingesetzten Biomasse ab. Die effizienteste CO_2-Entnahme erfolgt durch Rest- und Abfallstoffe, da sie geringere Vorkettenemissionen aufweisen und – sofern vorhanden – in Nutzungskaskaden integriert werden können. Wird nur das Potenzial von Rest- und Abfallstoffen betrachtet, ergibt sich in Deutschland ein theoretisches Potenzial von 28 bis zu 39 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr.[125]

Im Rahmen der Modellierung der LNe ergeben sich Negativemissionen durch BECCS im Jahr 2045 von 6 bis 27 Mio. Tonnen CO_2. Davon entfallen rund 1 bis 8 Mio. Tonnen CO_2 auf BECCS an Industrieanlagen, rund 5 bis 11 Mio. Tonnen CO_2 an Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung (TAB) und rund 0 bis 9 Mio. Tonnen CO_2 an Energieerzeugungsanlagen.

Der Einsatz von Biomasse könnte insbesondere in Industriesektoren wie der Zement- und Kalkindustrie zur Dekarbonisierung der energiebedingten Emissionen beitragen. An diesen Anlagen wird aufgrund des hohen Anteils prozessbedingter Emissionen (etwa zwei Drittel) bereits die Abscheidung von CO_2 vorgesehen. Die CO_2-Abscheidung an TAB-Anlagen bietet Potenzial für BECCS, da der CO2-Abgasstrom zu 50 bis 60 Prozent biogen ist.[126]

Die Speicherung des abgeschiedenen CO_2 im Untergrund ist bereits erprobt und nach aktuellen Erkenntnissen langfristig sicher (> 1.000 Jahre)

Das Risiko einer Leckage wird bei Einhaltung bestehender Vorgaben zur Erschließung von CO_2-Speicherstätten als gering eingeschätzt. MMV-Systeme (engl. Monitoring, Measurement and Verification) sind vorhanden und werden noch weiterentwickelt. Die aus dem Prozess abgeschiedene CO_2-Menge ist am Standort mit hoher Genauigkeit messbar.

Erste Pilotprojekte weltweit haben die Machbarkeit von CCS erfolgreich demonstriert. Bisher fehlen jedoch noch Projekte auf industrieller Ebene, die den Einsatz an Industrieanlagen (Kalk- und Zementindustrie) sowie die nahezu vollständige Abscheidung an thermischen Abfallbehandlungsanlagen demonstrieren. Im Jahr 2025 wird das erste kommerzielle Abscheidungsprojekt an einer Zementanlage in Betrieb gehen. Dies gilt auch für kommerzielle CO_2-Speicherprojekte wie Northern Lights und Porthos. Darüber hinaus bietet BECCS erhebliche Chancen für den deutschen Anlagenbau und die Wertschöpfung im Inland.

Die ökologische Bilanz von BECCS hängt stark von der Biomasseherkunft ab

Eine intensive Biomassenutzung kann zu Landnutzungskonflikten mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion führen und bestehende Kohlenstoffspeicher in Böden und Wäldern gefährden, wodurch die LULUCF-Sektorbilanz geschwächt wird. Besonders problematisch ist der Einsatz von Energiepflanzen und Primärholz aufgrund des hohen Flächenbedarfs. Für die Entnahme von 10 Mio.

[124] (UBA, 2026).
[125] (Thrän, et al., 2024a).
[126] (Thrän, et al., 2024a).

Tonnen CO_2 würden bei der Verwendung zusätzlicher Biomasse zwischen 1 und 5 Prozent der deutschen Fläche benötigt werden, was in einem ohnehin flächenknappen Land zu erheblichen Nutzungskonflikten führen kann. Zudem besteht die Gefahr, dass indirekte Effekte wie die Verlagerung der Landwirtschaft auf nicht nachhaltige Flächen im Ausland zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen führen – insbesondere, wenn artenreiche Ökosysteme wie tropische Regenwälder abgeholzt werden.[127, 128]

Weitere Umweltbelastungen ergeben sich aus dem hohen Wasser-, Stickstoff- und Phosphorbedarf bestimmter Biomassen sowie aus den Emissionen beim Anbau, bei der Ernte und bei der Verarbeitung. Auch der Energieeinsatz für die BECCS-Prozesse und die CO_2-Speicherung beeinflusst die Gesamtemissionen. Die vorrangige Verwendung von Abfall- und Reststoffen kann diese negativen Effekte minimieren, da sie keinen zusätzlichen Rohstoffbedarf verursachen. Zudem bietet Biomasse aus der näheren Umgebung Vorteile durch niedrigere Transportkosten und geringere Emissionen.[129]

Ein effektiver Einsatz von BECCS zur CO_2-Entnahme erfordert daher eine nachhaltige Biomassebereitstellung mit geringen Vorkettenemissionen (Biomasseanbau, Transport, Umwandlung) sowie einen effizienten Anlagenbetrieb auf Basis erneuerbarer Energien.

BECCS weist durch die Energieintensität bei der Abscheidung hohe Kosten für die CO_2-Entnahme auf

Die Kosten für BECCS sind abhängig von der eingesetzten Technologie, den Energiepreisen, der verwendeten Biomasse, der Anlagengröße, der Distanz zur Speicherstätte und den Transportmodi. Die geschätzten Entnahmekosten liegen zwischen 139 und 365 Euro/t CO_2. Die ersten industriellen Abscheideanlagen in Europa befinden sich im Bau und haben aufgrund von Pioniereffekten noch deutlich höhere Kosten. Das schwedische Projekt Stockholm Exergi hat im Januar 2025 einen Förderbescheid der schwedischen Regierung im Umfang von 1,8 Mrd. Euro erhalten für einen Zeitraum von 15 Jahren bei einer Entnahme von 800.000 Tonnen CO_2 pro Jahr. Dies entspricht vereinfacht einer Förderung von 150 Euro/t CO_2.

Die langfristige Höhe der Transport- und Speicherkosten ist aufgrund der geringen Zahl an bislang realisierten großskaligen Projekte schwer absehbar; in der Literatur werden Speicherkosten zwischen 10 und 30 Euro/t CO_2 erwartet sowie Transportkosten zwischen 20 und 60 Euro/t CO_2, wobei erste Praxiserfahrungen auf höhere Kosten hindeuten.[130]

Die Abscheidekosten sind häufig auf den hohen Energiebedarf für die CCS-Kette zurückzuführen. Die CO_2-Abscheidung über die Aminwäsche hat nach aktuellen Erkenntnissen einen Wärmebedarf von 700 bis 1.000 kWh/t CO_2 auf einem Temperaturlevel von 130 bis 150 °C sowie einen Strombedarf für die Kompression von 100 kWh/t CO_2 und für die Verflüssigung von etwa 160 kWh/t CO_2.

---

[127] Annahmen Flächenbedarf: 0,03 bis 0,11 ha/t CO_2 für Energiepflanzen und 0,16 ha/t CO_2 für Rest- und Abfallstoffe aus der Landwirtschaft.
[128] (Smith, et al., 2016).
[129] (Fajarday & Mac Dowell, 2017).
[130] (vdz, 2024; Wallmann & Löschke, 2024; Danish Energy Agency, 2024; Wollnik, et al., 2023; Carbon Herald, 2025).

Insgesamt ergibt sich bei einer Elektrifizierung des Wärmebedarfs ein Gesamtstrombedarf von etwa 350 bis 600 kWh/t CO_2.[131, 132]

Oftmals eignet sich der aktuelle Anlagenbestand, in welchen Biomasse energetisch genutzt wird, nur eingeschränkt für die Nachrüstung mit CO_2-Abscheideanlagen, da die Anlagen häufig klein dimensioniert und dezentral gelegen sind. Bei solchen kleineren Anlagen stellen insbesondere die Investitionskosten für die Abscheidungstechnik den wesentlichen Kostentreiber dar. Hinzu kommen die höheren Transportkosten, da der Transport, solange es noch keinen Pipelinenetz für CO_2 gibt, per Zug oder Lkw erfolgt.[133]

Die RED III legt verbindliche Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse fest und das KSpG regelt die Speicherung von CO_2

Die RED III soll sicherstellen, dass die Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung ökologisch verträglich und emissionsarm ist. Hierzu gehören Anforderungen wie die Vermeidung von Landnutzungsänderungen, der Schutz von biologischer Vielfalt sowie der Nachweis einer deutlichen Treibhausgaseinsparung entlang der gesamten Wertschöpfungskette gegenüber einem fossilen Referenzwert. Die CRCF-Verordnung verweist ebenfalls auf die RED III in Bezug auf die Nachhaltigkeit von Biomasse. Im Rahmen der Bundesförderung Industrie und Klimaschutz (BIK) werden bereits Vorgaben gemacht, um den Einsatz von Biomasse auf Rest- und Abfallstoffe zu begrenzen.[134]

Der inländische Transport per Pipeline sowie die Speicherung von CO_2 sind derzeit durch die Regelungen im Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) verboten. Eine Anpassung des aktuellen Rechtsrahmens bezüglich des Transports und der Speicherung von CO_2 soll durch die Carbon Management-Strategie (CMS) erfolgen. Diese ist bisher jedoch nicht verabschiedet. Eine Novelle des KSpG wurde von der Bundesregierung bereits erarbeitet, aber noch nicht vom Bundestag verabschiedet. Dies gilt auch für die Ratifizierung des London-Protokolls.

Weitere rechtliche Unsicherheiten ergeben im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) im Hinblick auf die Einhaltung von Grenzwerten nach der Abscheidung sowie durch die Einstufung als bestehender Prozess im BImSchG, was Einfluss auf die Art des Genehmigungsverfahrens hat (§ 16

[131] (Danish Energy Agency, 2024).
[132] Annahme: Wärmepumpe mit einer durchschnittlichen Leistungszahl (Coefficient of Performance) von 3.
[133] (Thrän, et al., 2024a).
[134] „Die energetische Nutzung von Biomasse ist nur förderfähig, soweit der Antragsteller nachweisen kann, dass eine Direktelektrifizierung technisch und eine Wasserstoffnutzung technisch oder wirtschaftlich absehbar nicht verfügbar ist, und soweit die geplante Nutzung von Biomasse mit Blick auf die begrenzten nachhaltig verfügbaren Biomassepotenziale skalierbar ist. Die Bewilligungsbehörde wird im Förderaufruf unter Berücksichtigung des Stands der Technik Vorgaben machen, wie diese Nachweise zu erbringen sind. Die energetische Nutzung von Biomasse sollte auf Rest- und Abfallstoffe sowie auf aus Rest- und Abfallstoffen gewonnene Rohstoffe und Energieträger beschränkt sein. Soweit Biomasse förderfähig ist, hat der Antragsteller die Herkunft und die Bezugsquelle der im Rahmen der Förderung eingesetzten Biomasse nachzuweisen. Verwendete Energie aus Biomasse muss den Anforderungen der Biomasseverordnung, der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung sowie den Nachhaltigkeitsanforderungen des Artikels 29 der Richtlinie (EU) 2018/2001 (RED II) und anderen Rechtsakten der EU (zum Beispiel der künftigen RED III) genügen. Trifft die Nationale Biomassestrategie abweichende Anforderungen für die Förderung von Feuerungsanlagen zur Nutzung von Biomasse oder weitergehende Förderungsmöglichkeiten, gelten diese entsprechend für diese Förderrichtlinie“ (Förderrichtlinie Bundesförderung Industrie und Klimaschutz).

oder § 19 BImSchG). Darüber hinaus fehlen bei der Umweltverträglichkeitsprüfung Präzedenzfälle für die Einstufung als Abfallprodukt, wenn das CO_2 gespeichert wird.

Die Bundesförderung Industrie und Klimaschutz (BIK) und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) fördern die Abscheidung von biogenem CO_2

Mitte 2024 wurde die BIK verabschiedet. In Teilmodul 2 können CCS und auch BECCS gefördert werden. Darüber hinaus können im Rahmen der Klimaschutzverträge (KSV) CCU/S-Projekte gefördert werden. Die Interessenbekundung für die zweite Runde lief vom 19. Juli bis zum 30. September 2024. Dabei sind thermische Abfallbehandlungsanlagen ausgenommen, da sie nicht Teil des EU-ETS sind. Da Biomasse im EU-ETS mit dem Emissionsfaktor null berücksichtigt wird, besteht kein Anreiz für Unternehmen, biogenes CO_2 abzuscheiden. Der Anreiz für den Einsatz von CCS in Kombination mit Biomasse zur Emissionsreduktion wird reduziert durch die Proportionalitätsanforderung in Art. 49 (6)[135] bzw. Art. 49a (1)[136] in der Monitoring-Verordnung des EU-ETS (EU 2024/2493).

Im Rahmen des EEG entsteht durch die Förderung der Aufbereitung von Biogas zu Biomethan ein Anreiz für die Abscheidung von CO_2, nicht jedoch für die Speicherung.

BECCS ist in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium (TRL 8)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie können die Kosten- und die Energieeffizienz von CO_2-Abscheidungs- und Speichertechnologien optimiert werden?
- Wie kann die Freisetzung von Absorberflüssigkeit im Ablaufstrom minimiert werden?
- Wie lässt sich die Integration dieser Technologien in bestehende und zukünftige Energieinfrastrukturen optimal gestalten?

4.10 Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)

Bei Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) wird CO_2 über technische Anlagen direkt aus der Umgebungsluft gefiltert und abgeschieden, um es anschließend einer geologischen Speicherung zuzuführen. Die Abscheidung erfolgt über chemische oder physikalische Prozesse, bei denen CO_2 von den übrigen Bestandteilen der Atmosphäre getrennt wird. Das konzentrierte CO_2 kann anschließend in geologische Speicherstätten eingebracht werden. Aufgrund des hohen Energiebedarfs dieses Prozesses hängt die Effizienz der CO_2-Entnahme unter anderem vom Anteil erneuerbarer Energien an der Energieversorgung ab.[137]

---

[135] Im Falle der Übertragung von CO_2, das aus Materialien oder Brennstoffen mit einem Anteil an CO_2-neutralem Kohlenstoff stammt, an eine Abscheideanlage darf die übertragende Anlage gemäß Abs. 1 dieses Artikels nur diejenige Menge an CO_2 von ihren gemeldeten Emissionen abziehen, die dem Anteil des Kohlenstoffs entspricht, der nicht aus CO_2-neutralem Kohlenstoff stammt.

[136] Im Falle von CO_2, das aus Materialien oder Brennstoffen mit einem Anteil an CO_2-neutralem Kohlenstoff stammt, darf der Betreiber von den Emissionen der Anlage nur diejenige Menge an CO_2 abziehen, die dauerhaft chemisch in einem Produkt gebunden ist, das in der gemäß Art. 12 Abs. 3b der Richtlinie 2003/87/EG erlassenen delegierten Verordnung aufgeführt ist, und zwar anteilig entsprechend dem Kohlenstoffanteil, der nicht aus CO_2-neutralem Kohlenstoff stammt.

[137] (Pongratz, Geneuss, Hoppe, & Miller, 2024).

Das Potenzial von DACCS wird hauptsächlich durch den Energiebedarf begrenzt, nicht jedoch durch den Flächenbedarf

Für DACCS sind je Mio. Tonne CO_2 etwa 1,5 TWh CO_2-neutraler Strom erforderlich. Mit 3 bzw. 10 Prozent der inländischen Stromproduktion im Jahr 2024 (15 bzw. 50 TWh) könnte somit ein Entnahmepotenzial von rund 10 bzw. etwa 35 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr erreicht werden.[138] Ein weiterer potenzieller Engpass ist die CO_2-Transport- und Speicherinfrastruktur. Die Anlagenstandorte für Direct Air Capture (DAC) könnten dabei so gewählt werden, dass sie sich in Regionen mit hoher Stromproduktion durch erneuerbare Energien und kurzen Transportwegen zu geologischen Speicherstätten befinden, zum Beispiel an der deutschen Nordseeküste. Darüber hinaus könnten DAC-Anlagen auch von industrieller Abwärme profitieren und so ihren Strombedarf reduzieren. Unter Verwendung von Anbaubiomasse benötigt BECCS für die Entnahme von 10 Mio. Tonnen CO_2 zwischen 10.000 und 40.000 km^2 Fläche für den Anbau von dedizierten Energiepflanzen. Dies entspricht 1 bis 3 Prozent der gesamtdeutschen Fläche. Im Gegensatz dazu benötigt DAC für dieselbe Menge abgeschiedenes CO_2 weniger als 1.000 km^2 (einschließlich der Fläche für die Bereitstellung erneuerbarer Energie durch Photovoltaik) oder 0,3 Prozent der gesamtdeutschen Fläche.[139]

Bisher sind nur wenige DACCS-Anlagen in Betrieb

DACCS ist eine vergleichsweise neue Technologie. Die kumulierte Abscheidekapazität der in Betrieb befindlichen Pilotprojekte verschiedener Unternehmen liegt daher erst bei rund 0,01 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr. Gleichwohl sind Projekte mit Skalierungspotenzial mit bis zu 1 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr in Planung bzw. im Bau. Kumuliert könnten DACCS-Anlagen im Jahr 2030 global rund 3 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr abscheiden.[140, 141]

Die Speicherung des abgeschiedenen CO_2 im Untergrund ist bereits erprobt und nach aktuellen Erkenntnissen langfristig sicher (> 1.000 Jahre)

Das ins Speichergestein eingebrachte CO_2 kann, je nach Gesteinsart, in einer chemischen Reaktion über einen Zeitraum von Jahrhunderten oder Jahrtausenden mineralisieren und Karbonate und andere Minerale bilden, in denen der Kohlenstoff gebunden ist. Das Risiko einer Leckage wird bei Einhaltung bestehender Vorgaben zur Erschließung von CO_2-Speicherstätten als sehr gering eingeschätzt. Systeme zum MMV von geologischen CO_2-Speichern sind vorhanden und werden noch weiterentwickelt. Abgeschiedene, transportierte und gespeicherte CO_2-Mengen lassen sich bei DACCS entlang der gesamten Prozesskette präzise quantifizieren.[142]

---

[138] Bezogen auf ein DAC-Niedertemperaturverfahren im Jahr 2045, bei einem vollständig erneuerbaren Strommix. Im Jahr 2024 lag der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bei ca. 59%.

[139] (Strefler, Merfort, & Stevanovic, 2023; Edenhofer, et al., 2021; Smith, et al., 2016; Deutz & Bardow, 2021).

[140] (Heß, Klumpp, & Dittmeyer, 2020; IEA, 2025).

[141] Unter anderem Carbon Engineering / 1PointFive: Ziel von bis zu 0,5 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr mit der Anlage *Stratos* in den USA, in Betrieb ab 2025; Climeworks: Ziel von bis zu 40.000 Tonnen CO_2 pro Jahr mit den Anlagen *Orca* und *Mammoth* in Island, in Betrieb seit 2021 bzw. 2024; Ziel von bis zu 1 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr im Jahr 2030 mit der Anlage *Cypress* in den USA.

[142] (IPCC, Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005; Wallmann & Löschke, 2024; Borchers, et al., 2024).

Der Energiebedarf von DACCS ist sehr hoch

Der hohe Energiebedarf von DACCS ist auf den energieintensiven Prozessschritt der Regeneration des Sorbens zurückzuführen. Hier wird das abgeschiedene CO_2 aus dem Sorbens gelöst und das Sorbens für einen neuen Zyklus aufbereitet.

- Beim absorptionsbasierten Hochtemperaturverfahren liegt der Energiebedarf für die Abscheidung von 1 Tonne CO_2 bei 350 bis 700 kWh Strom und 1.500 bis 2.500 kWh Wärme. Die Wärmebereitstellung erfolgt dabei aktuell mittels Erdgases (z. B. Carbon Engineering).
- Das adsorptionsbasierte Niedertemperaturverfahren benötigt zur Regeneration Temperaturen von rund 80 bis 120 °C, die durch die Nutzung von Abwärme oder elektrisch erzeugt werden können. Zur Abscheidung von 1 Tonne CO_2 benötigt dieses Verfahren rund 150 bis 700 kWh Strom und 1.750 bis 2.000 kWh Wärme. Wird die Wärme durch eine Wärmepumpe mit einer Leistungszahl von 3,0 bereitgestellt, ergibt sich für dieses Verfahren ein Strombedarf von rund 1,4 kWh pro Tonne CO_2.

Die Energiebedarfe für beide Verfahren können durch Umweltfaktoren erheblich beeinflusst werden und höher ausfallen. Für die Kompression und den Transport des CO_2 werden zusätzlich 100 bis 130 kWh Strom je Tonne CO_2 benötigt. Weniger energieintensive Verfahren zur Abscheidung von CO_2 aus der Umgebungsluft (z. B. elektrochemische Verfahren; Metal Organic Frameworks) befinden sich noch in frühen Entwicklungsstadien. Aufgrund des hohen Energiebedarfs hat die Zusammensetzung des Strominputs einen erheblichen Einfluss auf die CO_2-Entnahmeeffizienz und die Kosten.[143]

Durch den hohen Energiebedarf ergeben sich hohe Betriebskosten für DAC-Anlagen

Die Kostenschätzungen pro Tonne CO_2 rangieren zwischen über 1.000 Euro für First-of-a-kind-Pilotanlagen und bei rund 500 bis 800 Euro für aktuell in Betrieb befindliche Anlagen. Unter Berücksichtigung von klimatischen Bedingungen und Abwärmepotenzialen ergeben sich unter Idealbedingungen Kostenschätzungen von 650 bis 830 Euro/t CO_2. Beim Erreichen einer kumulierten weltweiten Abscheidekapazität von 1 Gigatonne pro Jahr liegen die Kosten für DACCS global schätzungsweise zwischen 217 und 555 Euro/t CO_2. Für die günstigsten Standorte in Deutschland können im Jahr 2045 mit Kosten von rund 230 Euro/t CO_2 gerechnet werden. Von großer Bedeutung für die Effizienz des DAC-Abscheideprozesses und somit für die tatsächlichen Abscheidekosten sind zudem die atmosphärischen Bedingungen wie Luftfeuchtigkeit und Umgebungstemperatur.

Bisher liegen erst wenige Gesetze, Verordnungen und Strategien für DACCS vor und die öffentliche Akzeptanz für die Technologie ist ungewiss

Die CO_2-Transport- und Speicherinfrastruktur kann mit anderen CCS-basierten Anwendungen geteilt werden. Trotz dieser Synergien sind hohe Investitionen und geeignete regulatorische Rahmenbedingungen notwendig. Der inländische Transport per Pipeline sowie die Speicherung von CO_2 sind durch die Regelungen im Kohlendioxid-Speicherungsgesetz derzeit verboten. Eine Anpassung des aktuellen Rechtsrahmens bezüglich des Transports und der Speicherung von CO_2 soll durch die Carbon Management-Strategie (CMS) erfolgen. Diese ist bisher jedoch nicht verabschiedet. Eine Novelle des KSpG wurde von der Bundesregierung bereits erarbeitet, aber noch

[143] (Wang, et al., 2024; Erans, et al., 2022; Eke, Sahu, Ghuman, Freire-Gormaly, & O'Brien, 2025).

nicht vom Bundestag verabschiedet. Dies gilt auch für die Ratifizierung des London-Protokolls. Die Genehmigung von DACCS-Anlagen könnte durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) bestimmt sein, auch wenn es sie noch nicht explizit aufführt. Mitte 2024 wurde die BIK verabschiedet. In Teilmodul 2 können industrielle Forschungsvorhaben zu DACCS für Entwicklungs- und Erprobungszwecke mit bis zu 35 Mio. Euro gefördert werden. Die Interessenbekundung für die zweite Runde lief vom 19. Juli bis zum 30. September 2024. Zudem ist die öffentliche Akzeptanz für die DACCS-Technologie in Deutschland ungewiss. Erste Studien zeigen ein geringes Vorwissen der Öffentlichkeit über die Technologie, was mit einer höheren Risikoeinschätzung und einem geringeren Vertrauen einhergeht.

DACCS ist eine neuartige Methode zur CO_2-Entnahme, die bisher hauptsächlich im Labormaßstab oder in Pilotprojekten erprobt wird (TRL 4 bis 8)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Welche neuen Materialien und Verfahren können den Energieverbrauch und die Kosten senken?
- Was sind die (standortspezifischen) Auswirkungen von Umweltfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von DAC-Anlagen?
- Welche Bedingungen müssen für eine erfolgreiche Integration von DACCS in bestehende oder neu zu entwickelnde Infrastrukturnetze – etwa für Strom, Abwärme oder den CO_2-Transport – gegeben sein?
- Was sind die aktuellen politischen, regulatorischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, insbesondere hinsichtlich der sozialen Akzeptanz von DACCS?

4.11 Künstliche Photosynthese

Analog zur natürlichen Photosynthese soll bei der künstlichen Photosynthese die Energie des Sonnenlichts genutzt werden, um CO_2 aus der Umgebungsluft aufzunehmen und in kohlenstoffhaltige Produkte umzuwandeln. Dabei basiert der Prozess, wie auch bei DACCU/S, auf der Entnahme von CO_2 aus der Umgebungsluft. Im Gegensatz zu DACCS wird das CO_2 mithilfe photoelektrochemischer Verfahren in feste oder flüssige Produkte überführt.[144]

Die künstliche Photosynthese ist ein technologisch neuer Ansatz mit einem hohen Forschungsbedarf

Die künstliche Photosynthese kann in Zukunft eine wichtige Methode zur CO_2-Entnahme sein. Dies ist in der hohen Effizienz begründet. Photoelektrochemische Zellen können CO_2 bis zu zehnmal effizienter umwandeln als die natürliche Photosynthese. Die Technologie zeichnet sich weiterhin dadurch aus, dass die Speicherung des Kohlenstoffs sowohl oberirdisch (z. B. in Lagerhallen) als auch unterirdisch (z. B. in alten Bergwerken) erfolgen kann und somit keiner energieintensiven Verflüssigung für die unterirdische Speicherung wie bei CCS bedarf.[145] Die Endprodukte wie Oxalat

[144] Bei der Reaktion zu Oxalat wird Wasser oxidiert zu Sauerstoff und Wasserstoff und CO_2 reduziert zu Oxalat (C_2O_4).

[145] (Adam, Kleinen, May, & Rehfeld, 2025).

oder Grafit sind nach aktuellen Erkenntnissen mit geringen Umweltauswirkungen verbunden und könnten den Kohlenstoff über Tausende Jahre binden. Darüber hinaus ist die Methode flächeneffizient. So liegt der Flächenbedarf bei 2 bis 5 Prozent des Flächenbedarfs von Aufforstungen.[146]

Es bestehen noch Unsicherheiten bei Potenzial, Kosten und Umweltauswirkungen

An der Herstellung von stabilen speicherbaren Kohlenstoffprodukten wird gegenwärtig geforscht, es liegen jedoch aktuell nahezu keine Erfahrungen vor.[147] Die künstliche Photosynthese steht vor der Herausforderung eines hohen Energiebedarfs und damit verbunden entsprechend hohen Kosten (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Zwar ist der im Vergleich zu anderen landbasierten Entnahmemethoden geringere Flächenbedarf positiv hervorzuheben. Dennoch würde der großskalige Einsatz zu Landnutzungskonflikten führen und in Konkurrenz zu weiteren Landnutzungen stehen.[148]

Die Entnahmemethode befindet sich aktuell in der Grundlagenforschung (TRL 1 bis 3)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Was ist die am besten geeignete Speicherform zur CO_2-Entnahme?
- Was sind geeignete Materialien für Katalysatoren?
- Wie ist die Akzeptanz für die Technologie in der Gesellschaft einzuschätzen?

4.12 Bioenergie / Direct Air Carbon Capture and Utilisation (BECCU/DACCU)

Bei Verfahren zur CO_2-Abscheidung und -Nutzung (engl. Carbon Capture and Utilisation, CCU) wird abgeschiedenes CO_2 physikalisch, chemisch oder biologisch verwendet. Damit es bei CCU-Verfahren zu einer Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre kommt, muss das CO_2 aus der Atmosphäre stammen (engl. Direct Air Carbon Capture and Utilisation, DACCU) oder biogenen Ursprungs sein (engl. Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation, BECCU). Zum anderen muss das CO_2 langfristig im Kreislauf geführt oder im Produkt gebunden werden. CO_2 kann zur Herstellung von Kunststoffen, in Baumaterialien wie Dämmstoffen oder als Ersatz für fossiles Kerosin in der Luftfahrt genutzt werden. Eine kurzlebige Nutzung beispielsweise als Treibstoff im Luftverkehr führt nicht zu einer Entnahme, da das CO_2 nach kurzer Zeit wieder in die Atmosphäre emittiert wird. Die beschleunigte Karbonatisierung, eine spezielle Form von CCU, wird gesondert betrachtet.

CCU-Verfahren bieten ein hohes Vermeidungspotenzial in der Chemieindustrie sowie im Luft- und Seeverkehr

Aktuell stammt der für viele Produkte notwendige Kohlenstoff nahezu ausschließlich aus Erdöl und Erdgas. CCU-Verfahren werden eine wesentliche Rolle bei der Schließung des anthropogenen Kohlenstoffkreislaufs spielen. Dies gilt insbesondere für Verfahren, die auch in Zukunft Kohlenstoff in Produkten (u. a. Kunststoffen) oder für kohlenstoffhaltige Kraftstoffe benötigen (u. a. Kerosin in der

[146] (Adam, Kleinen, May, & Rehfeld, 2025; May & Rehfeld, 2022; Thrän, et al., 2024b).
[147] (Adam, Kleinen, May, & Rehfeld, 2025).
[148] (Adam, Kleinen, May, & Rehfeld, 2025; Thrän, et al., 2024b).

Luftfahrt). Der Bedarf an CO_2 zur Deckung des Gesamtkohlenstoffbedarfs in der petrochemischen Industrie liegt laut der Studie „Chemistry 4 Climate“ zwischen 21 und 52 Mio. Tonnen CO_2 im Jahr 2045 in Abhängigkeit von der verfügbaren Biomasse sowie dem Anteil von mechanischem und chemischem Recycling. Andere Studien zeigen, dass der Bedarf für die Kunststoffproduktion theoretisch ohne CCU-Verfahren gedeckt werden kann.[149]

Die Dauer der Speicherung variiert in Abhängigkeit vom Produkt und von der Kreislaufführung des CO_2

Bei CCU-Verfahren zur Herstellung von Kunststoffen und weiteren Produkten kann die Nutzungsdauer erheblich variieren. So können Kunststoffrohre in Gebäuden das CO_2 über Jahrzehnte binden. Hingegen erreichen Kunststoffverpackungen oft schon nach einigen Wochen wieder ihr Lebensende. Diese Kunststoffe können jedoch im Rahmen von Recyclingverfahren und weiteren Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen nach der Nutzungsphase weiter in Nutzung gehalten werden. Somit ist bei der Betrachtung unterschiedlicher CCU-Produkte eine generelle Aussage zur Dauer der CO_2-Entnahme nicht möglich.[150]

Bisher fehlen Methodiken zur Messung und Inventarberichterstattung der CO_2-Entnahme für nichtdauerhafte CCU-Verfahren.

Bei CCU-Verfahren zur Herstellung von chemischen Produkten bestehen zwei wesentliche Herausforderungen hinsichtlich MRV:

- Unterscheidung zwischen biogenem, atmosphärischem und fossilem CO_2
- Messung der Entnahmedauer

Bei der Abscheidung kann unterschieden werden, ob das CO_2 atmosphärischen oder biogenen Ursprungs ist. Sobald es aber innerhalb der Transportsysteme zu einer Durchmischung mit anderen (fossilen) CO_2-Quellen kommt, ist eine Unterscheidung nicht mehr möglich. Einen Ansatz zur Lösung dieses Problems bieten Massenbilanzierungssysteme[151]. Weiterhin werden der Zufluss und der Abfluss von nicht fossilem Kohlenstoff im nationalen THG-Inventar nicht gemessen. Dies wäre jedoch notwendig, um auf Inventarebene auszuweisen, wie viel CO_2 der Atmosphäre jährlich entnommen wird (siehe auch Kapitel 6.3.2 und Kapitel 6.3.3).

[149] (Agora Think Tanks; Prognos AG; Öko-Institut e.V.; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Universität Kassel, 2024; Renewable Carbon Initiative, 2023; VCI, VDI, 2023).
[150] (Geyer, Jambeck, & Law, 2017).
[151] Ein Massenbilanzierungssystem verfolgt die Menge von Materialien (z. B. Rohstoffe oder Produkte) entlang einer Lieferkette. Die Funktionsweise ist folgendermaßen:
Input erfassen: Die Menge der eingesetzten Rohstoffe (z. B. nachhaltige oder fossile) wird am Anfang erfasst.
Mengenverfolgung: Während der Verarbeitung wird dokumentiert, wie viel von den Rohstoffen genutzt oder in Produkte umgewandelt wird.
Output zuordnen: Am Ende wird die produzierte Menge so aufgeteilt, dass klar ist, welcher Anteil auf die nachhaltigen und welcher auf die konventionellen Materialien zurückgeht.
Massenbilanzierungssysteme sind in der RED II und III enthalten, um die Nachhaltigkeit der Biomasse sicherzustellen. Entsprechende Erfahrungen liegen somit bereits vor.

Wasserstoffbasierte CCU-Verfahren sind sehr energieintensiv

Die Verfahren zur Nutzung von CO_2 für die Herstellung von Grundstoffchemikalien (engl. High Value Chemicals, HVC)[152] sind von einem hohen Energiebedarf gekennzeichnet (22.000 bis 49.000 kWh/t_{HVC}).[153] Der Energiebedarf erwächst hauptsächlich aus der Herstellung von Wasserstoff und ist abhängig von der CO_2-Quelle und dem hergestellten Produkt. Der hohe Energiebedarf resultiert in hohen Vermeidungskosten von 215 bis 1.244 Euro/t CO_2.[154] Ist die bereitgestellte Energie nicht nahezu oder vollständig treibhausgasneutral, führt die Herstellung zu zusätzlichen CO_2-Emissionen.

BECCU kann bei Nutzung von zusätzlicher Biomasse Landnutzungskonflikte verschärfen (z. B. mit Nahrungsmitteln), zur Eutrophierung von Gewässern beitragen sowie zu einer Verlagerung von Landnutzungen ins Ausland führen, die zu einer weiteren Abholzung von Wäldern beitragen (siehe Kapitel 4.9). Wird atmosphärisches CO_2 verwendet, hängen die Umweltauswirkungen im Wesentlichen von der THG-Intensität der Energiebereitstellung ab (siehe Kapitel 4.10).

Wasserstoffbasierte CCU-Verfahren sind noch auf industrieller Ebene zu demonstrieren

Es gibt bereits Anlagen, die aus CO_2 und H_2 Methanol herstellen (z. B. in China).[155] Auf Island werden jährlich etwa 4.000 Tonnen Methanol aus CO_2 und H_2 produziert. Zum Vergleich beträgt die jährliche weltweite Menge von konventionell produziertem Methanol 170 Mio. Tonnen. Das Methanol-to-Olefines-Verfahren (MtO)[156] ist bereits im industriellen Maßstab im Einsatz.[157] Das Methanol-to-Aromatics-Verfahren (MtA)[158] ist derzeit auf Pilotstufen begrenzt und weist eine geringe Technologiereife (TRL 5) auf.[159]

CCU ist noch mit rechtlichen Unsicherheiten verbunden

Die CRCF-Verordnung unterscheidet zwischen permanent gebundenem genutzten CO_2 (siehe Kapitel 4.13) und der Bindung in langlebigen Produkten (engl. Long-lasting Products). Von der EU wird in der aktuellen Diskussion eine Bindung von mindestens 35 Jahren als Bedingung für die Einordnung von CCU als Entnahme vorgeschlagen.[160]

---

[152] Beispiele für HVC: Ethylen und Propylen (Olefine) sowie Benzol, Toluol und Xylol (Aromaten).

[153] Der Strombedarf zur Herstellung von Methanol liegt zwischen 8,4 und 11,5 MWh/$t_{Methanol}$. Für die Bereitstellung des CO_2 wird ein Strombedarf von 500 bis 2.000 kWh/t CO_2 und für die Wasserstoffherstellung wird ein Wirkungsgrad von 66,6 bis 80 Prozent angenommen, der im Ergebnis zu einem Strombedarf von 7.900 bis 9.500 kWh führt. Die Zahlen basieren auf Berechnungen der dena.

[154] Die Kosten ergeben sich aus folgenden Annahmen: H_2-Preis: 1,5 bis 4,5 Euro/kg H_2, CO_2-Preis: 50 bis 400 Euro/t CO_2, eingesparte Emissionen: 5 t CO_2/t_{HVC}. Die Investitions- und Betriebskosten ergeben sich aus Agora Energiewende & Agora Verkehrswende (2018).

[155] Pilotanlagen in Deutschland: Fraunhofer ISE (Laboranlage), Chemiepark Leuna (Pilotanlage), CO2BioClean (Pilotanlage Chemiepark Höchst) (Leuna100, 2025; Fraunhofer ISE, 2023; CO2BioClean, 2025).

[156] Beim MtO-Verfahren wird Methanol in Dimethylether (CH_3OCH_3) umgewandelt und dieses dann in Olefine wie Ethylen und Propylen (C_2H_4). Die Reaktion erfolgt bei Temperaturen von 300 bis 500 °C.

[157] vgl. Sailboat, Yangmei & Wison Clean Energy Company in China.

[158] Das Verfahren basiert wie das MtO-Verfahren auf Dimethylether und der Produktion von Olefinen. Diese werden durch Cyclisierung und Dehydrierung in Aromaten umgewandelt wie Benzol (C_6H_6).

[159] (Carbon Recycling, 2025; Statista, 2023; Zhang, et al., 2024; Honeywell UOP, 2019).

[160] (Europäische Kommission, 2025).

Die deutsche Rechtsprechung schließt die Nutzung von CO_2 nicht aus.[161] Nach der aktuell geltenden Legaldefinition in § 3 Nr. 7 KSpG liegen CO_2-Leitungen, die nicht zu Kohlendioxidspeichern, sondern zu CCU-Anlagen führen, nicht im speziellen Zulassungsregime des § 4 KSpG. Stattdessen gilt das allgemeine Zulassungsregime für Leitungsanlagen des Gesetzes über Umweltverträglichkeitsprüfungen. Die Bundesregierung plant mit der Novellierung des KSpG, die Regelungen für den leitungsgebundenen Transport von CO_2 für die Nutzung zu spezifizieren.

In der deutschen Rechtsprechung ist Kohlenstoffdioxid nicht einheitlich als (industrielle) Rohstoffquelle, Nebenprodukt oder Abfallprodukt (Emission) definiert. CO_2 ist gesetzgeberisch nicht eindeutig einem Rechtsregime zugeordnet. Stattdessen wird funktional zwischen den einzelnen Rechtsgebieten abgegrenzt, wobei eine Abfalleigenschaft im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes regelmäßig aufgrund der fehlenden Entledigungsabsicht oder -pflicht ausscheidet. Um als industrielle Ressource zugelassen zu werden, müssen je nach geplanter Verwendung die Voraussetzungen des Produktrechts, Emissionsrechts oder Energierechts (RED II/III) erfüllt sein. Dies kann Einzelfallprüfungen und -genehmigungen erforderlich machen.

Im EU-Emissionshandelssystem sind bei der Nutzung von CO_2 nur bei bestimmten Produkten keine Zertifikate abzugeben

Die aktuellen Regelungen für CCU im EU-ETS fokussieren sich weitestgehend auf die Minderung von CO_2-Emissionen durch die Bindung von fossilem CO_2.[162] CCU wird derzeit nur unter sehr spezifischen Umständen als Emissionsminderung an der Quelle anerkannt (siehe Kapitel 4.13). Regelungen zur Anrechnung für die Nutzung von biogenem oder atmosphärischem CO_2 für die langfristige Bindung liegen bisher im EU-ETS nicht vor. CCU-spezifische Anreizsysteme existieren derzeit über das Förderprogramm Horizon Europe sowie über den Innovation Fund.[163]

Forschungsbedarf besteht sowohl in der Grundlagenforschung als auch bei der industriellen Skalierung

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie können die Verfahren optimiert werden, insbesondere im Hinblick auf geeignete Katalysatoren?
- Inwiefern lassen sich MtO/MtA-Verfahren im großskaligen kommerziellen Maßstab einsetzen?
- Wie ist die öffentliche Wahrnehmung und Akzeptanz von CCU-Verfahren einzuschätzen?[164]

[161] (Weber, 2022).

[162] Derzeit begrenzt der delegierte Rechtsakt zur GHG-Methodik der RED II die Nutzung EU-ETS-bezogener Emissionen in CCU-Kraftstoffen nach 2040 (nach 2036 für Emissionen aus der Verbrennung zur Stromerzeugung). Eingefangenes fossiles CO_2 wird nicht mehr als vermieden angesehen, wenn es für RFNBOs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) bzw. RCFs (Recycled Carbon Fuels) verwendet wird. Auf EU-Ebene besteht ab 2036/2041 die Vorgabe, dass nur biogenes oder atmosphärisches CO_2 zu nutzen ist.

[163] (Thielges, et al., 2022).

[164] (Fürst & Strunge, 2024).

4.13 Beschleunigte Karbonatisierung

In der Zement- und Kalkindustrie wird karbonathaltiges Gestein wie Kalkstein gebrannt ($CaCO_3$ + Wärme -> CaO + CO_2). Dabei entstehen CO_2 und Produkte wie Branntkalk (CaO). Im Laufe der Zeit nehmen diese Produkte (Branntkalk, Zementklinker im Beton u. a.) sowie ebenfalls enthaltene Silikate CO_2 auf natürliche Weise wieder auf.[165] Aktuell ist noch nicht definiert, ob es sich hierbei um eine zertifizierbare CO_2-Entnahme handelt.

Diese Prozesse können durch menschliches Eingreifen beschleunigt werden. Beispielsweise wird CO_2 gezielt über Abbruchbeton unter entsprechenden Temperatur- und Druckbedingungen geführt. Das CO_2 geht dabei vereinfacht eine chemische Bindung mit dem Branntkalk (CaO) ein, um wieder Karbonate zu bilden (z. B. $CaCO_3$). Abbruchbeton wird in Deutschland beispielsweise im Straßenbau eingesetzt.

Das Verfahren kann CO_2 langfristig binden

Wird das CO_2 in Karbonaten gespeichert, ist die Speicherung als dauerhaft anzusehen, da das CO_2 geochemisch gebunden wird. Für eine Entnahme muss das CO_2 biogenen oder atmosphärischen Ursprungs sein. Die bereits beschriebenen Herausforderungen bei der CO_2-Abscheidung bleiben bestehen (siehe Kapitel 4.9, Kapitel 4.10). Darüber hinaus reduziert die Karbonatisierung von gefährlichen Abfällen wie Flugasche die Mobilität von Schwermetallen (z. B. Blei, Zink, Kupfer) und neutralisiert die Alkalität, was ihre Entsorgung sicherer macht. Die resultierenden Materialien weisen oft verbesserte mechanische Eigenschaften auf, was zu langlebigeren Bauprodukten führt.[166]

Die Potenzialabschätzungen weisen noch hohe Unsicherheiten auf

Bisher liegen in Deutschland keine Potenzialabschätzungen für die beschleunigte Karbonatisierung vor.[167] Im Jahr 2045 wird das Potenzial für die natürliche Karbonatisierung bei Beton auf 1,5 Mio. Tonnen CO_2 und bei Kalkprodukten auf 0,7 Mio. Tonnen CO_2 geschätzt. Weltweit wurden durch den Prozess der natürlichen Karbonatisierung 52 Prozent der global prozessbedingten Emissionen der Zementindustrie bereits wieder entnommen.[168]

Die Effizienz der CO_2-Entnahme hängt von den vorherigen Emissionen ab. Bei der Herstellung von Zementklinker oder Branntkalk entstehen CO_2-Emissionen. In Deutschland liegen diese in etwa bei 700 Kilogramm CO_2 pro Tonne Zementklinker, davon etwa ein Drittel brennstoffbedingt und zwei Drittel prozessbedingt. Bei Betrachtung des Lebenszyklus übersteigen diese Emissionen den Effekt

[165] Reaktionsgleichungen:

$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

$Ca_xSi_yO_{(x+2y)} + xCO_2 + zH_2O \rightarrow xCaCO_3 + ySiO_2 * zH_2O$

[166] (Cappai, Cara, Muntoni, & Piredda, 2012; El-Hassan, 2020; Oljaire, 2013).

[167] In Bezug auf die beschleunigte Verwitterung liegt das Potenzial für recycelten Bauschutt bei 5 kg CO_2/t und für Betonbrechsand bei 22 kg CO_2/t (EU Recycling Magazin, 2025).

[168] (Agora Think Tanks; Prognos AG; Öko-Institut e.V.; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Universität Kassel, 2024; Wu, et al., 2024).

der natürlichen oder beschleunigten Aufnahme durch Karbonatisierung. Erfolgt hingegen eine Reduktion der Emissionen über einen Brennstoffwechsel sowie die CO_2-Abscheidung, kann über den gesamten Lebenszyklus CO_2 entnommen werden.[169, 170]

Bisher liegen nur wenige Erfahrungen mit der beschleunigten Karbonatisierung vor. In Deutschland gibt es erste Anlagen mit einer jährlichen Kapazität von etwa 1.000 Tonnen CO_2. Die Bindung erfolgt in rezykliertem Bauschutt, der als Recycling-Beton (RC-Beton) eingesetzt werden kann.[171, 172] Weiterhin gibt es europäische Konzepte für den Betrieb einer Anlage, in der CO_2 aus dem Abgas von Kalköfen in Kombination mit Nebenprodukten aus der Edelstahlindustrie zur Herstellung von Baumaterial verwendet wird.[173, 174]

Im EU-ETS sind die Produkte spezifiziert, bei denen keine Zertifikate abzugeben sind

Der delegierte Rechtsakt C(2024) 5294 enthält folgende Liste von Produkten, die CO_2 dauerhaft binden:

- Karbonatisiertes Gesteinskorn, ungebunden oder gebunden in mineralischen Baustoffprodukten verwendet
- Karbonatisierte Bestandteile von Zement, Kalk oder anderen hydraulischen Bindemitteln, die in Bauprodukten verwendet werden
- Karbonatisierter Beton, einschließlich vorgefertigter Blöcke, Pflastersteinen oder Porenbeton
- Karbonatisierte Ziegel, Fliesen oder andere Mauerwerkseinheiten

Für den Einsatz von Recyclingbeton besteht ein gesetzlicher Rahmen. In Deutschland regelt die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) den Einsatz von Recyclingbeton. Kritik gibt es an den Vorschriften zum Einsatz von Recyclingbeton (EN 197-1 und DIN EN 206), da sie den verbreiteten Einsatz von Recyclingbeton verhindern würden.

Die beschleunigte Karbonatisierung erfordert weitere Forschung (TRL 6)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie kann die Prozesseffizienz gesteigert werden?

---

[169] Bei einer erheblichen Reduktion des Betonbedarfs könnte sich dieser Effekt ebenfalls einstellen (vgl. Watari et al., 2022), da der bestehende verbaute Beton über Jahre hinweg CO_2 aufnimmt und diese Karbonatisierungsrate (vgl. Wu et al., 2024) die dann noch bestehenden CO_2-Emissionen übersteigen kann.

[170] (Schwenk, 2023; BV Kalk, 2024).

[171] Bei neustark wird das CO_2 während des Recyclingprozesses in das Granulat von Abbruchbeton injiziert. Durch einen Mineralisierungsprozess wird das CO_2 in Kalkstein umgewandelt und dauerhaft an die Poren und Oberflächen des Granulats gebunden. Das CO_2 stammt aus Biogasanlagen und Biomethananlagen (neustark, 2023).

[172] Weiterhin ist im November 2024 eine Anlage in Kirchheim in Betrieb genommen worden, die CO_2 in rezykliertem Bauschutt bindet (EU Recycling Magazin, 2025).

[173] Bei dem Verfahren wird CO_2 vermieden. Eine Entnahme erfolgt nicht, da die Emissionen prozessbedingt oder aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen und das CO_2 somit nicht biogenen oder atmosphärischen Ursprungs ist.

[174] (Lhoist, 2025).

- Welche Rohstoffe (einschließlich industrieller Abfälle) eignen sich für die Karbonatisierung?
- Wie kann eine Integration in bestehende industrielle Prozesse aussehen?
- Wie hoch ist die langfristige Stabilität der gebildeten Karbonate und welche Gesamtumwelt-auswirkungen entstehen?[175]

4.14 Alkalinitätserhöhung im Ozean

Durch die Alkalinitätserhöhung im Ozean steigt das Säurebindungsvermögen, wodurch das Meerwasser mehr CO_2 aus der Atmosphäre aufnehmen und chemisch als Bikarbonat- und Karbonationen (HCO_3^- bzw. CO_3^{2-}) binden kann. Für Deutschland sind drei verschiedene Ansätze relevant:

Der erste Ansatz basiert auf Kalkstein und der Umsetzung zu gelöschtem Kalk ($Ca(OH)_2$) für die Einbringung in den Ozean. Dafür wird Löschkalk durch Brennen von Kalkstein in Kombination mit CCS hergestellt, um CO_2-Emissionen in der Produktion zu vermeiden.[176] Der sehr gut lösliche Löschkalk wird anschließend als Gesteinsmehl in das Meerwasser ausgetragen oder als Suspensionslösung bereitgestellt. Ein Mol Löschkalk kann zwei Mol CO_2 binden.[177] Kalkstein ($CaCO_3$) hat zwar auch ein theoretisches Säurebindungspotenzial (gemäß der Gleichung $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2\ HCO_3^-$), löst sich in der Praxis jedoch in der Regel zu langsam auf, so dass es zum Meeresboden sinken würde. In Meeren mit hohem Säuregehalt, wie etwa den tieferen Gebieten der Ostsee, könnte es jedoch eine kostengünstigere Alternative darstellen.[178]

Ein weiterer Ansatz besteht in der chemischen Bindung von abgeschiedenem CO_2 in Reaktoren an geeignetem verarbeitetem Gestein mit anschließender Einleitung des Reaktorwassers in Flüsse oder direkt ins Meer über Schiffe oder stationäre Anlagen.[179]

Schließlich basiert ein dritter Ansatz auf anderen Silikat- oder Karbonatgesteinen. Diese werden gemahlen und danach an Stränden (siehe Kapitel 4.7), im Flachwasser oder an der Meeresoberfläche verteilt.[180]

Für Deutschland gilt ein möglicher weiterer Ansatz auf Basis der elektrochemischen Entfernung von Säuren aus dem Meerwasser und dem Zurücklassen von Basen als nicht relevant.[181, 182]

---

[175] (Pfleger, Radl, & Vill, 2023).

[176] Bei einer Herstellung großer Mengen ohne CO_2-Abscheidung und -Speicherung wären erhebliche zusätzliche CO_2-Emissionen zu erwarten.

[177] (Martin, Nickoloff, Moffat, Weaver, & Eby, 2025).

[178] Die Zuordnung der beschleunigten Verwitterung von fein gemahlenem Gestein am Meeresboden (Enhanced benthic weathering (EBW)) ist nicht eindeutig. Es ein Teilbereich der ozeanischen Alkalinitätserhöhung, wird aber als Prozess auch direkt der beschleunigten Gesteinsverwitterung zugeordnet. (Fuhr, et al., 2025).

[179] (Planeteers, 2025).

[180] (Oschlies, Bach, Fennel, Gattuso, & Mengis, 2025; Planeteers, 2025; Rotteveel, Heubach, & Sterling, 2022).

[181] Beispielsweise wird Kochsalz (NaCl) elektrolytisch in NaOH und Cl_2 gespalten.

[182] (Eisaman, et al., 2023).

Das theoretisch hohe Potenzial ist begrenzt durch bestehende Bergbaukapazitäten, mögliche Nutzungskonflikte sowie lokale Umweltauswirkungen

Abschätzungen des Forschungskonsortiums REKTAE (CDRmare) zeigen, dass bei der Nutzung sauerstoffarmer, saisonal bedingter Regionen der Ostsee, von Verwitterungsreaktoren entlang von Flüssen sowie von Austragungsrouten für Löschkalklauge entlang der maritimen Routen der deutschen Nordsee eine jährliche theoretische Entnahme von über 18 Mio. Tonnen CO_2 möglich ist. Das tatsächliche Entnahmepotenzial hängt jedoch von den lokalen Umweltbedingungen, Nutzungskonkurrenzen und den eingesetzten Verfahren ab.[183] Nutzungskonflikte können durch konkurrierende Meeres- und Gewässernutzungen entstehen und das potenzielle Einsatzgebiet beschränken. Hierzu zählen beispielsweise auch marine Schutzgebiete.

Kalk- und Silikatgesteine sind weltweit ausreichend verfügbar und gehören zu den häufigsten Gesteinen der Erdkruste.[184] Bei Betrachtung der bestehenden Produktionsmenge von Kalk-, Dolomit- und Mergelgesteinen (44 bis 56 Mio. Tonnen pro Jahr) ergäbe sich ein CO_2-Entnahmepotenzial von etwa 19 bis 24 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr.[185] Die Produktionsmengen werden in der Zement- und Kalkindustrie eingesetzt und dienen daher als Indikation für ein theoretisches Potenzial. Somit ist es möglich, dass für die zusätzliche Nutzung der Gesteine zur Erhöhung der Alkalinität weitere Abbaugebiete erschlossen werden müssen. Der Abbau von Mineralen in Steinbrüchen führt häufig zu Landnutzungskonflikten, zu Eingriffen in lokale Ökosysteme sowie zu einer erhöhten Lärm- und Staubbelastung.

Bislang fehlen Labor- oder Feldstudien zu den Auswirkungen eines Mineraleintrags im industriellen Maßstab. Aktuelle Erkenntnisse aus Modellstudien zeigen, dass ein erhöhter pH-Wert des Meerwassers und erhöhte Sättigungsgrade lokal nachteilige Auswirkungen auf marine Ökosysteme haben können.[186] Spurenelemente (vor allem aus Silikatgesteinen) wie Nickel, Kupfer, Cadmium und Chrom können Risiken für Ökosysteme und Menschen darstellen.[187]

Die Alkalinitätserhöhung zeichnet sich durch eine hohe Speicherdauer aus (bis zu 10.000 Jahre). Die Dauerhaftigkeit ist jedoch noch nicht abschließend geklärt. Simulationen zeigen, dass die Wirksamkeit der Alkalinitätserhöhung mit zunehmender globaler Erwärmung abnimmt.[188, 189]

Die Alkalinitätserhöhung kann zu positiven Umweltauswirkungen führen

Die Alkalinitätserhöhung kann die Versauerung des Meerwassers reduzieren. Dies kann der Biodiversität zugutekommen, insbesondere Korallen und Krustentieren.[190] Trotz bestehender Nutzungskonflikte haben marine Methoden gegenüber terrestrischen CO_2-Entnahmemethoden den

[183] (Löschke, et al., 2025)

[184] Darüber hinaus können sich als Ausgangsstoffe auch Beton oder Stahlwerksschlacke oder deren Lösungsprodukte eignen (Renforth & Henderson, Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration, 2017; Renforth, The negative emission potential of alkaline materials, 2019).

[185] Annahme: 2,3 Tonnen Mineralprodukt pro gebundener Tonne CO_2 (Oschlies, et al., 2022).

[186] (Bach, Vaughan, Law, & Williamson, 2024).

[187] (Oschlies, Bach, Fennel, Gattuso, & Mengis, 2025).

[188] (World Ocean Review, 2024).

[189] (BGR, 2023).

[190] (Y Feng, Keller, Koeve, & Oschlies, 2016).

Vorteil, in geringerer Konkurrenz zu anderen Nutzungsformen zu stehen, wie es etwa bei der Lebensmittel- und Futterproduktion an Land der Fall ist.

Die Verfahren sind sehr materialintensiv und weisen häufig einen hohen Energiebedarf auf

Schätzungen gehen davon aus, dass pro Tonne gebundenem CO_2 0,5 bis 5 Tonnen Mineralprodukte zum Einsatz kommen müssten. Bei den Ansätzen zur Alkalinitätserhöhung handelt es sich um energieintensive Prozesse. Beispielsweise besteht bei der Verarbeitung von Kalkstein zu Löschkalk mit CCS ein hoher Wärmebedarf von 850 kWh/t CO_2 und ein Strombedarf von 300 kWh/t CO_2. Aus dem hohen Energiebedarf resultieren Kosten von 129 bis 286 Euro/t CO_2 in Abhängigkeit von den Energiepreisen und der verwendeten Technologie sowie von zukünftigen Skaleneffekten und MRV-Kosten.[191, 192] Der Energieaufwand und somit die Kosten sind wesentlich geringer, wenn Gesteine verwendet werden können, die chemisch unverändert aus dem Steinbruch kommen, was aber nur eingeschränkt möglich ist.[193]

Bislang gibt es keine verlässliche Methodik zur Verifikation und Attribution der CO_2-Entnahme. Große Herausforderungen bestehen darin, die gezielte Erhöhung des Kohlenstoffgehalts der Meere durch den Eintrag gemahlener Minerale zu messen, von natürlichen Schwankungen zu unterscheiden und einzelnen Maßnahmen zuzuordnen.

Bisher liegen keine spezifischen Gesetze und internationalen Abkommen für die Alkalinitätserhöhung vor

Es gibt internationale und nationale Regelungen, die Forschungs- und kommerzielle Aktivitäten betreffen. Dazu zählen das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (engl. United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS), das Übereinkommen über die biologische Vielfalt (engl. Convention on Biological Diversity, CBD), das Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Übereinkommen) sowie das Protokoll zu diesem Übereinkommen (Londoner Protokoll, LP). Das im LP verankerte Vorsorgeprinzip hat zur Folge, dass Vertragsstaaten (darunter auch Deutschland) keine kommerzielle Alkalinitätserhöhung erlauben können. Deutschland hat sich in der Umsetzung des LP für eine strengere nationale Rechtslage entschieden.

Stand 2025 sind hierzulande sowohl das kommerzielle Betreiben als auch die entsprechende Forschung von marinem Geoengineering verboten.[194] Darüber hinaus findet für die Alkalinitätserhöhung das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) Anwendung, wenn die Alkalinitätserhöhung in Binnen- und Küstengewässern geplant ist. Für die Gesetze zum Abbau von Gestein wird auf Kapitel 4.7 und in Bezug

[191] Annahmen: Energie wird über Gas oder Strom bereitgestellt. Wärme: 27 Euro/MWh, Strom: 106 Euro/MWh und Kraftstoff: 435 Euro/t. Weiterhin gilt die Annahme eines vollständig dekarbonisierten Energiesystems und einer komplett dekarbonisierten Transportinfrastruktur (Kowalczyk, et al., 2024).
[192] (Kowalczyk, et al., 2024; World Ocean Review, 2024).
[193] (Fuhr, et al., 2025).
[194] § 4 Satz 2 Nr. 3 HSEG sieht eine Ausnahme vom Verbot des Einbringens für Maßnahmen des sogenannten marinen Geoengineerings vor. Diese Ausnahme greift für Tätigkeiten, die in der Anlage zum HSEG aufgeführt sind. Dort wird Stand 2025 nur auf Tätigkeiten der Meeresdüngung verwiesen. Die hier beschriebenen Aktivitäten wären entsprechend zu ergänzen.

auf CCS auf Kapitel 4.9 verwiesen. Bisher sind keine Anreizsysteme für die Alkalinitätserhöhung außerhalb von Forschungsförderungen vorhanden.

Viele der beschriebenen Ansätze weisen einen hohen Forschungsbedarf auf (TRL 4 bis 6)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Können die auf dem Meer verteilten Mineralpartikel schnell genug verwittern und zu einer Alkalinitätserhöhung an der Wasseroberfläche beitragen, bevor sie zu Boden sinken?
- Wie sind die Auswirkungen auf die marinen Nahrungsketten und die globalen Fischbestände?
- Wie können verlässliche Aussagen zum Nutzen einer gezielten Alkalinitätserhöhung über geeignete chemische Messungen, statistische Analysen, Modellierungen und Prozessbeobachtungen getroffen werden?
- Wie kann die mögliche Ausfällung von Kalziumkarbonat bei der Übersättigung mit Kalk verhindert werden?[195]

4.15 Künstlicher Auftrieb

Durch die biologisch-physikalische Kohlenstoffpumpe entnimmt der Ozean der Atmosphäre auf natürliche Weise CO_2. Das Oberflächenwasser in den meisten Meeresregionen (75 Prozent der Ozeanfläche) ist durch Nährstoffmangel gekennzeichnet, der das Algenwachstum begrenzt. Wenn nährstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche gelangt, verstärkt es das Algenwachstum, das durch Photosynthese Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Biomasse bindet. Durch natürliche Prozesse wird anschließend ein Teil des gebundenen Kohlenstoffs in tiefere Lagen des Ozeans transportiert und dort gespeichert. Beim künstlichen Auftrieb soll dieser Prozess verstärkt werden, indem nährstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche gepumpt wird.

Bestehende Modellierungsstudien ermitteln global ein begrenztes Potenzial zur CO_2-Entnahme

Das Potenzial zur CO_2-Entnahme nimmt mit steigenden THG-Emissionen zu.[196] Studien zeigen, dass der dominierende Effekt auf das Klima jedoch nicht in der Entnahme des CO_2 aus der Atmosphäre besteht, sondern in der vorübergehenden Abkühlung der Oberflächengewässer.[197] In Kombination mit Eisendüngung kann das Potenzial zur CO_2-Entnahme erhöht werden.[198] Diese Abkühlung kann den Strahlungshaushalt beeinflussen und zu einer Reduktion der globalen Erwärmung beitragen. Aufgrund der geringen Fläche der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) in Deutschland wird

[195] (Oschlies, Bach, Fennel, Gattuso, & Mengis, 2025; Yang & Timmermanns, 2024).

[196] Bei höheren THG-Emissionen und steigenden globalen Temperaturen erwärmen sich die Ozeane. Dadurch reduziert sich die Fähigkeit, CO_2 zu lösen, da warmes Wasser weniger CO_2 aufnehmen kann. Als Folge wird die Löslichkeitspumpe weniger effektiv, da die thermische Schichtung der Ozeane zunimmt und somit die vertikale Durchmischung erschwert. Die Löslichkeitspumpe wirkt bei Szenarien mit geringeren THG-Emissionen der Entnahme von CO_2 entgegen.

[197] Bei den Modellierungsstudien wird dabei von einem festen Bindungsverhältnis von Kohlenstoff zu Nährstoffen ausgegangen.

[198] (Jürchott, Koeve, & Oschlies, 2024).

kein nennenswertes Potenzial zur CO_2-Entnahme erwartet. Anzumerken ist, dass die Entnahmemethode sich noch in der Grundlagenforschung befindet und Schätzungen zu Kosten, Energiebedarfen und Potenzialen aktuell mit hohen Unsicherheiten verbunden sind.[199]

Die Entnahmedauer ist abhängig vom Betrieb der Pumpen. Bei kontinuierlichem Betrieb wird erwartet, dass das zusätzlich im Ozean gespeicherte CO_2 für Jahrzehnte bis Jahrtausende gespeichert bleibt. Erfolgt jedoch eine abrupte Einstellung des Betriebs der Pumpen, würden die Oberflächengewässer mit einer Abgabe des CO_2 reagieren.[200]

Die Erkenntnisse zu Umweltauswirkungen sind bisher noch mit hohen Unsicherheiten verbunden

Durch das Hochpumpen des Wassers werden Wärme, Salzgehalt, Alkalinität sowie CO_2 und andere Stoffe transportiert. Dies hätte bei einem flächendeckenden Betrieb Auswirkungen auf die Ozeanschichtung und die Ozeanzirkulation und könnte sich auch erheblich auf das Klima auswirken. Der Effekt der anfänglichen Abkühlung könnte zu einer thermisch veränderten Schichtung des Ozeans und über Rückkopplung auf die Ozeanzirkulation und das Strahlungsgleichgewicht zu einer zusätzlichen Erwärmung führen und dem Effekt der Abkühlung und der CO_2-Entnahme entgegenwirken.[201]

Würde sich die Verfügbarkeit von Nährstoffen an der Oberfläche dauerhaft erhöhen, wird davon ausgegangen, dass eine Anpassung der Ökosysteme erfolgt. So werden eine Vermehrung von Kieselalgen, daraufhin eine Ansiedlung von Zooplankton und als Effekt davon eine Vermehrung der Fischbestände erwartet.[202] Führt der Eintrag zu einer höheren Primärproduktion[203], könnte dies den Sauerstoffgehalt in tieferen Gewässern verringern und die Freisetzung von Treibhausgasen erhöhen (z. B. CH_4 und N_2O). Weiterhin könnte es zu Auswirkungen auf die Ökosysteme der Tiefsee durch einen zunehmenden Transport kohlenstoffreicher Biomasse kommen.[204]

Weitere Herausforderungen ergeben sich beim Betrieb und bei der Messung

Für eine signifikante Klimawirksamkeit wäre eine hohe Pumpenleistung notwendig. Dabei ist fraglich, ob ein solches Pumpensystem überhaupt technisch umsetzbar wäre. Auch die direkte Messung und Zuordnung der CO_2-Entnahme sind schwierig, da die CO_2-Entnahme zeitlich und räumlich vom Einsatzort der Methode getrennt ist.[205]

[199] (Oschlies, Pahlow, Yool, & Matear, 2010; Oschlies, Bach, Fennel, Gattuso, & Mengis, 2025; Koweek, 2022; Jürchott, A., & Koeve, Artificial Upwelling—A Refined Narrative, 2023; Keller, Feng, & Oschlies, 2014).
[200] (World Ocean Review, 2024).
[201] (Oschlies, Bach, Fennel, Gattuso, & Mengis, 2025; GESAMP, 2019; Kwiatkowski, Ricke, & Caldeira, 2015).
[202] (Goldenberg, et al., 2022).
[203] Primärproduktion beschreibt die erzeugte Biomasse durch autotrophe Organismen (Pflanzen, Algen und bestimmte Bakterien) über die Umwandlung von anorganischen Stoffen (Spektrum, 2025).
[204] (Williamson, et al., 2012; Baumann, et al., 2021; Ortiz, Aristegui, Hernández-Hernández, Fernández-Méndez, & Riebesell, 2022; World Ocean Review, 2024).
[205] (World Ocean Review, 2024; Mengis, Allanah, & Fernández-Méndez, 2023).

Innerhalb der rechtlichen Rahmenbedingungen für den künstlichen Auftrieb bestehen offene Fragen

International fällt der künstliche Auftrieb durch das Ausbringen der frei treibenden Pumpen in den Regelungsrahmen des Seevölkerrechts. Dabei relevant sind Bestimmungen zum Schutz der Meeresumwelt, das UNCLOS sowie das Londoner Protokoll. Im nationalen Recht sind in Deutschland sowohl das kommerzielle Betreiben als auch die entsprechende Forschung durch das HSEG verboten.[206] Dabei ist zu beachten, dass mit Ausnahme der für die Erhöhung des Auftriebs benötigten Plastikröhren keine Stoffe in die Meeresumwelt eingebracht werden. Für den Fall, dass die Pumpinfrastruktur nach der Nutzung wieder aus der Meeresumwelt entfernt wird, kann die Einschätzung erfolgen, dass das HSEG damit von vornherein nicht anwendbar ist. Dies wäre insbesondere im Hinblick auf Forschungsprojekte zu spezifizieren.

Grundsätzlich verfolgen marine Entnahmemethoden eine Nutzung der Meere zu klimaschutzrechtlichen Zwecken. Die Berücksichtigung einer solchen Nutzung im Rahmen des Seevölkerrechts ist jedoch nicht abschließend geklärt und Gegenstand der rechtswissenschaftlichen Debatte. Offene Fragen bestehen in Bezug auf

- die Rechtmäßigkeit des Einbringens von vielen Auftriebspumpen,
- eine Genehmigungspflicht für den Einsatz und
- die entsprechenden Bedingungen für eine solche Genehmigung.

Es besteht noch erheblicher Forschungsbedarf für einen Einsatz zur Entnahme von CO_2 (TRL 1 bis 3)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie lassen sich die technischen Herausforderungen bei den Pumpen verringern, da bisherige Feldversuche im marinen Umfeld nicht länger als einige Tage umfassten?
- Welches Potenzial hat die Methode für eine zusätzliche Kohlenstoffbindung? Welches Potenzial gibt es bei der Kombination mit der Kultivierung von Makroalgen?
- Welche Risiken gehen für das Leben im Meer mit künstlichem Auftrieb einher und wie lange würde es zum Beispiel dauern, bis sich nach der Inbetriebnahme einer oder mehrerer Pumpen das lokale Ökosystem vollständig angepasst hätte?

4.16 Kultivierung und Nutzung von Makroalgen

Die Kultivierung von Makroalgen hat eine lange Tradition: Seit Jahrhunderten werden sie als Nahrung, Tierfutter und Dünger verwendet. Ein neuer Ansatz ist der gezielte Anbau zur Entnahme von CO_2. Der Anbau kann in Küstennähe oder im offenen Meer stattfinden. Algen wandeln mittels Photosynthese im Meerwasser gelöstes CO_2 in kohlenstoffreiche Biomasse um. Zur langfristigen Speicherung des in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffs gibt es mehrere Verfahren:

- Natürliches oder absichtliches Absinken der Biomasse: Dabei wird ein Teil des Kohlenstoffs in der Wassersäule und im Sediment gespeichert.

[206] siehe § 4 S. 1 HSEG i.V.m. § 3 Abs. 1 S. 1 Nr. 5, Abs. 5 HSEG.

- Ernten und Verarbeiten der Biomasse: Bei diesem Prozess werden die Makroalgen geerntet, verarbeitet und gezielt genutzt, beispielsweise für die Herstellung von Pflanzenkohle und Baumaterialien oder für BECCU/S (siehe Kapitel 4.8, Kapitel 4.9, Kapitel 4.12).

Wichtige natürlich vorkommende Makroalgen in Deutschland sind die Tangwälder um Helgoland und der Blasentang in der Nord- und Ostsee.[207] Zur Nutzung von Makroalgen für die CO_2-Entnahme in Deutschland gibt es bisher wenige Untersuchungen.

Es besteht ein hohes Potenzial zur Mehrfachnutzung bestehender Meeresinfrastrukturen

Im Gegensatz zum Anbau von terrestrischer Biomasse entstehen beim Anbau von Makroalgen keine zusätzlichen Landnutzungskonflikte, auch wird kein Frischwasser benötigt. Der Ansatz hat darüber hinaus ein hohes Potenzial zur Mehrfachnutzung von bestehenden Meeresinfrastrukturen. Ein Beispiel sind Offshore-Windkraftanlagen. Hier ergeben sich Synergien durch die Nutzung bestehender Fundamente, Plattformen oder Zugangsmöglichkeiten, die für die Installation und Wartung von Makroalgen-Farmen genutzt werden können.[208]

Die Kultivierung von Makroalgen kann lokal zu positiven Effekten auf Meeresökosysteme führen

Durch die Kultivierung von Makroalgen kann es zu einer potenziellen Reduktion von Nährstoffbelastungen in Küstengewässern kommen. Eine mögliche Erhöhung der lokalen Biodiversität und Co-Benefits zum Beispiel für die lokale Fischerei wurden bei natürlich vorkommenden Makroalgen ebenfalls beobachtet. Bei Versuchen in China haben Makroalgen die Wasserqualität verbessert und der Überdüngung der Gewässer entgegengewirkt.[209]

Die küstennahe Kultivierung konkurriert mit anderen Meeresraumnutzungen

Eine küstennahe Makroalgen-Kultivierung in der deutschen AWZ würde mit anderen Nutzungsformen wie Fischerei, Windkraft, Schifffahrtsstraßen und Schutzgebieten konkurrieren. Die AWZ steht bereits unter einem hohen Nutzungsanspruch. Durch eine Verschärfung kann es zu negativen Auswirkungen auf küstennahe und marine Ökosysteme kommen.

Die Umweltauswirkungen großflächiger Makroalgen-Farmen umfassen nach gegenwärtigem Kenntnisstand wahrscheinlich eine erhöhte oder veränderte Biodiversität sowohl an der Oberfläche als auch in der Tiefsee. Auch führen sie zu einer erhöhten Albedo, zu reduziertem Licht unter der Oberfläche (Meeresboden, Wassersäule) sowie möglicherweise zu Emissionen von Halogenverbindungen.[210]

Das Potenzial zur CO_2-Entnahme in Deutschland gilt als fraglich

Durch die geringe Größe der AWZ Deutschlands sowie Nutzungskonflikte ist gegenwärtig eine signifikante Makroalgen-Kultivierung nur in Mitnutzung von Strukturen wie Offshore-Windparks oder in internationalen Gewässern realistisch. Für Deutschland gibt es bisher nur wenige Abschätzungen zum CO_2-Entnahmepotenzial. Die Möglichkeiten zum Anbau von Makroalgen in Farmen sind durch

[207] (Camarena-Gómez, Lähteenmäki-Uutela, & Spilling, 2022).
[208] (Buck, et al., 2018; Koplin, et al., 2024).
[209] (Martin, et al., 2021; World Ocean Review, 2024).
[210] (Baker, et al., 2018; Bach, et al., 2021; Keng, et al., 2013; Mithoo-Singh, et al., 2017).

andere Meeresraumnutzungen begrenzt. Eine sehr idealisierte Berechnung zeigt, dass für die Entnahme von 10 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr etwa 8 Prozent der Meeresfläche der AWZ benötigt würden.[211]

Die CO_2-Entnahmemethoden basierend auf Makroalgen-Biomasse bieten auf globaler Ebene ein theoretisch hohes Entnahmepotenzial. Dies beruht bisher auf theoretischen Schätzungen und einigen wenigen Pilotprojekten. Für die Kultivierung auf dem offenen Meer eignen sich Algenarten wie zum Beispiel Sargassum, die geringere Nährstoffansprüche haben und im Gegensatz zu Kelp-/Tangwäldern nicht an küstennahe Bereiche gebunden sind.[212]

Die Messbarkeit der Entnahme von CO_2 ist abhängig vom angewandten Verfahren

Die Komplexität der Ozeanumgebung (Austausch Atmosphäre/Ozean), der Mangel an Referenzwerten und die Verbundenheit mariner Ökosysteme erschweren die Zuschreibung der CO_2-Speicherung bzw. -Entnahme der Makroalgen-Kultivierung auf dem offenen Meer und die Bestimmung der Dauerhaftigkeit der CO_2-Speicherung, da Kohlenstoffaufnahme sowie Speicherform und -dauer zeitlich und räumlich voneinander getrennt sind.

Die Messung des gespeicherten Kohlenstoffs in der Makroalgen-Biomasse ist vergleichsweise einfach möglich über die Menge an Biomasse.

Bisher liegen keine spezifischen Gesetze und internationalen Abkommen für die Kultivierung von Makroalgen vor

Dennoch finden bestimmte internationale und nationale Gesetze und Abkommen darauf Anwendung. Analog zur Alkalinitätserhöhung zählen dazu das UNCLOS, das CBD, das Londoner Übereinkommen sowie das Londoner Protokoll. Das im LP verankerte Vorsorgeprinzip hat zur Folge, dass Vertragsstaaten (darunter Deutschland) keine kommerzielle Kultivierung von Makroalgen zum Zwecke der anschließenden Versenkung erlauben können. Im nationalen Recht sind gegenwärtig sowohl das kommerzielle Betreiben als auch die entsprechende Forschung für das absichtliche Versenken von Biomasse durch das HSEG verboten.

Im deutschen Recht wird die Kultivierung von Makroalgen durch das Bundeswasserstraßengesetz (2007, § 31 WaStrG) und die Wasserrechte der Länder geregelt. Das Bundeswasserstraßengesetz regelt strom- und schifffahrtspolizeiliche Genehmigungen für Aktivitäten auf Bundeswasserstraßen (§ 31 Abs. 3 WaStrG). Zusätzlich zur wasserrechtlichen Genehmigung auf Bundesebene sind Genehmigungen auf Länderebene erforderlich, wenn es sich um Küstenschutzgebiete handelt. Herausforderungen können sich zukünftig ergeben, da die Makroalgen-Kultivierung weder im Meeresraumordnungsplan für die Ostsee noch für die Nordsee erwähnt wird.[213]

---

[211] Im Rahmen der 10 Mio. t Challenge wurde errechnet, dass auf einer Fläche von 8,3 Prozent der AWZ Makroalgen angebaut werden müssten, um der Atmosphäre 10 Mio. t CO_2 zu entnehmen. Die Makroalgen würden zu Biomethan umgesetzt und dann energetisch verwertet werden mit anschließender Abscheidung und Speicherung des biogenen CO_2 (Yao, et al., 2024).

[212] (Gouvêa, et al., 2020).

[213] (Camarena-Gómez, Lähteenmäki-Uutela, & Spilling, 2022).

Für den Einsatz als Methode zur CO_2-Entnahme besteht noch grundlegender Forschungsbedarf (TRL 5 bis 6)

Offene Forschungsfragen umfassen:

- Wie lässt sich die CO_2-Entnahme zuverlässig messen und einzelnen Projekten zuordnen? Welche MRV-Systeme werden hierfür benötigt?
- Wie viel Kohlenstoff wird durch die Biomasse gebunden und wie viel Kohlenstoff geht bei dem Prozess der Kultivierung und Nutzung verloren?

4.17 Stärkung küstennaher Ökosysteme (Blue Carbon Enhancement)

Der Begriff Blue Carbon Enhancement steht für die Ausweitung küstennaher Ökosysteme. Hierzu zählen Salzmarschen, Seegraswiesen sowie Mangroven- und Tangwälder. Sie nehmen aktuell weniger als 1 Prozent der globalen Küstenfläche ein.

Die Vegetation küstennaher Ökosysteme nimmt im Zuge der Photosynthese CO_2 aus der Atmosphäre und dem Meerwasser auf und speichert den enthaltenen Kohlenstoff anschließend in oberirdischer (Halme, Blätter, Zweige) und unterirdischer Biomasse. Abgestorbene Pflanzenteile und Tierreste dieser Ökosysteme und aus anderen Land- und Meeresgebieten werden im Küstensediment eingelagert. Auch dieses Material enthält gebundenen Kohlenstoff und dessen luftdichte Einlagerung führt zur langfristigen Anreicherung von Kohlenstoff im Sediment. Auf diese Weise tragen die existierenden Meereswiesen und -wälder bereits heute sehr effizient[214] zur Verlangsamung des Klimawandels bei. Durch die Wiederherstellung verloren gegangener, die Erweiterung bestehender und die Aufforstung bislang nicht bepflanzter Flächen kann die CO_2-Entnahme von küstennahen Ökosystemen erhöht werden, insofern diese Ökosysteme geschützt und erhalten werden. In Deutschland würde sich die Stärkung küstennaher Ökosysteme vermutlich auf eine Erweiterung von Salzmarschen und Seegraswiesen fokussieren. Geforscht wird allerdings auch zu heimischen Tangwäldern.

Vegetationsreiche Küstenökosysteme bieten eine Vielzahl an Ökosystemdienstleistungen

Vegetationsreiche Küstenökosysteme filtern Krankheitserreger und überschüssige Nährstoffe aus dem Wasser. Sie stabilisieren den Meeresboden und schützen mithilfe ihres Wurzelwerks die Küsten vor Erosion. Zudem fördern sie die Biodiversität, indem sie vielen Arten Nahrung und Unterschlupf bieten, darunter auch dem Nachwuchs kommerziell wichtiger Fischarten (z. B. Hering). Beispielsweise bieten 4.000 m^2 Seegraswiese Rückzugsorte und Nahrung für etwa 40.000 Fische und rund 50 Mio. wirbellose Tiere wie Hummer, Muscheln und Garnelen. Weiterhin leisten küstennahe Ökosysteme wertvolle Dienste für die Regionen. Je nach Grad der Umsetzung kann die Ausweitung

[214] Küstennahe Ökosysteme können in Abhängigkeit vom Standort die 5- bis 30-fache Menge an Kohlenstoff im Untergrund einlagern im Vergleich zu tropischen Regenwäldern (World Ocean Review, 2024).

zur lokalen Wertschöpfung beitragen, indem Küstenökosysteme auch als touristisches Ziel genutzt werden.[215]

Dabei liegen bereits erste Erfahrungen mit der Wiederherstellung und Ausweitung vor. Ansätze zur Neuanpflanzung von Mangroven und Salzwiesen sind am weitesten fortgeschritten. Die Methoden zur Neuanpflanzung von Seegraswiesen befinden sich hingegen noch in der Entwicklung.[216] Grundsätzlich genießt der Ansatz der Wiederherstellung eine große politische und öffentliche Akzeptanz.[217]

Die größte Herausforderung ist die Messung der Menge an entnommenem CO_2

Neben begrenzten Flächen für Maßnahmen der Wiederherstellung und Aufforstung treten verschiedene Probleme bei der Kohlenstoffbilanzierung auf. Darunter fallen:

- eine hohe Variabilität und Fehleranfälligkeit bei der Messung von Kohlenstoffeinlagerungsraten,
- komplexe Kohlenstoffflüsse in das und aus dem Ökosystem (Unterscheidung zwischen lokalen und nicht lokalen Quellen),
- Veränderungen bei der Freisetzung anderer Treibhausgase (Methan und Lachgas),
- Prozesse der Karbonatbildung und -auflösung sowie
- die Anfälligkeit gegenüber menschlichen Einflüssen und dem stattfindenden Klimawandel (siehe unten).

Daraus ergeben sich hohe Unsicherheiten beim globalen Entnahmepotenzial, das mit 0,06 bis 2,21 Gigatonnen CO_2 pro Jahr angegeben wird. Aktuelle Schätzungen für Deutschland gehen von einem Potenzial von bis zu 0,1 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr aus.[218, 219]

Für ein geeignetes MRV-System muss eine klare Zunahme der CO_2-Entnahme, die durch (Wieder-)Ansiedlung erreicht würde, gegenüber einem Baseline-Szenario möglich sein. Dies erfordert eine entsprechende langfristige Überwachung. Schwierigkeiten bei der genauen Messung von Kohlenstoffaufnahme und -speicherung entstehen durch die räumliche und zeitliche Entkopplung von Produktions- und Exportprozessen. Darüber hinaus bestehen Unsicherheiten bei der Messung der CO_2-Entnahme über Satelliten.

Die Speicherdauer ist empfindlich gegenüber dem Klimawandel und anthropogenen Störungen

Grundsätzlich kann die Speicherung des Kohlenstoffs über Jahrhunderte bis Jahrtausende erfolgen. Jedoch gibt es verschiedene Faktoren, die zu einer Freigabe des gespeicherten Kohlenstoffs führen können. Dazu können der relative Meeresspiegelanstieg, die Verfügbarkeit von Sediment oder die

[215] (Kayalvizhi & Kathiresan, 2019; Castro, Pinedo, Marrugo, & Leon, 2022; Cuba, et al., 2022; Eger, et al., 2023; EMB, 2023; Bandaranayake, 1998; Theuerkauff, et al., 2020).
[216] Projekte in Deutschland:
Salzmarschen: sea4soCiety, GREENTRIALS, DFG TRG2530.
Seegraswiesen: SEASTORE, sea4soCiety.
Weitere: DEFINE II, STATUS, ARKOBI (Koplin, et al., 2024).
[217] (Hilmi, et al., 2021).
[218] Experteneinschätzung im Rahmen eines Workshops der LNe am 02.07.2024.
[219] (Williamson & Gattuso, 2022).

Temperatur zählen. Diese Faktoren beeinträchtigen nicht nur die Fähigkeit der Ökosysteme zur weiteren Kohlenstoffspeicherung, sondern fördern auch die Freisetzung von bereits gespeichertem Kohlenstoff aus Sediment und Biomasse.

In den vergangenen 100 Jahren hat sich die Fläche küstennaher Ökosysteme bereits erheblich verringert.[220] Die Abholzung von Mangroven hat weltweit von 2000 bis 2015 zur Freisetzung von 30 bis 120 Mio. Tonnen eingelagertem Kohlenstoff in Form von 110 bis 450 Mio. Tonnen CO_2 in die Atmosphäre geführt.[221]

Im bestehenden Rechtsrahmen gibt es Widersprüche zwischen Naturschutz und Klimaschutz

Feuchtgebiete wie beispielsweise Salzmarschen fallen auf internationaler Ebene unter die Berner Konvention[222] sowie die Ramsar-Konvention bei Anerkennung als Ramsar Sites[223]. Auf europäischer Ebene zielt die Verordnung über die Wiederherstellung der Natur (Nature Restoration Law, NRL) darauf ab, degradierte Ökosysteme, einschließlich mariner und küstennaher Systeme, bis 2050 wiederherzustellen. Deutschland ist verpflichtet, Salzmarschen gemäß Anhang I, Gruppe I (Feuchtgebiete) der EU-Verordnung zur NRL wiederherzustellen.[224] Weiterhin ist Deutschland verpflichtet, Seegraswiesen gemäß Anhang II, Gruppe 1 und marine Sedimente gemäß Anhang II, Gruppe 7 (Weichsedimente) wiederherzustellen.[225] Bis Mitte 2026 muss Deutschland seinen Entwurf des Wiederherstellungsplans für die Natur der EU-Kommission vorlegen. Das ANK wird diese Maßnahmen unter Federführung des BMUKN umsetzen. Weiterhin werden die Ökosysteme bei der Umsetzung der zukünftigen Nationalen Meeresstrategie (NMS) berücksichtigt. In Deutschland und der EU

[220] Mangroven: Verlustrate 35 bis 50 Prozent der Ursprungsfläche, Salzmarschen: Verlustrate 25 bis 50 Prozent der Ursprungsfläche, Seegraswiesen: Verlustrate 29 Prozent der Ursprungsfläche im Zeitraum von 1879 bis 2006, Tangwälder: Verlustrate 40 bis 60 Prozent (CDRmare, 2024).
[221] (World Ocean Review, 2024).,
[222] Übereinkommen über die Erhaltung der europäischen wildlebenden Pflanzen und Tiere und ihrer natürlichen Lebensräume.
[223] Übereinkommen über den Schutz von Feuchtgebieten, insbesondere als Lebensraum für Wasser- und Watvögel, von internationaler Bedeutung.
[224] Bis 2030 muss Deutschland die folgenden Maßnahmen gemäß Anhang I umsetzen: Wiederherstellung von 30 Prozent der Gesamtfläche aller Lebensraumtypen, die sich nicht in gutem Zustand befinden, um sie in einen guten Zustand zu bringen. Erfassung des Zustands von 90 Prozent der Flächen, die über alle Lebensraumtypen hinweg unter Anhang I aufgeführt sind, um ihren Zustand besser zu bewerten und geeignete Maßnahmen zu planen. Wiederherstellung von 30 Prozent zusätzlicher Flächen, um Lebensraumtypen wiederherzustellen und das Ziel einer günstigen Referenzfläche zu erreichen. Verhinderung der Verschlechterung von Lebensräumen, die sich bereits in gutem Zustand befinden, um den langfristigen Schutz dieser Flächen zu gewährleisten. Priorisierung von Flächen innerhalb von Natura-2.000-Gebieten bis 2030, um die Schutz- und Wiederherstellungsmaßnahmen in besonders wertvollen Gebieten zu fokussieren.
[225] Die spezifischen Anforderungen umfassen: Wiederherstellung von 30 Prozent der Gesamtfläche aller Lebensraumtypen gemäß Anhang II, Gruppen 1–6, die sich nicht in gutem Zustand befinden, um sie in einen guten Zustand zu bringen. Erfassung des Zustands von 50 Prozent der Flächen, die über alle in Anhang II aufgeführten Lebensraumtypen verteilt sind, um ihren Zustand zu bewerten und gezielte Maßnahmen zu planen. Wiederherstellung von 30 Prozent zusätzlicher Flächen innerhalb jeder Kategorie der Gruppen 1–6, um Lebensraumtypen wiederherzustellen und das Ziel einer günstigen Referenzfläche zu erreichen. Verhinderung der Verschlechterung von Lebensräumen gemäß Anhang II, die sich bereits in gutem Zustand befinden, um ihren langfristigen Schutz zu gewährleisten.

werden Salzmarschen bereits als wichtige und geschützte Lebensraumtypen anerkannt, beispielsweise im Rahmen der EU-Meeresstrategierahmenrichtlinie (EU Marine Strategy Framework Directive) und der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie.[226, 227]

Inwiefern Maßnahmen zur Stärkung küstennaher Ökosysteme als Einbringen im Sinne des HSEG gelten, hängt davon ab, ob sie als „Maßnahmen des Naturschutzes" qualifiziert werden. Bei einer entsprechenden Einschätzung wäre die Ausnahmevorschrift des § 3 Abs. 1 Satz 2 HSEG anwendbar und es läge kein Einbringen im Sinne des HSEG vor. Jedoch ist offen, ob es sich bei Maßnahmen zur Stärkung küstennaher Ökosysteme um Maßnahmen des Naturschutzes im Sinne von § 3 Abs. 1 Satz 2 HSEG handelt. Dies hängt von den spezifischen Umständen ab, unter denen die betreffenden Vorhaben durchgeführt werden. Ist beispielsweise die zu verwendende Seegras- oder Makroalgenart am vorgesehenen Standort nicht heimisch, kann das Vorhaben vor dem Hintergrund von Art. 8 lit. h des CBD, der EU-Verordnung über invasive gebietsfremde Arten sowie § 40a BNatSchG nicht als Naturschutzmaßnahme angesehen werden. Darüber hinaus müssen dergleichen Vorhaben in jedem Fall mit den Zielen des Naturschutzes im Sinne von § 1 BNatSchG kompatibel sein sowie den Anforderungen der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie entsprechen, die mit §§ 31–36, 44 und 56–58 BNatSchG in deutsches Recht umgesetzt wurden.

Weiterhin fallen Maßnahmen der Stärkung küstennaher Ökosysteme in den Geltungsbereich der Küstenbundesländer wie Schleswig-Holstein oder Niedersachsen und es existieren darüber hinaus spezifische Gesetze für den Schutz und die Nutzung von Küsten. Bei der Umsetzung von Maßnahmen nehmen Nationalparkgesetze (z. B. für Wattenmeer-Nationalparks in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Hamburg) eine wichtige Rolle ein, da Renaturierungsmaßnahmen mit den Schutzzielen des jeweiligen Nationalparks übereinstimmen müssen. Dies kann im Widerspruch zu einer Erweiterung von küstennahen Ökosystemen stehen. Zur Verbesserung der Verwaltung von Meeresfragen in den fünf Küstenbundesländern wurde 2012 die Bund-Länder-Arbeitsgruppe Nord- und Ostsee (BLANO) eingerichtet.[228]

Projekte können bereits im Rahmen des ANK gefördert werden

Im ANK können Projekte zum Meeres- und Küstenschutz eine Förderung erhalten. Das ANK sieht die Identifizierung von marinen Gebieten mit kohlenstoffreichen Sedimenten sowie die Entwicklung eines möglichen rechtlichen Rahmens für die zukünftige Ausweisung von Klimaschutzgebieten vor. Weiterhin besteht die Möglichkeit der Förderung im Rahmen der GAK im Förderbereich Küstenschutz, insbesondere im Bereich der Salzmarschrenaturierung.

Trotz jahrelanger Forschung verbleibt ein hoher Forschungsbedarf[229] in Deutschland (TRL 6 bis 9)

Offene Forschungsfragen umfassen:

[226] Salzmarschen: Habitattypen 1310, 1320, 1330 gemäß Richtlinie 92/43/EWG.
[227] (Koplin, et al., 2024).
[228] (Koplin, et al., 2024).
[229] Seegraswiesen: TRL 6 bis 9, Mangroven: TRL 9, Tangwälder: TRL 8 bis 9.
Experteneinschätzung im Rahmen eines Workshops der LNe am 02.07.2024. Der TRL variiert in Abhängigkeit von den Erfahrungen vor Ort.

- Wie können die Bilanzierung und Überwachung bezüglich der CO_2-Aufnahme und -Abgabe sowie der Kohlenstoffeinlagerung im Meeresboden erfolgen?
- Wie kann die Resilienz von bestehenden und renaturierten küstennahen Ökosystemen gegenüber der rapide fortschreitenden Klima- bzw. Ozeanerwärmung erhöht werden?
- Wie kann eine Skalierung der Ausweitung und Wiederherstellung erfolgen in Bezug auf rechtliche und planerische sowie methodische Aspekte? Welche Daten und Technologien werden benötigt, um die Flächenentwicklung zu monitoren?
- Unter welchen Bedingungen würde die Küstenbevölkerung Maßnahmen des Blue Carbon Enhancement umsetzen und mittragen?

5 Bedarfe und Potenziale der CO_2-Entnahme

Für die Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) wurde eine Modellierung von Transformationspfaden zur Treibhausgasneutralität, zum Beitrag von CO_2-Entnahmemethoden sowie zur Perspektive für die Zeit nach 2045 durchgeführt. Zielsetzung der Modellierung war es, über eine Bandbreite von Szenarien die jeweils zu erwartenden Restemissionen und die Rolle von Negativemissionen zu untersuchen sowie Aussagen über die Auswirkungen, den Ressourcenbedarf und die Kosten dieser Pfade zu ermitteln. Die Ergebnisse sind damit auch eine Informationsbasis für die Zielsetzung technischer Senken für die Zieljahre 2035, 2040 und 2045. Darüber hinaus wird in der Modellierung ein Blick auf den Zeitraum bis 2060 geworfen, in dem Deutschland insgesamt netto-negative Treibhausgasemissionen erreichen soll.

5.1 Modellierungsdesign und Ergebnisse in den Sektoren

Für die Sektoren LULUCF, Landwirtschaft und Industrie sowie für thermische Abfallbehandlungsanlagen (TAB-Anlagen) wurden mehrere Transformationspfade modelliert. Für die nicht modellierten Sektoren wurden exogene Annahmen aus Mittelwerten von bestehenden THG-Neutralitätsszenarien gesetzt.[230] Es wurden drei Szenarien betrachtet (siehe Abbildung 4), die alle Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 erreichen und die in diesem Jahr die folgenden Restemissionen haben:

- LNe-Basisszenario (LNe95): 4,6 Prozent an Restemissionen gegenüber 1990 231 (57 Mio. Tonnen CO_2äq). LNe95 ist im Mittelfeld bestehender THG-Neutralitätsszenarien verortet.
- Szenario LNe93: 7,5 Prozent (94 Mio. Tonnen CO_2äq) an Restemissionen.
- Szenario LNe97: 3,2 Prozent an Restemissionen (41 Mio. Tonnen CO_2äq).

In Sensitivitäten werden unterschiedliche Ausprägungen von klima- und witterungsbedingten Störungen für den Wald und ihr erheblicher Einfluss auf die Kohlenstoffbindung im LULUCF-Sektor abgebildet. Das hat Auswirkungen auf das Biomasseaufkommen sowie den Bedarf und die Potenziale von Negativemissionen. Für alle Szenarien und Sensitivitäten werden „CDR-Portfolios" abgeleitet. Netto-THG-Neutralität ab 2045 wird dabei immer erreicht. Über eine Impact-Analyse werden die jeweiligen CDR-Portfolios bewertet (Energiebedarfe, Kosten etc.).

Anmerkung: Die Zuordnung einzelner CO_2-Entnahmemethoden in der Modellierung weicht von der tatsächlich zu erwartenden Zuordnung zu den Zielen nach §§ 3a und 3b KSG ab. Im Verständnis der Modellierung umfasst der LULUCF-Sektor ausschließlich diejenigen Senken, die auch bisher bereits im THG-Inventar berichtet werden (d. h. natürliche Senken). Folglich wurden neuartige Senken wie Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle und beschleunigte Verwitterung nicht im LULUCF-Sektor modelliert, sondern gemeinsam mit den technischen Senken im Sinne des Ziels nach § 3b KSG (siehe Kapitel 6.3.3) erfasst. In der Beschreibung der Modellierung ist daher von neuartigen

[230] Es wurden die Szenarien Klimapfade 2.0 des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI), Klimaneutrales Deutschland 2045 von Agora, die dena-Leitstudie (KN100), die BMWK-Langfristszenarien III (T45-Strom), Ariadne (REMIND-Mix), UBA Rescue GreenSupreme sowie „Neue Ziele auf alten Wegen?" des Forschungszentrums Jülich berücksichtigt. Die ausgewiesenen Trends wurden bis 2060 fortgeschrieben.

[231] Immer als Summe der Brutto-Emissionen aller Sektoren außer LULUCF.

Senken die Rede; modelliert wurden BECCS, BECCU, DACCS, DACCU, Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle, beschleunigte Verwitterung, stoffliche Biomassenutzung.

In Kapitel 5 ist somit bei der Beschreibung des LULUCF-Sektors nur das eingeschränkte Sektorverständnis gemeint. Die Begriffe "natürliche Senken" und "neuartige Senken" werden in diesem Kapitel wie im Definitionskapitel erläutert verwendet.

Tabelle 2 Analysierte Szenarien und Sensitivitäten (Prognos/Öko-Institut, 2024)

Szenario	LULUCF	Landwirtschaft	Biomasse	Industrie	CDR-Portfolio
LNe93	Wald: Basis LULUCF-Ziele erfüllt	modelliert	modelliert	modelliert	P1
LNe95		modelliert	modelliert	modelliert	P2
LNe97		modelliert	modelliert	modelliert	P3
LNe93-S-ZE	Wald: hohe natürliche Störungen (S) LULUCF-Ziele erfüllt (ZE) durch „Anschärfen“	wie LNe93	modelliert	wie LNe93	P4
LNe95-S-ZE		wie LNe95	modelliert	wie LNe95	P5
LNe97-S-ZE		wie LNe97	modelliert	wie LNe97	P6
LNe93-S-ZV	Wald: hohe natürliche Störungen (S) LULUCF-Ziele verfehlt (ZV)	wie LNe93	wie LNe93	wie LNe93	P7
LNe95-S-ZV		wie LNe95	wie LNe95	wie LNe95	P8
LNe97-S-ZV		wie LNe97	wie LNe97	wie LNe97	P9

Eigene Darstellung. Varianten = THG-Minderungsambition, Sensitivitäten = Störungen im Wald.
Prognos/Öko-Institut (2024)

Der größte Anteil der Restemissionen entfällt auf die Landwirtschaft

Die Brutto-THG-Emissionen entwickeln sich vor allem ab 2030 in den Szenariovarianten unterschiedlich. Es kommt 2045 zu Restemissionen von insgesamt rund 41, 57 bzw. 94 Mio. Tonnen CO_2äq in den Szenarien LNe97, LNe95 bzw. LNe93, davon ist der Großteil mit 30, 34 bzw. 36 Mio. Tonnen CO_2äq der Landwirtschaft zuzuordnen (siehe Abbildung 4). Für diese Emissionen aus natürlichen biochemischen Prozessen sind die technischen Minderungspotenziale eingeschränkt.

Im Basisszenario LNe95 werden Emissionen in der Landwirtschaft um knapp 60 Prozent gemindert. Wie heute stammen die verbleibenden Emissionen vor allem aus der Tierhaltung (Verdauung und Exkremente) und aus der Stickstoffdüngung der Böden. Es wird angenommen, dass bis ins Jahr 2045 technische Minderungen angewendet werden. Dazu zählt der Einsatz von Zusatzstoffen – Methaninhibitoren für die Fütterung und Nitrifikationsinhibitoren im Bereich der mineralischen und

organischen Düngung[232] – ebenso wie investive Maßnahmen. Das sind zum Beispiel emissionsarme Ställe, die gasdichte Lagerung und Ausbringung der Tierexkremente und Energiespartechniken. Analog zu den anderen Sektoren findet der Wechsel auf regenerative Energieträger statt. Zusätzlich sind Veränderungen in der Produktionsstruktur notwendig, um die THG-Emissionen im dargestellten Umfang zu verringern. Hierfür werden mehr Flächen extensiv genutzt durch Agroforst, Ökolandbau und Paludikulturen an wiedervernässten Moorstandorten. Außerdem wird die Zahl der Nutztiere, insbesondere der Milchkühe und Rinder, verringert. Auf diese Weise verändert sich der Sektor zugunsten pflanzlicher Produktion. Zugleich werden weniger klassische Ackerkulturen (z. B. Raps und Mais) und dafür mehr Holz und Paludikulturen für die stoffliche und energetische Verwendung angebaut.

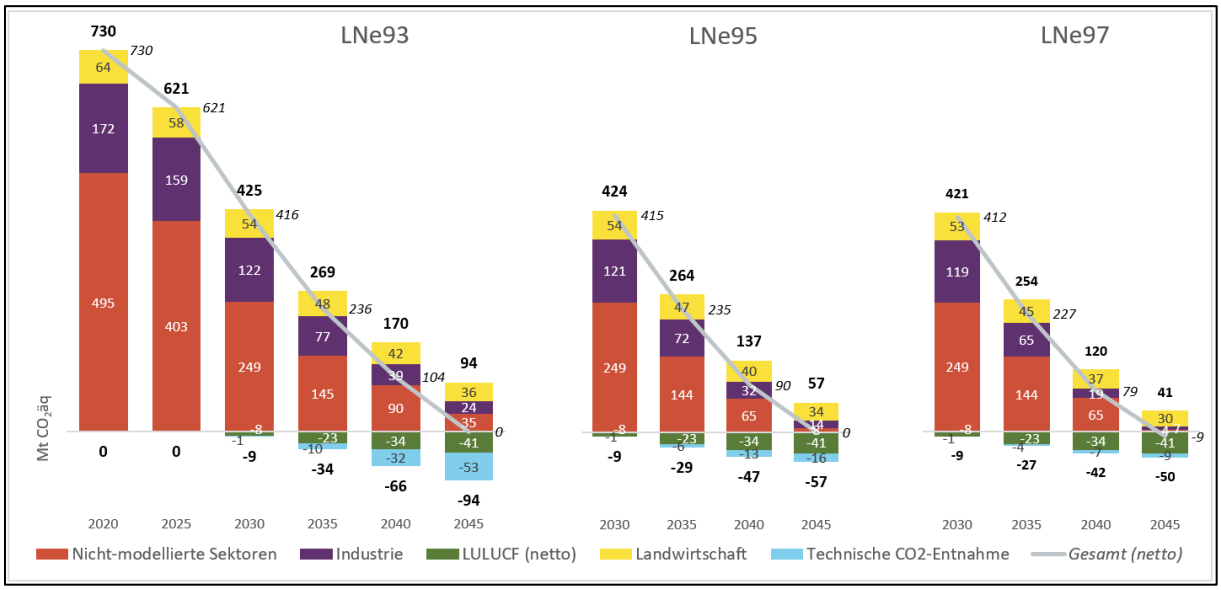


Abbildung 4 THG-Emissionen nach Sektoren und Negativemissionen bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024) Die graue Linie zeigt die Gesamtemissionen (netto) nach Abzug der Negativemissionen an.

Weitere Restemissionen stammen vor allem aus nicht vermeidbaren Prozessemissionen in der Industrie

Im Industriesektor entstehen im Jahr 2045 7, 14 bzw. 24 Mio. Tonnen CO_2äq an Restemissionen. Unterstellt wird eine umfassende energetische und stoffliche Defossilisierung. Elektrifizierung wird in der Breite umgesetzt, Biomasse wird im Rahmen des (modellierten) Angebots im jeweiligen Szenario eingesetzt. Restemissionen stammen vor allem aus der weiteren Nutzung nicht erneuerbarer Abfälle (speziell als Brennstoff in der Zementindustrie). Wasserstoff dient an wenigen Stellen als Ergänzung (Stahl, Chemie, Mineralien). Verbleibende fossile Emissionen in der Zement- und Kalkindustrie werden zu einem Großteil mittels CO_2-Abscheidung gemindert. Trotzdem kommt es in eini-

[232] Methaninhibitoren hemmen die Bildung von Methan im Darm, Nitrifikationsinhibitoren hemmen die Oxidation von Ammoniumionen im Boden; durch beide können THG-Emissionen (v. a. CH_4 und N_2O) gemindert werden.

gen Branchen zu relevanten Restemissionen, insbesondere bei Prozessemissionen. Transformationspfade auf unter 10 Mio. Tonnen CO_2äq[233] sind speziell bis 2045 (LNe97) nur durch sehr ambitionierte Emissionsminderungen in allen Bereichen erreichbar.

In den nicht modellierten Sektoren (Gebäude, Verkehr, Energiewirtschaft) verbleibt lediglich in Szenariovariante LNe93 eine signifikante Menge an Restemissionen.

Bis 2060 sinken die Restemissionen weiter auf insgesamt 33 bis 54 Mio. Tonnen CO_2äq. Der überwiegende Teil davon ist der Landwirtschaft zuzurechnen (90 bis 64 Prozent).

5.2 Modellierungsergebnisse und Schlussfolgerungen

Bedarf an Negativemissionen liegt zwischen 40 und 94 Mio. Tonnen CO_2äq

Der gesamte Bedarf an Negativemissionen zum Erreichen von THG-Neutralität für 2045 ergibt sich aus den Restemissionen von ca. 41, 57 bzw. 94 Mio. Tonnen CO_2äq. Falls der LULUCF-Sektor (in diesem Kapitel wie oben beschrieben definiert als natürliche Senken) das gesetzte Ziel von rund 40 Mio. Tonnen CO_2äq Netto-Negativemissionen im Jahr 2045 erreicht, besteht ein Bedarf an neuartigen Entnahmen von 17 Mio. Tonnen CO_2 in LNe95 und 54 Mio. Tonnen CO_2 in LNe93. Trotz eines annähernden bilanziellen Null-Bedarfs in LNe97[234] werden gewisse Mengen an Negativemissionen durch BECCS als Nebeneffekt der CO_2-Abscheidung in den TAB-Anlagen sowie in der Zement- und Kalkproduktion erzeugt, wodurch in dieser Szenariovariante im Jahr 2045 bereits Netto-Negativität in Höhe von rund -9 Mio. Tonnen CO_2äq erreicht wird. Im Ergebnis liegen die zwischen 2025 und 2045 kumulierten Netto-THG-Emissionen in LNe97 um über 200 Mio. Tonnen CO_2äq niedriger als in LNe93.

Die Zielerreichung des LULUCF-Sektors ist herausfordernd und erfordert große Ambitionen

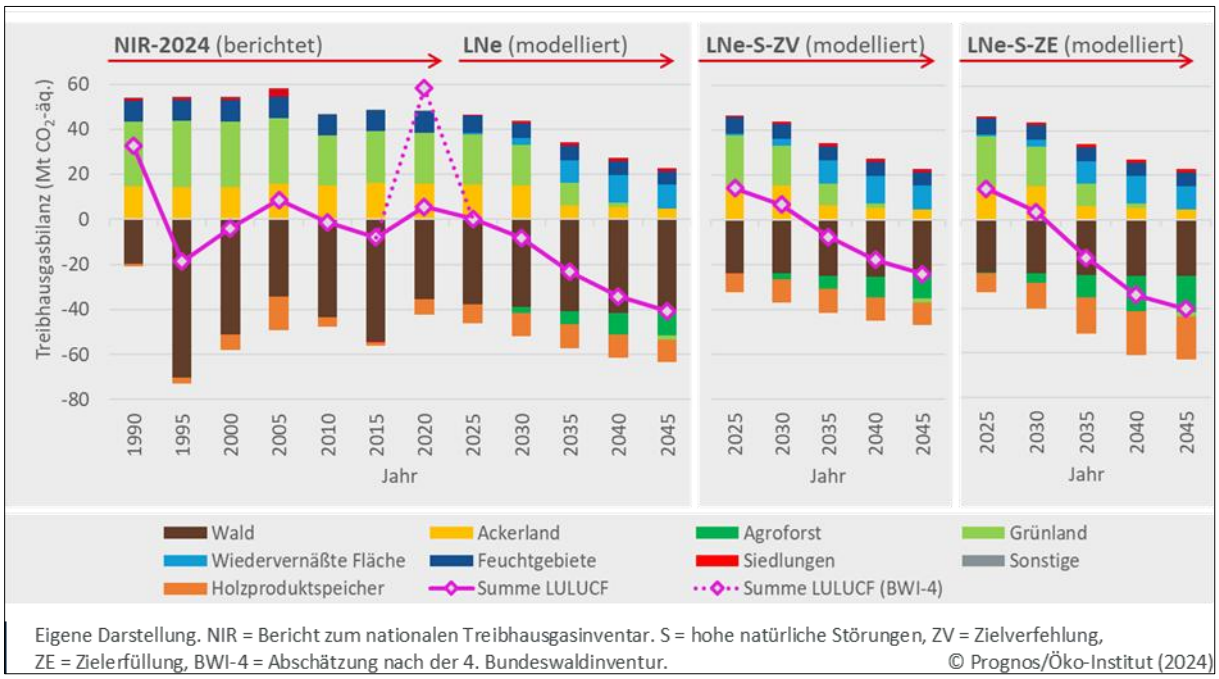
Die Zielerreichung im LULUCF-Sektor hat eine doppelte Bedeutung: Zum einen hat der Sektor durch seine hohen derzeitigen Emissionen und das Potenzial für natürliche Senken einen erheblichen Einfluss auf die Emissionsbilanz. Zum anderen ist eine Transformation des LULUCF-Sektors eine wichtige Determinante der Flächen- und Biomasseverfügbarkeit, die für viele Entnahmemethoden begrenzende Faktoren darstellen.

Im LULUCF-Sektor werden die THG-Emissionen (Quellen) sowie die CO_2-Einbindungen (Senken) der Landfläche in Deutschland bilanziert. Dabei werden Flächenkategorien wie Wald, Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen unterschieden (siehe Abbildung 5). Die Emissionen trockengelegter Moore (hauptsächlich in Ackerland und Grünland geführt) sind dabei die größte

[233] 4 bis 5 Mio. Tonnen CO_2äq entsprechen 1,5 Prozent an Restemissionen im Industriesektor gegenüber 1990 und bilden das Minimum der bestehenden THG-Neutralitätsszenarien.

[234] In LNe97 stehen 41 Mio. Tonnen CO_2äq an Restemissionen einer LULUCF-Senkenleistung von -41 Mio. Tonnen CO_2äq gegenüber. In LNe97-S-ZE beträgt die LULUCF-Senkenleistung hingegen nur 40 Mio. Tonnen, wodurch ein geringer Bedarf von 1 Mio. Tonnen an technischen Senken entsteht.

Emissionsquelle, der Wald ist die wesentliche Senke des Sektors. Zudem wird der Holzproduktespeicher dem LULUCF-Sektor zugerechnet. Die Entwicklung dieses Kohlenstoffpools ist durch Zuflüsse in Form neuer Holzprodukte und Abflüsse wie Altholz (etwa zur Verbrennung) geprägt.



Eigene Darstellung. NIR = Bericht zum nationalen Treibhausgasinventar. S = hohe natürliche Störungen, ZV = Zielverfehlung, ZE = Zielerfüllung, BWI-4 = Abschätzung nach der 4. Bundeswaldinventur. © Prognos/Öko-Institut (2024)

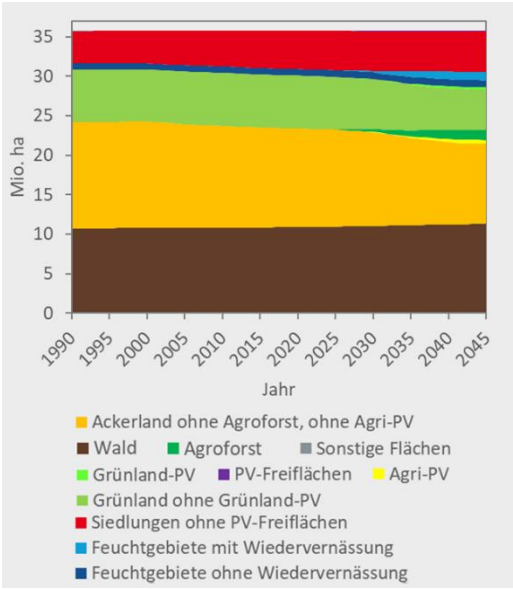
Abbildung 5 THG-Emissionsbilanz im LULUCF-Sektor bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024)

In allen drei Szenariovarianten ist die Grundannahme, dass die LULUCF-Ziele im KSG für die Jahre 2040 von -35 Mio. Tonnen CO_2äq und 2045 von -40 Mio. Tonnen CO_2äq erreicht werden (siehe Abbildung 5, links). Hierzu ist ein ambitionierter Moorbodenschutz nötig, um die THG-Emissionen für Acker- und Grünland zu mindern. Es bleiben aber Restemissionen auf wiedervernässten Flächen. Die nötigen Negativemissionen zur Erreichung der LULUCF-Ziele werden durch den Gehölzaufwuchs auf Agroforstflächen, die verstärkte Nutzung von langlebigen Holzprodukten und die Stabilisierung der CO_2-Einbindungen auf der Waldfläche erreicht.

In den modellierten Szenarien werden in den Sensitivitäten LNe-S hohe Störungen (S) im Wald abgebildet, um Unsicherheiten in der Waldentwicklung zu analysieren. Um die KSG-Ziele für LULUCF 2040 und 2045 dennoch zu erreichen (Zielerfüllung, ZE), wird bei LNe-S-ZE der Holzproduktespeicher weiter ausgebaut, es werden weniger Gehölze auf Agroforstflächen geerntet und die Holzentnahme in Laubbaumbeständen wird weiter verringert (siehe Abbildung 5, rechts). Dies setzt eine extrem ambitionierte Ausgestaltung von Klimaschutzmaßnahmen voraus. Bei LNe-S-ZV (Zielverfehlung) wird angenommen, dass dies nicht ausreichend gelingt, sodass es unter den Annahmen zu

einer Zielverfehlung (ZV) des LULUCF-Sektors von ca. 17 Mio. Tonnen CO_2äq im Jahr 2045 kommt (siehe Abbildung 5, Mitte).[235]

Maßnahmen	2030	2045
Moorbodenschutz		
- Wiedervernässung	15%	87%
- Optimierung Feuchtgebiete	80%	100%
- Einstellung Torfabbau	50%	100%
Agroforst		
- Fläche (kumulativ, kha)	325	1.240
- Ernterate	60%	60%
Zusätzlicher Zufluss zum Holzproduktspeicher (Mio. m³)	4,5	7,0
Wald		
- Laubholzentnahme reduziert	-2,0	-5,0
- Störungsintensität	mS	mS
Grünland (mineralische Böden)	erhalten	
Netto-Flächenverbrauch Siedlungen	2030: 30 ha/Tag 2050: 0 ha/Tag	



Eigene Darstellung.
LNe-S-ZV: hohe Störungen (S) statt mittlere Störungen im Wald
LNe-S-ZE: hohe Störungen (S), 10% Ernterate Agroforst, Zufluss zum Holzproduktspeicher von 6 und 20 Mio. m³ in 2030 und 2045

© Prognos/Öko-Institut (2024)

Abbildung 6 Modellannahmen für LULUCF und Entwicklung der Flächenkulisse für LNe (Basis) bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024)

Die Modellierung berücksichtigt die Ergebnisse der 4. Bundeswaldinventur.[236] Als methodische Verbesserungen weist das vorläufige THG-Inventar für das Jahr 2025 erstmals THG-Emissionen zu Mineralböden unter Acker- und Grünland aus.[237] Diese liegen in der Größenordnung von 10 Mio. Tonnen CO_2äq und müssen bei der Interpretation der LULUCF-Ergebnisse berücksichtigt werden.

Biomasse spielt als zunehmend knappe Ressource eine bedeutende Rolle bei der Defossilisierung sowie zur Erzielung von Negativemissionen

Biomasse spielt als erneuerbare Rohstoffbasis und – am Ende der Nutzungskaskade – Energiequelle eine wichtige Rolle für das Erreichen von THG-Neutralität. Darüber hinaus ist die Kohlenstoffbindung in Biomasse die Voraussetzung für alle natürlichen und für einen Teil der neuartigen Entnahmemethoden. Angebot und Nachfrage der energetisch nutzbaren Biomasse (inklusive stofflicher Nutzung in Industrieprozessen) sind für LNe95 in Abbildung 7 dargestellt. Das Biomasseangebot für die Nachfragesektoren wird über die Sektor-Modellierung für LULUCF, Landwirtschaft sowie Rest- und Abfallstoffe errechnet. In allen Szenarien nimmt das Angebot bis 2045 deutlich ab und

[235] Wie oben beschrieben beziehen sich diese Zahlen nur auf natürliche Senken.
[236] Siehe auch (Öko-Institut, 2024).
[237] (Thünen-Institut, 2025).

bleibt danach bis 2060 etwa konstant. In den LNe- und LNe-S-ZV-Szenarien liegt das energetisch nutzbare Biomasseangebot im Jahr 2045 bei rund 240 TWh. In den LNe-S-ZE-Szenarien wird vermehrt Biomasse im LULUCF-Sektor benötigt, um natürliche CO_2-Entnahmen auszubauen. Entsprechend nimmt das Biomassepotenzial in den LNe-S-ZE-Szenarien für das Jahr 2045 auf ca. 180 TWh ab. Beispielsweise fließt in LNe95-S-ZE mehr Holz im Umfang von 28 TWh in Holzprodukte als in LNe95.

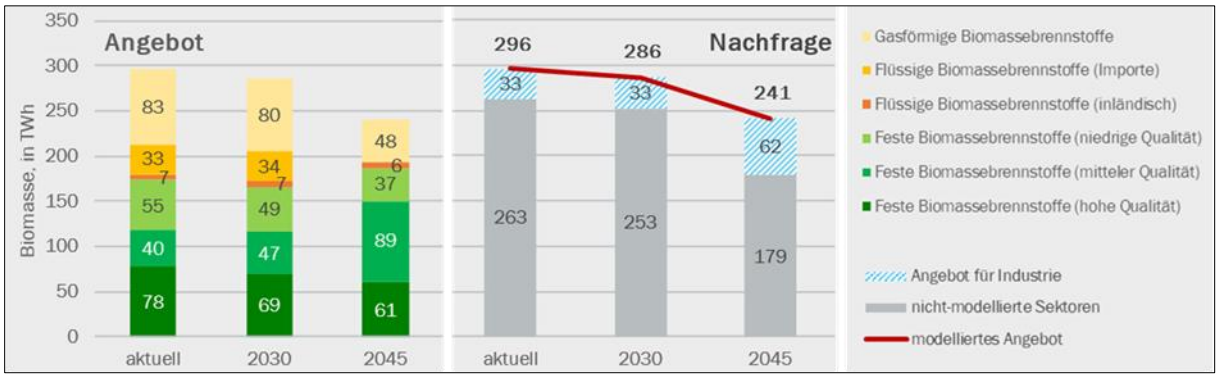


Abbildung 7 Energetisch nutzbare Biomasse (Angebot und Nachfrage, exklusive Exporte) für LNe95 bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024)

Biomasse wird von allen Sektoren nachgefragt. Die Nachfrage der nicht modellierten Sektoren wird über Mittelwerte der bestehenden THG-Neutralitätsszenarien berücksichtigt. Sie nimmt im Mittel der Studien bis 2045 deutlich ab. Nach Abzug vom modellierten Angebot ergibt sich ein Restangebot für die Industrie. Es nimmt in Zukunft trotz insgesamt geringerem Angebot zu. Viele der THG-Neutralitätsstudien bilden eine vergleichbare Verschiebung der Biomassenutzung ab. Die im Industriesektor genutzte Biomasse wird strukturell anhand der aktuellen Nutzung fortgeschrieben, wobei sich mit der angenommenen Transformation Verschiebungen ergeben – unter anderem verstärkte stoffliche Nutzung und Einsatz in Bereichen, in denen Negativemissionen erzeugt werden können. In LNe95 werden 2045 über 40 TWh an Biomasse für neuartige Senken (Bioenergie mit Carbon Capture and Utilisation/Storage (BECCU/S), stoffliche Nutzung) eingesetzt, davon knapp 10 TWh für die direkte stoffliche Nutzung.[238]

Zur Deckung des Bedarfs an Negativemissionen ist ein Portfolio verschiedener Entnahmemethoden erforderlich

Alle Methoden weisen spezifische Herausforderungen und Potenzialgrenzen auf, weshalb die Zielerreichung immer ein Portfolio verschiedener Entnahmemethoden benötigt. In der Modellierung werden daher aus den einzelnen Szenarien und Sensitivitäten jeweils Portfolios zusammengestellt. So ergeben sich insgesamt neun Bilder zu Negativemissionen (siehe Abbildung 8), die unter anderem aus der angenommenen Höhe der Restemissionen, den Szenariorahmen sowie den Potenzialgrenzen für die unterschiedlichen Entnahmemethoden resultieren.

[238] Durch ein Mehrangebot an Biomasse werden in LNe93 bis zu 11 TWh zur Pflanzenkohle-Produktion aufgewendet.

Die Szenarien und Sensitivitäten spannen für 2045 eine Bandbreite an Negativemissionen zwischen 41 und 94 Mio. Tonnen CO_2äq auf (siehe Abbildung 8). Davon werden 9 bis 70 Mio. Tonnen CO_2äq über neuartige Entnahmemethoden gedeckt.

Die Entwicklung des Portfolios der CO_2-Entnahmemethoden sollte so erfolgen, dass die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Methoden wie Dauerhaftigkeit, Effizienz und Kosten gegeneinander abgewogen werden. Kombiniert man verschiedene Verfahren, lassen sich Synergien nutzen und Risiken, die mit der Abhängigkeit von einer einzelnen Entnahmemethode einhergehen, minimieren. Dies soll durch eine technologieoffene Zielsetzung sowie teilweise technologiespezifische Förderinstrumente erreicht werden, um sowohl neue Technologien anzureizen als auch eine kosteneffiziente Gesamtzielerreichung zu ermöglichen. Auch für die weitere Skalierung zu einer netto-negativen THG-Bilanz ist ein Portfolio an Entnahmemethoden zielführend.

Der Bedarf an technischen Senken ist in den Szenarien unmittelbar abhängig von der Emissionsminderung in den einzelnen Sektoren und der Bilanz des LULUCF-Sektors

In den Szenarien werden unterschiedliche Mengen an Restemissionen modelliert. Die nach Abzug des LULUCF-Sektors verbleibende Lücke zur THG-Neutralität wird durch eine entsprechende Menge neuartiger Entnahmemethoden geschlossen. Im LULUCF-Sektor[239] wurde so modelliert, dass das im KSG vorgegebene Sektorziel von rund -40 Mio. Tonnen CO_2äq im Jahr 2045 erreicht wird. Werden im Wald hohe natürliche Störungen als Risiko abgebildet und keine weiteren Maßnahmen modelliert (Zielverfehlung), reduziert sich die Netto-Einbindung des LULUCF-Sektors im Modell von -41 auf -24 Mio. Tonnen CO_2äq.

Infolgedessen besteht in den LNe-S-ZV-Szenariovarianten ein Mehrbedarf an neuartigen Entnahmemethoden. So verdoppelt sich deren Umfang von LNe95 zu LNe95-S-ZV von 16 auf 33 Mio. Tonnen CO_2, wovon 17 Mio. Tonnen CO_2äq durch DACCS erbracht werden.

Die höchste Menge an neuartigen Entnahmen wird mit -70 Mio. Tonnen CO_2äq in LNe93-S-ZV benötigt (davon DACCS: 34 Mio. Tonnen). Auch biobasierte Entnahmemethoden (BECCS, BECCU, stoffliche Nutzung, Pflanzenkohle) tragen mit zwischen 9 und 30 Mio. Tonnen CO_2äq wesentlich zum Realisieren der unterstellten Mengen an CO_2-Entnahme bei, größtenteils durch Abscheidung von biogenem CO_2 in Bereichen mit schwer vermeidbaren Emissionen (Zement, Kalk, TAB). Der Umfang biobasierter Entnahmen ist vor allem abhängig vom Biomasseangebot und der Art der Biomassenutzung in den Sektoren.

[239] Wie oben beschrieben bezieht sich diese Angabe nur auf natürliche Senken.

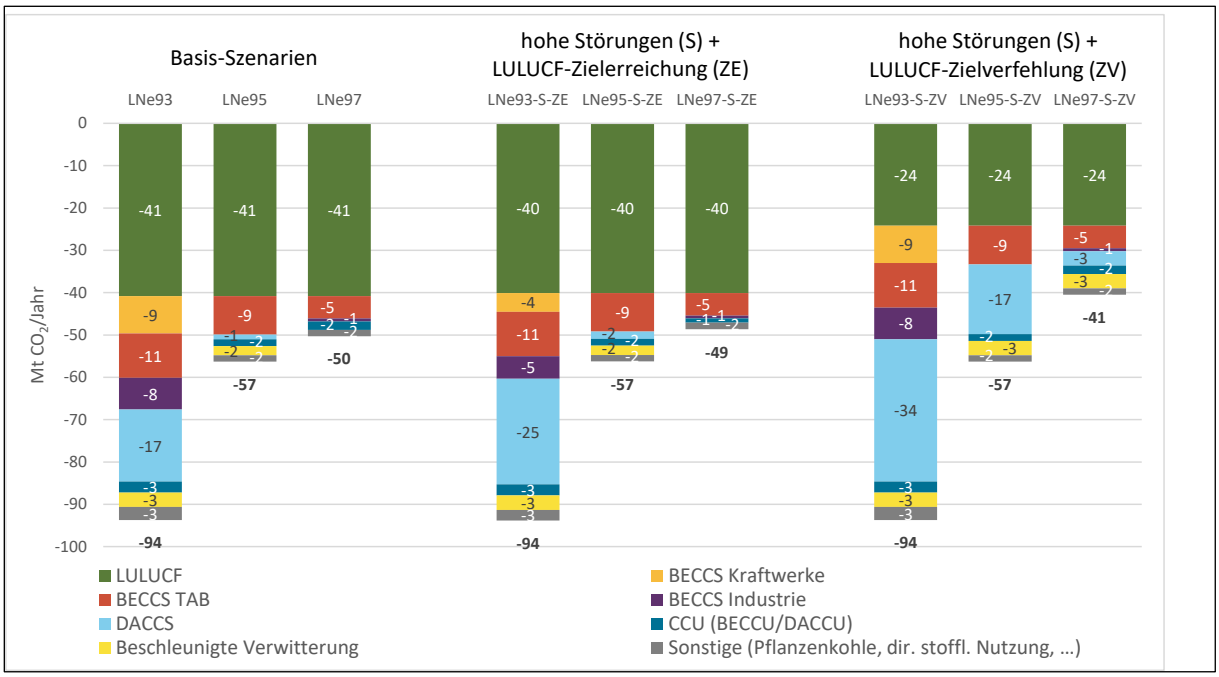


Abbildung 8 CDR-Portfolios nach Optionen für das Jahr 2045 (Prognos/Öko-Institut 2024)

Im Falle hoher Störungen (S) reduziert sich die jährliche Kohlenstoffbindung im Wald auf rund 24 Mio. Tonnen CO_2äq. Um die KSG-Ziele dennoch zu erreichen, wird dies vor allem über sehr ambitionierte zusätzliche Entnahmen durch Agroforstsysteme auf Ackerflächen und Holzprodukte ausgeglichen. Dies beinhaltet eine Steigerung des zusätzlichen Zuflusses zum Holzproduktespeicher von 7 Mio. m³ im Jahr 2045 im Szenario ohne Störungen auf 20 Mio. m³ und zudem eine Verringerung der Ernterate bei Agroforstsystemen von 60 auf 10 Prozent.

Bei LULUCF-Zielverfehlung besteht ein markant höherer Bedarf an neuartigen Entnahmen, der im Szenario LNe95-S-ZV insgesamt 33 Mio. Tonnen CO_2äq erreicht. Da Biomasseangebot und -nutzung sich nicht ändern, wird der zusätzliche Bedarf über nicht-biobasierte Entnahmemethoden gedeckt. Dementsprechend werden beschleunigte Verwitterung und DACCS im Umfang von insgesamt rund 20 Mio. Tonnen CO_2äq eingesetzt.

Das Szenario LNe97-ZE erreicht rechnerisch auch ohne neuartige Entnahmemethoden die THG-Neutralität. Diskussionen im Stakeholderkreis legen allerdings nahe, dass dieses Szenario keinen resilienten Zielerreichungspfad darstellt. Die getroffenen Annahmen zur Emissionsminderung bewegen sich an der Grenze zum technisch Machbaren und erfordern nicht nur einen kompletten Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe und Rohstoffe, sondern auch einen tiefgreifenden Wandel gesellschaftlicher Konsummuster (unter anderem Halbierung der Rinderhaltung durch geringeren Konsum tierischer Produkte). Dies zeigt sich auch bei den notwendigen Maßnahmen zur Zielerreichung im LULUCF-Sektor. Erforderlich in diesen Szenarien sind ein sehr starker Ausbau von Agroforstsystemen (um 1.240 Tsd. ha bis 2045) sowie eine starke Reduktion der Laubholzentnahme (-5 Mio. m³ bis 2050) bei gleichzeitiger deutlicher Steigerung des Zuflusses in den Holzproduktespeicher (7 Mio. m³ bis 2045 bzw. 20 Mio. m³ bei hohen natürlichen Störungen des Waldes). Die jeweiligen Annahmen wurden im Stakeholderkreis als extrem ambitioniert bewertet.

Die Auswirkungen der verschiedenen CDR-Portfolios unterscheiden sich signifikant

Zentrale Implikationen der CDR-Portfolios sind ihre Kosten sowie der Energie- und Biomasseverbrauch.[240] Die spezifischen Kosten der Entnahmeoptionen unterscheiden sich stark (siehe Tabelle 3).

Die jährlichen Gesamtkosten der betrachteten Methoden (ohne Aufforstung) in den Portfolios bewegen sich 2045 zwischen 2 und 19 Mrd. Euro pro Jahr. Die geringsten Entnahmekosten entstehen bei LNe97, die höchsten hingegen bei LNe93 mit knapp 15 Mrd. Euro pro Jahr bei LULUCF-Zielerreichung und über 19 Mrd. Euro bei LULUCF-Zielverfehlung.[241] Im Szenario LNe95-ZV sind es 10 Mrd. Euro. Eine ambitionierte Minderung trägt daher zu einer kosteneffizienten und resilienteren Erreichung der Gesamtziele bei.

Auch der Endenergieverbrauch (EEV) der betrachteten Entnahmemethoden variiert stark. In der Regel ist der EEV für neuartige Entnahmen deutlich höher als für natürliche Senken. Durch Effizienzsteigerungen sind noch Reduktionen des Energiebedarfs zu erwarten. Der gesamte EEV für die betrachteten Optionen in den CDR-Portfolios liegt zwischen ca. 13 und 130 TWh. Im Basisszenario LNe95 liegt der Endenergieverbrauch bei 22 TWh für das Jahr 2045. Der Großteil davon entfällt auf Entnahmemethoden, die auf CO_2-Abscheidung basieren. Insgesamt liegt der Biomasseverbrauch für die CO_2-Entnahme in den Szenarien zwischen ca. 50 und 160 TWh; in den LNe95-Szenarien sind es 61 TWh. In Szenarien mit knappem Biomasseangebot sind nicht biobasierte Entnahmemethoden sowie biobasierte Entnahmemethoden mit niedrigem Biomasseverbrauch zu bevorzugen.

Tabelle 3 Mittlere spezifische Kosten der Entnahmemethoden bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024)

Spezifische Kosten der CDR-Optionen, in Euro/t CO_2	2030	2045
Waldmanagement	35	35
Agroforstsysteme	74	76
BECCS	200	175
DACCS	800	391
Beschleunigte Verwitterung	200	110
Pflanzenkohle	254	150
Aufforstung	Keine Angabe möglich aufgrund potenziellen Wertverlusts der Fläche	
Holzprodukte, DACCU, Bio-CCU, direkte stoffliche Nutzung von Biomasse	Keine Angabe möglich aufgrund Heterogenität der hergestellten Produkte	

[240] Die spezifischen Werte können sich durch verschiedene Ausprägungen der Entnahmemethoden in den Portfolios (leicht) unterscheiden.

[241] Die ausgewiesenen spezifischen Kosten beziehen sich auf 1 Tonne eingespeichertes CO_2. Da sich die Dauerhaftigkeit für die verschiedenen Entnahmemethoden stark unterscheidet (bei natürlichen in der Regel deutlich geringer), muss vor allem eine Betrachtung, die sich über den Szenarienzeitraum hinaus (nach 2060) erstreckt, diesen Faktor berücksichtigen.

Die Entwicklung der Modellierung bis 2060 zeigt eine weitere Reduktion der Restemissionen sowie die hohe Unsicherheit bei den Potenzialen der CO_2-Entnahme

Bis zum Jahr 2060 werden die Szenarien und bestehende Trends im Hochlauf der CO_2-Entnahmen fortgeschrieben. Bis 2060 reduzieren sich die Restemissionen in den Szenarien weiter auf insgesamt 33 bis 54 Mio. Tonnen CO_2äq. Der überwiegende Teil davon ist (weiterhin) der Landwirtschaft zuzurechnen (90 bis 64 Prozent).

Der LULUCF-Sektor bleibt in den Szenarien von 2045 bis 2060 netto in etwa konstant (bei rund -41 bzw. -24 Mio. Tonnen CO_2äq). Dafür sind eine konsequente Maßnahmenfortführung und in einigen Bereichen eine deutliche Ambitionssteigerung (vor allem bei Agroforst und Holzprodukten) notwendig.

Die Entwicklung der CO_2-Entnahmekapazitäten unterliegt erheblichen Unsicherheiten. Aus der Trendfortschreibung lassen sich vier verschiedene mögliche Hochlaufpfade bis maximal 110 Mio. Tonnen CO_2äq Gesamt-CO_2-Entnahmen, davon bis zu 85 Mio. Tonnen CO_2äq an neuartigen Entnahmemethoden, ableiten. Dies ist allerdings stark abhängig insbesondere von der Biomassenverfügbarkeit sowie von der Bereitstellung erneuerbarer Energie und dient daher nur als Orientierung.

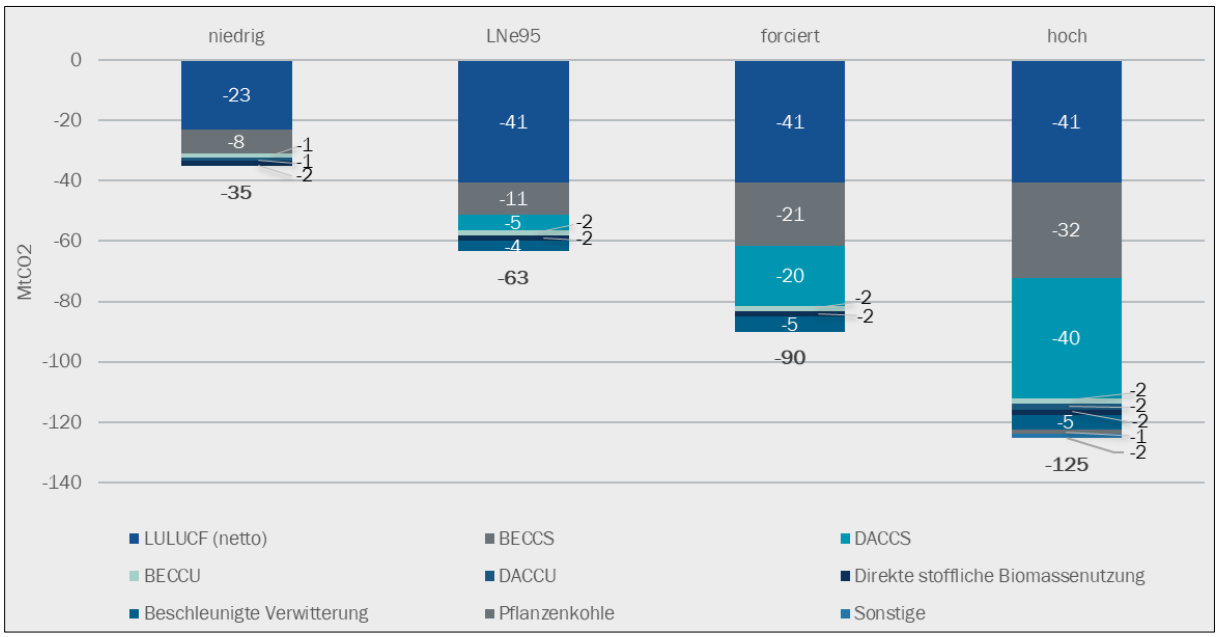


Abbildung 9 Ausgewählte CDR-Portfolios nach Optionen für das Jahr 2060 (Prognos/Öko-Institut, 2024)

Im CDR-Portfolio „niedrig" liegen die Entnahmekosten für 2060 bei knapp 2 Mrd. Euro, davon gut die Hälfte für neuartige Entnahmen. Im CDR-Portfolio „hoch" sind die Kosten dagegen mit knapp 14 Mrd. Euro rund 7-mal so hoch, rund 95 Prozent davon entfallen auf neuartige Entnahmen. Durch den unterschiedlichen Mix bewegen sich die gewichteten spezifischen Kosten für neuartige Entnahmen von 130 Euro/t CO_2 für „niedrig" bis über 160 Euro/t CO_2 für „hoch". Der Endenergieverbrauch für die CO_2-Entnahme (ohne Biomasse) liegt bei den CDR-Portfolios „niedrig" und LNe95 bei 24 TWh bzw. knapp über 30 TWh. Im CDR-Portfolio „forciert" sind bereits knapp 80 TWh für die entsprechende CO_2-Entnahme notwendig, für „hoch" sogar knapp 150 TWh.

In allen Szenarien nimmt das Biomasseangebot bis 2045 deutlich ab und bleibt dann bis 2060 etwa konstant. Die Nachfrage der nicht modellierten Sektoren nimmt im Mittel der Studien bis

2045 deutlich ab, bis 2060 wird der Trend fortgeschrieben. Das Restangebot für die Industrie nimmt bis 2045 trotz insgesamt geringerem Angebot zu und steigt bis 2060 sogar noch an. In LNe95 werden bis zu 49 TWh an Biomasse für Entnahmen (BECCU/S, stoffliche Nutzung) eingesetzt, davon bis zu knapp 10 TWh für die direkte stoffliche Nutzung. Durch ein Mehrangebot an Biomasse werden in LNe93 bis zu 11 TWh zur Pflanzenkohle-Produktion aufgewendet.

Fazit: Die Erreichung der THG-Neutralität erfordert prioritär die ambitionierte Emissionsminderung in den Sektoren und hierzu eine deutliche Maßnahmensteigerung

Die wichtigste Voraussetzung, um THG-Neutralität zu erreichen, ist eine weitgehende Transformation und eine tiefgreifende Emissionsminderung in den Sektoren.

- CO_2-Entnahmen setzen eine Transformation in den Sektoren voraus und damit die für Entnahmen notwendige Flächenbereitstellung und den Ausbau erneuerbarer Energien.
- Die Nutzung fossiler Brennstoffe hat über die direkte Klimawirkung hinaus negative ökologische, soziale, geopolitische und ökonomische Auswirkungen, die sich nur nachhaltig und vollständig vermeiden lassen, wenn sie durch erneuerbare Energien substituiert werden.
- CO_2-Entnahmen in Deutschland besitzen nur ein begrenztes Potenzial und sollten daher primär dazu dienen, unvermeidbare Restemissionen auszugleichen. Somit sollte eine resiliente Strategie zur Klimazielerreichung nicht die Bemühungen um eine zeitnahe Emissionsminderung zugunsten unsicherer und zukünftiger Entnahmen einschränken (Mitigation Deterrence[242]).

Die Ergebnisse der Modellierung verdeutlichen das sehr hohe Ambitionsniveau bei der Transformation der Sektoren sowie die enormen Anstrengungen, derer es zur Zielerreichung im LULUCF-Sektor bedarf. Die aktuell getroffenen und geplanten politischen Maßnahmen reichen noch nicht aus, um diese Ziele zu erreichen (siehe UBA-Projektionsdaten).

[242] Mitigation Deterrence: Der Ausblick auf zukünftige Entnahmen könnte zur Reduktion und Verzögerung von Emissionsminderungen führen.

6 Governance der CO_2-Entnahme

Unter Governance von CO_2-Entnahmen werden im Rahmen der LNe vier Teilbereiche unterschieden:

- Gesetzlichen Anpassungsbedarf für einzelne CO2-Entnahmemethoden identifizieren und konkrete Anpassungsempfehlungen geben
- Ziel- und Ressourcenkonflikte adressieren
- Ziele für technische Senken im Klimaschutzgesetz verankern und die Zielüberprüfung anhand des nationalen THG-Inventars ermöglichen (MRV auf Inventarebene)
- Grundlagen für die Bemessung und Zertifizierung von CO2-Entnahmen auf Projektebene schaffen (MRV auf Projektebene)

6.1 Gesetzlicher Anpassungsbedarf für CO_2-Entnahmemethoden

Der breite Einsatz von CO_2-Entnahmemethoden wird derzeit durch verschiedene gesetzliche und regulatorische Hürden erschwert. Der bestehende Rechtsrahmen ist nicht an die Anforderungen der CO_2-Entnahme angepasst: Er behindert sowohl praktische Anwendung als auch die Forschung und verbietet bestimmte Ansätze im Sinne des Vorsorgeprinzips. Zudem fehlen einheitliche Standards für die Messung, Berichterstattung und Verifizierung (engl. Monitoring/Measurement, Reporting and Verification, MRV), was die Vergleichbarkeit und Transparenz von Entnahmeprojekten einschränkt. Um Erforschung, Entwicklung und Umsetzung dieser Technologien zu ermöglichen und zu vereinfachen, werden im Folgenden gesetzliche und regulatorische Anpassungen vorgeschlagen. Dieser Anpassungsbedarf basiert auf der Methodenbewertung (Kapitel 2) und berücksichtigt zusätzlich Rückmeldungen aus einer umfassenden Online-Beteiligung.

Es besteht gesetzlicher Anpassungsbedarf für den Einsatz CCS-basierter CO_2-Entnahmemethoden

Mit dem Beschluss des Kohlendioxid-Speicherungs- und -Transportgesetzes (KSpTG) und der Ratifizierung des London-Protokolls sowie der Anpassung des Hohe-See-Einbringungsgesetzes (HSEG) können die rechtlichen Grundlagen für den Einsatz von CCS geschaffen werden. Hierzu liegen aktuell entsprechende Referentenentwürfe vor.[243] Diese Grundlagen sind notwendig, um den Einsatz von CCS-basierten Entnahmemethoden (DACCS, BECCS) in Deutschland sowie den Export von CO_2 zur unterirdischen Offshore-Speicherung zu ermöglichen.

Empfehlung 1: Um den Einsatz von CCS-basierten Methoden in Deutschland zu ermöglichen, sollten das KSpG und das HSEG angepasst und das London-Protokoll ratifiziert werden. Diese Maßnahme

[243] Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes; Referentenentwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Hohe-See-Einbringungsgesetzes.

ist aktuell in der Umsetzung. Der Referentenentwurf für die KSpG-Novelle wurde vom Bundeskabinett beschlossen und wird nun in den Bundestag eingebracht. Diese Anpassungen sollten zeitnah rechtskräftig werden.

Die Forschung an marinen Entnahmemethoden und die Speicherung von CO_2 erfordern eine Anpassung des HSEG

Aktuell sind Feldversuche zur Erforschung von marinen Entnahmemethoden mit Ausnahme der Ozeandüngung nicht möglich. Im HSEG ist die Forschung an marinen CO_2-Entnahmemethoden mit Ausnahme der Ozeandüngung verboten. Ein aktueller Referentenentwurf zur Änderung des HSEG sieht vor, die Offshore-Speicherung von CO_2 in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) zu ermöglichen.

Die Bundesregierung will den Katalog zulässiger Maßnahmen des marinen Geoengineerings[244] erweitern, um zusätzliche Potenziale zur Bindung von CO_2 aus der Atmosphäre zu erforschen und ihre Auswirkungen auf die Umwelt zu bewerten. Darunter fallen die Alkalinitätserhöhung, der künstliche Auftrieb sowie die Kultivierung und Nutzung von Makroalgen. Zudem soll der Export von CO_2 in andere Staaten zur dortigen Speicherung erlaubt werden. Dies erfordert eine Änderung des bisherigen Exportverbots für Abfälle und andere Stoffe gemäß Artikel 6 des London-Protokolls.

Empfehlung 2: Um die Forschung an marinen Entnahmemethoden in Deutschland zu ermöglichen, sollten die Maßnahmen des marinen Geoengineering (§ 4 Satz 2 Nr. 3) im HSEG entsprechend des Referentenentwurfs erweitert werden.

Weitere gesetzliche Anpassungen können den Einsatz mariner Methoden vereinfachen

Der Einsatz mariner Entnahmemethoden ist derzeit in der Regel nicht zulässig. Gleichwohl bestehen Möglichkeiten für eine vereinfachte Umsetzung, insbesondere wenn Maßnahmen nachweislich positive Effekte auf das Ökosystem haben. Weitreichende Eingriffsverbote verhindern derzeit Wiederherstellungs- und Erweiterungsmaßnahmen von Küstenökosystemen. Daraus ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen Umweltschutz und Klimaschutz. Die Ermöglichung der marinen CO_2-Entnahme

[244]Der Referentenentwurf des HSEG definiert Maßnahmen des marinen Geoengineering gemäß nach § 4 Satz 2 Nr. 3 als Tätigkeiten, die ausschließlich der wissenschaftlichen Forschung dienen und die folgenden Ziele verfolgen:
a. Einbringung von Materialien zur Anregung der Primärproduktion im Meer, um die Aufnahmefähigkeit der Biomasse für Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu erhöhen (Meeresdüngung).
b. Einbringung von Materialien zur Erhöhung der Alkalinität des Meerwassers, um die Aufnahmefähigkeit des Meerwassers für Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu erhöhen oder der Versauerung entgegenzuwirken (Ozean-Alkalinisierung).
c. Versenkung von biologischem Material lebender oder toter, nicht mineralisierter Organismen auf den Meeresboden, um dem natürlichen Kreislauf Kohlenstoff zu entziehen (Versenkung von Biomasse im Meer). Dies umfasst nicht Tätigkeiten zur Wiederherstellung von Lebensräumen.
d. Verbringung von Kohlendioxid zur Mineralisierung im Basaltgestein der oberen Ozeankruste, um Kohlenstoff in diesen Gesteinsschichten einzulagern (Speicherung in ozeanischer Kruste). Dies umfasst keine Speichervorhaben im Sinne von § 3 Nr. 3 Kohlendioxid-Speicherungs- und -Transportgesetz (Forschungsspeicher).
e. Umverteilung von Meerwasser durch technisch unterstützte Maßnahmen, um die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre durch das Meerwasser oder die Meeresorganismen zu erhöhen (künstlicher Auftrieb).

(insbesondere die Stärkung küstennaher Ökosysteme) würde entsprechende Änderungen im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) für Binnengewässer und innerhalb der Territorialgewässer sowie in der Raumordnung erfordern.

Im Hinblick auf die Nutzung von Makroalgen in terrestrischen Anwendungen besteht Untersuchungsbedarf, inwiefern ein großflächiger Anbau von Makroalgen mit einschlägigen Gesetzen auf Bundes- oder Länderebene vereinbar wäre. Das Kultivieren von Makroalgen könnte dabei insbesondere eine genehmigungspflichtige Nutzung im Sinne des WHG oder einen Eingriff im Sinne des BNatSchG darstellen.

Empfehlung 3: Zur Förderung mariner CO_2-Entnahmemethoden und zur Stärkung küstennaher Ökosysteme sollte die Bundesregierung rechtliche Hürden und Unklarheiten im bestehenden Regulierungsrahmen gezielt abbauen. Folgende Anpassungen könnten die Stärkung küstennaher Ökosysteme sowie perspektivisch den Einsatz zusätzlicher mariner Methoden vereinfachen:[245]

- Die Bundesregierung sollte prüfen, wie der Meeresschutz in den relevanten Gesetzgebungen (WHG, BNatSchG) als überragendes öffentliches Interesse verankert werden kann, um die Durchsetzung von Maßnahmen zu erleichtern.
- Eine ambitionierte Umsetzung der Ziele der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie ist notwendig, um den geforderten guten Umweltzustand der Meeresgewässer zu erreichen und gleichzeitig den Schutz mariner Ökosysteme sowie deren ökologische Funktionen zu stärken .
- Im Flächenentwicklungsplan für die deutsche Nord- und Ostsee sollte eine verbindliche Berücksichtigung von Meeresschutzbelangen verankert werden. So können natürliche Ökosysteme und ihre Senkenfunktion systematisch in die räumliche Planung einbezogen und Nutzungskonflikte frühzeitig minimiert werden.
- Die Meeresraumplanung sollte küstennahe Ökosysteme wie Salzwiesen, Wattflächen, Seegraswiesen oder Muschelbänke systematisch stärken und ihre Funktionen im natürlichen Klimaschutz berücksichtigen. Eigenständige oder prioritäre Flächen werden diesen Ökosystemen bislang nicht zugewiesen. Die potenzielle Kultivierung von Makroalgen befindet sich noch im Forschungsstadium, daher sollte ihre Integration an die Ergebnisse laufender Projekte geknüpft werden.
- Bei Eingriffen in den marinen Raum (z. B. Offshore-Bauten, Sedimententnahme, Kabelverlegung) sollte soweit möglich die Realkompensation zum Standard werden, sodass gleichartige Wiederherstellungen im Eingriffsgebiet Vorrang erhalten. Wo geeignete Flächen für eine direkte Wiederherstellung fehlen, dürfen Ersatzmaßnahmen nur ergänzend eingesetzt werden. Bund und Länder sollten die Verfügbarkeit von Flächen aktiv und koordiniert prüfen, um den ökologischen Nutzen zu maximieren.
- In der Raumordnung sollten degradierte marine Lebensräume als priorisierte Wiederherstellungsflächen ausgewiesen werden; andere Nutzungen können nur unter Einhaltung ökologischer Mindestanforderungen erfolgen, sodass die Flächen vorrangig für Wiederherstellungsmaßnahmen genutzt werden können.

[245] Die Anpassungen wären zukünftig auch für die Alkalinitätserhöhung relevant. Solange noch ein Forschungsverbot besteht und eine Entscheidung über den zukünftigen kommerziellen Einsatz aussteht, erscheint eine Untersuchung verfrüht.

Empfehlung 4: Das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) sollte um klare Regelungen zur Rolle mariner und küstennaher Ökosysteme als natürliche Kohlenstoffsenken ergänzt werden. Lebensräume wie Seegraswiesen, Salzwiesen und Sedimentflächen bieten erhebliche Potenziale zur CO_2-Entnahme und sollten rechtlich entsprechend berücksichtigt werden. Daher könnten von der Bundesregierung folgende Anpassungen im BNatSchG vorgenommen werden, welche zugleich andere natürliche Senken an Land fördern könnten:

- § 14 BNatSchG: Klarstellung, dass Renaturierungsmaßnahmen grundsätzlich als positive Maßnahmen gelten und nicht als Eingriff gewertet werden. Viele Ökosysteme sind nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat (FFH)-Richtlinie als geschützte Lebensräume ausgewiesen. Veränderungen in diesen Gebieten können als Beeinträchtigung gewertet werden, obwohl sie auf die Wiederherstellung natürlicher Funktionen und Kohlenstoffbindung abzielen.
- § 30 BNatSchG: Renaturierungs- und Wiederherstellungsmaßnahmen sollten grundsätzlich zulässig sein, sofern keine Schutzgüter beeinträchtigt werden, um Genehmigungsverfahren zu vereinfachen. Bisher werden Renaturierungsmaßnahmen wie die Wiederherstellung von Seegraswiesen oftmals wie reguläre Bauvorhaben behandelt, was komplexe Genehmigungsverfahren erfordert. Auch weitere natürliche Senken wie der Ausbau von Agroforstsystemen oder die Wiedervernässung von Mooren können als Eingriff in ein geschütztes Biotop oder als landschaftsverändernde Maßnahme gewertet werden, obwohl sie ökologisch sinnvoll sind.
- § 34 BNatSchG: Die Bundesregierung sollte transparente und einheitliche Kriterien festlegen, wann Renaturierungsmaßnahmen in Natura-2000-Gebieten als "gebietsfördernd" bzw. als "ökologische Verbesserung" im Sinne der FFH-Verträglichkeit gelten. Dies reduziert Prüfaufwand, schafft Investitions- und Rechtssicherheit und vereinfacht Genehmigungsprozesse.
- § 44 BNatSchG: Entwicklung bundeseinheitlicher Leitlinien zur artenschutzrechtlichen Bewertung von Renaturierungsmaßnahmen, insbesondere zur Klärung, wann Eingriffe als zulässig, vermeidbar oder ausgleichbar gelten.

Die Anpassung des gesetzlichen Rahmens für terrestrische Methoden kann die CO_2-Entnahme vereinfachen

Im Gegensatz zu marinen und CCS-basierten Methoden gibt es für die anderen Methoden keine gesetzlichen Verbote, die ihre Umsetzung verhindern. Die meisten der betrachteten Methoden dienen nicht ausschließlich der CO_2-Entnahme. Häufig stehen andere Ziele im Vordergrund, etwa die klimagerechte Waldentwicklung oder die Herstellung von Bauprodukten. Deshalb verfolgen die geltenden Gesetze andere Zwecke und sollten daraufhin geprüft werden, ob sie mit dem Ziel der CO_2-Entnahme vereinbar sind.

Im Folgenden werden die in Kapitel 2 identifizierten Handlungsbedarfe sowie zentrale Empfehlungen als Ergebnis der Online-Beteiligung für die verschiedenen terrestrischen Entnahmemethoden konkret aufgeführt.

Empfehlung 5: Für den Einsatz von Agroforstsystemen sollten bestehende Gesetze und Verordnungen vereinheitlicht werden, um eine klare Rechtslage zu schaffen. Agroforstsysteme sollten dabei eindeutig als Form der landwirtschaftlichen Bodennutzung eingeordnet werden, um Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Bewertung als Eingriff in die Landschaft nach § 14 BNatSchG zu beseitigen. Eine Vereinheitlichung und Vereinfachung des Einsatzes von Agroforstsystemen könnte folgende Anpassungen umfassen:

- Rechtliche Unsicherheiten bezüglich der Genehmigungspflicht nach § 4 Abs. 2 GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV) sollten ausgeräumt werden, indem Agroforstsysteme nicht als Eingriff in die Natur und Landschaft nach § 14 BNatSchG eingeordnet werden, da die Nutzung

weder § 5 Abs. 2 BNatSchG noch § 17 Abs. 2 Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) entgegensteht. Gleichzeitig sollten klare Leitlinien sicherstellen, dass Bodenschutzaspekte wie die Vermeidung von Bodenverdichtungen, Nährstoffentzug oder Wurzelkonkurrenzen bei der Umsetzung berücksichtigt werden.

- Landwirte und Bewirtschafter sollten durch angepasste Vertragsvorgaben und gelockerte Nutzungsauflagen langfristig die Möglichkeit erhalten, Agroforstsysteme zu etablieren. Heute verhindern viele Pachtverträge eine dauerhafte Nutzungsänderung oder verlangen eine Rückführung in den Ausgangszustand. Dadurch blockieren sie Investitionen, die sich erst nach vielen Jahren ökologisch und ökonomisch auszahlen.
- Die GAP sollte auch Nicht-Energieholz als ökologische Vorrangfläche (ÖVF) anerkennen und die Liste zugelassener Gehölzarten um ökologisch vorteilhafte Arten erweitern. Bisher sind diese ausgeschlossen, obwohl sie sowohl ökologisch wertvoll als auch wirtschaftlich sinnvoll sein können.

Empfehlung 6: Zur Vereinfachung der Aufforstung sollten bestehende Gesetze angepasst werden, um Erstaufforstungen zu erleichtern und gleichzeitig den Schutz anderer wichtiger Lebensraumtypen zu sichern. Die Bundesregierung könnte folgende Anpassungen vornehmen:

- Die Erstaufforstung unterliegt derzeit oft komplexen naturschutz- und forstrechtlichen Genehmigungsverfahren. Es sollte einheitlich geregelt werden, dass bei Einhaltung ökologisch fundierter Mindeststandards auf aufwendige Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVP) verzichtet werden kann

    - Um potenziell kontraproduktive Erstaufforstungen in ökologisch sensiblen Gebieten wie Moorstandorten, Wasserschutz- und Überschwemmungsflächen zu vermeiden, sollte eine verbindliche Prüfung im Rahmen des Wasserrechts eingeführt werden. Diese stellt sicher, dass Aufforstungen nur dort erfolgen, wo sie tatsächlich zu einer Netto-CO_2-Entnahme beitragen und keine zusätzlichen Emissionen durch Bodenstörungen oder Entwässerung verursachen.
    - Standortangepasste Erstaufforstungskonzepte sollten verbindlich in die Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer integriert werden, um naturbasierte Klimaanpassung und CO_2-Entnahme gezielt zu fördern. Die systematische Berücksichtigung von Aufforstung als Maßnahme zur Klimaanpassung kann positive Effekte wie Mikroklimaverbesserung, Erosionskontrolle und Stabilisierung des Wasserhaushalts stärken. Aktuell wird dieses Potenzial in den Strategien der Länder noch unzureichend ausgeschöpft.

Empfehlung 7: Für die Ermöglichung von BECCS-Projekten müssen neben der Anpassung des KSpG und des HSEG noch weitere rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden. Rechtliche Unsicherheiten ergeben sich insbesondere aus dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), etwa bei der Einhaltung von Grenzwerten nach der Abscheidung sowie durch die Einstufung als bestehender Prozess, die das Genehmigungsverfahren nach § 16 oder § 19 BImSchG beeinflusst.

Spezifisch für das BImSchG könnte die Bundesregierung folgende Anpassungen vorsehen, welche die Genehmigungspraxis erleichtern und Rechtssicherheit schaffen können:

- Es sollte klargestellt werden, dass abgeschiedenes CO_2 – auch bei Nachrüstung bestehender Feuerungsanlagen – als Abgasstrom im Sinne des § 19 gilt.
- Die CO_2-Abscheidung verändert die Zusammensetzung des Rauchgases. Daher sollte verbindlich (gesetzlich oder untergesetzlich) geregelt werden, ob und inwiefern bestehende Emissionsgrenzwerte eingehalten, angepasst oder neu definiert werden müssen.

- Bei der CO_2-Abscheidung mittels Aminwäsche können Nebenprodukte wie Amine und Ammoniak in das Rauchgas übergehen, ohne dass derzeit verbindliche Grenzwerte im BImSchG oder in zugehörigen Verordnungen festgelegt sind. Zwar sieht § 27 der 13. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) für bestimmte andere Anlagen Ammoniak-Grenzwerte von 10 mg/m³ (Jahres- und Tagesmittel) bzw. 20 mg/m³ (Halbstundenmittelwert) vor, doch fehlen eine Übertragung auf CO_2-Abscheidungsanlagen sowie eine Regelung für Amine. Eine spezifische Festlegung von Grenzwerten ist erforderlich, um Umwelt- und Gesundheitsschutz zu gewährleisten und gleichzeitig Genehmigungsverfahren für BECCS-Anlagen zu standardisieren.

Empfehlung 8: Die Bundesregierung sollte die Rahmenbedingungen für BECCS verbessern und zu einem nachhaltigen Einsatz beitragen. Dazu gehören unter anderem die folgenden Anpassungen:

- Aktuell muss die UVP bei der CO_2-Speicherung den Bestimmungen der EU-Abfalldirektive genügen. Es sollte klar geregelt werden, inwieweit bestehende Präzedenzfälle und Erfahrungen lokaler und regionaler Prüfbehörden bei der Nutzung von CO_2 herangezogen werden können, um Genehmigungsverfahren zu vereinfachen und Planungssicherheit zu schaffen.
- Die aktuelle Regelung des § 35 Baugesetzbuchs (BauGB) privilegiert landwirtschaftliche Biogasanlagen im Außenbereich, nicht jedoch zentrale Anlagenkomponenten für die Biomethanherstellung – wie Aufbereitungsanlagen oder CO_2-Verflüssigungsanlagen. Dies erschwert deren Genehmigung trotz ihrer funktionalen und räumlichen Nähe zur Biogaserzeugung und ihrer Bedeutung für negative Emissionen durch BECCS. Eine ausdrückliche Aufnahme dieser Anlagentypen in den Katalog privilegierter Vorhaben würde die Planungssicherheit erhöhen und Genehmigungsverfahren beschleunigen.

Empfehlung 9: Zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bausektor sollte die Bundesregierung regulatorische Hemmnisse für die beschleunigte Karbonatisierung und den Einsatz von Recyclingbeton abbauen. Ein angepasster Rechtsrahmen könnte Genehmigungsverfahren vereinfachen, technische Standards modernisieren und die Wiederverwendung mineralischer Reststoffe erleichtern. Das bedeutet im Einzelnen:

- Anpassung der Vorschriften zum Einsatz von Recyclingbeton (EN 197-1 und DIN EN 206), um die Benachteiligung gegenüber Frischbeton zu reduzieren.
- Aufnahme zentraler Anlagenteile der beschleunigten Karbonatisierung in den Net Zero Industry Act (NZIA) Dies ermöglicht die Inanspruchnahme vereinfachter und beschleunigter Genehmigungsverfahren.
- Aufnahme verbindlicher Vorgaben in Merkblättern zum Recyceln bzw. Wiederverwenden von Materialien (gegebenenfalls auf Länderebene).

Empfehlung 10: Für DACCS existiert außerhalb der Regelungen im KSpG kein spezifischer rechtlicher Rahmen. Auch das BImSchG erfasst bisher noch keine DAC-Anlagen. Bei einer zukünftigen Anpassung des BImSchG und der BImSchV sollte eine Integration von DACCS erfolgen. Dafür ist zu überprüfen, welche Regelungen zu ergänzen sind.

Empfehlung 11: Die Bundesregierung sollte prüfen, inwieweit bestehende Anforderungen weiterentwickelt werden können, um den Einsatz von Biomasse zu erleichtern– beispielsweise durch Anpassung der brandschutztechnischen Anforderungen in der Muster-Holzbaurichtlinie. Der stoffliche Einsatz von Biomasse, insbesondere Holz, unterliegt bauordnungsrechtlichen Vorgaben, die sich in Deutschland an Richtlinien wie der Muster-Holzbaurichtlinie orientieren. Insbesondere bestehende

brandschutzrechtliche Anforderungen können den Einsatz von Holz und anderen Biomasseprodukten als nachhaltigen Baustoff einschränken, obwohl sie einen wichtigen Beitrag zur Klimaneutralität im Bauwesen leisten.

Empfehlung 12: Um den Einsatz von Pflanzenkohle zu erweitern und eine bessere Kohärenz zwischen europäischem und nationalem Recht herzustellen, sollte eine Anpassung der Düngemittelverordnung (DüMV) an die EU-Regelungen geprüft werden. Die EU-Düngeprodukteverordnung (Verordnung (EU) 2019/1009) erlaubt für die Herstellung von Pflanzenkohle neben unbehandeltem Holz auch andere Stoffe, wohingegen in der deutschen DüMV dafür ausschließlich unbehandeltes Holz genutzt werden darf.

Empfehlung 13: Zur Überwindung bestehender Unsicherheiten bei der Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle sollte der Gesetzgeber eine einheitliche regulatorische Einstufung von Pyrolyseanlagen gemäß BImSchV vornehmen, um sie an die Regelungen für Abfallverbrennungsanlagen (4. BImSchV, Nr. 8.1.1) und Feuerungsanlagen (1. BImSchV) anzugleichen oder offizielle Handreichungen erstellen, um Unsicherheiten bei den Unternehmen sowie Zulassungsbehörden abzubauen. Hierzu liegt aktuell bereits ein veröffentlichter Entwurf vor.

Die Wiedervernässung von Mooren als flächenwirksame Methode ist herausfordernd und erfordert die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren

Die Wiedervernässung von Mooren ist ein zentraler Hebel für eine wirksame Reduktion von Emissionen und kann perspektivisch auch zusätzlichen Kohlenstoff binden. Aktuell wird die Umsetzung von großflächigen Maßnahmen zur Wiedervernässung vor allem durch zwei Faktoren erschwert. Erstens betrifft die Wiedervernässung von Mooren häufig Flächen mehrerer Eigentümer. Projekte zur Wiedervernässung müssen daher koordiniert von mehreren Eigentümern durchgeführt werden. Der Wertverlust bei der Wiedervernässung und nur schwer planbare Einkommensmöglichkeiten macht es jedoch schwierig, die Zustimmung aller Eigentümer zu erhalten und Projekte umzusetzen. Die Wiedervernässung von Moorböden kann zu erheblichen Einschränkungen anderweitiger Nutzungsmöglichkeiten führen. Daher kommt der angemessenen Honorierung der Ökosystemdienstleistungen der Wiedervernässung eine wichtige Rolle zu.

Zweitens gestalten sich Genehmigungsverfahren zur Wiederherstellung von Mooren derzeit oft langwierig, da sie mehrere Bereiche wie Wasser, Bau, Forstwirtschaft und Naturschutz betreffen. Die Flächennutzung ist häufig im Raumordnungs- und Planungsrecht vorgegeben, hingegen sind Moor- und Klimaschutz in diesen genehmigungsrelevanten Gesetzen nicht ausreichend berücksichtigt. Nutzungsänderungen wie die Wiedervernässung sind mit Unsicherheiten im Genehmigungsverfahren behaftet, wenn sie von den dort getroffenen Festlegungen abweichen. Hier bedarf es einer rechtlichen Priorisierung als auch einer Vereinfachung und Standardisierung genehmigungsrechtlicher Verfahren.

Empfehlung 14: Um die Wiedervernässung von Mooren als zentrale Maßnahme des natürlichen Klimaschutzes wirksam zu fördern, sollte ein kohärenter rechtlicher und planerischer Rahmen geschaffen werden, der Hindernisse bei Eigentumsverhältnissen, Genehmigungsverfahren und Nutzungskonflikten systematisch abbaut. Dazu sind Anpassungen in Wasser-, Naturschutz-, Bau- und Raumordnungsrecht erforderlich, die Moorschutz als öffentliches Interesse verankern, Verfahren vereinfachen, Planungssicherheit erhöhen und den gezielten Flächenerwerb sowie die Umsetzung von Maßnahmen auch gegen einzelne Widerstände ermöglichen. Im Einzelnen bedeutet das:

- Der Schutz von Moorböden sollte als besonders wichtiges öffentliches Interesse im BBodSchG, WHG und BNatSchG festgeschrieben werden. Dadurch könnten auch in Natura-2000-Gebieten Maßnahmen zur Wiedervernässung leichter umgesetzt werden. Die Bundesregierung sollte vorher prüfen, welche Risiken entstehen, wenn dieses Interesse gegenüber anderen Formen der Landnutzung bevorzugt wird.
- Eine klare gesetzliche Festlegung der Schwelle zur Planfeststellungsbedürftigkeit bei Wiedervernässungsvorhaben kann Rechts- und Planungssicherheit schaffen. Damit könnte bei Vorhaben unterhalb einer gewissen Schwelle auf ein Planfeststellungsverfahren verzichtet werden. Dabei sollte zugleich die Ausklammerung nicht berichtspflichtiger Kleingewässer aus dem Anwendungsbereich des WHG (gemäß § 2 Abs. 2 WHG) auf Länderebene geprüft werden, um Genehmigungsprozesse zu vereinfachen und Vorhaben ohne relevanten Einfluss auf den Gewässerschutz zu beschleunigen.
- Das Vorkaufsrecht nach § 99a WHG sollte auf Zwecke des Moorklimaschutzes ausgeweitet werden, um den gezielten Erwerb von Flächen mit hohem Wiedervernässungspotenzial zu ermöglichen, insbesondere dann, wenn Eigentümer einer Umnutzung nicht zustimmen, jedoch verkaufsbereit sind. Dies würde die Umsetzung von Klimaschutz- und Renaturierungszielen beschleunigen.
- Die Duldungspflicht nach § 65 BNatSchG sollte auch für Maßnahmen des natürlichen Klimaschutzes ausgeweitet werden. § 92 WHG sollte zudem Vorhaben zur Verbesserung des Wasserrückhalts einbeziehen. Damit lassen sich Wiedervernässungsprojekte umsetzen, auch wenn einzelne Eigentümer nicht zustimmen.
- § 71 WHG sollte die Moorwiedervernässung ausdrücklich als dem Wohl der Allgemeinheit dienende Maßnahme aufnehmen, um in begründeten Ausnahmefällen auch hierfür die enteignungsrechtlichen Voraussetzungen zu schaffen.
- Die Bewirtschaftungsgrundsätze des § 6 WHG sollten um den Klima- und Moorbodenschutz als eigenständige Ziele ergänzt werden, um sicherzustellen, dass diese Belange in wasserrechtlichen Entscheidungen berücksichtigt werden und auf Fachplanungen wie Raumordnung, Bauleitplanung und Infrastrukturvorhaben ausstrahlen.
- Eine Qualifizierung von Wiedervernässungsprojekten als raumbedeutsame Vorhaben könnte Planungssicherheit erhöhen und die Umsetzung effizienter gestalten. Hierzu sollten Kriterien und Schwellenwerte in Raumordnungsplänen festgeschrieben sowie Vorranggebiete für Moorschutz und -erhalt gemäß § 7 Abs. 3 Satz 2 Nr. 1 Raumordnungsgesetz (ROG) ausgewiesen werden.
- Gemeinden sollten Flächen mit besonderer ökologischer Bedeutung (u. a. Moore) in Bebauungsplänen (§ 9 Abs. 1 Nr. 15 BauGB) oder als Flächen zum natürlichen Klimaschutz im Flächennutzungsplan (§ 5 Abs. 2 Nr. 5a BauGB) ausweisen. Dadurch lassen sich die ökologische Funktion dauerhaft sichern, Fördermöglichkeiten erleichtern, die Rechtsklarheit für Duldungspflichten, Vorkaufsrechte und Enteignungen erhöhen sowie die langfristige Umsetzung von Wiedervernässungs- und Klimaschutzmaßnahmen unterstützen.

6.2 Ziel- und Ressourcenkonflikte zwischen CO_2-Entnahme und anderen Prioritäten

Die Skalierung von CO_2-Entnahmen ist durch die vorhandenen Ressourcen begrenzt. Neben der Finanzierung sind dies insbesondere die Aspekte Landfläche, Biomasse und (erneuerbare) Energie. Dies ist bei der Entwicklung der LNe zu berücksichtigen.

Die Landverfügbarkeit begrenzt das CO_2-Entnahmepotenzial in Deutschland

In Deutschland ist der Flächendruck hoch: Täglich werden 55 ha versiegelt[246], während gleichzeitig Landwirtschaft, erneuerbare Energien, Moorrenaturierung, Ökolandbau und Biodiversitätsflächen zusätzliche Flächen beanspruchen. Wachsende Landnutzungskonflikte können die CO_2-Entnahme beeinträchtigen und globale Auswirkungen auf den Flächenbedarf haben, die unter Umständen zu Entwaldung und damit einem höheren CO_2-Ausstoß in anderen Ländern führen können.

Die meisten betrachteten Entnahmemethoden haben einen hohen Flächenbedarf. Dies gilt insbesondere für Methoden, die entweder auf eine Änderung der Flächennutzung (z. B. Aufforstung) oder auf die Nutzung zusätzlicher Biomasse setzen (z. B. BECCS oder Pflanzenkohle, sofern keine Abfall- und Reststoffe zum Einsatz kommen). Andere Verfahren, wie etwa die beschleunigte Verwitterung, Agroforstsysteme oder marine Methoden, benötigen keine dedizierten Flächen, sind durch die Flächenverfügbarkeit aber dennoch begrenzt. Manche technische Senken, wie etwa DACCS, haben einen sehr viel geringeren Flächenbedarf, der hauptsächlich aus der Bereitstellung der benötigten Energie stammt.

Die Ausweitung des Biomasseanbaus für energetische Zwecke birgt Risiken für Biodiversität, Bodenfruchtbarkeit und die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Eine klare regulatorische Begrenzung der Flächenausdehnung sowie die gezielte Förderung von Rest- und Abfallstoffnutzung sind daher zentrale Voraussetzungen für eine nachhaltige CO_2-Entnahme mit Biomasse.

Empfehlung 15: Die Entwicklung der CO_2-Entnahme sollte keinen zusätzlichen Flächendruck verursachen. Deshalb sollte auch der Einsatz zusätzlicher Biomasse zur CO_2-Entnahme über die derzeitige energetische Nutzung hinaus vermieden werden. Förderprogramme und Regulierungen sollten darauf abzielen, keine neuen Flächen für den Biomasseanbau zu erschließen, sondern vorrangig bestehende Rest- und Abfallstoffe zu nutzen.

Der maßvolle Umgang mit Biomasse ist zentral zur Sicherstellung der Nachhaltigkeit

Die Modellierung der LNe zeigt, dass das Angebot an Biomasse mit steigenden Risiken im LULUCF-Sektor voraussichtlich abnehmen wird. In der Methodenbewertung werden insbesondere für BECCS, Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle und BECCU je nach Herkunft der Biomasse Risiken für erhebliche negative Auswirkungen erkannt. Über die RED III werden Nachhaltigkeitsaspekte von Biomasse bereits europaweit reguliert. In der Bundesförderung Industrie und Klimaschutz (BIK), dem bisher einzigen Förderprogramm auf deutscher Ebene für BECCS, werden bereits Vorgaben gemacht, die den Einsatz von Biomasse weitestgehend auf Rest- und Abfallstoffe beschränken und dabei auf die Regelungen der RED II verweisen.

Empfehlung 16: Es sollte geprüft werden, ob die bestehenden Regelungen der RED III gewährleisten, dass die Nutzung von Biomasse für BECCU/S und die Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle tatsächlich zu einer ausreichend großen Netto-CO_2-Entnahme über den gesamten Lebenszyklus

[246] Bis 2030 soll die tägliche Flächenneuinanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrszwecke auf unter 30 ha reduziert werden. Im Integrierten Umweltprogramm ist sogar ein Wert von 20 ha vorgesehen. Bis 2050 strebt die Bundesregierung eine Netto-Nullversiegelung an.

der Methoden führt, ohne sich negativ auf Umweltschutzgüter auszuwirken. Dies sollte auch für Biomasseimporte gelten.

Eine effektive CO_2-Entnahme mit energieintensiven CO_2-Entnahmemethoden setzt erneuerbare Energien voraus

Manche CO_2-Entnahmemethoden (insbesondere BECCU/S, DACCU/S und künstliche Photosynthese) haben einen hohen oder sehr hohen Energiebedarf. Daher ist eine niedrige CO_2-Intensität des genutzten Stroms notwendig, um die Entnahme möglichst effizient zu machen und vorgelagerte Prozessemissionen zu verringern. Die Bundesregierung hat sich bereits ambitionierte Ziele für die Erzeugung erneuerbarer Energien gesetzt. Im Jahr 2030 sollen dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) zufolge mindestens 80 Prozent der Brutto-Stromerzeugung erneuerbar sein, 2035 soll die Stromversorgung fast vollständig aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. Insbesondere in der Zeit bis zur vollständigen Dekarbonisierung des Energiesystems kann es zu Nutzungskonkurrenzen zwischen der Energiebereitstellung für die CO_2-Entnahme und anderen Anwendungen für erneuerbare Energien kommen, zum Beispiel der Elektrifizierung in der Industrie. Damit technische Senken möglichst nachhaltig und effizient ausgebaut werden können, müssen erneuerbare Energien deutlich erweitert und kostengünstig verfügbar gemacht werden.

Empfehlung 17: Möglichst effektive CO_2-Entnahmen erfordern den Einsatz erneuerbarer Energien. Eine Skalierung der teils energieintensiven Methoden hat entsprechende Auswirkungen auf den Gesamtenergiebedarf in Deutschland. Entsprechend sollte die Bundesregierung die Energiebedarfe der verschiedenen Entnahmemethoden in die Systementwicklungsstrategie integrieren.

Empfehlung 18: Da in Abhängigkeit von der Methode punktuell hohe Mengen an Strom benötigt werden sollte eine Integration der CO_2-Abscheidung in den Szenariorahmen Strom (nach § 12a Energiewirtschaftsgesetz, EnWG) und die Regionalszenarien als Basis der Netzausbaupläne (nach § 14d EnWG) erfolgen. Dort könnten in Zukunft neben CCS-basierten Methoden auch weitere CO_2-Entnahmemethoden berücksichtigt werden.

Begrenzte Speicherkapazitäten für CO_2 bergen Konfliktpotenzial zwischen CCS-basierter Vermeidung fossiler CO_2-Emissionen und CCS-basierter CO_2-Entnahme

CCS wird sowohl für die Vermeidung fossiler CO_2-Emissionen (FoCCS) als auch für die CO_2-Entnahme zum Einsatz kommen. Im Rahmen der LNe-Modellierung ergibt sich eine Bandbreite an abgeschiedenem CO_2 von 7 bis 56 Mio. Tonnen CO_2 für die CO_2-Entnahme im Jahr 2045 (BECCS und DACCS). Bis zum Jahr 2035 werden keine relevanten Mengen an CO_2 aus CCS-basierten CO_2-Entnahmeprozessen erwartet.

Diese CO_2-Mengen haben Einfluss auf den Infrastrukturbedarf für CCS und betreffen die CMS. Dies gilt insbesondere für die Mengen von abgeschiedenem biogenen CO_2, da diese standortgebunden sind im Gegensatz zu den Mengen für DACCS, die sich in der Nähe von Speicherstandorten befinden können.

Der Hochlauf der CO_2-Infrastruktur ist aktuell mit Unsicherheiten verbunden, insbesondere bei der Verfügbarkeit von Speicherkapazitäten. Entsprechend hat die EU im Rahmen des NZIA das Ziel von einer Injektionskapazität von 50 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr für das Jahr 2030 festgehalten. Aktuelle Prognosen schätzen, dass die abgeschiedenen Mengen CO_2 (hauptsächlich fossiles CO_2) diese Kapazität übersteigen werden. Zudem zeichnet sich ab, dass die Diskrepanz zwischen Abscheide-

und Speicherkapazitäten bis in die 2030er Jahre bestehen bleibt. Es ist somit ungewiss, ob zukünftig die entsprechende CCS-Infrastruktur für die abgeschiedenen Mengen CO_2 bereitsteht.[247]

Ungewissheit ergibt sich zusätzlich daraus, dass die ersten CCS-Großprojekte in Europa erst im Zeitraum 2025 bis 2030 in Betrieb gehen und somit bisher keine Erfahrungen mit der Skalierung der Technologie vorliegen.

Empfehlung 19: Der Hochlauf der CO_2-Infrastruktur sollte die zusätzlichen Mengen für die CO_2-Entnahme berücksichtigen, damit sie ausreichend dimensioniert ist und effizient aufgebaut wird. Entsprechend sollten in den entsprechenden Planungen die Mengengerüste aus der LNe einbezogen und zukünftig nachverfolgt werden. Dafür sind die Entwicklung von CCS-basierter CO_2-Entnahme und ihre Auswirkungen auf die CCU/S-Infrastruktur in den Evaluierungsbericht des KSpG aufzunehmen.

6.3 CO_2-Entnahmen im Klimaschutzgesetz

6.3.1 Zielverankerung von CO_2-Entnahmen im Klimaschutzgesetz

Im KSG sind separate Ziele für die Emissionsminderung, für den netto-negativen Beitrag des LULUCF-Sektors und für technische Senken festgelegt

Die Erreichung der THG-Neutralität und der THG-Negativität beruht im KSG auf drei separaten rechtsverbindlichen Zielen:

- THG-Minderungsziele für die deutschen Gesamtemissionen ohne LULUCF (§ 3 KSG, Anlagen 2, 2a und 3 KSG sowie § 5 Abs. 8 KSG)
- Ziele für den netto-negativen Beitrag des LULUCF-Sektors (§ 3a KSG)
- Ziele für technische Senken (§ 3b KSG)

CO_2-Entnahmen leisten einen Beitrag zur Erreichung von zwei dieser drei Ziele: Entnahmen, die im LULUCF-Sektor berichtet werden, fließen in die Zielerreichung nach § 3a KSG ein. Andere Entnahmen wirken sich auf die Zielerreichung gemäß § 3b KSG aus. Während die Zielwerte für den LULUCF-Sektor bereits gesetzlich festgelegt sind, stehen die konkreten Zielwerte für technische Senken noch aus. Die Bundesregierung wird diese Zielwerte gemäß § 3b KSG für die Jahre 2035, 2040 und 2045 unter Berücksichtigung der besonderen Bedeutung des LULUCF-Sektors und auf Basis der LNe per Rechtsverordnung erlassen.

Technische Senken erhöhen das Ambitionsniveau der deutschen Klimaschutzpolitik

Bei den THG-Minderungszielen nach § 3 KSG ist zwischen Brutto- und Netto-Minderungszielen zu unterscheiden. Die Zwischenziele für 2030 und 2040 (§ 3 Abs. 1 KSG) sowie die Jahresemissionsgesamtmengen in Anlage 2, die sektoralen Jahresemissionsmengen in Anlage 2a und der Minderungspfad in Anlage 3 sind Brutto-Minderungsziele. Das bedeutet, dass sie eigenständige Minde-

[247] (Cavanagh & Lockwood, 2024).

rungsziele darstellen, die nicht mit den CO_2-Entnahmen nach §§ 3a oder 3b KSG verrechnet werden können. Dies gilt ebenfalls für die noch zu definierenden Minderungsziele für die Jahre 2041 bis 2045.[248]

Die beiden Ziele der THG-Neutralität bis 2045 und der THG-Negativität nach 2050 (§ 3 Abs. 2 KSG) stellen hingegen Netto-Minderungsziele dar. Zu ihrer Erreichung werden verbleibende Restemissionen mit dem netto-negativen Beitrag des LULUCF-Sektors (§ 3a KSG) und mit technischen Senken (§ 3b KSG) verrechnet.

Die Ziele für technische Senken gemäß § 3b KSG gelten somit zusätzlich zu den bereits bestehenden Minderungszielen (§ 3 Abs. 1 KSG) und dem LULUCF-Ziel (§ 3a KSG). Die separate Zielverankerung stellt sicher, dass Emissionsminderungen nicht durch CO_2-Entnahmen ersetzt werden können. Dies trägt zu einer dauerhaften Transformation in den Sektoren bei und beugt Mitigation Deterrence vor. Durch den Einsatz von technischen Senken werden somit weder Bemühungen zur Emissionsminderung noch Bemühungen zur Erreichung der LULUCF-Ziele reduziert.

Ein Überblick über die deutsche Klimazielarchitektur im KSG ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Überblick über die deutsche Klimazielarchitektur im KSG

Jahr	Netto-THG-Minderung gemäß § 3 Abs. 2 KSG	Brutto-THG-Minderung gemäß § 3 Abs. 1 KSG	Netto-negativer Beitrag des LULUCF-Sektors gemäß § 3a KSG	Technische Senken gemäß § 3b KSG
2030	-	mind. 65 %	mind. -25 Mt*	-
2035	-	-	-	noch festzulegen
2040	-	mind. 88 %	mind. -35 Mt*	noch festzulegen
2045	100 %	Gesetzgebungsvorschlag bis spätestens 2032	mind. -40 Mt*	noch festzulegen
Nach 2050	Netto-negative Emissionen	-	-	-

* Im vierjährigen Mittel.

6.3.2 Zielüberprüfung und MRV auf Inventarebene

Die Ziele des KSG werden anhand des nationalen THG-Inventars überprüft

Die Ziele des KSG folgen der Inventarlogik. Das bedeutet, dass die Zielerreichung anhand des nationalen THG-Inventars überprüft wird. Dies gilt für die Minderungsziele (§ 3 KSG) ebenso wie für die LULUCF-Ziele (§ 3a KSG) und die Ziele für technische Senken (§ 3b KSG).

[248] Spätestens im Jahr 2032 wird die Bundesregierung gemäß § 4 Abs. 1 KSG einen Gesetzgebungsvorschlag zur Festlegung dieser Minderungsziele vorlegen.

Damit CO_2-Entnahmemethoden auf die Ziele nach §§ 3a und 3b KSG einzahlen können, müssen daher Methodiken zu ihrer Berichterstattung im Inventar existieren (Berichterstattungsmethodiken). Diese Berichterstattungsmethodiken werden in der Regel nicht national, sondern international erarbeitet und abgestimmt. Zunächst erarbeitet der IPCC hierfür Vorschläge und hält sie in sogenannten IPCC-Richtlinien fest. Daraufhin werden sie von den UNFCCC-Vertragsstaaten politisch abgestimmt. Hierbei können noch Änderungen vorgenommen werden. Erst wenn sich die UNFCCC-Staaten auf eine Annahme der IPCC-Richtlinien geeinigt haben, sind die dort aufgeführten Methodiken für die internationale Klimaberichterstattung und somit auch für die Erstellung des nationalen THG-Inventars maßgeblich (im Folgenden: UNFCCC-geeinte Berichterstattungsmethodiken).

Inventar-Berichterstattungsmethodiken unterscheiden sich von Methodiken zur Projektzertifizierung

Inventar-Berichterstattungsmethodiken unterscheiden sich in ihrer Logik und Funktionsweise von Methodiken zur Projektzertifizierung. Während Erstere die Berichterstattung einzelner Brutto-CO_2-Entnahmen im THG-Inventar ermöglichen, dienen Letztere dazu, die Netto-CO_2-Entnahme eines konkreten CO_2-Entnahmeprojekts entlang der gesamten Prozesskette zu zertifizieren. Methodiken zur Projektzertifizierung (beispielsweise im Rahmen des europäischen CRCF) folgen somit einer Projektlogik, während Berichterstattungsmethodiken einer Inventarlogik folgen.

Es handelt sich somit um zwei unterschiedliche Arten von Methodiken, die jeweils in verschiedenen wissenschaftlichen und politischen Prozessen ausgearbeitet werden. Dabei werden unterschiedliche Systemgrenzen und Funktionsweisen angewendet – etwa das Quellprinzip in Inventaren im Gegensatz zum Prozesskettenprinzip auf Projektebene (siehe auch Infobox 2 und Kapitel 6.4.1). Deshalb bedeutet es nicht automatisch, dass eine CO_2-Entnahmemethode im nationalen THG-Inventar berichtet werden kann, nur weil eine CRCF-Methodik zur Projektzertifizierung existiert. Ausschlaggebend hierfür sind die Berichterstattungsmethodiken. Sie sind Grundvoraussetzung dafür, dass eine CO_2-Entnahmemethode bei den Zielen nach §§ 3a, 3b KSG berücksichtigt werden kann.

Die Berichterstattung in nationalen THG-Inventaren

Staaten berichten über THG-Emissionen und -Senken nach den Vorgaben der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC). Nationale THG-Inventare bilden dabei das zentrale Element der Berichterstattung (Artikel 4, 12 UNFCCC). Industriestaaten (Annex-1-Länder) sind verpflichtet, ihr THG-Inventar jährlich zu berichten. Die Quantifizierung von THG-Emissionen und ihres Abbaus hat dabei seit dem Berichtsjahr 2015 den Methodik-Richtlinien des IPCC aus dem Jahr 2006 zu folgen (Beschluss 24/CP.19). Ziel der THG-Inventare ist es, die anthropogenen THG-Emissionen, die auf dem Territorium eines Staates entstehen, und deren Abbau vollständig zu erfassen. Die Erfassung der Emissionen und Entnahmen erfolgt ex post pro Kalenderjahr und basiert auf dem Allokations- bzw. Attributionsprinzip, nach dem jede Emission und jede Entnahme einer einzigen spezifischen Quelle bzw. Senke zugeordnet wird. Die aggregierte Darstellung aller Quellen und Senken im THG-Inventar erlaubt eine Vergleichbarkeit über die Zeit. Anhand der relativen Veränderungen über Zeiträume, beispielsweise gegenüber einem Basisjahr, kann die Minderung von Emissionen oder die Steigerung von Entnahmen bemessen werden. Klimaziele wie das Ziel der EU, ihre THG-Emissionen bis 2030 um 55 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren, basieren auf diesem Vergleich. Die gesammelten Daten werden nach einem einheitlichen Standard in tabellarischer Form, den sogenannten Common Reporting Tables (CRT), berichtet.

Infobox 2: Nationale THG-Inventare

Im THG-Inventar werden Prozessschritte von CO_2-Entnahmeprojekten teils in unterschiedlichen CRT-Kategorien berichtet

Im Inventar werden jährlich alle Quellen und Senken von THG innerhalb der deutschen Territorialgrenzen berichtet. Teilprozesse von Projektprozessketten werden dabei mitunter in verschiedenen Berichtsjahren und in unterschiedlichen CRT-Kategorien berichtet. Entsteht bei einem Prozessschritt eine Emission, wird in der jeweiligen CRT-Kategorie eine Brutto-Emission erfasst. Wird durch einen Prozessschritt der Atmosphäre CO_2 entnommen, so wird in der jeweiligen CRT-Kategorie eine Brutto-CO_2-Entnahme berichtet.

Die Funktionsweise der Inventarberichterstattung lässt sich beispielhaft anhand der BECCS-Prozesskette veranschaulichen. Hier werden verschiedene Teile des Prozesses in unterschiedlichen CRT-Kategorien erfasst:

- Während des Biomassewachstums wird eine CO_2-Entnahme in CRT-Kategorie 4 (LULUCF) berichtet. Dies geschieht in dem Jahr bzw. in den Jahren des Wachstums und in dem Staat, in dem die Biomasse wächst.[249]
- Im Jahr der Ernte wird im Falle mehrjähriger Biomasse eine Emission in CRT-Kategorie 4 (LULUCF) desselben Staates berichtet.
- Die Emissionen, die beim Transport und der Verarbeitung der Biomasse anfallen, werden im Regelfall in CRT-Kategorie 1 (Energie) des jeweiligen Landes berichtet.
- Bei der thermischen Verwertung der Biomasse mit CCS wird eine Rückgewinnung entweder in CRT-Kategorie 1 (Energie) oder in CRT-Kategorie 2 (Industrie) berichtet (abhängig von der CO_2-Quelle). Dies geschieht in dem Land, in dem die Abscheidung stattfindet. Wenn man nur die CRT-Kategorie der Rückgewinnung betrachtet, entspricht sie rechnerisch einer vermiedenen Emission.

Betrachtet man den BECCS-Prozess bei mehrjähriger Biomasse über die CRT-Kategorien hinweg, so ist der Prozess im Jahr der Ernte bestenfalls CO_2-neutral, denn der Abbau von CO_2 aus der Atmosphäre erfolgte schon in den Jahren des Biomassewachstums und wurde dort als CO_2-Entnahme in CRT 4 (LULUCF) berichtet.

Das BECCS-Beispiel veranschaulicht, weshalb sich anhand des nationalen THG-Inventars keine pauschalen Aussagen über die Netto-Entnahmeleistung einzelner Entnahmeprojekte treffen lassen. Das liegt daran, dass das Inventar nicht dafür gedacht ist, einzelne Projekte zu bewerten. Hierfür muss stattdessen eine Quantifizierung entlang der gesamten Prozesskette erfolgen, beispielsweise im Rahmen von Projektzertifizierungen (siehe Kapitel 6.4).

Die buchhalterische Trennung von Teilprozessen in verschiedenen CRT-Kategorien des THG-Inventars ist jedoch keine Besonderheit von CO_2-Entnahmeaktivitäten. Auch bei anderen privaten und öffentlichen Gütern, beispielsweise einer Windkraftanlage, werden die Vorkettenemissionen im Inventar nach diesem Prinzip berichtet.

[249] Unterjährige Biomasse, zum Beispiel dedizierte Energiepflanzen, werden nicht in den THG-Inventaren erfasst.

Für viele CO_2-Entnahmemethoden fehlen bisher Inventar-Berichterstattungsmethodiken

Tabelle 5 bietet eine Übersicht über alle CO_2-Entnahmemethoden, die im Rahmen der LNe betrachtet werden. Bislang existieren nur für einen Teil davon Berichterstattungsmethodiken (siehe Spalte A). Dies sind vor allem CO_2-Entnahmemethoden, die in der CRT-Kategorie 4 (LULUCF) berichtet werden. Davon abgesehen besteht auch für BECCS bereits eine Methodik. Für alle anderen Entnahmemethoden existieren bisher keine Berichterstattungsmethodiken. Es steht also weder fest, wie sie zukünftig im Inventar quantifiziert werden, noch innerhalb welcher CRT-Kategorie sie zu berichten sind.

Inventar-Berichterstattungsmethodiken für neuartige CO_2-Entnahmemethoden werden aktuell erarbeitet und in einem IPCC-Methodikbericht bereitgestellt

Der IPCC hat für Ende 2027 einen neuen Methodikbericht[250] angekündigt. Dieser soll das bestehende Regelwerk von IPCC-Richtlinien ergänzen und Berichterstattungsmethodiken für einige der bisher nicht im Inventar abgebildeten CO_2-Entnahmemethoden bereitstellen. Welche CO_2-Entnahmemethoden der IPCC dabei voraussichtlich berücksichtigen wird, ist in Tabelle 5 dargestellt (siehe Spalte B). Die CO_2-Entnahmemethoden in den Spalten A und B können in Zukunft also voraussichtlich bei der Zielerreichung nach §§ 3a und 3b KSG berücksichtigt werden.

Uneinigkeiten zwischen den Vertragsstaaten haben jedoch bereits zu ersten Verzögerungen bei der Berichterstellung geführt.[251] Die angestrebte Veröffentlichung Ende 2027 erscheint daher unrealistisch. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass rechtzeitig bis zum ersten Zieljahr für technische Senken (2035) UNFCCC-geeinte Berichterstattungsmethodiken zur Verfügung stehen.

Tabelle 5 Berücksichtigung der verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden in den IPCC-Richtlinien

A **Berichterstattungsmethodik bereits vorhanden[252]**	B **Berichterstattungsmethodik voraussichtlich im 2027er Methodikbericht enthalten**	C **Aktuell keine Berichterstattungsmethodik durch IPCC vorgesehen**
• Aufforstung* • Agroforstsysteme* • Forstwirtschaft* • Humusanreicherung im Boden* • Wiedervernässung von Mooren*	• Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle b) außerhalb von Böden • Beschleunigte Verwitterung • Stoffliche Biomassenutzung • Beschleunigte Karbonatisierung**	• Künstlicher Auftrieb • Kultivierung und Nutzung von Makroalgen (marine Biomasse)*** • Künstliche Photosynthese

[250] Methodology Report on Carbon Dioxide Removal Technologies, Carbon Capture, Utilization and Storage.
[251] (Merner, 2025).
[252] Für diese Entnahmemethoden wurden seitens des IPCC bereits Methodiken zur Inventarberichterstattung bereitgestellt. Diese befinden sich entweder in den 2006er IPCC-Richtlinien, dem „2013 Wetlands Supplement" oder dem 2019er „Refinement".

A **Berichterstattungsmethodik bereits vorhanden[252]**	B **Berichterstattungsmethodik voraussichtlich im 2027er Methodikbericht enthalten**	C **Aktuell keine Berichterstattungsmethodik durch IPCC vorgesehen**
• Stärkung küstennaher Ökosysteme (Blue Carbon Enhancement)* • Holzprodukte* • Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle a) in Böden • BECCS	• BECCU/DACCU • Alkalinitätserhöhung** • DACCS	

* Natürliche Senke

** Für die beiden Entnahmemethoden "Beschleunigte Karbonatisierung" und "Alkalinitätserhöhung" ist noch unklar, ob eine Berichterstattungsmethodik seitens IPCC bereitgestellt wird. Sie sind zwar im Scoping Report gelistet, jedoch unter Vorbehalt.

*** Eine Nutzung von Makroalgen im Zusammenhang mit BECCS oder Pflanzenkohle ist über die jeweilige Methodik bereits abgedeckt.

6.3.3 Zuordnung der CO_2-Entnahmemethoden zu §§ 3a und 3b KSG

Bisher gibt es keine eindeutige Zuordnung der verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden zu §§ 3a und 3b KSG

Da CO_2-Entnahmen sowohl zu den LULUCF-Zielen nach § 3a KSG als auch zu den Zielen für technische Senken nach § 3b KSG beitragen können, muss eindeutig festgelegt werden, welche CO_2-Entnahmemethode in Zukunft auf welches der beiden Ziele „einzahlt".

Eine Legaldefinition des Begriffs „technische Senken" wurde im KSG nicht vorgenommen. Auch international existiert bisher keine einheitliche Definition des Begriffs.[253] Daher gibt es derzeit kein Vorbild, an dem sich die Bundesrepublik bei der Definition des Ziels für technische Senken orientieren könnte.

Im Gegensatz zu den technischen Senken ist der Anwendungsbereich der LULUCF-Ziele bereits definiert und international etabliert. Da jede CO_2-Entnahme nur auf eins der Ziele angerechnet wer-

[253] Die EU verwendet zum Beispiel den Begriff „industrielle CO_2-Entnahme" (industrial carbon removals), wenn sie von CO_2-Entnahmemethoden spricht, die nicht ihrem Verständnis von „natürlicher CO_2-Entnahme" (land-based carbon removals) entsprechen. Diese Begriffe nutzt sie sowohl in ihrer Industrial Carbon Management Strategy als auch in ihrer Mitteilung zum EU-Klimaziel 2040 – allerdings teils inkonsistent und ohne sie genauer zu definieren.

den kann, muss der Anwendungsbereich von § 3b KSG in Abgrenzung zu dem von § 3a KSG definiert werden. Technische Senken sind demnach alle CO_2-Entnahmemethoden, die nicht im LULUCF-Ziel berücksichtigt werden.

Der im KSG definierte LULUCF-Sektor entspricht gemäß Anlage 1 KSG exakt der UNFCCC-geeinten CRT-Kategorie 4. Somit setzt sich der Sektor aus allen THG-Quellen und THG-Senken zusammen, die gemäß UNFCCC-Vorgaben und der europäischen Governance-Verordnung in CRT-Kategorie 4 zu berichten sind. Tabelle 6 (Spalte A) gibt einen Überblick darüber, welche Entnahmemethoden aktuell bereits von der LULUCF-Sektordefinition umfasst sind.

Für die meisten neuartigen CO_2-Entnahmemethoden ist noch nicht abschließend geklärt, in welcher CRT-Kategorie sie in Zukunft berichtet werden. Im Anfang 2025 veröffentlichten „Scoping Report" zum Methodikbericht nimmt der IPCC jedoch eine erste vorläufige CRT-Zuordnung vor.[254] Demnach sollen in Zukunft – zusätzlich zu den CO_2-Entnahmemethoden in Tabelle 6, Spalte A – die folgenden drei CO_2-Entnahmemethoden in CRT-Kategorie 4 (LULUCF) berichtet werden:

- Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle außerhalb von Böden
- Beschleunigte Verwitterung
- Stoffliche (nicht holzbasierte) Biomassenutzung

Das bedeutet, dass diese drei CO_2-Entnahmemethoden in Zukunft voraussichtlich auf das LULUCF-Ziel nach § 3a KSG einzahlen werden.

Tabelle 6 IPCC-Zuordnung der verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden zu den UNFCCC-geeinten CRT-Kategorien

A **Berichterstattung bereits heute in CRT-Kategorie 4 (LULUCF)**	**B** **Berichterstattung voraussichtlich in CRT-Kategorie 4**	**C** **Berichterstattung definitiv oder voraussichtlich außerhalb von CRT-Kategorie 4**
• Aufforstung • Agroforstsysteme • Forstwirtschaft • Humusanreicherung im Boden • Wiedervernässung von Mooren	• Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle b) außerhalb von Böden • Beschleunigte Verwitterung • Stoffliche Biomassenutzung	• Beschleunigte Karbonatisierung* • BECCU/DACCU • BECCS • DACCS • Alkalinitätserhöhung*

[254] (IPCC, IPCC 2025 – Scoping of the Metholodlogy Report, 2025).

A **Berichterstattung bereits heute in CRT-Kategorie 4 (LULUCF)**	B **Berichterstattung voraussichtlich in CRT-Kategorie 4**	C **Berichterstattung definitiv oder voraussichtlich außerhalb von CRT-Kategorie 4**
• Stärkung küstennaher Ökosysteme (Blue Carbon Enhancement) • Holzprodukte • Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle a) in Böden		

* Für die beiden Entnahmemethoden "Beschleunigte Karbonatisierung" und "Alkalinitätserhöhung" ist noch unklar, ob eine Berichterstattungsmethodik seitens IPCC bereitgestellt wird. Sie sind zwar im Scoping Report gelistet, jedoch unter Vorbehalt.

Nicht-dauerhafte CO_2-Entnahmemethoden können prinzipiell bei der KSG-Zielüberprüfung berücksichtigt werden

Für neuartige, nicht-dauerhafte CO_2-Entnahmemethoden (beispielsweise BECCU/DACCU oder die stoffliche, nicht holzbasierte Biomassenutzung) wird der IPCC-Methodikbericht voraussichtlich Kohlenstoffspeicherkategorien etablieren. Die (Nicht-)Dauerhaftigkeit entsprechender CO_2-Entnahmen kann dadurch aggregiert über eine jährliche Zu- oder Abnahme des gesamten Kohlenstoffspeichers abgebildet werden. Die (Nicht-)Dauerhaftigkeit der CO_2-Entnahmemethode „Aufforstung" wird analog zum Beispiel bereits durch eine Abnahme des Kohlenstoffspeichers „Wald" in der CRT-Kategorie 4 (LULUCF) dargestellt.

Die Aggregierung von Zu- und Abflüssen in Kohlenstoffspeichern ermöglicht es, nicht-dauerhafte CO_2-Entnahmemethoden bei der Erreichung der Ziele nach §§ 3a und 3b KSG zu berücksichtigen. Es steht jedoch noch nicht abschließend fest, für welche konkreten Formen von BECCU, DACCU oder der stofflichen Biomassenutzung IPCC-Methodiken bereitstellt werden. Es ist also noch unklar, für welche Produkte das gebundene CO_2 im Inventar tatsächlich als Senke berichtet werden kann.

Marine CO_2-Entnahmemethoden sind nur schwer im deutschen THG-Inventar abbildbar

Marine CO_2-Entnahmemethoden können nur bedingt zur Erreichung der Ziele nach §§ 3a und 3b KSG beitragen. Dies ist in erster Linie auf das Territorialprinzip von THG-Inventaren zurückzuführen, wonach Inventare nur THG-Flüsse innerhalb der nationalen Territorialgrenzen erfassen dürfen. CO_2-Entnahmen in internationalen Gewässern (außerhalb der deutschen AWZ) können folglich nicht im deutschen THG-Inventar berichtet werden. Auch für einige marine CO_2-Entnahmeaktivitäten, die in territorialen Gewässern durchgeführt werden (beispielsweise in der AWZ oder in Flüssen), gilt eine Erfassung der CO_2-Entnahmen im Inventar perspektivisch als schwierig, da die angrenzenden internationalen Gewässer, in denen es potenziell zu Wiederfreisetzungen kommen kann, nicht in den Anwendungsbereich von THG-Inventaren fallen.

In den IPCC-Richtlinien sind marine CO_2-Entnahmemethoden bisher weitgehend unberücksichtigt. Eine Ausnahme bildet die Stärkung küstennaher Ökosysteme (Blue Carbon Enhancement), für die im 2013er IPCC-Wetlands Supplement eine Berichterstattungsmethodik innerhalb von CRT-Kate-

gorie 4 (LULUCF) bereitgestellt wurde (siehe Tabelle 6 Spalte A). Die Anwendung des 2013er Supplement ist bisher jedoch weder für die internationale noch für die europäische Berichterstattung gemäß EU-LULUCF-Verordnung verpflichtend.

Im neuen Methodikbericht wird der IPCC eventuell eine weitere marine CO_2-Entnahmemethode berücksichtigen. So wurde im Scoping Report des Methodikberichts eine Berichterstattungsmethodik für die „Alkalinitätserhöhung" in Aussicht gestellt. Bei den vergangenen IPCC-Treffen war sich die Staatengemeinschaft jedoch uneins darüber, ob sie eine entsprechende Methodik bereitstellen möchte. Manche Ländervertretende gaben zu bedenken, dass ausreichend Belege für die tatsächliche Klimaschutzwirkung der CO_2-Entnahmemethode fehlten. Zudem sei die Messbarkeit mit signifikanten Unsicherheiten behaftet.[255]

Die CO_2-Entnahmemethode „Kultivierung und Nutzung von Makroalgen (marine Biomasse)", die im Rahmen der LNe ebenfalls betrachtet wird, ist im IPCC-Prozess bislang nicht berücksichtigt. Dies liegt unter anderem daran, dass man den Effekt des Absenkens von mariner Biomasse auf den Meeresgrund vermutlich auch in Zukunft nur schwer in territorialen Grenzen quantifizieren kann. Andere Anwendungen von Makroalgen – beispielsweise in Kombination mit BECCU/S oder der Verarbeitung zu Pflanzenkohle oder anderen Produkten – sind jedoch denkbar und können perspektivisch über die jeweilige CO_2-Entnahmemethode (BECCU/S, Pflanzenkohle etc.) im Inventar abgebildet werden.

Alle CO_2-Entnahmemethoden außerhalb von CRT-Kategorie 4 (LULUCF) sollten als technische Senken definiert werden und zum Ziel nach § 3b KSG beitragen

Den bisherigen Ausführungen entsprechend sollte die Bundesregierung folgendermaßen vorgehen:

Empfehlung 20: CO_2-Entnahmemethoden sollten bei der Zuordnung zu den Zielen nach §§ 3a, 3b KSG nur berücksichtigt werden, wenn für sie entweder bereits eine Berichterstattungsmethodik existiert oder der IPCC plant, sie im neuen Methodikbericht zu berücksichtigen. Alle CO_2-Entnahmemethoden, die entweder bereits jetzt oder gemäß IPCC-Scoping Report voraussichtlich in CRT-Kategorie 4 (LULUCF) zu berichten sind, tragen zum LULUCF-Ziel nach § 3a KSG bei. Die restlichen CO_2-Entnahmemethoden sollten als technische Senken definiert werden und zum Ziel nach § 3b KSG beitragen.

Hieraus ergibt sich folgende Zuordnung:

Tabelle 7 Zuordnung der verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden zu § § 3a, 3b KSG

§ 3a KSG CRT-Kategorie 4 (LULUCF)	§ 3b KSG (technische Senken)	Vorerst nicht berücksichtigt
• Aufforstung • Agroforstsysteme	• BECCS • DACCS	• Künstlicher Auftrieb

[255] (Merner, 2025).

§ 3a KSG CRT-Kategorie 4 (LULUCF)	§ 3b KSG (technische Senken)	Vorerst nicht berücksichtigt
• Forstwirtschaft • Humusanreicherung im Boden • Wiedervernässung von Mooren • Stärkung küstennaher Ökosysteme (Blue Carbon Enhancement) • Holzprodukte • Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle • in Böden • außerhalb von Böden • Beschleunigte Verwitterung • Stoffliche Biomassenutzung	• BECCU/DACCU • Ggf. Alkalinitätserhöhung* • Ggf. Beschleunigte Karbonatisierung*	• Kultivierung und Nutzung von Makroalgen (marine Biomasse)** • Künstliche Photosynthese

* "Beschleunigte Karbonatisierung" und "Alkalinitätserhöhung" sollten nur in § 3b KSG berücksichtigt werden, sofern eine Berichterstattungsmethodik im IPCC-Methodikbericht bereitgestellt wird.
** Eine Nutzung von Makroalgen mit BECCS oder Pflanzenkohle ist perspektivisch über die jeweilige Entnahmemethode abgedeckt. Die Absenkung von Makroalgen auf den Meeresgrund sollte hingegen vorerst nicht in den Zielen gemäß §§ 3a und 3b KSG berücksichtigt werden.

Aus dieser Zuordnung ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Einige neuartige CO_2-Entnahmemethoden tragen zukünftig zur Erreichung der Ziele nach § 3a KSG bei.
- Die Ziele für technische Senken gemäß § 3b KSG sind hauptsächlich durch CCU/S-basierte CO_2-Entnahmemethoden zu erreichen. Zudem können eventuell die beiden Entnahmemethoden "Beschleunigte Karbonatisierung" und "Alkalinitätserhöhung" berücksichtigt werden. Dies ist jedoch davon abhängig, ob für sie eine Berichterstattungsmethodik im IPCC-Methodikbericht bereitgestellt wird.

Hintergrund der Zuordnung zu den Zielen nach §§ 3a und 3b KSG und eigene Entwicklung von Berichterstattungsmethodiken

Einige neuartige CO_2-Entnahmemethoden kombinieren natürliche und technische Prozessschritte. Dies betrifft vor allem Pflanzenkohle, die beschleunigte Verwitterung sowie die stoffliche Biomassenutzung. Das vorliegende Grundlagendokument empfiehlt eine Zuordnung dieser Entnahmemethoden zu den Zielen nach § 3a KSG im Einklang mit dem erwarteten internationalen Vorgehen. Dafür sprechen die folgenden Gründe:

1. Eine abweichende nationale Kategorisierung von CO_2-Entnahmen entgegen den internationalen und europäischen Berichtspflichten sollte vermieden werden, da es zu zusätzlichem Aufwand und einer höheren Komplexität führen würde.
2. Die Aufnahme neuer Quell- und Senkengruppen in bestehende CRT-Kategorien ist gängige Praxis. Zum Beispiel wurden im Jahr 2023 künstliche Gewässer gemäß des 2019er IPCC-Refinements in das deutsche THG-Inventar aufgenommen. Auch methodische

Weiterentwicklungen, insbesondere im LULUCF-Bereich, führen regelmäßig zu Änderungen an Emissions- und Senkengrößen. In Deutschland hat dies seit dem Jahr 2021 zu einem erheblichen Zuwachs an berichteten Emissionen im LULUCF-Sektor geführt. Entsprechend ließe sich auch die Aufnahme neuer Senkengruppen in die LULUCF-Sektordefinition vornehmen.

3. Bereits heute wird die Senkengruppe Holzprodukte mit technischen Prozessschritten in der CRT-Kategorie 4 (LULUCF) berichtet. Neuartige CO_2-Entnahmemethoden, die biogenen Kohlenstoff in Produkten binden (z. B. Pflanzenkohle außerhalb von Böden, stoffliche Biomassenutzung), sollten daher analog abgebildet werden.
4. Die Einbringung von Pflanzenkohle in Böden kann bereits heute in CRT-Kategorie 4 berichtet werden. Eine Änderung dieser Zuordnung in den IPCC-Richtlinien ist nicht realistisch.

Eventuell werden erst in den 2030er Jahren UNFCCC-geeinte Berichterstattungsmethodiken für neuartige CO_2-Entnahmen zur Verfügung stehen. Sollte dies nach Ansicht der Bundesregierung zu spät sein – etwa, weil es die Zielüberprüfung von § 3b KSG im ersten Zieljahr (2035) gefährdet –, könnten auf europäischer Ebene eigene Methodiken für (einzelne) Entnahmemethoden entwickelt werden. Möglicherweise ist auch die EU an einer zeitnahen Berichterstattung von neuartigen CO_2-Entnahmemethoden im europäischen THG-Inventar interessiert, insbesondere falls permanente CO_2-Entnahmen in den EU-ETS integriert und diese Änderung im europäischen NDC berücksichtigt werden sollen.

Grundsätzlich können Staaten auch CO_2-Entnahmen berichten, für die keine IPCC-Methodik existiert.[256] Dieses Vorgehen muss jedoch mit den IPCC-Richtlinien kompatibel sein und wissenschaftlichen Gütekriterien genügen.[257] In der EU müssen zudem die Vorgaben der europäischen Governance-Verordnung (EU) 2018/1999 eingehalten werden. Als Übergangslösung könnte die EU eigene Berichterstattungsmethodiken entwickeln, die sich am CRCF orientieren. Sobald UNFCCC-geeinte Berichterstattungsmethodiken bereitstehen, sollte die Berichterstattung entsprechend angepasst werden.

Infobox 3: Einordnung der Möglichkeit einer alternativen Zuordnung zu §§ 3a und 3b KSG

Die Datengrundlage für die Überprüfung der Zielerreichung sicherstellen

Zur Überprüfung der Zielerreichung nach §§ 3a und 3b KSG ist eine Unterlegung der Datenerhebung durch die amtliche Statistik entscheidend. Bislang existiert eine solche Datengrundlage für technische Senken nach § 3b KSG beim zuständigen UBA jedoch nicht. Teilweise werden bereits jetzt relevante Daten über unterschiedliche Instrumente und Berichtspflichten erfasst. Diese stehen dem UBA jedoch nicht zur Verfügung.

Empfehlung 21: Die Bundesregierung sollte sicherstellen, dass das UBA in Zukunft über die erforderliche Datengrundlage zur Überprüfung der Ziele nach § 3b KSG verfügt.

Hierfür bietet sich folgendes Vorgehen an:

[256] (IPCC, IPCC 2025 – Scoping of the Metholodlogy Report, 2025).

[257] Decision 24/CP.19 UNFCCC.

- In einem ersten Schritt sind die notwendigen Daten zu spezifizieren.
- In einem zweiten Schritt sind die relevanten Akteure zu identifizieren (z. B. Betreiber von BECCS- oder DACCS-Anlagen).
- In einem dritten Schritt könnten Anlagenbetreiber, die Förderinstrumente in Anspruch nehmen, verpflichtet werden, dem UBA die Menge an abgeschiedenem CO_2, unterteilt nach den Herkünften fossil, biogen und atmosphärisch, zu melden. Im Rahmen des Monitorings des EU-ETS wird die Erhebung dieser Daten bei der CO_2-Abscheidung an emissionshandelspflichtigen Anlagen bereits vorgeschrieben. Diese Daten könnten auch für die nationale Berichterstattung genutzt werden.
- Hierzu sollte eine Ergänzung der Zweckbestimmung der Datennutzung im Sinne des § 5 Abs. 6 und Abs. 7 KSG ermöglicht werden.

6.3.4 Zielerreichung durch CO_2-Entnahmen im Ausland

Die Möglichkeit zur Anrechnung von extraterritorialen CO_2-Entnahmen auf die deutschen Klimaziele ist in § 3 Abs. 3 KSG geregelt

Relevant bei der Zielsetzung für technische Senken ist ebenfalls, ob neben CO_2-Entnahmen, die innerhalb des deutschen Territoriums erzielt und deshalb im nationalen THG-Inventar berichtet werden, auch CO_2-Entnahmen im Wege staatenübergreifender Mechanismen auf die nationalen Ziele angerechnet werden können. CO_2-Entnahmen in Ländern mit günstigeren Bedingungen für bestimmte Entnahmemethoden (beispielsweise günstige erneuerbare Energien) könnten volkswirtschaftlich effizienter sein als eine rein territoriale Zielerreichung.

Diese Frage erfährt aktuell besondere Aufmerksamkeit, da sich die Bundesregierung im Koalitionsvertrag folgendermaßen äußerte: „Die deutschen und europäischen Klimaziele erreichen wir vorrangig durch Reduktion von CO_2 und anderen Treibhausgasen in Deutschland, zusätzlich durch Anrechnung negativer Emissionen sowie in begrenztem Umfang durch hochqualifizierte [sic] und glaubwürdige CO_2-Minderungen in außereuropäischen Partnerländern.“[258] Die Formulierung lässt dabei offen, ob sich die angestrebte Anrechnung negativer Emissionen auf CO_2-Entnahmen innerhalb des deutschen Territoriums oder auf CO_2-Entnahmen in europäischen oder außereuropäischen Partnerländern bezieht.

Im KSG ist diese grundsätzliche Frage in § 3 Abs. 3 KSG geregelt: „Die Möglichkeit, die nationalen Klimaschutzziele teilweise im Rahmen von staatenübergreifenden Mechanismen zur Minderung von Treibhausgasemissionen zu erreichen, bleibt unberührt.“ Das Gesetz eröffnet grundsätzlich die Möglichkeit, nationale Klimaschutzziele teilweise über An- und Zukäufe von Emissionsrechten aus der Europäischen Union bzw. Drittstaaten zu erreichen. In der derzeitigen Praxis beschränkt sich dies jedoch auf Zertifikate im EU-ETS. Eine Anrechnung von Emissionsreduktionsmaßnahmen in Drittländern ist derzeit ausgeschlossen.

Grundsätzlich sind zur Zielerfüllung sowohl europäische als auch internationale Mechanismen möglich: Gemäß der Entwurfsbegründung umfasst dies den Europäischen Emissionshandel, aber auch zwischenstaatliche Mechanismen auf Grundlage europäischen Rechts, wie die Verlinkung regionaler

[258] (CDU, CSU, & SPD, 2025).

Emissionshandelssysteme, sowie internationale Mechanismen in Umsetzung von Artikel 6 des Übereinkommens von Paris (ÜvP).[259] Im Rahmen der COP29, der 29. UN-Klimakonferenz, in Aserbaidschan wurden erhebliche Fortschritte bei der Operationalisierung der kooperativen Ansätze nach Artikel 6.2 ÜvP und dem multilateralen Mechanismus nach Artikel 6.4 ÜvP gemacht (siehe Infobox 4). Sofern endgültig operationalisiert, stünde ein internationaler Mechanismus zum Transfer von CO_2-Entnahmen zur Verfügung.

Die deutsche Zielsetzung ist beeinflusst vom EU-Klimaziel

Ob auf einen internationalen Mechanismus zur Zielerfüllung zurückgegriffen werden darf, bestimmt nicht allein das deutsche, sondern auch das europäische Recht. Auf europäischer Ebene sind sowohl die Klimaneutralitätsverpflichtung für das Jahr 2050 als auch das Klimaziel für das Jahr 2030 so ausgestaltet, dass sie durch Emissionsminderungen innerhalb der EU erreicht werden müssen. Dies gilt auch für die Ziele im NDC der EU. Im derzeitig gültigen NDC aus dem Jahr 2023 verpflichtet sich die EU dazu, bis 2030 eine Netto-THG-Emissionsreduktion von mindestens 55 Prozent verglichen mit dem Jahr 1990 zu erreichen.[260] Dabei sollen alle Emissionsreduktionsmaßnahmen innerhalb des Territoriums der EU-Mitgliedstaaten durchgeführt werden. Die Möglichkeit, Zertifikate aus Drittstaaten zuzukaufen, ist zurzeit ausgeschlossen.

Bislang beinhalten weder das EU-Recht noch der EU-NDC ein konkretes CO_2-Entnahmeziel, das in der Folge direkt von dieser Einschränkung umfasst wäre. Die Auswirkungen dieses Verbots sind daher nicht abschließend geklärt. Darüber hinaus wird auch auf europäischer Ebene erwogen, die Zielerreichung durch Leistungen im Ausland zu ermöglichen. Der Vorschlag der Kommission für das 2040-Ziel sieht vor, dass bis zu drei Prozent der Netto-Emissionsminderung durch internationale Zertifikate unter Artikel 6 des Pariser Abkommens erbracht werden können. Über die genaue Funktionsweise dieser Obergrenze besteht jedoch noch Unklarheit, da der Vorschlag der Kommission noch das parlamentarische Verfahren durchlaufen muss.

Auch im Rahmen des EU-ETS dürfen seit Beginn der vierten Handelsperiode (ab 2021 bis 2030) keine internationalen Emissionsgutschriften zur Erfüllung der Verpflichtungen eingesetzt werden. Sollten CO_2-Entnahmen zukünftig im ETS berücksichtigt werden, so müsste auf europäischer Ebene geregelt werden, ob der Handel mit internationalen CO_2-Entnahmezertifikaten ebenfalls aus dem EU-ETS ausgeschlossen wird.

Die Möglichkeit der extraterritorialen Zielerreichung muss weiter konkretisiert werden

Abgesehen von den Rahmenbedingungen, die auf europäischer Ebene gesetzt werden, besteht Klärungsbedarf, ob der Mechanismus nach Artikel 6.4 ÜvP in Bezug auf den Transfer von CO_2-Entnahmen unter § 3 Abs. 3 KSG fällt.

[259] BT-Drs. 19/14337, 27.
[260] (EU-Kommission, 2023).

§ 3 Abs. 3 KSG eröffnet die Möglichkeit der Nutzung staatenübergreifender Mechanismen zur „Minderung von Treibhausgasemissionen". Sinn und Zweck der Vorschrift ist es, die Erreichung der Klimaschutzziele zu flexibilisieren. Diese Flexibilität ist „erforderlich, um anspruchsvolle Ziele ggf. teilweise durch Marktmechanismen erfüllen [sic] zu können".[261]

Dabei umfasst die Vorschrift laut der Entwurfsbegründung auch die Ziele des § 1 KSG, das heißt auch die Erreichung der THG-Neutralität. Die Erreichung von THG-Neutralität im Jahr 2045 ist ein wichtiges Ziel, das nur durch eine Kombination aus Emissionsminderungen und CO_2-Entnahmen erreicht werden kann. Mithin wäre es gemäß Sinn und Zweck daher geboten, § 3 Abs. 3 KSG auch auf Entnahmen anzuwenden. Jedoch besteht ohne eine Anpassung des Wortlauts keine Rechtssicherheit über den genauen Anwendungsbereich von § 3 Abs. 3 KSG. Daher sollte – sofern politisch gewünscht – auch die Entnahme von Treibhausgasen explizit in § 3 Abs. 3 aufgeführt werden.

Dies hätte den Vorteil, dass CO_2-Entnahmen dort vorgenommen werden können, wo die Voraussetzungen besonders vorteilhaft sind. In der praktischen Umsetzung stellen sich jedoch auch Herausforderungen dabei, die Umweltintegrität von Entnahmezertifikaten und die Vermeidung von Doppelanrechnungen sicherzustellen. Um diesen Problemen entgegenzuwirken, wurden die Vorschriften des Artikel 6.4 ÜvP gegenüber den Vorgängermechanismen unter dem Kyoto-Protokoll teilweise verschärft. Ob diese Vorschriften die Integrität des Zertifikathandels ausreichend schützen, kann derzeit noch nicht abschließend bewertet werden. Die Bundesregierung sollte sich daher, je nach politischen Zielen, für eine der beiden folgenden Optionen entscheiden:

Empfehlung 22 Option 1: Die Bundesregierung sollte den Wortlaut des § 3 Abs. 3 so anpassen, dass Emissionsminderungen und CO_2-Entnahmen gleichermaßen umfasst sind. Dies würde eine rechtssichere Möglichkeit für die Nutzung staatenübergreifender Mechanismen zum Zwecke der CO_2-Entnahme schaffen. Dadurch könnte theoretisch ein volkswirtschaftlich effizienter Klimaschutz erreicht werden, indem CO_2-Entnahmen dort durchgeführt werden, wo sie am günstigsten sind.

Option 2: Die Bundesregierung sollte klarstellen, dass die Ziele nach §§ 3, 3a und 3b KSG in Bezug auf CO_2-Entnahmen rein territorial erreicht werden müssen. Staatenübergreifende Mechanismen zum Zwecke der CO_2-Entnahme fallen nicht unter den Anwendungsbereich von § 3 Abs. 3 KSG, da hiervon lediglich Mechanismen „zur Minderung von Treibhausgasemissionen" abgedeckt sind. Dies bewahrt das hohe nationale Ambitionsniveau und vermeidet mögliche Risiken beim Monitoring und bei der Anerkennung international erbrachter Klimaschutzleistungen.

6.3.5 Ableitung der Zielwerte für technische Senken

Die Bundesregierung hat sich aus den folgenden Gründen vorgenommen, Ziele für die CO_2-Entnahme festzulegen:

- Konkrete rechtliche CO_2-Entnahmeziele demonstrieren ein starkes politisches Bekenntnis zum Klimaschutz. Sie signalisieren Investoren, Unternehmen und der Öffentlichkeit, dass die Bundesregierung verlässliche Rahmenbedingungen schafft. Diese Planungssicherheit fördert langfristige Investitionsentscheidungen in neue Technologien und Infrastrukturen. Idealerweise können

[261] BT-Drs. 19/14337, 27.

sie auch international eine Signalwirkung entfalten, um andere Länder zu motivieren, ähnliche Maßnahmen zu ergreifen.

- Durch separate Ziele für die Emissionsminderung, den netto-negativen Beitrag des LULUCF-Sektors und für technische Senken wird sichergestellt, dass die Vermeidung von Emissionen weiterhin oberste Priorität hat und Emissionsminderungen nicht durch CO_2-Entnahmen ersetzt werden können. Die Entnahme wird damit als ergänzender Ansatz verstanden, um unvermeidbare Emissionen auszugleichen und perspektivisch netto-negative Emissionen zu erreichen.
- Klar definierte Ziele für die CO_2-Entnahme ermöglichen ein kontinuierliches Monitoring der gesteckten Meilensteine, damit bei Bedarf gezielt Anpassungen vorgenommen werden können.

Für die LNe wurden zukünftige Bedarfe und Potenziale der CO_2-Entnahme basierend auf unterschiedlichen Restemissionsmengen modelliert (siehe Kapitel 3). Aus den Ergebnissen der Modellierung, der Methodenbewertung und den Diskussionen im Beteiligungsprozess lassen sich mögliche Zielwerte für technische Senken ableiten, um die Klimaziele möglichst sicher, nachhaltig und effizient zu erreichen.

Die Zielsetzung für technische Senken nach § 3b KSG erfolgt entlang der vorgenommenen Zuordnung von CO_2-Entnahmemethoden zu §§ 3a und 3b KSG (siehe Kapitel 6.3.4).

Ziele für technische Senken nach § 3b KSG sollten an dem mittleren Szenario LNe95 ausgerichtet werden

Die Ziele für technische Senken nach § 3b KSG sind so festzulegen, dass sie unter Berücksichtigung von Unsicherheiten zu einer resilienten Erreichung der übergeordneten THG-Neutralität gemäß § 3 Abs. 1 KSG beitragen. Es wird vorgeschlagen, dass sich das Ziel für technische Senken für das Jahr 2045 am mittleren Szenario LNe95 orientiert. Dadurch ergibt sich eine Bandbreite von 17 bis 28 Mio. Tonnen CO_2 für die Zielfestlegung der Bundesregierung; der obere Wert beinhaltet einen Sicherheitsaufschlag für mögliche Zielverfehlungen im LULUCF-Sektor.

LNe95 stellt ein mittleres, an Klimaneutralitätsstudien orientiertes Szenario dar. Der Mindestbedarf in der Modellierung (LNe97) ist ein sehr optimistisches Szenario mit höchster Reduktion der Restemissionen in allen Sektoren und gleichzeitiger Zielerreichung im LULUCF-Sektor, das äußerst ambitionierte Maßnahmen für eine so starke Emissionsminderung erfordert. Diese erscheinen aus heutiger Sicht nicht realistisch. Ebenfalls sollten die Ziele für technische Senken nicht auf Basis von reduzierten Minderungsbemühungen (LNe93) definiert werden. Im Vergleich zum Großteil der Minderungsmaßnahmen sind die meisten (technischen) CO_2-Entnahmemethoden mit deutlich höheren Kosten und Energiebedarfen verbunden. Zu hohe Ziele für technische Senken noch vor der zukünftigen Festlegung von Minderungszielen bis 2045 könnten die Minderungsbemühungen in anderen Sektoren hemmen (Mitigation Deterrence). Außerdem muss die Menge an technischen Senken realistisch erreichbar sein.

Die Zielfestlegung sollte auch die erhebliche Unsicherheit des LULUCF-Sektors berücksichtigen. Die Modellierung zeigt das erhebliche Risiko für Störungen und verdeutlicht die ambitionierten Annahmen, die für eine Zielerreichung nach § 3a KSG notwendig sind (siehe Szenarien S-ZE). Auch wenn nicht von einer Zielverfehlung im LULUCF-Sektor ausgegangen werden sollte, sollten die Ziele für technische Senken so festgelegt werden, dass auch in diesem Fall die THG-Neutralität erreicht wird. Dies berücksichtigt auch die Reversibilität der CO_2-Bindung in natürlichen Ökosystemen und ihre Anfälligkeit für Störungen.

Daher wird eine Bandbreite vorgeschlagen, in der sich die Zielfestlegung durch die Bundesregierung bewegen sollte:

- Unterer Wert: Basierend auf dem LNe95-Szenario der Modellierung unter Annahme der LULUCF-Zielerreichung: Restemissionen von 57 Mio. Tonnen CO_2äq abzüglich 40 Mio. Tonnen CO_2 im LULUCF-Sektor[262] ergeben einen Bedarf von 17 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme durch technische Senken.
- Oberer Wert: Basierend auf dem LNe95-ZV-Szenario, in welchem der LULUCF-Sektor nur noch eine netto-negative Bilanz von -29 Mio. Tonnen CO_2 aufweist.[263] Dadurch erhöht sich der Bedarf für technische Senken auf 28 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme.

Damit ergibt sich eine mögliche Bandbreite für das Ziel von technischen Senken nach § 3b KSG in einer Größenordnung von 17 – 28 Mio. Tonnen CO_2, welche hauptsächlich durch BECCS, DACCS, BECCU und DACCU erbracht werden müssen. Der obere Wert der Bandbreite kann dabei als Sicherheitsaufschlag verstanden werden, der die resiliente Erreichung der Klimaziele auch unter bestehender Unsicherheit sicherstellt und auch mögliche negative Entwicklungen im LULUCF-Sektor berücksichtigt.

Bei Erreichung der LULUCF-Ziele durch verstärkte Maßnahmen in diesem Sektor könnten insgesamt kumulierte Emissionen verringert und schon vor 2045 eine netto-negative Bilanz erreicht werden.

Der Hochlauf von CO_2-Entnahmen im Jahr 2035 und 2040

Die Analysen der LNe verdeutlichen die Bedeutung einer zeitnahen Skalierung der verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden. Der Hochlauf der CCS-basierten Entnahmen ist dabei unter anderem abhängig von der Entwicklung einer CO_2-Infrastruktur und beginnt vor allem ab den 2030er Jahren. Bereits vorher können einzelne Projekte Negativemissionen verwirklichen, wenn sie CO_2 langfristig nutzen, jedoch wird noch keine Infrastruktur für eine dauerhafte Speicherung bestehen.

Bis 2035 kann die Inbetriebnahme von Abscheidungsanlagen an mehreren großindustriellen Industrieanlagen unter Abscheidung biogener Emissionen größere Mengen an CO_2-Entnahme ermöglichen. CO_2-Entnahmen von 5 Mio. Tonnen CO_2 für das Jahr 2035 könnten damit einen ambitionierten, aber realistischen Zielwert bilden. Dies wird auch in der Modellierung der LNe entsprechend abgebildet.

Erst in den späten 2030er Jahren beginnt in der Modellierung der Hochlauf von Direct Air Capture im Maßstab von Megatonnen. Bereits vorher sollten jedoch erste größere Pilotanlagen und die ersten kommerziellen Anlagen errichtet werden, um Lerneffekte zu heben und in den 2030er Jahren den Betrieb von Anlagen mit Abscheidekapazitäten von über 1 Mio. Tonnen CO_2 zu ermöglichen.

[262] Die Zielerreichung des LULUCF Sektor beinhaltet rund 5 Mio. Tonnen CO_2 durch neuartige Methoden (unter anderem beschleunigte Verwitterung oder Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle). Dies ist im Sektorverständnis der Modellierung noch nicht berücksichtigt worden.

[263] Der LULUCF-Sektor wies im ZV-Szenario eine Bilanz von -24 Mio. Tonnen CO_2 auf. Hinzu kommen auch hier rund 5 Mio. Tonnen durch neuartige Methoden, die in der Modellierung noch unter "technische Senken" geführt wurden.

Für die Jahre 2035 und 2040 ergibt sich unter Annahme eines realistischen Hochlaufpfads ein möglicher Zielwert von mindestens 5 Mio. Tonnen CO_2 für 2035 und 10 bis 15 Mio. Tonnen CO_2 für 2040.

Ein Zielwert von 10 bis 15 Mio. Tonnen CO_2 im Jahr 2040 könnte daher durch die Skalierung von BECCU/S oder bereits frühzeitig auch mit dem Beitrag von DACCU/S erzielt werden.

Empfehlung 23: In der Rechtsverordnung gemäß § 3b KSG sollte die Bundesregierung Zielwerte für technische Senken festlegen. Die durchgeführten Analysen, basierend auf der Modellierung der LNe, legen folgende Bandbreite als realistische Orientierung nahe:

- Mindestens 5 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme durch technische Senken im Jahr 2035
- 10 bis 15 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme durch technische Senken im Jahr 2040
- 17 bis 28 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme durch technische Senken im Jahr 2045

Empfehlung 24: Die Bundesregierung sollte zusätzlich ein Kurzfristziel 2030 für die Realisierung einer bestimmten Menge an nachhaltigen, dauerhaften und zusätzlichen technischen CO_2-Entnahmeprojekten anvisieren. Dieses Ziel könnte anhand der Menge an CRCF-zertifizierten Entnahmen überprüft werden.

Das Ziel für technische Senken kann mit unterschiedlichen Portfolios an CO_2-Entnahmemethoden erreicht werden

In der Modellierung der LNe leisten CCS-basierte Entnahmemethoden einen großen Teil des Entnahmeportfolios. Im Fall von BECCS werden die Entnahmen vornehmlich an großindustriellen Anlagen (Zement- und Kalkwerke, Müllverbrennungsanlagen) erbracht, an denen schwer vermeidbare Prozessemissionen abgeschieden werden. Über die zusätzliche Abscheidung von biogenen Emissionen werden dabei Negativemissionen erzielt.

Im Szenario LN95-ZV werden darüber hinaus bis zu 17 Mio. Tonnen CO_2 durch Direct Air Capture entnommen. Dies geht unter den getroffenen Annahmen mit jährlichen Kosten von 6,3 Mrd. Euro und einem Strombedarf von ca. 13 TWh einher. Der Strom- und Wärmebedarf müssen erneuerbar bereitgestellt werden. Im Szenario mit den höchsten Restemissionen LNe93-ZV werden sogar bis zu 34 Mio. Tonnen CO_2-Entnahme durch DACCS benötigt. Dies entspräche einem Strombedarf von etwa 25 TWh, knapp 5 Prozent des aktuellen jährlichen Stromverbrauchs in Deutschland

Dies verdeutlicht die Chance eines breiten Portfolioansatzes. Da jede Entnahmemethode bestimmte Restriktionen hat, erhöht ein diversifizierter Ansatz die Resilienz und reduziert einseitige Abhängigkeiten. DACCS ist vor allem durch Energiebedarfe und Kosten limitiert, die beschleunigte Verwitterung durch die Verfügbarkeit der entsprechenden Minerale und den Energiebedarf. Nachhaltiges BECCS und BECCU erfordern den Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe (im Mittel 3,4 MWh je Tonne CO_2) und benötigen für die CO_2-Abscheidung ebenfalls Energie. Für die in LNe95-ZV modellierten 9 Mio. Tonnen CO_2 durch BECCS sind somit also etwa 30 TWh Biomasse erforderlich – 12 Prozent des heutigen Einsatzes. Dabei handelt es sich ausschließlich um organische Abfälle in Müllverbrennungsanlagen, an denen sowohl der fossile als auch der biogene Anteil am CO_2 abgeschieden werden.

Die Ergebnisse der Modellierung zeigen nur einen der möglichen Pfade der Zielerreichung auf; andere Portfolios sind ebenfalls denkbar und haben entsprechende Auswirkungen. Ein stärkerer Fokus auf Kohlenstoffbindung durch Pflanzenkohle beispielsweise reduziert die Kosten und Energiebedarfe, erhöht jedoch gleichzeitig den Biomassebedarf, der nachhaltig gedeckt werden muss.

Empfehlung 25: Die Bundesregierung sollte keine methodenspezifischen Zielwerte setzen, sondern aus Effizienzgründen und zur Stärkung der Resilienz eine technologieoffene Erfüllung der Ziele ermöglichen.

Vorschlag eines netto-negativen THG-Ziels für 2060

Bis 2060 sollen die Restemissionen möglichst weiter gemindert werden. Die Modellierung der LNe zeigt hier ein Potenzial der Minderung auf bis zu 33 Mio. Tonnen CO_2 (97,4 Prozent Minderung) auf. Laut Modellierung können bei ehrgeiziger Nutzung der Potenziale rund 100 Mio. Tonnen CO_2 entnommen werden. Daher ist für das Jahr 2060 ein Netto-Minderungsziel von 105 Prozent eine realistische Zielgröße. Dieser Zielwert geht von einem rein territorialen Verständnis der Zielerreichung des KSG aus.

Empfehlung 26: Die Bundesregierung sollte in § 3 Abs. 2 KSG perspektivisch einen Zielwert von 105 Prozent Netto-Emissionsminderung für das Jahr 2060 verankern.

Die Zielerreichung sowie die Notwendigkeit einer Aktualisierung werden regelmäßig überprüft

Empfehlung 27: Die Erreichung der Ziele für technische Senken sollte regelmäßig überprüft werden. Hierfür könnte die Entwicklung technischer Senken als eigenes Kapitel in die Projektionsdaten des UBA aufgenommen werden.

Empfehlung 28: Darüber hinaus könnte eine zukünftige Weiterentwicklung der LNe evaluieren, inwieweit rechtliche oder ökonomische Anpassungen erforderlich sind, um die Erreichung der Ziele nach §§ 3a und 3b KSG zu gewährleisten.

6.4 CO_2-Entnahmen in Projekten

6.4.1 Projektbasiertes MRV in Zertifizierungssystemen

Projektbasiertes MRV quantifiziert die Netto-CO_2-Entnahme einzelner Entnahmeprojekte

Die nationale Inventarberichterstattung kann keinen Aufschluss darüber geben, welche CO_2-Entnahmeleistung einzelne Projekte erbringen. Um klimawirksame Entnahmeaktivitäten zu fördern, ist es daher entscheidend, die Netto-Entnahmeleistung von Projekten zuverlässig zu quantifizieren. Anders als in Inventaren wird dafür die Entnahmemenge nicht jährlich erfasst, sondern als Integral über lange Zeiträume bilanziert. Über weitgefasste Systemgrenzen (inklusive des Produktlebensendes bei CCU-Produkten) sollen alle positiven und negativen THG-Effekte des Entnahmeprojekts, inklusive eventueller Leckagen, berücksichtigt werden.

MRV-Systeme haben zum Ziel, die Einhaltung von Qualitätsstandards durch Entnahmeprojekte zu überprüfen. Sie bestehen aus drei Komponenten:

- Messung: regelmäßige Erfassung von Daten und Informationen zur Quantifizierung der Entnahmeleistung
- Berichterstattung: standardisierte Dokumentation und Bereitstellung der erfassten Daten
- Verifizierung: unabhängige Überprüfung der gemeldeten Daten

MRV in Projekten überprüft die kausale Beziehung zwischen dem jeweiligen Entnahmeprojekt und der tatsächlich erreichten (Netto-)CO_2-Entnahme. Neben der zuverlässigen Erfassung und Überwa-

chung entlang der gesamten Prozesskette erfordert dies die Überprüfung der Zusätzlichkeit. Deshalb ist stets ein kontrafaktisches Baseline-Szenario nötig, in dem das Entnahmeprojekt nicht stattfindet. Dies gilt sowohl für nicht-dauerhafte als auch für dauerhafte CO_2-Entnahmen und ist Grundvoraussetzung dafür, die Klimawirkung erfassen zu können.

Projektbasierte MRV-Systeme überwachen den Status einer CO_2-Entnahme auch langfristig, um so eine eventuelle Wiederfreisetzung von CO_2 oder Schwankungen der Entnahmeleistung bei der Bewertung zu berücksichtigen. CO_2-Entnahmeaktivitäten können mit positiven oder negativen ökologischen und sozialen Auswirkungen einhergehen (siehe Kapitel 6.4.2). MRV-Systeme können Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Entnahmeaktivitäten überprüfen, zum Beispiel mit Blick auf die nachhaltige Nutzung von Biomasse und die Biodiversität oder soziale Auswirkungen. Diese Aspekte finden in der Inventarberichterstattung keine Berücksichtigung, sie können nur auf der Ebene einzelner CO_2-Entnahmeprojekte betrachtet werden.

Die Entnahmeleistung wird im projektbasierten MRV ex ante und ex post bestimmt[264] und basiert je nach Entnahmemethode auf Messungen vor Ort, Fernerkundungen und Modellierungen. Aufgrund der besseren Datenlage lässt sich die Entnahmeleistung auf Projektebene üblicherweise genauer bestimmen als im nationalen THG-Inventar. Infolge der unterschiedlichen Berechnungsmethodiken lassen sich die zertifizierten Netto-CO_2-Entnahmen von Projekten im Allgemeinen nicht direkt auf THG-Inventare übertragen. Dies gilt beispielsweise auch für die Methodiken des CRCF. Dennoch kann eine verbesserte Datenlage auf Projektebene perspektivisch zu einer qualitativen Aufwertung von THG-Inventaren beitragen, zum Beispiel bei der Berechnung landesspezifischer Emissionsfaktoren und der Anwendung höherer Grade methodischer Komplexität bei der Berechnung (Tier 2 und 3[265]). Die LULUCF-Verordnung (EU 2018/1999) sieht die Anwendung von Tier-2-Methoden ab 2028 vor, ab 2030 ebenfalls von Tier-3-Methoden. Daten aus CRCF-zertifizierten Projekten könnten dabei hilfreiche Informationen liefern.

Empfehlung 29: Das UBA sollte überprüfen, wie eine Integration der projektspezifischen Daten des CRCF zukünftig zur Verbesserung der nationalen THG-Berichterstattung erfolgen kann.

Zertifizierungssysteme schaffen Handelbarkeit und Vergleichbarkeit von CO_2-Entnahmen

MRV-Systeme sind auf Projektebene integraler Bestandteil von Zertifizierungssystemen. Diese standardisierten, unabhängigen Verfahren stellen sicher, dass eine CO_2-Entnahme tatsächlich erfolgt ist und den festgelegten Qualitätsstandards entspricht. Wird eine Entnahme validiert, erhalten die Projektbetreiber Zertifikate (engl. Carbon Credits), die verkauft, gehandelt oder anderweitig

[264] Ex ante: Zertifikate für erwartete CO_2-Entnahmen werden im Voraus basierend auf vorhandenen Daten modelliert bzw. bestimmt. Ex post: CO_2-Entnahmen werden erst nach nachweislich erbrachter Entnahmeleistung ausgegeben. In der Praxis ist häufig eine Kombination beider Elemente anzutreffen (McDonald, Siemons, & Scheider, Finanzierung einer klimafreundlichen Bodennutzung – Zentrale Aspekte, 2022; Karsch & van Baren, 2024).

[265] In den IPCC-Richtlinien stellen "Tiers" bzw. Stufen den Grad der methodischen Komplexität und Genauigkeit dar. In der Regel werden drei Stufen unterschieden. Stufe 1 ist die grundlegende Methodik (z. B. generische Emissionsfaktoren), Stufe 2 die mittlere (z. B. spezifische Emissionsfaktoren und detaillierte Aktivitätsdaten) und Stufe 3 die anspruchsvollste in Bezug auf Komplexität und Datenanforderungen (z. B. präzise Messdaten oder hochaufgelöste Modelle).

verwendet werden können. Projektbasierte MRV-Systeme für CO_2-Entnahmeprojekte existieren bereits im gutschriftbasierten Kohlenstoffmarkt (engl. Carbon Credit Market). In diesem Markt werden handelbare Zertifikate von verschiedenen Zertifizierungsstandards ausgegeben, die von internationalen Organisationen, etwa beim Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (engl. Clean Development Mechanism, CDM) unter dem Kyoto-Protokoll, von Staaten, wie beim kalifornischen ETS, oder von nicht staatlichen Organisationen wie Verra, Gold Standard oder puro.earth verwaltet werden. Je nach Verwendungszweck der Zertifikate auf der Nachfrageseite spricht man vom verbindlichen Kohlenstoffmarkt (z. B. EU-ETS; Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA; Internationally Transferred Mitigation Outcome, ITMO) oder vom freiwilligen Kohlenstoffmarkt (engl. Voluntary Carbon Market, VCM).

Grundsätzlich zielen Zertifizierungssysteme darauf ab, zwei Arten von Vergleichbarkeit zu schaffen: Erstens soll die Entnahmeleistung von verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden vergleichbar gemacht werden, die sich im Hinblick auf die jeweilige Speicherdauer, die Messgenauigkeit oder das Wiederfreisetzungsrisiko erheblich unterscheiden können. Zum anderen soll eine Vergleichbarkeit von CO_2-Entnahmen und der Emissionsvermeidung hergestellt werden. Letzteres ist methodisch schwer zu bestimmen und wird von Teilen der Wissenschaft kritisch hinterfragt. [266] Wenn ein Zertifizierungssystem ausreichende Vergleichbarkeit und Integrität herstellt, können Entnahmezertifikate zur freiwilligen oder verpflichtenden Kompensation von Emissionen verwendet werden. Auch andere Verwendungszwecke von Zertifikaten sind möglich, etwa als Beitrag zur Klimafinanzierung (engl. Contribution Claim).[267]

Der Markt ist bislang heterogen und nur begrenzt standardisiert. Anforderungen an MRV, Dauerhaftigkeit, Zusätzlichkeit, Messmethoden und Vorsorgemaßnahmen unterscheiden sich je nach Standard und Verwendungszweck.[268] Zudem ist es in der Vergangenheit wiederholt zu erheblichen Mängeln bei der Integrität von Entnahmezertifikaten gekommen. Ähnlich der Inventarberichterstattung existieren für einige CO_2-Entnahmemethoden auch auf Projektebene noch keine etablierten Methodiken zur Erfassung und Überwachung der Entnahmeleistung.

Im Rahmen der europäischen CRCF-Verordnung (EU 2024/3012) entsteht zurzeit ein standardisiertes Zertifizierungssystem für qualitativ hochwertige CO_2-Entnahmen und die Reduktion von Bodenemissionen. Artikel 6 ÜvP schafft ebenfalls Regeln und Instrumente für den internationalen Handel von Emissionsminderungs- und Entnahmegutschriften (Article 6.4 Emission Reductions, A6.4ERs) (siehe Infobox 3). Es ist davon auszugehen, dass diese Regeln den internationalen Kohlenstoffmarkt maßgeblich prägen werden.

Die Ausarbeitung des CRCF (EU 2024/3012) und des Artikels 6 ÜvP

[266] (Burke & Schenuit, 2023).
[267] Contribution Claim: Unternehmen erwerben CO_2-Entnahmezertifikate, nutzen sie jedoch nicht zur Kompensation eigener Emissionen (engl. Offsetting). Stattdessen wird der finanzielle Beitrag zur Entwicklung und Skalierung von Klimaschutzstrategien betont, ohne eine direkte Verbindung zu unternehmensbezogenen Emissionsbilanzen oder Klimaneutralitätsbehauptungen herzustellen.
[268] (Arcusa & Hagood, 2025).

Die CRCF-Verordnung schreibt die Einhaltung spezifischer Qualitätskriterien für die Zertifizierung von CO_2-Entnahmen vor. Dazu gehören Quantifizierbarkeit (relativ zu einer Baseline), Zusätzlichkeit, Speicherfähigkeit, Überwachbarkeit und Haftbarkeit sowie die Nachhaltigkeit der Entnahmen. Zur präzisen Festlegung dieser Kriterien für verschiedene Entnahmemethoden wird die Europäische Kommission delegierte Rechtsakte erlassen. Sie definieren die Methodologien zur Zertifizierung, insbesondere die Regeln für die Überwachung von CO_2-Entnahmen sowie die Haftung im Falle einer Wiederfreisetzung. Derzeit erfolgt die Ausarbeitung dieser Methodologien in Konsultation mit der CRCF-Expertengruppe für CO_2-Entnahmen und weiteren Stakeholdern. Die Bundesregierung ist aktiv in diesen Prozess eingebunden.

Artikel 6 ÜvP schafft sowohl marktbasierte als auch nicht marktbasierte freiwillige Kooperationsmechanismen, die Staaten dabei unterstützen sollen, ihre Klimaziele effizienter zu erreichen. Auf der COP29 wurden weitere Regeln zur Umsetzung der Mechanismen gemäß Artikel 6.2 und 6.4 ÜvP beschlossen. Artikel 6.2 ÜvP umfasst nun nicht nur bilaterale Abkommen zwischen Staaten, sondern auch Vereinbarungen zwischen Staaten und Drittparteien, etwa Unternehmen. Der Kooperationsprozess sowie die Berichtspflichten werden weitgehend von den beteiligten Parteien festgelegt. Zudem wurde entschieden, dass ITMOs auch über internationale Register gehandelt werden können. In Artikel 6.4 ÜvP wurden die Leitlinien des sog. Supervisory Body zu Methodologien und CO_2-Entnahmen angenommen. Dabei wurde festgelegt, dass die Zusätzlichkeit von A6.4ERs anhand finanzieller Kriterien überprüft wird und die Baselines kontinuierlich nach unten angepasst werden (engl. Downward Adjustment). Die konkrete Ausgestaltung des Zertifikateregisters und der MRV-Anforderungen unter Artikel 6.4 ÜvP wird aktuell durch den Supervisory Body erarbeitet und ist weiterhin Thema der Verhandlungen zwischen den Vertragsstaaten. Neben der Verabschiedung des Arbeitsprogramms des Supervisory Body und der Vorgaben zu Versicherungsmechanismen gegen die Wiederfreisetzung von CO_2 (siehe Kapitel 6.4.2) wurden auch die Modalitäten für die Übertragung von Aufforstungszertifikaten aus dem CDM in das Register von Artikel 6.4 ÜvP festgelegt.

Infobox 4: Ausarbeitung CRCF und Artikel 6 ÜvP

6.4.2 Anforderungen an CO_2-Entnahmeprojekte

Zusätzlichkeit zur Ermittlung des (Netto-)Beitrags von CO_2-Entnahmeprojekten

Die Ermittlung des Netto-CO_2-Entnahmeeffekts eines Projekts basiert in der Regel auf der Bestimmung der Differenz zwischen der durch das Projekt erzielten Entnahme und einem kontrafaktischen Referenzszenario (engl. Baseline) – also dem, was unter normalen Bedingungen ohne das Projekt geschehen wäre. Der Nachweis der „Kohlenstoff-Zusätzlichkeit" (engl. Carbon Additionality) belegt die Kausalität zwischen dem Projekt und der tatsächlichen Mehrentnahme von CO_2 aus der Atmosphäre. Üblicherweise wird dafür ein Baseline-Szenario herangezogen.

Unterschiedliche Ansätze für die Bestimmung einer Baseline bergen jeweils Vor- und Nachteile. Einfachere, standardisierte Methodiken sind anfälliger für Manipulation, lassen sich aber leichter implementieren. Komplexere, projektspezifische Methodiken bieten eine höhere Genauigkeit und reduzieren das Risiko von Verzerrungen, führen jedoch zu höheren Transaktionskosten. Tabelle 8 bietet einen Überblick über Methodiken zur Baseline-Bestimmung.

Tabelle 8 Übersicht über Methodiken zur Baseline-Bestimmung[269]

Ansatz	Funktionsweise
Standardisierte Baselines	Schätzung auf Basis übergreifender Daten, beispielsweise nationaler, regionaler oder sektoraler Natur. Dynamische Anpassungen an veränderte Rahmenbedingungen sind möglich. Ihr Geltungsbereich kann innerhalb eines bestimmten Mechanismus (zum Beispiel eines Zertifizierungsstandards) oder innerhalb eines geografischen Rechtsraums (national oder regional) definiert sein.
• **Historisch**	Vergleicht das Niveau von CO2-Entnahmen vor Beginn der Aktivität (Einzeljahrbetrachtung oder Durchschnittswert mehrerer Jahre)
• **Forward-looking**	Prognostiziert das zu erwartende Niveau zukünftiger CO_2-Entnahmen unter Annahme bestehender Trends oder bestehender bzw. zu erwartender politischer Maßnahmen
• **Benchmark**	Setzt eine vordefinierte CO2-Entnahmerate als Referenzwert, die sich an spezifischen Annahmen orientiert, zum Beispiel an den Klassenbesten
Projektspezifische Baselines	Individuelle, aktivitätsspezifische Schätzung für jedes Entnahmeprojekt

Die Nutzung standardisierter Baselines verringert die Transaktionskosten für die Beteiligten, birgt jedoch die Gefahr von Auswahlverzerrungen aufgrund unterschiedlicher Ausgangsbedingungen für Entnahmeprojekte. Dazu kann es kommen, wenn standardisierte Emissions- oder Entnahmefaktoren pauschal festgelegt werden, jedoch eine hohe Heterogenität bei den Standortbedingungen besteht. Dies lässt sich am Beispiel der Aufforstung darstellen: Projektbetreiber könnten in diesem Fall bevorzugt Aufforstung auf jenen Flächen registrieren, die von Natur aus hohe Kohlenstoffspeicherraten aufweisen, während weniger produktive Flächen unberücksichtigt bleiben. Dadurch steigt zwar die Zahl der zertifizierten Entnahmen, aber nicht unbedingt die tatsächliche Netto-Kohlenstoffentnahme – es entstünden nichtzusätzliche CO_2-Entnahmezertifikate, die die Umweltintegrität gefährden. Auch bei der projektspezifischen Bestimmung von Baselines kann es aufgrund von Informationsasymmetrien zu Fehleinschätzungen kommen. Zudem ist die konsistente Anwendung von Zusätzlichkeitskriterien aufgrund der Heterogenität der Projektumstände schwierig.

Neben der Kohlenstoff-Zusätzlichkeit gibt es auch den Aspekt der finanziellen und/oder regulatorischen Zusätzlichkeit. Finanzielle Zusätzlichkeit besteht, wenn ein Entnahmeprojekt ohne den finanziellen Anreiz für die Entnahme, zum Beispiel durch den Verkauf von Entnahmezertifikaten, nicht stattfinden würde. Regulatorische Zusätzlichkeit besteht, wenn ein Entnahmeprojekt über die gesetzlichen Anforderungen hinausgeht.

Die Zusätzlichkeit einer CO_2-Entnahme festzustellen, ist aufgrund der kontrafaktischen Natur von Baselines grundsätzlich herausfordernd. Gleichzeitig ist sie aus Sicht der Bemessung von CO_2-Entnahmen, der effizienten Allokation finanzieller Ressourcen und der öffentlichen Wahrnehmung von

[269] Auswahl nach (Zakkour & Cook, 2024; McDonald, Bey, Duin, & al., 2021).

Entnahmeprojekten unabdingbar. Die Ausstellung nichtzusätzlicher Zertifikate ist bislang eine der größten Qualitätsherausforderungen auf dem VCM.[270]

Bestimmung der Zusätzlichkeit von CO_2-Entnahmeprojekten in bestehenden Zertifizierungssystemen

Die CRCF-Verordnung legt fest, dass zertifizierte Entnahmen alle drei Arten der Zusätzlichkeit erfüllen müssen: regulatorische, finanzielle und Kohlenstoff-Zusätzlichkeit (Artikel 5). Standardisierte Baselines sind so festzulegen, dass sowohl die regulatorische als auch die finanzielle Zusätzlichkeit gewährleistet ist. Eine mindestens alle fünf Jahre von der Kommission durchgeführte Anpassung der Baselines soll zudem das Ambitionsniveau schrittweise erhöhen sowie aktuelle wissenschaftliche und regulatorische Entwicklungen berücksichtigen. Wenn standardisierte Baselines nicht praktikabel sind, können auch projektspezifische Baselines verwendet werden. Die konkrete Ausgestaltung der Baseline-Bestimmung wird in den delegierten Rechtsakten zu den einzelnen Zertifizierungsmethoden festgelegt. Unter Artikel 6.4 ÜvP können standardisierte Baselines vom Supervisory Body oder von den Vertragsstaaten eingebracht werden. Sie sollen dabei einem leistungsorientierten Ansatz folgen, der sich an einer Benchmark oder historischen Daten orientiert. Auf der COP29 wurden die Mindestanforderungen weiter spezifiziert und es wurde festgelegt, dass finanzielle Zusätzlichkeit dargelegt werden und eine kontinuierliche Anpassung nach unten vorgenommen werden muss (siehe auch Infobox 3).[271] Einen anderen Ansatz verfolgt das neuseeländische ETS, das auf eine Überprüfung der Zusätzlichkeit von Aufforstungsprojekten verzichtet. Dies liegt daran, dass das System als sektorweites Instrument konzipiert ist, bei dem sämtliche forstwirtschaftlichen Kohlenstoffflüsse – sowohl zusätzliche als auch nichtzusätzliche – innerhalb der nationalen Emissionsbilanz berücksichtigt werden.

In der Vergangenheit gab es auf Kohlenstoffmärkten wiederholt Probleme mit der ökologischen Integrität von Zertifikaten – unabhängig davon, ob die Standards von öffentlichen oder von privaten Akteuren verwaltet wurden.[272] In vielen Fällen scheint die Zusätzlichkeit der zertifizierten Projekte nicht gewährleistet zu sein. Dies betrifft zwar hauptsächlich die Zertifizierung vermiedener Emissionen, etwa durch Projekte zur Verringerung von Emissionen aus Entwaldung und Waldschädigung sowie zur Förderung nachhaltiger Waldbewirtschaftung (engl. Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation, REDD+), doch Untersuchungen zum kalifornischen ETS zeigen, dass auch landbasierte Entnahmeprojekte durch das strategische Ausnutzen der oben beschriebenen Problematik standardisierter Baselines zu Überzertifizierung geführt haben.[273]

Zu berücksichtigen ist außerdem die Schwierigkeit der Etablierung akkurater Baselines für natürliche Senken: Zu niedrig angesetzte Baselines führen zu einer Überzertifizierung, wodurch die Glaubwürdigkeit dieser Entnahmemethoden gefährdet wird. Zu hoch angesetzte Baselines hingegen können zu einer Unterzertifizierung führen, was die finanzielle Tragfähigkeit solcher Projekte untergräbt. Dies gilt insbesondere für solche Methoden, die bereits bestehende natürliche Senken erhalten

[270] (European Scientific Advisory Board on Climate Change, 2025).
[271] (Art. 36 Decision 3/CMA.3 UNFCCC; SBM 014, Annex 5).
[272] (Cames, et al., 2016).
[273] (Badgley, et al., 2022).

oder stärken, wie die Forstwirtschaft. Zu restriktive Baselines könnten dazu führen, dass die Entnahmeleistung solcher nachhaltigen Praktiken unzureichend honoriert wird.

Des Weiteren besteht bei der Nutzung von kontrafaktischen Baselines das Risiko, dass es im Rahmen der Verifikation der Zertifizierung von Zusätzlichkeit durch Dritte zu Fehlanreizen kommt. Wenn Prüfinstanzen wirtschaftlich von wiederkehrenden Aufträgen abhängig sind, kann dies womöglich dazu führen, dass Projekte auch dann eine Zertifizierung erhalten, wenn sie die Standards nicht vollständig erfüllen. In der Praxis führen Anforderungen an die Zusätzlichkeit von Entnahmeprojekten im besten Fall zu einer Balance zwischen Über- und Unterzertifizierung. Das bedeutet, dass die Baseline die Kohlenstoffspeicherung, die ohne das CO_2-Entnahmeprojekt stattgefunden hätte, gelegentlich unterschätzt und in anderen Fällen überschätzt.[274]

Empfehlung 30: Die Bundesregierung sollte die konkrete Ausgestaltung der Anforderungen an die Zusätzlichkeit von natürlichen Senken in Zertifizierungssystemen wie dem CRCF genau prüfen und bei Bedarf im Rahmen von nationalen Anreiz- oder Förderinstrumenten Maßnahmen ergreifen, die den Erhalt der Entnahmeleistung solcher Methoden angemessen honorieren.

Empfehlung 31: Um Interessenkonflikte bei der Verifikation von Entnahmeprojekten zu vermeiden, sollte die Bundesregierung klare Unabhängigkeitskriterien und Rechenschaftspflichten für Prüfinstanzen festlegen. Dazu gehören beispielsweise eine strenge Akkreditierung, die regelmäßige Rotation von Prüfstellen sowie Mechanismen zur Überprüfung und Sanktionierung fehlerhafter Zertifizierungen.[275] Außerdem sollten hohe Transparenzanforderungen für Transaktionen von Entnahmezertifikaten gelten, um Nachvollziehbarkeit und öffentliche Kontrolle zu gewährleisten.

Empfehlung 32: Die Bundesregierung sollte die personelle und finanzielle Ausstattung der Regulierungsbehörden sicherstellen, um eine effektive Überwachung und Durchsetzung der Standards zu wahren. Außerdem sollte die Gesetzgebung präzise und spezifisch gestaltet sein, um klare Durchsetzungsmöglichkeiten zu schaffen und regulatorische Schlupflöcher zu vermeiden.

Dauerhaftigkeit und die Risiken der Wiederfreisetzung von entnommenem CO_2 adressieren

Bislang besteht weder in der Wissenschaft noch in der praktischen Umsetzung von Zertifizierungssystemen Einigkeit darüber, ab welcher Dauer der CO_2-Speicherung außerhalb der Atmosphäre eine CO_2-Entnahme als permanent gilt.[276] Bei der Festlegung ist zu beachten, dass freigesetztes CO_2 über Jahrtausende Schäden durch Temperaturanstieg und Ozeanversäuerung verursacht.[277] Die Reduktion der CO_2-Emissionen bleibt deshalb die effektivste Art des Klimaschutzes. Damit CO_2-Emissionen wirksam ausgeglichen werden können, bedarf es einer langfristigen Speicherung des Kohlenstoffs außerhalb der Atmosphäre. Dennoch können auch temporäre Entnahmen zu einer

[274] (Nolan, van Paasschen, & Field, 2024).
[275] (Betz, et al., 2022).
[276] Der Begriff „Dauerhaftigkeit" bezeichnet in diesem Zusammenhang die physische Speicherdauer von CO_2 in einem spezifischen Reservoir sowie die Mechanismen, die seinen Verbleib sichern. „Permanenz" beschreibt eine gesellschaftlich festgelegte Schwelle für eine ausreichend lange CO_2-Speicherung, um keine Schäden mehr zu verursachen. In der Praxis werden die Begriffe meist weitgehend synonym verwendet.
[277] (Archer, Kheshgi, & Maier-Reimer, Multiple timescales for neutralization of fossil fuel CO2, 1997; Archer, et al., 2009).

Reduktion der Erderwärmung beitragen, sofern ihre kumulierte Menge stetig zunimmt.[278] Viele temporäre, meist LULUCF-basierte Entnahmemethoden können über die CO_2-Entnahme hinaus auch wertvolle Ökosystemdienstleistungen bieten. Bestehende Förderprogramme der Bundesregierung wie das ANK honorieren solche Leistungen bereits, berücksichtigen dabei aber oft nicht die Entnahmeleistung.

Zertifizierungssysteme haben zum Ziel, die Dauerhaftigkeit einer Entnahme für bestimmte Zeiträume mittels unterschiedlicher Mechanismen sicherzustellen (siehe Tabelle 9). Zudem sollen sie für den Fall vorsorgen, dass einmal entnommenes CO_2 aufgrund von unvorhergesehenen Ereignissen wie Leckagen oder Waldbränden wieder zurück in die Atmosphäre gelangt. Bei solchen Rückflüssen besteht die Gefahr, dass Zertifikate für eine dauerhafte CO_2-Entnahme ausgestellt wurden. Neben finanziellen Versicherungsmechanismen sind dabei auch physische Instrumente möglich (siehe Tabelle 10).

Die Möglichkeit der Wiederfreisetzung von CO_2-Entnahmen sollte durch Zertifizierungssysteme konsequent adressiert werden. Eine Option für die Bundesregierung ist dabei, die Entwicklung angemessener Versicherungsvorgaben für die Zertifizierung von Entnahmen in MRV-Systemen zu unterstützen, unter anderem im Rahmen der weiteren Ausarbeitung des CRCF.

Tabelle 9 Mögliche Dauerhaftigkeitsmechanismen für zertifizierte CO_2 Entnahmeprojekte[279]

Dauerhaftigkeitsmechanismus	Funktionsweise
Verpflichtungszeitraum	Befristete Verpflichtung: Ein Entnahmezertifikat ist für eine festgelegte Dauer gültig, in der der Anbieter (zum Beispiel Projektentwickler, Speicherbetreiber oder Abscheideunternehmen) für das Reservoir verantwortlich ist. Nach diesem Zeitraum endet die Haftung für den Käufer und den Anbieter.
Temporäre Zertifikate	Zertifikate sind nur für einen begrenzten Zeitraum gültig. Danach muss der Käufer ein neues Zertifikat erwerben, um die Klimawirkung aufrechtzuerhalten. Dies stellt sicher, dass eine temporäre CO_2-Speicherung regelmäßig erneuert oder durch dauerhafte Maßnahmen ersetzt wird.
Diskontierung des Zeithorizonts („Tonne-Jahr")	Multiplikation mit Abschlagsfaktor, um die effektive Entnahmeleistung über einen bestimmten Zeithorizont (z. B. 100 Jahre) auszudrücken. Er wird vom Zertifizierungssystem festgelegt. Die Klimawirkung einer nichtdauerhaften CO_2-Entnahme kann so potenziell mit einer dauerhaften Entnahme vergleichbar gemacht werden.
Haftungsübertrag	Übertragung der Haftung auf eine dritte Partei, zum Beispiel einen Staat. Die dritte Partei übernimmt nach einer bestimmten Zeit die Verantwortung für die Integrität des Reservoirs.

[278] (Matthews, Zickfeld, Koch, & Luers, 2023).
[279] Auswahl nach (Arcusa & Hagood, 2025).

Tabelle 10 Versicherungsmethoden gegen Wiederfreisetzung[280]

Versicherung gegen Wiederfreisetzung	Funktionsweise
Buffer Pool	Ein Anteil der generierten Zertifikate wird nicht verkauft, sondern in einen Reservepool (Buffer Pool) eingezahlt. Im Fall von Wiederfreisetzungen können zur Kompensation Zertifikate aus dem Pool entnommen und stillgelegt werden.
Deposit-Refund-System	Projektbetreiber hinterlegen eine Sicherheit, die nur bei nachgewiesener Langzeitspeicherung zurückerstattet wird. Bei einer CO_2-Freisetzung wird die Kaution stattdessen für die erneute Entnahme oder die Kompensation verwendet.
Risiko-Diskontierung	Das Risiko einer Wiederfreisetzung wird methodenspezifisch bei der Berechnung der zu zertifizierenden Entnahmemenge berücksichtigt. Nur ein Teil des entnommenen CO_2 wird zertifiziert.
Verpflichtende Kompensation	Im Falle einer Wiederfreisetzung müssen entweder bereits vergebene Zertifikate zurückgegeben, die Freisetzung muss durch erneute Sequestrierung ausgeglichen oder es müssen Ersatzgutschriften erworben werden.
Versicherung	Eine dritte Partei kommt für eventuelle Wiederfreisetzungen auf. Die Kompensation kann dabei finanziell oder durch erneute CO_2-Entnahme erfolgen.

Bislang bestehen unterschiedliche Anforderungen an Überwachung und Dauer der CO_2-Speicherung von Entnahmen

Die meisten Zertifizierungssysteme basieren auf einer vertraglich festgelegten Dauerhaftigkeit von 100 Jahren (auch Monitoring-Periode genannt). Sie verwenden Verpflichtungszeiträume als Dauerhaftigkeitsmechanismus und setzen zusätzlich auf Buffer Pools und die verpflichtende Kompensation als Versicherungsmechanismen gegen die Wiederfreisetzung von CO_2. Dennoch gibt es zwischen verschiedenen Standards zum Teil große Unterschiede hinsichtlich der festgelegten Dauerhaftigkeit von Entnahmemethoden. Beispielsweise zertifiziert Verra unter dem Verified Carbon Standard (VCS) Aufforstung mit 20 Jahren Dauerhaftigkeit (die Zertifikate sind bis zu viermal erneuerbar), das französische Label Bas Carbone mit 5 Jahren und Gold Standard mit 30 und 50 Jahren.[281]

Im CRCF wird eine CO_2-Entnahme als „permanent" definiert, wenn das entnommene CO_2 über „mehrere Jahrhunderte" gespeichert bleibt. Für die Zertifizierung von CO_2-Speicherung in Produkten gilt eine Mindestspeicherdauer von 35 Jahren, während für landwirtschaftliche Entnahmemethoden (engl. Carbon Farming) eine Speicherung von mindestens 5 Jahren vorausgesetzt wird. Für jede dieser Kategorien von CO_2-Entnahmen wird dabei ein eigener Zertifikatstyp ausgestellt. Die

[280] Auswahl nach (Arcusa & Hagood, 2025; Zakkour & Cook, 2024; Lemoine, 2023).
[281] (Karsch & van Baren, 2024).

spezifischen Mechanismen zur Sicherstellung des zertifizierten Klimaschutzbeitrags und zur Versicherung gegen mögliche CO_2-Wiederfreisetzungen werden in den delegierten Rechtsakten zu den jeweiligen Zertifizierungsmethoden geregelt. Sie befinden sich aktuell noch in Ausarbeitung. Die Verordnung verweist auf verschiedene Absicherungsinstrumente wie Buffer Pools und Vorabversicherungsmechanismen, um das Risiko einer späteren Freisetzung zu minimieren. Bereits existierende Monitoring- und Haftungsvorschriften für die dauerhafte Speicherung von CO_2 im geologischen Untergrund und in Produkten der Emissionshandelsrichtlinie (2003/87/EG) und der Richtlinie zur geologischen Speicherung von Kohlendioxid (2009/31/EG) sind dabei zu berücksichtigen.

In Artikel 6.4 ÜvP ist ebenfalls die Nutzung eines Buffer Pool vorgesehen, um sowohl vermeidbare als auch nicht vermeidbare CO_2-Wiederfreisetzungen abzusichern. Die genauen Anforderungen zur Dauerhaftigkeit, einschließlich der genauen Monitoring-Perioden und der Verpflichtungen zur erneuten Speicherung im Falle von Wiederfreisetzung, sind noch durch den Supervisory Body zu spezifizieren.

In Deutschland besteht für die geologische Speicherung mit dem Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) bereits die Vorgabe zur Rückstellung einer Deckungsvorsorge für etwaige unvorhergesehene Schäden und Leckagen an CO_2-Speichern. Für alle weiteren CO_2-Entnahmemethoden bestehen nur vereinzelt Ansätze für gesetzliche Versicherungsvorgaben. Mit dem CRCF werden solche Vorgaben jedoch aktuell auf EU-Ebene geschaffen.

Empfehlung 33: Sollte sich die Spezifikation von Überwachungszeiträumen und Versicherungsmechanismen als notwendig erweisen, zum Beispiel bei Anforderungen an Entnahmeprojekte in nationalen Anreiz- oder Förderinstrumenten, empfiehlt sich die Orientierung an den in Entwicklung befindlichen europäischen Mindeststandards des CRCF und den Zertifizierungsstandards unter Artikel 6.4.

MRV-Systeme sollten stringente Anforderungen an die Nachhaltigkeit von CO_2-Entnahmeprojekten stellen

Aus der Methodenbewertung im Rahmen der LNe geht deutlich hervor, dass CO_2-Entnahmeaktivitäten neben der Entnahme von atmosphärischem CO_2 auch ökologische und soziale Auswirkungen haben (siehe Kapitel 4). CO_2-Entnahmeprojekte haben dabei das Potenzial, Synergien mit anderen Umwelt- oder Nachhaltigkeitszielen zu schaffen. Gleichzeitig können sie aber auch zu potenziellen Zielkonflikten und negativen Veränderungen führen, zum Beispiel bei der Land- und Wassernutzung, der Biodiversität oder der Verteilung lokaler Ressourcen. Daher ist eine ganzheitliche Betrachtung von Entnahmeprojekten unerlässlich, um potenzielle negative Nebenwirkungen der CO_2-Entnahme zu minimieren und ihre langfristige Nachhaltigkeit sicherzustellen. Bestehende Zertifizierungssysteme berufen sich dabei häufig auf das Prinzip der „Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen" (engl. Do No Significant Harm, DNSH). Des Weiteren schreiben einige MRV-Systeme vor, dass über positive und negative Auswirkungen berichtet wird (zum Beispiel Label Bas Carbone, Verra, Gold Standard, UK Woodland Carbon Code)[282]. Obwohl einzelne Standards einen Beitrag von CO_2-Entnahmeprojekten zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele der UN erfordern (zum Beispiel VCS), gibt es für ihre Bemessung in der Regel keine klaren Kriterien oder Indikatoren. Dies ist unter anderem

[282] (Karsch & van Baren, 2024).

darauf zurückzuführen, dass die robuste Quantifizierung von sozialen und ökologischen Auswirkungen komplex ist und unter Umständen die Transaktionskosten für Projektentwickler erheblich erhöhen kann.[283]

Die CRCF-Verordnung legt fest, dass zertifizierte Entnahmeaktivitäten die Umwelt nicht beeinträchtigen dürfen und zusätzlich positive Nebeneffekte in Bereichen wie Klimaschutz, Klimaanpassung, Schutz von Wasser- und Meeresressourcen, Kreislaufwirtschaft, Schadstoffvermeidung und Biodiversitätswiederherstellung generieren können (Artikel 7). Landwirtschaftliche Carbon-Farming-Aktivitäten müssen dabei verpflichtend mindestens zum Schutz von Biodiversität und Ökosystemen beitragen. Außerdem müssen die Zertifizierungsmethoden mit Blick auf die Biomassennutzung das Kaskadenprinzip und die Nachhaltigkeitskriterien der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (EU) 2018/2001 (RED II) einhalten. Sofern möglich sieht die CRCF-Verordnung vor, Co-Benefits in den Zertifizierungsmethoden zu berücksichtigen. CO_2-Entnahmeprojekte, die eine Zertifizierung unter dem Mechanismus des Artikels 6.4 ÜvP erhalten wollen, müssen die Nachhaltigkeitsanforderungen eines eigens dafür entwickelten Instruments (engl. Sustainable Development Tool) erfüllen. Dafür müssen Projektentwickler unter anderem Risiken für die Umwelt und lokale Stakeholder bewerten, Maßnahmen zur Schadensvermeidung oder -minderung ergreifen und die Auswirkungen im Kontext der 17 UN-Nachhaltigkeitsziele dokumentieren. Zudem sind transparente Stakeholder-Konsultationen verpflichtend, um lokale Interessen zu berücksichtigen und die Nachhaltigkeit der Projekte sicherzustellen.

Zertifizierte CO_2-Entnahmeprojekte sollten hohen Qualitätsansprüchen gerecht werden müssen. Dies gilt auch für ihre Nachhaltigkeit. Bislang sind die Nachhaltigkeitsstandards bestehender Zertifizierungssysteme noch nicht einheitlich geregelt, mit den Prozessen zum CRCF und zu Artikel 6.4 ÜvP sind jedoch maßgebliche Instrumente absehbar. Gleichwohl steht die konkrete Umsetzung in beiden Fällen noch aus. Des Weiteren ist die Stringenz ihrer Nachhaltigkeitsanforderungen noch unklar. Im Rahmen des CRCF ist die Anwendung des Prinzips der Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen nach den Vorgaben der EU-Taxonomie nicht gesichert. Zudem ist noch nicht abzusehen, ob die Nachhaltigkeitsanforderungen an Biomasse unter der RED II/III in der Praxis ausreichend streng und umfassend sind.

Empfehlung 34: Die Bundesregierung kann im Rahmen nationaler Anreizsysteme oder Förderinstrumente zusätzliche Nachhaltigkeitsanforderungen an CO_2-Entnahmeprojekte stellen, die über die der Zertifizierungsstandards hinausgehen. Ein Beispiel hierfür sind Umweltverträglichkeitsprüfungen oder zusätzliche Nachhaltigkeitskriterien für Biomasse, die über die der RED hinausgehen, wie sie beispielsweise im Rahmen der BIK für BECCS-Projekte Anwendung finden.

[283] (Lesschen & Karsch, 2023).

Anforderungen an nachhaltige Biomasse in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2018/2001

Die EU-Richtlinie 2018/2001 (engl. Renewable Energy Directive, RED) verfolgt das Ziel, die Nutzung erneuerbarer Energien in der EU zu steigern, zu der auch die Erzeugung von Wärme und Strom durch den Einsatz von nachhaltiger Biomasse gehört. Sie legt deshalb sowohl Kriterien für Treibhausgaseinsparungen als auch Nachhaltigkeitskriterien für den Einsatz von Biomasse zur Energieerzeugung fest. Zum 20. November 2023 ist die novellierte Fassung der Richtlinie, die RED III (EU 2023/2413), in Kraft getreten, für deren Umsetzung in nationales Recht die Mitgliedstaaten 18 Monate Zeit haben.

Die Mindestanforderungen an die Nachhaltigkeit von Biomasse für die Zertifizierung von CO_2-Entnahmen unter der CRCF-Verordnung entsprechen den Kriterien aus Artikel 3 (3) und Artikel 29 der RED. Dies gilt es bei der Ausarbeitung der Zertifizierungsmethoden für einzelne Entnahmemethoden zu berücksichtigen. Artikel 3 (3) der RED III regelt das Prinzip der Kaskadennutzung, nach dem Holzbiomasse entsprechend ihrem höchsten wirtschaftlichen und ökologischen Mehrwert prioritär stofflich genutzt werden soll. Eine Förderung der energetischen Verwertung von hochwertiger Holzbiomasse wie Sägerundholz ist nicht erlaubt. Artikel 29 der RED III regelt folgende Aspekte der Nachhaltigkeitsanforderungen für Anlagen mit festen Biomassebrennstoffen ab 7,5 Megawatt Leistung bzw. gasförmigen Biomassebrennstoffen ab 2 Megawatt Leistung:

Landwirtschaftliche Biomasse unterliegt spezifischen Anforderungen in Bezug auf bestimmte Kohlenstoffpools, insbesondere den Bodenkohlenstoff (Artikel 29.2), und auf die Landnutzungskategorie, aus der die Biomasse stammt. Biomasse darf nicht von Flächen mit hohem Biodiversitätswert stammen (Artikel 29.3), darunter Primärwälder, Wälder mit hohem ökologischen Wert und artenreiches Grünland. Ebenso ist die Nutzung von Biomasse aus Flächen mit hohem Kohlenstoffbestand untersagt (Artikel 29.4), wozu Feuchtgebiete und dauerhaft bewaldete Flächen zählen. Sowohl land- als auch forstwirtschaftliche Biomasse darf nicht aus ehemaligen Torfgebieten gewonnen werden (Artikel 29.5). Für forstwirtschaftliche Biomasse gelten darüber hinaus spezifische Produktionskriterien (Artikel 29.6), darunter die Legalität der Ernte, der Schutz der Natur, der Erhalt der Bodenqualität und der Biodiversität sowie die langfristige Produktionskapazität des Waldes. Zusätzlich müssen nationale oder regionale LULUCF-Vorschriften eingehalten werden (Artikel 29.7(a)). Für landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Biomasse gilt eine Mindestanforderung an die Treibhausgasminderung (Artikel 29.10). Zudem müssen die indirekten Landnutzungsänderungseffekte von Biomasse, die für Biokraftstoffe und Bioliquids verwendet wird, minimiert werden (Artikel 26). Dies soll durch eine Deckelung der Nutzung von risikobehafteten Nahrungs- und Futtermittelpflanzen sowie deren schrittweisen Ausschluss erfolgen (Verordnung (EU) 2019/807).

Infobox 5: Nachhaltige Biomasse in der Richtlinie (EU) 2018/2001[284]

Doppelzählungen von Entnahmen durch mehrere Staaten lassen sich durch Corresponding Adjustments vermeiden

Doppelzählung (engl. Double Counting) ist ein Sammelbegriff, der die doppelte Registrierung, Nutzung oder Beanspruchung von Emissionsminderungen umfasst. Die Doppelzählung beschreibt die

[284] (UBA, 2024).

mehrfache Anrechnung einer Minderung oder Entnahme, was potenziell zu höheren globalen Netto-CO_2-Emissionen führt.

Ein wichtiger Baustein für die Vermeidung von Doppelzählungen von Minderungsleistungen durch die doppelte Registrierung oder Nutzung einzelner CO_2-Entnahmen sind stringente MRV-Systeme und Zertifikateregister. Die doppelte Beanspruchung (engl. Double Claiming) von CO_2-Zertifikaten stellt insbesondere beim internationalen Handel mit CO_2-Entnahmeleistungen ein Risiko dar. Es entsteht, wenn sowohl der Staat, in dem die Entnahme erfolgt, als auch der Staat, der die Entnahmeleistung erwirbt, die Minderung in seinen THG-Inventaren oder seinen national festgelegten NDCs anrechnet. Im Rahmen des Handels von ITMOs unter Artikel 6.2 ÜvP soll eine solche Möglichkeit durch „entsprechende Anpassungen" der nationalen THG-Inventare (engl. Corresponding Adjustments) verhindert werden, indem nur eine der beiden Parteien die Entnahme auf ihre staatlichen Minderungsziele anrechnet. Das Gleiche gilt prinzipiell auch für CO_2-Entnahmeleistungen, die unter dem Mechanismus von Artikel 6.4 ÜvP gehandelt werden. Die Doppelzählung von CO_2-Entnahmen durch die gleichzeitige Anrechnung auf die Klimaziele zweier Staaten wird allgemein als problematisch angesehen und sollte vermieden werden.

Unklar ist, ob Corresponding Adjustments auch bei staatlichen und unternehmerischen Zielen notwendig sind

Weniger eindeutig sind nach aktuellem Kenntnisstand Fälle, in denen sowohl ein Staat als auch ein Unternehmen eine zertifizierte CO_2-Entnahme auf seine jeweiligen Klimaziele anrechnet. Dies geschieht beispielsweise dann, wenn ein Unternehmen freiwillig CO_2-Zertifikate erwirbt und eine Klimaneutralitäts- oder Kompensations-Behauptung aufstellt, während ein Staat die CO_2-Entnahme gleichzeitig auf sein NDC anrechnet. Aus der Sicht einiger Stakeholder sollten Ansprüche auf zertifizierte Minderungsleistungen (einschließlich Entnahmen) entweder von einem Unternehmen oder einem Land geltend gemacht werden können, jedoch nicht von beiden. Ein Unternehmen darf in diesem Verständnis keine Kompensationsbehauptung aufstellen, sofern der Staat der Entnahme keine Anpassung seines THG-Inventars vornimmt. Es kann lediglich einen Beitrag zur Klimafinanzierung geltend machen (engl. Contribution Claim).

Umgekehrt gilt: Autorisiert ein Staat den Verkauf von kompensationsbefähigenden A6.4ERs, darf er die damit verbundene Entnahmeleistung nicht auf seine Minderungsziele anrechnen. Ein Unternehmen kann diese Zertifikate erwerben und stilllegen, um einen Klimaneutralitätsanspruch zu erheben.[285] Hintergrund ist das Argument, dass die gleichzeitige Anrechnung einer einzelnen CO_2-Entnahme auf ein unternehmerisches und ein staatliches Ziel dazu führen kann, dass anderweitige Emissionsminderungsbemühungen des Staates reduziert werden könnten. In diesem Fall wäre die Kompensationsbehauptung des Unternehmens irreführend, da der Effekt der Entnahme geringer ist als die tatsächlich aufs Unternehmensziel angerechnete Menge. Im Zusammenhang mit Artikel 6 ÜvP scheinen die Vertragsstaaten eine solche restriktive Interpretation der Doppelzählungsproblematik zu unterstützen. Die Formulierung der UNFCCC-Entscheidung 7/CMA.4, Annex I, para 29 sieht

[285] (Stoefs, 2024).

vor, dass A6.4ERs, bei denen keine entsprechende Anpassung des Staates vorliegt, in dem die Entnahme stattfindet, potenziell nicht für die Kompensationsansprüche von Unternehmen gelten können.

Andererseits wirft ein solch restriktives Verständnis von Doppelzählungen eine Reihe von Problemen und ungeklärten Fragen auf. Zunächst scheint das restriktive Verständnis in Widerspruch zum Vollständigkeitsprinzip der THG-Inventarberichterstattung zu stehen. Wie oben beschrieben, sollen die THG-Inventare alle THG-Emissionen und CO_2-Entnahmen innerhalb der territorialen Grenzen eines Staates erfassen. Da Unternehmen keine Unterzeichner der UNFCCC sind, würde eine entsprechende Anpassung im Fall einer Anrechnung zu Kompensationszwecken durch ein Unternehmen dazu führen, dass die Entnahme in keinem THG-Inventar widergespiegelt ist. Unklar ist bislang ebenfalls, ob Double Claiming auch dann als problematisch anzusehen ist, wenn das Unternehmen in demselben Staat angesiedelt ist, in dem auch das Entnahmeprojekt stattfindet.[286] Der CRCF schließt die gleichzeitige Anrechnung von CO_2-Entnahmen auf Unternehmensziele und das europäische NDC nicht aus und spricht in diesem Zusammenhang von Co-Claiming. Anbieter von Entnahmezertifikaten im VCM vertreten bislang unterschiedliche Sichtweisen zu der Thematik.[287] Auf EU-Ebene ist zu erwarten, dass im Rahmen weiterer legislativer Prozesse festgelegt wird, für welche Verwendungszwecke CRCF-Zertifikate zukünftig genutzt werden können.[288] Die Richtlinie über Umweltaussagen (engl. Green Claims Directive, GCD) wird dazu voraussichtlich erste Festlegungen treffen. Eine weitere Einbindung von CRCF-Einheiten in weitere europäische und nationale Bestimmungen und verpflichtende Instrumente ist darüber hinaus denkbar. Auf internationaler Ebene werden die Konkretisierung von Artikel 6 ÜvP und die Umsetzung erster kooperativer Abkommen nach Artikel 6.2 ÜvP und des Mechanismus nach Artikel 6.4 ÜvP Aufschluss über das Zusammenspiel zwischen der staatlichen und der privaten Ebene bringen.

Empfehlung 35: Die Bundesregierung sollte sich im Rahmen der Verhandlungen zwischen den Vertragsstaaten dafür einsetzen, dass die buchhalterischen Regeln zu entsprechenden Anpassungen bei ITMOs unter Artikel 6.2 ÜvP so gestaltet werden, dass sie Doppelzählungen konsequent ausschließen.

Empfehlung 36: Ein Ziel der angekündigten EU Green Claims Directive ist es, festzulegen, für welche Zwecke Unternehmen CRCF-Zertifikate einsetzen können. Die Bundesregierung sollte sich in diesem Prozess dafür einsetzen, dass Unternehmensangaben zu diesen Zertifikaten möglichst transparent und glaubwürdig sind. Dies ist gerade vor dem Hintergrund der Möglichkeit der gleichzeitigen Anrechnung zertifizierter CO_2-Entnahmen auf Unternehmensziele und nationale NDCs relevant.

[286] (Zakkour & Cook, 2024).
[287] (Schneider & Fallasch, 2024).
[288] (Fallasch, et al., 2024).

7 Ökonomische Anreize und Marktrahmen

Zur Entwicklung der CO_2-Entnahme und zur Erreichung der Klimaziele bedarf es eines adäquaten Anreiz- und Regelungssystems (Marktrahmen). In diesem Kapitel werden Handlungsoptionen zur Gestaltung des Marktrahmens beschrieben und bewertet, um Empfehlungen abzuleiten. Ein ungefährer zeitlicher Ablauf der Instrumente wird in einem Phasenmodell dargestellt.

7.1 Problemstellung und Zielbild

Grundlegendes Marktversagen für CO_2-Entnahmen

Die CO_2-Entnahme leidet unter einem ähnlichen Anreizproblem wie die Vermeidung von CO_2-Emissionen: Während emissionsverursachende Tätigkeiten für den Einzelnen kurzfristige Vorteile bieten können, verursachen sie langfristige Kosten für die Gesellschaft. Die Schäden durch den Klimawandel sind weltweit ungleich verteilt und treffen auch kommende Generationen. Dies erschwert es, die Effekte der CO_2-Entnahme in Entscheidungen einzubeziehen. Umgekehrt bewirkt die CO_2-Entnahme zwar gesellschaftliche Vorteile durch die Vermeidung langfristiger Schäden, ist aber mit Kosten verbunden. Daher besteht ohne geeignete Rahmenbedingungen das Risiko, dass notwendige Investitionen in CO_2-Entnahmen ausbleiben.

Bestehender Marktrahmen für CO_2-Entnahmen nicht ausreichend

Der bestehende Marktrahmen für CO_2-Entnahmemethoden führt momentan nicht zu den benötigten Investitionen in Negativemissionen für die Erreichung der Klimaziele. Dies betrifft sowohl LULUCF-basierte als auch technische Entnahmemethoden. Der bisherige Marktrahmen für den LULUCF-Sektor verfolgt nicht primär das Ziel der CO_2-Entnahme, sondern den Naturschutz (Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz, ANK / Nature Restoration Law, NRL) sowie eine Verbesserung der Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft und der Landschaftspflege (Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes, GAK).

Der freiwillige Kohlenstoffmarkt: Mangel an Nachfrage und Zahlungsbereitschaft für qualitativ hochwertige CO_2-Entnahmen

Auf dem freiwilligen Kohlenstoffmarkt (engl. Voluntary Carbon Market, VCM) können Projekte zur Emissionsvermeidung oder CO_2-Entnahme handelbare CO_2-Zertifikate generieren. Die Zertifizierung erfolgt durch staatliche oder private Akteure, die teils eigene Qualitätsstandards für MRV (engl. Monitoring/Measurement, Reporting and Verification, MRV) von CO_2-Entnahmen entwickeln (siehe Kapitel 6.4.1). Die Preise für CO_2-Zertifikate im VCM variieren stark, in Abhängigkeit von der Art des Projekts und der Qualität des Zertifikats sowie von Verfügbarkeit und Nachfrage: Während Zertifikate natürlicher CO_2-Entnahmemethoden oft zwischen 5 und 30 Euro pro Tonne CO_2 gehandelt werden, können Zertifikate über Entnahmen durch DACCS oder BECCS bis zu 1.000 Euro pro Tonne CO_2 kosten. 2021 hatte der gesamte VCM ein Volumen von rund 2 Mrd. US-Dollar, das bis 2024 auf ca. 700 Mio. US-Dollar abnahm.[289] Ein Großteil der Zertifikate stammt aus Emissionsvermeidungsprojekten, während nur rund 10 Prozent aus CO_2-Entnahmen resultieren. Neuartige CO_2-

[289] (Krey, Hansen, & Ulrik, 2025).

Entnahmen machen sogar nur einen Anteil von 2 Prozent, jedoch 33 Prozent des Marktwertes aus.[290, 291]

Der freiwillige Kohlenstoffmarkt ist mit erheblichen Herausforderungen konfrontiert, die das Vertrauen schwächen und die Nachfrage dämpfen. Auf dem Markt sind Kompensationszertifikate unterschiedlicher Qualität mit mangelnder Vergleichbarkeit erhältlich, die oft nicht genau zwischen CO_2-Reduktion und -Entnahme unterscheiden. Es wurden wiederholt Missstände bei der Zertifizierung offengelegt, insbesondere in Hinblick auf die verlässliche Quantifizierung der tatsächlich erreichten zusätzlichen Klimaschutzwirkung.[292] Hinzu kommen offene Fragen bezüglich der Vermeidung der Doppelzählung von Zertifikaten (siehe Kapitel 6.4.2).

Aktuell ist daher davon auszugehen, dass es weiterer Maßnahmen bedarf, um klare und verlässliche Investitionsanreize zu bieten und die notwendige Skalierung von CO_2-Entnahmen zur Erreichung der Klimaziele zu gewährleisten.

Öffentliche Förderungen: Staatliche Maßnahmen zur Skalierung von CO_2-Entnahmen stehen noch am Anfang

Weltweit lag der Fokus staatlicher Maßnahmen bislang auf der Förderung von Forschung und Entwicklung für einzelne CO_2-Entnahmemethoden oder von Pilotprojekten. Für die Forschung bestehen bereits auf europäischer Ebene Fördermöglichkeiten, beispielsweise durch das LIFE-Programm (franz. L'Instrument Financier pour l'Environnement) sowie dem Horizon Europe Programm. In Deutschland wird die Grundlagenforschung etwa in den Programmen CDRmare und CDRterra gefördert. Über den Innovation Fund werden Demonstrationsprojekte durch die EU gefördert (vgl. BECCS-Projekt von Stockholm Exergi).

Inzwischen beginnen einige Staaten gezielte, öffentlich finanzierte Anreize für bestimmte Entnahmemethoden zu schaffen. So nutzt Schweden Rückwärtsauktionen (engl. Reverse Auctions), um BECCS-Projekte zu fördern. In den USA bietet das 45Q-Steuergutschriftprogramm finanzielle Anreize für die dauerhafte CO_2-Speicherung. Großbritannien arbeitet an einem Konzept zur Förderung der CO_2-Entnahme über Kohlenstoffdifferenzverträge (engl. Carbon Contracts for Difference, CCfDs). Durch die Bundesförderung für Industrie und Klimaschutz (BIK) besteht auch in Deutschland ein erstes Förderprogramm für CCU/S-basierte Emissionsreduktion und CO_2-Entnahme.

Bisher gibt es jedoch noch keine ganzheitlichen Rahmenbedingungen für die nachhaltige Entwicklung eines Marktes für die CO_2-Entnahme auf nationaler und internationaler Ebene. Viele politische Prozesse wie der Handel von zertifizierten CO_2-Entnahmen unter Artikel 6 des Übereinkommens von Paris (ÜvP) befinden sich noch in der Diskussion oder in der Entwicklungsphase.

[290] (CDRterra, 2024).
[291] (Krey, Hansen, & Ulrik, 2025).
[292] Einer Studie der Max-Planck-Gesellschaft zufolge führten nur 16 Prozent der evaluierten Projekte zu tatsächlichen Emissionsminderungen (MPG, 2024).

Zielbild: Effizienter und effektiver Marktrahmen für die CO_2-Entnahme

Das langfristige Ziel ist ein ökologisch nachhaltiger und selbsttragender Marktrahmen, der Investitionen in CO_2-Entnahmen so anreizt, dass sie einen volkswirtschaftlich effizienten Beitrag zur Klimaneutralität leisten. Das bedeutet auch, dass der Marktrahmen zum Hochlauf von CO_2-Entnahmen beiträgt, ohne zu reduzierten Emissionsminderungsbemühungen (engl. Mitigation Deterrence) zu führen. Der Marktrahmen ist dann effizient, wenn er die Erreichung der Klimaziele zu möglichst geringen Kosten für den Staat und die Volkswirtschaft ermöglicht. Sobald es keiner staatlichen Unterstützung finanzieller Natur mehr bedarf, ist der Marktrahmen selbsttragend. Der Marktrahmen ist dann ökologisch nachhaltig, wenn er Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt und negative Auswirkungen minimiert. Ein solcher Markt muss robuste Qualitätsstandards für CO_2-Entnahmen, transparente Berichtsmechanismen und verlässliche regulatorische Rahmenbedingungen bieten, um Vertrauen zu schaffen und Investitionen zu ermöglichen.

Um diesem Ziel gerecht zu werden, sollte eine langfristige Strategie zur Entwicklung des Marktrahmens entwickelt werden. Dazu werden im folgenden Kapitel mögliche Anreizinstrumente bewertet. Eine geeignete Strategie berücksichtigt auch die unterschiedlichen Charakteristika der einzelnen CO_2-Entnahmemethoden. Vor diesem Hintergrund bedarf es sowohl einer funktionalen als auch einer temporalen Koordinierung[293] möglicher Anreizinstrumente (siehe auch Kapitel 7.3).

7.2 Bewertung von Anreizinstrumenten

In diesem Kapitel werden neun Anreizinstrumente bewertet, die in Fachkreisen bezüglich ihrer möglichen Rolle für eine Verbesserung des Marktrahmens für CO_2-Entnahmen diskutiert werden (siehe Tabelle 11). Eine Vorauswahl von Instrumenten wurde auf Basis einer Analyse der Fachliteratur[294] und bestehender Instrumente im Ausland vorgenommen und durch Vorschläge im Rahmen des Stakeholderprozesses ergänzt. Diese Instrumente legen den Fokus auf unterschiedliche Ansätze. Einige sollen die Verfügbarkeit marktbildender Informationen verbessern und andere direkt für finanzielle Anreize oder nachfragebildende Vereinbarungen und Verpflichtungen sorgen.

Die Instrumente können in drei Kategorien eingeteilt werden:

[293] (Stechmesser et al., 2024).

[294] (Edenhofer, et al., 2021) (Fuss, et al., 2021) (Smith S. , et al., 2024) (Poralla, Honegger, & Ahonen, 2021).

Tabelle 11 Neun mögliche Anreizinstrumente für eine Verbesserung des Marktrahmens für CO_2-Entnahmen

Maßnahmen zur Marktvorbereitung	Öffentliche Investitionen	Marktfinanzierte Instrumente
1. Staatliche Zertifizierungsstandards 2. Reportingvorgaben, Labels, Kompetenz- und Kapazitätsaufbau 3. Forschungs- und Entwicklungs-förderung	4. Klimaneutrale öffentliche Verwaltung und Beschaffung 5. Ergebnisbasierte Förderung 6. Aktivitätsbasierte Förderung	7. Öffentlich-private Vereinbarungen / Private Abkommen 8. Integration in den EU-ETS 9. Entnahmeverpflichtungen

Die Relevanz einzelner Instrumente hängt von der jeweiligen Marktphase ab. Manche Maßnahmen sind insbesondere für den anfänglichen Hochlauf der CO_2-Entnahme relevant, verlieren aber mit zunehmender Marktreife an Bedeutung. Andere Instrumente könnten auch langfristig notwendig bleiben, um einen effizienten und resilienten CO_2-Entnahmemarkt zu sichern.

Kriterien der Bewertung

In diesem Kapitel wird eine Bewertung anhand der in Tabelle 12 aufgeführten Kriterien vorgenommen. Die sieben Kriterien ergeben sich anhand des beschriebenen Zielbildes auf Basis wissenschaftlicher Studien[295] sowie von Reflexionen der Experten- und im Rahmen des LNe-Beteiligungsprozesses.

Tabelle 12 Kriterien der Bewertung von Anreizinstrumenten

Bewertungskriterien	
Effektivität	• In welchem Umfang trägt das Instrument dazu bei, dass die für die Klimaziele erforderlichen CO_2-Entnahmemengen erreicht werden?
Effizienz	• Sorgt das Instrument dafür, dass der Ausbau von CO_2-Entnahmen so kostengünstig wie möglich erfolgt? • Schafft das Instrument Anreize für Innovationen und langfristige Kostenreduktionen? • Wird durch dieses Instrument die Informationslage über Emissionen und weitere externe Effekte verbessert?
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Welche Investitionen und laufenden Aufwendungen sind notwendig, um die Einführung und Verwaltung des Instruments zu gewährleisten?

[295] (Fuss, et al., 2021) (Arlinghaus, Feng, Stemmler, Fankhauser, & Smith, 2025) (Honegger, et al., 2022).

Bewertungskriterien	
	• Wie hoch sind der bürokratische Aufwand und die Transaktionskosten für Antragstellung, Berichterstattung oder Nachweispflichten?
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Wie stark belastet das Instrument den Staatshaushalt? • Inwieweit orientiert sich die Kostenverteilung am „Polluter Pays"-Prinzip (Verursachergerechtigkeit)? • Wie sind die Auswirkungen auf die Verteilungsgerechtigkeit? Wer trägt die Kosten und wird die Zahlungsfähigkeit berücksichtigt?
Investitionssicherheit und Resilienz	• Bestehen langfristig planbare Anreize und Finanzierungsmechanismen für Unternehmen? • Ist das Instrument flexibel und resilient genug, um auf Marktentwicklungen, geopolitische Änderungen und neue Erkenntnisse zu reagieren? • Trägt das Instrument dazu bei, dass Märkte sich langfristig unabhängig von staatlicher Unterstützung entwickeln?
Internationale Anschlussfähigkeit	• Trägt das Instrument dazu bei, den internationalen Hochlauf von CO_2-Entnahmen zu unterstützen? • Werden mögliche negative Auswirkungen für Drittländer vermieden? • Können Nachteile für Unternehmen in regulierten Märkten gegenüber internationalen Wettbewerbern vermieden werden, um Carbon Leakage zu minimieren?
Politische Umsetzbarkeit	• Findet das Instrument Akzeptanz bei Bevölkerung, Unternehmen, NGOs und anderen Stakeholdern? • Besteht eine realistische Chance auf Zustimmung in Regierung und Parlament? • Ist das Instrument mit nationalen und internationalen Regelwerken kompatibel?

7.2.1 Staatliche Zertifizierungsstandards

Sowohl private Standards zur Zertifizierung von CO_2-Entnahmen als auch die tatsächliche Klimaschutzwirkung vieler Entnahmeprojekte werden häufig dahingehend hinterfragt, inwiefern sie vergleichbar sind und eine hohe Qualität von CO_2-Entnahmen gewährleisten. Dies führt zu Unsicherheiten sowohl für den VCM als auch bei der möglichen Anerkennung dieser Zertifikate in nationalen oder internationalen Regulierungssystemen.

Staatliche Zertifizierungsstandards sollen als Grundlage dienen, um die Effektivität von CO_2-Entnahmeprojekten einheitlich zu bewerten und die Einhaltung von weitergehenden Nachhaltigkeitsanforderungen sicherzustellen. Ein wesentlicher Aspekt der Standards ist die Entwicklung von geeigneten MRV-Methoden. Sie sollen nicht nur die CO_2-Entnahmen quantifizieren, sondern auch die Zusätzlichkeit, Dauerhaftigkeit, Nachhaltigkeit und Vermeidung von Doppelzählungen überprüfen (siehe Kapitel 6.4.2). Eine einheitliche Bewertungsgrundlage soll die Berichterstattung und Integration in nationale Treibhausgasinventare gewährleisten. Beispiele für staatliche Zertifizierungsstandards sind der in Erarbeitung befindliche europäische Standard der CRCF-Verordnung, der internationale Standard unter den Artikeln 6.2 und 6.4 des ÜvP, sowie das französische Label Bas Carbone (siehe Kapitel 6.4.1).

Tabelle 13 Bewertung Staatliche Zertifizierungsstandards

Kriterium	Bewertung
Effektivität	• Es ist unwahrscheinlich, dass gesetzte Klimaziele durch Zertifizierungsstandards allein erreicht werden. Sie können jedoch helfen, Hindernisse bei der Entwicklung der freiwilligen Nachfrage abzubauen.
Effizienz	• Eine standardisierte Bewertung von CO_2-Entnahmen ermöglicht es, zwischen und innerhalb verschiedener Methoden zu vergleichen, und verbessert damit die Markttransparenz. • Einheitliche Standards ermöglichen internationalen Handel und somit kostengünstigeren Klimaschutz, da Unternehmen Entnahmeprojekte in Regionen mit niedrigen Umsetzungskosten finanzieren können.
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Kurzfristig bestehen gewisse Verwaltungskosten, da Methodiken und eine Registerinfrastruktur aufzubauen sind. • Administrative Belastungen könnten insbesondere für kleinere Unternehmen mit geringeren entsprechenden Kapazitäten eine Hürde darstellen. • Langfristig können einheitliche Standards und Zertifizierungen die Transaktionskosten senken.
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Standards und Zertifizierungen belasten kaum den Staatshaushalt. • Standardisierungen im Rahmen von CRCF und Artikel 6 ÜvP könnten das Vertrauen in Zertifikate erhöhen und private Investitionen steigern.
Investitionssicherheit und Resilienz	• Der CRCF bildet eine wichtige Basis für Investitionen in Entnahmemethoden innerhalb der EU. • Bei der Umsetzung von Artikel 6 ÜvP und der Anerkennung der Zertifikate bestehen noch erhebliche Unsicherheiten.
Internationale Anschlussfähigkeit	• Der CRCF und der Artikel 6 ÜvP unterstützen eine Standardisierung über nationale Grenzen hinweg.
Politische Umsetzbarkeit	• Es gibt Herausforderungen bei der politischen Umsetzung durch unterschiedliche Interessenlagen von Akteuren. • Der CRCF-Prozess ist innerhalb der EU politisch gut verankert. • Die Umsetzbarkeit von Artikel 6 ÜvP ist stark abhängig von der konkreten Ausgestaltung auf UNFCCC-Ebene und der Akzeptanz durch involvierte Akteure.

Zusammenführende Bewertung

Die Entwicklung von Zertifizierungsstandards, die Qualität, Dauerhaftigkeit und Vergleichbarkeit verschiedener Entnahmemethoden gewährleisten, stärkt das Vertrauen von Investoren, erhöht die Markttransparenz und unterstützt so die Skalierung der CO_2-Entnahme.

Die Haushaltswirkung dieser Instrumente ist verhältnismäßig gering und umfasst primär die administrativen Kosten, die mit der Entwicklung und Implementierung dieser Standards verbunden sind. Die Kosten für MRV und die Umsetzung der Standards werden dabei von den Unternehmen getragen. Der Administrationsaufwand könnte insbesondere für kleinere Unternehmen oder Projekte eine Hürde darstellen.

Sowohl die CRCF-Verordnung der EU als auch die Regelungen zu Artikel 6 ÜvP haben das Potenzial, die Verlässlichkeit und Vergleichbarkeit von Zertifikaten zu erhöhen, Vertrauen und private Investitionen zu steigern und somit zur Kosteneffizienz beizutragen. Aktuell bestehen aber noch offene Diskussionen zum Umgang mit den Herausforderungen bezüglich der unterschiedlichen MRV-Fähigkeit und der Anforderungen an die Versicherung gegen Wiederfreisetzung sowie der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsanforderungen und Ökosystemdienstleistungen.

7.2.2 Reporting-Vorgaben, Labels, Kompetenz- und Kapazitätsaufbau

Diese Kategorie umfasst Instrumente, die Informationen über die Umweltwirkung von CO_2-Entnahmen zur Verfügung stellen. Sie haben zwar keinen direkten Einfluss auf die Nachfrage nach CO_2-Entnahmen, indem sie aber die Informationsbasis der Bevölkerung verbessern, können sie die Grundlage für zukünftige politische Entscheidungen und Konsumentscheidungen legen. Durch die entsprechende Ausgestaltung von Reporting-Vorgaben und Labels, beispielsweise für „klimaneutrale" Produkte, können – neben der Emissionsvermeidung – auch Anreize für CO_2-Entnahmen geschaffen werden.

Zentrale Instrumente in dieser Kategorie sind:

- Reporting-Vorgaben, wie sie etwa durch die EU-Richtlinie zur Unternehmens-Nachhaltigkeitsberichterstattung (engl. Corporate Sustainability Reporting Directive, CSRD) und die EU Green Claims Directive (GCD) entwickelt wurden und nun in nationales Recht umgesetzt werden, um Unternehmen zur standardisierten Offenlegung von Nachhaltigkeitsinformationen zu verpflichten und Greenwashing entgegenzuwirken.
- Staatliche Labels und Ratings, die einzelne CO_2-Entnahmeprojekte oder Produkte qualitativ bewerten und es potenziellen Nachfragern ermöglichen sollen, einzelne Aspekte differenziert beurteilen zu können. Hierzu zählen beispielsweise Umweltverträglichkeit oder Ressourcenintensität.
- Maßnahmen zum Kompetenz- und Kapazitätsaufbau, wie etwa Informationskampagnen und Bürgerbeteiligung, die das gesellschaftliche Bewusstsein für den Bedarf und die Möglichkeiten der CO_2-Entnahme stärken, oder auch die Förderung von kooperativen Ansätzen zur Umsetzung von Artikel 6 ÜvP im Rahmen der Internationalen Klimaschutz Initiative (IKI), bei der Akteure auf Angebots- und Nachfrageseite der CO_2-Entnahme vernetzt werden und staatliche Kapazitäten zur Überprüfung von Standards aufgebaut werden sollen.

Tabelle 14 Bewertung Reporting-Vorgaben, Labels, Kompetenz- und Kapazitätsaufbau

Kriterium	Bewertung
Effektivität	• Durch verpflichtende Reporting-Vorgaben (CSRD) kann die Verfügbarkeit wichtiger Informationsgrundlagen sichergestellt werden.

Kriterium	Bewertung
	• Die GCD kann die tatsächliche Minderung oder Kompensation statt Greenwashing anreizen. • Kompetenzaufbaumaßnahmen können das Wissen über Chancen und Risiken der CO_2-Entnahme erhöhen. • Die Erreichung der Klimaziele ist mit den Maßnahmen allein unwahrscheinlich.
Effizienz	• Eine transparente, einheitliche und damit vergleichbare Berichterstattung ermöglicht fundiertere Investitionsentscheidungen. • Maßnahmen zum Aufbau von Wissen und Netzwerken gehen mit geringen direkten Kosten einher. Ihr Effekt ist allerdings auch schwer quantifizierbar.
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Der (initiale) administrative Aufwand für Unternehmen ist hoch, insbesondere bei Einführung neuer Berichtspflichten und für kleine und mittlere Unternehmen (KMU). • Die öffentliche Verwaltung benötigt ausreichend Kapazitäten zur Durchsetzung und Überwachung von Reporting-Vorgaben und Umweltaussagen. • Niedriger Verwaltungsaufwand bei Bildungsmaßnahmen, da es sich meist um gezielte Kommunikationsmaßnahmen handelt
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Eher geringe direkte Haushaltsbelastung; Kosten vor allem für die Einrichtung und Überwachung von Berichtsmechanismen und Kontrollen • Ungleichmäßige Kostenverteilung zwischen kleinen und großen Unternehmen, da KMU überproportional belastet werden können • CSRD und GCD fördern die Verursachergerechtigkeit, da Unternehmen über ihre Umweltauswirkungen Rechenschaft ablegen. • Kompetenz- und Kapazitätsaufbau verursachen relativ geringe öffentliche Kosten.
Investitionssicherheit und Resilienz	• Reporting-Verpflichtungen und Labels mit langfristiger Planungssicherheit durch stabilen Rahmen für die Bewertung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen • Hohes Maß an Planbarkeit durch standardisierte und verpflichtende Berichterstattung • Abhängigkeit von politischen Entwicklungen: Änderungen in regulatorischen Vorgaben oder eine schwache Durchsetzung könnten Unsicherheiten für Unternehmen und Investoren schaffen. • Geringere Investitionssicherheit, wenn Zertifizierungen und Labels nicht breit anerkannt sind • Bildungsmaßnahmen und Bürgerbeteiligung haben einen langfristigen Effekt, der aber weniger planbar und abhängig von der gesellschaftlichen Dynamik ist.
Internationale Anschlussfähigkeit	• Potenzielle Rolle als Best-Practice-Modell: Länder mit etablierten Berichtspflichten und Informationssystemen bzw. die EU könnten als Vorbilder für internationale Regulierungen dienen oder diese bei Handelsabkommen und Ähnlichem zugrunde legen.
Politische Umsetzbarkeit	• Während freiwillige Informationsmaßnahmen leichter umsetzbar sind, gibt es Widerstände gegen verpflichtende Berichtssysteme.

Kriterium	Bewertung
	• Aktuell noch unklar, wann und in welcher Ausgestaltung CSRD in nationales Recht überführt wird; insbesondere Widerstand von Unternehmen aufgrund hoher Bürokratiekosten • Die GCD stößt auf Kritik aus der Wirtschaft, da sie strengere Regeln für Umweltversprechen vorschreibt. • Bildungs- und Aufklärungskampagnen sind politisch einfacher umsetzbar, da sie keine wirtschaftlichen Verpflichtungen für Unternehmen schaffen.

Zusammenführende Bewertung

Staatliche Reporting-Vorgaben und Informationsaufbau können die Entwicklung eines nachhaltigen und tragfähigen Marktrahmens unterstützen, indem sie Transparenz in Bezug auf Emissionen und ihre Kompensation schaffen, was die freiwillige Nachfrage nach CO_2-Entnahmen und Investitionen erhöhen und Greenwashing hemmen kann.

Berichtsvorgaben wie die EU Corporate Sustainability Reporting Directive und die EU Green Claims Directive verpflichten die Unternehmen zur standardisierten Offenlegung von Klimawirkungen und Nachhaltigkeitsstrategien. Die verpflichtenden europäischen Reporting-Vorgaben müssen auf nationaler Ebene umgesetzt werden. Die Sorge vor Wettbewerbsnachteilen durch den Aufwand zur Erfüllung der Reporting-Vorgaben kann dafür eine Hürde darstellen.

Durch die Entwicklung von qualitativ hochwertigen Labels, wie etwa einem Klimalabel, könnte für Unternehmen ein Anreiz entstehen, Emissionsreduktionen und CO_2-Entnahmen zum Erhalt des Labels umzusetzen, um damit verbundene Marketingchancen zu nutzen. Dabei können Informationskampagnen und Bürgerbeteiligungsformate das gesellschaftliche Bewusstsein für den Bedarf und die Möglichkeiten der CO_2-Entnahme und konkret auch die Bekanntheit und Akzeptanz etwa von Labels stärken.

Eine Zielerreichung allein durch einen Einsatz der genannten Instrumente ist schwer absehbar, allerdings können die Rahmenbedingungen für freiwillige Märkte verbessert bzw. indirekt reguliert werden und Nachfrage nach hochwertigen Entnahmen schaffen.

7.2.3 Forschungs- und Entwicklungsförderung

Die Förderung von Forschung und Entwicklung (F&E) umfasst den Einsatz öffentlicher Gelder (gegebenenfalls ergänzt um die gezielte Mobilisierung privater Gelder) zum einen für die Grundlagenforschung zu CO_2-Entnahmen sowie zum anderen für technische Entwicklungen zu neuen CO_2-Entnahmemethoden oder zur Verbesserung bestehender Methoden. Dadurch können entweder übergeordnete Erkenntnisse gewonnen oder einzelne Methoden auf verschiedenen Entwicklungsstufen unterstützt werden.

Dabei gibt es verschiedene Ansätze für F&E-Förderungen:

- Förderung der Grundlagenforschung zu neuen Methoden
- Begleitforschung, zum Beispiel zu ökologischen Auswirkungen oder gesellschaftlichen Aspekten, die mittelbar auf den Hochlauf der CO_2-Entnahme einzahlen

- Technologische Verbesserung bestehender Methoden, etwa zur Kostensenkung oder Effizienzsteigerung
- Unterstützung der Hochskalierung durch die Förderung von konkreten (Pilot-) Entnahmeprojekten in begrenztem Umfang wie etwa Reallaboren

Beispiele sind diverse Förderprogramme des Bundes und der Länder (unter anderem die Bundesförderung Industrie und Klimaschutz (BIK), BMBF-Förderprogramme wie Forschung für Nachhaltigkeit (FONA), aus dem die Projekte CDRterra und CDRmare finanziert werden) oder auch europäische Programme (z. B. Strategic Technologies for Europe Platform (STEP), der Innovationsfonds, Horizon Europe, das LIFE-Programm etc.).

Tabelle 15 Bewertung Forschungs- und Entwicklungsförderung

Kriterium	Bewertung
Effektivität	• Indem neue und effizientere Technologien entwickelt werden, können für gleiche finanzielle Aufwendungen größere Klimaschutzbeiträge erzielt werden. Kurzfristig ist der Beitrag zur Skalierung des Einsatzes von CO_2-Entnahmemethoden allerdings begrenzt.
Effizienz	• Finanzielle Aufwände für F&E können langfristig eine große Hebelwirkung haben und Kosten vermeiden oder senken. • Es besteht jedoch das Risiko der Fehlallokation von Fördergeldern, wenn ungeeignete Projekte für die Förderung ausgewählt werden.
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Es ist von keinem gesteigerten Bürokratieaufwand auszugehen, da Strukturen zur Forschungsförderung bereits etabliert sind und Transaktionskosten lediglich für die Erstellung von Förderanträgen anfallen. • Der Hauptverwaltungsaufwand besteht in der Auswahl geförderter Projekte und ihres kontinuierlichen Monitorings. Dieser Aufwand ist allerdings begrenzt.
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Geringe Haushaltswirkung; kann durch die Kooperation mit privaten Akteuren teilweise weiter verringert werden • Die Finanzierungsgerechtigkeit ist abhängig davon, ob Forschungsgewinne in Patenten gebunden bleiben oder der Allgemeinheit zugutekommen.
Investitionssicherheit und Resilienz	• Risiken der Refinanzierung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben werden durch staatliche Beteiligung minimiert. • Kostenrisiken für Folgeprojekte können durch Erkenntnisse der F&E-Projekte gesenkt werden. • Forschungsförderung kann zur Entwicklung eines Portfolios an Entnahmemethoden und damit zur Resilienz beitragen.
Internationale Anschlussfähigkeit	• Die internationale Anschlussfähigkeit ist abhängig davon, ob ausschließlich Forschungsprojekte in Deutschland gefördert werden, und ob Forschungsergebnisse auch dem Ausland zur Verfügung gestellt werden. • Forschungsergebnisse dienen der Weiterentwicklung von Technologien und können potenziell global genutzt werden. Indem Technologien zur Marktreife gebracht werden, können Beiträge zur globalen Skalierung von CO_2-Entnahmen geleistet werden.
Politische Umsetzbarkeit	• Es besteht eine hohe Akzeptanz für Maßnahmen zu Forschung und Entwicklung und es gibt nur geringe Zielkonflikte mit anderen haushaltspolitischen Prioritäten, da die Projekte einen begrenzten Finanzbedarf haben. • Es bestehen keine nennenswerten politischen Barrieren, F&E zu fördern.

Zusammenführende Bewertung

Die Forschung zur CO_2-Entnahme leistet langfristig einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele, entfaltet ihre Wirkung aber erst über mehrere Jahre hinweg und führt nicht unmittelbar zu großskaliger CO_2-Entnahme. Da private Mittel noch nicht ausreichend zur Verfügung stehen und

Unternehmen positive Externalitäten ihrer Wissensgenerierung für Dritte nicht berücksichtigen (Technologie-Spillover-Effekte)[296], ist eine staatliche Förderung von F&E notwendig. Die Wirkung auf den Haushalt ist im Vergleich zu anderen Maßnahmen begrenzt, auch da staatliche F&E-Förderungen private Investitionen anregen können. Politisch ist F&E-Förderung vergleichsweise leicht umsetzbar.

Heute sind viele CO_2-Entnahmemethoden entweder noch in einem frühen Entwicklungsstadium und der Erfolg der Umsetzung ist durch unausgereifte Monitoring-Methodiken unzureichend überprüfbar oder zu teuer. Eine staatliche F&E-Förderung kann dabei unterstützen, die Technologie- und Marktreife schneller zu erreichen, Effizienz- und Kostenvorteile zu erzielen sowie wissenschaftlich fundierte MRV-Verfahren zu entwickeln, die den kommerziellen Einsatz von CO_2-Entnahmemethoden ermöglichen. Eine umfassende Erforschung weiterer Faktoren ist Voraussetzung für den erfolgreichen und nachhaltigen Einsatz der CO_2-Entnahme und sollte daher langfristig finanziert werden. Dazu zählen ökologische Auswirkungen sowie Energie- und Flächenbedarfe, aber auch die gesellschaftliche Akzeptanz, was Unsicherheiten hinsichtlich der Rolle der CO_2-Entnahme in der Klimaarchitektur aufwirft.

Um die Effizienz und Wirkung zu maximieren, sollte gezielt auf die praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse geachtet sowie zu einer engen Zusammenarbeit mit potenziellen Anwendern und anderen Marktakteuren ermutigt werden. Insbesondere anhand von Reallaboren und anderen Praxiserprobungen können die tatsächlichen Chancen und Risiken der Technologien besser abgeschätzt und es kann die Aussagekraft von Kostenschätzungen erhöht werden.

7.2.4 Klimaneutrale öffentliche Verwaltung und Beschaffung

Der Bund ist gemäß § 15 KSG verpflichtet, die Bundesverwaltung bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu organisieren. § 13 KSG verpflichtet die öffentliche Hand, durch nachhaltige Beschaffungsrichtlinien die Nachfrage nach klimafreundlichen Produkten und Dienstleistungen zu fördern und so zur Erreichung der Klimaziele beizutragen. Dies beinhaltet zwei eng miteinander verbundene Teilaspekte:

Klimaneutrale Verwaltung: Dies umfasst die Reduktion der Netto-Treibhausgasemissionen aller staatlichen Institutionen, insbesondere der Bundesverwaltung. Das erfordert, dass zunächst Emissionen vorrangig vermieden oder reduziert werden, beispielsweise durch energieeffiziente Gebäude, nachhaltige Mobilität, den Bezug erneuerbarer Energien und digitale Arbeitsprozesse. Darüber hinaus könnte ein verbleibender Teil der Emissionen durch (dauerhafte) CO_2-Entnahme kompensiert werden.

Öffentliche Beschaffung: Die öffentliche Hand ist einer der größten Auftraggeber in Deutschland und beeinflusst durch ihre Vergabeentscheidungen maßgeblich den Markt für Produkte und Dienstleistungen. Zudem verursacht sie in erheblichem Umfang Scope-3-Emissionen. Eine möglichst klimafreundliche öffentliche Beschaffung ermöglicht es, diese Emissionen zu adressieren, aber auch grüne Leitmärkte zu schaffen, um den Hochlauf CO_2-armer Technologien zu ermöglichen.

[296] (Edenhofer, et al., 2021).

Eine verbindliche Kompensation verbliebener Emissionen in Beschaffungsprozessen könnte somit einen Anreiz für den Hochlauf der CO_2-Entnahme schaffen.

Tabelle 16 Bewertung Klimaneutrale öffentliche Verwaltung und Beschaffung

Kriterium	Bewertung
Effektivität	• Klimaneutrale öffentliche Beschaffung hat das Potenzial, Standards auch für den Privatsektor und andere Länder zu setzen. • Der Hebel für den Hochlauf von CO_2-Entnahmen ist gering, da die Ziele primär durch Emissionsminderung erreicht werden müssen.
Effizienz	• Die bevorzugte Verwendung kosteneffizienter Methoden ist möglich, insbesondere bei Ausschreibeverfahren. • Die Transparenzanforderungen bezüglich des CO_2-Fußabdrucks in der öffentlichen Beschaffung sind bislang noch unzureichend, sodass Investitionsentscheidungen nicht immer auf optimalen Daten basieren.
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Erforderliche Anpassungen in Vergabe- und Berichtssystemen führen zu höherem bürokratischen Aufwand für Unternehmen und Verwaltung. • Kontroll- und Überwachungsmechanismen sind nötig, um Greenwashing zu vermeiden. • Gut designte Standards und Zertifizierungssysteme können langfristig die Transaktionskosten senken, indem sie für mehr Markttransparenz sorgen.
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Eine klimaneutrale Verwaltung erfordert signifikante finanzielle Mittel aus dem Staatshaushalt (primär jedoch für die Emissionsminderung). • Verursachergerechtigkeit ist gegeben, da die Verwaltung für ihre eigenen Restemissionen bezahlt.
Investitionssicherheit und Resilienz	• Die Investitionssicherheit ist abhängig von einer stabilen politischen Unterstützung und der Aufrechterhaltung der entsprechenden Vorgaben. • Langfristige Abnahmeverpflichtungen könnten für zusätzliche Planbarkeit sorgen, solange eine ambitionierte Emissionsvermeidung stattfindet.
Internationale Anschlussfähigkeit	• Eine klimaneutrale Verwaltung kann Standards setzen, die von anderen Ländern adaptiert werden könnten. • Falls internationaler Handel zugelassen wird, könnten internationale Ausschreibungen zusätzliche Impulse für den globalen Markt setzen.
Politische Umsetzbarkeit	• Gut in bestehende Beschaffungs- und Verwaltungsprozesse integrierbar, allerdings Anpassungen in Vergaberichtlinien erforderlich. • Politisch relativ gut umsetzbar, da keine neuen Steuern oder Abgaben notwendig sind, sondern nachhaltigere Nutzung bestehender Mittel.

Kriterium	Bewertung
	• Die gesellschaftliche Akzeptanz ist hoch, insbesondere wenn die Klimaneutralität der Verwaltung in ihrer Vorbildfunktion kommuniziert wird.

Zusammenführende Bewertung

Die klimaneutrale öffentliche Verwaltung und Beschaffung zielen zwar primär auf Emissionsvermeidung ab, können aber auch wirkungsvolle Instrumente sein, um den Hochlauf von CO_2-Entnahmen zu fördern. Sie schaffen eine zwar begrenzte, aber stabile Nachfrage und können als Vorbild für andere Sektoren oder andere Staaten dienen. Sie bieten Investitionssicherheit für Unternehmen und sind politisch gut umsetzbar, da sie auf bestehenden Strukturen aufbauen. Allerdings bringen sie einen vergleichsweise hohen administrativen Aufwand mit sich, insbesondere in der Anfangsphase, und benötigen längerfristige politische Unterstützung sowie die Identifikation geeigneter Zertifikate.

Wichtig ist, die Rolle der CO_2-Entnahme gegenüber der Emissionsvermeidung zu definieren, also etwa schwer vermeidbare Emissionen festzulegen, die kompensiert werden können und sollen.

7.2.5 Ergebnisbasierte Förderung

Die ergebnisbasierte Förderung ist direkt an die erzielte CO_2-Entnahme gekoppelt. Im Unterschied zu aktivitätsbasierten Förderungen, die Mittel für bestimmte Maßnahmen bereitstellen (z. B. Renaturierung von Mooren oder Aufforstung), erfolgt die Auszahlung bei ergebnisbasierten Instrumenten abhängig von der geprüften CO_2-Entnahmeleistung. Die Förderung könnte dabei auf zertifizierte Entnahmen mit gewissen Standards zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit beschränkt sein (siehe Kategorie Zertifizierungsstandards).

Ergebnisbasierte Förderungen sollen dazu beitragen, (noch) nicht wettbewerbsfähige Entnahmemethoden zu fördern und so das finanzielle Risiko ihrer frühzeitigen Entwicklung zu reduzieren. Die Förderung kann direkt durch Zahlungen pro Tonne entnommenes CO_2 oder indirekt durch steuerliche Vergünstigungen erfolgen. Derartige Förderungen können an wettbewerbliche Vergabeverfahren geknüpft werden, die Mitnahmeeffekte reduzieren und sicherstellen sollen, dass die kosteneffizientesten Technologien und Anbieter profitieren.

Innerhalb dieser Kategorie gibt es verschiedene Gestaltungsoptionen, die sich hinsichtlich ihrer Funktionsweise und Finanzierung unterscheiden. Drei wichtige Instrumente sind:

- Carbon Contracts for Difference (CCfDs): Der Staat vergibt in einem Auktionsverfahren Verträge, die Unternehmen feste Einnahmen für jede Tonne entnommenes CO_2 garantieren, indem sie die Differenz zwischen diesen Einnahmen und dem realisierten Marktpreis ausgleichen (siehe Infobox 7).
- Öffentliche Ankaufprogramme durch Reverse Auctions: Der Staat kauft CO_2-Entnahmen in einem Auktionsverfahren ein, bei dem Anbieter den geringstmöglichen Preis pro Tonne entnommenes CO_2 bieten (siehe Infobox 6).
- Steuervergünstigungen: Unternehmen erhalten direkte Steuervorteile für jede Tonne entnommenes und gespeichertes CO_2, wodurch entsprechende Investitionen finanziell attraktiver werden (siehe Infobox 8).

Reverse Auctions

Reverse Auctions (umgekehrte Auktionen) sind ein marktbasiertes Förderinstrument, bei dem Unternehmen in einem Auktionsverfahren um staatliche Subventionen für Klimaschutzmaßnahmen bieten. Zuschläge erhalten Projekte, die den niedrigsten Zuschuss für die Vermeidung oder Entnahme pro Tonne CO_2 (z. B. Euro/t CO_2) fordern.

Eine öffentliche Institution definiert die Rahmenbedingungen für die Auktionen, etwa das Zielvolumen an CO_2 oder das verfügbare Förderbudget. Unternehmen reichen dann Gebote ein, in denen sie den Unterstützungsbedarf pro Leistungseinheit angeben.

Beispiel: Ausgestaltung der Reverse Auctions in Schweden

Schweden hat 2022 als eines der ersten Länder ein Reverse-Auctions-Programm zur Förderung von CO_2-Entnahmen eingeführt und stellt zwischen 2026 und 2046 bis zu 36 Mrd. Schwedische Kronen (ca. 3,2 Mrd. Euro) für BECCS-Projekte aus nachhaltiger Biomasse bereit. Gefördert werden ausschließlich Projekte, die biogenes CO_2 abscheiden und geologisch speichern. Die Zuschüsse decken sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten ab.

Infobox 6: Reverse Auctions

Carbon Contracts for Difference (CCfDs)

CCfDs sind marktbasierte Förderverträge, die Investitionen in klimafreundliche Technologien absichern. Sie wurden ursprünglich aus dem Energiesektor übernommen, wo ähnliche Verträge zur Förderung erneuerbarer Energien (z. B. Offshore-Windenergie) eingesetzt wurden.

Unternehmen erhalten eine garantierte Vergütung pro Tonne vermiedenes CO_2 (engl. Strike Price). Liegt der CO_2-Marktpreis (in der Regel EU-ETS) darunter, gleicht der Staat die Differenz aus. Steigt der Marktpreis über den Strike Price, zahlen Unternehmen (bei zweiseitiger Ausgestaltung) die Differenz zurück.

Unternehmen erhalten durch die Absicherung gegen schwankende CO2-Preise langfristige Planungssicherheit, ohne dass eine Überförderung riskiert wird. Deshalb eignen sich CCfDs besonders für Technologien, die noch nicht marktfähig sind. Voraussetzung ist die Anbindung an ein CO_2-Bepreisungssystem.

2023 hat Deutschland CCfDs mit den Klimaschutzverträgen (KSV) eingeführt. 2024 wurde das erste Gebotsverfahren durchgeführt. Momentan werden CO2-Entnahmen bei der Treibhausgasemissionsminderung eines Vorhabens nicht anerkannt (vgl. KSV-Förderrichtlinie). Eine Berücksichtigung ist aber explizit möglich, sofern CO2-Entnahmen in den EU-ETS 1 integriert werden. Eine solche Integration wird derzeit auf EU-Ebene geprüft (siehe Kapitel 7.2.8).

Beispiel: Ausgestaltung von CCfDs in Großbritannien

Großbritannien nutzt industrielle Carbon Contracts for Difference (CCfDs), um Investitionen in CCS abzusichern. Das Instrument bezieht sich allerdings nicht auf CO2-Entnahme, sondern auf CO2-Vermeidung.

Das britische Modell konzentriert sich auf große Industrieanlagen, insbesondere im Rahmen des „Track 1"-Cluster-Programms mit den CCS-Zentren HyNet und East Coast Cluster. Die Vertragslaufzeiten betragen 15 Jahre. Das Modell reduziert das Investitionsrisiko, stabilisiert den Markthochlauf von CCS und minimiert langfristig staatliche Subventionen.

In Großbritannien ist darüber hinaus ebenfalls ein Negative Emissions Contract for Difference in Diskussion, der explizit die CO2-Entnahme innerhalb eines CCfD-Systems fördern soll.

Infobox 7: Carbon Contracts for Difference

Steuervergünstigungen

Steuervergünstigungen sind ein indirektes Förderinstrument, das Unternehmen steuerliche Anreize für Investitionen in CO_2-Vermeidung oder -Entnahmen bietet. Statt direkter Subventionen erhalten Unternehmen eine Steuergutschrift pro Tonne abgeschiedenes oder gespeichertes CO_2.

Die Höhe der Gutschrift kann je nach CO2-Quelle (fossil, biogen oder atmosphärisch), Technologie und Anwendung variieren. Dieses System soll Technologien wie DACCS und BECCS wirtschaftlich attraktiver machen und eine marktnahe Entwicklung ohne vollständige Abhängigkeit von Subventionen fördern.

Beispiel: Steuervergünstigungen in den USA – das 45Q-Programm

Das 45Q-Programm ist das zentrale steuerliche Förderinstrument für CCU/S in den USA. Es wurde ursprünglich 2008 eingeführt und 2018 sowie 2022 im Rahmen des "Inflation Reduction Act of 2022" erheblich ausgeweitet. 2025 wurde die Höhe der Förderung für DACCU und EOR erhöht[297]. Die Steuererleichterungen (engl. Tax Credits) richten sich nach der Technologie:

- 180 US-Dollar pro Tonne CO_2 für DACCS oder DACCU
- 85 US-Dollar pro Tonne CO_2 für BECCS und industrielles CCS
- 85 US-Dollar pro Tonne CO_2, wenn das CO_2 zur industriellen Nutzung (CCU) oder zu Tertiärer Ölgewinnung (engl. Enhanced Oil Recovery, EOR) verwendet wird

Die Steuervergünstigungen sind über 12 Jahre garantiert. Neue Projekte müssen bis 2033 in Betrieb genommen werden, um von den Vergünstigungen zu profitieren.

Infobox 8: Steuervergünstigungen

Tabelle 17 Bewertung Ergebnisbasierte Förderung

Kriterium	Bewertung
Effektivität	• Potenziell ist die Erreichung gesetzter Entnahmemengen mit der Bereitstellung ausreichender Fördermittel möglich. • Bei zweiseitiger Ausgestaltung von CCfDs sowie bei Reverse Auctions besteht das Risiko, dass Gewinner der Ausschreibungen von zu optimistischen Annahmen ausgehen und Projekte am Ende gar nicht realisiert werden.

[297] (GCCSI, 2025).

Kriterium	Bewertung
Effizienz	• Die Förderung ist zielgerichtet, da Zahlungen nur für nachweislich erbrachte Entnahmen erfolgen. • Es kann potenziell zu Marktverzerrungen kommen, wenn bestimmte Technologien oder (insbesondere große) Unternehmen mit besserem Zugang zu Förderprogrammen bevorzugt werden. • Die wettbewerbsbasierte Vergabe bei CCfDs und Reverse Auctions reduziert die Kosten für den Staat, da Unternehmen in einem Auktionsverfahren bieten und andere Einkommensmöglichkeiten durch den VCM oder den EU-ETS berücksichtigen. • Steuergutschriften sind anfälliger für Überförderung und Mitnahmeeffekte.
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Es besteht ein hoher initialer administrativer Aufwand für die Festlegung des Ausschreibungsvolumens und -budgets sowie für die Entwicklung der Förderrichtlinie. • Es kommt zu hohen Transaktionskosten und Verwaltungslasten für Unternehmen durch detaillierte Antragsverfahren bei CCfDs und Reverse Auctions und langfristige Verträge mit der Regierung. Steuergutschriften führen möglicherweise zu geringeren Verwaltungs- und Transaktionskosten, weil sie in bestehende Strukturen integriert werden können.
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Die Finanzierungsgerechtigkeit hängt von der Kostenverteilung und Mittelherkunft ab – die Instrumente belasten direkt den Staatshaushalt. • Im Vergleich zu Steuergutschriften werden Mittel bei Auktionsverfahren kompetitiv und damit effizienter vergeben. • Die konkreten Auswirkungen von CCfDs auf den Staatshaushalt sind schwer planbar und hängen von der Entwicklung des Referenzpreises im ETS ab. • Die Haushaltswirkung bei Reverse Auctions ist gut planbar durch die vorgelagerte Definition der Fördervolumen.
Investitionssicherheit und Resilienz	• Die vertragliche Zahlungszusicherung des Staates führt zu tendenziell hoher Investitionssicherheit. • Durch eine einseitige Förderung einzelner Unternehmen und Technologien können Abhängigkeiten befördert werden. • Durch langfristige Förderverträge wird die flexible Reaktion auf veränderte Rahmenbedingungen eingeschränkt.
Internationale Anschlussfähigkeit	• Über die Skalierung von Technologien durch ergebnisbasierte Förderungen können Kostendegressionen von bestimmten Entnahmemethoden erzielt werden, womit der globale Hochlauf unterstützt werden kann. • Eine einseitige Subventionierung könnte den internationalen Wettbewerb verzerren.
Politische Umsetzbarkeit	• Grundsätzlich sind ergebnisbasierte Förderungen gut in bestehende Klimapolitiken integrierbar. • Die politische Umsetzbarkeit ist abhängig von der Haushaltslage, politischen Prioritäten und der beihilferechtlichen Genehmigung.

Kriterium	Bewertung
	• Auf nationaler Ebene sind Steuergutschriften gut umsetzbar, auf EU-Ebene ist dies allerdings schwer möglich aufgrund der mangelnden Fiskalkompetenz der Union. • Die Instrumente genießen hohe Akzeptanz in der Wirtschaft, da das Modell Planbarkeit für Investoren schafft und die finanzielle Unsicherheit von Marktpreisen reduziert. • Beihilferechtliche Genehmigungen für Reverse Auctions und CCfDs in Schweden bzw. Dänemark lassen eine Genehmigung für Deutschland wahrscheinlich erscheinen.[298]

Zusammenführende Bewertung

Die ergebnisbasierte Förderung kann bei ausreichender Mittelbereitstellung prinzipiell eine wichtige Unterstützung des Hochlaufs von CO_2-Entnahmemethoden darstellen. Grundsätzlich ist die leistungsabhängige Vergütung zielgenau und stellt sicher, dass nur realisierte CO_2-Entnahmen gefördert werden. Ergebnisbasierte Förderungen schaffen eine stabile Finanzierungsgrundlage für Unternehmen, reduzieren Investitionsrisiken und ermöglichen die Skalierung neuer Technologien. Damit sind sie insbesondere relevant für technische CO_2-Entnahmemethoden wie DACCS und BECCS, die hohe Investitionen erfordern und deren Wettbewerbsfähigkeit noch nicht gegeben ist. Diese Förderinstrumente können besonders dann Investitionsrisiken von CO_2-Entnahmeprojekten senken, wenn sie langfristig und planbar angeboten werden.

Nachteile und Herausforderungen dieser Instrumente liegen im Verwaltungsaufwand sowie in der Haushaltswirkung. Tendenziell sind Steuervergünstigungen die Instrumente mit den niedrigsten Transaktionskosten gefolgt von Reverse Auctions und dann CCfDs.

Während Reverse Auctions und CCfDs durch Wettbewerb eine kosteneffiziente Vergabe ermöglichen, können Steuergutschriften mit hohen Mitnahmeeffekten verbunden sein, wenn sie einen pauschalen Zuschuss unabhängig von weiteren Einkommensmöglichkeiten gewähren.

Reverse Auctions und CCfDs können anderweitige Einkommensmöglichkeiten durch den Verkauf von Zertifikaten auf dem VCM oder im ETS berücksichtigen, was die Effizienz steigern und die Haushaltswirkung reduzieren kann. Aufgrund dessen sowie der zweiseitigen Ausgestaltung sind CCfDs die haushaltsschonendste Option unter den beschriebenen ergebnisbasierten Förderungen, falls die Nachfrage auf dem VCM vorhanden oder die ETS-Integration erfolgt ist. Erforderlich hierfür ist jedoch die Entwicklung entsprechender Nachfrage auf dem VCM oder verpflichtenden Emissionshandelsmärkten. Eine Herausforderung bei CCfDs ist der schwer zu kalkulierende Finanzierungsbedarf für den öffentlichen Haushalt, da er abhängig von der Referenzpreisentwicklung ist.

Carbon Shares

[298] (Schenuit & Treß, 2025).

Carbon Shares sind ein neues Konzept[299], mit dem CO_2-Entnahmen vergleichbar und fair entlohnt werden könnten, auch wenn ihre Messbarkeit und Dauerhaftigkeit unterschiedlich sicher sind. Dies wird durch einen zugrundeliegenden Deposit-Refund-Ansatz ermöglicht:

Dabei hinterlegen CO2-emittierende Unternehmen eine Kaution, um die Kompensation von erwarteten Schäden zu versichern. Diese Kaution entspricht den erwarteten Klimaschäden – den sogenannten „Social Cost of Carbon" – zuzüglich eines Sicherheitsaufschlags.

Im Gegenzug erhalten die Unternehmen zwei handelbare Wertpapiere:

- einen Kautionsbrief, den Carbon Share
- ein Zertifikat, das die versicherte Kompensation bescheinigt.

Das Zertifikat über versicherte Kompensation kann für die Erfüllung von Umweltzielen und Vorschriften geltend gemacht werden. Der Wert der Carbon Shares besteht darin, dass die Halter - hier die Emittenten - einen entsprechenden Teil der hinterlegten Kaution wieder ausgezahlt bekommen, wenn später festgestellt wird, dass die Schäden geringer waren als erwartet, oder die Schäden durch eigene CO_2-Entnahme vermieden wurden.

Für die Emittenten bestünde somit ein Anreiz, in die Atmosphäre eingetragene Emissionen möglichst dauerhaft wieder zu entnehmen, um neben dem Erhalt des Kompensationszertifikats, auch die verzinste Rückzahlung der geleisteten Kaution zu erreichen.

Das Modell der Carbon Shares hätte zwei bedeutende Vorteile:

- Unternehmen zahlen (nur) für tatsächliche Schäden der (Wieder-)Freisetzung von Emissionen.
- Auch CO_2-Entnahmemethoden mit Herausforderungen bei der Messung der Entnahmeleistung und Sicherstellung von Dauerhaftigkeit könnten fair vergütet werden – abhängig von den Ergebnissen wiederholter Überprüfungen.

Infobox 9: Carbon Shares

Da diese Förderinstrumente grundsätzlich direkt haushaltswirksam sind, ist ihre Effektivität und Funktion abhängig von der entsprechenden Mittelbereitstellung. Regierungswechsel, geänderte politische Prioritäten oder eine veränderte Haushaltslage können daher die Kontinuität der Förderprogramme beeinflussen und damit die langfristige Investitionssicherheit reduzieren.

[299] (Lemoine, 2023).

7.2.6 Aktivitätsbasierte Förderung

Bei aktivitätsbasierten Förderungen werden spezifische Aktivitäten unabhängig von der tatsächlich erreichten CO_2-Entnahmemenge gefördert. Dies kann insbesondere für natürliche Senken relevant sein, bei denen exakte Messungen und die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit der CO_2-Entnahme schwieriger sind, oder zusätzliche Umweltaspekte berücksichtigt werden müssen.

Für Deutschland sind insbesondere vier bereits bestehende aktivitätsbasierte Förderprogramme für die CO_2-Entnahme relevant. Sie verfolgen unterschiedliche Ansätze der aktivitätsbasierten Förderung:

- Das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) ist eine Initiative der deutschen Bundesregierung zur Förderung des Schutzes und der Wiederherstellung natürlicher Ökosysteme. Finanziert durch den Klima- und Transformationsfonds (KTF), stellt es bis 2026 insgesamt rund 4 Mrd. Euro für Maßnahmen zur Stärkung von Ökosystemdienstleistungen bereit. Der Fokus liegt auf Biodiversitätsschutz, Wiedervernässung von Mooren, Waldumbau und nachhaltiger Landnutzung. Die CO_2-Entnahme ist dabei ein erwünschtes, aber nicht primäres Ziel der Maßnahmen.[300]
- Die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) ist das zentrale europäische Förderinstrument für die Landwirtschaft. Sie umfasst Direktzahlungen an landwirtschaftliche Betriebe, gekoppelt an Umweltauflagen, sowie Programme zur Förderung ländlicher Entwicklung. Ein Teil der GAP-Mittel wird für die Bezuschussung nachhaltiger Landwirtschaftspraktiken und Förderung von Biodiversität und CO_2-Speicherung genutzt. Allerdings besteht kein gezielter Anreiz für CO_2-Entnahmen.
- Die Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes (GAK) ist ein nationales Förderprogramm zur Unterstützung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes in Deutschland. Sie wird von Bund und Ländern finanziert und fördert unter anderem nachhaltige Landbewirtschaftung, Wiedervernässung von Mooren und den Umbau von Wäldern. Auch wenn die GAK primär auf strukturelle Entwicklung abzielt, hat sie positive Nebeneffekte für den Klimaschutz, indem sie Maßnahmen zur CO_2-Speicherung in Böden und Wäldern unterstützt. [301]
- Die Bundesförderung Industrie und Klimaschutz (BIK) ist ein deutsches Förderprogramm zur Unterstützung der Industrie beim Übergang zu einer klimaneutralen Produktion. Modul 2 des Programms bietet finanzielle Zuschüsse für Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie Investitionen in CO_2-arme Prozesse. Dabei werden auch Investitionen in Anlagen zur Abscheidung schwer vermeidbarer CO_2-Emissionen oder zur Erzielung von Negativemissionen gefördert. Ähnlich wie der Innovation Fund zielt die BIK darauf ab, innovative Technologien zu fördern, wobei hier der Fokus auf der deutschen Industrie liegt.

[300] (BMUV, 2024).
[301] (BMEL, 2024b).

Tabelle 18 Bewertung Aktivitätsbasierte Förderung

Kriterium	Bewertung
Effektivität	• Bei ausreichender Mittelbereitstellung kann eine aktivitätsbasierte Förderung prinzipiell hohe Entnahmemengen ermöglichen. • Die Effektivität ist schwer zu erfassen ohne den Nachweis einer tatsächlichen CO_2-Entnahme.
Effizienz	• Die Effizienz der Programme variiert stark und hängt davon ab, inwiefern sie auch auf Klimaschutz und vor allem auf CO_2-Entnahme abzielen.
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Es besteht ein relativ hoher Verwaltungsaufwand für Beantragung, Genehmigung und Kontrolle der Mittelverwendung. Das ist insbesondere der Fall aufgrund der Vielzahl an Förder- und Projektarten. • Gerade für kleinere Akteure wie landwirtschaftliche Betriebe stellt die Komplexität der Förderverfahren oft eine administrative und kapazitäre Hürde dar. • Eine Vereinfachung der Förderbedingungen oder eine stärkere Digitalisierung könnten den Verwaltungsaufwand reduzieren. • Relativ geringer Verwaltungsaufwand der BIK im Vergleich zu GAP und GAK, da gezieltes Industrie-Förderprogramm
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Haushaltsbelastung hoch, insbesondere wenn Fördermittel nicht auf CO_2-Entnahmen ausgerichtet sind • Viele durch allgemeine Umwelt- oder Agrarbudgets finanzierte Programme konkurrieren mit anderen politischen Prioritäten
Investitionssicherheit und Resilienz	• Gewisse Planbarkeit durch Einbettung in mehrjährigen Finanzrahmen (z. B. GAP) oder langfristige Umweltstrategien (z. B. ANK) • Keine direkte Kopplung an marktwirtschaftliche Mechanismen, was die nachhaltige Entwicklung erschwert • Kurzfristig stabile Finanzierung durch öffentliche Mittel, langfristig oft unsicher, da stark von politischen Entscheidungen und Haushaltsplanungen abhängig • Für CO_2-Entnahmeprojekte mit langen Investitionszeiträumen besteht das Risiko, dass Fördermittel nicht dauerhaft verfügbar bleiben.
Internationale Anschlussfähigkeit	• Anwendung meist räumlich begrenzt auf Geltungsbereich der Maßnahme; nur schwer in internationale Mechanismen wie Artikel 6 ÜvP einbindbar
Politische Umsetzbarkeit	• Politisch vergleichsweise einfach umsetzbar, da an bestehende Umwelt- und Agrarfördermechanismen angelehnt • Stärkere Integration der Ausrichtung auf Klimaschutz in der GAP erfordert politischen Aushandlungsprozess zwischen den Mitgliedstaaten • Abhängig von haushaltspolitischen Rahmenbedingungen und der Priorisierung von Klimaschutzmaßnahmen national und EU-weit • Herausforderungen hinsichtlich der Effektivität und der gerechten Mittelverteilung mindern die politische Akzeptanz. • Teils hohe Transaktionskosten durch interministerielle Koordination

Zusammenführende Bewertung

Aktivitätsbasierte Förderungen sind nicht an eine konkret gemessene CO_2-Entnahmemenge gebunden, sondern finanzieren spezifische Aktivitäten, die zur Erreichung verschiedener umwelt- und agrarpolitischer Ziele beitragen. Sie spielen insbesondere für natürliche Senken eine Rolle, da deren CO_2-Entnahmeleistung schwerer zu quantifizieren und zu gewährleisten sein kann. Jedoch ist die Messung der tatsächlichen Klimawirkung bei der aktivitätsbasierten Förderung weniger genau. Insgesamt ist sie daher weniger zielgerichtet als ergebnisbasierte Mechanismen.

Ein weiterer Nachteil dieser Instrumente sind die Haushaltswirkung und die fragliche Finanzierungsgerechtigkeit. Aktivitätsbasierte Förderungen erfordern oft hohe Haushaltsmittel, insbesondere wenn sie nicht spezifisch auf die CO_2-Entnahme ausgerichtet sind. Dies kann zu einer ineffizienten Mittelverwendung führen.

Die aktivitätsbasierten Förderinstrumente können über ihren oft mehrjährigen Finanzrahmen eine gewisse Planbarkeit sicherstellen. Allerdings sind diese Förderungen stark von politischen Haushaltsentscheidungen abhängig, was für langfristige Projekte ein erhebliches Risiko darstellt. Insbesondere für CO_2-Entnahmeprojekte, die über Jahrzehnte angelegt sind, besteht Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Verfügbarkeit von Fördermitteln.

Aktivitätsbasierte Förderungen sind vergleichsweise einfach umsetzbar, da sie an bestehende Umwelt- und Agrarfördermechanismen anknüpfen könnten. Eine stärkere Integration von CO_2-Entnahmen in Programme wie die GAP erfordert jedoch umfangreiche politische Aushandlungsprozesse auf EU-Ebene, insbesondere zwischen Mitgliedstaaten mit unterschiedlichen agrarpolitischen Interessen.

Da zahlreiche Programme mit unterschiedlichen Zielsetzungen existieren, entstehen mitunter hohe Transaktionskosten bei Beantragung, Genehmigung und Kontrolle der Mittelverwendung. Besonders für kleinere Akteure wie landwirtschaftliche Betriebe stellt die Bürokratie eine erhebliche Hürde dar.

Eine zentrale Stärke der aktivitätsbasierten Förderprogramme besteht jedoch in der Honorierung weiterer Ökosystemdienstleistungen neben dem Klimaschutzbeitrag. Die Herstellung dieser gesellschaftlichen Mehrwerte bedarf ebenfalls eines adäquaten Anreizes.

7.2.7 Öffentlich-private Vereinbarungen / Private Abkommen

Freiwillige Abkommen sind eine alternative Möglichkeit zur staatlichen Regulierung, bei der Unternehmen oder Sektoren sich eigenständig dazu verpflichten, bestimmte Klimaschutzmaßnahmen umzusetzen. Diese Abkommen basieren auf einem Übereinkommen, nach dem die Marktakteure ihre Emissionen freiwillig reduzieren oder kompensieren, um strengere gesetzliche Regulierungen oder finanzielle Belastungen zu vermeiden. Der Staat stellt in diesen Vereinbarungen in Aussicht, von weiteren verpflichtenden Maßnahmen abzusehen, solange die vereinbarten Ziele erreicht werden.

Die Wirksamkeit freiwilliger Abkommen hängt maßgeblich davon ab, dass geeignete Kontrollmechanismen sowie glaubhafte Sanktionen oder Risiken bestehen. Unternehmen müssen eine echte Motivation haben, sich auf ambitionierte Selbstverpflichtungen einzulassen – sei es durch die Aussicht auf regulatorische Vorteile oder die Vermeidung teurerer Maßnahmen wie CO_2-Bepreisung.

Ein konkretes Beispiel für freiwillige Abkommen ist das Sektorabkommen[302] für thermische Abfallverbrennungsanlagen (TAB) in der Schweiz. Dieses Abkommen sieht vor, dass mindestens eine dieser Anlagen mit CCS ausgestattet wird und bis Ende 2030 mindestens 100.000 Tonnen CO_2 pro Jahr abscheidet und speichert.

Als Anreiz für die Teilnahme sind die betroffenen Betreiber aktuell von der Pflicht befreit, Emissionszertifikate im schweizerischen Emissionshandelssystem zu erwerben. Gleichzeitig besteht für die Teilnehmer eine klare Sanktionsregelung: Falls die vereinbarten Ziele nicht erreicht werden, sind die Unternehmen verpflichtet, beim nächstmöglichen Anlass wieder in das reguläre Emissionshandelssystem einzutreten und Zertifikate zu erwerben. Beide Seiten erhoffen sich damit die Zielerreichung mit geringeren Verwaltungs- und Transaktionskosten.

Tabelle 19 Bewertung Öffentlich-private Vereinbarungen / Freiwillige Abkommen

Kriterium	Bewertung
Effektivität	• Durch Sanktionsregime kann Ergreifung von Maßnahmen angereizt werden • Effektivität abhängig von glaubwürdigem Sanktionsmechanismus
Effizienz	• Die Effizienz ist abhängig von der Ausgestaltung der Abkommen; spezifische Unterziele bergen die Gefahr der Falscheinschätzung. • Eine größere Freiheit bei der Wahl der Maßnahmen zur Zielerreichung kann die Effizienz erhöhen. • Mit der Vereinbarung sind oft Transparenzerhöhungen verbunden, etwa durch Offenlegung der Emissionen.
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Der Verwaltungsaufwand für freiwillige Abkommen ist im Vergleich zu verbindlichen Regulierungen geringer, da keine Umsetzung verpflichtender Maßnahmen vorzubereiten und durchzuführen ist. • Überprüfung des nötigen Fortschritts zur Zielerreichung nötig; gegebenenfalls ist die Möglichkeit zur Durchsetzung von Sanktionen vorzubereiten • Transaktionskosten vergleichsweise niedrig
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Geringfügige staatliche Ausgaben zur Aushandlung der Abkommen und Überprüfung der Einhaltung erforderlich • Die Befreiung von Abgaben (z.B. CO_2-Bepreisung) kann zu Mindereinnahmen führen. • Mögliche Sanktionen können, je nach Ausgestaltung, ungleiche Belastungen hervorrufen.

[302] (Umwelt, 2025).

Kriterium	Bewertung
Investitionssicherheit und Resilienz	• Erreichung der Klimaziele kann zur Vorgabe gemacht werden, Fortschritt muss aber regelmäßig überprüft werden; Zielerreichung abhängig von glaubhafter Sanktionsmöglichkeit • Planungssicherheit für Unternehmen, soweit sie Vorgaben einhalten
Internationale Anschlussfähigkeit	• Auch freiwillig auferlegte Maßnahmen zur Erreichung der Ziele des Abkommens können die internationale Wettbewerbsfähigkeit negativ beeinflussen. • Der Einstieg internationaler Wettbewerber in ein Abkommen ist grundsätzlich möglich und im Sinne der Entwicklung eines Leitmarktes. • Die Androhung von Sanktionen könnte zu Carbon Leakage führen.
Politische Umsetzbarkeit	• Politisch vergleichsweise einfach umsetzbar, da die Abkommen auf bereits existierenden Erfahrungen und Brancheninitiativen aufbauen können • Potenziell große Bereitschaft der Unternehmen zur Teilnahme, um strengere Regulierung zu vermeiden • Benötigt glaubwürdige Sanktionsmöglichkeit

Zusammenfassende Bewertung

Vereinbarungen von privaten Akteuren und Sektoren mit der öffentlichen Hand sind eine Möglichkeit, den Akteuren Freiheiten in der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen zu gewähren, indem sie eigenständig Maßnahmen zur CO_2-Reduktion oder CO_2-Entnahme umsetzen können. Diese Abkommen bieten eine flexible und pragmatische Lösung zur schnellen Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen, insbesondere in Bereichen, in denen verbindliche gesetzliche Vorgaben schwer durchzusetzen oder noch nicht technisch ausgereift sind.

Unternehmen begrüßen solche Ansätze häufig, da sie im Vergleich zu staatlichen Regulierungen mehr Spielraum lassen und weniger bürokratische Hürden mit sich bringen. Dadurch können sie Konflikte zwischen Staat und Unternehmen entschärfen und Innovationen im Bereich der CO_2-Entnahme vorantreiben. Damit freiwillige Abkommen effektiv sind, müssen sie jedoch einen glaubwürdigen Sanktionsmechanismus vorsehen, etwa die Aussicht auf eine verpflichtende CO_2-Bepreisung oder strengere Regulierungen. Gleichzeitig bergen freiwillige Abkommen das Risiko, dass sie als Verzögerungsstrategie dienen oder ambitionierte Klimaziele untergraben. Zudem hängt der Erfolg solcher Abkommen stark von der administrativen Fähigkeit und dem politischen Willen ab, Sanktionen durchzusetzen und die Einhaltung der Vereinbarungen zu überwachen.

7.2.8 Integration in den EU-ETS

Integriert man CO_2-Entnahmen in den EU-ETS, können emissionshandelspflichtige Anlagen neben Emissionsberechtigungen (engl. EU Allowances) auch CO_2-Entnahmezertifikate zur Compliance nutzen, zum Beispiel zur Kompensation von Restemissionen. Dies könnte Nachfrage nach CO_2-Entnahme schaffen und gleichzeitig durch die Eröffnung zusätzlicher Flexibilitätsoptionen für Emittenten die Liquidität des ETS stärken. Eine Voraussetzung ist ein robustes Zertifizierungssystem, um sicherzustellen, dass die CO_2-Entnahme permanent und zusätzlich ist und es nicht zu Doppelzählungen kommt.

Integration von CO_2-Entnahmen in den Emissionshandel stärkt die Liquidität des EU-ETS und schafft Anreize für die Entwicklung von CO_2-Entnahmen

Auf EU-Ebene erfährt eine mögliche Integration von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS zurzeit besondere Aufmerksamkeit. Bisher umfasst der EU-ETS keine Zertifikate für CO_2-Entnahmen. Die Obergrenze der Zertifikate für stationäre Anlagen im ETS 1 wird in den kommenden Jahrzehnten zur Erreichung der Klimaziele deutlich reduziert werden und die Neuausgabe von Zertifikaten soll bis 2039 enden. Daher stellt sich die Frage, wie mit den verbleibenden, schwer vermeidbaren Emissionen umzugehen ist, insbesondere in der Industrie. Über die Integration von Entnahmezertifikaten in den EU-ETS könnte die Liquidität des Marktes erhöht und eine Perspektive für den Umgang mit Restemissionen und für die Zeit nach 2039 geschaffen werden. Außerdem könnte eine ETS-Integration einen Anreiz zur verursacherfinanzierten Skalierung der CO_2-Entnahme und der notwendigen Infrastruktur bieten, der den Bedarf an staatlichen Mitteln reduziert.

Vor diesem Hintergrund ist die EU-Kommission damit betraut, bis zum 31. Juli 2026 ein Impact Assessment vorzulegen, gefolgt von einem Legislativvorschlag, ob und wie permanente CO_2-Entnahmen in den EU-ETS integriert werden könnten.[303] Dabei sollen auch Sicherheitsvorkehrungen vorgeschlagen werden, um verringerte Anstrengungen zur Emissionsreduktion zu vermeiden. Permanenz ist in der CRCF-Verordnung (2024/3012) definiert als eine Speicherung von CO_2 „über mehrere Jahrhunderte".[304] Dies umfasst CCS-basierte CO_2-Entnahmemethoden sowie gegebenenfalls die Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle (siehe Kapitel 4.8).[305] Gegen eine Inklusion von temporären CO_2-Entnahmemethoden spricht primär die geringe Vergleichbarkeit der Methoden unterschiedlicher Dauerhaftigkeit. Es werden verschiedene Mechanismen diskutiert, um diese Vergleichbarkeit herzustellen (siehe Kapitel 6.4.2). Da aktuell aber noch unsicher ist, ob sie tatsächlich zu einer Vergleichbarkeit von temporären und dauerhaften Entnahmen führen können, wird die Integration von temporären Entnahmen aktuell nicht von der EU-Kommission geplant und soll auch an dieser Stelle nicht diskutiert werden.

Einige Akteure sprechen sich grundsätzlich gegen die ETS-Integration der CO_2-Entnahme aus. Ein Hauptkritikpunkt der ETS-Integration ist, dass es herausfordernd ist, Vergleichbarkeit von CO_2-Entnahmezertifikaten untereinander und mit der Emissionsvermeidung herzustellen.[306] Wenn es nicht zu einer Integration von permanenten CO_2-Entnahmen in den EU-ETS käme, könnte es weiterhin separate Märkte für CO_2-Entnahmen und -Reduktionen geben, beispielsweise im Rahmen von Entnahmeverpflichtungen (siehe Kapitel 7.2.9).

[303] Richtlinie (EU) 2023/959, Art. 30 (5) (a).

[304] Verordnung (EU) 2024/3012, Art. 2 (9).

[305] Pflanzenkohle ist laut rechtlich nicht verbindlicher Einschätzung der EU-Kommission sowohl als „permanente Speicherung" im Sinn der Verordnung (EU) 2024/3012 Art. 2(9) als auch als „Carbon Farming" im Sinne von Artikel 2(10) oder „Speicherung in Produkten" im Sinne von Artikel 2(11) zu verstehen. Vgl. EU-Kommission, Impact Assessment der CRCF 1I2, SWD(2022) 377 final, Infobox 1, Seite 2, abrufbar unter: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CONSIL:ST_15557_2022_ADD_3; Impact Assessment der CRCF COM, Impact Assessment 2I2, SWD(2022) 377 final, S. 59 ff., abrufbar unter: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CONSIL:ST_15557_2022_ADD_4.

[306] (Assous, Woods, & Wikström, 2024).

Es bestehen zwei grundsätzliche Optionen bei der Integration von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS

Bei Überlegungen zur Integration von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, die insofern kompatibel sind, als dass sie zeitlich gestaffelt implementiert werden könnten (Einführung der ersten Option, dann Weiterentwicklung zur zweiten Option).

- 1. Eingeschränkte Integration: Zur Vorbeugung von reduzierten Minderungsbemühungen und Risiken der Integration von Entnahmen unsicherer Permanenz sind Integrationsmodelle denkbar, die spezifische Einschränkungen vornehmen[307]. Die einzelnen Designoptionen für eine eingeschränkte Integration sind folgend näher beschrieben und lassen sich kombinieren.
- 2. Vollständige Integration: CO_2-Entnahmen könnten ohne Einschränkungen in den ETS integriert werden. ETS-pflichtige Emittenten könnten entsprechend uneingeschränkt (permanente) Entnahmezertifikate anstelle von Emissionsberechtigungen zum Ausgleich ihrer Emissionen handeln.

Möglichkeiten zur Beibehaltung des Ambitionsniveaus und der Priorisierung der Emissionsminderung

Um sicherzustellen, dass das Klimaschutzambitionsniveau für die ETS-Sektoren durch die Integration von Entnahmezertifikaten nicht abgeschwächt wird, wird von vielen Experten empfohlen, nur Zertifikate über zuverlässig permanente Entnahmen zu integrieren.

Auch eine Integration beschränkt auf gesichert permanente CO_2-Entnahmen könnte den Kohlenstoffpreis senken und Anreize für Emissionsminderungen abschwächen.[308] Um dies zu verhindern, könnte die Obergrenze an Zertifikaten (engl. Cap) des ETS angepasst werden.[309] Konkret bedeutet dies, dass mit jedem integrierten CO_2-Entnahmezertifikat eine Emissionserlaubnis annulliert würde, sodass der Marktumfang und das Ambitionsniveau gleich blieben.

Eine Integration von CO_2-Entnahmen könnte auch auf der Nachfrageseite werden. Dabei ist es etwa denkbar, sektorspezifische Begrenzungen einzuführen. Beispielsweise könnten lediglich Sektoren mit „schwer vermeidbaren" Emissionen dazu berechtigt werden, Entnahmezertifikate zu erwerben.[310] Es könnte auch eine prozentuale Grenze oder eine absolute Grenze für den Erwerb von Entnahmezertifikaten eingeführt werden. Derartige Beschränkungen ließen sich auch kombinieren: Zum Beispiel könnten lediglich spezifische Sektoren für einen bestimmten Prozentsatz ihrer Gesamtemissionen Entnahmezertifikate handeln dürfen. Die Restriktionen könnten sukzessive ambitionierter gestaltet werden, um einen dauerhaften Anreiz zur Emissionsminderung zu bewahren.

Eine weitere denkbare Option ist die zukünftige Auktion von „Clean-up-Zertifikaten", die vom ETS erfasste Anlagen zur Emission berechtigen, aber eine Verpflichtung zur Entnahme mit festzulegender Erfüllungsfrist beinhalten.[311] Diese Zertifikate können zusätzlich zu oder anstatt der im ETS ursprünglich geplanten Menge zu vergebender Emissionserlaubnisscheine verauktioniert werden.

---

[307] (La Hoz Theuer, Doda, William, & Kellner, 2024).
[308] (Sultani, et al., 2024).
[309] (Edenhofer, Franks, Kalkuhl, & Runge-Metzger, 2023).
[310] (La Hoz Theuer, Doda, William, & Kellner, 2024).
[311] (Lessmann, Gruner, Kalkuhl, & Edenhofer, 2024).

Dadurch können eine Netto-Reduktion des Cap und somit eine Ambitionssteigerung bewirkt werden oder auch eine Reduktion der Kosten zur Einhaltung des Budgets. Dabei müssen jedoch Klimaschäden durch zeitweise Übersteigung des Budgets berücksichtigt werden. Wichtig ist zudem die Durchsetzung der Pflicht zur CO_2-Entnahme nach Ablauf der Erfüllungsfrist der Clean-up-Zertifikate.

Wie kann die Integration implementiert werden?

Die Designoptionen lassen sich zeitlich gestaffelt in den bestehenden EU-ETS integrieren. Eine phasenweise Integration wird meist bevorzugt312, weil sie technologisches und politisches Lernen und Raum für Revision ermöglicht[313]. Eine Integration von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS müsste institutionell begleitet werden, etwa durch eine unabhängige Europäische Kohlenstoff-Zentralbank (engl. European Carbon Central Bank, ECCB)[314]. Eine ECCB könnte damit betraut werden, die Obergrenze der gehandelten Zertifikate im EU-ETS zu verwalten. Die Legitimation und Finanzierung einer solchen Institution sind noch unklar. Entsprechende Vorschläge sind bisher lediglich theoretischer Natur und die spezifischeren Aufgaben einer solchen Institution kaum definiert. Langfristig könnte im EU-ETS ein netto-negativer Cap gesetzt werden, um eine Entnahme über die Restemissionen hinaus anzureizen.

Tabelle 20 Bewertung Integration in den EU-ETS

Kriterium	Bewertung
Effektivität	• Durch die Integration in den EU-ETS wird effektive Nachfrage für CO_2-Entnahmen in dem Umfang geschaffen, wie der Cap des EU-ETS Restemissionen zulässt. • Dieses Instrument bietet wenig Steuerungsmöglichkeiten dahingehend, ob die Entnahme in Deutschland oder in einem anderen EU-Land stattfindet.
Effizienz	• Durch die Integration in den ETS entsteht Wettbewerb zwischen verschiedenen Vermeidungs- und Entnahmemaßnahmen, was die Effizienz steigern kann, aber auch das Risiko der Mitigation Deterrence birgt. • Die Kosten der CO_2-Entnahme werden verursachergerecht von den Emittenten getragen, die Zertifikate kaufen müssen, was sich in Produktpreisen widerspiegelt und effizientere Kaufentscheidungen befördern kann. • Die Integration der CO_2-Entnahme in den ETS kann dessen Glaubwürdigkeit und Liquidität erhöhen und eine Lösung für Restemissionen anbieten. Eine Integration kann eine langfristige Nachfrage und so einen nachhaltigen Business Case für Entnahmeanbieter schaffen – perspektivisch sogar für Netto-Negativität.

[312] (Sultani, et al., 2024).
[313] (La Hoz Theuer, Doda, William, & Kellner, 2024).
[314] (Edenhofer, Franks, Kalkuhl, & Runge-Metzger, 2023).

Kriterium	Bewertung
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Der Verwaltungsaufwand ist mäßig, da bereits Strukturen des ETS bestehen. Der tatsächliche Aufwand hängt allerdings stark von der Ausgestaltung der ETS-Integration ab. • Wenn eine koordinierende Institution wie etwa eine European Carbon Central Bank eingeführt werden sollte, könnte der initiale Aufwand erheblich sein.
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Durch eine ETS-Integration wird die verursachergerechte Finanzierung durch ETS-pflichtige Anlagenbetreiber erreicht. • Erlöse der Auktion von Emissionserlaubnisscheinen können je nach Gestaltung der ETS-Integration geringer ausfallen. Durch Integration über Clean-up-Zertifikate sind gegebenenfalls Mehreinnahmen möglich.
Investitionssicherheit und Resilienz	• Hohe Planbarkeit der Erreichung gesetzter Ziele durch ETS und ETS-Integration von CO_2-Entnahmen • Die Investitionssicherheit ist abhängig von dem politischen Vertrauen in die Durchsetzung des Cap. • Das Preisniveau im ETS ist nicht gut planbar, da sich der Preis am Markt bildet.
Internationale Anschlussfähigkeit	• Die Kosten von CO_2-Entnahmen schaffen einen effektiven Deckel des ETS-Preises und damit eine Reduktion des Carbon-Leakage-Risikos. • Eine ETS-Integration würde auch einen europäischen Binnenmarkt für CO_2-Entnahmen ermöglichen.
Politische Umsetzbarkeit	• Die europäische Umsetzung kann etablierte Governance-Infrastrukturen und Prozesse nutzen, geht jedoch mit erheblich gesteigertem Koordinierungsaufwand einher. • Die Integration in den EU-ETS wird kontrovers bewertet, insbesondere in der Zivilgesellschaft und bei NGOs, da die Sorge besteht, dass durch Mitigation Deterrance Klimaziele aufgeweicht werden.

Zusammenführende Bewertung

Die Integration der CO_2-Entnahme kann langfristige Nachfrage nach CO_2-Entnahmen schaffen, um ein festgelegtes Emissionsbudget effizient zu erreichen. Außerdem kann durch die Integration auch das Vertrauen in den EU-ETS und seine Liquidität gestärkt werden.

Eine effektive Integration von Negativemissionen in den ETS, die mit Umweltintegritätsaspekten vereinbar ist, setzt voraus, dass die Klimawirkung von CO_2-Entnahmen und Emissionsreduktionen vergleichbar ist. Bei unüberlegter Anerkennung von Entnahmen mit mangelnder Permanenz und Qualität wird die Wirksamkeit des ETS für den Klimaschutz geschwächt.

Clean-up-Zertifikate können genutzt werden, um gesetzte Emissionsbudgets durch die zeitliche Flexibilität kostengünstiger zu erreichen oder um das Ambitionsniveau durch zusätzliche Entnahmen in der Zukunft zu steigern. Der Cap des EU-ETS ist nicht auf die Erreichung der nationalen Ziele abgestimmt: Der europaweite Markt könnte kostengünstigere CO_2-Entnahmen im europäischen Ausland bevorzugen, wodurch die Erreichung von Zielen für die CO_2-Entnahme in Deutschland nicht sichergestellt werden kann.

7.2.9 Entnahmeverpflichtungen

Durch eine Verpflichtung zur CO_2-Entnahme könnten diverse Akteure zur CO_2-Entnahme verpflichtet werden, was zwei Ziele verfolgen würde: die Nachfrage nach CO_2-Entnahme zu steigern und zu Netto-THG-Negativität beizutragen, sofern die Verpflichtung auch über die Klimaneutralität hinaus fortgeführt würde. Für Entnahmeverpflichtungen kommen verschiedene Akteure in Frage:

- Verpflichtung zur Abscheidung von biogenem CO_2: Betreiber von Anlagen, die biogene Brennstoffe nutzen (unter anderem thermische Abfallbehandlungsanlagen und Zementwerke) könnten dazu verpflichtet werden, einen festgelegten Teil der entstehenden biogenen Emissionen abzuscheiden.
- Carbon Removal Obligation (CRO): Produzenten fossiler Energieträger könnten dazu verpflichtet werden, für einen Anteil der durch ihre Produkte verursachten Emissionen eine (dauerhafte) CO_2-Entnahme durchzuführen oder zu finanzieren.
- Akteure der Landwirtschaft könnten dazu verpflichtet werden, einen Teil ihrer Emissionen durch CO_2-Entnahmen auszugleichen. Beispielsweise könnte es auch eine Entnahmeverpflichtung für die äquivalente Menge der kurzlebigeren Emissionen der Landwirtschaft (Methan und Lachgas[315]) geben. Hierfür könnten auch temporäre CO_2-Entnahmen verwendet werden. Somit könnte Nachfrage für temporäre CO_2-Entnahmen generiert werden.

[315] Die ungefähre Verweilzeit von Methan in der Atmosphäre beträgt 12 Jahre, die von Lachgas etwa 114.

Tabelle 21 Bewertung Entnahmeverpflichtungen

Kriterium	Erläuterung
Effektivität	• Potenzielle Sanktionen zur Einhaltung von Entnahmeverpflichtungen können bestimmte CO_2-Entnahmemengen effektiv gewährleisten. • Sollten Verpflichtungen mit erheblichen Mehrkosten und/oder Wettbewerbsnachteilen für Unternehmen einhergehen, könnte es zu Carbon Leakage kommen. Dies stellt ein Risiko für die Effektivität des Instruments dar.
Effizienz	• Die Verpflichtung zur Entnahme kann je nach Ausgestaltung Wettbewerb zwischen CO_2-Entnahmemethoden ermöglichen; im speziellen Fall einer Verpflichtung zum Einsatz spezifischer Entnahmemethoden kann es zu Effizienzeinbußen kommen. • Eine Entnahmeverpflichtung könnte für bestimmte Produkte für eine Internalisierung zusätzlicher Emissionskosten und somit für weitere Anreize zur Emissionsminderung sorgen.
Verwaltungsaufwand und Transaktionskosten	• Entnahmeverpflichtungen gehen mit einem gesonderten Verwaltungsaufwand einher, um die Verantwortlichkeit sowie Art und Umfang des Beitrags zur CO_2-Entnahme zu bestimmen.
Haushaltswirkung und Finanzierungsgerechtigkeit	• Entnahmeverpflichtungen sind für den Haushalt lediglich mit Verwaltungskosten verbunden. Es kommt daher weder zu direkten staatlichen Ausgaben noch Einnahmen. • Bei Missachtung der Betroffenheit von weiteren Marktversagen (bspw. Kreditmarktzugangsbeschränkungen) und somit unterschiedlicher Zahlungsfähigkeit, besteht die Gefahr einer ungerechten bzw. ineffizienten Belastung durch Entnahmeverpflichtungen.
Investitionssicherheit und Resilienz	• Die Sicherheit von Investitionen in Entnahmemethoden ist vermutlich relativ hoch, da Akteure zur Abnahme verpflichtet sind. Diese Sicherheit steht und fällt mit dem Vertrauen in die Durchsetzung der Verpflichtung.
Internationale Anschlussfähigkeit	• Nationale Verpflichtungen zu einem Beitrag zur CO_2-Entnahme (zusätzlich zu den CO_2-Kosten im ETS) können zu Wettbewerbsnachteilen führen.
Politische Umsetzbarkeit	• Die Eignung von Entnahmeverpflichtungen ist umstritten. Es gibt Befürchtungen, dass Emissionsminderungsmaßnahmen verzögert werden und bei mangelnder Erfüllung der Entnahmeverpflichtung zusätzliche Netto-Emissionen anfallen könnten. • Zudem können solche Maßnahmen mit Belastungen für die jeweils Verantwortlichen eingehen, was Widerstände hervorrufen kann.

Zusammenführende Bewertung

Eine Verpflichtung zur CO_2-Entnahme kann eingeführt werden, um die Nachfrage (langfristig) zu gewährleisten. Eine Herausforderung besteht darin, die Belastung der verpflichteten Marktteilnehmer ausgewogen zu gestalten – sowohl untereinander als auch im Vergleich zu nicht verpflichteten Akteuren. Zudem erfordert die politische Umsetzung von Entnahmeverpflichtungen eine sorgfältige Gestaltung, um finanzielle Auswirkungen angemessen zu steuern und eine sinnvolle Integration in bestehende Klimaschutzstrategien sicherzustellen. Für die effektive Umsetzung sind außerdem geeignete Compliance- und Sanktionsmechanismen besonders relevant, um Vertrauen in die Durchsetzung einer solchen Verpflichtung zu schaffen.

7.3 Erkenntnisse und Empfehlungen

Der Weg zu einem tragfähigen Marktrahmen besteht aus einer Kombination verschiedener Instrumente

Die Analyse der verschiedenen Anreizinstrumente zeigt, dass kein einzelnes Instrument ausreicht, um ein effizientes und effektives marktbasiertes System aufzubauen. Ähnlich wie bei anderen Klimaschutzmaßnahmen und der Verbreitung neuer Technologien ist zu erwarten, dass ein ausgewogener Instrumentenmix am besten dazu geeignet ist, Herausforderungen in verschiedenen Phasen des Markthochlaufs zu adressieren.[316] Während einige Instrumente die grundlegenden Marktstrukturen und Rahmenbedingungen schaffen, stellen andere eine direkte finanzielle Unterstützung zur Überwindung von Marktbarrieren dar und wiederum andere sorgen für eine langfristig tragfähige verursachergerechte Finanzierung.

Dabei bedarf es sowohl einer funktionalen als auch einer sequenziellen Koordination innerhalb des Instrumentenmix.[317] Eine funktionale Koordination erfordert, dass innerhalb dieses Instrumentenmix die Wirkung der einzelnen Instrumente aufeinander abgestimmt wird. Eine sequenzielle Koordination bedeutet, dass darüber hinaus die Instrumente an die Phasen der Entwicklung der CO_2-Entnahmen angepasst werden sollten.

7.3.1 Maßnahmen zur Marktvorbereitung

Marktvorbereitungsinstrumente („Enabler“) tragen dazu bei, Transparenz zu schaffen und Vertrauen in die Qualität und Verlässlichkeit von CO_2-Entnahmen zu fördern. Sie erfordern meist verhältnismäßig geringe direkte finanzielle Mittel, legen die Grundlage für freiwilligen und verpflichtenden Handel von CO_2-Entnahmen sowie für staatliche Investitionen und sind somit sogenannte No-Regret-Maßnahmen. Instrumente in dieser Kategorie sind:

- Staatliche Zertifizierungsstandards (z. B. CRCF, Artikel 6 ÜvP)
- Reporting-Vorgaben, Labels, Kompetenz- und Kapazitätsaufbau (z. B. CSRD, GCD, IKI)
- Förderung von Forschung und Entwicklung

[316] (Stechemesser, et al., 2024).
[317] (Stechemesser, et al., 2024).

Etablierung von staatlichen Zertifizierungsstandards

Glaubwürdige, transparente und vergleichbare Standards für CO_2-Entnahmen sind eine zentrale Voraussetzung sowohl für freiwillige als auch für verpflichtende Kohlenstoffmärkte und können auch für ergebnisbasierte Förderinstrumente als Referenz dienen, sofern sie auf robusten MRV-Systemen beruhen. Dafür gilt es die in Kapitel 4.4 beschriebenen Herausforderungen zu überwinden, insbesondere bei der Entwicklung adäquater Quantifizierungsmethodiken für natürliche Senken auf Projektebene. Bei der Entwicklung von Standards sollte auf eine Harmonisierung mit bestehenden Datenerhebungspflichten und internationalen Standards (z. B. Artikel 6 ÜvP) geachtet werden, um Marktverzerrungen und ineffiziente Parallelstrukturen zu vermeiden.

Empfehlung 37: Unterstützung der Weiterentwicklung von Zertifizierungsstandards und MRV-Systemen (siehe Kapitel 6.4). Hierfür sollte sich die Bundesregierung in die entsprechenden europäischen und internationalen Prozesse einbringen und auf eine harmonisierte, ambitionierte Ausgestaltung hinarbeiten.

Informations- und Bildungsmaßnahmen verstärken

Die gesellschaftliche Akzeptanz der CO_2-Entnahme ist eine zentrale Voraussetzung für ihre Umsetzung. Daher sollten frühzeitig Maßnahmen zum Kompetenzaufbau wie Informations- und Bildungsformate etabliert werden, um Wissen über verschiedene CO_2-Entnahmemethoden sowie ihre Potenziale und Herausforderungen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft zu verankern. Dies könnte beispielsweise über die Integration des Themas CO_2-Entnahme in bestehende Klima- und Umweltbildungsprogramme erfolgen.

Der Prozess der LNe hat hier bereits einen wichtigen Anfang gemacht und viele Stakeholder möglichst umfassend und transparent beteiligt. Künftig sollen der Öffentlichkeit zusätzliche Informationen zu den verschiedenen Entnahmemethoden, aktuellen Entwicklungen und politischen Maßnahmen bereitgestellt werden.

Empfehlung 38: Die Bundesregierung sollte umfassende Informations- und Bildungsprogramme sowie Dialogveranstaltungen initiieren, um Akzeptanz und Wissen über CO_2-Entnahmen in der Gesellschaft zu fördern und eine faktenbasierte öffentliche Debatte zu ermöglichen.

Kapazitätsaufbau in Ministerien, Behörden und unterstützenden Institutionen

Der Markthochlauf neuer Technologien und Geschäftsmodelle erfordert handlungsfähige staatliche Strukturen. Ministerien und Behörden müssen über ausreichende Fachkenntnisse verfügen, um das komplexe Vorhaben zu organisieren. Nur so können sie klare, verlässliche und innovationsfreundliche Rahmenbedingungen gestalten. Daher ist ein Kapazitätsaufbau in Ministerien, Behörden und unterstützenden Institutionen erforderlich. Dieser stärkt die Fähigkeit, regulatorische Prozesse effizient und transparent umzusetzen, indem er u.a. auch die Koordinierung zwischen verschiedenen Ressorts verbessert. Unterstützende Institutionen spielen dabei eine wichtige Rolle bei Analyse, Beratung und Wissenstransfer. Ohne diese Kapazitäten drohen Verzögerungen in der Umsetzung der Strategie und der Unterstützung des Markthochlaufs.

Empfehlung 39: Um den Markthochlauf erfolgreich zu gestalten, sollte ein gezielter Kapazitätsaufbau in Ministerien, Behörden und unterstützenden Institutionen organisiert werden. Nur mit ausreichenden Fachkenntnissen und Ressourcen können die nötigen Rahmenbedingungen entwickelt, Prozesse effizient gesteuert und Vertrauen bei Wirtschaft und Gesellschaft geschaffen werden.

Unterstützung der freiwilligen Nachfrage durch die Regelung von Umweltaussagen sowie die Schaffung von Reporting-Vorgaben und staatlichen Labels

Verpflichtende Reporting-Vorgaben auf Unternehmensebene sowie Regelungen zur Nutzung von (staatlichen) Labels auf Produktebene sollen die Transparenz und Nachvollziehbarkeit getätigter Aussagen steigern. Aktuelle EU-Prozesse, die darauf hinwirken, sind die CSRD sowie die GCD (siehe Kapitel 7.2). Je nachdem, wie die Instrumente konkret ausgestaltet werden, können sie zu einer gesteigerten Zahlungsbereitschaft für hochwertige CO_2-Entnahmen und zu einer entsprechenden Nachfragesteigerung im VCM führen.

Empfehlung 40: Die Weiterentwicklung staatlicher Reporting-Vorgaben wie zum Beispiel der CSRD und der GCD sollte von der Bundesregierung begleitet werden. Dabei sollte die Berichterstattung von CO_2-Entnahmen als Teil der Emissionsbilanz klar geregelt werden, insbesondere für Unternehmen, die klimaneutrale Produkte oder Dienstleistungen anbieten.

F&E-Förderung für Entnahmemethoden sowie Begleitforschung zu ökologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen

Die Methodenbewertung zeigt, dass es bei vielen Methoden noch grundlegenden Forschungsbedarf gibt, bevor sie auf industrieller Ebene eingesetzt werden können. Daher können gezielte Investitionen in die technologische Entwicklung und die wissenschaftliche Begleitforschung zu einem früheren Hochlauf dieser Methoden beitragen.

Neben technischen Fragen muss F&E auch die MRV-Fähigkeit bei natürlichen Senken verbessern. Fortschritte in Sensorik, Satellitenbildern und KI-gestützter Modellierung können die Genauigkeit und Vergleichbarkeit von CO_2-Entnahmen erhöhen. Einheitliche Datenstandards und öffentlich zugängliche Forschungsdaten sind essenziell für eine internationale Vergleichbarkeit.

Empfehlung 41: Speziell in der ersten Phase des Hochlaufs der CO_2-Entnahmen sollten gezielte Investitionen in Forschung und Entwicklung erfolgen. Die Bundesregierung sollte analog zu den Reallaboren der Energiewende geeignete Förderprogramme auflegen, um in einem öffentlichen Raum praxistaugliche und breit akzeptierte CO_2-Entnahmemethoden, Pilotprojekte und Monitoring-Konzepte zu entwickeln und zu testen.

Empfehlung 42: Die bestehende Unterstützung für Forschung und Entwicklung für den LULUCF-Sektor im Rahmen des Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz sollte weitergeführt werden. Zusätzliche Förderprogramme mit dem Ziel der CO_2-Entnahme sollten in enger Abstimmung mit dem bestehenden Förderrahmen entwickelt werden.

Rechtliche Anpassungen zur Ermöglichung von CO_2-Entnahmen

Aktuell bestehen noch viele Hürden, die der Entwicklung von CO_2-Entnahmen im Weg stehen (siehe Kapitel 2). Ebenfalls gibt es eine Reihe weiterer rechtlicher Anpassungen (siehe Kapitel 6.1), deren Umsetzung die Durchführung von Forschungs- oder Entnahmeprojekten ermöglichen würde.

Empfehlung 43: Für die Schaffung von Rechtssicherheit für CO_2-Entnahmen sollten die entsprechenden Rechtsanpassungen vorgenommen werden. Dies betrifft insbesondere die Ermöglichung CCS-basierter Entnahmen in Deutschland sowie die Vereinfachung der Forschung an marinen Methoden (siehe Kapitel 6.1).

7.3.2 Öffentliche Investitionen für die Skalierung von CO_2-Entnahmen

Einige Instrumente beruhen auf einer öffentlichen Finanzierung von CO_2-Entnahmen. Dies sind:

- Klimaneutrale öffentliche Verwaltung und Beschaffung
- Ergebnisbasierte Förderung (z. B. CCfDs, Reverse Auctions, Steuergutschriften)
- Aktivitätsbasierte Förderung (z.B. ANK, GAP, GAK, BIK-Modul 2)

Diese Instrumente ermöglichen es dem Staat in konkrete Projekte zur CO_2-Entnahme zu investieren und so weitere private Investitionen anzureizen. Dadurch können der Hochlauf beschleunigt und weitere Innovationen und Kostenreduktionen erreicht werden.

Die Instrumentenbewertung zeigt, dass eine ergebnisbasierte Förderung effektiver und effizienter ist als eine aktivitätsbasierte Förderung. Ergebnisbasierte Förderungen erfordern jedoch die klare Messbarkeit und langfristige Sicherstellung der Entnahmeleistung, die vor allem bei technischen Senken bereits gegeben ist. Für LULUCF-basierte Senken müssen die Voraussetzungen teilweise noch geschaffen werden. Insbesondere für natürliche Senken sollte die aktivitätsbasierte Förderung zunächst weiterhin eine prioritäre Rolle spielen, während für neuartige Entnahmemethoden eine ergebnisbasierte Förderung anzustreben ist.

Aus Effizienzgründen sollten Investitionsentscheidungen soweit möglich nach wettbewerblichem Verfahren (wie Ausschreibungen, gegebenenfalls technologieoffen) getroffen werden.

Öffentliche Förderprogramme können aus dem Staatshaushalt (bzw. dem Klima- und Transformationsfonds) oder durch eigene Instrumente finanziert werden. Dafür werden verschiedene Konzepte, wie etwa eine Endproduktumlage, diskutiert. Bei der Ausgestaltung sollte darauf geachtet werden, dass diese Konzepte möglichst zweckdienliche Anreize setzen und verursachergerecht wirken, aber auch die Zahlungsfähigkeit berücksichtigen.

Unterstützung für Pilotprojekte und Demonstrationsanlagen

Erste Pilot- und Demonstrationsprojekte verschiedener neuartiger CO_2-Entnahmemethoden sollten gefördert werden, um Skalierungshemmnisse zu überwinden, MRV-Verfahren zu erproben und Wirtschaftlichkeit sowie technische Tauglichkeit unter realen Bedingungen zu prüfen. Ein gezieltes staatliches Ankaufprogramm kann ein frühes Marktsignal schaffen, zusätzliches privates Kapital mobilisieren und das „Valley of Death“ zwischen Forschung und Marktstart zu schließen helfen. Selbst verhältnismäßig geringe staatliche Mittel können hier eine wichtige Hebelwirkung entfalten.

Hierfür könnten insbesondere Reverse Auctions eingesetzt werden, da sie einen wettbewerblichen, transparenten Fördermechanismus mit planbarer Haushaltswirkung darstellen. Voraussetzung für die Teilnahme sollten staatliche Zertifizierungsstandards wie der CRCF sein. Aufgrund sehr unterschiedlicher Entnahmekosten sind zumindest zu Beginn technologiespezifische Auktionen anzuraten.

Alternativ oder ergänzend können bestehende Förderprogramme wie die BIK und die Klimaschutzverträge, aber auch die Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW) weiterentwickelt werden, um neben der Emissionsvermeidung auch die CO_2-Entnahme zu ermöglichen.

Empfehlung 44: Die Bundesregierung sollte ein staatliches Ankaufprogramm für qualitativ hochwertige Entnahmen einführen. Hierfür sollten ausreichende staatliche Mittel eingeplant werden, die über technologiespezifische und technologieoffene Förderwettbewerbe (engl. Reverse Auctions) vergeben werden.

Empfehlung 45: Bei der nächsten Novellierung der BIK sollte die Bundesregierung prüfen, ob weitere neuartige Entnahmemethoden wie die Kohlenstoffspeicherung durch Pflanzenkohle oder die beschleunigte Verwitterung neben CCU/S-basierten Methoden integriert werden können.

BECCS an Industrieanlagen mit schwer vermeidbaren Emissionen anreizen

An Industrieanlagen mit schwer vermeidbaren Emissionen (insbesondere Kalk, Zement und thermische Abfallbehandlungsanlagen), an denen ohnehin Abscheideanlagen zur Emissionsvermeidung geplant werden, besteht ein erhebliches Entnahmepotenzial durch Abscheidung und Speicherung biogener CO_2-Ströme (BECCS). Dies ist auch in der Modellierung der LNe Grundvoraussetzung für CO_2-Entnahmen in größerem Maßstab in den kommenden Jahren. Aktuell besteht dafür jedoch durch eine fehlende Vergütung für BECCS kein Anreiz: Die Abscheidung von CO_2 an thermischen Abfallbehandlungsanlagen ist über die Klimaschutzverträge derzeit nicht förderfähig. Zudem ist zu erwarten, dass die Förderhöhe der BIK keinen ausreichenden wirtschaftlichen Anreiz bietet, um biogenes CO_2 an Großanlagen abzuscheiden.

Empfehlung 46: Auf nationaler Ebene sollten Anreize für BECCS an Industrieanlagen mit schwer vermeidbaren Emissionen und an Müllverbrennungsanlagen geschaffen werden, um Investitionssignale zu senden und die Planung geeigneter Abscheideanlagen zu vereinfachen. Hierfür sollte geprüft werden, ob die Förderrichtlinie der Klimaschutzverträge auch auf CO_2-Entnahmen ausgeweitet werden kann oder ob Reverse Auctions eingesetzt werden können.

Weiterentwicklung der Förderung natürlicher Entnahmemethoden

Natürliche CO_2-Entnahmen werden bislang überwiegend durch aktivitätsbasierte Förderprogramme angereizt. Programme wie die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) und die Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes (GAK) fördern Maßnahmen wie Aufforstung, Agroforstsysteme, Humusanreicherung oder die Renaturierung küstennaher Ökosysteme. Diese Förderungen leisten einen wichtigen Beitrag zum Natur- und Klimaschutz, sind aber bislang nur begrenzt auf CO_2-Entnahmen ausgerichtet. Diese Programme sollten stärker auf Klimawirkung und CO_2-Entnahmen ausgerichtet werden, wobei andere Ökosystemdienstleistungen weiter honoriert werden müssen.

Empfehlung 47: Bestehende Förderinstrumente der GAP und der GAK sollten mit dem Ziel der aktiven Förderung der CO_2-Entnahme angepasst werden. Dabei sind unter anderem folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Bei der Aufforstung wird der Wertverlust durch die Neuanlage des Waldes bislang nicht ausreichend einbezogen.
- In Bezug auf Agroforstsysteme sollte ein Ausgleich des Minderertrags bzw. der Mehrarbeit erfolgen und die unterschiedlichen Förderprogramme und Antragsverfahren in den 16 Bundesländern sollten harmonisiert werden.
- Bei der Humusanreicherung ist eine Entnahme des CO_2 nur bei einer dauerhaften Umstellung der bisherigen landwirtschaftlichen Praktik möglich. Damit verbundene Direktzahlungen können für ein Jahr bezogen werden und sind dann erneut zu beantragen. Eine stärkere Berücksichtigung der CO_2-Entnahme würde jedoch eine längerfristige Umstellung erfordern.
- Für die Wiedervernässung von Mooren erfolgt im Zeitraum von 2023 bis 2027 keine Förderung über die GAP. In der zukünftigen Ausgestaltung könnten Ökosystemdienstleistungen von wiedervernässten Mooren stärker honoriert werden.

Ergebnisbasierte Förderung natürlicher Entnahmen ermöglichen

Aufgrund methodischer Unsicherheiten, etwa beim MRV, sowie des Risikos der Wiederfreisetzung, aber auch durch positive Umweltauswirkungen sind natürliche Entnahmemethoden schwer mit Neuartigen vergleichbar. Derzeit werden verschiedene Ansätze diskutiert, um die Vergleichbarkeit zu erhöhen (siehe Kapitel 6.4.1). Vorbehaltlich der erfolgten Verbesserung von MRV und der Zertifizierungsstandards für natürliche CO_2-Entnahmen sollte die Förderung natürlicher Entnahmen sukzessive auf ergebnisbasierte Förderung umgestellt werden. Anstatt reine Flächenbereitstellung zu subventionieren, sollten Fördermechanismen direkt an die nachgewiesene CO_2-Entnahme gekoppelt werden. Die Förderung könnte als wettbewerbliches staatliches Ankaufsprogramm ausgestaltet werden.

Ein verstärkter Anreiz für die Emissionsreduktion und die CO_2-Entnahme im LULUCF-Sektor könnte auch über die Bepreisung von Emissionen und die Honorierung von Entnahmen im LULUCF-Sektor und gegebenenfalls auch in der Landwirtschaft entstehen. Auch eine Selbstverpflichtung zur Kompensation von THG-Emissionen aus der Landwirtschaft könnte natürliche Entnahmen anreizen.

Empfehlung 48: Wenn möglich, sollte eine ergebnisbasierte Förderung von natürlichen Entnahmemethoden entwickelt und mit der Förderung weiterer Ökosystemdienstleistungen abgestimmt werden. Die Bundesregierung sollte zudem auf europäischer Ebene zusätzliche Anreize für klimafreundliche Landnutzungspraktiken, beispielsweise durch die Bepreisung der entsprechenden Emissionen, prüfen.

Ergebnisbasierten Anreiz für neuartige Senken ausbauen

Für den Hochlauf neuartiger CO_2-Entnahmemethoden und zur Erreichung der Ziele für technische Senken nach § 3b KSG sollten Förderprogramme für verschiedene Methoden zum Einsatz kommen. CCfDs sind insbesondere dann sinnvoll, wenn über die ETS-Integration der entsprechenden Entnahmen bereits ein Referenzpreis existiert. Andernfalls sollten aus Gründen der haushälterischen Planbarkeit und Umsetzbarkeit Reverse Auctions eingesetzt werden. Technologieoffene Reverse Auctions fördern besonders kosteneffiziente Entnahmemethoden, wohingegen technologiespezifische Ausschreibungen die gezielte Förderung teurerer Entnahmemethoden ermöglichen, um Kostendegressionen zu erreichen. Dies ermöglicht den notwendigen Portfolioansatz für die CO_2-Entnahme in Deutschland und der EU. Eine Berücksichtigung der Einnahmen auf dem freiwilligen Kohlenstoffmarkt kann öffentliche Ausgaben zusätzlich reduzieren.

Empfehlung 49: Die Bundesregierung sollte bereits frühzeitig erste Reverse Auctions vorbereiten und ihr Volumen allmählich ausbauen. Dabei sollten sowohl technologieoffene als auch technologiespezifische Auktionen abgehalten werden. CCfDs für CO_2-Entnahmen stellen eine alternative Möglichkeit einer öffentlichen Förderung dar, wobei sie eine Anbindung an den ETS erfordern.

Öffentliche Beschaffung als Markttreiber

Die öffentliche Hand kann durch gezielte Beschaffungsrichtlinien die Nachfrage nach hochwertigen CO_2-Entnahmen stärken und so als Katalysator für den Markt wirken. Die im Klimaschutzgesetz (§ 13 und § 15 KSG) verankerten Ziele für eine nachhaltige Beschaffung und klimaneutrale Verwaltung bis 2030 bieten dafür einen Rahmen.

Empfehlung 50: Es sollten klare Vorgaben definiert werden, welche Entnahmemethoden als zulässig für die Erreichung der Ziele einer klimaneutralen Verwaltung und einer nachhaltigen Beschaffung gelten, in welchem Umfang sie genutzt werden dürfen und über welchen Zeitraum eine Anrechnung möglich ist. Dabei muss sichergestellt werden, dass CO_2-Entnahmen ausschließlich ergänzend zur

Emissionsminderung eingesetzt werden – nicht als Ersatz für ambitionierte Reduktionsmaßnahmen wie den Umstieg auf erneuerbare Energien oder die Beschaffung emissionsarmer Produkte.

7.3.3 Langfristige Finanzierung durch marktfinanzierte Instrumente

Das langfristige Zielbild eines effizienten, sich selbst tragenden Marktrahmens erfordert zunehmend auch „marktfinanzierte Instrumente", die nicht mit öffentlichen Ausgaben einhergehen. Hierzu zählen:

- Integration in Emissionshandelssysteme (ETS)
- Verpflichtungsmarkt für CO_2-Entnahmen (engl. Carbon Removal Obligation, CRO)
- Öffentlich-private Vereinbarungen

Sie können dafür sorgen, dass die Kosten für CO_2-Entnahmen möglichst verursachergerecht von den verantwortlichen Emittenten gedeckt werden und so eine sich selbst tragende Marktstruktur entsteht.

Die Integration in den EU-ETS kann langfristig eine verlässliche Nachfrage nach CO_2-Entnahmen schaffen, über die die Notwendigkeit und die Kosten für staatliche Förderung minimiert werden können.

Klarheit über langfristige regulatorische Perspektive für eine EU-ETS-Integration

Aktuell besteht noch Uneinigkeit darüber, ob und wie CO_2-Entnahmezertifikate in den EU-ETS integriert werden sollten. Bis Juli 2026 wird die EU-Kommission einen Vorschlag zur möglichen Integration von CO_2-Entnahmen in den ETS unterbreiten.

Es ist naheliegend, dass zumindest permanente Entnahmen langfristig in den ETS integriert werden sollten. Dies würde für diese Entnahmen eine private Finanzierung und einen möglichst effizienten Marktrahmen für den Hochlauf ermöglichen. Es ist jedoch aktuell noch unklar, ob, wie schnell und unter welchen Bedingungen CO_2-Entnahmen in den Emissionshandel integriert werden. Eine Zugangsvoraussetzung von ausreichender Dauerhaftigkeit oder entsprechende Versicherungsmechanismen sind dabei für die Glaubwürdigkeit des Systems von entscheidender Bedeutung.

Auch wenn eine Integration kurzfristig nicht möglich erscheint, sollten so bald wie möglich die langfristigen Rahmenbedingungen geklärt werden, um Planungs- und Investitionssicherheit für Marktteilnehmer zu schaffen. Darauf aufbauend sollten die Voraussetzungen für eine ETS-Integration geschaffen werden.

Empfehlung 51: Die Bundesregierung sollte sich aktiv in die Diskussion um die Integration von Entnahmen in den ETS einbringen, nachdem der Vorschlag der Kommission veröffentlicht wurde. Dabei sollte die Bundesregierung für eine möglichst nachhaltige Option der ETS-Integration werben, mit der bereits frühzeitig zusätzliche Finanzierungsmöglichkeiten für Entnahmen entstehen und gleichzeitig das hohe Ambitionsniveau der Emissionsminderung gewahrt wird. Für eine detaillierte Positionierung sind frühzeitige Analysen und Konsultationsprozesse unter anderem mit Industrie, Wissenschaft und Finanzmarktakteuren notwendig.

Beginn der ETS-Integration für permanente CO_2-Entnahmen

Permanente CO_2-Entnahmen[318] sollten zunächst schrittweise in den EU-ETS 1 integriert werden, um einen marktbasierten Anreiz für die Entwicklung von CO_2-Entnahmen zu schaffen. Dabei sollte der Fokus auf der Integrität des ETS und einem hohen Klimaschutzniveau liegen. Aufgrund der noch hohen Entnahmekosten ist zu erwarten, dass der Anreizeffekt zu Beginn noch begrenzt ist; allerdings sendet die Integration ein wichtiges Signal an Marktteilnehmer. Mit der Integration in den ETS können CCfDs den ETS-Preis als Referenzwert nutzen, um verbleibende Kostenlücken effizient zu schließen (siehe Kapitel 7.2.5).

Der Cap des EU-ETS sollte so angepasst werden, dass eine Integration zumindest in einer Übergangsphase das bisherige Ambitionsniveau der Minderung beibehält, um zu verhindern, dass Anreize für Emissionsminderungen abgeschwächt werden.[319] Eine schrittweise Einbindung von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS bietet Gelegenheit für Anpassungen und eine kontinuierliche Ambitionssteigerung. Zur Vermeidung von Mitigation Deterrence sind weitere mögliche Einschränkungen zu prüfen. Hierzu zählen quantitative Begrenzungen oder Beschränkungen auf der Nachfrageseite, beispielsweise für bestimmte Sektoren oder schwer vermeidbare Emissionen, die noch genauer definiert werden müssten.

Eine Integration von CO_2-Entnahmen in den EU-ETS könnte perspektivisch von intermediären Institutionen begleitet werden, zum Beispiel durch eine unabhängige Europäische Kohlenstoff-Zentralbank (ECCB). Eine ECCB könnte damit betraut werden, die Obergrenze der gehandelten Zertifikate im EU-ETS (engl. Cap) zu verwalten oder sequenziell Entnahmezertifikate in den ETS zu überführen und die jeweiligen Zugangsvoraussetzungen zu überwachen. Über eine solche Institution könnten zudem bereits frühzeitig Entnahmen angereizt werden, die nicht direkt in den EU-ETS integriert, sondern in einer Reserve gehalten werden, beispielsweise um Preisschwankungen auszugleichen.[320]

Empfehlung 52: Die Bundesregierung sollte auf EU-Ebene für eine Integration von permanenten technischen Senken in den EU-ETS hinarbeiten. Bei der Ausgestaltung der Integration sollte weiter auf ein hohes Ambitionsniveau der Minderung geachtet werden. Dies kann zum Beispiel über eine Absenkung der Zertifikate-Obergrenze oder über Beschränkungen auf der Nachfrageseite erreicht werden. Langfristig sollte eine vollständige Integration von permanenten CO_2-Entnahmen in den Emissionshandel angestrebt werden.

Internationale Marktvernetzung

Artikel 6 ÜvP ermöglicht den internationalen Handel mit Emissionsminderungen und CO_2-Entnahmen. Dadurch können Skalierungseffekte und Standortvorteile genutzt und Kosten reduziert werden. Um eine glaubwürdige und funktionsfähige Marktstruktur zu etablieren, ist eine enge Zusammenarbeit mit anderen Staaten erforderlich. Die Harmonisierung von Standards und Zertifizierungsmechanismen stellt sicher, dass CO_2-Entnahmen einheitlich bewertet und anerkannt werden.

[318] Gemäß Verordnung (EU) 2024/3012 Art. 2 (9) definiert durch eine Speicherdauer von mindestens 200 Jahren.
[319] (Sultani et al., 2024).
[320] (Edenhofer et al., 2024; Rickels et al., 2021; Sultani et al., 2024).

Empfehlung 53: Der Ausbau globaler Handelsmechanismen für CO_2-Entnahmen sollte aktiv vorangetrieben werden. Dazu sind die Schaffung transparenter und robuster Zertifizierungsstandards sowie die enge internationale Kooperation essenziell.

Frühzeitige Einführung verursachergerechter Finanzierungsmodelle für netto-negative Emissionen

Die Finanzierung netto-negativer Emissionen stellt eine besondere Herausforderung dar: Eine Integration in den EU-ETS oder eine Verpflichtung zur Kompensation außerhalb des EU-ETS kann nur die verbleibenden Emissionen dieser Systeme ausgleichen. Mit sinkenden Emissionen geht jedoch auch die davon finanzierte Nachfrage nach Entnahmen zurück. Eine bilanzielle Verschiebung durch verlängerte Erfüllungsfristen kann zwar rechnerisch die Netto-Negativität in einem Zieljahr ermöglichen, führt jedoch nicht zu zusätzlichem Klimaschutz.

Um einen verursachergerechten Beitrag zum Klimaschutz auch jenseits der THG-Neutralität zu sichern, könnten Emittenten langfristig verpflichtet werden, anteilig historische Emissionen durch dauerhafte CO_2-Entnahme auszugleichen. Aufgrund dabei bestehender Umsetzungsschwierigkeiten ist es wichtig, frühzeitig eine erweiterte Emittenten-Verantwortung rechtlich zu verankern.

Empfehlung 54: Die Bundesregierung sollte möglichst frühzeitig ein verbindliches Modell der erweiterten Emittenten-Verantwortung (engl. Carbon Takeback Obligation, CTBO) entwickeln und rechtlich verankern, um die Grundlage für eine verursachergerechte Finanzierung netto-negativer Emissionen zu schaffen. Je früher solche Verpflichtungen eingeführt werden, desto größer wird der verursachergerechte Beitrag ausfallen.

7.3.4 Weitere Empfehlungen

Bisher fehlen Anreize für die Kreislaufführung von nicht fossilem Kohlenstoff

Bisher liegen kaum Anreize zur Kreislaufführung oder langfristigen Nutzung von atmosphärischem und biogenem CO_2/Kohlenstoff vor. Aktuell bestehen lediglich Anreize zur kurzzeitigen Nutzung von abgeschiedenem atmosphärischen und biogenen CO_2 im Rahmen der Anrechenbarkeit auf die Quotenvorgaben für Biokraftstoffe in der RED III sowie der EU-Initiativen "ReFuelEU Aviation" oder "FuelEU Maritime".

Für die stoffliche Biomassenutzung gibt es bisher nur das bestehende Bundesförderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“. Die Entnahmeleistung durch die stoffliche Nutzung nachhaltiger Biomasse und die langfristige Nutzung von abgeschiedenem biogenen und atmosphärischen CO_2 werden nicht finanziell, etwa im EU-ETS, honoriert. Dies führt dazu, dass Biomasse bislang kaum stofflich in der Bau- und Chemieindustrie genutzt wird. Daher sollten Ansätze entwickelt werden, um die Kreislaufführung von Kohlenstoff anzureizen. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Speicherung dauerhaft erfolgt, damit sie als Entnahme anerkannt wird.

Empfehlung 55: Zur Stärkung des Anreizes für den Einsatz von nicht fossilem Kohlenstoff in Produkten könnten Anpassungen erfolgen wie zum Beispiel die Einführung höherer Recyclingquoten oder eine Prämie für die stoffliche Nutzung von Altholz (Altholzverordnung, AltholzV). Außerdem könnte die Einführung von Quoten in Anlehnung an die bestehenden Quoten für Biokraftstoffe in der RED III, der ReFuelEU Aviation oder der FuelEU Maritime geprüft werden. Anreize könnten auf der CRCF-Zertifizierung für Entnahmeprojekte zur CO_2-Speicherung in Produkten aufbauen.

Gesamtgesellschaftlichen Diskurs zur Rolle der öffentlichen Hand bei der Finanzierung von netto-negativen Emissionen anstoßen

Auch mit neuen Maßnahmen zur erweiterten Emittenten-Verantwortung wird die Menge an CO_2-Entnahmen voraussichtlich nicht ausreichen, um den Overshoot des CO_2-Budgets zu adressieren.[321] In diesem Fall könnte der öffentlichen Hand eine wesentliche Rolle beim Kauf von CO_2-Entnahmezertifikaten zukommen. Dies kann potenziell zu erheblichen finanziellen Aufwänden führen, bei denen auch Fragen zu historischer Verantwortung und intergenerationeller Gerechtigkeit zu bedenken sind. Während das Phasenmodell ein Auslaufen von öffentlich finanzierten Instrumenten für die Erreichung von Netto-THG-Neutralität vorsieht, werden diese Instrumente für die Phase nach Netto-Null wieder stärker benötigt.

Empfehlung 56: Im Sinne der intergenerationellen Gerechtigkeit und der langfristigen fiskalischen Stabilität sollte bereits heute eine gesellschaftliche und politische Debatte zu Umfang und Finanzierung von netto-negativen Emissionen angestoßen werden.

7.4 Rolle der Instrumente in einem Phasenmodell

Motivation und Ziele des Phasenmodells

Die Entwicklung eines funktionsfähigen Marktrahmens für CO_2-Entnahmen ist ein langfristiger Prozess, da aktuell noch entscheidende technische und ökonomische Voraussetzungen fehlen, sodass eine sofortige Umsetzung nicht möglich ist. Gleichzeitig muss der politische Fokus weiterhin auf der Emissionsminderung als kurzfristig effektivster Klimaschutzmaßnahme liegen. Auch gesellschaftliche Fragen wie Akzeptanz, Verteilungsgerechtigkeit und ökologische Risiken müssen zunächst noch breit diskutiert werden.

Ein phasenweiser Markthochlauf mit schrittweiser Implementierung einzelner Instrumente kann das Risiko von Fehlanreizen, ineffizienter Ressourcenverwendung und unerwünschten Nebenwirkungen wie Mitigation Deterrence reduzieren. In der praktischen Umsetzung ist zu prüfen, welche Maßnahmen methodenübergreifend wirken und welche spezifisch für einzelne Technologien ausgestaltet werden müssen. Da politische und infrastrukturelle Vorlaufzeiten variieren, müssen viele Maßnahmen phasenübergreifend initiiert werden.

[321] (Sultani, et al., 2024).

Überblick über die Phasen

Die vier Phasen gehen jeweils fließend ineinander über und stellen die relative Bedeutung der verschiedenen Instrumente dar.

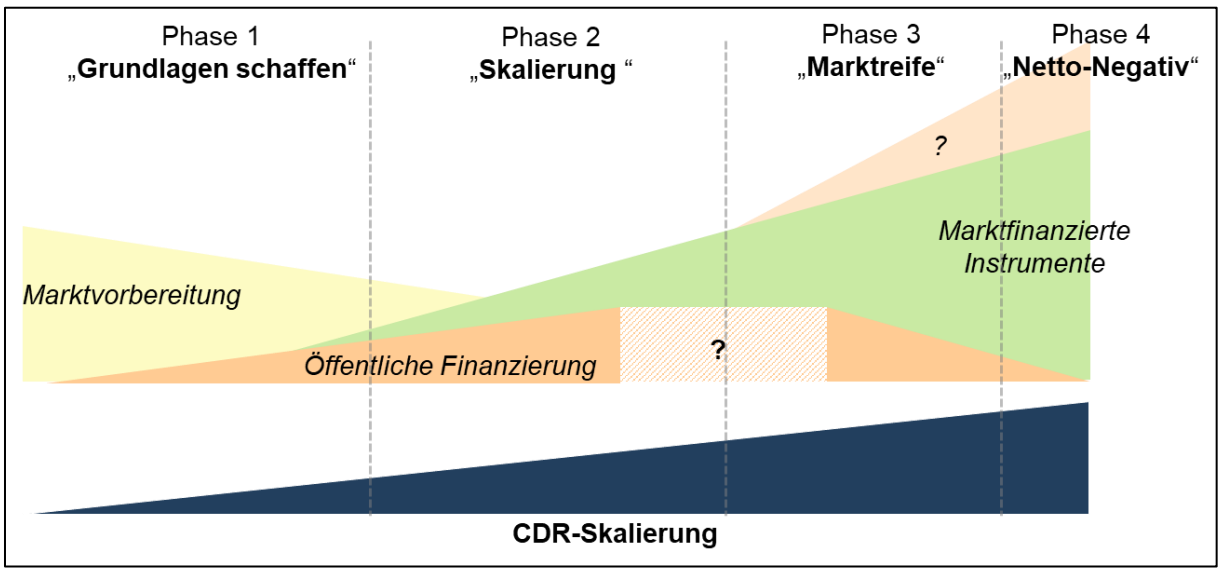


Abbildung 10 Schematisches Phasenmodell für die Entwicklung von Anreizinstrumenten für die CO_2-Entnahme

Die erste Phase, „Grundlagen schaffen“, hat zum Ziel, die notwendigen regulatorischen und technischen Rahmenbedingungen zu schaffen. Ein Schwerpunkt liegt in dieser Phase auf Instrumenten der Marktvorbereitung wie der Etablierung von Standards und Zertifizierungen, der F&E-Förderung sowie Informations- und Bildungsmaßnahmen.

In der zweiten Phase, der „Skalierung“, beginnt die großskalige Implementierung von CO_2-Entnahmemethoden, um CO_2-Entnahme in existierende Klimaschutzstrategien zu integrieren. Voraussichtlich bleibt der Markt jedoch noch stark von staatlicher Unterstützung abhängig.

Die dritte Phase, die „Marktreife“, zeichnet sich durch eine größere Bedeutung marktfinanzierter, verursachergerechter Instrumente aus. Dadurch können direkte Subventionen zunehmend reduziert werden. Eine weitgehende EU-ETS-Integration permanenter Entnahmemethoden wird um verpflichtende Regelungen für Unternehmen ergänzt.

In der vierten Phase, der „Netto-Negativität“, sollen Deutschland und die EU eine netto-negative THG-Bilanz erreichen, was neue Finanzierungsmodelle erfordert. Neben neuen staatlichen Programmen könnte dies durch Entnahmeverpflichtungen und auch internationale Marktvernetzungen erfolgen.

7.4.1 Phase 1: Grundlagen schaffen

Ausgangssituation

Ein adäquater Marktrahmen für CO_2-Entnahmen existiert noch nicht: Weder gibt es ausreichende Anreize für Investitionen in Entnahmen, noch bestehen die Voraussetzungen wie ein umfassender rechtlich-regulatorischer Rahmen für (vor allem technische) CO_2-Entnahmen, geeignete MRV-Prozesse oder standardisierte Methoden zur Vergleichbarkeit und Qualitätssicherung. Zudem befinden

sich viele CO_2-Entnahmemethoden noch in frühen Entwicklungsstadien. Natürliche Entnahmemethoden sind bereits heute verfügbar, erfordern jedoch gezieltere Anreize und verbesserte MRV-Prozesse, um ihre langfristige Wirksamkeit sicherzustellen.

Ziele der Phase 1

Die erste Phase hat das Ziel, rechtlich-regulatorische Grundlagen für die CO_2-Entnahme zu schaffen, Investitionen in die Entwicklung und Erprobung von Technologien zu fördern und eine langfristige Marktstruktur vorzubereiten. Die Phase 1 sollte nicht verzögert werden. So bald wie möglich sollten parallel auch schon Maßnahmen der Phase 2 begonnen werden.

Schwerpunkte in Phase 1

- Etablierung einheitlicher Zertifizierungs- und MRV-Standards (z. B. CRCF-Rahmen, EU-weit harmonisierte Labels bzw. Regelungen über Umweltaussagen über Green Claims Directive)
- Gezielte F&E-Förderung (EU Innovation Fund, BIK, Horizon Europe) und Aufbau von Demonstrationsanlagen
- Bau von Demonstrationsanlagen für verschiedene Entnahmemethoden; Beginn erster größerer Entnahmeprojekte
- Rechtsanpassungen, um die Forschung zu und den Ausbau von CO_2-Entnahmen und der benötigten Infrastrukturen zu ermöglichen
- Klärung zentraler Fragen zur langfristigen Ausgestaltung der ETS-Integration
- Anpassung bestehender Programme (GAP, ANK, GAK), um natürliche Senken künftig stärker auf Klimaschutz auszurichten
- Vorbereitung zentraler Phase-2-Instrumente (Reverse Auctions, CCfDs, öffentliche Beschaffung) aufgrund langer Vorlaufzeiten

7.4.2 Phase 2: Skalierung

Ausgangssituation

Die Basisinstrumente aus Phase 1 (Standards, Zertifizierung, erste Pilotprojekte) sind implementiert. Zahlreiche Entnahmemethoden wurden technologisch weiterentwickelt und MRV-Verfahren stehen für fast alle Methoden zur Verfügung. Dennoch bleiben die Kosten und Risiken hoch und freiwillige Nachfragemärkte reichen nicht aus, um die großflächige Etablierung zu tragen.

Ziele der Phase 2

In der zweiten Phase steht die großskalige Umsetzung von CO_2-Entnahmemethoden im Mittelpunkt. Ziel ist es, Kosten zu senken, Technologien zu konsolidieren und einen messbaren Beitrag zur Erreichung der Klimaziele – insbesondere des Zwischenziels gemäß § 3b KSG für das Jahr 2035 – zu leisten. Gleichzeitig soll der Markt für CO_2-Entnahmen so vorbereitet werden, dass er mittelfristig durch Marktmechanismen mit möglichst geringer staatlicher Förderung finanziert wird.

Schwerpunkte in Phase 2

Insgesamt sollten die Maßnahmen aus Phase 1 abgeschlossen und gegebenenfalls fortgeführt werden. Zudem:

- Ausbau ergebnisbasierte Förderinstrumente, um großskalige Projekte zu ermöglichen; dabei Ausschreibung von Reverse Auctions und, falls möglich, eigenständiger CCfDs für neuartige CO_2-Entnahmen oder Integration von CO_2-Entnahme in KSV

- Etablierung verbindlicher Kriterien für CO_2-Entnahmen für die Kompensation von Emissionen in öffentlicher Verwaltung und Beschaffung
- Eingeschränkte Integration permanenter CO_2-Entnahmen in den EU-ETS für erste Markterfahrungen und als Vorbereitung für eine spätere Vollintegration; flankierend Aufbau geeigneter Governance-Strukturen wie einer European Carbon Central Bank, um diesen Prozess zu begleiten
- Schaffung der Voraussetzungen für die ergebnisbasierte Förderung natürlicher Senken

7.4.3 Phase 3: Marktreife

Ausgangssituation

Mit dem Erreichen der dritten Phase sind viele CO_2-Entnahmemethoden marktreif. Permanente Entnahmemethoden werden bereits teilweise durch verursachergerechte Finanzierungsmodelle wie den EU-ETS nachgefragt, sind aber noch von staatlicher Unterstützung durch CCfDs abhängig. Für natürliche Senken existieren erweiterte MRV-Möglichkeiten.

Ziele der Phase 3

In dieser Phase sollen staatliche Förderungen insbesondere für neuartige Senken weitgehend auslaufen, um zu marktbasierten, verursachergerechten Finanzierungsmodellen überzugehen. Natürliche Senken sollen durch ergebnisbasierte Anreize weiter ausgebaut werden. Zudem soll die angestrebte netto-negative Phase nach 2050 vorbereitet werden.

Schwerpunkte in Phase 3

- Vollständige Integration permanenter technischer Senken in den EU-ETS
- Förderung für neuartige Entnahmemethoden besteht primär aus CCfDs, wird aber allmählich zurückgefahren
- Einführung von Entnahmeverpflichtungen wie Carbon Takeback Obligations oder Clean-up-Zertifikaten für bestimmte Emittenten, um netto-negative Emissionen vorzubereiten
- Natürliche Senken werden weitgehend ergebnisbasiert gefördert.
- Ermöglichung des internationalen Handels, etwa über Artikel 6 ÜvP. Hierfür sind frühzeitig geeignete Standards und Regelwerke zu entwickeln, aber auch Limitationen, um das nationale Ambitionsniveau nicht zu verringern.
- Setzung von Zielen für netto-negative Emissionen für die Jahre nach 2050

7.4.4 Phase 4: Netto-Negativität

Ausgangssituation

Ein funktionsfähiger Entnahmesektor basierend auf der Nachfrage im EU-ETS und mit ergänzender freiwilliger Nachfrage ist etabliert. So kann die THG-Neutralität in den ETS-Sektoren erreicht werden.

Ziele der Phase 4

In Phase 4 liegt der Fokus auf der Erreichung und Finanzierung netto-negativer Emissionen. Dies erfordert verbindliche Vorgaben und Verpflichtungen sowie stabile langfristige Finanzierungsstrukturen. Dabei gilt: Je früher diese Instrumente eingeführt werden, desto langfristiger ist die Planungssicherheit und je breiter der mögliche Kreis an Emittenten, die zur Verantwortung gezogen werden können.

Schwerpunkte in Phase 4

- Langfristige Integration und Konkretisierung netto-negativer Zwischenziele in nationale und europäische Klimastrategien
- Durchsetzung einer Entnahmeverpflichtung im Rahmen von Clean-up-Zertifikaten bzw. Carbon Removal Obligations für Unternehmen, die noch Restemissionen emittieren
- Weiterführung des Ausbaus natürlicher Senken, unter anderem durch Entlohnung für temporäre Entnahmen bei entsprechender Versicherung gegen Wiederfreisetzung
- Integration internationaler Märkte und Finanzierung von CO_2-Entnahmen im Ausland durch Mechanismen wie Artikel 6 ÜvP
- Ergänzende staatliche Ankäufe von CO_2-Entnahmen, die die Restemissionen der öffentlichen Verwaltung überschreiten und so Netto-Negativität anreizen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematische Darstellung der Gruppierung von CO_2-Entnahmemethoden (für die Zuordnung der einzelnen Methoden siehe Kapitel 4.3.3) (eigene Abbildung) 26

Abbildung 2 Übersicht über die verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden der LNe (eigene Abbildung) 31

Abbildung 3 Übersicht Kriterienset (eigene Abbildung) 32

Abbildung 4 THG-Emissionen nach Sektoren und Negativemissionen bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024) Die graue Linie zeigt die Gesamtemissionen (netto) nach Abzug der Negativemissionen an. 92

Abbildung 5 THG-Emissionsbilanz im LULUCF-Sektor bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024) 94

Abbildung 6 Modellannahmen für LULUCF und Entwicklung der Flächenkulisse für LNe (Basis) bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024) 95

Abbildung 7 Energetisch nutzbare Biomasse (Angebot und Nachfrage, exklusive Exporte) für LNe95 bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024) 96

Abbildung 8 CDR-Portfolios nach Optionen für das Jahr 2045 (Prognos/Öko-Institut 2024) 98

Abbildung 9 Ausgewählte CDR-Portfolios nach Optionen für das Jahr 2060 (Prognos/Öko-Institut, 2024) 100

Abbildung 10 Schematisches Phasenmodell für die Entwicklung von Anreizinstrumenten für die CO_2-Entnahme 183

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht möglicher BECCS-Anwendungen 63

Tabelle 2 Analysierte Szenarien und Sensitivitäten (Prognos/Öko-Institut, 2024) 91

Tabelle 3 Mittlere spezifische Kosten der Entnahmemethoden bis 2045 (Prognos/Öko-Institut, 2024) 99

Tabelle 4 Überblick über die deutsche Klimazielarchitektur im KSG 113

Tabelle 5 Berücksichtigung der verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden in den IPCC-Richtlinien 116

Tabelle 6 IPCC-Zuordnung der verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden zu den UNFCCC-geeinten CRT-Kategorien 118

Tabelle 7 Zuordnung der verschiedenen CO_2-Entnahmemethoden zu §§ 3a, 3b KSG 120

Tabelle 8 Übersicht über Methodiken zur Baseline-Bestimmung 133

Tabelle 9 Mögliche Dauerhaftigkeitsmechanismen für zertifizierte CO_2 Entnahmeprojekte 136

Tabelle 10 Versicherungsmethoden gegen Wiederfreisetzung 137

Tabelle 11 Neun mögliche Anreizinstrumente für eine Verbesserung des Marktrahmens für CO_2-Entnahmen 146

Tabelle 12 Kriterien der Bewertung von Anreizinstrumenten 146

Tabelle 13 Bewertung Staatliche Zertifizierungsstandards 148

Tabelle 14 Bewertung Reporting-Vorgaben, Labels, Kompetenz- und Kapazitätsaufbau 149

Tabelle 15 Bewertung Forschungs- und Entwicklungsförderung 153

Tabelle 16 Bewertung Klimaneutrale öffentliche Verwaltung und Beschaffung 155

Tabelle 17 Bewertung Ergebnisbasierte Förderung 158

Tabelle 18 Bewertung Aktivitätsbasierte Förderung 163

Tabelle 19 Bewertung Öffentlich-private Vereinbarungen / Freiwillige Abkommen 165

Tabelle 20 Bewertung Integration in den EU-ETS 169

Tabelle 21 Bewertung Entnahmeverpflichtungen 172

Literaturverzeichnis

Adam, M., Kleinen, T., May, M., & Rehfeld, K. (2025). *Land conversions not climate effects are the dominant indirect consequence of sun-driven CO 2 capture, conversion, and sequestration*. doi:10.1088/1748-9326/ada972

Agora Energiewende; Agora Verkehrswende. (2018). *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf

Agora Think Tanks; Prognos AG; Öko-Institut e.V.; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Universität Kassel. (2024). *Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung – Vertiefung*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-szenariopfade

agrarheute. (2023). *Agroforst auf Pachtflächen: So kann es gelingen*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://www.agrarheute.com/management/betriebsfuehrung/agroforst-pachtflaechen-so-gelingen-612694?utm_source=chatgpt.com

Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, U., . . . Tokos, K. (2009). Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. (Annual Review of Earth and Planetary Sciences), 37*(1), 117–134.

Archer, D., Kheshgi, H., & Maier-Reimer, E. (1997). Multiple timescales for neutralization of fossil fuel CO2. *Geophysical Research Letters, 24*(4), 405–408.

Arcusa, S., & Hagood, E. (2025). Definitions and mechanisms for managing durability and reversals in standards and procurers of carbon dioxide removal. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 30*(1).

Arlinghaus, J., Feng, S., Stemmler, J., Fankhauser, S., & Smith, S. (2025). A taxonomy of policies to support permanent carbon dioxide removal (Working Paper). *Smith School of Enterprise and the Environment. University of Oxford*.

Assous, A., Woods, D., & Wikström, E. (2024). *In or Out: Whats best for carbon removals and the EU ETS*. Belgien.

Bach, L. T., Tamsitt, V., Gower, J., Hurd, C. L., Raven, J. A., & Boyd, P. W. (2021). *Testing the climate intervention potential of ocean afforestation using the Great Atlantic Sargassum Belt*. doi:10.1038/s41467-021-22837-2

Bach, L. T., Vaughan, N. E., Law, C. S., & Williamson, P. (2024). *Implementation of marine CO2 removal for climate mitigation: The challenges of additionality, predictability, and governability*. doi:https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00034

Badgley, G., Freeman, J., Hamman, J. J., Haya, B., Trugman, A. T., Anderegg, W. R., & Cullenward, D. (2022). Systematic over-crediting in California's forest carbon offsets program. *Global change biology, 28*(4), 1433–1445.

Baker, P., Minzlaff, U., Schoenle, A., Schwabe, E., Hohlfeld, M., Jeuck, A., & Brenke, N. (2018). *Potential contribution of surface-dwelling Sargassum algae to deep-sea ecosystems in the southern North Atlantic*. doi:https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.10.002

Bandaranayake, W. (1998). *Traditional and medicinal uses of mangroves*. Von https://link.springer.com/article/10.1023/A:1009988607044 abgerufen

Bär, H., & Collmer, F. (2024). *Planen ist Silber, Ausgeben ist Gold: Warum weniger Geld für Klimaschutz fließt, als wir denken*. Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft. Abgerufen am 05. 06 2025 von https://foes.de/publikationen/2024/FOES_2024_KTF_Soll-Ist_Analyse.pdf

Bauhus, J., Bodirsky, B. L., Gawel, E., Hartmann, J., Havermann, F., Kuse, K., . . . von der Assen, N. (2025). *CO2-Entnahmemethoden an Land – Überblick III: Mit der Kraft der Pflanzen: Biologische Verfahren zur CO2-Entnahme aus der Atmosphäre*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://zenodo.org/records/14289573

Baumann, M., Taucher, J., Paul, A. J., Heinemann, M., Vanharanta, M., Bach, L. T., . . . Riebesell, U. (2021). *Effect of Intensity and Mode of Artificial Upwelling on Particle Flux and Carbon Export*. doi:https://doi.org/10.3389/fmars.2021.742142

Betz, R., Michaelowa, A., Castro, P., Kotsch, R., Mehling, M., Michaelowa, K., & Baranzini, A. (2022). *The Carbon Market Challenge*. Cambridge University Press.

BGR. (2023). *Deutschland – Rohstoffsituation*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2023.pdf;jsessionid=88ED8B5424FA1FACF4D80BF618ED1A4A.internet952?__blob=publicationFile&v=8

BMEL. (2021). *Ackerbaustrategie 2035*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/ackerbau/ackerbaustrategie.html

BMEL. (2022). *Ziele und Prioritäten der Entwicklung des ländlichen Raums 2014 – 2022*. Abgerufen am 05. 06 2025 von https://www.bmel.de/DE/themen/laendliche-regionen/foerderung-des-laendlichen-raumes/eu-foerderung/eler-2014-2020.html

BMEL. (2023). *Biokohle in der Pflanzenproduktion – Nutzen, Grenzen und Zielkonflikte*. .

BMEL. (2024a). *Bio-Strategie 2030 – Nationale Strategie für 30 Prozent ökologische Land- und Lebensmittelwirtschaft bis 2030*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/oekologischer-landbau/bio-strategie-2030.html

BMEL. (2024b). *Rahmenplan der Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" 2024-2027*. Von https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/gak-rahmenplan-2024-2027.html abgerufen

BMEL. (2024c). *Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur*.

BMEL. (2025). *Förderung*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/forst-foerderung.html

BMUV. (2024). *ANK schützt unsere natürlichen Lebensgrundlagen und stärkt den Klimaschutz*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://www.bmuv.de/pressemitteilung/ank-schuetzt-unsere-natuerlichen-lebensgrundlagen-und-staerkt-den-klimaschutz

BMWK. (2024). *Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe). Eckpunkte*.

Bodirsky, B. L., Gawel, E., Hartmann, J., Havermann, F., Kuse, K., May, M., . . . Rehfeld, K. (2025). *CO2-Entnahmemethoden an Land – Überblick I: Die Kohlenstoffspeicherung unserer Böden steigern*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://zenodo.org/records/14918782

Böhm, C., Tsonkova, P., Mohr, T., & al., e. (2020). *Agroforstwirtschaft als Agrarumwelt- und Klimamaßnahme. Konzept zur Förderung von Agroforstflächen als Agrarumweltund Klimamaßnahme (AUKM) im Rahmen des Kulturlandschaftsprogramms (KULAP) des Landes Brandenburg*.

BonaRes. (2020). *O2-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen*. doi:https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn062163.pdf

Borchers, M., Förster, J., Thrän, D., Beck, S., Thoni, T., Korte, K., . . . Schaller, R. (2024). A Comprehensive Assessment of Carbon Dioxide Removal Options for Germany. *Earth's Future, 12*(5). doi:https://doi.org/10.1029/2023EF003986

Borchers, M., Thrän, D., Chi, Y., Dahmen, N., Dittmeyer, R., Dolch, T., . . . Reusch, T. B. (2022). *Scoping carbon dioxide removal options for Germany–What is their potential contribution to Net-Zero CO2?* Frontiers in Climate.

Buck, B. H., Troell, M. F., Krause, G., Angel, D. L., Grote, B., & Chopin, T. (2018). *State of the Art and Challenges for Offshore Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA)*. doi:https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00165

Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. (2024). *Was bringen die Ökoregelungen im Einzelnen?* Abgerufen am 05. 06 2025 von https://www.praxis-agrar.de/betrieb/recht/gap-reform-ab-2023/gap-2023-was-sind-die-grundlagen/was-bringen-die-oekoregelungen-im-einzelnen?

Burke, J., & Schenuit, F. (2023). Governing permanence of Carbon Dioxide Removal: a typology of policy measures. (CO2RE - The Greenhouse Gas Removal Hub, Hrsg.)

BV Kalk. (2024). *Klimaneutraler Kalk unsere Roadmap 2045*. Abgerufen am 07. 02 2025 von file://vmfile22.dena.de/Home/LFLOEER/Downloads/Kalkindustrie_Roadmap_Booklet.pdf

Camarena-Gómez, M. T., Lähteenmäki-Uutela, A., & Spilling, K. (2022). *Macroalgae production in Northern Europe: Business and government perspectives on how to regulate a novel blue bioeconomy*. doi:https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738434

Cames, M., Harthan, R. O., Füssler, J., Lazarus, M., Lee, C. M., Erickson, P., & Spalding-Fecher, R. (2016). *How additional is the Clean Development Mechanism?* Berlin: Öko-Institut.

Cappai, G., Cara, S., Muntoni, A., & Piredda, M. (2012). *Application of accelerated carbonation on MSW combustion APC residues for metal immobilization and CO2 sequestration*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.013

Carbon Herald. (2025). *Stockholm Exergi's BECCS Project Wins Over $1.8B In Government Support*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://carbonherald.com/stockholm-exergis-beccs-project-wins-over-1-8b-in-government-support/

Carbon Recycling. (2025). *GLOBAL PROJECTS*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://carbonrecycling.com/projects

Castro, E., Pinedo, J., Marrugo, J., & Leon, I. (2022). *Retention and vertical distribution of heavy metals in mangrove sediments of the protected area swamp of Mallorquin, Colombian Caribbean*. doi:https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.102072

Cavanagh, A., & Lockwood, T. (2024). *Carbon Capture & Storage 2030: As the market takes shape, can Europe's CO2 storage projects meet growing demand?* doi:https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5067953

CDRmare. (2024). *Gezielte Kohlendioxid-Entnahme - Welche Möglichkeiten meeresbasierte Verfahren bieten und wie diese erforscht werden*. Abgerufen am 05. 06 2025 von https://cdrmare.de/wp-content/uploads/2024/02/CDRmare_broschuere_240208V2_WEB.pdf

CDRterra. (2024). *Die Bedeutung einer gezielten CO2-Entnahme für die Zukunft des Europäischen Emissionshandelssystems (ETS)*.

CDU, CSU, & SPD. (2025). *Verantwortung für Deutschland. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD*. Abgerufen am 14. August 2025 von https://www.koalitionsvertrag2025.de/sites/www.koalitionsvertrag2025.de/files/koav_2025.pdf

CO2BioClean. (2025). *CO2Bioclean*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://co2bioclean.com/

Cuba, D., Luzon-Guardia, K., Cevallos, B., Ramos-Larico, S., Neira, E., Pons, A., & Avila-Peltroche, J. (2022). *Ecosystem Services Provided by Kelp Forests of the Humboldt Current System: A Comprehensive Review*. Von https://doi.org/10.3390/coasts2040013 abgerufen

Danish Energy Agency. (2024). *Technology Data for Carbon Capture and Storage*. Abgerufen am 02. 01 2025 von https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-carbon-capture-transport-and-storage

DeFAF. (2023). *Themenblatt Nr. 3: Agroforstsysteme in der GAP ab 2023 - ein Überblick*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://agroforst-info.de/wp-content/uploads/2024/02/Themenblatt_3-2.Auflage-Web.pdf

DeFAF. (2024). *Agroforst Landkarte*. Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF) e.V. Abgerufen am 14. 03 2025 von https://agroforst-info.de/agroforst-landkarte/

DeFAF. (2025). *Agroforst Landkarte*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://agroforst-info.de/agroforst-landkarte/

DeFaF. (2025a). *Themenblatt Nr. 10: Klimawirksamkeit von Agroforstsystemen.* Abgerufen am 02. April 2025 von https://agroforst-info.de/wp-content/uploads/2025/05/Themenblatt_Nr.10_Web.pdf

Deutz, S., & Bardow, A. (2021). Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. *Nature Energy, 6*(2), S. 203–213.

Edenhofer, O., Eggers, J., Fuss, S., Kalkuhl, M., Merfort, A., Minx, J., & Strefler, J. (2021). Wissensstand zu CO2-Entnahmen.

Edenhofer, O., Franks, M., Kalkuhl, M., & Runge-Metzger, A. (2023). *On the Governance of Carbon Dioxide Removal – A Public Economics Perspective*. München.

Edwards, D. P., Lim, F., James, R. H., Pearce, C. R., Scholes, J., Freckelton, R. P., & Beerling, D. J. (2017). *Climate change mitigation: potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture.* doi:10.1098/rsbl.2016.0715

Eger, A. M., Marzinelli, E. M., Beas-Luna, R., Blain, C. O., Blamey, L. K., & Jarrett, E. (2023). *The value of ecosystem services in global marine kelp forests.* doi:https://doi.org/10.1038/s41467-023-37385-0

Eisaman, M. D., Geilert, S., Renforth, P., Bastianini, L., Campbell, J., Dale, A. W., . . . Rønning, J. (2023). *Assessing the technical aspects of ocean-alkalinity-enhancement approaches.* doi:https://doi.org/10.5194/sp-2-oae2023-3-2023

Eke, V., Sahu, T., Ghuman, K. K., Freire-Gormaly, M., & O'Brien, P. G. (2025). A comprehensive review of life cycle assessments of direct air capture and carbon dioxide storage. *Sustainable Production and Consumption*, 217-241. doi:https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.02.017

El-Hassan, H. (2020). *Accelerated Carbonation Curing as a Means of Reducing Carbon Dioxide Emissions.* doi:10.5772/intechopen.93929

EMB. (2023). *Blue Carbon Challenges and opportunities to mitigate the climate and biodiveristy crisis.* Von https://marineboard.eu/publications/blue-carbon abgerufen

Erans, M., Sanz-Pérez, E. S., Hanak, D. P., Clulow, Z., Reiner, D. M., & Mutch, G. A. (2022). Direct air capture: process technology, techno-economic and socio-political challenges. *Energy & Environmental Science, 15*(4), S. 1360–1405.

EU Recycling Magazin. (2025). *Feess bindet CO2 in rezykliertem Bauschutt*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://eu-recycling.com/Archive/46118

EU-Kommission. (2023). *Submission by Spain and the European Commission on behalf of the European Union and its Member States.* Abgerufen am 14. August 2025 von https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-10/ES-2023-10-17%20EU%20submission%20NDC%20update.pdf

Europäische Kommission. (2025). *Carbon Removals and Carbon Farming*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-removals-and-carbon-farming_en

European Biochar Industry. (2023). *European Biochar Market Report 2023 × 2024* .

European Scientific Advisory Board on Climate Change. (2025). Scaling up carbon dioxide removals.

Fajarday, M., & Mac Dowell, N. (2017). *Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions?*

Fallasch, F., Böttcher, H., Schneider, L., Herrmann, H., Jörß, W., Siemons, A., & Flohr Reija, M. (2024). *The EU Carbon Removal Certification Framework: Options for using certified removal units and funding mitigation activities*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Ferderer, A., Schulz, K. G., Riebesell, U., Baker, K. G., Chase, Z., & Bach, L. T. (2024). *Investigating the effect of silicate- and calcium-based ocean alkalinity enhancement on diatom silicification*. doi:https://doi.org/10.5194/bg-21-2777-2024

FNR. (2024). *Doppelter Förderaufruf zur Holzbauinitiative: Laubholz im Holzbau und Sanieren mit Holz*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://foerderung.fnr.de/service/presse/doppelter-foerderaufruf-zur-holzbauinitiative-laubholz-im-holzbau-und-sanieren-mit-holz

Förster, J., Beck, S., Borchers, M., Gawel, E., Korte, K., Markus, T., . . . Thrän, D. (2022). *Framework for Assessing the Feasibility of Carbon Dioxide Removal Options Within the National Context of Germany*. doi:https://doi.org/10.3389/fclim.2022.758628

Foteinis, S., Campbell, J. S., & Renforth, P. (2022). *Life Cycle Assessment of Coastal Enhanced Weathering for Carbon Dioxide Removal from Air*. doi:10.1021/acs.est.2c08633

Fraunhofer ISE. (2023). *Entwicklung einer Pilotanlage zur Herstellung von nachhaltigen synthetischen Flugkraftstoffen auf Basis von Methanol*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2023/entwicklung-einer-pilotanlage-zur-herstellung-von-nachhaltigen-synthetischen-flugkraftstoffen-auf-basis-von-methanol.html

Fuhr, M., Dale, A. W., Wallmann, K., Bährle, R., Kalaprakkal, H. T., Sommer, S., . . . Geilert, S. (2025). *Calcite is an efficient and low-cost material to enhance benthic weathering in shelf sediments of the Baltic Sea*. doi:https://doi.org/10.1038/s43247-025-02079-6

Fürst, K., & Strunge, T. (2024). *Perception of carbon capture and utilization - a framing analysis of German-speaking media*. doi:https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1424865

Fuss, S., Gruner, F., Hilaire, J., Kalkuhl, M., Knapp, J., Lamb, W., . . . Strefler, J. (2021). CO2-Entnahmen: Notwendigkeit und Regulierungsoptionen. (WPKS, Hrsg.) 65.

GCCSI. (2025). *Global CCS Institute*. Abgerufen am 25. 08 2025 von https://www.globalccsinstitute.com/news-media/latest-news/u-s-preserves-and-increases-45q-credit-in-one-big-beautiful-bill-act/

GESAMP. (2019). *High Level Review of a Wide Range of Proposed Marine Geoengineering Techniques*. Von http://www.gesamp.org/publications/high-level-review-of-a-wide-range-of-proposed-marine-geoengineering-techniques abgerufen

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). *Production, use, and fate of all plastics ever made*. doi:https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/sciadv.1700782

Goldenberg, S. U., Taucher, J., Fernandez-Mendez, M., Ludwig, A., Arstegui, J., Baumann, M., . . . Riebesell, U. (2022). *Nutrient composition (Si:N) as driver of plankton communities during artificial upwelling*. doi:https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1015188

Goulouti, K., Favre, D., Giorgi, M., & Padey, P. (2021). *Dataset of service life data for 100 building elements and technical systems including their descriptive statistics and fitting to lognormal distribution*. doi:10.1016/j.dib.2021.107062

Gouvêa, L. P., Assis, J., Gurgel, C. F., Serrao, E. A., Silveria, T. C., Santos, R., . . . Horta, P. A. (2020). *Golden carbon of Sargassum forests revealed as an opportunity for climate change mitigation*. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138745

Greifswald Moor Centrum. (2022). *Herleitung von Förderpauschalen zur Umsetzung von Moorklimaschutzprojekten*. Selbstverlag. Von https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2022-01_Wichmann%20et%20al_Herleitung%20von%20F%C3%B6rderpauschalen%20zur%20Umsetzung%20von%20Moorklimaschutzprojekten.pdf abgerufen

Heinrich-Böll-Stiftung. (2023). *Mooratlas*.

Herhold, P., Pütz, J., Mistry, K., Bierganz, R., Spiekermann, P., & Maier, L. (2024). *Europe and Germany's Role in Catalyzing a Trillion-Euro Industry*. BCG, DVNE.

Heß, D., Klumpp, M., & Dittmeyer, R. (2020). Nutzung von CO2 aus Luft als Rohstoff für synthethische Kraftstoffe und Chemikalien.

Hilmi, N., Chami, R., Sutherland, M. D., Hall-Spencer, J. M., Lebleu, L., Benitez, M. B., & Levin, L. A. (2021). *The Role of Blue Carbon in Climate Change Mitigation and Carbon Stock Conservation*. Von https://doi.org/10.3389/fclim.2021.710546 abgerufen

Honegger, M., Baatz, C., Eberenz, S., Holland-Cunz, A., Michaelowa, A., Pokorny, B., . . . Winkler, M. (2022). The ABC of Governance Principles for Carbon Dioxide Removal Policy.

Honeywell UOP. (2019). *UOP Advanced Methanol to Olefines (MTO) Process*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://uop.honeywell.com/content/dam/uop/en-us/documents/industry-solutions/petrochemicals/olefins/uop-advanced-methanol-to-olefins-process-datasheet.pdf

IEA. (2025). *Direct Air Capture*. Abgerufen am 18. 2 2025 von https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture

IEA Bioenergy. (2018). *Bio-CCS and Bio-CCU Climate change mitigation and extended use of biomass raw material*. Abgerufen am 05. 06 2025 von https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/06/IEA-Bioenergy-2-page-Summary-Bio_CCUS_FINAL_29.6.2018.pdf

IPCC. (2005). *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*.

IPCC. (2023). *Glossary: Sixth Assessment Report*. Geneva: IPCC.

IPCC. (2025). *Scoping of the Metholodlogy Report on Carbon Dioxide Removal Technologies, Carbon Capture Utilization and Storage*. Abgerufen am 19. August 2025 von

https://apps.ipcc.ch/eventmanager/documents/88/270120251125-Doc.%206%20-%20Outline%20Method_Report_CDR.pdf?utm_medium=email&utm_source=sendpress&utm_campaign

Jürchott, M., A., O., & Koeve, W. (2023). *Artificial Upwelling—A Refined Narrative*. Von https://doi.org/10.1029/2022GL101870 abgerufen

Jürchott, M., Koeve, W., & Oschlies, A. (2024). *The response of the ocean carbon cycle to artificial upwelling, ocean iron fertilization and the combination of both*. doi:10.1088/1748-9326/ad858d

Kalhori, A., Wille, C., Gottschalk, P., Li, Z., Hashemi, J., Kemper, K., & Sachs, T. (2022). *Long-term flux measurements suggest dynamic emission factors are needed for rewetted peatlands*. doi:https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3241711/v1

Karsch, P., & van Baren, S. (2024). Forestry – Technical Assessment Paper.

Kayalvizhi, K., & Kathiresan, K. (2019). *Microbes from wastewater treated mangrove soil and their heavy metal accumulation and Zn solubilization*. doi:https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101379

Keller, D. P., Feng, E. Y., & Oschlies, A. (2014). *Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide-emission scenario*. doi:https://doi.org/10.1038/ncomms4304

Keng, F. S.-L., Phang, S.-M., Rahmann, N. A., Leedham, E. C., Hughes, C., Robinson, A. D., . . . Sturges, W. T. (2013). *Volatile halocarbon emissions by three tropical brown seaweeds under different irradiances*. Von https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-013-9990-x abgerufen

Koplin, J., Corina, P., Bischof, K., Böttcher, M. E., Kuhn, A., Logemann, E., . . . Mueller, P. (2024). *Blue Carbon Potential in Germany: Status and Future Development*. doi:10.2139/ssrn.5016399

Kowalczyk, K. A., Amann, T., Strefler, J., Vorrath, M.-E., Hartmann, J., De Marco, S., . . . Kriegler, E. (2024). *Marine carbon dioxide removal by alkalinization should no longer be overlooked*. Environ. Res. Lett. 19 074033. doi:10.1088/1748-9326/ad5192

Koweek, D. A. (2022). *Expected Limits on the Potential for Carbon Dioxide Removal From Artificial Upwelling*. Von https://doi.org/10.3389/fmars.2022.841894 abgerufen

Krey, M., Hansen, M. B., & Ulrik, J. (2025). *The voluntary carbon market. The role of the voluntary carbon market in driving the business case for CCS*. Abgerufen am 27. 03 2025 von https://implementconsultinggroup.com/article/the-voluntary-carbon-market

Kwiatkowski, L., Ricke, K. L., & Caldeira, K. (2015). *Atmospheric consequences of disruption of the ocean thermocline*. doi:10.1088/1748-9326/10/3/034016

La Hoz Theuer, S., Doda, B., William, A., & Kellner, K. (2024). Emissions trading systems: Trading removals?

Lemoine, D. (2023). Informationally Efficient Climate Policy: Designing Markets to Measure and Price Externalities. Cambridge, MA.

Lenk, C., & al., e. (2024). *Biochar carbon removal from residues in Germany—assessment from environmental and economic perspectives*.

Lesschen, J. P., & Karsch, P. (2023). Review of certification methodologies for carbon farming – survey results and first assessment of coverage of the QU.A.L.ITY criteria.

Lessmann, K., Gruner, F., Kalkuhl, M., & Edenhofer, O. (2024). *Emissions Trading with Clean-Up Certificates: Deterring Mitigation or Increasing Ambition?*

Leuna100. (2025). *Das Projekt Leuna100 schreibt Industriegeschichte*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.leuna100.de/de

Lhoist. (2025). *co2ncreat*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.lhoist.com/en/co2ncreat

Löschke, S., Oschlies, A., Boersma, M., Fuhr, M., Hauck, J., Moosdorf, N., . . . Voss, R. (2025). CDRmare Insights: Neues Wissen zur CO2-Entnahme durch die Erhöhung der Alkalinität des Meeres: Die sieben wichtigsten Erkenntnisse aus der RETAKE-Forschung. 1-12.

Martens, H. R., Laage, K., Eickmanns, M., Drexler, A., Heinsohn, V., Wegner, N., . . . Tanneberger, F. (2023). *Paludiculture can support biodiversity conservation in rewetted fen peatlands*. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-023-44481-0

Martin, K. R., Nickoloff, A., Moffat, L., Weaver, A. J., & Eby, M. (2025). Assessing the effectiveness of ocean alkalinity enhancement on carbon sequestration and ocean acidification. *FACETS*, 1-8.

Martin, L., Taylor, M., Huston, G., Goodwin, D., Schell, J., & Siuda, A. (2021). *Pelagic Sargassum morphotypes support different rafting motile epifauna communities*. doi:10.1007/s00227-021-03910-2

Matthews, H. D., Zickfeld, K., Koch, A., & Luers, A. (2023). Accounting for the climate benefit of temporary carbon storage in nature. *Nature communications, 14*(1), S. 5485.

May, M., & Rehfeld, K. (2022). *Negative Emissions as the New Frontier ofPhotoelectrochemical CO2 Reduction*. Von https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aenm.202103801 abgerufen

McDonald, H., Bey, N., Duin, L., & al., e. (2021). *Certification of Carbon Removals: Part 2: A review of carbon removal certification* . Vienna: Umweltbundesamt.

McDonald, H., Siemons, A., & Scheider, L. (2022). *Finanzierung einer klimafreundlichen Bodennutzung – Zentrale Aspekte.* Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Mengis, N., Allanah, P., & Fernández-Méndez, M. (2023). *Counting (on) blue carbon—Challenges and ways forward for carbon accounting of ecosystem-based carbon removal in marine environments*. doi:https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000148

Merner, L. D. (2025). *Delays and Disagreements: The IPCC's Struggle to Stay on Course*. Abgerufen am 24. 04 2025 von https://blog.ucs.org/delta-merner/delays-and-disagreements-the-ipccs-struggle-to-stay-on-course/

Mithoo-Singh, P. K., Keng, F. S.-L., Phang, S.-M., Leedham Elvidge, E. C., Sturges, W. T., Malin, G., & Rahman, N. A. (2017). *Halocarbon emissions by selected tropical seaweeds: species-specific and compound-specific responses under changing pH*. Von https://peerj.com/articles/2918/ abgerufen

Moosdorf, N., Renforth, P., & Hartmann, J. (2014). *Carbon Dioxide Efficiency of Terrestrial Enhanced Weathering*. doi:10.1021/es4052022

MPG. (2024). *Climate Impact of Carbon Crediting Projects Is Substantially Overestimated*. Abgerufen am 27. 03 2025 von https://www.mpg.de/23737687/climate-impact-of-carbon-crediting-projects-substantially-overestimated

neustark. (2023). *Neustark eröffnet die erste kommerzielle Anlage für permanente CO_2-Speicherung in der Europäischen Union*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.neustark.com/de/news/neustark-er%C3%B6ffnet-die-erste-kommerzielle-anlage-f%C3%BCr-permanente-co2-speicherung-in-der-europ%C3%A4ischen-union

Nolan, C., van Paasschen, C. A., & Field, C. B. (2024). Additionality, baselines, and the proper accounting for land-based climate change mitigation efforts. *Oxford Open Climate Change, 4*(1).

Öko-Institut. (2024). *Entwicklungen der CO2-Speicherleistung des Waldes frühzeitiger abschätzen – Einordung der Ergebnisse der Bundeswaldinventur*. Abgerufen am 27. 03 2025 von https://www.oeko.de/blog/entwicklungen-der-co2-speicherleistung-des-waldes-fruehzeitiger-abschaetzen-einordung-der-ergebnisse-der-bundeswaldinventur/

Oljaire, A. A. (2013). *A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO2*. doi:https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.013

Ortiz, J., Aristegui, J., Hernández-Hernández, N., Fernández-Méndez, M., & Riebesell, U. (2022). *Oligotrophic Phytoplankton Community Effectively Adjusts to Artificial Upwelling Regardless of Intensity, but Differently Among Upwelling Modes*. Von https://doi.org/10.3389/fmars.2022.880550 abgerufen

Oschlies, A., Bach, L. T., Fennel, K., Gattuso, J.-P., & Mengis, N. (2025). *Perspectives and challenges of marine carbon dioxide removal*. Front. Clim. doi:https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1506181

Oschlies, A., Pahlow, M., Yool, A., & Matear, R. J. (2010). *Climate engineering by artificial ocean upwelling: Channeling the sorcerer's apprentice*. Von https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/3029/1/1019_Oschlies_2010_ClimateEngineeringByArtificialOcean_Artzeit_pubid13251.pdf abgerufen

Oschlies, A., Rehder, G., Kopf, A., Riebesell, U., Wallmann, K., & Zimmer, M. (2022). *Minerale für eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme des Ozeans*. GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung.

Pfleger, M.-P., Radl, E., & Vill, M. (2023). *Untersuchungen zum CO2-Speicherpotenzial von rezyklierten Gesteinskörnungen und Zementproben unter Zwangskarbonatisierung*. Von https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/best.202300006 abgerufen

Planeteers. (2025). *Solution for Point Sources*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://planeteers.de/solutions/point-sources/

Pongratz, J., Geneuss, K., Hoppe, I., & Miller, M. (2024). *CDR - weil Emissionsreduktion alleine nicht genügt, um die Klimaziele zu erreichen*. München: CDRterra.

Poralla, M., Honegger, M., & Ahonen, H.-M. (2021). *'Sewage Treatment for the Skies': Mobilising carbon dioxide removal through public policies*. London, UK and Freiburg i.B., Germany: NET-Rapido Consortium and Perspectives .

ptj. (2025). *Nationale Bioökonomiestrategie*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://www.ptj.de/biooekonomie

Reise, J., Hennenberg, K., Benndorf, A., & Böttcher, H. (2024). *Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor: Potenziale und Sensitivitäten*. Umweltbundesamt.

Renewable Carbon Initiative. (2023). *Making a case for Carbon Capture and Utilisation (CCU) – It is much more than just a carbon removal technology*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://renewable-carbon.eu/publications/product/making-a-case-for-carbon-capture-and-utilisation-ccu-it-is-much-more-than-just-a-carbon-removal-technology/

Renforth, P. (2019). *The negative emission potential of alkaline materials*. Nat. Commun. 10:1401. doi:10.1038/s41467-019-09475-5

Renforth, P., & Henderson, G. (2017). *Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration*. doi: https://doi.org/10.1002/2016RG000533

Rotteveel, L., Heubach, F., & Sterling, S. M. (2022). *The Surface Water Chemistry (SWatCh) database: a standardized global database of water chemistry to facilitate large-sample hydrological research*. Earth System Science Data 14, 4667–4680. . doi:https://doi.org/10.5194/essd-14-4667-2022

Rupp, J., & Bluhm, H. (2023). *Pflanzenkohle: Kohlenstoffbindung, Bodenverbesserung und Energieversorgung zusammendenken* .

Schenuit, F., & Treß, D. (2025). Eine "Kurzfriststrategie Negativemissionen": Politikoptionen für den Hochlauf der CO2-Entnahme. *SWP-Aktuell*(10).

Schneider, L., & Fallasch, F. (2024). FAQ on carbon credits and climate mitigation. Öko-Institut.

Schwenk. (2023). *Der Weg zur Klimaneutralität von Zement und Beton*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.schwenk.de/der-weg-zur-klimaneutralitaet-von-zement-und-beton/

Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., . . . Yongsung, C. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. *Nature Climate Change, 6*(1), S. 42–50.

Smith, S. M., Geden, O., Minx, J. C., & Nemet, G. F. (2023). *The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition*. doi:10.17605/OSF.IO/W3B4Z.

Smith, S., Geden, O., Gidden, M., Lamb, W., Nemet, G., Minx, J., . . . Vaughan, N. (2024). The State of Carbon Dioxide Removal - 2nd Edition. *2024*.

Spektrum. (2025). *Primärproduktion*. Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/primaerproduktion/9340

Statista. (2023). *Produktionskapazität von Methanol weltweit von 2018 bis 2023.* Abgerufen am 07. 02 2025 von https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1454582/umfrage/methanol-globale-produktionskapazitaet/

Stechemesser, A., Koch, N., Mark, E., Dilger, E., Klösel, P., Menicacci, L., . . . Wenzel, A. (2024). *Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades*.

Stoefs, W. (2024). The EU's double counting problem. (Carbon Market Watch, Hrsg.) Carbon Market Watch.

Strefler, J., Merfort, A., & Stevanovic, M. (2023). *Ariadne-Analyse: Energiewende auf Netto-Null - Passen Angebot und Nachfrage nach CO2-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen?* Potsdam: Kopernikus-Projekt Ariadne.

Sultani, D., Osorio, S., Günther, C., Pahle, M., Sievert, K., Schmidt, T., . . . Edenhofer, O. (2024). Sequencing Carbon Dioxide Removal into the EU ETS. *CESifo Working Paper*(11173).

Tanneberger, F. (2024). Experteninterview im Rahmen der Methodenbewertung der LNe.

Theuerkauff, D., Rivera-Ingraham, G. A., Lambert, S. M., Lejeune, M., Lignot, J.-H., & Sucre, E. (2020). *Wastewater bioremediation by mangrove ecosystems.* doi:10.1016/j.aquatox.2019.105358

Thielges, S., Olfe-Kräutlein, B., Rees, A., Jahn, J., Sick, V., & Quitzow, R. (2022). *Committed to implementing CCU? A comparison of the policy mix in the US and the EU.* Von https://www.frontiersin.org/journals/climate/articles/10.3389/fclim.2022.943387/full abgerufen

Thrän, D., Borchers, M., Jordan, M., Lenz, V., Markus, T., Matzner, N., . . . Wollnik, R. (2024a). *BECCS - ein nachhaltiger Beitrag zur dauerhaften CO2-Entnahme in Deutschland? Diskussionspapier*.

Thrän, D., Havermann, F., Hartmann, J., Jürgen, B., Pongratz, J., Rehfeld, K., . . . Bodirsky, B. L. (2024b). *CO2-Entnahmemethoden an Land – Überblick II: Neue technische Verfahren zur CO2-Entnahme aus der Atmosphäre*. Von https://zenodo.org/records/12794918 abgerufen

Thünen-Institut. (2025). *Treibhausgasemissionen durch Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)*. Abgerufen am 27. 03 2025 von https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/treibhausgas-emissionen-lulucf

UBA. (2022). *Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie.* Abgerufen am 25. 02 2025 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2024-06-27_cc_12-2022_aktuelle_nutzung_und_foerderung_der_holzenergie.pdf.pdf

UBA. (2024). Sustainability criteria for carbon dioxide removals.

UBA. (2026). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.* Von https://www.dena.de/infocenter/marktmonitoring-bioenergie-2023/ abgerufen

Umwelt, B. f. (2025). *Bundesamt für Umwelt BAFU.* Abgerufen am 6. Mai 2025 von https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/verminderungsmassnahmen/branchenvereinbarungen/vereinbarung-kehrichtverwertungsanlagen.html

VCI, VDI. (2023). *Chemistry 4 Climate*.

vdz. (2024). *Anforderungen an eine CO2-Infrastruktur in Deutschland - Voraussetzungen für Klimaneutralität in den Sektoren Zement, Kalk und Abfallverbrennung*. Düsseldorf. Abgerufen am 02. 01 2025 von https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_CO2-Infrastruktur-Deutschland.pdf

Wallmann, K., & Löschke, S. (2024). CDRmare Insights: CO2-Speicherung tief unter der deutschen Nordsee: Die sieben wichtigsten Erkenntnisse aus der GEOSTOR-Forschung.

Wang, E., Navik, R., Miao, Y., Gao, Q., Izikowitz, D., Chen, L., & Li, J. (2024). Reviewing direct air capture startups and emerging technologies. *Cell Reports Physical Science, 5*(2), S. 101791.

WBGU. (2021). *Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration.* Abgerufen am 25. 02 2025 von https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/landwende

Weber, R. (2022). *Regulatorische Weiterentwicklung eines klimapolitischen Dilemmas: Der Einsatz von CCS und CCU als Negativemissionstechnologien.* . Die Verwalt. 55 (2), 213–248. doi:doi:10.3790/verw.55.2.219

Williamson, P., & Gattuso, J.-P. (2022). *Carbon removal using coastal blue carbon ecosystems is uncertain and unreliable, with questionable climatic cost-effectiveness*. doi:10.3389/fclim.2022.853666

Williamson, P., Wallace, D. W., Law, C. S., Boyd, P. W., Collos, Y., Croot, P., . . . Vivian, C. (2012). *Ocean fertilization for geoengineering: A review of*. Von https://cdrlaw.org/wp-content/uploads/2020/04/ocean_fertilization_for_geoengineering_a_review.pdf abgerufen

Wollnik, R., Borchers, M., Seibert, R., Abel, S., Herrmann, P., Elsasser, P., . . . Eisenschmidt, P. (2023). *Steckbriefe für biobasierte Kohlenstoffdioxidentnahme-Optionen in Deutschland*. Abgerufen am 24. 02 2025 von https://datalab.dbfz.de/bionet/home?lang=de

World Ocean Review. (2024). *Klimaretter Ozean? Wie das Meer (noch) mehr Kohlendioxid aufnehmen soll.* Abgerufen am 07. 02 2025 von https://worldoceanreview.com/de/wor-8/

Wu, S., Shao, Z., Andrew, R. M., Bing, L., Wang, J., Niu, L., . . . Fengming. (2024). *Global CO2 uptake by cement materials accounts 1930–2023*. Von https://www.nature.com/articles/s41597-024-04234-8 abgerufen

WWF. (2022). *Alles aus Holz - Rohstoff der Zukunft oder kommende Krise*. Abgerufen am 25. 02 2025 von https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Wald/WWF-Studie-Alles-aus-Holz.pdf

Y Feng, E., Keller, D., Koeve, W., & Oschlies, A. (2016). Could artificial ocean alkalinization protect tropical coral ecosystems from ocean acidification? *Environmental Research Letters*.

Yang, A. J., & Timmermanns, M.-L. (2024). *Assessing the effective settling of mineral particles in the ocean with application to ocean-based carbon-dioxide removal*. doi:https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ad2236

Yao, W., Morganti, T., Wu, J., Borchers, M., Anschütz, A.-A., Bednarz, L.-K., . . . Fink, M. (2024). *Exploring site-specific carbon dioxide removal options with storage or sequestration in the marine environment - The 10 Mt CO2 yr-1 removal challenge for Germany*. Von https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/60337/ abgerufen

Zakkour, P., & Cook, G. (2024). *Measurement, reporting and verification and accounting for carbon dioxide removal in the context of both project-based approaches and national greenhouse gas inventories*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.

Zhang, X., Gong, X., Abou-Hamad, E., Zhou, H., You, X., Gascon, J., & Chowdhury, A. D. (2024). *Selectivity Descriptors of Methanol-to-Aromatics Process over 3-Dimensional Zeolites*. doi:https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38935406/

Abkürzungen

AltholzV	Altholzverordnung
ANK	Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz
AUKM	Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BauGB	Baugesetzbuch
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BECCU	Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BIK	Bundesförderung Industrie und Klimaschutz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BLANO	Bund-Länder-Arbeitsgruppe Nord- und Ostsee
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWE	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BWaldG	Bundeswaldgesetz
BWI	Bundeswaldinventur
CBD	Convention on Biological Diversity
CCfDs	Carbon Contracts for Difference
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CDM	Clean Development Mechanism
CDR	Carbon Dioxide Removal
CMS	Carbon Management-Strategie
CRCF	Carbon Removal and Carbon Farming Regulation
CRO	Carbon Removal Obligation
CRT	Common Reporting Table
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
CTBO	Carbon Takeback Obligation
DAC	Direct Air Capture
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage

DACCU	Direct Air Carbon Capture and Utilisation
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
dena	Deutsche Energie-Agentur
DNSH	Do No Significant Harm
DüMV	Düngemittelverordnung
EBC	European Biochar Certificate
ECCB	European Carbon Central Bank
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
EEW	Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft
ELER	Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EOR	Enhanced Oil Recovery
ETS	Emissions Trading System
EU-ETS	European Union Emissions Trading System
EU-ICMS	EU Industrial Carbon Management Strategy
EW	Enhanced Weathering
F&E	Forschung und Entwicklung
FFH	Fauna-Flora-Habitat
FOAK	First-of-a-kind
FONA	Forschung für Nachhaltigkeit
GAK	Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GAPDZV	GAP-Direktzahlungen-Verordnung
GCD	Green Claims Directive
HolzSiG	Holzhandels-Sicherungs-Gesetz
HSEG	Hohe-See-Einbringungsgesetz
HVC	High Value Chemicals
ICC	Industrial Carbon Capture
ILUC	Indirect Land Use Change
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRA	Inflation Reduction Act
ITMO	Internationally Transferred Mitigation Outcome
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KSpG	Kohlendioxidspeicherungsgesetz
KSV	Klimaschutzvertrag
KTF	Klima- und Transformationsfonds
KUP	Kurzumtriebsplantagen
LIFE	L'Instrument Financier pour l'Environnement
LNe	Langfriststrategie Negativemissionen
LULUCF	Land Use, Land Use-Change and Forestry

MMV	Monitoring, Measurement and Verification
MRV	Monitoring/Measurement, Reporting and Verification
MtA	Methanol-to-Aromatics
MtO	Methanol-to-Olefines
NachbG	Nachbarschaftsgesetz
NDC	Nationally Determined Contributions
NEKP	Nationaler Energie- und Klimaplan
NMS	Nationale Meeresstrategie
NRL	Nature Restoration Law
NZIA	Net Zero Industry Act
ÖVF	Ökologische Vorrangfläche
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
RED III	Renewable Energy Directive (EU 2023/2413)
REDD+	Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation
SRM	Solar Radiation Management
STEP	Strategic Technologies for Europe Platform
TAB	Thermische Abfallbehandlung
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level
UBA	Umweltbundesamt
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
ÜvP	Übereinkommens von Paris
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
VCM	Voluntary Carbon Market
VCS	Verified Carbon Standard
WaStrG	Bundeswasserstraßengesetz
WHG	Wasserhaushaltsgeset

Glossar

Alkalinitätserhöhung im Ozean	Siehe Kapitel 4.14.
Agroforstsysteme	Siehe Kapitel 4.4.
Aufforstung	Siehe Kapitel 4.2.
Berner Konvention	Übereinkommen über die Erhaltung der europäischen wildlebenden Pflanzen und Tiere und ihrer natürlichen Lebensräume.
Beschleunigte Karbonatisierung	Siehe Kapitel 4.13.
Beschleunigte Verwitterung von Gesteinen	Siehe Kapitel 4.7.
BioCCS und BECCS – Unterschied	BioCCS/BECCS umfasst eine Vielzahl von Prozessen, bei denen biogenes CO_2 abgeschieden und gespeichert wird – unabhängig davon, ob die Biomasse zur Energieproduktion, in industriellen Prozessen oder als Material eingesetzt wird. Der Begriff BioCCS kann als weitreichender als BECCS gesehen werden, da er über Energie hinausgeht. In der Praxis werden die Begriffe jedoch zumeist synonym verwendet. Im Rahmen der LNe wird der Begriff BECCS gebraucht (siehe auch Kapitel 4.9).
Carbon Capture and Storage (CCS)	Ein Verfahren, bei dem ein Strom von CO_2 aus industriellen oder energiebezogenen Quellen abgeschieden, aufbereitet, komprimiert und zu einem Speicherort transportiert wird, um dort langfristig von der Atmosphäre isoliert zu werden (siehe auch Kapitel 3.1).
Carbon Capture and Utilisation (CCU)	Ein Verfahren, bei dem CO_2 abgeschieden und der Kohlenstoff anschließend in einem Produkt verwendet wird. Die Auswirkungen von CCU auf das Klima hängen von der Lebensdauer des Produkts, dem Produkt, das es ersetzt, und der CO_2-Quelle (fossile Brennstoffe, Biomasse oder Atmosphäre) ab.
Carbon Contracts for Difference (CCfDs) / Klimaschutzverträge	Siehe Infobox 7.
Carbon Farming	Bezeichnet im Zusammenhang mit dem CRCF Aktivitäten und Entnahmemethoden, die sich auf die Bewirtschaftung einer terrestrischen Umwelt oder einer Küstenumwelt beziehen und zur Abscheidung oder vorübergehenden Speicherung von atmosphärischem oder biogenem CO_2 in biogenen Kohlenstoffspeichern oder zur Verringerung von Bodenemissionen führen.
Carbon Shares	Siehe Infobox 9.
Carbon Takeback/ Removal Obligations	Rücknahme- oder Entnahmeverpflichtung: Verpflichtung der Produzenten fossiler Energieträger, für einen Anteil der durch ihre Produkte verursachten Emissionen eine (dauerhafte) CO_2-Speicherung bzw. CO_2-Entnahme durchzuführen oder zu finanzieren.
CO_2-Entnahme	Siehe Kapitel 3.1.

Contribution Claim	Erwerb von CO_2-Entnahmezertifikaten durch Unternehmen, die sie nicht zur Kompensation eigener Emissionen verwenden. Im Gegensatz zum Offset Claim wird hier kein Anspruch auf Klimaneutralität erhoben, sondern ein transparenter Beitrag zum Klimaschutz betont.
Dauerhaftigkeit	Physische Speicherdauer von CO_2 in einem spezifischen Reservoir sowie die Mechanismen, die seinen Verbleib sichern. Dauerhaftigkeit wird mitunter vom Begriff Permanenz unterschieden (siehe z. B. Arcusa & Hagood, 2025). In diesem Sinne gilt eine Entnahme als "permanent", wenn sie eine gesellschaftlich festgelegte Schwelle für eine ausreichend lange CO_2-Speicherung überschreitet, um keine Schäden mehr zu verursachen. In der Praxis werden die beiden Begriffe oft synonym verwendet. Im vorliegenden Dokument werden die Wörter Permanenz und permanent vorrangig im Kontext des EU-ETS verwendet, da die EU-Kommission von einer möglichen Integration "permanenter" (engl. permanent) CO_2-Entnahmen in den ETS spricht (siehe auch Kapitel 3.1 und Kapitel 6.4.2).
Direct Air Capture and Storage (DACCS)	Siehe Kapitel 4.10.
Direct Ocean Capture	Verfahren, die CO_2 direkt aus dem Meerwasser entfernen. Die Entnahme erfolgt beispielsweise über elektrochemische Prozesse. Das CO_2 kann anschließend einer Speicherung oder Nutzung zugeführt werden.
Forstvermehrungsgutgesetz	Dient der Erhaltung der Qualität und genetischen Vielfalt des forstlichen Vermehrungsgutes.
Forstwirtschaft	Siehe Kapitel 4.1.
Holzprodukte	Siehe Kapitel 4.1.
Humusanreicherung im Boden	Siehe Kapitel 4.5.
Kalamitätsschäden	Schäden, die durch außergewöhnliche Naturereignisse oder Katastrophen verursacht werden. Der Begriff wird in der Forstwirtschaft und in der Landwirtschaft verwendet, um großflächige Schäden an Wäldern oder landwirtschaftlichen Flächen zu beschreiben, die durch Stürme, Dürren, Hochwasser, Schädlinge oder Krankheiten entstehen.
Kohlenstoffmarkt (freiwillig/ verbindlich)	Im gutschriftbasierten Kohlenstoffmarkt (engl. Carbon Credit Market) werden handelbare Emissionsminderungs- oder CO_2-Entnahmezertifikate von verschiedenen Zertifizierungsstandards ausgegeben, die von internationalen Organisationen, von Staaten, oder von nicht staatlichen Organisationen verwaltet werden. Je nach Verwendungszweck der Zertifikate auf der Nachfrageseite spricht man vom verbindlichen Kohlenstoffmarkt (z. B. EU-ETS) oder vom freiwilligen Kohlenstoffmarkt (engl. Voluntary Carbon Market, VCM).
Kultivierung und Nutzung von Makroalgen	Siehe Kapitel 4.16.

Künstliche Photosynthese	Siehe Kapitel 4.11.
Künstlicher Auftrieb	Siehe Kapitel 4.15.
(Stärkung) küstennaher Ökosysteme (Blue Carbon Enhancement)	Siehe Kapitel 4.17.
Land use, land-use change and forestry (LULUCF)	Der Sektor der Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft. Im Kontext der THG-Inventare unter der UNFCCC ist es ein THG-Inventar-Sektor, der anthropogene Emissionen und den Abbau von Treibhausgasen in bewirtschafteten Flächen (engl. Managed Land) umfasst, mit Ausnahme von Nicht-CO_2-Emissionen aus der Landwirtschaft.
LULUCF-basierte Senke	Siehe Kapitel 3.1.
Massenbilanzierungssystem	Ein System zur mengenmäßigen Verfolgung von (nachhaltigen und fossilen) Materialien entlang der Lieferkette. Es erfasst Input-Mengen von Rohstoffen, dokumentiert ihre Verarbeitung und ordnet die Output-Mengen den Quellen zu. Massenbilanzierungssysteme sind in der RED II und III verankert, um die Nachhaltigkeit von Biomasse sicherzustellen.
Mitigation Deterrence	Reduktion oder Verzögerung von Emissionsminderungen durch Ausblick auf mögliche zukünftige Entnahmen.
Monitoring/Measurement, Reporting and Verification (MRV)	Bestehend aus drei Komponenten bezeichnet MRV die systematische Erfassung von Daten und Informationen (Messung), die standardisierte Dokumentation und Bereitstellung der erfassten Daten (Berichterstattung) und die unabhängige Überprüfung der gemeldeten Daten (Verifizierung). Wichtiger Bestandteil sowohl auf THG-Inventar- wie auch auf Projektebene.
Natürliche Senke	Siehe 3.1.
Negativemissionen	Siehe Kapitel 3.1.
Overshoot	Die zeitweise Überschreitung eines spezifischen Niveaus globaler Erwärmung (z. B. 1,5 °C). Der Begriff impliziert einen Höhepunkt globaler Erwärmung gefolgt von einer Abnahme, die durch CO_2-Entnahme erreicht wird.
Permanenz	Siehe Dauerhaftigkeit.
Pflanzenkohle	Siehe Kapitel 4.8.
Primärproduktion	Beschreibt die erzeugte Biomasse durch autotrophe Organismen (Pflanzen, Algen und bestimmte Bakterien) über die Umwandlung von anorganischen Stoffen.
(THG-) Quelle	Jeder Prozess oder jede Tätigkeit, bei dem bzw. der ein Treibhausgas (THG), ein Aerosol oder ein Vorläufer eines THG in die Atmosphäre freigesetzt wird.

Ramsar-Konvention	Übereinkommen über den Schutz von Feuchtgebieten, insbesondere als Lebensraum für Wasser- und Watvögel, von internationaler Bedeutung.
Reverse Auctions	Siehe Infobox 6.
Senke	Siehe Kapitel 3.1.
Stoffliche Biomassenutzung	Siehe Kapitel 4.3.
Störungsintensität	Beschreibt das Ausmaß natürlicher (z. B. Stürme, Schädlinge, Dürren) und menschlicher Einflüsse auf Wälder, die deren Wachstum und Holzvorrat und damit die CO_2-Entnahme beeinflussen.
Solar Radiation Management (SRM)	Siehe Kapitel 3.1.
Technische Senke	Siehe Kapitel 3.1.
Unvermeidbare Restemissionen	Anteil der Emissionen, der nach tiefgreifender THG-Minderung und einer Transformation der verschiedenen Sektoren sowie nach dem Einsatz von CO_2-Abscheidetechnologien im Zieljahr der THG-Neutralität noch verbleibt. Diese Emissionen sind nicht einheitlich definiert; in den meisten Studien stammen sie vorrangig aus der Landwirtschaft und aus Prozessemissionen der Industrie.
Voluntary Carbon Market	Siehe Kohlenstoffmarkt.
Waldinventur	„Das durch die Landeswaldgesetze vorgeschriebene forstliche Inventur- und Planungssystem für Staats- und Körperschaftsforstbetriebe, zum Teil auch für Privatwaldbetriebe ab einer bestimmten Mindestgröße“ (Wollnik et al. 2023).
Waldschadensausgleichsgesetz	Dient der Eindämmung von Störungen des Holzmarktes bei überregionalen Kalamitäten.
Wiedervernässung von Mooren	Siehe Kapitel 4.6.

dena

www.dena.de