



Mercator Research Institute on  
Global Commons and Climate Change  
(MCC) gemeinnützige GmbH

# Wissensstand zu CO<sub>2</sub>-Entnahmen

**BEDARF & POTENZIALE,  
TECHNOLOGIEN & POLITIKINSTRUMENTE,  
WELTWEIT & IN DEUTSCHLAND**

# Impressum

Ottmar Edenhofer (MCC, Berlin)

Juliana Eggers (HU Berlin)

Sabine Fuss (MCC, Berlin)

Matthias Kalkuhl (MCC, Berlin)

Anne Merfort (PIK, Potsdam)

Jan C. Minx (MCC, Berlin)

Jessica Strefler (PIK, Potsdam)

Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH

EUREF-Campus 19

10829 Berlin | Deutschland

Email: [director@mcc-berlin.net](mailto:director@mcc-berlin.net)

[www.mcc-berlin.net](http://www.mcc-berlin.net)

Copyright © Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH

Juni 2021

MCC was founded jointly by





# Kurzfassung

## Klimaschutzpfade und Residualemissionen

Die Erreichung des 1,5°C-Ziels hängt von der großskaligen Verfügbarkeit und Anwendung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien bzw. -praktiken ab.

Auch in vielen 2°C-Szenarien spielt die CO<sub>2</sub>-Entnahme eine wichtige Rolle, insbesondere, um die Kosten des Klimaschutzes zu reduzieren. Das 2°C-Ziel könnte zwar prinzipiell noch ohne größere CO<sub>2</sub>-Entnahmen erreicht werden, jedoch nur zu sehr hohen Kosten bzw. unter sehr optimistischen Annahmen, etwa bezüglich der Energienachfrage.

Eine weitere Verzögerung von ambitionierter Klimapolitik führt zu einer wachsenden Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen, um die Pariser Klimaziele zu erreichen – auch für das 2°C-Ziel. Dies lässt sich anhand der Residualemissionen belegen.

In den meisten 1,5°C- und 2°C-Szenarien werden CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien schon bis zum Jahr 2050 großskalig ausgebaut, wobei bis zu 20% der heutigen Emissionen durch BECCS und bis zu 25% durch Wiederaufforstung und landwirtschaftliche Maßnahmen entnommen werden.

Es gibt eine große Bandbreite an möglichen CO<sub>2</sub>-Entnahmepfaden, sowohl in 1,5°C- als auch in 2°C-Klimaschutzszenarien. Das bedeutet: Es ist nun ein gesellschaftlicher Diskurs notwendig, der Risiken und Nutzen der verschiedenen Pfade abwägt und entscheidet – erstens wieviel CO<sub>2</sub> der Atmosphäre entzogen werden soll und zweitens auf welche Art und Weise dies durchgeführt werden soll.

In Deutschland stehen nur wenige Szenarien zu nötigen CO<sub>2</sub>-Entnahmemengen zur Verfügung. Unter der Annahme sofortiger ambitionierter Klimapolitik liegt die Spannweite bei 60-130 MtCO<sub>2</sub>Äq, um Emissionsneutralität in 2050 zu erreichen, wobei der Großteil auf die Restemissionen der Industrie und Landwirtschaft entfällt.

## Technologien & Praktiken

Die momentan in der Diskussion stehenden Entnahmetechnologien und -praktiken sind folgende: Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und Speicherung (BECCS), direkte Abscheidung aus der Luft mit geologischer Speicherung (DACCS), beschleunigte Verwitterung, Aufforstung und Wiederaufforstung, Anreicherung des Bodenkohlenstoffs sowie Ausbringen von Pflanzenkohle. Sie alle weisen auf globalem Niveau relevante Potentiale auf – aber auch technologiespezifische Konflikte mit anderen Nachhaltigkeitszielen, Ressourcenkonkurrenz, und Barrieren, was die Skalierung betrifft (Innovationslücken, Systeminkompatibilitäten, etc.). Es kristallisiert sich keine Gewinner-Technologie heraus, und das passende CDR-Portfolio wird vom Kontext abhängen.

Während die technischen CDR-Möglichkeiten am oberen Ende des Kostenspektrums anzusiedeln sind, sind viele der landbasierten Methoden bereits erprobt und könnten sofort in Angriff genommen werden – beispielsweise die Anreicherung des Bodenkohlenstoffs durch vermindertes Pflügen und Anpflanzen von Bodendeckern. Zudem ist die Implementierung einiger dieser Optionen nicht mit Zielkonflikten verbunden, etwa durch erhöhten Landflächenbedarf, sondern sie weist auch potentiell positive Nebeneffekte auf und kann andere Nachhaltigkeitsziele unterstützen. Hierbei sind jedoch den Problemen der Sättigung und vor allem der Permanenz/Reversibilität Rechnung zu tragen.

Während es einen wachsenden Wissensstand zur Angebotsseite der CDR-Innovationskette gibt, sind die nachfrageseitigen Aspekte der Innovationskette kaum erforscht. Es gilt daher ein besseres Verständnis für Nischenmärkte, Demand Pull und Akzeptanz zu entwickeln. Zudem zeigen die Klimaschutzszenarien eine derart rasche und hohe Skalierung auf, sodass völlig neue Innovationsmodelle für CDR-Technologien erforderlich sind.

Methoden zur CO<sub>2</sub>-Nutzung (CCU) erreichen i.A. keine dauerhafte Speicherung von CO<sub>2</sub> und weisen zudem vergleichsweise begrenzte Potentiale auf. Eine verstärkte CO<sub>2</sub>-Nutzung kann daher zunächst kaum dazu beitragen, das Pariser Abkommen wieder in Reichweite zu bringen. Sie könnte aber durchaus ein entscheidender Katalysator sein, um die Innovationslücke zu schließen und eine rasche technologische Entwicklung für die dauerhafte Kohlenstoffabscheidung in Gang zu setzen.

Beispielhafte Schätzungen für die Entnahmepotentiale in Deutschland liegen für BECCS bei 65-120 MtCO<sub>2</sub> (limitierender Faktor ist das Biomassepotential), für DACCS bei 35-55 MtCO<sub>2</sub> (limitierender Faktor ist der Energiebedarf), für Aufforstung 7 MtCO<sub>2</sub> (limitierender Faktor die Landfläche), für Pflanzenkohle 3-7 MtCO<sub>2</sub> (limitierender Faktor ist das Biomassepotential) und für beschleunigte Verwitterung 30 MtCO<sub>2</sub> (limitierender Faktor ist die Gesamtagrarfläche). Aufgrund von Flächenkonkurrenz liegt das Gesamtpotential jedoch unter der Summe der einzelnen Potentiale.

### **Politikinstrumente und Governance**

Grundsätzlich sollten Emissionen und Entnahmen gleich hoch bepreist werden. Dies gilt auch für die dynamische Betrachtung des CO<sub>2</sub>-Preispfads, wobei bei netto-negativer Emissionsbilanz ein öffentlicher Finanzierungsbedarf entsteht, der nicht mehr über die Einnahmen aus der CO<sub>2</sub>-Bepreisung gedeckt werden kann. Durch Marktversagen, Externalitäten und technologiespezifische Verzerrungen kann es aber Fälle geben, in denen Preisdifferenzierung angezeigt ist.

Trotz der potenziellen Kostenvorteile einer global ausgerichteten Förderung von CO<sub>2</sub>-Entnahme kann ein Fokus auf Deutschland bzw. die EU zunächst sinnvoll sein, da z.B. Lerneffekte ausgenutzt und negative Umweltwirkungen besser kontrolliert werden können.

Zur Innovationsbeschleunigung dienen Zuschüsse und Fördermittel für F&E-Vorhaben (inklusive für Verfahren zur Speicherung, zum Monitoring und zur Verifizierung), langfristig angekündigte CO<sub>2</sub>-Mindestpreise für CO<sub>2</sub>-Entnahme und ein regelmäßiges Review-Verfahren, in dem nach klar definierten Kriterien neue Technologien als CO<sub>2</sub>-Entnahme-Technologie zugelassen und förderfähig werden.

Ein präzises Monitoring der entnommenen Emissionsmengen und eine Verifizierung der dauerhaft gespeicherten Kohlenstoffmengen sind essentiell, um (a) den Klimaeffekt von CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren korrekt messen zu können und damit belastbare Aussagen zur Erreichung von Klimazielen tätigen zu können und (b) die Vergütung zur CO<sub>2</sub>-Entnahme möglichst exakt an den entnommenen und dauerhaft gespeicherten Emissionsmengen ausrichten zu können.

Zur Förderung und Ausweitung von CDR werden zwei grundlegende Governance-Architekturen identifiziert: (1) der Einsatz von Einzelmaßnahmen, die auf einzelne Entnahme-Technologien bzw. -Aktivitäten zielen, sowie (2) ein preisbasierter Ansatz. Bei letzterem stellt ein Emissionspreis oder ein Entnahme-Referenzpreis das zentrale Instrument dar, ergänzt um zusätzliche Regulierungen oder Förderungen, die spezifische technologische, ökologische oder ökonomische Aspekte berücksichtigen. Die Hauptfrage ist dabei, ob es ein separates Mengenziel für die Entnahme geben sollte, was auch unerwünschte Interaktionen mit Emissionsminderungsmaßnahmen vermeiden würde.

### **Einstiegsmöglichkeiten**

Die als erstes zu klärende Frage ist die des Entnahmeziels und ob man es vom Vermeidungsziel trennt. In zweiter Instanz ist die Art der Entnahme zu klären. Land-basierte Entnahmepraktiken könnten bereits bei einer Verschärfung der 2030-Minderungsziele mitgedacht werden. Ihre relativ niedrigeren Kosten und geringeren politischen Herausforderungen (z.B. Akzeptanz) machen sie zu günstigen Einstiegsmöglichkeiten – jedoch ist das Potential begrenzt, und die Reversibilität, Messung und Verifizierung sind ernstzunehmende Herausforderungen. Daher muss eine umfassende Strategie auch Techniken berücksichtigen, die u.a. die geologische Speicherung beinhalten (CCS). Die politischen

Herausforderungen könnten kurz- bis mittelfristig durch einen Fokus auf Offshore-Speicherung, Transparenz und partizipative Modelle adressiert werden.

## Einleitung

Dieses Arbeitspapier präsentiert eine Synthese des derzeitigen Wissensstandes zum Thema CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre im Rahmen des Ziels der Treibhausgasneutralität. Das Arbeitspapier gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil werden Notwendigkeit und Umfang von CO<sub>2</sub>-Entnahmen zur Erreichung der Pariser Klimaziele und Treibhausgasneutralität anhand publizierter globaler Klimaschutzenszenarien ausgeleuchtet. Grundsätzlich werden in der wissenschaftlichen Literatur zwei Gründe für die notwendigen CO<sub>2</sub>-Entnahmen angeführt: Zum einen erfordert Treibhausgasneutralität den Ausgleich einiger extrem schwer vermeidbarer Emissionen wie zum Beispiel Methanemissionen in der Viehwirtschaft, Lachgasemissionen im Rahmen von Düngemittelanwendung oder einigen Emissionen im Transportbereich. Diese schwer vermeidbaren Restemissionen – in der wissenschaftlichen Literatur Residualemissionen genannt – müssen durch CO<sub>2</sub>-Entnahme kompensiert werden. Zum anderen ist die internationale Gemeinschaft spät dran beim Klimaschutz: Die ambitioniertesten Klimaziele wie die Begrenzung des Klimawandels auf 1,5°C lassen sich in vielen Szenarien nur noch durch einen zwischenzeitiges „Überschießen“ des verbleibenden CO<sub>2</sub>-Budgets erreichen. Dies muss dann in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts während einer Periode globaler netto-negativer CO<sub>2</sub>-Emissionen wieder kompensiert werden.

Der zweite Teil beantwortet die Frage nach den Optionen für CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre, die momentan diskutiert werden. Er bewertet den Sachstand betreffend der zu erwartenden Kosten und Potentiale, aber auch den Entwicklungsstand, die Sicherheit und den Zeithorizont der CO<sub>2</sub>-Bindung sowie Nachhaltigkeitswirkungen und Akzeptanz. Auch wenn es in Bezug auf umsetzbare Potentiale in Deutschland noch große Forschungslücken gibt, ordnen qualitative Szenarien Deutschland in den Kontext der globalen Potentiale ein. Die Diskussion über mögliche Roadmaps soll dadurch nicht vorgezeichnet, aber ermöglicht werden.

Nach der Klärung des „Warum“ und des „Wie“ geht dann der dritte Teil auf die Umsetzung und somit die Frage der entsprechenden Politikinstrumente ein. Hier wird ein bisher noch sehr überschaubarer wissenschaftlicher Wissensstand aufbereitet: etwa zu Finanzierung, Einnahmen vs. Ausgaben aus CO<sub>2</sub>-Bepreisung, Möglichkeiten zur Integration in den Emissionshandel, Problematik von Netto-Negativität sowie Innovationspolitik. Aufgrund des lückenhaften Sachstandes werden hier auch bewusst offene Fragen und Instrumente zu deren Adressierung präsentiert. Im Weiteren geht dieser Teil über Politikinstrumente zur reinen Skalierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien hinaus und behandelt auch den Umgang mit und die Regulierung von Nebeneffekten sowie mögliche Governance-Architekturen und das Zusammenwirken mit konventionellen Klimaschutzmaßnahmen. Erfahrungen aus anderen Ländern zeigen in diesem Rahmen wichtige Fragen auf, die auch in Deutschland diskutiert werden müssen: Sollen getrennte CO<sub>2</sub>-Vermeidungs- und Entnahmeziele wie im Vereinigten Königreich definiert werden? Sollen Entnahmen als öffentliches Gut verstanden und diese Dienstleistung verauktioniert werden wie in Schweden? Oder reicht die Definition von Nachhaltigkeitskriterien wie in der EU aus, um die größeren negativen Umweltauswirkungen von landbasierten CDR-Methoden zu vermeiden?

Der Schlussteil diskutiert dann die Verfügbarkeit der verschiedenen Optionen im Rahmen einer möglichen Gesamtstrategie.

# 1. Klimaschutzpfade und Residualemissionen

## 1.1. Warum brauchen wir CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre? Grundlegende Konzepte

Um den Klimawandel auf deutlich unter 2°C oder sogar 1,5°C zu begrenzen, wie im Pariser Klimaabkommen beschlossen, steht nur noch ein sehr begrenztes zukünftiges CO<sub>2</sub>-Budget zur Verfügung. Das ist eine wichtige Einsicht aus der Klimaphysik (IPCC, 2013). Um den Klimawandel beispielsweise mit einer zumindest 67%igen Wahrscheinlichkeit auf unter 1,5°C zu begrenzen, darf die Welt gerechnet ab dem 1.1.2020 noch ungefähr 340±250 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> ausstoßen. Für das 2°C-Ziel stehen noch etwa 990±250 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> zur Verfügung (IPCC, 2018). Bei weltweiten CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen von ungefähr 43±3.3 Milliarden Tonnen pro Jahr (Friedlingstein et al. 2020) ist dieses Budget rasch aufgezehrt, im Falle des 1,5°C-Ziels in weniger als 10 Jahren. Aus der Existenz eines absolut und streng begrenzten CO<sub>2</sub>-Budgets zur Erreichung der Pariser Klimaziele lassen sich die zwei grundlegenden Notwendigkeiten der CO<sub>2</sub>-Entnahme im Klimaschutz ableiten.

Erstens erfordert die Begrenzung des Klimawandels auf deutlich unter 2°C CO<sub>2</sub>-Neutralität während des 21. Jahrhunderts, im Falle des 1,5°C-Ziels schon ungefähr zur Mitte des Jahrhunderts. Es werden jedoch nicht alle CO<sub>2</sub>-Emissionen einfach auf Null gesenkt werden können, sodass eine gewisse Menge an sogenannten Rest- oder Residualemissionen bleiben wird. Diese müssen dann durch Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre in gleicher Höhe kompensiert werden. Die Kompensation von Residualemissionen ist die erste wichtige Aufgabe der CO<sub>2</sub>-Entnahme im Klimaschutz – eine unvermeidbare.

Dies wird in Abbildung 1 anhand eines exemplarischen 2°C-Szenarios verdeutlicht. Der dunkelblaue 2°C-Pfad zeigt die Nettoemissionen zu jedem Zeitpunkt. Die CO<sub>2</sub>-Restemissionen werden als graue Fläche gezeigt. Über das 21. Jahrhundert werden diese Restemissionen sehr stark reduziert, es verbleibt jedoch ein gewisser Sockel. Die Abweichung zwischen Netto- und Residualemission wird in jedem Jahr genau durch eine entsprechende CO<sub>2</sub>-Entnahme kompensiert, die als hellblaue Fläche im negativen Bereich der y-Achse dargestellt ist. Bei Erreichung der CO<sub>2</sub>-Neutralität im Jahr 2075 sind Residualemissionen und CO<sub>2</sub>-Entnahmen genau gleich groß.

Die zweite Notwendigkeit für CO<sub>2</sub>-Entnahme entsteht aus dem sehr begrenzten noch verfügbaren CO<sub>2</sub>-Budget, um die Pariser Klimaziele einzuhalten. In vielen Klimaschutzszenarien reicht das verfügbare CO<sub>2</sub>-Budget nicht aus, um die Transformation zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Gesellschaft rechtzeitig zu schaffen. Deshalb wird es zeitweise überschritten, um dann später in Form einer Netto-CO<sub>2</sub>-Entnahme wieder kompensiert zu werden. Es wird in gewisser Weise ein Kredit bei der Atmosphäre aufgenommen, der dann in Form netto-negativer Emissionen zurückgezahlt wird.

Abbildung 1 zeigt somit auch ein häufiges Missverständnis bei der Betrachtung von Klimaschutzpfaden auf: Viele Abbildungen weisen nur die Nettoemissionen aus (blauer 2°C-Pfad in Abbildung 1). Wenn man die Bruttoemissionen mit einbezieht, wird jedoch schnell deutlich, dass nicht erst in der zweiten Jahrhunderthälfte CO<sub>2</sub> entnommen wird, sondern dass Emissionen bereits in den kommenden zehn Jahren mit CO<sub>2</sub>-Entnahmetechniken teilweise ausgeglichen werden (blaue Flächen in Abbildung 1). Die gesamte Menge an CO<sub>2</sub>-Entnahmen über das 21. Jahrhundert hinweg ist sehr viel größer als die Menge an netto-negativen Emissionen in der zweiten Jahrhunderthälfte. Dies ist wichtig für das Erstellen von nationalen Plänen zur Skalierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechniken im Rahmen der Gesamtstrategie zum Klimaschutz.

Ein weiteres Konzept, das es zu klären gilt, ist das der CO<sub>2</sub>-Neutralität im Gegensatz zur eingangs erwähnten und auch in Deutschland diskutierten Treibhausgasneutralität (siehe auch Glossar): Werden auch Nicht-CO<sub>2</sub>-Treibhausgase wie beispielsweise Methan und Lachgas mit einbezogen, dann rückt der

Zeitpunkt, bei dem zum Erreichen des 2-Grad-Ziels Netto-null-Emissionen erreicht werden, um mehr als eine Dekade in die Zukunft (siehe unterer Teil von Abbildung 1).

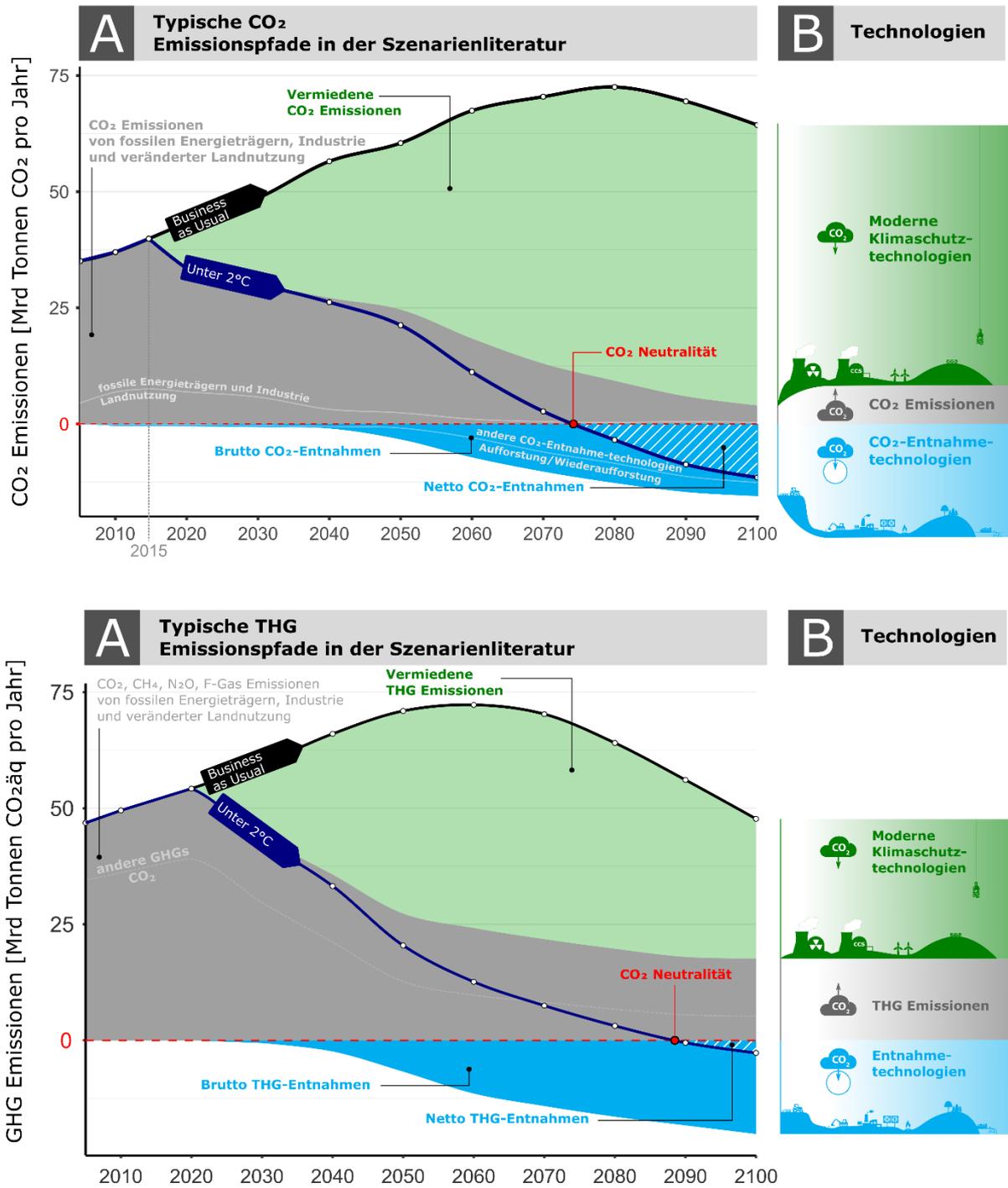


Abbildung 1: Brutto- versus Nettoemissionen (oben CO<sub>2</sub>, unten alle THGs) auf einem exemplarischen 2°C-Klimaschutzpfad, (übersetzt nach Fuss et al. 2018, Abb. 2; UNEP EGR 2017).

## 1.2. Wieviel CO<sub>2</sub> muss der Atmosphäre entnommen werden, um die Pariser Klimaziele einzuhalten?

Der Weltklimarat IPCC hat viele hunderte Szenarien, die den Klimawandel deutlich auf unter 2°C begrenzen, zusammengetragen und analysiert (IPCC, 2014; IPCC, 2018). Aus dieser reichhaltigen Datenbasis (Krey et al., 2014; Huppmann et al., 2018; Fuss et al., 2018; Hilaire et al., 2019) lassen sich wichtige Einsichten zur Rolle von CO<sub>2</sub>-Entnahme bei der Erreichung des 1,5°C- und des 2°-Ziels ableiten. Aufgrund vielfältiger Unsicherheiten wird dabei immer mit Wahrscheinlichkeiten gearbeitet. Hier werden im Weiteren drei Gruppen von Szenarien betrachtet (siehe Abbildung 2):

- 1,5°C-Szenarien: Szenarien mit einer 50%igen Wahrscheinlichkeit, den durchschnittlichen globalen Temperaturanstieg im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter im Jahre 2100 auf 1,5°C zu begrenzen;
- „Wahrscheinliche 2°C-Szenarien“: Szenarien mit einer mindestens 66%igen Wahrscheinlichkeit, den durchschnittlichen Temperaturanstieg im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter über das gesamte 21. Jahrhundert auf unter 2°C zu begrenzen;
- „Mittlere 2°C Szenarien“: Szenarien mit einer mindestens 50%igen Wahrscheinlichkeit, den durchschnittlichen Temperaturanstieg im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter über das gesamte 21. Jahrhundert auf unter 2°C zu begrenzen.

Aus der Analyse der verfügbaren Szenarien ergeben sich wichtige Einsichten (siehe Abbildung 2):

1. **Die Erreichung des 1,5°C-Ziels hängt von der großskaligen Verfügbarkeit und Anwendung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien ab.** Selbst jene Szenarien, die versuchen, CDR auf ein Minimum zu reduzieren (z.B. Grübler et al., 2018; van Vuuren et al., 2018; Holz et al., 2018), sind auf eine großskalige Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien angewiesen (IPCC, 2018). Wie in Abbildung 2a) dargestellt, wird in 1,5°C-Szenarien um die Jahrhundertmitte schon CO<sub>2</sub>-Neutralität erreicht. Dieser folgt dann in der Regel eine lange Periode mit netto-negativen Emissionen.
2. **Auch in vielen 2°C-Szenarien spielt die CO<sub>2</sub>-Entnahme eine wichtige Rolle – das 2°C-Ziel kann prinzipiell jedoch noch ohne größere CO<sub>2</sub>-Entnahmen erreicht werden.** Aufgrund des größeren, verbleibenden CO<sub>2</sub>-Budgets könnte der Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf 2°C noch ohne die Entnahme größerer Mengen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre erreicht werden. Das heißt, es gibt eine ganze Reihe von 2°C-Szenarien, die über das gesamte 21. Jahrhundert keine dezidierte CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologie nutzen (siehe Abbildung 2c: 2°C -Szenarien mit Bandbreite, die 0 einschließt). Dazu müssen jedoch CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich schneller gegen Null gesenkt werden. Diese Szenarien weisen sehr hohe Kosten auf bzw. sehr optimistische Annahmen etwa bezüglich der Energienachfrage. In den meisten verfügbaren 2°C-Szenarien werden CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien jedoch zügig und großskalig ausgebaut. CO<sub>2</sub>-Neutralität wird im Mittel erst ungefähr im Jahr 2070 erreicht, wiederum gefolgt von einer längeren Phase netto-negativer Emissionen (Abbildung 2a). Der Ausbau von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien erfolgt ein wenig langsamer als in 1,5°C-Szenarien (Abbildung 2b); die entnommenen Gesamtmengen erfolgen aber häufig in ähnlicher Größenordnung (Abbildung 2c).
3. **Eine weitere Verzögerung von ambitionierter Klimapolitik führt zu einer wachsenden Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen, um die Pariser Klimaziele zu erreichen – auch für das 2°C Ziel.** Ohne eine weitere deutliche Anschärfung der kurzfristigen nationalen Klimaschutzbeiträge (Nationally Determined Contributions, NDCs) wird auch die Erreichung des 2°C-Ziels im Jahr 2030 grundlegend von einer großskaligen Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien abhängen (Fuss et al., 2018; Minx et al., 2021).

4. **In den meisten 1,5°C- und 2°C-Szenarien werden CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien schon im Jahr 2050 großskalig ausgebaut.** Bis 2050 werden in vielen globalen Szenarien, die den Klimawandel auf deutlich unter 2°C begrenzen, schon mehrere Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnommen und sicher gespeichert (Abbildung 2.b). Dies stellt eine gewaltige Herausforderung für Technologieinnovation und -ausbau dar (siehe auch Kapitel 2).
5. **Es gibt eine große Bandbreite an möglichen CO<sub>2</sub>-Entnahmepfaden – sowohl in 1,5°C- als auch in 2°C-Klimaschutzszenarien.** Die wissenschaftliche Literatur zeigt wichtige Unterschiede in der Ausgestaltung unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-Entnahmepfade, d.h. wie viel CO<sub>2</sub> entnommen wird und mit welchen Methoden dies geschehen kann. Dies gilt auch für 1,5°C-Klimaschutzszenarien. Bezüglich der CO<sub>2</sub>-Entnahmemengen zeigt die Literatur, dass sowohl fehlende Ambition im Klimaschutz, insbesondere in den nächsten zehn Jahren, als auch Beschränkungen im Energietechnologieportfolio tendenziell zu größeren CO<sub>2</sub>-Entnahmen führen. Hingegen sinkt die Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen im Falle von aggressiven Reduzierungen in der Energienachfrage durch radikale Energieeffizienzsteigerungen und auch Lebensstilveränderungen (van Vuuren et al., 2018; Grübler et al., 2018). Das zeigt sich auch in den vier ausgewählten Pfaden (P1-P4) des Sonderberichts des Weltklimarats zu 1,5°C Globaler Erwärmung (siehe Abbildung 3): P1 kommt aufgrund nachfrageseitiger Emissionsminderungen mit einem Minimum an CDR aus, und zwar in Form von Wiederaufforstung, während P4 ein zwischenzeitliches Überschreiten des Temperaturziels von 1,5°C globaler Erwärmung in Kauf nimmt und die Emissionen kurzfristig langsamer senkt, dies jedoch durch massive Entnahmen in der zweiten Jahrhunderthälfte ausgleichen muss. Ein solches Szenario birgt das Risiko, das Temperaturziel dauerhaft zu überschreiten, falls die geplante große Menge an netto-negativen Emissionen nicht bereitgestellt werden kann. Es gilt, die Risiken und Nutzen der verschiedenen Pfade gesellschaftlich abzuwägen. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse stellen hierfür die Entscheidungsgrundlage bereit. Insbesondere richtet sich das Minimum von notwendigem CDR nach dem Ausmaß der Emissionen, die kurzfristig schwierig herunterzufahren sind.

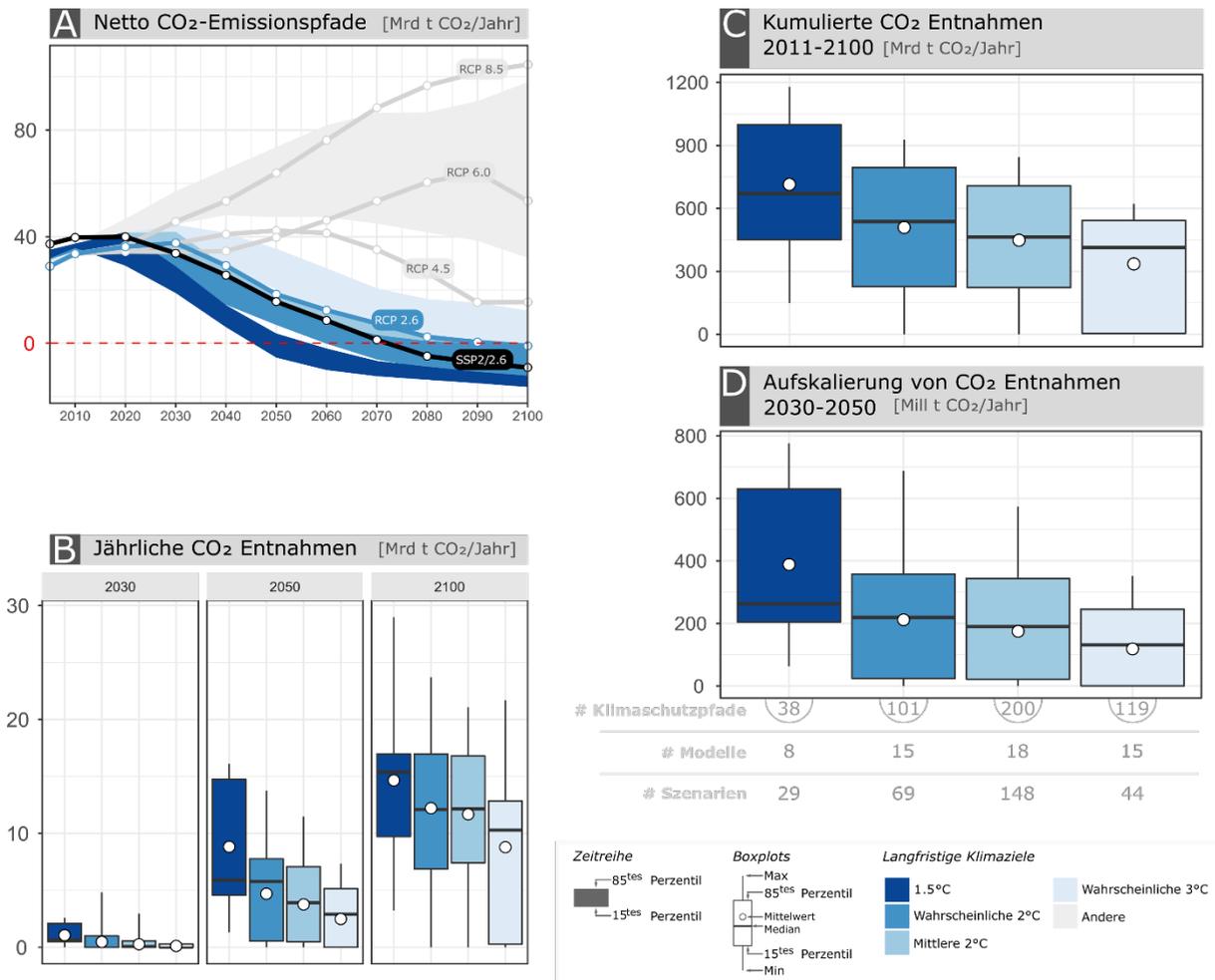


Abbildung 2: CO<sub>2</sub>-Entnahmen in 1,5°C- und 2°C-Szenarien (übersetzt nach Fuss et al. 2018, Abb. 3).

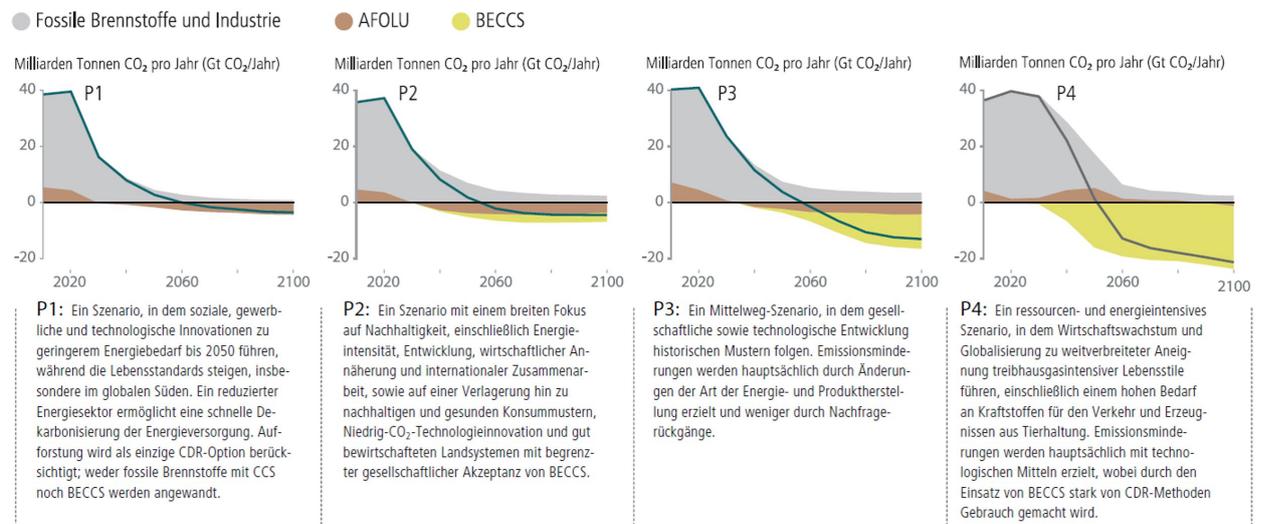
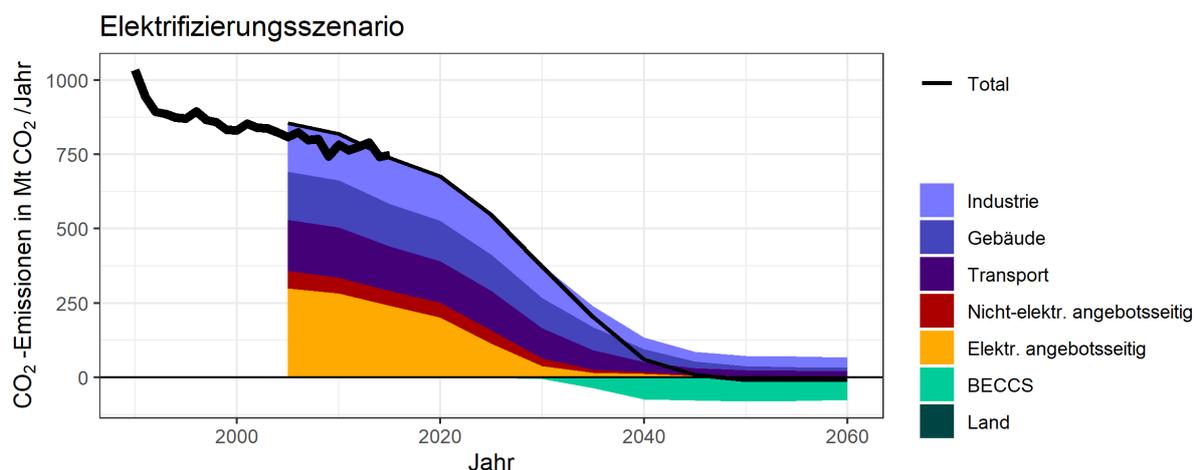


Abbildung 3: Globale Netto- und Brutto-CO<sub>2</sub>-Emissionen in vier illustrativen Modellpfaden (IPCC 2018).

### 1.3. Bedarf an CO<sub>2</sub>-Entnahmen in Deutschland

Abbildung 4 zeigt vorläufige Modellergebnisse des Integrated Assessment Modells (IAM) REMIND zu CO<sub>2</sub>-Emissionen und -Entnahmen für ein Szenario, in dem Deutschland bis 2050 CO<sub>2</sub>-Neutralität erreicht. In diesem Szenario stehen Aufforstung, BECCS und DACCS als verfügbare CO<sub>2</sub>-Entnahmemaßnahmen zur Verfügung. Die verbleibenden CO<sub>2</sub>-Restemissionen von ~70 MtCO<sub>2</sub>/Jahr (vorrangig aus der Industrie) werden vollständig kompensiert durch CO<sub>2</sub>-Entnahme, überwiegend mit dem kostengünstigen BECCS und einem sehr kleinen Teil Wiederaufforstung. Soll darüber hinaus Treibhausgasneutralität erreicht werden, so müssen auch die verbleibenden N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen (vorrangig aus der Landwirtschaft) entsprechend ihres CO<sub>2</sub>-Äquivalents (~40-60 MtCO<sub>2</sub>Äq) durch CO<sub>2</sub>-Entnahme kompensiert werden. In zukünftigen Modellverfeinerungen soll das verfügbare CDR-Portfolio erweitert werden. Das Modell nimmt über alle Sektoren hinweg gleiche CO<sub>2</sub>-Preise an und beginnt instantan mit der Verstärkung der Vermeidungsanstrengungen. Unsicherheiten in den Modellergebnissen ergeben sich vor allem durch noch nicht abgebildete, eventuell disruptive Technologien, durch potentielles Marktversagen und durch Unsicherheiten in der Technologieverfügbarkeit, insbesondere von BECCS und CCS.



**Abbildung 4: CO<sub>2</sub>-Emissionen von Deutschland in einem Szenario im Einklang mit den Emissionsreduktionszielen, die im Rahmen des europäischen Green Deal angekündigt wurden (vorläufige Ergebnisse von REMIND im Rahmen des ARIADNE-Projekts).**

Im Gegensatz zu diesen kosteneffizienten Szenarien berechnet eine Studie des Umweltbundesamtes die aus technologischer Sicht höchstmöglichen Emissionsreduktionen. In „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ wird die technologische Durchführbarkeit einer Emissionsreduktion um 95% bis zum Jahr 2050 dargestellt. Es verbleiben Restemissionen in Höhe von ~ 60 MtCO<sub>2</sub>Äq. Ökonomische Aspekte, internationale Wechselwirkungen und CDR-Technologien wurden dabei nicht untersucht.

In einer aktuellen Studie von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität werden zwei Szenarien entwickelt, mit denen Deutschland bis 2050 treibhausgasneutral werden kann. Ähnlich wie in den REMIND-Szenarien werden hier aktuelle Trends fortgeschrieben, etwa ein jährliches Wirtschaftswachstum von 1,3%, eine leichte Bevölkerungsabnahme, ein leicht sinkender Milchkonsum, eine Verschiebung im Fleischkonsums hin zu mehr Geflügel, eine steigende Pro-Kopf-Wohnfläche und gleichbleibende Mobilität.

Die Szenarien erreichen eine 61%ige bzw. 65%ige Minderung der Emissionen (im Vergleich zu 1990) bis 2030 – und 95% bis 2050. Es bleiben Restemissionen von ca. 62 MtCO<sub>2</sub>Äq übrig, die sich v.a. in der Landwirtschaft (44 MtCO<sub>2</sub>Äq) und in der Industrie (13 MtCO<sub>2</sub>Äq) nicht vermeiden lassen. Diese werden durch CO<sub>2</sub>-Entnahme ausgeglichen. Es wird dabei auf BECCS, DACCS und die stoffliche Bindung von CO<sub>2</sub> in grünen Polymeren gesetzt.

## 2. CO<sub>2</sub>-Entnahmetechniken

### 2.1. Definition und Überblick

Der erste Teil des Arbeitspapiers hat eindrücklich aufgezeigt: Es gibt kein einziges Szenario, das das 1,5°C-Ziel ohne das Entfernen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre erreichen kann - und es muss in 2050 mindestens mit nötigen Entnahmen von 60-130 Mt CO<sub>2</sub> pro Jahr in Deutschland gerechnet werden, um das Ziel der THG-Neutralität zu erreichen. Der zweite Teil konzentriert sich nun auf die Frage, wie diese Entnahmen bewerkstelligt werden können. Hierbei gilt zu beachten, dass CO<sub>2</sub>-Entnahmen zwei Funktionen haben. Zum einen werden sie genutzt, um die Emissionen schneller auf Netto-Null zu fahren, wobei sie schwer zu senkende Emissionen beispielsweise aus der Landwirtschaft ausgleichen. Zum anderen können CO<sub>2</sub>-Entnahmen bei einem Überschreiten des Temperaturziels (siehe Kapitel 3) dafür genutzt werden, um durch CO<sub>2</sub>-Entnahme ein niedrigeres Temperaturziel anschließend zu erreichen. Die gesellschaftliche Diskussion hat sich in der Vergangenheit oft um die zweite Funktion gedreht, wobei die erste Funktion definitiv die relevantere ist für die nächste Legislaturperiode. Die 2030-Einsparungsziele sind hierbei ausschlaggebend.

In diesem Arbeitspapier wird die aktuelle Definition für CO<sub>2</sub>-Entnahmen des Weltklimarats verwendet (IPCC 2018). Diese umfasst anthropogene Aktivitäten, die CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernen und es dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Senken oder in Produkten speichern. Darin eingeschlossen sind die bestehende und potenzielle anthropogene Erweiterung biologischer oder geochemischer Senken sowie die direkte Abscheidung und Speicherung aus der Luft. Ausgeschlossen wird explizit die natürliche CO<sub>2</sub>-Aufnahme, die nicht direkt durch menschliche Aktivitäten verursacht und beeinflussbar wird (z.B. durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Düngung).

Auf dieser Basis werden momentan die in Abbildung 5 illustrierten Technologien und Praktiken diskutiert. Diese weisen durchweg große Unterschiede auf, was Potenziale, Kosten, Nebenwirkungen und Innovationsaspekte (Skalierung, Akzeptanz, etc.) betrifft.

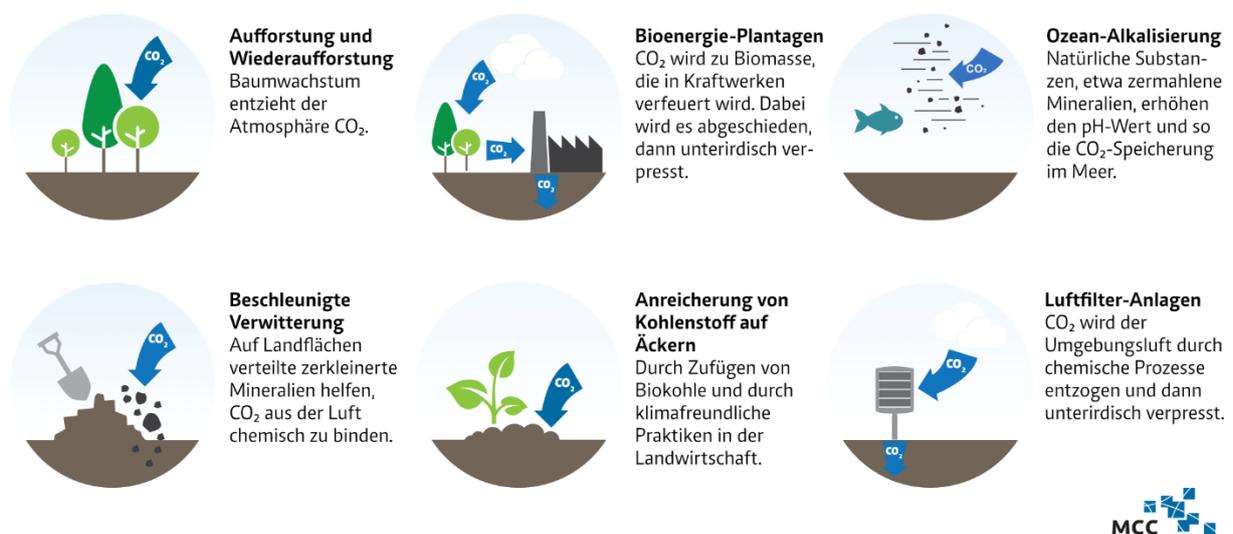


Abbildung 5: CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren in der Diskussion.

Oft wird zwischen den verschiedenen Optionen aufgrund der involvierten Sequestrierungsprozesse (photosynthetisch versus geo-chemisch) differenziert, wie in Abbildung 6 demonstriert. Es existieren

jedoch die unterschiedlichsten Typologien, die sich teilweise am Speichermedium orientieren (geologisch, mineralisch, in Böden, marin) und teilweise am Erdsystem (terrestrisch versus Ozean-basiert).

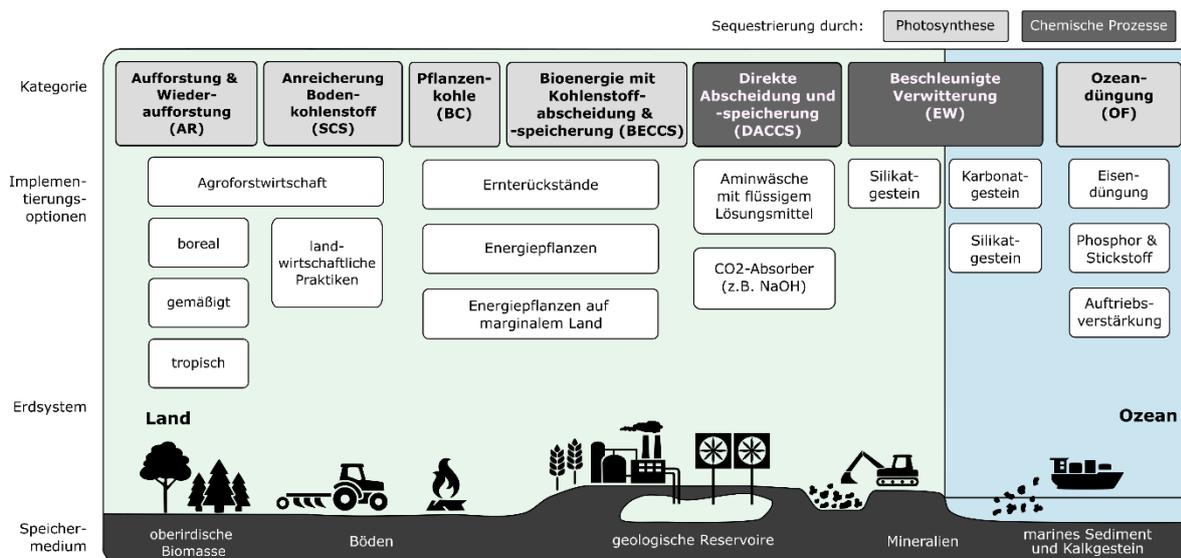


Abbildung 6: CDR-Typologien und Implementierungsoptionen (übersetzt nach Minx et al. 2018, Abb. 2).

## 2.2. Potentiale, Kosten und Zielkonflikte

Eine systematische Begutachtung der Literatur vor 2018 (Fuss et al. 2018) zeigt breite Spannweiten für die Einschätzungen von Potentialen und Kosten von CO<sub>2</sub>-Entnahmen auf. Diese Spannweiten können vor dem Hintergrund von Expertenwissen bzgl. Nachhaltigkeit, Skalierungsproblemen, etc. weiter eingeschränkt werden (Abbildung 7). Hierbei sind folgende Anmerkungen zu machen:

(1) Die verschiedenen Potentiale sind nicht zu addieren, da es sich um Bottom-up-Abschätzungen auf Technologiebasis handelt. Land, das beispielsweise für eine Biomasse-Plantage mit nachgelagerter BECCS-Anlage genutzt wird, steht also nicht auch noch für Aufforstung zur Verfügung. Die unterliegenden Studien maximieren das Potential aufgrund aller zur Verfügung stehenden Ressourcen.

(2) Die Literatur umfasst weit höhere Potentiale, jedoch auch Informationen zu Barrieren, was die Skalierung betrifft (Nachhaltigkeitseffekte, Innovationslücken, System-Inkompatibilitäten etc.), daher sind die Spannweiten, die hier genannt werden, als konservativ gegenüber anderen Assessments einzuschätzen.

(3) Trotz der in Punkt 2 erwähnten Einschränkungen sind die unteren Enden der Kostenspektren teilweise kritisiert worden. So geht es bei der sehr energieintensiven direkten Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Luft um sehr unterschiedliche Technologien, die momentan noch die unterschiedlichsten Emissionsbilanzen aufweisen, aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-freier Energie.

(4) Während die technischen CDR-Möglichkeiten am oberen Ende des Kostenspektrums anzusiedeln sind, sind viele der landbasierten Methoden bereits erprobt und könnten sofort in Angriff genommen werden. Dazu zählen die Anreicherung des Bodenkohlenstoffs durch vermindertes Pflügen, das Anpflanzen von Bodendeckern und viele andere Praktiken. Zudem ist die Implementierung einiger dieser Optionen nicht mit Zielkonflikten verbunden – beispielsweise durch erhöhten Landflächenbedarf und auch

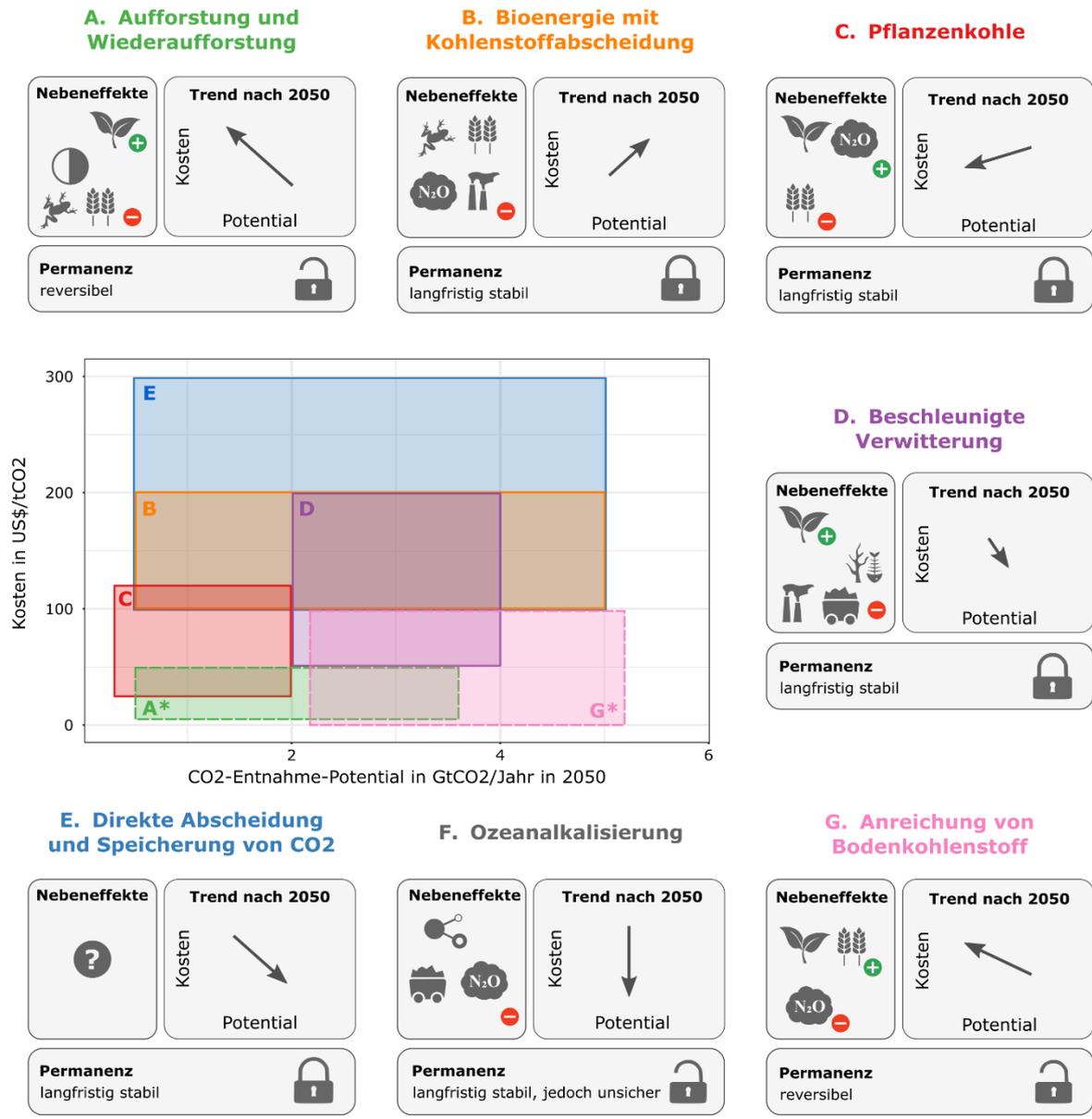
potentielle indirekte Landnutzungsänderungen –, sondern weist auch potentiell positive Nebeneffekte und Beförderung anderer Nachhaltigkeitsziele auf (Smith et al. 2019b).

(5) Dem vierten Punkt steht gegenüber: Viele land-basierte CDR-Praktiken, zu denen nicht nur Aufforstung sondern auch die Anreicherung des Bodenkohlenstoffes zählt, sehen sich den Problemen der Sättigung und vor allem der Permanenz ausgesetzt (vgl. Abbildung 8). Änderungen in der landwirtschaftlichen Bearbeitung, Feuer und Schädlingsbefall, aber auch anthropogene und klimatische Faktoren können dazu führen, dass zuvor sequestriertes CO<sub>2</sub> sehr schnell wieder freigesetzt wird (Seidl et al. 2017). Gleichzeitig geht die jährliche Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre gegen Null, wenn Vegetation reift oder wenn Vegetations- und Bodenkohlenstoff-Reservoirs Sättigung erreichen, wobei die Bestände an Kohlenstoff aufrechterhalten werden können (Smith et al. 2019a).

(6) Alle untersuchten Technologien außer der momentan noch ausgenommenen Ozeandüngung (s.u.) können negative Emissionen in relevanten Mengen bereitstellen. Es gibt jedoch eine wichtige Innovationslücke: Eine systematische Begutachtung der Literatur zu CDR und Innovation zeigt auf, dass die nachfrageseitigen Aspekte der Innovationskette (Nischenmärkte, Demand Pull, Akzeptanz) kaum erforscht sind, und dass die Klimaschutzenszenarien eine Skalierung vorsehen, die völlig neue Innovationsmodelle erfordern (Nemet et al. 2018). Der derzeitige Stand und die Dynamik der Technologieentwicklung stehen im Widerspruch zur Verwendung einiger Technologien in vielen Klimaschutzenszenarien in integrierten Bewertungsmodellen (siehe Kapitel 1).

(7) Methoden zur CO<sub>2</sub>-Nutzung weisen nicht zu vernachlässigende Potenziale auf, gleichwohl sind diese vergleichsweise begrenzt. Die CO<sub>2</sub>-Nutzung kann also nicht als Königsweg angesehen werden, um das Pariser Abkommen wieder in Reichweite zu bringen. Sie könnte aber durchaus ein entscheidender Katalysator sein, um die Innovationslücke zu schließen und eine rasche technologische Entwicklung in Gang zu setzen für die Kohlenstoffabscheidung und die Eindämmung des Klimawandels (siehe Box zu CCU).

Fazit: Bezüglich der Bewertung der 2050er-Potentiale und -Kosten der verschiedenen CDR-Optionen ist klar, dass der derzeitige Sachstand keine Konzentration auf eine einzige „Gewinner-Technologie“ zulässt. Im Gegenteil deutet alles auf die Notwendigkeit hin, einen geeigneten CDR-Mix zu finden, mit dem so viel CO<sub>2</sub> entnommen kann, wie es für nötig befunden wird (im Angesicht anderer Zielsetzungen), während die technischen, ökonomischen, sozialen und ökologischen Risiken der Skalierung auf ein Minimum reduziert werden müssen (Minx et al. 2018; Fuss et al. 2020).



- Nebeneffekte**  
 (+) positiv, (-) negativ
- Luftverschmutzung
  - Albedo
  - Biodiversität
  - Ökosystemveränderungen
  - Ernährungssicherheit
  - Grundwasser-/Wasserverschmutzung
  - Abbaubetrieb
  - Bodenqualität
  - nicht-CO<sub>2</sub>-Treibhausgase

Abbildung 7: Globale Potentiale und Kosten von CDR-Techniken in 2050 (übersetzt nach Minx et al. 2018, Abb. 6).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über den Stand des Wissens der diskutierten CDR-Optionen. Sie geht über Potentiale und Kosten hinaus und fasst auch das Wissen zusammen zu positiven und negativen Nebeneffekten einer CDR-Skalierung, zum Stand der Technik, zur Akzeptanz sowie zur Permanenz der Sequestrierung. Hierbei stützt sich das Arbeitspapier vor allem auf die Review-Trilogie Fuss et al. 2018, Minx et al. 2018, Nemet et al. 2018; dies ist komplementiert mit Erkenntnissen, die in neueren Assessments erfasst sind (NASEM 2019, Royal Society 2019, Smith et al. 2019a).

**Tabelle 1: Einordnung der diskutierten CDR-Optionen nach aktuellem Wissensstand.**

	Kosten (in \$/tCO <sub>2</sub> )*	Potential und Sättigung (in GtCO <sub>2</sub> yr <sup>-1</sup> )*	Nebeneffekte (+/-)	Stand der Technik	Politische Herausforderungen	Permanenz
<b>Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung &amp; Speicherung (BECCS)</b>	100-200 [25 - 1000]	0,5-5 [1-85]	+ Marktchancen, wirtschaftliche Diversifizierung, Energieunabhängigkeit, Technologieentwicklung und -transfer, Substitution von THG-Emissionen.  - Direkter und indirekter Landnutzungswandel, Ernährungssicherheit, Auswirkungen auf Gesundheit, Biodiversitätsverlust, Entwaldung und Walddegradation, durch Luftverschmutzung CO <sub>2</sub> -Leckage, Auswirkungen auf Boden und Wasser.	- Wenige Demonstrationsanlagen.	- Fehlende Akzeptanz von geologischen Speichern und Landnutzungsänderungen für Biomasseanbau in der Bevölkerung.	- Stabil.  - Hohe Permanenz für adäquate geologische Speicherung, mögliche Speicherbegrenzungen, Grenzen der Raten der Bioenergie-Produktion und Kohlenstoffsequenzierung.
<b>Direkte Abscheidung &amp; Speicherung (DACCS)</b>	100-300 [25-1000]	0,5-5	+ Geschäftsmöglichkeiten, spezifische Anwendungen könnten Raumluftqualität verbessern.  - CO <sub>2</sub> -Strafe, wenn hoher (thermischer) Energiebedarf durch fossile Brennstoffe gedeckt wird, derzeit hohe Anfangsinvestitionskosten, meist unzureichend untersucht, Material-/Abfallimplikationen nicht bekannt, können aber nicht ausgeschlossen werden, einige räumliche Anforderungen.	- Angewandt in kleinen Nischenmärkten, Kosten unbekannt.	- Fehlende Akzeptanz von geologischen Speichern.  - Sicherstellung einer Governance, die das Verfahren zu einer CO <sub>2</sub> -Sequestrierung und nicht zu einer CO <sub>2</sub> -Nutzungstechnologie macht.	- Stabil.  - Hohe Permanenz für adäquate geologische Speicherung, mögliche Speicherbegrenzung, aber flexible Zusammenlagerung mit Speicherung möglich.
<b>Beschleunigte Verwitterung</b>	50-200 [15-3460]	2-4 [0-100]	+ Gesteigerte Ernteerträge, verbesserte Pflanzennährstoffversorgung und Bodenfruchtbarkeit, Nährstoff- und Feuchtigkeitsversorgung, Erhöhung des pH-Wertes im Boden, erhöhte Kationenaustauschkapazität in degradierten Böden.  - Risiken für die menschliche Gesundheit durch feinkörniges Material, ökologische Auswirkungen von Mineralienabbau und -transport, mögliche Freisetzung von Schwermetallen, Veränderung der hydraulischen Bodeneigenschaften.	- Mineralien  - Produktion derzeit begrenzt, da optimale Parameterisierung der Produkte nicht bekannt.	- Widerstände gegen Mineralienabbau im großen Stil; weitere Forschung notwendig, um zukünftige Relevanz besser einordnen zu können.	- Stabil.  - Sättigung des Bodens, Verweilzeit von Monaten bis zur geologischen Zeitskala.

<b>Anreicherung Bodenkohlenstoff</b>	0-100 [-45-100]	2- 5 [0,5-11]	+ Verbesserte Resilienz des Bodens und verbesserte landwirtschaftliche Produktion, negative Kostenoptionen, reduzierte Verschmutzung und verbesserte Bodenqualität, positive Auswirkungen auf Boden-, Wasser- und Luftqualität.  - Möglicher Anstieg von N <sub>2</sub> O-Emissionen und Stickstoff und Phosphor; Notwendigkeit der Zugabe von Stickstoff und Phosphor zur Aufrechterhaltung der Stöchiometrie der organischen Bodensubstanz.	- Im großen Maßstab verfügbar.	- Anreizsysteme schwierig umzusetzen (viele dezentrale Akteure); Schwierigkeiten und Kosten der Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung.	- Reversibel.  - Bodensenken werden gesättigt und sind reversibel, wenn die Bewirtschaftung stoppt, die Bodenkohlenstoff anreichert.
<b>Pflanzenkohle</b>	30-120 [10-345]	0,5-1 [1-35]	+ Höhere Ernteerträge und geringere Trockenheit, geringere CH <sub>4</sub> und N <sub>2</sub> O-Emissionen aus Böden, verbesserte Auswirkungen auf den Kohlenstoff-, Nährstoff- und Wasserkreislauf im Boden.  - Konkurrenz um Biomasse-Ressourcen, direkter und indirekter Landnutzungswandel, potenzielle Erhöhung der Anfälligkeit von Pflanzen gegenüber Insekten, Krankheitserregern und Trockenheit, Albedo-Veränderung, die den Minderungseffekt teilweise ausgleicht, mögliche Umweltbelastungen durch Pyrolyse.	- Pyrolyse-Kapazität derzeit noch begrenzt.		- Stabil.  - Die Verweilzeiten liegen zwischen Jahrzehnten und Jahrhunderten, je nach Bodentyp, Bewirtschaftung und Umweltbedingungen.
<b>Aufforstung</b>	5-50 [0-240]	0,5-3,6 [0,5-7]	+ Umsetzungsabhängiger Nutzen für Bodenkohlenstoff, Bodenqualität, Biodiversität, Lebensgrundlagen, Wasserrückhalt, Beschäftigung.  - Direkter und indirekter Landnutzungswandel, netto-positive Erwärmung in hohen Breiten durch Albedo-Effekt, Risiken für Biodiversität und Ernährungssicherheit.	- In großem Maßstab verfügbar.	- Widerstände im Zusammenhang mit Landnutzungs Konkurrenz; Bedenken wegen Unbeständigkeit der Speicherung, u.a. durch natürliche Störungen (z.B. Feuer).	- Reversibel.  - Sättigung innerhalb eines Zeitraums von Jahrzehnten bis Jahrhunderten, anfällig für natürliche und vom Menschen verursachte Störungen, erfordert kontinuierliches Management zum Aufrechterhalten der Senken.

\* Kosten- und Potentialspektrum aus Fuss et al. (2018), Schätzungen in der kompletten Literatur in eckigen Klammern; negative Kosten implizieren, dass diese Praktiken sich zu diesem Zeitpunkt bereits wirtschaftlich auszahlen

In der Tabelle nicht aufgeführt sind die ozeanbasierten Technologien. Die viel diskutierte Ozeandüngung basiert auf dem Ausbringen von Eisen oder anderen Nährstoffen im Ozean, so dass das Wachstum von mikroskopisch kleinen marinen Pflanzen angeregt wird. Diese Organismen brauchen zum Wachsen im Wasser gelöstes CO<sub>2</sub>, welches somit der Atmosphäre entnommen wird. Das Londoner Protokoll der

Internationalen Seeschifffahrtsorganisation hat die Autorität für die Regulierung der Ozeandüngung. Allgemein wird die Regulierung als De-facto-Moratorium für Aktivitäten zur Düngung der Ozeane betrachtet, angesichts der großen Unsicherheiten bzgl. der möglichen Umweltfolgen. Die Ozeanalkalisierung wird in dem Zusammenhang als vielversprechender eingestuft, wenngleich ebenfalls Unsicherheiten bestehen. Hier geht es um eine Erhöhung des pH-Wertes im Ozean, was auch positive Nebeneffekte haben kann.

Aufforstung und Wiederaufforstung, aber auch angereicherter Bodenkohlenstoff werden oft unter dem Sammelbegriff der „natürlichen Klimalösungen“ (NCS) zusammengefasst, zu dem auch die Wiederherstellung anderer Ökosysteme gehört. NCS sind Maßnahmen im Landnutzungssektor, die natürliche Kohlenstoffvorräte und -senken, vor allem Ökosysteme, schützen und verbessern. NCS verfügen über ein erhebliches Potenzial, um zur Eindämmung des Klimawandels beizutragen, und können gleichzeitig Vorteile bieten für die biologische Vielfalt, nachhaltige Lebensgrundlagen für indigene Völker und lokale Gemeinschaften (Smith et al. 2019a,b). Tatsächlich hat sich gezeigt, dass der Landsektor 30% oder mehr zu den Minderungsmaßnahmen beitragen kann, die zur Erreichung der Klimaziele gemäß dem Pariser Abkommen bis 2030 erforderlich sind, der genaue Umfang ist abhängig von der Dekarbonisierung der anderen Sektoren (Roe et al., 2019; Griscom et al., 2017).

### Box 1: CO<sub>2</sub>-Nutzung und Speicherung

Im Gegensatz zum CDR ist beim CCU das Ziel nicht die dauerhafte Speicherung von CO<sub>2</sub>, sondern die Nutzbarmachung des Stoffes als wertvolles Ausgangsmaterial für weitere industrielle und chemische Prozesse (Cuéller-Franca et al., 2015). Der Begriff CCU umfasst eine Vielzahl von Methoden – dabei kann das CO<sub>2</sub> aus fossilen Abgasen stammen, durch einen industriellen Prozess aus der Atmosphäre abgeschieden werden oder auch biologisch durch landbasierte Prozesse gewonnen werden (Hepburn et al., 2019). Die folgende Tabelle bietet eine Übersicht über die CCU-Methoden, die bisher in der Forschung am meisten Aufmerksamkeit bekommen haben.

Durch die Wiederverwendung des CO<sub>2</sub> kann Kohlenstoffdioxid von einer Belastung für Industrie und Klima zu einer erneuerbaren und alternativen Ressource werden, etwa für fossile Brennstoffe (Ghiat et al., 2021). Das CO<sub>2</sub> wird allerdings in den meisten Prozessen und produzierten Materialien nur temporär gespeichert und nach einiger Zeit wieder in die Atmosphäre abgegeben. Je nach Verfahren variieren dabei die Speicherzeiten stark, wobei synthetische Brennstoffe besonders kurzfristig speichern, CO<sub>2</sub> in Baumaterialien aber länger gespeichert wird. Baut man direkt mit Holz, finden Churkina et al. (2020) in einer neueren Studie Speicherungsraten von 0,04–2,5 GtCO<sub>2</sub> pro Jahr. Neben der genutzten Menge an CO<sub>2</sub> im Endprodukt gilt es ebenfalls zu beachten, wie viel CO<sub>2</sub>-Äquivalente durch die Vermeidung der konventionellen Produktion eingespart wurde (Kätelhön et al., 2019). CCU stellt meist ein geringeres CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial als CDR bereit, doch es bietet trotzdem Lösungen in der Emissionskontrolle und den Herausforderungen in der Energieversorgung (Al-Mamoori et al., 2017). Um CCU in großem Maßstab und kosteneffektiv anwenden zu können, bedarf es noch weiterer Grundlagenforschung und der Bereitstellung von finanziellen Ressourcen, um die Entwicklung der vielversprechendsten Technologien voranzutreiben (Zimmermann et al., 2020).

Die Prozesse der Abscheidung und kurzfristigen Speicherung bei CCU verlaufen wie bei CDR-Verfahren. Weil das genutzte CO<sub>2</sub> letztlich wieder in die Atmosphäre abgegeben wird, kann CCU langfristig nicht zur Begrenzung der Erwärmung beitragen. Allerdings ergeben sich Innovationskomplementaritäten mit anderen Verfahren, die CCS nutzen (Hepburn et al., 2019). Dadurch kann CCU auch Reifegrad und Kostensenkungen bei Technologien fördern, die eine langfristige Speicherung von CO<sub>2</sub> ermöglichen. CCU kann daher im Rahmen der Innovationsförderung berücksichtigt werden; durch CCU-Verfahren abgeschiedene Mengen sollten aber nicht als „entnommene“ CO<sub>2</sub>-Mengen gezählt bzw. in CO<sub>2</sub>-Preissystemen berücksichtigt werden.

Nutzung	Erklärung/Beispiele	CO <sub>2</sub> -Haltbarkeit	Potenzial in 2050 (Mt CO <sub>2</sub> entfernt pro Jahr)	Nutzungspotential in 2050 (Mt genutztes CO <sub>2</sub> pro Jahr)	Kosten* (2015 US\$ pro Tonne genutztes CO <sub>2</sub> )
Chemikalien	CO <sub>2</sub> kann in verschiedene Chemikalien umgewandelt werden, bisher sind aber nur wenige Technologien praktikabel und erweiterbar, z.B. die Produktion von Urea und Polycarbonate-Polyolen.	Tage bis Jahrzehnte	10-30	300-600	-80-320
Brennstoffe	Aus CO <sub>2</sub> gewonnene Kraftstoffe können im Dekarbonierungsprozess eine wichtige Rolle spielen, Beispiele sind Methanol, Methan und Fischer-Tropsch-Brennstoffe.	Wochen bis Monate	0	1000-4200	0-670
Tertiäre Ölgewinnung	Durch das Einführen von Gasen, u.a. CO <sub>2</sub> , in Bohrlöcher, wird Öl an die Oberfläche gedrückt und führt damit zu einer erhöhten Fördermenge. Durch das Einführen von mehr CO <sub>2</sub> , als durch den Konsum des finalen Ölproduktes freigesetzt wird, lässt sich CO <sub>2</sub> einsparen.	Jahrtausende	100-1800	100-1800	-60-45
Betonbaustoffe	CO <sub>2</sub> kann als Zementhärtungsmittel dienen.	Jahrzehnte	100-1400	100-1400	-30-70

Quelle: Hepburn et al. (2019).

\*Positive Kosten spiegeln den Zuschuss wider, den der Nutzungspfad zur Wirtschaftlichkeit bräuchte, negative Kosten implizieren zu diesem Zeitpunkt bereits Wirtschaftlichkeit.

### 2.3. Deutsche CDR-Potentiale und frühe Einstiegsmöglichkeiten

Die Potentiale der CDR-Methoden, die auf einer biologischen Bindung von Kohlenstoffdioxid beruhen, hängen maßgeblich von der verfügbaren Landfläche und der vorhandenen Biomasse ab. Nach einer Studie des BMU (2012) beträgt das ökologisch tragbare Biomassepotential aus innerdeutschem Anbau 1,55 EJ/Jahr, wovon 0,8 EJ/Jahr aus Reststoffen stammen. Dafür stünde laut der Studie ein maximales Flächenpotential von 4,2 Mio ha Land zur Verfügung. Die derzeitige Gesamtagrarfläche von Deutschland beträgt 16,7 Mio ha, im Jahr 2010 wurden davon bereits 1,8 Mio ha für den Anbau von Energiepflanzen genutzt. Das zur energetischen Nutzung verfügbare, nachhaltige Biomassepotential ist dennoch mit großen Unsicherheiten behaftet. CDR-Methoden mit geologischer Speicherung sind zusätzlich durch die geologischen Speicherkapazitäten beschränkt. Für Deutschland wird die Speicherkapazität auf etwa 17 Gt CO<sub>2</sub> geschätzt (Vangkilde-Pedersen et al. 2009). Auf Grundlage dieser Zahlen werden im Folgenden beispielhaft CDR-Potentiale für Deutschland berechnet. Diese Potentiale sind als tentative Abschätzung der potentiellen Größenordnung zu verstehen.

**Tabelle 2: Abschätzung der Abscheidungspotentiale verschiedener Optionen für Deutschland**

Technologie	Annahmen	Limitierender Faktor	Max. Abscheidungs-potential [MtCO <sub>2</sub> /Jahr]
-------------	----------	----------------------	---

BECCS	Emissionsfaktor 44-82,5 MtCO <sub>2</sub> /EJ (je nach Technologie, niedriger Faktor für Flüssigkraftstoffe, höchster Faktor für H <sub>2</sub> Produktion)	Biomassepotential Hier: 1,5 EJ/Jahr (aus: BMU (2012))	66-123,8
DACCS	400 kWh elektrische Energie + 1600 kWh (bzw. 533 kWh*) thermische Energie pro tCO <sub>2</sub> (Beuttler et al. 2019) (*wenn aus Strom durch Wärmepumpe mit COP=3 bereitgestellt)	Energiebedarf Hier: 50 TWh, entspricht ca. 10% der aktuellen innerdeutschen Stromproduktion	53,6 (Bei CO <sub>2</sub> neutralem Strommix)  33,5 (Bei aktuellem Strommix, Emissionsfaktor 401g CO <sub>2</sub> /kWh) <sup>1</sup>  (Umweltbundesamt 2020)
Aufforstung	7,3 tCO <sub>2</sub> /ha pro Jahr (in den ersten 25 Jahren, Doelman 2020)	Fläche Hier: 1 Mha	7,3 Sättigungseffekte treten nach ~25 Jahren ein
Pflanzkohle	Abscheidungspotential 0,55 tCO <sub>2</sub> /t <sub>DM</sub> (Teichmann 2014) DM = Dry Matter/Trockenmasse	Verfügbares Biomassepotential 5,3-12,1 Mt <sub>DM</sub> /a (Teichmann 2014, in 2030)	2,9-6,7
Bodenkohlenstoffanreicherung	Reduzierte Bodenbearbeitung Kein nennenswertes Potential  Agroforstsysteme 2,5 tCO <sub>2</sub> /ha pro Jahr  Verbesserte Fruchtfolge/ Dauerkulturen 0,55-1,32 tCO <sub>2</sub> /ha pro Jahr  (Wiesmeier 2020)	Ackerfläche Hier: 11,7 Mha, entspricht 70% der Gesamttagarfläche	0  29,3  6,4 - 15,4  Sättigungseffekte treten nach ~25 Jahren ein, je nach Bodenbeschaffenheit
Beschleunigte Verwitterung	Maximal 15 kg/m <sup>2</sup> Basalt insgesamt, entspricht 8mm Schicht Gesteinspulver (Strefler et al. 2018)	Ackerfläche Hier: 11,7 Mha, entspricht 70% der Gesamttagarfläche	29,9

Die in Tabelle 2 angegebenen technologischen Abscheidungspotentiale berücksichtigen nicht die in Tabelle 1 identifizierten Vor- und Nachteile der einzelnen Optionen. Diese beeinflussen allerdings maßgeblich das tatsächliche, klimawirksame Minderungspotential der einzelnen Optionen. Am Beispiel BECCS bedeutet das etwa, dass durch den vermehrten Anbau von Biomasse erhebliche zusätzliche Emissionen aus direkter und indirekter Landnutzung die Wirksamkeit von BECCS schwächen können. Auf der anderen Seite erhöht sich das Minderungspotential durch BECCS erheblich dadurch, wenn

<sup>1</sup> Konservativere Schätzungen wenden einen Faktor von 542 gCO<sub>2</sub>/kWh an (Ecoinvent 2020).

Biokraftstoffe im Verkehrs- oder Gebäudesektor fossile Brennstoffe ersetzen und so zur Dekarbonisierung beitragen.

Zur Anreicherung von Kohlenstoff im Boden bleibt anzumerken, dass die Ackerböden in Europa derzeit durch die landwirtschaftlichen Praktiken mehr CO<sub>2</sub> emittieren, als sie aufnehmen (Frank et al. 2015). Dieser Trend muss erst umgekehrt werden, bevor durch Anreicherung von Kohlenstoff im Boden eine CO<sub>2</sub>-Senke entsteht.

## 3. Politikinstrumente und Governance

Angesichts des eklatanten Mangels an Fachliteratur im Bereich Politikinstrumente zur Skalierung von CDR-Techniken und den damit einhergehenden notwendigen Governance-Strukturen bietet dieses Kapitel zusätzlich zur Einschätzung des Sachstands auch eigene konzeptionelle Überlegungen. Und es formuliert Fragestellungen, die es bei der Erstellung einer nationalen Roadmap zu klären gilt. Das Kapitel ist in zwei Teilen strukturiert. Zunächst werden im ersten Teil grundsätzliche Fragen bzgl. Anreizsystemen behandelt. Im zweiten Teil werden dann Governance-Architekturen skizziert und bewertet.

### 3.1. Grundsätzliche Überlegungen zur Ausgestaltung von Anreizsystemen

In den meisten Fällen besteht für Unternehmen kein (privat-)wirtschaftlicher Anreiz, CO<sub>2</sub> der Atmosphäre zu entziehen. In einigen Bereichen wie der Forstwirtschaft und der Landwirtschaft findet allerdings eine (geringe) CO<sub>2</sub>-Entnahme praktisch als Nebenprodukt wirtschaftlicher Aktivitäten statt. In beiden Fällen wird jedoch das volkswirtschaftlich sinnvolle Potenzial der CO<sub>2</sub>-Entnahme bei weitem nicht ausgeschöpft. Der volkswirtschaftliche Nutzen (Erfüllung der Klimaziele bzw. Reduktion der Klimaschäden) stellt ein öffentliches Gut dar, von dem alle unabhängig von ihrer Bereitstellung profitieren. Um dieses Anreizproblem zu lösen, muss die CO<sub>2</sub>-Entnahme entsprechend vergütet werden. Im Folgenden erörtern wir grundlegende Aspekte, die bei der Entwicklung eines Vergütungssystems zu berücksichtigen sind.

#### **Wie hoch sollte die Vergütung für CO<sub>2</sub>-Entnahme sein (CO<sub>2</sub>-Preise)?**

Basierend auf der Überlegung, volkswirtschaftliche Kosten für den Klimaschutz zu minimieren, sollte sich die Vergütung für die CO<sub>2</sub>-Entnahme an den Grenzvermeidungskosten von CO<sub>2</sub> orientieren. Wenn Emissionsminderungen vor allem über einen CO<sub>2</sub>-Preis (Steuer oder Emissionshandel) erreicht werden, bildet dieser die Grenzvermeidungskosten ab. Entspricht nun die Höhe der Vergütung für eine Tonne entnommenes CO<sub>2</sub> genau dem CO<sub>2</sub>-Preis, so stellt sich das volkswirtschaftlich optimale Verhältnis zwischen Vermeidung und Entnahme ein. Jedes andere Verhältnis würde die Kosten zur Erreichung eines Klimazieles erhöhen (Rickels et al. 2020; Kalkuhl et al. 2021).

Diese grundlegende Überlegung lässt sich auf den dynamischen Fall wachsender CO<sub>2</sub>-Preise übertragen (Strefler et al. 2021). Weil die Konzentration des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre – und damit die Erwärmung – weiter voranschreiten, müssen CO<sub>2</sub>-Preise ansteigen. Steigende Preise spiegeln damit die steigende Knappheit des atmosphärischen Deponieraums wider. Der Preisanstieg kann erst dann gestoppt werden, wenn die Wirtschaft vollständig transformiert und klimaneutral ist, also netto keine weiteren Emissionen getätigt werden. Um Klimaneutralität kostenminimal zu erreichen, müssen CO<sub>2</sub>-Preise für Emissionen und für die Vergütung von CO<sub>2</sub>-Entnahme auch entlang der Transition gleich sein. Das Grundprinzip gleicher Preise gilt auch auf den Fall von (zeitweise) netto-negativen Emissionen (also einer höheren Entnahme als einer Emission), der in vielen Modellrechnungen für das Erreichen des 1,5°C-Ziels betrachtet wird (Strefler

et al. 2021). In diesem Fall werden jedoch aus Emissionsvermeidung und -entnahme netto keine Einnahmen generiert; bei netto-negativer Emissionsbilanz entsteht daher ein öffentlicher Finanzierungsbedarf, der nicht mehr über die Einnahmen aus der CO<sub>2</sub>-Bepreisung gedeckt werden kann.

Grundsätzlich sollte ein einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis für Emissionen und Entnahme gelten. Dennoch kann aus drei Gründen eine Preisdifferenzierung sinnvoll sein (siehe Tabelle 3).

1. **Fiskalische Auswirkungen:** Für die Vergütung der CO<sub>2</sub>-Entnahme bedarf es öffentlicher Finanzmittel, die letztlich aus dem öffentlichen Haushalt beglichen werden müssen (entweder durch Steuern oder über verringerte Einnahmen aus der CO<sub>2</sub>-Bepreisung). Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, die grundsätzlich Einnahmen erzeugt. Dadurch weist die Förderung der CO<sub>2</sub>-Entnahme etwas höhere volkswirtschaftliche Kosten auf als die Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. In ersten numerischen Berechnungen fällt dieser Kostenvorteil jedoch sehr klein aus (Kalkuhl et al. 2021).
2. **Carbon Leakage:** Ein CO<sub>2</sub>-Preis für Emissionen führt zu einer Reduktion der inländischen fossilen Energienutzung. Gilt in anderen Ländern ein niedriger oder gar kein CO<sub>2</sub>-Preis, ergibt sich in diesen Ländern ein Wettbewerbsvorteil in kohlenstoffintensiven Gütern, die über den Handel dann verstärkt importiert werden. Dadurch wird eine heimische Emissionsreduktion teilweise ausgeglichen. Modellschätzungen quantifizieren diese Leakage-Rate mit 10-30% (Böhringer et al. 2012), teilweise sind jedoch aufgrund der Angebotsreaktion fossiler Rohstoffe auch deutlich höhere Leakage-Raten möglich. Bei der Berücksichtigung von Carbon Leakage ist daher ein höherer Preis für die CO<sub>2</sub>-Entnahme gegenüber der CO<sub>2</sub>-Emission optimal (Kalkuhl et al. 2021).
3. **Second-best CO<sub>2</sub>-Preise:** Die aktuell beobachteten CO<sub>2</sub>-Preise können nur bedingt als Indikatoren für die Grenzvermeidungskosten betrachtet werden. Zahlreiche zusätzliche Vermeidungsmaßnahmen (wie der Kohleausstieg, Flottenstandards oder die Förderung von erneuerbarer Energie und Energieeffizienzinvestitionen) könnten dazu führen, dass CO<sub>2</sub>-Preise im EU-ETS und im nationalen ETS unter den volkswirtschaftlichen Grenzvermeidungskosten liegen. Orientiert sich Vergütung von CO<sub>2</sub>-Entnahme an den volkswirtschaftlichen Grenzvermeidungskosten, kann diese über bestehenden CO<sub>2</sub>-Preisen liegen.

Es kann also Argumente dafür geben, vom Grundprinzip gleicher Preise für Emission und Entnahme abzuweichen. Allerdings ist der Stellenwert dieser Argumente ungewiss: Es gibt bisher keine belastbaren quantitativen Untersuchungen dazu, wie relevant derartige Preisdifferenzierungen für ein optimales Politikdesign sind.

**Tabelle 3: Bepreisung von CDR versus Vermeidungen**

Verzerrung	Erklärung	Optimale Preise	Literatur
Verzerrendes Steuersystem	CO <sub>2</sub> -Preise generieren Einnahmen, mit denen andere verzerrende Steuern (z.B. Einkommenssteuer) gesenkt werden. CDR benötigt dagegen Einnahmen, d.h. es müssen andere verzerrende Steuern erhöht werden.	CDR-Preis < optimaler CO <sub>2</sub> -Preis	Kalkuhl et al. (2021)
Carbon Leakage	Nationale/europäische CO <sub>2</sub> -Preise führen zu Verlagerung fossiler Emissionen in Länder mit geringeren/fehlenden CO <sub>2</sub> -Preisen durch den globalen Energiemarkt. Über den Güterhandel werden vermiedene Emissionen teilweise wieder in die EU importiert. Bei CDR gibt es dieses Leakage-Problem nicht.	CDR-Preis > optimaler CO <sub>2</sub> -Preis	Kalkuhl et al. (2021)

Verringerte CO <sub>2</sub> -Preise durch zusätzliche Maßnahmen (Second-Best)	Aktuell beobachtbare CO <sub>2</sub> -Preise können nur bedingt als Indikatoren für die Grenzvermeidungskosten betrachtet werden, weil zusätzliche Vermeidungsmaßnahmen CO <sub>2</sub> -Preise verringern.	CDR-Preis > beobachteter CO <sub>2</sub> -Preis	
---	---	---	--

### Für welche Technologien sollten finanzielle Anreize gelten, und wie sollten diese ausdifferenziert werden?

Grundsätzlich sollte für alle Technologien, die CO<sub>2</sub> dauerhaft speichern, ein einheitlicher Preis gewährt werden, um eine kostengünstige CO<sub>2</sub>-Entnahme zu ermöglichen (Technologieneutralität). Da einige Technologien jedoch Besonderheiten aufweisen, kann das einheitliche Preissignal um spezifische Auf- oder Abschläge oder komplementäre Maßnahmen ergänzt werden, die gezielt auf weitere technologie-spezifische Marktversagen oder Probleme ausgerichtet sind. So gibt es gerade bei neuartigen Technologien ein hohes Innovationspotenzial, das zu erheblichen Kostensenkungen führen kann. Weil der volkswirtschaftliche Wert von Innovationen in diesen Fällen oft höher ist als der betriebswirtschaftliche Wert, kann eine anfängliche Zusatzförderung zu einer schnelleren Marktreife führen (Fischer & Newell 2008, Kalkuhl et al. 2012). Diese Förderung sollte jedoch mit der Zeit absinken.

Daneben weisen einige Technologien bestimmte positive oder negative Umweltwirkungen auf (siehe Kapitel 2, Tabelle 1), die separat berücksichtigt werden sollten. Bei der Nutzung von Biomasse und Aufforstung kann es zu Landnutzungsänderungen und Entwaldung kommen (über den Nahrungsmittelhandel auch in anderen Ländern), sodass hier ein weiterer Fall von „Leakage“ durch indirekte Landnutzungsänderungen auftritt (z.B. Plevin et al. 2010, Searchinger et al. 2009, Overmars et al. 2011, Sant’Anna 2019). Die Nutzung von Biomasse kann auch zu einem Verlust von Biodiversität und erhöhter Stickstoffbelastung führen. Andererseits kann die Aufforstung auch positive Auswirkungen auf das lokale Klima haben. Bestimmte Praktiken zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffs (wie z.B. wechselnde Fruchtfolgen) haben auch positive Auswirkungen auf die Biodiversität (Wiesmeier et al. 2020). In all diesen Fällen sollte die Nutzung von CDR-Technologien durch entsprechende Maßnahmen komplementiert werden.

### Tabelle 4: Übersicht über Fälle, für die technologie-spezifische Differenzierungen von Fördersätzen oder komplementäre Maßnahme sinnvoll sind

Technologiespezifische Verzerrung bzw. Externalität	Relevant für	Technologiespezifischer CDR Preis bzw. komplementäre Politik
Lernraten und höhere Finanzierungskosten/-risiken bei neuartigen CDR-Technologien.	BECCS, DACCS, beschleunigte Verwitterung, Pflanzenkohle.	Technologie-spezifische <b>Aufschläge oder Investitionszuschüsse</b> mit klarem Phase-out.
Keine langfristig gesicherten Eigentumsrechte an CO <sub>2</sub> -Speichern (Open Access).	BECCS, DACCS, Wiederaufforstung.	CDR Preis sollte <b>verringert</b> werden, um langfristige Knappheit der Senken einzupreisen.
CO <sub>2</sub> -Transport-Infrastruktur (Pipelines).	BECCS, DACCS.	Staat könnte erste Infrastrukturprojekte (ko-)finanzieren; Bepreisung der Infrastruktur sollte reguliert werden (natürliches Monopol).
Negative Umweltwirkungen (z.B. Landverbrauch, Wasserverbrauch, Artenvielfalt, Landleakage).	BECCS, Aufforstung, beschleunigte Verwitterung, Pflanzenkohle.	CDR-Preis sollte <b>verringert</b> werden bzw. Umweltwirkung sollte separat reguliert werden.
Positive Umweltwirkungen (z.B. Bodenfruchtbarkeit, lokales Klima durch Aufforstung oder Agroforstwirtschaft).	Aufforstung, Anreicherung Bodenkohlenstoff.	CDR-Preis sollte <b>erhöht</b> werden bzw. positiver Umwelteffekt sollte zusätzlich eingepreist/gefördert werden.

### **In welchen Regionen sollte CDR finanziert werden?**

Für die Klimawirkung der CO<sub>2</sub>-Entnahme spielt die räumliche Dimension zunächst keine Rolle. Solange eine permanente Speicherung sichergestellt werden kann, kann daher die CO<sub>2</sub>-Entnahme global erfolgen – und insbesondere dort, wo sie die geringsten Kosten aufweist. Die Förderung von CO<sub>2</sub>-Entnahme in anderen Ländern durch bilaterale Verträge zwischen Regierungen bedeutet allerdings auch erhebliche Finanztransfer in diese Länder. Wird dieser Transfer mit bestimmten Gegenleistungen gekoppelt, wie z.B. der Einführung/Anhebung von nationalen CO<sub>2</sub>-Preisen, lässt sich die Klimawirksamkeit weiter steigern.

Trotz der potenziellen Kostenvorteile einer global ausgerichteten Förderung von CO<sub>2</sub>-Entnahme kann ein Fokus auf Deutschland bzw. die EU zunächst sinnvoll sein:

1. Durch den frühzeitigen Aufbau einer Förderstruktur werden administrative Lerneffekte (zur Ausgestaltung von Fördersätzen, zum Monitoring etc.) erzielt. Diese sind auch für andere Länder wertvoll und könnten langfristig zu einer Optimierung der Förderarchitektur führen.
2. Bei der CO<sub>2</sub>-Entnahme sind negative Umweltwirkungen (z.B. bei der Landnutzung) sorgfältig zu berücksichtigen und eine permanente Speicherung sicherzustellen. Hier entsteht jedoch ein Informations- und Kontrollproblem gegenüber anderen Regierungen, das sich in der Praxis schwer lösen lässt.

### **Welche Möglichkeiten zum Offsetting/Linking zwischen CDR und Vermeidung (z.B. im ETS) sollte es geben?**

Durch ein Linking zwischen CO<sub>2</sub>-Märkten bzw. CO<sub>2</sub>-Preisen kommt es zu einer Angleichung der Preise. Eine Angleichung von Preisen kann potenziell die Kosten zur Erreichung von Klimaneutralität reduzieren. Eine Harmonisierung sollte daher ein langfristiges Ziel der Klimapolitik sein. In den Tabellen 3 und 4 werden bereits zahlreiche Gründe genannt, warum differenzierte CO<sub>2</sub>-Preise bzw. differenzierte Instrumente optimal sein können (z.B. Carbon Leakage oder indirekte Landnutzungsänderungen). Ein Linking von CO<sub>2</sub>-Entnahme mit den Emissionshandelssystemen in Deutschland und Europa sollte daher erst in Betracht gezogen werden, wenn der CO<sub>2</sub>-Markt für CO<sub>2</sub>-Entnahme ausreichend gut funktioniert. Andernfalls besteht das Risiko, dass ein fehlerhaftes Förderdesign auf alle verknüpften CO<sub>2</sub>-Märkte „durchschlägt“ und damit größere Fehlanreize setzen könnte, die auch den Vermeidungssektor betreffen. Dies erscheint insbesondere bei landbasierten Verfahren relevant, weil hier erhebliche Unsicherheiten über das Ausmaß und die Permanenz der CO<sub>2</sub>-Entnahme bestehen.

Darüber hinaus wird ein frühes Linking auch aus politökonomischer Perspektive als kritisch betrachtet: Können Emissionen kostengünstig durch CO<sub>2</sub>-Entnahme kompensiert werden, könnte der volkswirtschaftlich nötige Umbau der Wirtschaft verzögert werden. Insbesondere könnte sich die Politik dazu verleiten sehen, weniger ambitionierte CO<sub>2</sub>-Vermeidung zu betreiben, um damit die Kosten zur Erreichung der Klimaneutralität auf zukünftige Generationen (bzw. zukünftige Politiker) zu verschieben (McLaren et al. 2019).

### **Wie können Innovationen und Marktreife beschleunigt werden?**

Innovationen und technischer Fortschritt können dazu beitragen, Kosten und negative Umweltwirkungen von CO<sub>2</sub>-Entnahmepraktiken weiter zu senken. Unternehmen haben jedoch aus zwei Gründen zu geringe Anreize, um durch eigene Forschung und Entwicklung Innovationen zu kreieren bzw. in innovative Technologien zu investieren.

Zunächst stellen Innovationen ein (teilweise) öffentliches Gut dar, von dem alle profitieren, nicht nur der Innovator (Jaffe et al. 2003). Dies ist insbesondere bei Innovationen der Fall, die sich nicht durch Patente schützen lassen (z.B. landwirtschaftliche Praktiken). Weil der unternehmerische Wert einer Innovation geringer ist als der gesellschaftliche Wert, sind Firmen zu wenig innovativ. Hier können öffentlich

geförderte Programme wie F&E-Vorhaben, Finanzierung von Pilot- und Demonstrationsprojekten oder Forschungszuschüsse Innovationen beschleunigen.

Weiterhin existiert für Unternehmen eine hohe Unsicherheit darüber, ob und in welcher Höhe eine neue Technologie zur CO<sub>2</sub>-Entnahme in den Genuss einer Förderung kommt. Die Forschung zu Innovationen im Energie- und Automobilbereich bestätigt, dass hohe Energiepreise wesentlich zu Innovationen in energie- bzw. CO<sub>2</sub>-sparenden Technologien beitragen (Popp 2002, Aghion et al. 2016). Bei einer langfristig an CO<sub>2</sub>-Preisen ausgerichteten Förderarchitektur, die grundsätzlich technologieoffen ist, entsteht damit auch ein hoher finanzieller Anreiz für Innovationen. Dieser Anreiz ist umso stärker, je höher die in Zukunft erwarteten CO<sub>2</sub>-Preise sind.

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Handlungsoptionen herleiten:

1. Zuschüsse und Fördermittel für F&E-Vorhaben, Demonstrationsprojekte etc., die die Entwicklung und Diffusion neuartiger Technologien befördern. Diese Programme sollten nicht nur auf Technologien zur Entnahme abzielen, sondern auch auf Verfahren zur Speicherung, zum Monitoring und zur Verifizierung.
2. Langfristig angekündigte CO<sub>2</sub>-Mindestpreise für CO<sub>2</sub>-Entnahme, die einen technologie-neutralen Anreiz für Innovationen und Investitionen bieten.
3. Ein regelmäßiges Review-Verfahren, in dem nach klar definierten Kriterien neue Technologien als CO<sub>2</sub>-Entnahme-Technologie zugelassen und förderfähig werden.

### **Welche Maßnahmen sollten zu Monitoring, Verifizierung und Sicherstellung der Permanenz zum Tragen kommen?**

Ein präzises Monitoring der entnommenen Emissionsmengen und eine Verifizierung der dauerhaft gespeicherten Kohlenstoffmengen sind aus zwei Gründen essenziell. Erstens ist dies eine notwendige Voraussetzung dafür, den Klimaeffekt von CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren korrekt messen zu können und damit auch im nationalen wie internationalen Kontext belastbare Aussagen zu Netto-Emissionen bzw. zur Erreichung von Klimazielen tätigen zu können. Zweitens können problematische Anreize für Unternehmen entstehen, wenn sich die Vergütung zur CO<sub>2</sub>-Entnahme nicht möglichst exakt an den entnommenen und dauerhaft gespeicherten Emissionsmengen ausrichtet.

Bei Verfahren mit Abscheidung und (unterirdischer) Speicherung ist durch geologische Messung und Modellrechnungen sicherzustellen, dass kein CO<sub>2</sub> entweicht (IPCC 2005). Wegen der langen Zeiträume kann es zu Haftungsproblemen bei einer festgestellten Entweichung kommen, z.B. wenn die für die Speicherung zuständige Firma nicht mehr existiert oder insolvent geht. Bisherige Überlegungen zielen v.a. darauf ab, Finanzintermediäre an dem Risiko zu beteiligen, sodass diese auch eine Risikobewertung vornehmen und damit hohe Anreize zur sorgfältigen und dauerhaften Speicherung setzen (Held & Edenhofer 2009).

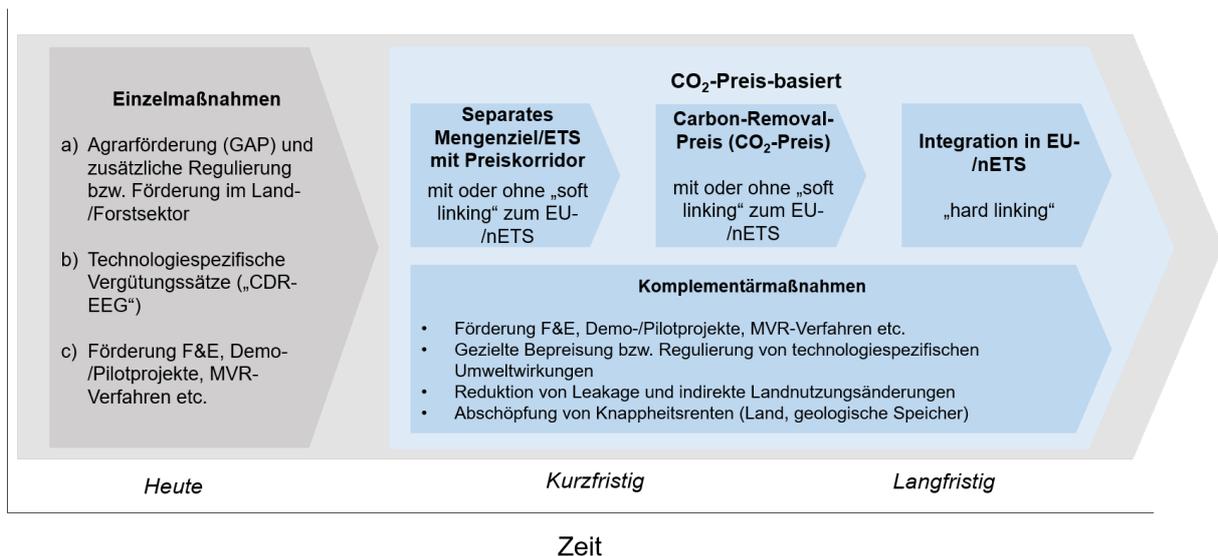
Bei landbasierter CO<sub>2</sub>-Bindung (Forstwirtschaft, Böden) ist wegen der diffusen Senkenstruktur eine exakte Messung des gespeicherten Kohlenstoffes weitaus aufwändiger und teurer. Der Kohlenstoffgehalt im Boden und in der Biomasse (wie z.B. in Wäldern) kann sehr heterogen sein, weswegen eine Vielzahl von räumlich verteilten Messungen für eine relativ geringe Menge an zusätzlich gespeichertem Kohlenstoff nötig wird (Jacobs et al. 2020, Wiesmeyer et al. 2020). Darüber hinaus sind weitere Messungen in regelmäßigen Zeitabständen nötig, um Änderungen im Kohlenstoffbestand zu erfassen. Durch neuere Messverfahren (z.B. mittels Fernerkundung) könnten sich die Kosten der Messung in Zukunft jedoch reduzieren. Eine Alternative zur Erfassung der landbasierten Kohlenstoffbestände stellt die präzise Messung von Kohlenstoffflüssen dar, die auch auf einer betrieblichen Basis erhoben werden könnten (Isermeyer et al. 2019). Diese ist zwar ebenfalls mit Kosten verbunden, könnte aber auch Synergieeffekte aufweisen zur Reduktion und Regulierung von anderen Treibhausgasen und Stoffflüssen (wie z.B. Stickstoff- und Phosphorüberschüsse).

Neben den genannten technologiespezifischen Herausforderungen einer präzisen Kohlenstoffmessung ist jedoch eine umfassende, alle Emissionen und Senken beinhaltete Treibhausgasbilanzierung essentiell, um Ausweicheffekte und problematische Anreize zu vermeiden (Isermeyer et al. 2019). Findet beispielsweise nur eine Messung der Zunahme von Kohlenstoff durch Aufforstung statt, könnten Waldflächen gerodet und wieder aufgeforstet werden. Auch könnten Waldflächen zur Produktion von Bioenergie mit anschließender Kohlenstoffabscheidung verwendet werden (Fajardy et al. 2018). Bodenkohlenstoff kann lokal durch eine regionale Verschiebung von organischem Kohlenstoff (z.B. Wirtschaftsdünger) aufgebaut werden, dem allerdings keine gesamtwirtschaftliche Zunahme an Bodenkohlenstoff gegenübersteht (Jacobs et al. 2020). Wird nur der Aufbau von Kohlenstoff gemessen (und bepreist), nicht aber der Abbau, entstehen damit erhebliche Fehlanreize.

## 3.2. Governance-Architekturen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme

### Überblick über Governance-Architekturen

Die oben angeführten Überlegungen führen zu zwei grundlegenden Governance-Architekturen, um CDR zu fördern und auszuweiten: (1) die Verwendung von Einzelmaßnahmen, um einzelne CDR-Technologien bzw. -Aktivitäten zu fördern sowie (2) ein preisbasierter Ansatz, bei dem ein CO<sub>2</sub>-Preis oder ein CDR-Referenzpreis das zentrale Instrument darstellt, ergänzt um zusätzliche Regulierungen oder Förderungen, die spezifische technologische, ökologische oder ökonomische Aspekte berücksichtigen (siehe Abbildung 8). Der preisbasierte Ansatz umfasst dabei auch die indirekte Bepreisung durch marktbasierende Mengeninstrumente, wie z.B. den Emissionshandel oder Auktionierungsverfahren für bestimmte Entnahmemengen.



**Abbildung 8. Übersicht über Governance-Strukturen, die auch über die Zeit entwickelt werden können, beginnend mit Einzelmaßnahmen im Landsektor (an einem CO<sub>2</sub>-Referenzpreis orientiert), dann ein separates Mengenziel zunächst für BECCS und DACCS, dann auch im Landsektor, und schlussendlich ein sektorübergreifender einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis.**

Der CO<sub>2</sub>-Preis-basierte Ansatz lässt sich wiederum in drei Formen differenzieren:

1. Einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis (einschl. des Vermeidungssektors) durch eine vollständige Integration in das europäische oder nationale ETS (indirekte Bepreisung). Dabei entsteht ein einheitlicher Kohlenstoffmarkt (siehe Rickels et al. 2020 für mögliche Implementierungsoptionen). Ein einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis ließe sich auch umsetzen direkt durch eine CO<sub>2</sub>-Steuer für Emissionen und eine Subvention für CO<sub>2</sub>-Entnahme (in gleicher Höhe pro Tonne CO<sub>2</sub>).

2. Eine indirekte Bepreisung durch ein separates Mengenziel (bzw. einen separaten Zertifikatehandel) für die CO<sub>2</sub>-Entnahme (McLaren 2019). Durch einen langfristig angekündigten Mindestpreis (im Zertifikatehandel bzw. für die Auktionierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmemengen) können die Investitionssicherheit erhöht werden und damit Investitionen und Innovationen induziert werden. Durch einen Höchstpreis werden hohe gesellschaftliche Kosten vermieden, wenn sich die CO<sub>2</sub>-Entnahme als schwierig und teuer herausstellt. Der Preiskorridor verbindet beide Vorteile (siehe Edenhofer et al. 2019). Prinzipiell kann durch Anpassung des Mengenziels bzw. durch 'Übertragung' von Emissionsrechten in andere Emissionshandelssysteme eine Preisangleichung durch den Regulierer vorgenommen werden („Soft Linking“).
3. Ein direkt gesetzter CO<sub>2</sub>-Preis für die Kohlenstoffentnahme. Hier würde – analog zu einer CO<sub>2</sub>-Steuer – ein über die Zeit ansteigender Festpreis gesetzt, mit dem jede entnommene Tonne CO<sub>2</sub> vergütet würde. Wenn dieser Preis sich am CO<sub>2</sub>-Preis anderer Handelssysteme (z.B. EU-/nETS) orientiert, kommt es zu einer Grenzkostenangleichung. Dadurch wird – zu einem gegebenen CO<sub>2</sub>-Preis im Vermeidungssektor – eine optimale Netto-Emissionsmenge erreicht.

### **Bewertung der Governance-Architekturen**

Ein Ansatz basierend auf Einzelmaßnahmen stellt zunächst den geringsten regulatorischen und politischen Aufwand dar. Denn er kann auf bestehenden Förder- und Regulierungspraktiken (z.B. in der Landwirtschaft) aufbauen. Im Landsektor ist zudem eine genaue und flächendeckende Messung der CO<sub>2</sub>-Entnahme durch Aufforstung oder die Erhöhung des Bodenkohlenstoffs bisher nicht kostengünstig möglich. Auch kann die Permanenz nicht sicher nachgewiesen werden. Die Förderung von Praktiken und Maßnahmen, die – im Durchschnitt – zu einer CO<sub>2</sub>-Entnahme führen, stellt daher einen pragmatischen Ansatz dar.

Durch die Verwendung von Einzelmaßnahmen ist eine kostengünstige Entnahme von CO<sub>2</sub> kaum sicherzustellen. Das bedeutet, dass für ein gegebenes finanzielles Fördervolumen weniger CO<sub>2</sub> entnommen und gespeichert wird, als es ökonomisch möglich wäre. Sobald präzise und kostengünstige Verfahren zur großflächigen Messung von Kohlenstoff in Böden und Wäldern zur Verfügung stehen, erscheint daher ein CO<sub>2</sub>-Preis-basierter Ansatz auch im Landsektor überlegen.

Allerdings bietet es sich auch bei ordnungspolitischen Maßnahmen oder bei Fördermaßnahmen an, kalkulatorische CO<sub>2</sub>-Preise zur Kosten-Nutzen-Abschätzung oder zur Berechnung von Förderprämien zu verwenden. Eine CO<sub>2</sub>-Komponente in Förderprämien für landwirtschaftliche Maßnahmen, die sich an einem CO<sub>2</sub>-Referenzpreis und der entnommenen CO<sub>2</sub>-Menge orientiert, erlaubt damit eine breite und zügige Steuerung der Entnahmemenge: Steigt der CO<sub>2</sub>-Referenzpreis (z.B. aufgrund ambitionierter Ziele oder höherer Vermeidungskosten in anderen Sektoren), würden gleichzeitig verschiedenste landwirtschaftliche Praktiken zur CO<sub>2</sub>-Entnahme stärker gefördert.

Bei den technologischen Ansätzen (BECCS, DACCS) lassen sich gespeicherte Mengen relativ gut verifizieren. Daher kann hier ein CO<sub>2</sub>-Preis-basierter Ansatz schon früh verfolgt werden. Die große Stärke des preisbasierten Ansatzes sind seine Kosteneffizienz (sofern spezifische Umweltwirkungen durch zusätzliche Maßnahmen abgedeckt sind), seine Steuerbarkeit (Ambitionsniveau kann durch Preisänderungen skaliert werden) und die Flexibilisierungsoptionen durch (Soft-)Linking mit anderen Kohlenstoffmärkten. Letzteres sollte jedoch erst angestrebt werden, wenn ein verlässliches Monitoring- und Verifizierungssystem aufgestellt ist und die CO<sub>2</sub>-Bepreisung im Entnahmebereich mit hoher Verlässlichkeit funktioniert. Andernfalls würden fehlerhafte Förderpraktiken (z.B. fehlerhaftes Monitoring, fehlende Permanenz) auf andere CO<sub>2</sub>-Märkte „durchschlagen“ und deren Wirksamkeit und Effizienz verringern.

Eine politische Herausforderung preisbasierter Anreizsysteme liegt in der Festsetzung und kontinuierlichen Anpassung der CO<sub>2</sub>-Preise bzw. der Entnahmemengen. Bei einer vollständigen Integration in das EU-ETS entfällt die Frage nach der Höhe des Preises für die CO<sub>2</sub>-Entnahme, weil sich

dieser aus dem Mengenziel ergibt. Bei einem separaten Mengenziel für die CO<sub>2</sub>-Entnahme werden Preise über Auktionierungsverfahren ähnlich wie beim Emissionshandel endogen aus dem (jährlichen) Entnahmeziel ermittelt. Bei einem Preiskorridor (oder entsprechend ausgestalteten Auktionierungsverfahren) muss die Politik jedoch explizit Mindest- und Höchstpreise setzen und diese über die Zeit anpassen. Die Politik muss also entweder Preise oder aber die Entnahmemengen (ggf. mit Mindest- und Höchstpreisen) festsetzen. Sie kann sich dabei an Modellrechnungen orientieren, die optimale Mengen bzw. Preise ausgeben.

### Offene Fragen

Die vorangegangenen Ausführungen stellen aufgrund des Forschungsstandes erste und vorläufige Überlegungen zur Ausgestaltung einer Förderpolitik für CO<sub>2</sub>-Entnahme dar. Für tieferegehende Analysen zur Gestaltung von Anreizsystemen und Politikinstrumenten wären weitere Forschungsarbeiten und Prüfaufträge zu folgenden Fragen nötig:

- Wie lassen sich gespeicherte CO<sub>2</sub>-Mengen und Permanenz großskalig messen (insbes. im Landbereich)?
- Wie sollten Haftungsfragen bei plötzlichem Entweichen bzw. Umwandlung von Kohlenstoffspeichern geklärt werden?
- Wie sollten relevante externe Effekte einzelner Technologien und Verfahren konkret berücksichtigt werden?
- Wie kann indirekter Landnutzungswandel durch Biomasseproduktion begrenzt werden? Wie kann insbesondere verhindert werden, dass durch den erhöhten landwirtschaftlichen Flächenbedarf Wälder und wertvolle Ökosysteme zerstört werden?
- Wie kann die Innovationsförderung optimal gestaltet werden?
- Welche Wechselwirkungen zu bestehenden Anreizsystemen (z.B. GAP, Gemeinsame Agrarpolitik der EU) sind zu berücksichtigen?

## 4. Wichtige Entscheidungen und Einstiegsmöglichkeiten

Die als erstes zu klärende Frage ist die des Entnahmeziels und ob man es vom Vermeidungsziel trennt. Kurz- und mittelfristig ist eine Trennung von CDR und Vermeidung auf der Ebene der Ziele und Preise aufgrund der in Kapitel 1 und 3 dargestellten Herausforderungen vorzuziehen (vor allem aufgrund der Unsicherheiten in der Permanenz und Speichermenge), während langfristig die Integration von CDR in den Emissionshandel der EU bzw. Deutschland angestrebt werden kann.

In zweiter Instanz ist die Art der Entnahme zu klären. Landbasierte Entnahmepraktiken könnten bereits bei einer Verschärfung der 2030-Minderungsziele mitgedacht werden. Ihre relativ niedrigeren Kosten und geringeren politischen Herausforderungen (z.B. Akzeptanz) machen sie zu Einstiegsluken, jedoch ist das Potential begrenzt. Außerdem müssen die Probleme bezüglich Reversibilität, Messung und Verifizierung zügig angegangen werden. Eine umfassende Strategie muss jedoch jetzt schon Techniken berücksichtigen, die erst später zum Einsatz kommen werden und die die geologische Speicherung beinhalten (CCS). Die politischen Herausforderungen könnten kurz- bis mittelfristig durch einen Fokus auf Offshore-Speicherung, die Nutzung internationaler Lagermöglichkeiten (z.B. Nordlicht-Projekt von

Equinor, Norwegen) oder vielleicht sogar Mineralisierung innerhalb Deutschlands adressiert werden. Längerfristig ist jedoch zu überlegen, wie auch die Akzeptanz für die Speicherung in geologischen Formationen Onshore durch erhöhte Transparenz und partizipative Modelle erhöht werden kann.

Weiterhin ist es angezeigt, so früh wie möglich damit anzufangen, eine umfassende CO<sub>2</sub>-Bilanzierung (und Bepreisung) im Landsektor einzuführen, durch F&E-Projekte Methoden zur Fernerkundung für Kohlenstoffspeicher zu fördern, Pilot- und Demonstrationsprojekte zur Speicherung zu fördern und Erfahrungen mit Monitoring- und Anreizsystemen zu sammeln. Auch ist zu bedenken: Während die Umsetzung landbasierter CO<sub>2</sub>-Entnahmen mit einer Reihe von oben identifizierten Herausforderungen einhergeht, besteht in Deutschland ein immenses Potential zu THG-Vermeidungen in diesem Bereich, insbesondere den Bodenkohlenstoffverlust betreffend.

Andere Länder haben für ihre Netto-Null-Strategien auch existierende biogene Punktquellen identifiziert, die durch eine Erweiterung mit CCS eine netto-negative Bilanz erreichen könnten. Schweden beispielsweise könnte so über die Hälfte seiner derzeitigen nationalen Emissionen ohne weitere Landnutzungsänderungen entfernen (Fuss & Johnsson 2021). In Deutschland jedoch sind, solche tiefhängenden Früchte (z.B. im Kontext bestehender Biogasanlagen) noch weitgehend unerforscht.

## Dank

Wir möchten Bernhard Osterburg, Leiter der Stabsstellen Klima und Boden am Thünen-Institut, unseren herzlichen Dank für seine Einschätzungen zu Biomasse-Flüssen und Bodenkohlenstoff aussprechen. Weiterer Dank geht an William Lamb, Constantino Dockendorf und Ulrich von Lampe des MCC für die tatkräftige Unterstützung bei Grafikarbeiten und Redigat.

## Glossar

Brutto-negative Emissionen	CO <sub>2</sub> -Entnahmen < anthropogene CO <sub>2</sub> -Emissionen, siehe auch Netto-Null-CO <sub>2</sub> -Emissionen.
CO <sub>2</sub> -Neutralität	Siehe Netto-Null-CO <sub>2</sub> -Emissionen.
Klimaneutralität	Zustand, in dem menschliche Aktivitäten keine Nettoauswirkungen auf das Klimasystem haben. Um einen solchen Zustand zu erreichen, müssten die Restemissionen mit der Emissionsentfernung (Kohlendioxid) in Einklang gebracht und regionale oder lokale biogeophysikalische Auswirkungen menschlicher Aktivitäten berücksichtigt werden, die beispielsweise die Oberflächenalbedo oder das lokale Klima beeinflussen.
Netto-negative Emissionen	CO <sub>2</sub> -Entnahmen > anthropogene CO <sub>2</sub> -Emissionen, siehe auch Netto-Null-CO <sub>2</sub> -Emissionen.
Netto-Null-CO <sub>2</sub> -Emissionen	Netto-Null-CO <sub>2</sub> -Emissionen werden erreicht, wenn die anthropogenen CO <sub>2</sub> -Emissionen weltweit durch

	anthropogene CO <sub>2</sub> -Entfernungen über einen bestimmten Zeitraum ausgeglichen werden. Netto-CO <sub>2</sub> -Nullemissionen werden auch als CO <sub>2</sub> -Neutralität bezeichnet.
Treibhausgasneutralität	Netto-Null-THG-Emissionen, siehe auch Netto-Null-CO <sub>2</sub> -Emissionen.

## Akronyme

Abkürzung	Bedeutung
BECCS	Bionenergy with Carbon Capture and Storage (Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und Speicherung)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CH <sub>4</sub>	Methan
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage (Direkte Abscheidung und Speicherung von CO <sub>2</sub> )
ETS	Emissionshandelssystem
EU-ETS	Europäisches Emissionshandelssystem
IAM	Integrated Assessment Model
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
NCS	Natural Climate Solutions (Natürliche Klimalösungen)
nETS	Nationales Emissionshandelssystem

## Referenzen

Aertsens, J., De Nocker, L., & Gobin, A. (2013). Valuing the carbon sequestration potential for European agriculture. *Land Use Policy*, 31, 584-594.

- Aghion, P., Dechezleprêtre, A., Hemous, D., Martin, R., & Van Reenen, J. (2016). Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry. *Journal of Political Economy*, 124(1), 1-51.
- Al-Mamoori A, Krishnamurthy A, Rownaghi AA, Rezaei F. (2017). Carbon Capture and Utilization Update. *Energy Technol*, 5, 834 – 849.
- Beuttler, C., Charles, L., & Wurzbacher, J. (2019). The role of direct air capture in mitigation of anthropogenic greenhouse gas emissions. *Frontiers in Climate*, 1, 10.
- BMU. 2012. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Studie (Schlussbericht BMU – FKZ 03MAP146), abgerufen am 10.02.2021 von [http://www.bmu.de/erneuerbare\\_energi-en/downloads/doc/48591.php](http://www.bmu.de/erneuerbare_energi-en/downloads/doc/48591.php).
- Böhringer, C., Balistreri, E. J., & Rutherford, T. F. (2012). The role of border carbon adjustment in unilateral climate policy: Overview of an Energy Modeling Forum study (EMF 29). *Energy Economics*, 34, 97-110.
- Busch, J. (2013). Supplementing REDD+ with Biodiversity Payments: The Paradox of Paying for Multiple Ecosystem Services. *Land Economics* 89:655-675.
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C.P.O. et al. Buildings as a global carbon sink. *Nat Sustain* 3, 269–276 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Creutzig, F., Ravindranath, N. H., Berndes, G., Bolwig, S., Bright, R., Cherubini, F., Chum, H., Corbera, E., Delucchi, M., Faaij, A., Fargione, J., Haberl, H., Heath, G., Lucon, O., Plevin, R., Popp, A., Robledo-Abad, C., Rose, S., Smith, P., ... Masera, O. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5), 916–944. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>
- Cuéllar-Franca, R. M. & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and utilisation technologies: a critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *J. CO<sub>2</sub> Utilization*, 9, 82–102.
- Doelman, J. C., Stehfest, E., van Vuuren, D. P., Tabeau, A., Hof, A. F., Braakhekke, M. C., ... & Lucas, P. L. (2020). Afforestation for climate change mitigation: Potentials, risks and trade-offs. *Global change biology*, 26(3), 1576-1591.
- Ecoinvent (2020). Life cycle inventory database v3.7., abgerufen am 10.02.2021 von [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- Edenhofer, O., Flachsland, C., Kalkuhl, M., Knopf, B., & Pahle, M. (2019). *Optionen für eine CO<sub>2</sub>-Preisreform* (No. 04/2019). Arbeitspapier.
- Fajardy, M., & Dowell, N. Mac (2018). The energy return on investment of BECCS : is BECCS a threat to energy security ? *Energy Environ. Sci.* 11, 1581–1594. doi:10.1039/C7EE03610H.
- Fischer, C., & Newell, R. G. (2008). Environmental and technology policies for climate mitigation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 55(2), 142-162.
- Frank, S., Schmid, E., Havlík, P., Schneider, U. A., Böttcher, H., Balkovič, J., & Obersteiner, M. (2015). The dynamic soil organic carbon mitigation potential of European cropland. *Global Environmental Change*, 35, 269-278.

- Fuss, S. & Johnsson, F. (2021) The BECCS Implementation Gap—A Swedish Case Study. *Front. Energy Res.* 8:553400. doi: 10.3389/fenrg.2020.553400.
- Fuss, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Jones, C. D., Lyngfelt, A., et al. (2020). Moving toward Net-Zero Emissions Requires New Alliances for Carbon Dioxide Removal. *One Earth* 3, 145–149. doi:10.1016/j.oneear.2020.08.002.
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Zamora, M., & Minx, J. C. (2018). Negative emissions - Part 2: Costs, potentials and side effects (C930, trans.). *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- Ghiat, I. & Al-Ansari, T. (2021). A review of carbon capture and utilisation as a CO<sub>2</sub> abatement opportunity within the EWF nexus. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 45, 101432.
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44), 11645–11650.
- Grübler, A. (2018). A Global Scenario of Low Energy Demand for Sustainable Development below 1,5°C without Negative Emission Technologies. *Nature Energy*.
- Held, H., & Edenhofer, O. (2009). CCS-Bonds as a superior instrument to incentivize secure carbon sequestration. *Energy Procedia*, 1(1), 4559–4566.
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., et al. (2019). The technological and economic prospect for CO<sub>2</sub> utilization and removal. *Nature*, 575, 87-97.
- Hilaire, J., Minx, J. C., Callaghan, M. W., & Edmonds, J. (2019). Negative emissions and international climate goals — learning from and about mitigation scenarios. *Climatic Change*, 157, 189 - 219. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02516-4>.
- Holz, C., Siegel, L. S., Johnston, E., Jones, A. P., & Sterman, J. (2018). Ratcheting ambition to limit warming to 1,5 °C—trade-offs between emission reductions and carbon dioxide removal. *Environmental Research Letters*, 13(6), 64028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac0c1>.
- Huppmann, D., Rogelj, J., Krey, V., Kriegler, E., & Riahi, K. (2018). A new scenario resource for integrated 1,5 °C research. *Nature Climate Change*, 8, 1027-1030.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In O.

- Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, & J. C. Minx (Eds.), & R. D1595 (Trans.), *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1,5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1,5 °C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- Isermeyer, F., Heidecke, C., & Osterburg, B. (2019). Einbeziehung des Agrarsektors in die CO<sub>2</sub>-Bepreisung (Issue 136). Johann Heinrich von Thünen-Institut. <https://doi.org/10.3220/WP1576588334000>.
- Jaffe, A. B., Newell, R. G., & Stavins, R. N. (2003). Technological change and the environment. In *Handbook of environmental economics* (Vol. 1, 461-516). Elsevier.
- Jacobs, A., Heidecke, C., Jumshudzade, Z., Osterburg, B., Paulsen, H. M., & Poeplau, C. (2020) Soil organic carbon certificates—potential and limitations for private and public climate action. *J Sustainable Organic Agric Syst* 70(2), 31–35.
- Kalkuhl, M., Franks, M., Lessmann, K. (2021). *Optimal Carbon Prices for Carbon Dioxide Removal*. Manuscript submitted to the EAERE Conference.
- Kalkuhl, M., Edenhofer, O., & Lessmann, K. (2012). Learning or lock-in: Optimal technology policies to support mitigation. *Resource and Energy Economics*, 34(1), 1-23.
- Kätelhön, A., Meys, R., Deutz, S., Suh, S. & Bardow, A. (2019). Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 116, 11187-11194.
- Krey, V., Luderer, G., Clarke, L., & Kriegler, E. (2014). Getting from here to there – energy technology transformation pathways in the EMF27 scenarios. *Climatic Change*, 123, 369–382. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0947-5>.
- Lemoine, D. (2020). Incentivizing negative emissions through carbon shares (No. 27880; NBER WORKING PAPER SERIES). <http://www.nber.org/papers/w27880>
- Mac Dowell, N., Fennell, P., Shah, N. et al. (2017). The role of CO<sub>2</sub> capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Clim Change* 7, 243–249. <https://doi.org/10.1038/nclimate3231>
- McLaren, D. P., Tyfield, D. P., Willis, R., Szerszynski, B., & Markusson, N. O. (2019). Beyond “Net-Zero”: A Case for Separate Targets for Emissions Reduction and Negative Emissions. In *Frontiers in Climate* (Vol. 1, 4). <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fclim.2019.00004>
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente, J. L., Wilcox, J., & del Mar Zamora Dominguez, M. (2018). Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>.

- Minx, J.C., Luderer, G., Creutzig, F., Davis, S.J., Edenhofer, O., Fisch-Romito, V., Fuss, S., Lamb, W.F., Steckel, J.C. (2021). A fast-growing dependence on negative emissions from carbon commitments. Under review at *Environmental Research Letters*.
- National Academies of Sciences, E. and M. (2019). Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration. In *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration*. <https://doi.org/10.17226/25259>
- Nemet, G. F., Callaghan, M. W., Creuzig, F., Fuss, S., Hartmann, J., Hilaire, J., Lamb, W. F., Minx, J. C., Rogers, S., & Smith, P. (2018). Negative emissions - Part 3: Innovation and upscaling. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063003..
- Overmars, K. P., Stehfest, E., Ros, J. P. M., & Prins, A. G. (2011). Indirect land use change emissions related to EU biofuel consumption: an analysis based on historical data. *Environmental Science & Policy*, 14(3), 248–257.
- Plevin, R. J., Jones A.D., Torn, M.S., Gibbs, H.K. (2010) Greenhouse gas emissions from biofuels' indirect land use change are uncertain but may be much greater than previously estimated *Environ. Sci. Technol.*, 44, 8015–21.
- Popp, D. (2002). Induced innovation and energy prices. *American economic review*, 92(1), 160-180.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.*
- Rickels, W., Proelß, A., Geden, O., Burhenne, J., and Fridahl, M. (2020). The future of (negative) emissions trading in the European Union, Kiel, Germany. Kiel Working Paper 2164, Sept 2020.
- Roe, S., Streck, C., Obersteiner, M. *et al.* Contribution of the land sector to a 1,5 °C world. *Nat. Clim. Chang.*, 9, 817–828 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0591-9>.
- Sant'Anna, M. C. B. (2019). *How green is sugarcane ethanol?* (No. 807). EPGE Brazilian School of Economics and Finance-FGV EPGE (Brazil).
- Searchinger, T. D., Hamburg, S. P., Melillo, J., Chameides, W., Havlik, P., Kammen, D. M., Likens, G. E., Lubowski, R. N., Obersteiner, M., Oppenheimer, M., Philip Robertson, G., Schlesinger, W. H., & David Tilman, G. (2009). Fixing a Critical Climate Accounting Error. *Science*, 326(5952), 527–528. <https://doi.org/10.1126/science.1178797>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M. *et al.* (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Clim Change*, 7, 395–402.
- Smith, P., J. Nkem, K. Calvin, D. Campbell, F. Cherubini, G. Grassi, V. Korotkov, A.L. Hoang, S. Lwasa, P. McElwee, E. Nkonya, N. Saigusa, J.-F. Soussana, M.A. Taboada (2019a). Interlinkages Between Desertification, Land Degradation, Food Security and Greenhouse Gas Fluxes: Synergies, Trade-offs and Integrated Response Options. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla et al. (eds.)]. In press.
- Smith, P., Adams, J., Beerling, D. J., Beringer, T., Calvin, K. V, Fuss, S., Griscom, B., Hagemann, N., Kammann, C., Kraxner, F., Minx, J. C., Popp, A., Renforth, P., Vicente Vicente, J. L., & Keesstra, S. (2019b). Land-Management Options for Greenhouse Gas Removal and Their Impacts on

- Ecosystem Services and the Sustainable Development Goals. *Annual Review of Environment and Resources*, 44(1), 255–286.
- Strefler, J., Amann, T., Bauer, N., Kriegler, E., & Hartmann, J. (2018). Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034010.
- Teichmann, I. (2014) Technical Greenhouse-Gas Mitigation Potentials of Biochar Soil Incorporation in Germany. DIW Berlin Discussion Paper, No.1406, <https://doi.org/10.2139/ssrn.2487765>
- The Royal Society (2018). Greenhouse Gas Removal. Report by the UK Royal Society and Royal Academy of Engineering.
- Umweltbundesamt (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050.
- Umweltbundesamt (2020): Bilanz 2019: CO<sub>2</sub> Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter.
- Vangkilde-Pedersen, T., Kirk, K., Smith, N., Maurand, N., Wojcicki, A., Neele, F., ... & Lyng Anthonsen, K. (2009). EU GeoCapacity–Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide. *Project no. SES6-518318*.
- van Vuuren, D., Stehfest, E., Gernaat, D., van den Berg, M., Bijl, D. L., de Boer, S., Daioglou, V., Doelman, J., Edelenbosch, O., Harmsen, M., Hof, A., & van Sluisveld, M. (2018). Alternative pathways to the 1,5° target reduce the need for negative emission technologies. *Nature Climate Change*, 8, 391 - 397.
- Wiesmeier, M., Mayer, S., Paul, C., Helming, K., Don, A., Franko, U., ... & Kögel-Knabner, I. (2020). CO<sub>2</sub>-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. *BonaRes Series*, 1, 1-24.
- Zimmermann, A., Wunderlich, J., Müller, L. et al. (2020). Techno-Economic Assessment Guidelines for CO<sub>2</sub> Utilization. *Front. Energy Res.*, 8:5.

