

# CO<sub>2</sub>-Entnahmen: Notwendigkeit und Regulierungsoptionen

Studie im Auftrag der  
Wissenschaftsplattform Klimaschutz

# Impressum

## **Autorinnen und Autoren**

Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH  
EUREF-Campus 19 / 10829 Berlin  
E-Mail: [director@mcc-berlin.net](mailto:director@mcc-berlin.net)  
[mcc-berlin.net](http://mcc-berlin.net)

Prof. Dr. Sabine Fuss (MCC), Friedemann Gruner (MCC), Dr. Jerome Hilaire (PIK),  
Prof. Dr. Matthias Kalkuhl (MCC), Jonas Knapp (PIK), Dr. William Lamb (MCC),  
Anne Merfort (PIK), Henrika Meyer (MCC), Prof. Dr. Jan C. Minx (MCC), Dr. Jessica Strefler (PIK)

## **Zitierhinweis für diese Publikation**

Fuss, S., Gruner, F., Hilaire, J., Kalkuhl, M., Knapp, J., Lamb, W., Merfort, A., Meyer, H., Minx, J. C. und Strefler, J. (2021): CO<sub>2</sub>-Entnahmen: Notwendigkeit und Regulierungsoptionen. Studie im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz. Berlin

## **Disclaimer**

Diese Studie wurde beauftragt und finanziert von der Wissenschaftsplattform Klimaschutz mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Die Ergebnisse und Aussagen in dieser Publikation liegen in der alleinigen Verantwortung der Autorinnen und Autoren und reflektieren nicht notwendigerweise die Sichtweise der Wissenschaftsplattform Klimaschutz.

Wissenschaftsplattform Klimaschutz (WPKS)  
Geschäftsstelle der WPKS  
DLR Projektträger  
Sachsendamm 61  
10829 Berlin  
E-Mail: [wpks@dlr.de](mailto:wpks@dlr.de)  
[wissenschaftsplattform-klimaschutz.de](http://wissenschaftsplattform-klimaschutz.de)

Stand  
November 2021

# Inhaltsübersicht

Kurzfassung .....	5
Einleitung .....	7
<b>1. Herausforderungen und Hürden der Skalierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen .....</b>	<b>8</b>
1.1. CO <sub>2</sub> -Entnahmenachfrage: Auswertung der Szenarienliteratur .....	10
1.1.1. Globale Szenarien .....	10
1.1.2. Europäische Szenarien .....	11
1.1.3. Einordnung in den deutschen Kontext .....	12
1.1.4. Ebenenübergreifende Einsichten aus der Literatur .....	14
1.2. CO <sub>2</sub> -Entnahmeangebot: Definition, Konzepte und Bewertung der Technologien und Praktiken .....	16
1.2.1. Definitionen und Konzepte .....	16
1.2.2. Bewertung der einzelnen CO <sub>2</sub> -Entnahmemaßnahmen .....	18
1.2.3. Überblick technologieübergreifender Problematiken .....	32
<b>2. Regulierungsoptionen für CO<sub>2</sub>-Entnahmen .....</b>	<b>32</b>
2.1. Konzeptioneller Rahmen für Anreizmechanismen .....	32
2.2. Grundlegende Instrumente zur Förderung der CO <sub>2</sub> -Entnahme .....	34
2.2.1. CO <sub>2</sub> -Bepreisung .....	34
2.2.2. Weitere Instrumente .....	36
2.3. Komplementäre Politikinstrumente .....	38
2.3.1. Additionalität und Carbon Leakage .....	38
2.3.2. Weitere Umweltwirkungen .....	39
2.3.3. Verteilungswirkungen .....	39
2.3.4. Innovationen .....	40
2.4. Programme zur CO <sub>2</sub> -Entnahme .....	42
2.5. Governance-Optionen für die Förderung von CO <sub>2</sub> -Entnahmen .....	46
<b>3. Fazit .....</b>	<b>49</b>
Dank .....	51
Glossar und Akronyme .....	51
Referenzen .....	52
Anhang .....	64



# Kurzfassung

Herausforderungen und Hürden der Skalierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen

## Notwendigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen

- CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre sind im Rahmen des Klimaschutzes aus zwei Gründen notwendig: 1) Kompensation von Restemissionen, die nicht oder nur unter sehr hohen Kosten vermieden werden können; 2) „Rückzahlung der CO<sub>2</sub>-Schuld“ einer temporären CO<sub>2</sub>-Budgetüberschreitung durch Nettoentnahmen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre (netto-negative Emission). Beide sind im deutschen Klimaschutzgesetz angelegt.
- Die wissenschaftliche Literatur zu Klimaschutzszenarien betont die Notwendigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre, insbesondere um die ambitioniertesten Klimaschutzziele wie das 1,5°C-Ziel zu erreichen. Doch auch für die Erreichung des 2°C-Ziels werden in fast allen Szenarien CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien großskalig ausgebaut. Der systematische Ausbau von Technologien und Praktiken zur CO<sub>2</sub>-Entnahme ist notwendig und muss wegen der langen Innovations- und Investitionszyklen sowie der noch zu etablierenden Governance-Architektur zeitnah erfolgen. Obwohl verschiedene Technologien derzeit noch teuer sind, würde eine verspätete Hochskalierung noch höhere Kosten verursachen. Diese entstehen insbesondere aus der Notwendigkeit eines schnellen Ausbaus von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien, die ihr Kostenreduktionspotential noch nicht durch entsprechende Lern- und Skalierungsprozesse realisieren konnten. Die erforderlichen Emissionsreduktionsraten zeigen nämlich, dass selbst bei einem erheblichen Ausbau der CO<sub>2</sub>-Entnahmen nicht auf die schnelle und ambitionierte Vermeidung von Emissionen verzichtet werden kann. CO<sub>2</sub>-Entnahmen können daher keine stringenter Klimaschutzmaßnahmen ersetzen, sondern v.a. dazu beitragen, ökonomische Kosten und deren soziale Auswirkungen zu verringern, die durch die Emissionsvermeidung in Bereichen mit extrem hohen Vermeidungskosten entstehen könnten. Weiterhin riskiert man mit einem zu späten Ausbau von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien das Einhalten von Klimazielen. Deutschland als Technologie- und Innovationsstandort könnte bei der Etablierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien eine wichtige Rolle spielen.
- Die Literatur zeigt, dass eine schnelle Reduktion von Treibhausgasemissionen und ambitionierte Maßnahmen zur Einsparung von Energie die notwendigen CO<sub>2</sub>-Entnahmemengen für die Erreichung des 1,5°C-Ziels noch begrenzen können. Verzögerungen ambitionierter Klimapolitik erhöhen dagegen die Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen. D.h., auch wenn die Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen bereits gegeben ist, kann zumindest das Ausmaß der Abhängigkeit noch in einem bestimmten Umfang beeinflusst werden. Dies erfordert jedoch beherzte, internationale Klimapolitik.
- Es besteht eine substantielle Innovationslücke bei der Entwicklung und dem Ausbau von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien. Zwar sind diese mengenmäßig vor allem in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts von Bedeutung, jedoch liegt der wichtigste Zeitraum für die Einführung von CO<sub>2</sub>-Entnahmooptionen zwischen 2030 und 2050. Mit Blick auf das deutsche Klimaschutzgesetz müssen CO<sub>2</sub>-Entnahmooptionen schon bis 2040 in relevanten Mengen aufskaliert worden sein. Angesichts der Tatsache, dass in der breiteren Innovationsliteratur immer wieder festgestellt wird, dass die Entwicklung und Einführung neuer Technologien lange Zeiträume in Anspruch nimmt (mehrere Dekaden), wird die Dringlichkeit der Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien weitgehend verkannt. Diese Dringlichkeit bei Technologieentwicklung und -ausbau spiegelt sich weder im Großteil der wissenschaftlichen Literatur, noch im internationalen, europäischen und deutschen Klimaschutz wider. Erste breitere Förderprogramme für Demonstrationsprojekte einzelner Regierungen, aber auch der

Privatwirtschaft sind möglicherweise Anzeichen für eine zunehmende Anerkennung der Herausforderung; der Umfang der Förderung ist jedoch weiterhin gering.

### **Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Entnahme**

- Für die Definition von CO<sub>2</sub>-Entnahmen sollten flexible Konzepte genutzt werden, die die Hochskalierung, die Bindungsdauer sowie die Reversibilität berücksichtigen, da arbiträre Schwellenwerte es erschweren, alle untersuchten Optionen gleichermaßen abzubilden.
- Eine Unterteilung der Methoden für CO<sub>2</sub>-Entnahmen in naturnahe und technologische Optionen ist inadäquat, da viele Optionen weder komplett in die eine noch die andere Kategorie passen, insbesondere Technologien der CO<sub>2</sub>-Nutzung oder auch BECCS. Zielführender ist eine Unterteilung entlang der finalen Destination des CO<sub>2</sub> (Atmosphäre, Lithosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre).
- Nachdem dieses Gutachten auch die standardmäßig diskutierten CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden wie BECCS und Wiederaufforstung einordnet, befasst es sich auch mit Optionen wie Pflanzenkohle und beschleunigte Verwitterung, die erst in den letzten Jahren mehr Aufmerksamkeit erhalten haben (sowohl an der Schnittstelle von Wissenschaft und Politik als auch durch neue Start-Ups), und arbeitet deren relevanten Potentiale heraus. Andere Optionen, insbesondere im Zusammenhang mit einer vergrößerten Ozeansenke, wurden in diesem Gutachten nicht bewertet, werden aber perspektivisch von aktuell anlaufenden Projekten in diesem Bereich näher beleuchtet werden.

### **Regulierungsoptionen für CO<sub>2</sub>-Entnahmen**

- Die Förderung und Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Entnahmekapazitäten sollte in Deutschland über eine möglichst große Vielfalt an Technologien erfolgen: Erste Szenarien für Deutschland zeigen Restemissionen von 37-73 MtCO<sub>2</sub>-Äq, die durch CO<sub>2</sub>-Entnahmen zu kompensieren sind. Zur kosteneffektiven, aber auch sicheren Erreichung solcher Mengen bedarf es eines Portfolios an Technologien. Es ist sehr unklar, ob der im deutschen Klimaschutzgesetz angelegte Fokus bei der CO<sub>2</sub>-Kompensation auf dem Landsektor diese Entnahmemengen tatsächlich bereitstellen kann, selbst unter Annahme ambitioniertester Ziele für die Restemissionen. Zudem binden viele dieser Entnahmeoptionen das CO<sub>2</sub> weniger langfristig als Alternativen (geologischer Speicherung; Mineralisierung) und sind störungsanfälliger (Reversibilität). Der langfristige Ausbau von CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen sollte somit technologisch breit angelegt sein, aber perspektivisch kritische Aspekte wie CO<sub>2</sub>-Bindungsdauer, Reversibilität, Aufwand für den Senkenerhalt, positive und negative Seiteneffekte sowie Innovationspotential (Kostenreduktionen) in den Blick nehmen.
- Die Förderung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen mittels CO<sub>2</sub>-Bepreisung stellt perspektivisch ein effektives Instrument dar; insbesondere lassen sich bei einer umfassenden Berücksichtigung von Emissionen im Landsektor damit am effektivsten problematische indirekte Landnutzungsänderungen vermeiden und ein kostenoptimales Portfolio an Entnahme-Technologien erzielen. Die CO<sub>2</sub>-Bepreisung kann dabei über einen separat festgesetzten Preis oder über ein separat festgesetztes Mengenziel (reverse auctioning) oder langfristig über die Integration in ein erweitertes Emissionshandelssystem erfolgen. Es bedarf separater Instrumente, die positive Umweltwirkungen (wie z.B. Erhöhung der Biodiversität durch bestimmte Maßnahmen zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffs) zusätzlich honorieren und negative Umweltwirkungen (wie z.B. Stickstoffüberschüsse bei Energiepflanzenanbau für BECCS) sanktionieren.
- Bis zum Aufbau eines umfassenden Monitoring- und Bepreisungssystems im Landsektor könnte an bestehende Fördermaßnahmen (z.B. im Rahmen der GAP und der neu eingeführten Eco-Schemes) angeknüpft und landbasierte CO<sub>2</sub>-Senken gefördert werden. Bei landintensiven Verfahren (Aufforstung, BECCS, Pflanzenkohle) sind zusätzliche Maßnahmen zur Eindämmung

indirekter Landnutzungseffekte notwendig. Insbesondere sollte zeitnah Klarheit geschaffen werden, wie groß der Anteil der Reststoffe ist, die ohne Nachfrageeffekte für BECCS und Pflanzenkohle eingesetzt werden könnten.

- Technologische Verfahren, die derzeit noch teuer sind, wie z.B. die direkte Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> sollten im Rahmen der Innovationsförderung und der Schaffung von Nischenmärkten durch separat auktionierte Entnahmemengen gefördert werden. Um notwendige Investitionen in Forschung, Entwicklung und Infrastruktur zu tätigen, sollte die Förderhöhe daher anfänglich über den aktuellen Grenzvermeidungskosten liegen, perspektivisch aber bei Marktreife vor allem über die CO<sub>2</sub>-Bepreisung erfolgen. Verfahren zur beschleunigten Verwitterung durch Mineralisierung könnten bereits zeitnah über eine separate CO<sub>2</sub>-Bepreisung gefördert werden.

## Einleitung

Die Erkenntnis, dass für das Erreichen des Pariser Klimaziels (UNFCCC 2015) bereits Mitte des Jahrhunderts die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei null angelangt sein müssen (IPCC 2018, 2019), hat das Augenmerk der Entscheidungsträger:innen verstärkt auf die Frage gerichtet, wie mit den Emissionen umzugehen ist, die in dem notwendigen Umfang nicht schnell genug oder nur unter sehr hohen Kosten heruntergefahren werden können (Minx et al. 2018) – die sogenannten Restemissionen. Technologien und Praktiken, die das CO<sub>2</sub>, das bereits emittiert wurde, wieder aus der Atmosphäre entfernen können (Fuss et al. 2018), spielen daher in der Diskussion um CO<sub>2</sub>-Neutralität eine zunehmend große Rolle.

Dieses Gutachten bietet eine Synthese des derzeitigen Wissensstands zum Thema CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre im Rahmen des Ziels der Klimaneutralität. Das Gutachten gliedert sich zunächst in zwei Hauptteile (Sektionen 1 und 2). Im ersten Teil (Sektion 1) werden die Herausforderungen und Hürden der Skalierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen beleuchtet. Dazu wird zunächst die Szenarienkultur auf globaler, europäischer und deutscher Ebene ausgewertet, insbesondere im Hinblick auf die Restemissionen Mitte dieses Jahrhunderts, um die Notwendigkeit und den Umfang von CO<sub>2</sub>-Entnahmen zur Erreichung des Pariser Klimaziels zu verstehen. Der Ausgleich von Restemissionen ist aber nur ein Grund, der in der wissenschaftlichen Literatur für die Notwendigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen angeführt wird. Ein zweiter Grund ist die Verspätung beim Klimaschutz, die sich in vielen Szenarien in einem zwischenzeitlichen „Überschießen“ des verbleibenden CO<sub>2</sub>-Budgets niederschlägt. Dieser Überschuss muss dann nach 2050 mit globalen netto-negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen wieder kompensiert werden und kann so die Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Entnahmen erhöhen. Mit einem besseren Verständnis der Nachfrageseite, wendet sich das Gutachten dann den Entnahmetechnologien und -praktiken zu, und ordnet qualitativ Potentiale, aber auch den Entwicklungsstand, die Sicherheit und den Zeithorizont der CO<sub>2</sub>-Bindung sowie Nachhaltigkeitswirkungen und Akzeptanz in den deutschen Kontext ein, zu dem noch große Forschungslücken bestehen.

Der zweite Hauptteil (Sektion 2) befasst sich dann mit der möglichen Regulierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen und baut auf den im ersten Hauptteil identifizierten Herausforderungen auf. Konkret wird zunächst ein konzeptioneller Rahmen für Anreizmechanismen entwickelt, der zum einen dem Umstand Rechnung trägt, dass CO<sub>2</sub>-Entnahmen bestimmte Charakteristika mit öffentlichen Gütern teilen, zum anderen auch die zahlreichen weiteren Externalitäten, die mit CO<sub>2</sub>-Entnahmen einhergehen, berücksichtigt. Dementsprechend wird im Weiteren zuerst der Wissensstand zu grundlegenden Politikinstrumenten bewertet und im zweiten Schritt komplementäre Instrumente diskutiert, die die Externalitäten adressieren. Da sich hier viele Wissenslücken auftun, werden außerdem aktuelle Erfahrungen und Projekte verschiedener Länder herangezogen, um den Raum der Optionen besser auszuleuchten. Im zweiten

Hauptteil stehen weiterhin auch die Anschlussfähigkeit von Instrumenten auf EU und deutscher Ebene sowie der Vorschlag eines Phasenmodells im Fokus.

Der Schlussteil diskutiert die wichtigsten Erkenntnisse des Gutachtens.

# 1. Herausforderungen und Hürden der Skalierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen

In diesem Kapitel werden die Herausforderungen und Hürden in der Entwicklung und Skalierung von Entnahmetechnologien und -praktiken bewertet, das heißt, es entspricht den Resultaten von Arbeitspaket 1A. In Sektion 1.1 wird das Thema der Skalierung von der Nachfrageseite her aufgerollt. CO<sub>2</sub>-Entnahmen können hierbei aus zwei Gründen nachgefragt werden: (i) Zum Ausgleich von Restemissionen, um die Emissionen rechtzeitig auf netto-null herunterfahren zu können (z.B. P1 in Abbildung 1); (ii) um nach einem Überschießen des Ziels durch eine netto-negative Emissionsbilanz den Temperaturanstieg auf 1,5°C zurückzufahren (z.B. P4 in Abbildung 1). Abbildung 2 zeigt den Prozess auf, der der Bildung der Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Entnahmen zugrunde liegt.

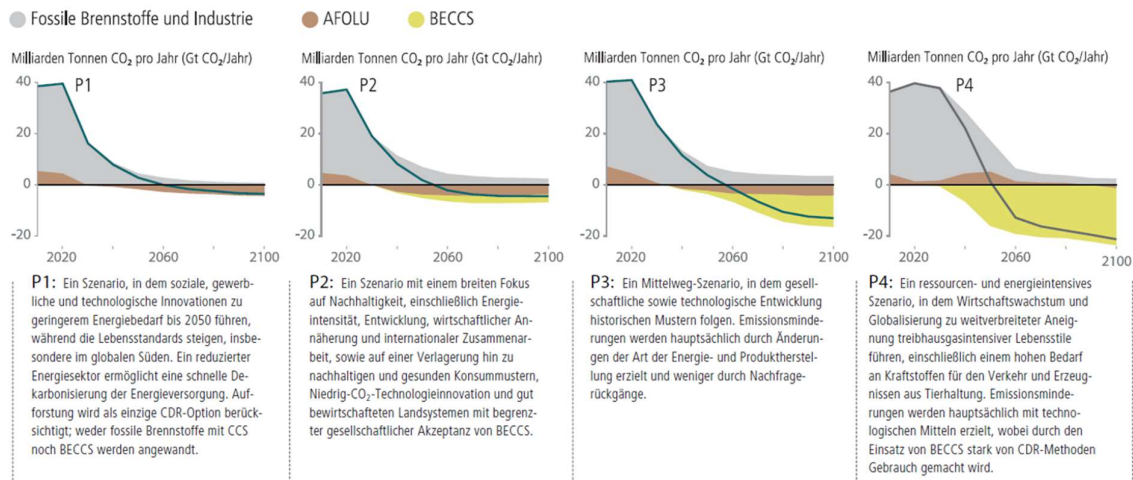


Abbildung 1: Illustrative Klimastabilisierungspfade (Quelle: basiert auf IPCC 2018)

Die langfristige Grenze für die globale Erwärmung (Temperaturänderung,  $\Delta T$ ) ist eine gesellschaftliche Entscheidung, die durch wissenschaftliche Erkenntnisse informiert wird, z.B. über die Klimaauswirkungen verschiedener Temperaturerhöhungen. Wie empfindlich das Klima auf höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen reagiert, impliziert ein Konzentrationsziel, das in ein verbleibendes CO<sub>2</sub>-Budget übersetzt werden kann. Die Wissenschaft kann dann für weitere gesellschaftliche Überlegungen und politische Entscheidungen mehrere Pfade entwickeln, die das CO<sub>2</sub>-Budget auf verschiedenen Wegen einhalten, weil sie mit unterschiedlichen Annahmen und Auswirkungen einhergehen (z.B. viel oder wenig CO<sub>2</sub>-Entnahme, vgl. Szenarien 1 und 4 in Abbildung 1).



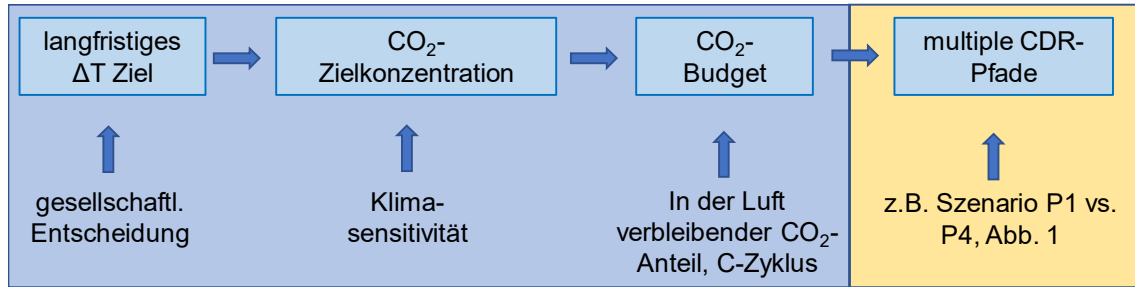


Abbildung 2: Bestimmung der Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Entnahmen (Quelle: angepasst von Fuss et al. 2020).

Die auf globaler, europäischer und deutscher Ebene zur Verfügung stehenden Szenarien, die darin abgebildeten Restemissionen und deren Einordnung in den Klimaschutz-Diskurs geben somit Aufschluss über die Nachfrageseite von CO<sub>2</sub>-Entnahmen. Resultat von 1.1 ist eine Einschätzung der Notwendigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen sowie der Gangbarkeit verschiedener Netto-Null-Pfade, inklusive der Zielkonflikte zwischen Entnahmemengen und den Kosten des Klimaschutzes.

In Sektion 1.2 wird dann die Entnahme-Angebotsseite beleuchtet. Hierzu werden zunächst eine Definition und Taxonomie für die verschiedenen Methoden der CO<sub>2</sub>-Entnahme eingeführt und die Problematik der Anrechnung kritisch reflektiert, um auch die Anschlussfähigkeit der später vorgeschlagenen Instrumente kontextualisieren zu können.

Folgende Auswahl an Entnahmetechnologien und -praktiken werden im Rahmen dieses Gutachtens bewertet – hierbei geht die Einschätzung über die üblichen Kriterien der Potentiale und Kosten hinaus und schließt auch Umweltauswirkungen, Permanenz und Herausforderungen des Monitorings mit ein:

- (Wieder-)Aufforstung/Renaturierung, Forstmanagement, inklusive der Wiedervernässung von Mooren
- Kohlenstoffspeicherung im Boden durch Pflanzenkohle
- andere landwirtschaftliche Methoden zur Anreicherung von Bodenkohlenstoff
- Bioenergie mit Abscheidung und Speicherung des CO<sub>2</sub> (BECCS)
- Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)
- beschleunigte Verwitterung
- CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung (CCU) – im Hinblick auf Arten der Pfade und deren Implikationen für Regulierung.

Problematiken wie „moral hazard“ werden technologieübergreifend diskutiert. Resultat von 1.2 ist eine tentative Einordnung verschiedener Entnahmeoptionen für Deutschland (wegen deutschlandspezifischer Lücken in der Literatur teilweise auf Basis global orientierter Literatur).

# 1.1. CO<sub>2</sub>-Entnahmenachfrage: Auswertung der Szenarienliteratur

## 1.1.1. Globale Szenarien

Die Notwendigkeit und Rolle von CO<sub>2</sub>-Entnahmen für die Erreichung ambitionierter Klimaschutzziele ist nicht erst seit dem Sonderbericht des Weltklimarats zu 1,5°C globaler Erwärmung (IPCC SR1.5, 2018) Diskussionsgegenstand. Auch die 2°C-Szenarien, die im fünften Sachstandsbericht (IPCC AR5, 2014) ausgewertet wurden, zeigten bereits eine Zunahme der Relevanz von CO<sub>2</sub>-Entnahmen (Clarke et al. 2014), obwohl noch eine größere Flexibilität bestand, das Temperaturziel mit sehr begrenzten Entnahmemengen zu erreichen. Fortschreitende Verzögerungen stringenterer Klimaschutzmaßnahmen und ein ambitionierteres Klimaziel machen es aber mittlerweile unmöglich, ohne CO<sub>2</sub>-Entnahmen auszukommen. Dies lässt sich klar aus der Gesamtheit der im SR1.5 bewerteten Pfade ablesen, die in Abbildung 3 aufgezeigt werden. Selbst in Szenarien, die explizit versuchen, höhere Klimaschutzpotenziale auf der Nachfrageseite zu heben (z.B. beim Energieverbrauch im Falle von Grübler et al. 2018 oder unter anderem durch eine Kombination von sonst wenig betrachteten Maßnahmen wie Lebensstiländerung, landwirtschaftlicher Intensivierung, kultiviertem Fleisch, und moderater Bevölkerungsentwicklung im Falle von van Vuuren et al. 2018), werden bis 2100 noch etwa 100 GtCO<sub>2</sub> entnommen. Das ist um einen Faktor 10 geringer als das, was am oberen Ende des Spektrums aus den Szenarien entnommen werden kann, aber mit sehr relevanten Herausforderungen verknüpft, was die Skalierung betrifft. Insbesondere wird in Abbildung 3 deutlich, dass schon vor 2050 in vielen globalen Szenarien, die den Klimawandel auf deutlich unter 2°C begrenzen, bereits mehrere GtCO<sub>2</sub> jährlich aus der Atmosphäre entnommen und sicher gespeichert werden, was auch Herausforderungen der Finanzierung mit sich bringt.

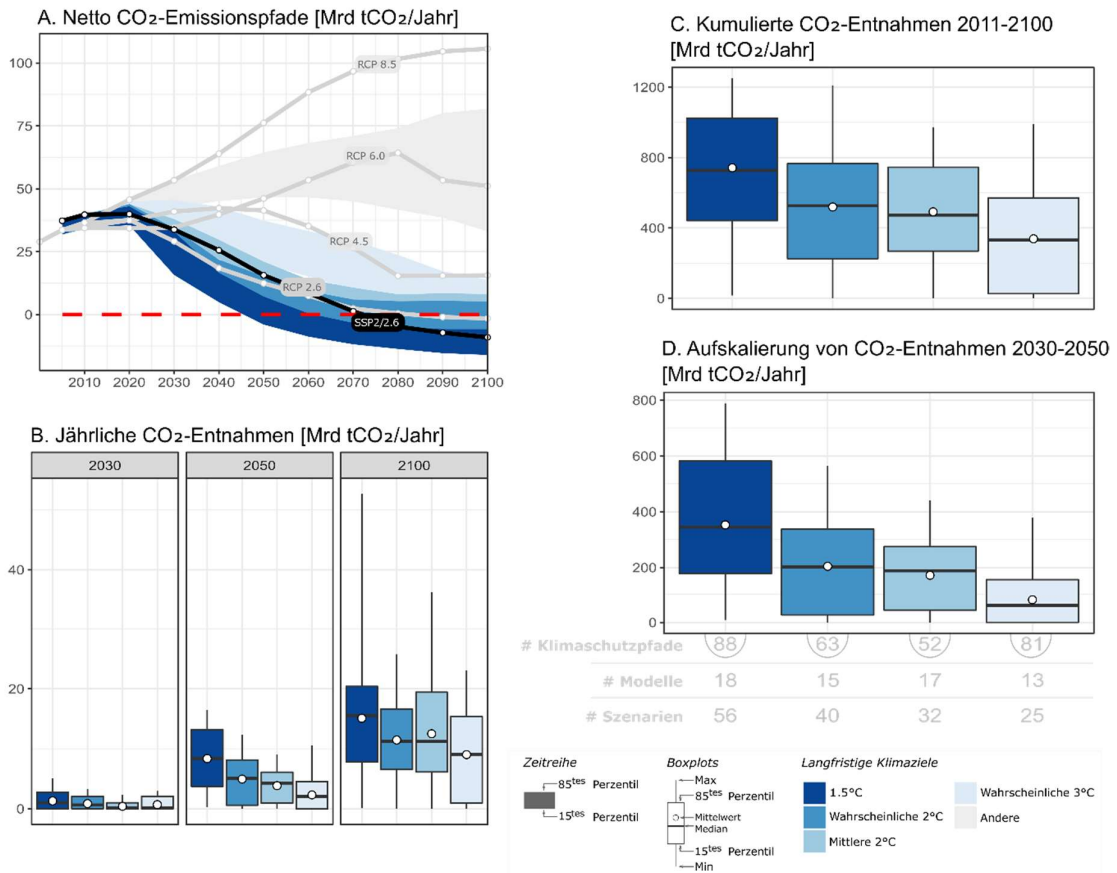


Abbildung 3: Globale 1,5°C-Pfade (IPCC 2018, SR1.5 Database).

Zusätzlich zur Notwendigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen für die Erreichung der Klimaziele lässt sich anhand der untersuchten Pfade auch eine immense Innovationslücke aufzeigen. Der Innovationsprozess wird oft als eine Abfolge von Stufen beschrieben (z.B. Nemet 2019, Nemet et al. 2018), beginnend mit Grundlagenforschung über angewandte Forschung bis hin zu Demonstrationsprojekten, der Bedienung von Nischenmärkten und der Skalierung auf einen größeren Markt. Die meisten Entnahmemethoden befinden sich noch in den ersten Stufen dieses Prozesses, der Fallstudien zufolge Dekaden dauern kann. Die überwältigende Mehrheit der 1,5°C-Pfade in Abbildung 3 erreichen jedoch bereits vor 2050 solch eine Skalierung. Der Blick auf den Innovationserfolg von Photovoltaik (Nemet 2019, Kapitel 10) legt nahe, dass die Geschwindigkeit von Innovationen zur Kostensenkung von Entnahmeverfahren um ein 4-faches höher als bei der Photovoltaik sein müsste, um die Innovationslücke rechtzeitig zu schließen. Hier besteht auch in der Literatur eine gut dokumentierte Forschungslücke (Nemet et al. 2018).

### 1.1.2. Europäische Szenarien

Anschließend an die Analyse der globalen Szenarien bis 2100 beschränkt sich die Perspektive der EU auf Klimaneutralität bis 2050, obwohl bei der Einigung zum sogenannten „Europäischen Klimagesetz“ vom 21. April 2021 zwischen dem Europäischen Parlament, dem Europäischen Rat und der Europäischen Kommission festgehalten wurde, nach 2050 netto-negative Treibhausgasemissionen auf Ebene der EU anzustreben. Die in diesem Bericht avisierte Skalierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen orientiert sich zunächst aber an den für 2050 projizierten Restemissionen. Dabei bleibt jedoch offen, ob einzelne Mitgliedsstaaten, die perspektivisch netto-negative Emissionen anstreben wie z.B. Deutschland, Restemissionen anderer Staaten ausgleichen würden. Abgesehen von einigen wenigen europäisch aufgelösten Szenarien globaler Modelle gibt es nur sehr wenige europäische Szenarien. Die vorliegende Analyse stützt sich daher auf die kommissionseigenen Pfade (EC 2019).

Die EU-Treibhausgas (THG)-Emissionen werden in einer Reihe von Szenarien abgebildet (Europäische Kommission 2019), die im Einklang mit den ursprünglichen Emissionsreduktionszielen, die im Rahmen des europäischen Green Deal angekündigt wurden. Es werden in 2050 Restemissionen von etwas mehr als 500 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ausgeglichen. Diese Restemissionen sind vor allem in der Landwirtschaft (in der Hauptsache Nicht-CO<sub>2</sub>-Treibhausgase im Kontext der Tierhaltung und durch Düngemittel), in der Industrie (in der Hauptsache CO<sub>2</sub>-basierte Prozessemissionen) und im Transport zu verorten.

Für den Ausgleich dieser Restemissionen werden CO<sub>2</sub>-Entnahmen eingeplant. Für einen besseren Überblick werden hier zwei der Szenarien hervorgehoben: Zum einen das „TECH1.5“-Szenario, bei dem in einem größeren Umfang auch Technologien wie Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) zulässig sind; zum anderen das sogenannte „LIFE1.5“-Szenario, das vor allem auf CO<sub>2</sub>-Entnahmen im Sektor der Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (Land Use, Land Use Change and Forestry [LULUCF]) setzt. Beide Szenarien erreichen 2050 THG-Neutralität, jedoch auf unterschiedliche Weise. Bei „TECH1.5“ durch einen großskaligeren Einsatz von CCS-Technologien, die in einigen europäischen Ländern noch auf viel Widerstand in der Umsetzung treffen; bei „LIFE1.5“ durch ein Senken der Restemissionen durch größere Einschnitte auf der Nachfrageseite, dessen Umsetzung sich durch nicht minder große Herausforderungen auszeichnen dürfte, sowie durch eine größere Rolle von LULUCF-CO<sub>2</sub>-Entnahmen. Dies illustriert auch eine weitere Herausforderung bei der Skalierung: Zusätzlich zur oben beschriebenen Innovationslücke gilt es, zeitnah ein besseres Verständnis von Herangehensweisen an öffentliche und politische Akzeptanz zu entwickeln. Welcher Pfad eingeschlagen wird, wird nicht nur von den technischen Herausforderungen und biophysikalischen Gegebenheiten bestimmt werden, sondern auch Produkt eines gesellschaftlichen Diskurses sein, bei dem Kommunikation und Deliberation eine wichtige Rolle spielen. Auch hier bestehen viele wichtige Forschungslücken (Nemet et al. 2018), jedoch gibt es einige Ansätze, die auch technologieübergreifende Problematiken in diesem Kontext adressieren können (siehe unten).

Die Szenarien können direkt in den Kontext des europäischen Klimaschutzgesetzes gesetzt werden, denn dieses beinhaltet konkrete Zielvorgaben für CO<sub>2</sub>-Entnahmen durch die Land- und Forstwirtschaft. Laut Gesetzestext dürfen für das Erreichen des Klimaziels im Jahr 2030 maximal Nettoentnahmen von bis zu 225 MtCO<sub>2</sub>-Äquivalenten angerechnet werden. Die von der EU-Kommission im Rahmen des „Fit-for-55“-Pakets vorgeschlagene LULUCF-Senke geht mit 310 Millionen Tonnen deutlich darüber hinaus, sodass die tatsächliche Nettoerduktion der EU bis 2030 über 55 % liegen würde (siehe auch 1.1.3). Dies deutet in die Richtung des „LIFE1.5“-Szenarios.

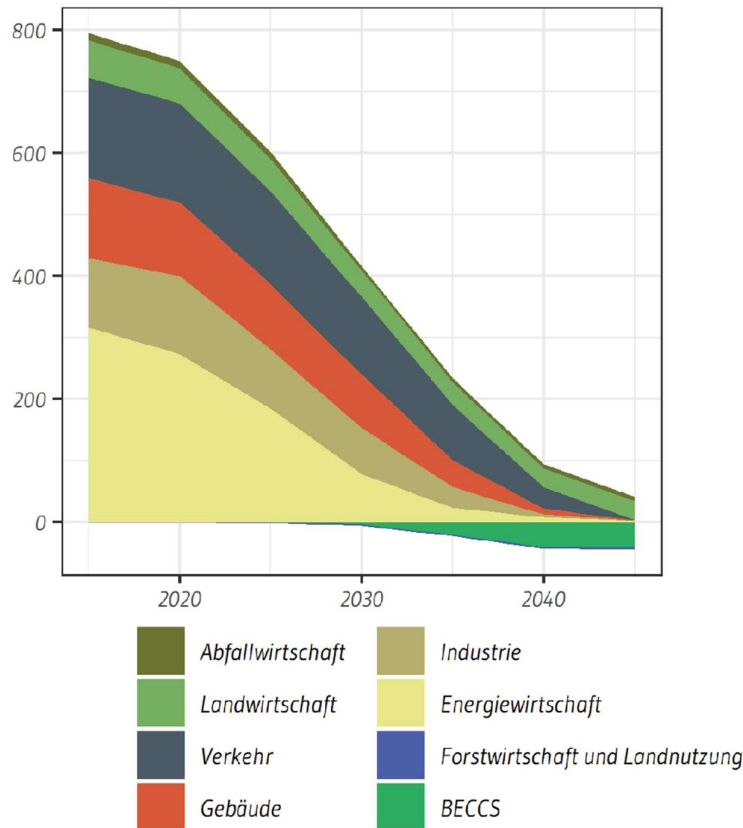
### 1.1.3. Einordnung in den deutschen Kontext

Auch in Deutschland ist die Nutzung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen hauptsächlich im Bereich des Ausgleichs von Restemissionen anzusiedeln. Während erste Abschätzungen der Restemissionen ursprünglich im Bereich von 60 MtCO<sub>2</sub>-Äq in 2050 lagen (UBA 2019 und Agora Energiewende 2020), basiert die Novelle des Klimaschutzgesetzes auf weitaus geringeren Restemissionen: laut der Begründung des Gesetzestextes deutlich unter 40 MtCO<sub>2</sub>-Äq in 2045 (Novelle KSG 2021, siehe auch Abbildung 4). Es soll eine mindestens ebenso große Senke im LULUCF-Sektor entstehen, mit perspektivisch netto-negativen Emissionen nach 2045. Der Entwurf des Gesetzestextes schließt aber andere Entnahmooptionen nicht explizit aus.<sup>1</sup> Bis dato wurden nur wenige Szenarien mit netto-negativen Emissionen veröffentlicht (Agora Energiewende 2021, BMWi 2021); zwei weitere Studien untersuchen Treibhausgasneutralität bis 2050 (UBA 2019 und Agora Energiewende 2020), während eine Reihe anderer Studien (BDI 2018, dena 2018, Robinius et al. 2019, Fraunhofer ISE 2020) mit 95% Emissionsreduktionen rechnen und somit keine CO<sub>2</sub>-Entnahmen einplanen müssen.

Die Reduktion in den Restemissionen von fast 60 auf 36 MtCO<sub>2</sub>-Äq in 2045 ist ebenfalls als ambitioniert einzustufen. Schon Restemissionen von 60 MtCO<sub>2</sub>-Äq bedeuten eine nahezu vollständige Vermeidung aller energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie eine deutliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Industrieprozessen ebenso wie der Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die zugrundeliegenden Annahmen der weiteren Reduktion auf 36 MtCO<sub>2</sub>-Äq sehen zum Beispiel eine drastische Änderung im Lebenswandel vor. Im Nahrungsmittelbereich müssten beispielsweise die Anzahl der Milchkühe und der Fleischkonsum stark reduziert werden. Auch im Flugverkehr gäbe es bis 2050 keinen nennenswerten Anstieg gegenüber 2010.

---

<sup>1</sup> Der genaue Wortlaut lautet: „[...] zur Erreichung von Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 [ist] eine Minderung der menschlich veranlassten Freisetzung von Treibhausgasen um mindestens 97% gegenüber [...] 1990 anzustreben. [Es] verbleiben Restemissionen in Höhe von bis zu 37,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq jährlich. Die bis dahin [...] zu erreichende negative Emissionsbilanz des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft sollte dann mindestens in dieser Größenordnung liegen“ (BMU 2021).



**Abbildung 4:** THG-Emissionen in Deutschland in einem Szenario im Einklang mit den Emissionsreduktionszielen, die im Rahmen des europäischen Green Deal angekündigt wurden (Technologiemix Szenario des REMIND im Rahmen des ARIADNE-Projekts, siehe Luderer et al. 2021).

Zur Einordnung der Zahlen der Novelle des Klimaschutzgesetzes kann eigentlich nur die UBA-Studie (UBA 2019) dienen, die am unteren Ende des Spektrums 36 MtCO<sub>2</sub>-Äq als Restemissionen in 2050 aufweist, CCS und somit auch BECCS und DACCS kategorisch ausschließt, und die Senkenleistung des Waldes durch Renaturierung und Extensivierung der Holzproduktion mit einer jährlichen Entnahme von 35 MtCO<sub>2</sub>-Äq beziffert. Zusätzlich gibt es Importe für die stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> und CCU für synthetische Brennstoffe. Demgegenüber steht die Studie der Agora Energiewende (2020), die trotz diverser Maßnahmen im LULUCF-Bereich auf die Herausforderung hinweist, hier erst einmal die Senke zu erhalten, bevor an eine signifikante Erweiterung selbiger für Entnahmen gedacht werden kann. Auch ist generell anzumerken, dass eine Strategie, die sich auf wenige Methoden der CO<sub>2</sub>-Entnahmen beschränkt, mit höheren Risiken behaftet ist, insbesondere wenn es sich dabei um Methoden mit hohem Risiko von Reversibilität (insbesondere unter erhöhtem Klimawandel) handelt. Die BMWi-Langfristszenarien zeigen THG-Emissionsreduktionen von 63% bis 66% bis 2030 und von 84% bis 88% bis 2040 (Sensfuß et al. 2021). Zur Erreichung der THG-Neutralität in 2045 müsste die Reduktion nach 2040 gegenüber den Szenarien weiter beschleunigt werden. Lediglich eines der Szenarien erreicht für die im novellierten Klimaschutzgesetz vorgesehenen Gesamtminierungsziele für 2030 (-65%) und 2040 (-88%). Neben den Zielvorgaben für LULUCF aus dem KSG werden 20 MtCO<sub>2</sub> in 2040 und 40 MtCO<sub>2</sub> in 2050 entnommen. Die Studie folgert, dass angesichts des erheblichen Aufwands, der in diesen Szenarien zur Absenkung der Emissionen notwendig ist, CO<sub>2</sub>-Entnahmen für eine echte Treibhausgasneutralität auch für Deutschland frühzeitig angegangen werden müssen (Sensfuß et al. 2021).

In der europäischen LULUCF-Verordnung (Verordnung (EU) 2018/841, European Commission 2018) wird das erste Mal ein europäisches Emissionsziel für diesen Sektor und ein dazugehöriges Accounting System formuliert. In der Regulierung ist vorgesehen, dass die bilanzierten Emissionen unter null liegen (no-debit-rule). Der LULUCF-Sektor unterteilt sich in die Kategorien **aufgeforstete Flächen, entwaldete Flächen, bewirtschaftete Ackerflächen, bewirtschaftetes Grünland, bewirtschaftete Feuchtgebiete**

und **bewirtschaftete Waldflächen**. Das Accounting im LULUCF-Sektor weist einige wichtige Besonderheiten auf: Das Accounting von **bewirtschafteten Ackerflächen, bewirtschaftetem Grünland und bewirtschafteten Feuchtgebieten** erfolgt über ein „net-net accounting“. Hier wird die Differenz zwischen den aktuellen Emissionen und den Basiswerten aus dem Jahr 2005 in den entsprechenden Kategorien bilanziert. Können die Emissionen im Vergleich zum Basisjahr reduziert werden, entstehen Gutschriften in der Bilanzierung. Eine solche Gutschrift bedeutet aber nicht, dass tatsächlich netto CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnommen wurde. Durch die Wiedervernässung von Mooren entsteht hier ein großes Potential für Gutschriften (siehe Box 1). Das Accounting von **bewirtschafteten Waldflächen** erfolgt über ein „reference level accounting“. Dazu wird eine Zukunftsprognose der Waldentwicklung (forest reference level) eingeführt und die Differenz aus der tatsächlichen Waldentwicklung und der Zukunftsprognose dann im Accounting bilanziert. Das Forest Reference Level für Deutschland in der Accountingperiode 2021-2025 beträgt -34,4 MtCO<sub>2</sub>. Wird die Waldsenke durch verändertes Management (z.B. durch Extensivierung oder Intensivierung der Holzproduktion oder Renaturierungsmaßnahmen) angehoben oder abgesenkt, wird die Differenz als Schuld oder Gutschrift im Accounting angerechnet. Das Accounting von **aufgeforsteten Flächen und entwaldeten Flächen** erfolgt über ein „gross-net accounting“. Hier werden alle Nettoemissionen ohne Abzug durch einen historischen oder prognostizierten Basiswert angerechnet.

Am 14. Juli 2021 hat die Europäische Kommission im Rahmen des „Fit-for-55“-Pakets einen Vorschlag für die Änderung der LULUCF-Verordnung veröffentlicht.<sup>2</sup> Demnach soll ab 2026 die No-Debit Rule mit expliziten Zielen für die Mitgliedstaaten ersetzt werden. Des Weiteren wird vorgeschlagen, auf die aktuell geltenden Accountingregeln nach 2026 zu verzichten und stattdessen die berichteten Emissionen aus den Nationalen Treibhausgasinventaren direkt mit den Zielen zu vergleichen. Im Jahr 2030 soll die LULUCF-Senke mindestens 310 MtCO<sub>2</sub>-Äq betragen. Dieses europäische Ziel wird durch nationale Ziele auf die Mitgliedstaaten verteilt. Für Deutschland ist für das Jahr 2030 eine LULUCF-Senkenleistung von 30,84 MtCO<sub>2</sub>-Äq vorgesehen. Dieses Ziel scheint deutlich ambitionierter als das Ziel im nationalen KSG von 25 MtCO<sub>2</sub>-Äq im Zieljahr 2030, auch wenn ein exakter Vergleich schwierig ist, da sich das Ziel im nationalen KSG auf die durchschnittlichen Emissionsbilanzen aus dem Zieljahr und den drei vorhergehenden Kalenderjahren bezieht. Ab 2031 soll der LULUCF-Sektor auch die Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen der Landwirtschaft enthalten, bis 2035 soll dieser erweiterte LULUCF-Sektor klimaneutral werden. Um dies sicherzustellen sollen im Jahr 2025 nationale Ziele für die Jahre 2031 bis 2035 festgeschrieben werden. Der Vorschlag sieht nach 2035 eine verstärkte Verbindung mit anderen Sektoren vor, konkretisiert dies aber nicht.

#### 1.1.4. Ebenenübergreifende Einsichten aus der Literatur

##### Zielkonflikte durch Einschränkung des CO<sub>2</sub>-Entnahmeportfolios

Eine wichtige Erkenntnis aus der globalen Szenarienliteratur ist, dass es einen Zielkonflikt zwischen einer Beschränkung der CO<sub>2</sub>-Entnahmen und der Kostenkontrolle ambitionierter Klimaschutzpfade gibt. Obwohl sich die Einsichten prinzipiell auf die europäischen und deutschen Ebenen übertragen lassen sollten, stellen genaue Zahlen für Deutschland noch eine Forschungslücke dar.

Abbildung 5 stellt eindrücklich heraus, dass Beschränkungen bei der CO<sub>2</sub>-Entnahme mit einer noch schnelleren Emissionsreduktion in den nächsten Jahren einhergehen müssen. Eine Einschränkung der in den Szenarien teils sehr hohen (bis zu 20 GtCO<sub>2</sub> pro Jahr) CO<sub>2</sub>-Entnahmenutzung auf moderatere Werte von 5-10 GtCO<sub>2</sub> pro Jahr ist zumindest in 2°C-Szenarien noch ohne starken Anstieg der Anstrengungen zur Emissionsreduktion und damit der Kosten möglich. Bei weiterer Einschränkung der CO<sub>2</sub>-Entnahme steigt jedoch die nötige Geschwindigkeit der Emissionsreduktion zwischen 2030 und 2050 stark auf deutlich über 5% an. Diese Raten wären global über mindestens zwei Dekaden erforderlich. Historisch wurden (mit Ausnahme von Kriegen oder etwa dem Zusammenbruch der Sowjetunion) bisher Raten von 2-3% in einzelnen Ländern erreicht, z.B. in Frankreich 2%/a 1980-2000 oder in Deutschland ca. 1.6%/a

<sup>2</sup> [https://ec.europa.eu/info/files/revision-regulation-inclusion-greenhouse-gas-emissions-and-removals-land-use-land-use-change-and-forestry\\_en](https://ec.europa.eu/info/files/revision-regulation-inclusion-greenhouse-gas-emissions-and-removals-land-use-land-use-change-and-forestry_en)



1990-2020. Eine Rate von 7% würde jede Dekade eine Halbierung der Emissionen bedeuten. Dieser Zielkonflikt zwischen der Nutzung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen und der Geschwindigkeit der langfristigen Emissionsreduktion nach 2030, und damit der Kosten der Transformation, erhöht sich mit der Stringenz des langfristigen Klimaziels und lässt sich nur durch eine Verschärfung der kurzfristigen Klimaziele bis 2030 reduzieren. Diese Überlegungen sind ein wichtiger Faktor für die politische Machbarkeit. Eine weitere Herausforderung, die hier identifiziert werden kann, ist daher mit der Kommunikation und Deliberation der verschiedenen Pfade verbunden, bei denen die Zielkonflikte zwischen der Nutzung der CO<sub>2</sub>-Entnahme und den Kosten der Transformation und damit der nötigen Höhe des CO<sub>2</sub>-Preises berücksichtigt werden müssen. Die erforderlichen Emissionsreduktionsraten zeigen, dass selbst bei einem erheblichen Ausbau der CO<sub>2</sub>-Entnahme nicht auf die schnelle und ambitionierte Vermeidung von Emissionen verzichtet werden kann. CO<sub>2</sub>-Entnahmen können daher keine stringenten Klimaschutzmaßnahmen ersetzen, sondern v.a. dazu beitragen, erhebliche ökonomische Kosten und deren sozialen Auswirkungen zu verringern.

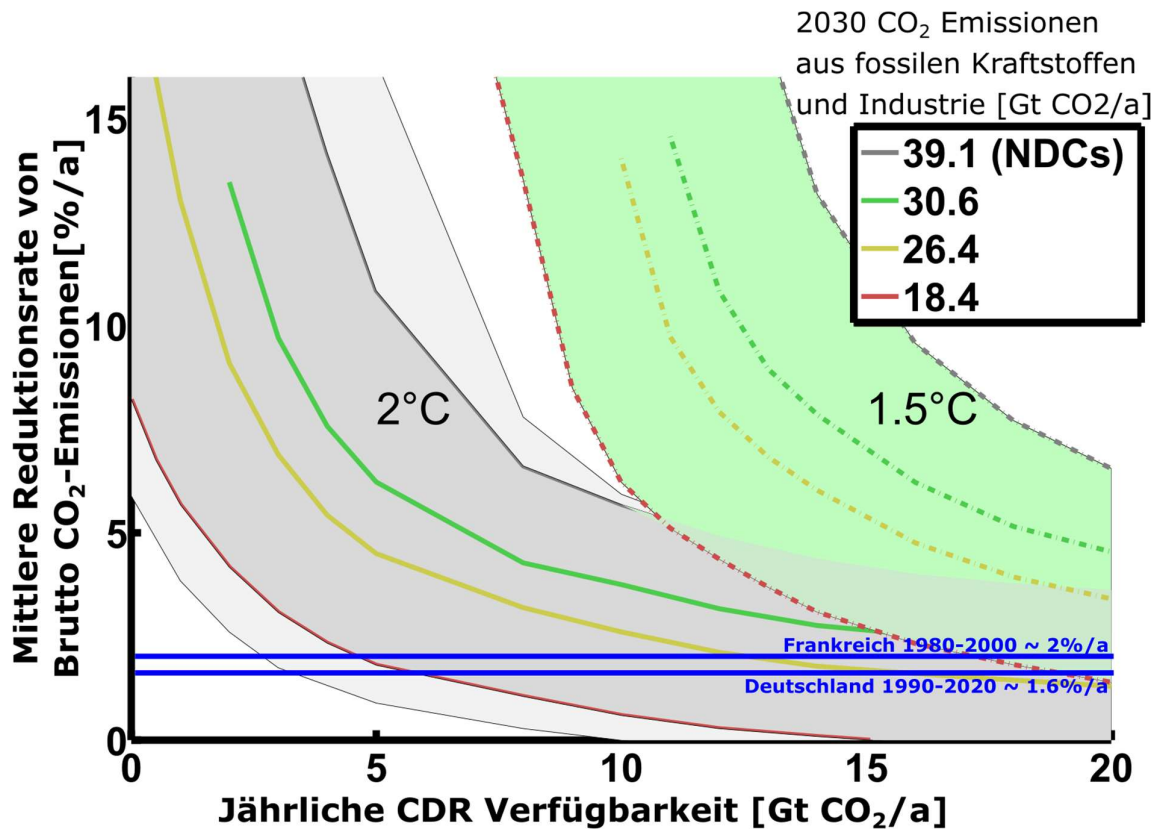


Abbildung 5: Jährliche globale mittlere Reduktionsrate von Brutto-CO<sub>2</sub>-Emissionen 2030-2050 in Abhängigkeit der jährlichen Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen (basierend auf Strefler et al. 2018a). Dargestellt sind 2°C- (durchgezogen) und 1,5°C-Szenarien (gestrichelt) mit unterschiedlicher kurzfristiger Klimapolitik, die entweder den nationalen festgelegten Beiträgen des Paris-Abkommens folgt (NDCs, graue Linien) oder die Emissionen bis 2030 deutlich darüber hinaus reduziert (farbige Linien). Zum Vergleich werden die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionsraten in Frankreich 1980-2000 (2% pro Jahr, aufgrund des Ausbaus der Atomenergie, siehe Riahi et al. 2015) und in Deutschland 1990-2020 (ca. 1.6% pro Jahr) gezeigt.

### Diskrepanzen zwischen Berichterstattung und Modellierung

Zwar wird die Szenarienliteratur immer mehr für den Politikprozess und die Einordnung der Skalierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen herangezogen, jedoch besteht eine erhebliche Diskrepanz zwischen Anrechnungen der LULUCF-Emissionen in nationalen Inventaren und denen, die in den Modellen angerechnet werden. Einige Landsenken werden in den nationalen Inventaren als anthropogen angerechnet, in den Modellen aber als natürlich eingeordnet und damit nicht angerechnet. Dadurch liegen die Emissionen in den

nationalen Inventaren unter denen der Modelle, sodass der tatsächliche Bedarf für CO<sub>2</sub>-Entnahmen noch höher liegen könnte. Grassi et al. (2021) schauen sich dies im Detail für die globalen Szenarien an und schätzen, dass die Diskrepanz etwa 5,5 GtCO<sub>2</sub> pro Jahr ausmacht. Um eine Übereinstimmung mit den Modellen zu erzielen, müssten die nationalen Ziele um diese Differenz verschärft werden.

## 1.2. CO<sub>2</sub>-Entnahmeangebot: Definition, Konzepte und Bewertung der Technologien und Praktiken

### 1.2.1. Definitionen und Konzepte

Wir definieren CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre als den Entzug von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und Bindung für eine Periode, die länger als ein Berichtsjahr bei der Erstellung von Treibhausgasinventaren sein muss. Weniger sinnvoll erscheint eine Definition, die auf einem (willkürlichen) Schwellenwert basiert, wie zum Beispiel eine langfristige Entnahme von 100 oder 1000 Jahren, weil eine Reihe von vorliegenden Optionen zur Stärkung natürlicher Senkenfunktionen so nur schlecht erfasst werden können. Stattdessen sollten flexible Konzepte wie das „Tonnenjahr“ eingeführt werden, auf deren Basis das gebundene CO<sub>2</sub> dann über die (durchschnittliche) Verweildauer in der Senke abgeschrieben werden könnte (siehe z.B. EBI 2020). Darauf basierend könnte dann eine umfassende und an die Treibhausgasinventare anschlussfähige Berichterstattung für die CO<sub>2</sub>-Entnahmen entwickelt werden. Dennoch könnte eine grobe Einteilung von CO<sub>2</sub>-Entnahmoptionen nach CO<sub>2</sub>-Bindungsdauer Sinn machen (z.B. kurzfristig 2-29 Jahre; mittelfristig: 30-99 Jahre; langfristig: ≥100 Jahre). Zudem sollten nicht nur die Bindungsdauer, sondern auch etwaige geringere Speicherraten bei der Skalierung und Reversibilität von CO<sub>2</sub>-Entnahmoptionen erfasst werden.

Durch Menschen gezielt induzierte CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre können auf sehr unterschiedliche Weisen erreicht werden. Sie können beispielsweise im Rahmen bestimmter landwirtschaftlicher Praktiken entstehen oder bei der Anwendung von spezifisch dafür entwickelten Technologien wie beispielsweise Luftfiltern. Dennoch ist die häufig gemachte Unterscheidung zwischen naturbasierten und technologiebasierten (sowie ggf. hybriden) CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre nicht hilfreich (z.B. UN Environment 2017), da keine scharfen Demarkationslinien gezogen werden können. Sind zum Beispiel Verfahren der „beschleunigten Verwitterung“ technologiebasiert, weil Gestein gemahlen werden muss, oder handelt es sich eher um einen durch Technologie unterstützten natürlichen Prozess (und somit einen Hybrid)? Des Weiteren sind „Pflanzenkohle“ oder „BECCS“ Sammelbegriffe für eine Reihe von CO<sub>2</sub>-Entnahmepfaden, die in ihren Umweltwirkungen (Nebeneffekte) oder auch technologischen Anforderungen sehr unterschiedlich sein können.

Statt einer starren Typologie erscheint die Bereitstellung eines konzeptionellen Rahmens sinnvoller, der unterschiedliche Formen der CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre als Pfade zwischen fünf unterschiedlichen Kohlenstoff-Pools im globalen Kohlenstoffzyklus darstellt: (1) Atmosphäre; (2) Lithosphäre; (3) Hydrosphäre; (4) Biosphäre; (5) Produktsphäre (siehe Abbildung 8). Unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Entnahmepfade beziehen sich unterschiedlich auf diese CO<sub>2</sub>-Pools, weil es eine Reihe von Möglichkeiten gibt, das CO<sub>2</sub> aus der Luft abzuscheiden, im Laufe des Prozesses umzuwandeln und dauerhaft/temporär zu speichern. Zum Beispiel kann Pflanzenkohle aus verschiedenen Arten von Biomasse erzeugt werden und auch in unterschiedliche Senken das CO<sub>2</sub> binden – in der Produktsphäre als Bestandteil von Beton oder in der Biosphäre, wenn es zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft eingesetzt wird. Dabei entstehen auch unterschiedliche Bindungsdauern für das CO<sub>2</sub>. Auf diese Art und Weise kann jeder CO<sub>2</sub>-Entnahmepfad als hilfreich im Kontext des globalen Kohlenstoffzyklus dargestellt werden.



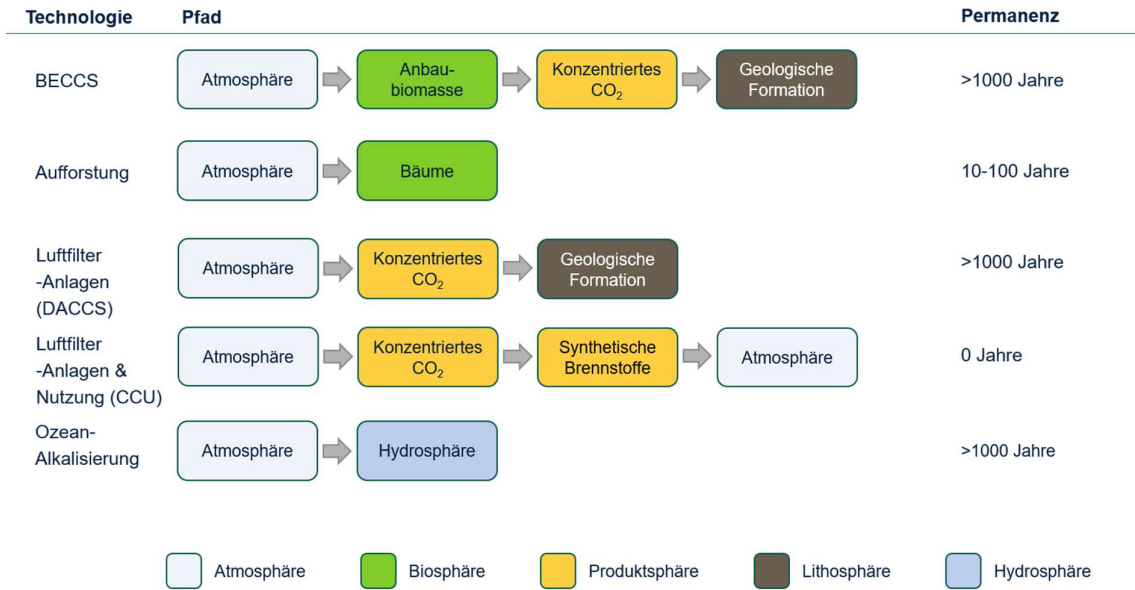


Abbildung 6: Konzeptualisierung von CO<sub>2</sub>-Entnahmepfaden (Quelle: angepasst auf Basis von persönlicher Kommunikation mit Smith 2021).

Abbildung 6 zeigt exemplarisch ein paar häufig dargestellte, generische CO<sub>2</sub>-Entnahmepfade. Die Farbkodierung weist dabei auf die unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Pools hin. Jeder Pfad wird zudem exemplarisch mit einem Hinweis auf die Reversibilität und Bindungsdauer versehen – auch wenn diese nur aussagekräftig für spezifische Pfade vergeben werden können. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Methoden (siehe auch Abbildung 7 für einen ersten Überblick) wird bei ihrer Bewertung im folgenden Abschnitt gegeben. Es ist zu beachten, dass in diesem Gutachten nur eine Auswahl der zur Verfügung stehenden CO<sub>2</sub>-Entnahmepfade bewertet und somit beispielsweise ozeanbasierte Methoden vernachlässigt werden.

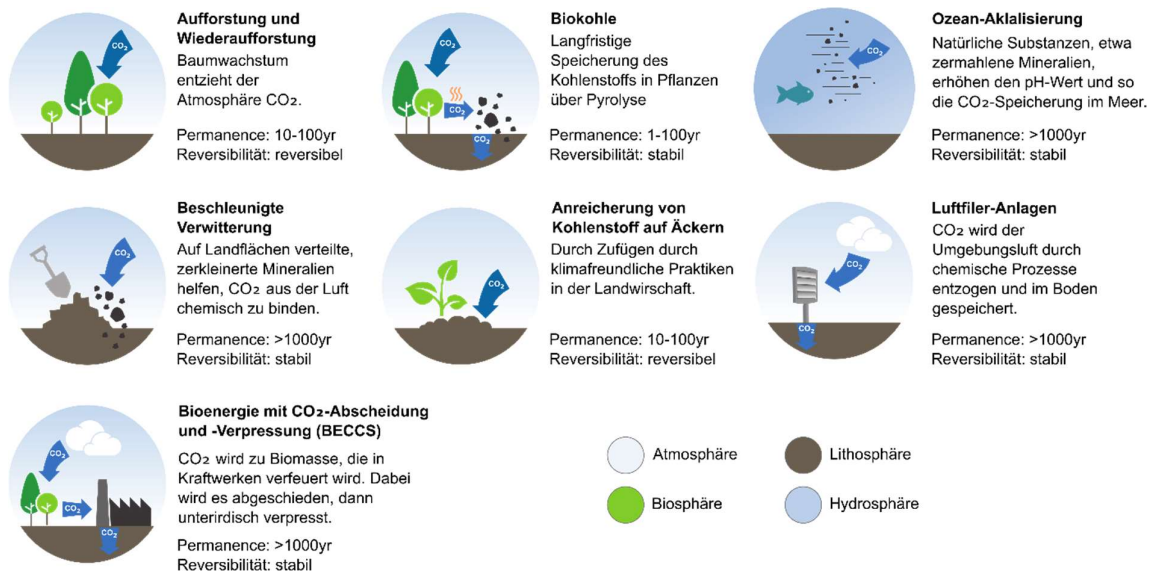


Abbildung 7: Exemplarische CO<sub>2</sub>-Entnahmepfade.

## 1.2.2. Bewertung der einzelnen CO<sub>2</sub>-Entnahmemaßnahmen<sup>3</sup>

### 1.2.2.1. Wieder-/Aufforstung

Wälder binden durch das Wachstum der Bäume atmosphärisches CO<sub>2</sub> in der Biosphäre, sowohl in lebender Biomasse als auch im Boden. Aktuell bilden die deutschen Wälder durch ihre verhältnismäßig junge Altersstruktur eine CO<sub>2</sub>-Senke in Höhe von 57 MtCO<sub>2</sub> (Umweltbundesamt 2021a). Studien prognostizieren eine deutliche Abnahme dieser CO<sub>2</sub>-Senke für die Trendfortschreibung der aktuellen Nutzung und einen Erhalt der aktuellen Senkenleistung nur bei deutlicher Extensivierung der Holzentnahme und Renaturierung der Waldstruktur (Oehmichen 2018, Böttcher 2018). Um die Senkenleistung der Wälder über das aktuelle Maß hinaus zu erhöhen, würden demzufolge zusätzliche Flächen zur Wieder-/Aufforstung benötigt werden.

#### Technisches Potential

Für eine stark vereinfachte Abschätzung des CO<sub>2</sub>-Entnahmepotentials durch Wieder-/Aufforstung wurden aus Doelman et al. (2020) die CO<sub>2</sub>-Abscheidungsraten für neu gepflanzte und junge Wälder im gemäßigten Klima mit 7,3 tCO<sub>2</sub>/ha pro Jahr entnommen. Die zur Aufforstung zur Verfügung stehenden Flächen sind der limitierende Faktor und wurden für diese Abschätzung illustrativ mit 0,3 Mha angenommen (zum Vergleich: die heutige deutsche Waldfläche beträgt circa 11 Mha). Daraus ergäbe sich eine Senkenleistung von 2 MtCO<sub>2</sub> jährlich. Dabei muss beachtet werden, dass dieser Wert nur für die ersten 25 Jahre nach der Pflanzung der Wälder gilt und danach die Senkenleistung aufgrund des steigenden Alters des Waldes mit der Zeit abnimmt. Werden Ackerflächen aufgeforstet, kommt es zusätzlich zu einer Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts (s. Abschnitt zur Bodenkohlenstoffanreicherung), wohingegen eine Aufforstung von Grünland nur einen vernachlässigbaren Anstieg des Bodenkohlenstoffgehalts bringt.

#### Einordnung

Positive Nebenwirkungen:

- umsetzungsabhängiger Nutzen für Bodenkohlenstoff
- Bodenqualität
- Biodiversität bei naturnaher Wieder-/Aufforstung, abhängig von der Biodiversität der aktuellen Fläche
- Wasserrückhalt
- Diversifizierung

Negative Nebenwirkungen:

- direkter und indirekter Landnutzungswandel
- netto-positive Erwärmung in hohen Breiten durch Albedo-Effekt
- Risiken für Biodiversität bei Monokulturanbau und mangelnder Berücksichtigung der Biodiversität der aktuellen Fläche
- Risiken für Ernährungssicherheit
- Kohlenstoffspeicher ist anfällig gegenüber natürlichen und anthropogenen Störungen.

Technologie-Reifegrad:

- hoch

---

<sup>3</sup> Bei den Potenzialeinschätzungen handelt es sich um illustrative Rechenbeispiele anhand der Emissionsfaktoren und Ressourcen, die aus der Literatur zur Verfügung stehen. Nebeneffekte und (globale) Kosten aus Fuss et al. (2018), Schätzungen in der kompletten Literatur in eckigen Klammern; negative Kosten implizieren, dass diese Praktiken sich bereits zu diesem Zeitpunkt wirtschaftlich auszahlen.

**Kosten:**

- Die Kosten sind bereits niedrig und weitestgehend von weiterem technologischen Fortschritt unabhängig. Fuss et al. (2018) finden in der globalen Literatur perspektivische Kosten für 2050 zwischen 5-50 [0-240] USD/tCO<sub>2</sub>.

**Permanenz:**

- Senkenleistung unterliegt einer Sättigung innerhalb eines Zeitraums von Jahrzehnten bis Jahrhunderten.

**Managementaufwand zur Speichererhaltung:**

- mittel bis hoch

**Reversibilität:**

- reversibel
- anfällig für natürliche (Waldbrände, Borkenkäfer) – unter fortschreitendem Klimawandel verstärkte – und vom Menschen verursachte (Entwaldung) Störungen
- erfordert kontinuierliches Management zum Aufrechterhalten des Kohlenstoffspeichers

**Monitoring:**

- mittel

**Flächenintensität:**

- 0,14 ha/tCO<sub>2</sub> für die jährliche CO<sub>2</sub>-Abscheidung durch Neuzuwachs

**Politische Herausforderungen:**

- Widerstände im Zusammenhang mit Landnutzungs Konkurrenz
- Bedenken wegen Unbeständigkeit der Speicherung u.a. durch natürliche Störungen wie Feuer

**Terrestrische Waldsenken, Waldrenaturierung und Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten**

Die deutschen Wälder nehmen beim Wachsen atmosphärisches CO<sub>2</sub> auf und leisten damit schon heute einen signifikanten Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Entnahme. Nicht in allen Szenarien werden die terrestrischen Waldsenken der bestehenden nationalen Wälder als anthropogene CO<sub>2</sub>-Entnahme berücksichtigt. Das hat insbesondere folgenden Grund: Derzeit besteht eine Diskrepanz zwischen dem Beitrag der terrestrischen Waldsenken, der von den Ländern in den nationalen Treibhausgasinventaren angegeben und angerechnet wird, und dem Beitrag der Waldsenken, der in Integrated Assessment Modellen als anthropogen klassifiziert und in Emissionsminderungspfaden berücksichtigt wird (Grassi et al. 2021). Dabei sind die natürlichen Senken (wie der Wald und der Ozean) implizit in den verbleibenden Emissionsbudgets in den Emissionsminderungspfaden der Modelle enthalten. Werden sie von den Ländern als anthropogen angerechnet und für die Erreichung der Klimaziele mitberücksichtigt, muss das Emissionsbudget um diesen Beitrag verkleinert werden, damit es nicht zu einer Doppelzählung kommt. Aus verkleinerten Emissionsbudgets folgt auch, dass Treibhausgasneutralität unter Berücksichtigung der terrestrischen Waldsenken früher erreicht werden muss, um dasselbe Klimaziel zu erreichen. Im nationalen Treibhausgasinventarbericht von Deutschland wird für das Jahr 2019 eine Senkenleistung des Waldes mit 57 MtCO<sub>2</sub> angegeben. Die Senkenleistung unterliegt großen zeitlichen Schwankungen, die sich aus der Holznutzung und der Altersstruktur des Waldes ergeben. Aufgrund der Altersstruktur der deutschen Wälder erreichen in den kommenden Jahren viele Bäume ihre Hiebsreife, wodurch Prognosen von einer starken Zunahme der Holzernten und einer damit einhergehenden Schwächung der Senkenleistung der Wälder ausgehen (Bundesregierung 2019, Böttcher et al. 2018, Oehmichen 2018). Danach läge bei Fortschreibung der aktuellen Bewirtschaftungstrends die Senkenleistung des Waldes im Jahr 2030 nur noch bei 22 MtCO<sub>2</sub>, nimmt in den darauffolgenden Jahren allerdings wieder zu. Böttcher et al. 2018 geben über den Zeitraum 2012-2102 gemittelt bei Trendfortschreibung der Bewirtschaftung eine mittlere jährliche Senkenleistung von 35 MtCO<sub>2</sub> pro Jahr an. Veränderungen der Waldbewirtschaftung haben

einen Einfluss auf die Senkenleistung der Wälder. Auf zwei alternative Bewirtschaftungsweisen soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

Im Waldvision-Szenario aus Böttcher et al. (2018) wird auf Renaturierung und Waldverdichtung mit dem Vorbild von Urwäldern gesetzt. Hier nimmt die Bruttozuwachsrate an Biomasse bis 2050 um 9% gegenüber dem Basisszenario (Fortschreibung aktueller Trends) zu. Der renaturierte Wald wächst also schneller und bindet in der gleichen Zeit mehr atmosphärisches CO<sub>2</sub> als ein konventionell genutzter Wald. Außerdem wird die Holzernte bis 2050 um 25% gesenkt, wodurch der Kohlenstoffspeicher im Wald im Waldvision-Szenario verglichen mit dem Basisszenario stark zunimmt. Im Waldvision-Szenario wird die aktuelle Senkenleistung der deutschen Wälder im betrachteten Zeithorizont bis 2100 erhalten. Eine Reduktion der Holzproduktion bei gleichbleibender oder sogar steigender Holznachfrage führt allerdings zu Landnutzungsänderungen andernorts und resultiert in potentiell hohen Emissionen durch direkte oder indirekte Landnutzungsänderungen.

Auf der anderen Seite könnte das dem Wald entnommene Holz in langlebigen Holzprodukten, zum Beispiel als Baumaterial in Gebäuden, erhalten bleiben. Dadurch kann nicht nur eine längerfristige CO<sub>2</sub>-Senke im Holzprodukt entstehen, sondern es besteht auch CO<sub>2</sub>-Minderungspotential durch Substitution von CO<sub>2</sub>-intensiven Baumaterialien wie Beton und Stahl (Churkina 2020). Die Unsicherheiten in der bestehenden Literatur sind bezüglich dieses Trade-Offs noch besonders groß, weswegen hier keine weiteren Potentialabschätzungen gemacht werden. Zur nachhaltigen Bewertung müssen zusätzlich auch andere Gesichtspunkte neben der reinen Klimawirksamkeit betrachtet werden.

### **Box 1: Wiedervernässung von Mooren als Option für CO<sub>2</sub>-Entnahmen**

**Hintergrund:** Die Fläche von kohlenstoffreichen Böden (Moorböden) in Deutschland beträgt rund 1,8 Mio. ha (Tegetmeyer et al. 2020). Dies entspricht etwa 5% der Landesfläche Deutschlands bzw. rund 10% der landwirtschaftlich genutzten Fläche (UBA 2020). Mehr als 95% der Mooreböden sind entwässert, vorwiegend für die Nutzung in Land- und Forstwirtschaft. Der niedrige Wasserstand in entwässerten Mooreböden hat jedoch zur Folge, dass durch eine Oxidierung der im Boden gespeicherte Kohlenstoff kontinuierlich als Kohlendioxid freigesetzt wird. Hierdurch emittieren entwässerte Mooreböden jährlich ca. 53 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente, was 6,7% der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen im Jahr 2019 entspricht (UBA 2021b). Auf die landwirtschaftliche Nutzung der Mooreböden ist hierbei ein Anteil von 80% der Emissionen zurückzuführen (UBA 2021b). Zudem nimmt die landwirtschaftliche Nutzung ca. 70% der Mooreböden in Anspruch, wobei der Großteil der Flächen als Grünland bewirtschaftet wird (ca. 74% der landwirtschaftlichen Nutzung) (UBA 2021a). Der Flächenanteil der forstwirtschaftlichen Nutzung beträgt ca. 15% (UBA 2021a).

**Leakage:** Werden auf entwässerten Mooreböden erneuerbare Energieträger angebaut, übersteigen deren Treibhausgasemissionen die Emissionen fossiler Rohstoffe um ein Vielfaches (Naturkapital Deutschland 2015). Aus diesem Grund ist die Entwässerung von Mooreböden für den Anbau von Biomasse für die Erzeugung von Biokraftstoff durch die europäische Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) bzw. die deutsche Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung explizit untersagt. Jedoch verfehlt die Regelung in der Praxis aus zwei Gründen ihre Wirkung. Erstens werden die angebauten Pflanzen (z.B. Raps, Weizen, Mais) auch außerhalb des Energiesektors verwendet. In anderen Sektoren gelten jedoch nicht die gleichen Nachhaltigkeitskriterien wie im Energiesektor. Zweitens erfolgt eine pauschalierte Betrachtung auf Ebene der Anbauregionen (Regierungsbezirken). Da der Anteil von Mooreböden an der Ackerfläche jedoch gering ist, wird die spätere Verwendung entwässerter Mooreböden für den Energiesektor nicht wirklich ausgeschlossen (Naturkapital Deutschland 2015).

**Klimaschutz durch Wiedervernässung:** Die Menge der Treibhausgasemissionen aus Mooreböden wird im Wesentlichen von der Höhe des Wasserstands beeinflusst. Durch Wiedervernässungsmaßnahmen können die Emissionen daher deutlich verringert bzw. in manchen Fällen sogar kann eine nahezu ausgeglichene Treibhausgasbilanz der wiedervernässten Flächen erreicht werden (Tiemeyer et al. 2020). Für Deutschland wird das maximale Reduktionspotential durch Wiedervernässung auf 5-35 MtCO<sub>2</sub>-Äq pro Jahr geschätzt (Freibauer et al. 2009). Für Niedermoore, die ca. 62% der Mooreböden in Deutschland ausmachen, wurde ein durchschnittliches Reduktionspotential von 30 tCO<sub>2</sub>-Äq pro Hektar und Jahr ermittelt (Drösler et al. 2012a). Bei Hochmooren, die ca. 18% der Mooreböden ausmachen, liegt das durchschnittliche Reduktionspotential bei 15 tCO<sub>2</sub>-Äq pro Hektar und Jahr (Drösler et al. 2012a).

**Kosten der Wiedervernässung:** Die Kosten für die Wiedervernässung variieren je nach Moortyp, Art der aktuellen Nutzung und anderer Faktoren wie z.B. der Entwässerungstiefe. Grundsätzlich erscheint die Wiedervernässung von Moorböden aber als eine der kostengünstigsten Klimaschutzmaßnahmen im Landnutzungsbereich (Naturkapital Deutschland 2015). So berechnen etwa Drösler et al. (2012b) unter Berücksichtigung der Kosten für die Verfügbarmachung der Fläche, Biotopeinrichtung, Management, Öffentlichkeitsarbeit, Monitoring und Folgekosten eine Kostenspanne von 40-110 EUR/tCO<sub>2</sub>-Äq für eine Wiedervernässung im Rahmen ausgewählter, nationaler Naturschutzgroßprojekte.

Kurz- bis mittelfristig erhöhte THG-Emissionen: Durch die Wiedervernässung degradierter Moorböden kann zwar die Freisetzung von Kohlendioxid gestoppt werden, jedoch erhöht sich zugleich auch der Ausstoß von Methan (Humpenöder et al. 2020). Je nach Degradierungsgrad sind die Emissionen aus wiedervernässten Moorböden hierdurch zunächst sogar höher als zuvor (BUND 2010). Zu beachten ist des Weiteren, dass die Höhe des Methanausstoßes ebenfalls stark vom Wasserstand abhängig ist. So führt etwa ein Überstau von 10 cm über Flur im Sommer zu einer sehr hohen Klimabelastung, während die niedrigsten Treibhausgasemissionen bei einem Wasserstand von ca. 10 cm unter Flur erreicht werden (Naturkapital Deutschland 2015). Langfristig birgt die Wiedervernässung von Mooren in Deutschland jedoch ein monumentales Vermeidungspotential: Tanneberger et al. (2021) bestimmen für eine Wiedervernässung von 91% der bis 2020 trockengelegten Moorflächen<sup>4</sup> eine Einsparung von mehr als 40 MtCO<sub>2</sub>-Äq/Jahr in 2050 verglichen mit 2020.

**Caveat:** Wichtig hierbei ist, dass es sich bei diesem eindrucksvollen Potential um CO<sub>2</sub>-Einsparungen handelt und nicht um Entnahmen. Für eine Entnahme müsste der Torfkörper anwachsen, was abzüglich der kontinuierlichen Methanemissionen pro Jahr in höchstens etwas mehr als einer Tonne CO<sub>2</sub>-Äq pro Hektar resultiert (z.B. Drollinger et al. 2019 und andere Fallstudien), wenn es sich um ein gutes – also ein feuchtes – Jahr handelt. In einem trockenen Jahr kann auch ein erfolgreich vernässtes Moor schnell wieder zur Quelle werden. Nichtsdestotrotz zeigt diese Analyse auf, dass es sich um eine extrem wichtige Klimaschutzoption handelt. Umso bedenklicher ist die lückenhafte Berichterstattung und die unzureichende Datenlage, die momentan keine genauen Aussagen zu Flächenänderungen und dem Moorverlust in Deutschland ermöglicht (Tegetmeyer et al. 2020). Nach der aktuell geltenden EU-Regulierung des LULUCF-Sektors 2018/841 werden Emissionen aus trockengelegten Mooren aus den Bereichen bewirtschaftete Ackerfläche und bewirtschaftete Grünfläche mit der Differenz zum Basisjahr 2005 angerechnet. Werden Moore also wiedervernässt und damit die oben beschriebenen Emissionen verhindert, kommt es nach dem aktuellen LULUCF-Accounting zu einer Gutschrift im LULUCF-Sektor, obwohl es zu keiner nennenswerten CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre kommt. Mit dem am 14. Juli 2021 vorgestellten „Fit-for-55“-Paket der EU-Kommission wurde vorgeschlagen, das aktuell geltende Accounting im LULUCF-Sektor nach 2026 nicht weiter anzuwenden und stattdessen direkt die Nettoemissionen aus den nationalen Treibhausgasinventaren zur Zielerreichung heranzuziehen.

### 1.2.2.2. Pflanzenkohle

Die Pyrolyse ist ein technisches Verfahren, bei dem unter Sauerstoffausschluss organisches Material zersetzt wird. Dabei entsteht sogenannte Pflanzenkohle, die bei geeigneter Wahl der Prozessparameter über Jahrhunderte hinweg stabil ist (Schmidt et al. 2019). Durch die langfristige Bindung des Kohlenstoffs entsteht auf diese Weise zudem eine Netto-CO<sub>2</sub>-Senke. Pflanzenkohle kann zur langfristigen Lagerung in Ackerböden eingebracht werden. Für degradierte oder schlecht gemanagte Böden kann der Zusatz von Pflanzenkohle die Bodenfruchtbarkeit signifikant erhöhen, allerdings wird für die stark gemanagten europäischen Böden kein nennenswertes Potential für diesen Effekt gesehen. Abgesehen von der Bodenfruchtbarkeit kann die Landwirtschaft auch von anderen positiven Nebeneffekten der Pflanzenkohleanwendung im Boden profitieren wie erhöhte Wasserhaltekapazitäten, verringerte Nitratauswaschung und vor allem die Reduzierung klimaschädlicher Treibhausgasemissionen (z.B. Lachgas und Methan). Pflanzenkohle kann vor ihrer dauerhaften Lagerung auf dem Feld im

<sup>4</sup> Das entspricht gut 1,6 Millionen Hektar.

landwirtschaftlichen Materialkreislauf verwendet werden, beispielsweise als Futtermittelzusatz oder Einstreue in Ställen. Auch eine materielle Verwendung außerhalb der Landwirtschaft als Beimischungen in Baumaterialien wird diskutiert.

### Technisches Potential

Laut Schmidt et al. (2019) kann durch Pyrolyse 30-43% des Kohlenstoffgehalts der Biomasse in stabile Pflanzenkohle abgeschieden werden. Perspektivisch könnte auch das im Prozess anfallende Öl einer langfristigen Speicherung zugeführt werden, wodurch sich die Abscheidungsrate auf 74% erhöhen würde. Im hypothetischen Fall, dass das gesamte aktuell verfügbare lignocellulose Biomassepotential zur Herstellung von Pflanzenkohle verwendet würde, könnten 38 MtCO<sub>2</sub> aus Reststoffen plus Scheitholz (0,885 EJ) und zusätzlich 18 MtCO<sub>2</sub> bei Verwendung der Anbaubiomasse (aktuell 0,426 EJ) abgeschieden werden. Bei zusätzlicher, langfristiger Speicherung des Öls könnten sogar 65 MtCO<sub>2</sub> aus Reststoffen und 32 MtCO<sub>2</sub> aus Anbaubiomasse abgeschieden werden. Würden 0,2 EJ Biomasse für die Produktion stabiler Pflanzenkohle verwendet werden, könnten 9 MtCO<sub>2</sub>, bei zusätzlicher langfristiger Speicherung des Öls sogar 15 MtCO<sub>2</sub> abgeschieden werden. Zur Erläuterung der aktuellen Biomassepotentiale siehe Unterkapitel BECCS. Pyrolyse könnte mit erhöhtem Energieaufwand auch aus flüssigen Reststoffen Pflanzenkohle herstellen, dies wird hier allerdings nicht weiter betrachtet. Da Bioenergie Bestandteil der Dekarbonisierung des Energiesystems ist und der energetische Co-Output bei der Produktion von Pflanzenkohle (mit Fokus auf CO<sub>2</sub>-Abscheidung) nur gering ausfällt, ergibt sich eine hohe Nutzungskonkurrenz insbesondere um das nachhaltige Anbaubiomassepotential. Aus energetischer Sicht ist eine Verwendung insbesondere von Anbaubiomasse zur Pflanzenkohleproduktion ökonomisch eher unattraktiv gegenüber anderen energetischen Nutzungsarten (wie z.B. BECCS). Die Kohlenstoffabscheidung durch Pflanzenkohle ist allerdings nicht an das Vorhandensein einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur gebunden und kann entsprechend dezentraler verteilt sein. Demzufolge könnten sich die BECCS-Technologien und die Kohlenstoffbindung in Pflanzenkohle bei der Ausschöpfung des dezentral anfallenden Biomassepotentials durchaus komplementieren. Zudem gibt es Reststoffe im landwirtschaftlichen Materialkreislauf, die nicht für eine energetische Nutzung zur Verfügung stehen, aber prinzipiell in Pflanzenkohle umgewandelt werden könnten (z.B. Stroh als Einstreue in Ställen).

### Einordnung

Positive Nebeneffekte:

- potentielle Reduktion der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen
- zusätzliches Minderungspotential durch Substitutionseffekte sowohl des Feedstocks als auch der Nebenprodukte
- keine geologische Speicherung nötig, die mit Akzeptanzproblemen und Infrastrukturanforderungen verbunden ist
- Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit insbesondere in tropischen Regionen

Negative Nebeneffekte:

- Konkurrenz mit BECCS um nachhaltige Biomasse
- wesentlich kleinerer energetischer Output als bei BECCS
- Negativ im Fall von Anbaubiomasse:
  - direkter und indirekter Landnutzungswandel
  - Konkurrenz mit Nahrungsmittelproduktion und Wieder-/Aufforstung um Landflächen
  - Auswirkungen auf Gesundheit
  - Biodiversitätsverlust, Entwaldung und Walddegradation
  - Auswirkungen auf Boden und Wasser



Technologie-Reifegrad:

- hoch

Kosten:

- Aktuelle Kosten sind sehr variabel, abhängig auch davon, ob preisgünstige Reststoffe in ausreichendem Umfang zur Verfügung stehen. Globale Kosten liegen in der Literatur perspektivisch für 2050 bei 30-120 [10-345] USD/tCO<sub>2</sub>.

Permanenz:

- stabil über Jahrhunderte, allerdings deutlich verkürzte Permanenz bei ungünstiger Prozessparameterwahl

Managementaufwand zur Speichererhaltung:

- in der Nutzung als Bodenzusatz niedrig.

Reversibilität:

- Beschleunigung der Zersetzung bei ungünstigem Bodenmanagement (z.B. Verbrennung von Residuen auf dem Feld) und ungünstigen Umweltbedingungen (z.B. besonders häufiger Wechsel zwischen Frieren und Tauen).

Monitoring:

- einfach (Zertifizierungsmöglichkeiten der Qualität und der Haltbarkeit schon heute möglich European Biochar Certificate).

Landintensität im Falle von Anbaubiomasse:

- Mais 0,2 ha/tCO<sub>2</sub>, Miscanthus 0,08 ha/tCO<sub>2</sub>

Politische Herausforderungen: –

### 1.2.2.3. Bodenkohlenstoffanreicherung

Der Bodenkohlenstoffgehalt ergibt sich aus dem Fließgleichgewicht aus Kohlenstoffeintrag und -austritt (überwiegend als gasförmiges CO<sub>2</sub>). Derzeit befinden sich die deutschen Ackerflächen nicht im Gleichgewicht, denn es geht im Jahresmittel mehr Kohlenstoff aus dem Boden in Form von CO<sub>2</sub> verloren, als wieder eingetragen wird, außerdem nimmt der Bodenkohlenstoffgehalt stetig ab. Wird der Kohlenstoffeintrag durch Veränderungen der landwirtschaftlichen Praktiken erhöht, kann das Gleichgewicht zwischen Eintrag und Austritt wiederhergestellt und der Verlust von weiterem Bodenkohlenstoff aufgehalten werden. Wird dabei sogar mehr Kohlenstoff eingetragen, als über das Jahr verloren geht, kann durch veränderte landwirtschaftliche Praktiken sogar eine Senkenleistung erzielt werden. Die Senkenleistung hält allerdings nur solange an, bis sich aufgrund der veränderten Praktiken der Bodenkohlenstoffgehalt auf einem höheren Fließgleichgewichtsniveau stabilisiert hat; sprich: die Sättigung erreicht ist. Auch danach müssen diese Praktiken beibehalten werden, damit der dazugewonnene Bodenkohlenstoff nicht wieder verlorenght und der Boden erneut zur CO<sub>2</sub>-Quelle wird. Zu möglichen Praktiken zur Anhebung des Bodenkohlenstoffgehalts zählen unter anderem die Optimierung der Fruchtfolgen beispielsweise durch die Einführung von Zwischenfrüchten oder den Anbau von Dauerkulturen. Auch Agroforstsysteme zählen zu den Maßnahmen der Bodenkohlenstoffanreicherung. Durch Pflanzung von Hecken oder Bäumen auf Weide- oder Ackerland können die Wurzeln im Boden zur Anreicherung des Bodenkohlenstoffgehalts beitragen. Zusätzlich binden vor allem Bäume auch oberirdisch signifikante Mengen CO<sub>2</sub> beim Wachsen.

#### Technisches Potential

Das Sequestrierungspotential hängt vom regionalen Mikroklima, der jeweiligen Praxis sowie den Bodenbeschaffenheiten vor Ort ab, die Literaturwerte für den europäischen Raum unterliegen größeren Schwankungen. Wiesmeier et al. (2020) geben für verbesserte Fruchtfolgen und Dauerkulturen auf

Ackerflächen ein jährliches Sequestrierungspotential von 0,55-1,32 tCO<sub>2</sub>/ha an. Für Agroforstsysteme auf Ackerflächen geben Wiesmeier et al. 2020 eine potentielle Speicherung von Kohlenstoff im Boden von bis zu 2,5 tCO<sub>2</sub>/ha pro Jahr an. Agroforstsysteme auf Grasland führen hingegen im Schnitt nicht zu nennenswerten Anstiegen des Bodenkohlenstoffgehalts. Bei Agroforstsystemen ist zu beachten, dass zusätzlich zur CO<sub>2</sub>-Speicherung im Boden CO<sub>2</sub> auch in der oberirdisch anwachsenden Biomasse gebunden wird. Für die Pflanzung von Bäumen auf Acker- oder Weideland werden in Cardinael et al. (2018) die mittleren jährlichen Kohlenstoffspeicherraten in der oberirdischen Biomasse für den europäischen Raum mit Werten zwischen 2 und 11 tCO<sub>2</sub>/ha angegeben. Diese Werte sind abhängig von der gewählten Baumdichte und den klimatischen Bedingungen. Das Abscheidungspotential ist im Vergleich zu den Sequestrierungsraten der Wieder-/Aufforstung hoch. Das ist zum einen damit zu begründen, dass die Raten für Wieder-/Aufforstung ein Mittelwert aller aufforstbaren Flächen umfasst und damit auch degradierte Flächen mit geringer Produktivität enthält. Zum anderen wachsen Bäume in Agroforstsystemen bis zu dreimal so schnell, wie gleichaltrige Bäume in entsprechenden Wäldern (Aertsens et al. 2013). Würden verbesserte Fruchtfolgen und Dauerkulturen sofort auf der gesamten deutschen Ackerfläche von 11,7 Mha gleichzeitig umgesetzt werden, könnten 6,5-15 MtCO<sub>2</sub> pro Jahr im Boden abgeschieden werden, wobei zu erwarten ist, dass sich nach etwa 20 bis 25 Jahren die Sättigung einstellt und kein weiterer Kohlenstoff mehr aufgenommen wird.

Um diesen Effekt in der Potenzialabschätzung zu berücksichtigen, wird der Einfachheit halber angenommen, dass die oben angegebenen CO<sub>2</sub>-Entnahmeraten linear mit der Zeit abnehmen und nach 25 Jahren auf null fallen. Des Weiteren nehmen wir vereinfacht an, dass der Anteil der Ackerflächen, auf denen bodenkohlenstoffanreichernde Maßnahmen etabliert werden, linear mit der Zeit steigt. Würden verbesserte Fruchtfolgen und Dauerkulturen auf 75% der gesamten deutschen Ackerfläche (8,8 Mha) über einen Zeitraum von 25 Jahren etabliert werden, könnten im 25. Jahr 3-6 MtCO<sub>2</sub> pro Jahr im Boden abgeschieden werden.

Durch die Umwandlung von 1 Mha Grünland in ein Agroforstsystem können durch Zunahme der oberirdischen Biomasse 2-11 MtCO<sub>2</sub> pro Jahr abgeschieden werden. Bei Umwandlung von 1 Mha Ackerland in ein Agroforstsystem könnten zusätzlich zum oben genannten Beitrag der oberirdischen Biomasse durch die Erhöhung des Bodenkohlenstoffes weitere 2,5 MtCO<sub>2</sub> pro Jahr gespeichert werden.

## Einordnung

Positive Nebeneffekte:

- Auf den gut gemanagten deutschen Böden werden keine signifikanten Verbesserungen der Nährstoffverfügbarkeit und damit Produktivität erwartet, jedoch kann standortspezifisch eine Verbesserung gerade der physikalischen Bodenqualität (z.B. höhere Wasserhaltefähigkeit) erwartet werden.
- Für den internationalen Kontext führt die Literatur auf:
  - verbesserte Resilienz des Bodens und verbesserte landwirtschaftliche Produktion zu teilweise negativen Kosten
  - reduzierte Verschmutzung und verbesserte Bodenqualität
  - positive Auswirkungen auf Boden-, Wasser- und Luftqualität.

Negative Nebeneffekte:

- möglicher Anstieg von N<sub>2</sub>O-Emissionen
- Notwendigkeit der Zugabe von Stickstoff und Phosphor zur Aufrechterhaltung der Stöchiometrie der organischen Bodensubstanz

Technologie-Reifegrad:

- hoch

Kosten:



- Es handelt sich bereits heute um eine sehr kosteneffektive Option. Globale Projektionen für 2050 liegen bei 0-100 [-45-100] USD/tCO<sub>2</sub>.

Permanenz:

- reversibel
- Bodensenken werden gesättigt und sind reversibel, wenn die Bewirtschaftung stoppt, die Bodenkohlenstoff anreichert.

Managementaufwand zur Speichererhaltung:

- mittel bis hoch

Monitoring:

- schwer

Flächenintensität:

- Agroforstsysteme 0,4 ha/tCO<sub>2</sub>, Fruchtfolgen und Dauerkulturen 0,75-1,8 ha/tCO<sub>2</sub>, allerdings ohne Flächenkonkurrenz zu landwirtschaftlichen Nutzungen und anderen CO<sub>2</sub>-Entnahmemassnahmen

Politische Herausforderungen:

- Anreizsysteme schwierig umzusetzen, da viele dezentrale Akteur:innen
- Schwierigkeiten der Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung.

#### 1.2.2.4. Bioenergie mit CCS (BECCS)

Durch Photosynthese wandeln Energiepflanzen beim Wachsen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre in energetisch nutzbare Biomasse um. BECCS (Bioenergie mit Carbon Capture und Storage) ist ein Oberbegriff für Technologien, die aus dieser Biomasse nutzbare Energie produzieren, wobei das im Prozess freiwerdende CO<sub>2</sub> abgefangen und einer langfristigen (geologischen) Speicherung zugeführt wird. Der in der Literatur prominenteste Prozess ist dabei die Verstromung. Doch auch eine Umwandlung in andere Energieträger wie Biogas, Bioflüssigkraftstoffe oder biogener Wasserstoff wird in diesem Kapitel unter dem Oberbegriff BECCS betrachtet. Das CO<sub>2</sub>-Abscheidungspotential hängt von der betrachteten Technologie ab. Bei der Verstromung sowie der Umwandlung von Biomasse in Wasserstoff enthalten die gewonnenen Energieträger keinen Kohlenstoff mehr, weswegen der Großteil des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffes abgeschieden und gespeichert werden kann. Bei der Umwandlung der Biomasse in energetisch nutzbare Kohlenwasserstoffe wird dementsprechend ein kleinerer Anteil des biogen gebundenen Kohlenstoffes abgeschieden. Jedoch können sich durch Substitution fossiler Energieträger zusätzliche, erhebliche CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale ergeben.

#### Technisches Potential

Die Abscheidungsraten von CO<sub>2</sub> bezüglich des Kohlenstoffanteils der Biomasse für verschiedene beispielhaft vorgestellte BECCS-Prozesse sind: 99% bei H<sub>2</sub>-Produktion (Cormos 2015), 90% bei Stromerzeugung über einen „integrated gasification combined cycle“ (Hanssen et al. 2020), 48% bei der Herstellung von Biokerosin mit Fischer-Tropsch-Synthese (Liu et al. 2010) und 40% für die Biogasherstellung (Carbo et al. 2011). Der limitierende Faktor aller dieser Optionen ist neben der bisher inexistenten Transport- und Speicherinfrastruktur das nachhaltige Biomasseangebot, bei dem hier unterschieden wird in grundlegende Biomasse aus energetisch nutzbaren Reststoffen und Anbaubiomasse aus dediziert angebauten Energiepflanzen. Das in 2014 verfügbare, energetisch nutzbare, lignocellulose Biomassepotential aus Reststoffen plus Scheitholz wird in Thrän et al. (2019) mit

0,855 EJ<sup>5</sup> angegeben. In 2014 wurde in Deutschland Biomasse zur energetischen Nutzung im Umfang von 0,426 EJ<sup>6</sup> angebaut (Thrän et al. 2019). Würde das volle Biomassepotential ausgeschöpft werden können, könnten durch BECCS-Prozesse, je nach Technologie, 35-87 MtCO<sub>2</sub> aus Reststoffen und zusätzlich 17,5-38 MtCO<sub>2</sub> aus Anbaubiomasse abgeschieden werden. Würden von diesem theoretischen Maximum 0,5 EJ für BECCS-Prozesse bereitgestellt werden können, könnten 20-49 MtCO<sub>2</sub> abgeschieden werden. Die Biomasse, sowohl aus Reststoffen als auch die Anbaubiomasse, liegt allerdings dezentral vor, wohingegen BECCS-Anlagen in zentralisierter Weise betrieben werden sollten, da sie an eine CO<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur angebunden sein müssen. Auch die Verfügbarkeit einer Transport- und Speicherinfrastruktur sollte also als limitierender Faktor in eine umfassende Potentialanalyse aufgenommen werden.

### Einordnung

Positive Nebeneffekte:

- Marktchancen
- wirtschaftliche Diversifizierung
- Energieunabhängigkeit
- Technologieentwicklung und –transfer
- wichtiger Beitrag zur Dekarbonisierung von Transport und Industrie durch Substitution von fossilen Kohlenwasserstoffen.

Negative Nebeneffekte:

- konkurriert mit Pflanzenkohle um verfügbare Biomasse
- konkurriert mit DACCS um geologische Einspeisekapazität
- im Fall von Anbaubiomasse:
  - direkter und indirekter Landnutzungswandel
  - Konkurrenz mit Nahrungsmittelproduktion und Wieder-/Aufforstung um Landflächen
  - Auswirkungen auf Gesundheit
  - Biodiversitätsverlust, Entwaldung und Walddegradation
  - Auswirkungen auf Nährstoffe und Wasser

Technologie-Reifegrad:

- bisher nur einige wenige Demonstrationsprojekte.

Kosten:

- Aktuelle Kosten hängen sehr davon ab, welche Bioenergiepfade involviert sind, z.B. könnte die Tonne CO<sub>2</sub> an existierenden biogenen Quellen, die mit CCS ausgestattet werden, unter idealen Bedingungen perspektivisch deutlich unter 100EUR/t entfernt werden bzw. für bis zu 135 EUR/t inklusive Transport und Speicherung (Johnsson et al. 2020), während erste Demonstrationsanlagen noch weit höhere Kosten aufweisen. Perspektivisch für 2050 liegen globale Studien im Bereich 100-200 [25-1000] USD/tCO<sub>2</sub>.

Permanenz:

- hoch für adäquate geologische Speicherung

---

<sup>5</sup> 0,855 EJ entsprechen 48,1 Mt. Trockenmasse, davon ungefähr 24 Mt Kohlenstoff, das entspräche umgerechnet 88 MtCO<sub>2</sub>.

<sup>6</sup> 0,426 EJ entsprechen 24,4 Mt. Trockenmasse, davon ungefähr 12 Mt Kohlenstoff, das entspräche umgerechnet 44 MtCO<sub>2</sub> (aus Thrän et al. 2019).

Managementaufwand zur Speichererhaltung:

- gering

Reversibilität:

- stabil für adäquate geologische Speicherung

Monitoring:

- geologische Speicherung einfach
- Emissionen aus indirekter Landnutzungsänderung im Fall von Anbaubiomasse sehr schwer

Flächenintensität im Fall von Anbaubiomasse:<sup>7</sup>

- Mais 0,1-0,25 ha/tCO<sub>2</sub>
- Miscanthus 0,04-0,1 ha/tCO<sub>2</sub> (je nach Technologie untere Grenze Biogas mit CCS, obere Grenze Bio-H<sub>2</sub> mit CCS)

Politische Herausforderungen:

- fehlende Akzeptanz von geologischen Speichern und Landnutzungsänderungen für Biomasseanbau in der Bevölkerung.

#### 1.2.2.5. Luftfilter (DACCS)

Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) ist der Oberbegriff für technische Verfahren zur Abscheidung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft mit anschließender langfristiger, geologischer Speicherung. Da die Konzentration des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre vergleichsweise klein ist, ist für diese Prozesse ein hoher Energieaufwand nötig. Die Umgebungsluft muss mit Hilfe von Ventilatoren am Ab- oder Adsorbiermaterial vorbeiströmen. Im Anschluss wird das dort gebundene CO<sub>2</sub> durch Ausheizen des Materials wieder freigesetzt und kann dabei abgefangen und der langfristigen Speicherung zugeführt werden.

#### Technisches Potential

Durch den hohen Energiebedarf der direkten atmosphärischen Abscheidung, Direct Air Capture (DAC), stellt die zur Verfügung stehende Energie die limitierende Ressource dar. Für die Abscheidung einer Tonne CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre werden perspektivisch nach Angaben von Climeworks, einem der führenden DAC-Unternehmen, 400 kWh elektrische Energie zur Betreibung der Ventilatoren und 1600 kWh thermische Energie zur Materialregeneration benötigt (Beuttler et al. 2019). Zur Einordnung der Größenordnung wird hier illustrativ das Abscheidungspotential berechnet, stunden für die Betreibung von DAC-Anlagen 15 tWh (etwa 3% der aktuellen innerdeutschen Stromproduktion) zur Verfügung. Der Einfachheit halber wird die thermische Energie in dieser Beispielrechnung durch Wärmepumpen mit COP 3 bereitgestellt. Damit könnten 16 MtCO<sub>2</sub> bei Verfügbarkeit eines CO<sub>2</sub>-neutralen Strommixes abgeschieden werden. Dieses Potential verringert sich auf 10 MtCO<sub>2</sub> beim aktuellen Strommix mit Emissionsfaktor 401 gCO<sub>2</sub>/kWh.

#### Einordnung

Positive Nebeneffekte:

- Geschäftsmöglichkeiten
- Spezifische Anwendungen könnten Raumluftqualität verbessern.

<sup>7</sup> Ertragsannahmen nach Tavakoli-Hashjini et al. (2020) für Brandenburg: Mais 100 GJ/ha, Miscanthus 250 GJ/ha. Kohlenstoffanteilannahme: vereinfacht konstant mit 18,5 GJ/t DM.

- Atmosphärisches CO<sub>2</sub> kann als Rohstoff in der Industrie eingesetzt werden, wobei beachtet werden muss, ob es bei der Nutzung wieder in die Atmosphäre entlassen wird (siehe auch Box 2).
- durch geringeren Flächenbedarf als viele landbasierte Praktiken sowie durch Standortunabhängigkeit potentiell geringerer Infrastrukturbedarf

Negative Nebeneffekte:

- Konkurrenz mit BECCS um geologische Einspeisekapazität
- CO<sub>2</sub>-Strafe, wenn hoher (thermischer) Energiebedarf durch fossile Brennstoffe gedeckt wird
- in dem Zusammenhang auch Abhängigkeit von enormer Erneuerbaren-Verfügbarkeit und Transport- und Speicherkapazitäten
- derzeit hohe Anfangsinvestitionskosten
- Material-/Abfallimplikationen nicht bekannt, die nicht ausgeschlossen werden können
- einige räumliche Anforderungen

Technologie-Reifegrad:

- nur in Nischenmärkten angewandt

Kosten:

- Während einzelne Unternehmen aktuelle Kosten in der Größenordnung von 600 USD/tCO<sub>2</sub> angeben, zeigt die globale Literatur eine Spannbreite von Schätzungen von unter 100- 300 [25-1000] USD/tCO<sub>2</sub> in 2050 auf.

Permanenz:

- hoch für adäquate geologische Speicherung

Managementaufwand zur Speichererhaltung:

- gering

Reversibilität:

- stabil für adäquate geologische Speicherung

Monitoring:

- einfach

Politische Herausforderungen:

- 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.

### 1.2.2.6. Beschleunigte Verwitterung

Die Verwitterung ist der natürliche Prozess der Gesteinszersetzung durch chemische Vorgänge, bei dem atmosphärisches CO<sub>2</sub> aufgenommen und dauerhaft in den Zerfallsprodukten gebunden wird. Dieser Prozess findet fast ausschließlich an der Materialoberfläche statt, wo Gestein mit Wasser und darin gelöstem atmosphärischem CO<sub>2</sub> in Kontakt treten kann. Durch Mahlen des Gesteins würde die Kontaktfläche deutlich erhöht und der Verwitterungsprozess signifikant beschleunigt werden. Um mit ausreichend Wasser und atmosphärischem CO<sub>2</sub> in Kontakt treten zu können, kann das Gesteinsmehl auf Ackerböden aufgetragen werden. Die Geschwindigkeit des Verwitterungsprozesses hängt von der Gesteinsart, der Korngröße, aber auch von der Umgebungstemperatur ab. Basaltgestein hat eine hohe CO<sub>2</sub>-Effizienz, ist nur wenig mit schädlichen Spurenelementen versetzt, in großen Mengen vorhanden und könnte sogar Nährstoffe wie Phosphor und Kalium liefern. Es ist daher die derzeit vielversprechendste Gesteinsart.

## Technisches Potential

Eine Tonne Basaltgestein bindet bei vollständiger Verwitterung etwa 0,3 tCO<sub>2</sub>. Bei einer Korngröße von 20 µm hätte Basaltgestein in gemäßigtem Klima eine Halbwertszeit von 12 Jahren (nach Strefler et al. 2018b). Bei einer maximalen Basaltgesteinsmenge von 15 kg/m<sup>2</sup> (Strefler et al. 2018b) könnten 150 Tonnen Basalt auf einem Hektar Land nach 12 Jahren rund 25 Tonnen atmosphärisches CO<sub>2</sub> binden. Da Basaltgestein in ausreichenden Mengen zu Verfügung steht, werden die verfügbaren Ackerflächen zum limitierenden Faktor. Weiterhin wird für das Gesteinsmahlen Energie benötigt.

Im hypothetischen Fall, dass die gesamte aktuell in Deutschland genutzte Ackerfläche von 11,7 Mha mit der maximalen Basaltgesteinsmenge bedeckt würde, könnten 30 MtCO<sub>2</sub> pro Jahr abgeschieden werden. Würden 30% (3,5 Mha) der gesamtdeutschen Ackerfläche mit der maximalen Basaltgesteinsmenge bedeckt, könnten 9 MtCO<sub>2</sub> pro Jahr abgeschieden werden. Um die genannten jährlichen Abscheidungsraten aufrecht zu erhalten, müssten die bereits verwitterten Anteile regelmäßig durch neues Gestein aufgefrischt werden.

## Einordnung

Positive Nebenwirkungen:

- Auf den gut gemanagten deutschen Böden werden keine signifikanten Verbesserungen der Ernteerträge erwartet.
- Für den internationalen Kontext führt die Literatur auf:
  - gesteigerte Ernteerträge
  - verbesserte Pflanzennährstoffversorgung und Bodenfruchtbarkeit
  - Nährstoff- und Feuchtigkeitsversorgung
  - Erhöhung des pH-Wertes im Boden
  - erhöhte Kationenaustauschkapazität in degradierten Böden

Negative Nebenwirkungen:

- Risiken für die menschliche Gesundheit durch feinkörniges Material
- ökologische Auswirkungen von Mineralienabbau und –transport
- mögliche Freisetzung von Schwermetallen
- Veränderung der hydrologischen Bodeneigenschaften

Technologie-Reifegrad:

- kleinskalige Anwendung im Düngebereich

Kosten:

- Auf globaler Ebene liegen perspektivische Kosten in 2050 bei 50-200 [15-3460] USD/tCO<sub>2</sub>, dabei gehen die Studien meist nicht von großem technologischen Fortschritt aus und arbeiten oft mit aktuellen Kosten.

Permanenz:

- hoch

Managementaufwand zur Speichererhaltung:

- sehr niedrig

Reversibilität:

- stabil

Monitoring:

- einfach

Flächenintensität:

- 0,4 ha/tCO<sub>2</sub> Abscheidung pro Jahr, allerdings ohne Flächenkonkurrenz zu landwirtschaftlichen Nutzungen und anderen CO<sub>2</sub>-Entnahmemaßnahmen

Politische Herausforderungen:

- Gesellschaftlich kontrovers diskutierter Mineralienabbau im großen Stil, wobei neuere Literatur auch auf große Potentiale durch Wiederverwertung alkalischer Abfallprodukte aus der Industrie hinweist, die den großflächigen Abbau unnötig machen würde (Beerling et al. 2020).
- Weitere Forschung notwendig, um zukünftige Relevanz besser einordnen zu können.

### **Box 2: CO<sub>2</sub>-Nutzung als Maßnahme für CO<sub>2</sub>-Entnahmen**

Generell ist bei der CO<sub>2</sub>-Nutzung (Carbon Capture and Utilisation [CCU]) das Ziel nicht die dauerhafte Speicherung von CO<sub>2</sub>, sondern die Nutzbarmachung des Stoffes als Ressource für weitere industrielle und chemische Prozesse (Cuéller-Franca et al. 2015, Ghat et al. 2021). Dabei umfasst der Begriff eine große Spannweite an Methoden: Hierbei kann das CO<sub>2</sub> aus fossilen Brennstoffen stammen, durch einen industriellen Prozess aus der Atmosphäre abgeschieden oder auch biologisch durch landbasierte Prozesse gewonnen werden (Hepburn et al. 2019). Die folgende Tabelle bietet eine Übersicht über die groben Kategorien an Nutzungsmethoden, die bisher in der Forschung am meisten Aufmerksamkeit bekommen haben.

Obwohl die Nutzbarmachung zunächst einmal ein attraktives Narrativ darstellt, muss beachtet werden, dass das CO<sub>2</sub> in den meisten Prozessen und produzierten Materialien nur temporär gespeichert wird, d.h. es wird nach unterschiedlichen Zeiträumen wieder in die Atmosphäre abgegeben. Diese Speicherzeiten können abhängig vom Verfahren stark variieren: Synthetische Brennstoffe speichern beispielsweise besonders kurzfristig, CO<sub>2</sub> in Baumaterialien hält natürlich länger. Für Holzbau finden Churkina et al. (2020) in einer neueren Studie globale Speicherungsraten von 0,04-2,5 GtCO<sub>2</sub> pro Jahr.

Weiterhin gilt es zu beachten, wie viele CO<sub>2</sub>-Äquivalente durch die Vermeidung der konventionellen Produktion eingespart wurden (Kätelhön et al. 2019) bzw. wie viele durch den Nutzungsprozess freigesetzt werden. CO<sub>2</sub>-Nutzung stellt meist ein deutlich geringeres CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial bereit als CO<sub>2</sub>-Entnahmetechniken und -praktiken. Dennoch kann CCU Lösungen für die Emissionskontrolle und die Herausforderungen in der Energieversorgung anbieten (Al-Mamoori et al. 2017). Eine kosteneffektive Anwendung in großem Maßstab bedarf allerdings noch weiterer Grundlagenforschung ebenso wie Bereitstellung finanzieller Ressourcen, um die Entwicklung der vielversprechendsten Technologien voranzutreiben (Zimmermann et al. 2020).

Da CCU-Prozesse, die das genutzte CO<sub>2</sub> letztlich wieder in die Atmosphäre abgeben, langfristig nicht zur Begrenzung der Erwärmung beitragen können, gilt es umso mehr, flexible Konzepte bei der Definition von Entnahmen anzuwenden, die die kürzere Bindungsdauer berücksichtigen (siehe Sektion 1.2.1). Eine genutzte Tonne CO<sub>2</sub> ist nicht automatisch mit einer entnommenen Tonne CO<sub>2</sub> gleichzusetzen.

Neben diesem Caveat muss allerdings auch erwähnt werden, dass sich Innovationskomplementaritäten mit anderen Verfahren, die CCS nutzen, ergeben können (Hepburn et al. 2019). Dadurch kann die CO<sub>2</sub>-Nutzung auch Reifegrad und Kostensenkungen bei Technologien fördern, die eine langfristige Speicherung von CO<sub>2</sub> ermöglichen. CCU-Prozesse können daher im Rahmen der Innovationsförderung berücksichtigt werden.

Nutzung	Erklärung/Beispiele	CO <sub>2</sub> -Haltbarkeit	Potenzial in 2050 (MtCO <sub>2</sub> entfernt pro Jahr)	Nutzungspotential in 2050 (Mt genutztes CO <sub>2</sub> pro Jahr)	Kosten* (2015 USD 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-Polyololen.	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

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

Quelle: Daten aus Hepburn et al. (2019), Tabelle angepasst von Edenhofer et al. (2021).

### 1.2.3. Überblick technologieübergreifender Problematiken

Die verschiedenen Herausforderungen technologiespezifischer Natur, wie zum Beispiel potenzielle Risiken der Nachhaltigkeit von großflächigem Biomasseanbau für BECCS, haben einen negativen Einfluss auf die öffentliche Wahrnehmung. Insbesondere Technologien, die geologische Speicherung beinhalten, begegnen in vielen Ländern, insbesondere in Deutschland großem Widerstand und sind teilweise sogar rechtlich ausgeschlossen (siehe Los 2).

Man kann also schlussfolgern, dass es auf Technologieebene eine gewisse Heterogenität bei der Akzeptanz gibt. Im Allgemeinen scheint es, dass Praktiken, die mit dem Pflanzen von Bäumen und der Wiederherstellung der Natur verbunden sind, größere öffentliche Unterstützung genießen als Technologien, die Bioenergie und CCS beinhalten (de Coninck et al. 2018). Auf einer höheren Ebene wird das eigentliche Konzept der Ermöglichung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen aufgrund von Ängsten vor sogenanntem „moral hazard“ abgelehnt (Lenzi et al. 2018), also die Besorgnis, dass es zu einer Verzögerung bei den Emissionsreduktionen kommen kann, die später durch CO<sub>2</sub>-Entnahmen ausgeglichen werden soll, und somit das Erreichen ambitionierter Minderungsziele gefährden kann (McLaren et al. 2016).

Es gibt auch Hinweise darauf, dass die Wahl des Politikinstruments zur Schaffung von Anreizen für die Beseitigung von Emissionen einen Einfluss auf die Akzeptanz hat. Insbesondere wird festgestellt, dass Zahlungen für CO<sub>2</sub>-Entnahmen gegenüber Preisgarantien für Produzent:innen, die aus BECCS gewonnene Energie verkaufen, bevorzugt werden (Bellamy et al. 2019). In ähnlicher Weise wird das „framing“ als entscheidender Faktor dafür identifiziert, wie die Gesellschaft auf CCS- (Whitmarsh et al. 2019) und CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien reagiert (Gough und Mander 2019).

## 2. Regulierungsoptionen für CO<sub>2</sub>-Entnahmen

### 2.1. Konzeptioneller Rahmen für Anreizmechanismen

**Die Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und dessen dauerhafte Speicherung stellt ein öffentliches Gut dar:** Einerseits werden dadurch Klimaschäden durch die Erderwärmung vermieden, andererseits vergrößert sich dadurch das verbleibende Kohlenstoffbudget in der Atmosphäre zur Erreichung eines Temperaturziels. Die CO<sub>2</sub>-Entnahme leidet damit unter einem spiegelbildlichen Anreizproblem wie der CO<sub>2</sub>-Ausstoß – ohne entsprechende politische Eingriffe findet deshalb zu wenig CO<sub>2</sub>-Entnahme statt.

Im Zentrum von Politikmaßnahmen zur Förderung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen müssen daher Anreizmechanismen oder Regulierungsinstrumente stehen, die die Entnahme von CO<sub>2</sub> honorieren bzw. durch ordnungsrechtliche Vorgaben sicherstellen.

Für das Design von Politik- und Regulierungsmaßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme sind jedoch **zahlreiche weitere Marktversagen und Externalitäten zu berücksichtigen**, um eine effektive, kostengünstige, ökologisch nachhaltige und sozialverträgliche CO<sub>2</sub>-Entnahme zu erzielen:

- **Monitoring:** Die entnommenen Emissionsmengen und der Zeitraum ihrer Speicherung müssen verifiziert werden. Je nach Verfahren ist ein auf individueller Betriebsebene rechtssicheres Monitoring der Entnahmemenge und möglicher später erfolgter Entweichungen sehr teuer. Während das Monitoring von unterirdisch gespeichertem CO<sub>2</sub> mit etwa 1-4 pro Tonne eingelagertem CO<sub>2</sub> (IEAGHG 2020) vernachlässigbar klein ist und auch Monitoring in tropischen Waldprojekten meist unter 1 pro Tonne eingelagertem CO<sub>2</sub> liegen (Pearson et al. 2014), übersteigen die Kosten für regelmäßige Proben zur Bestimmung des Bodenkohlenstoffgehaltes unter Umständen den Wert des eingelagerten CO<sub>2</sub> (Smith et al. 2020). Mittels Remote-Sensing-



Verfahren und Modellen, in denen land- und forstwirtschaftliche Aktivitäten abgebildet sind, lassen sich CO<sub>2</sub>-Bestände und CO<sub>2</sub>-Flüsse weitaus kostengünstiger bestimmen. Während diese Verfahren über größere räumliche Einheiten hinweg die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Mengen gut erfassen können, kann es auf kleineren räumlichen Skalen jedoch zu erheblichen Abweichungen kommen. (Petrokofsky et al. 2012).

- **Haftung:** Der gesellschaftliche Nutzen einer CO<sub>2</sub>-Entnahme hängt maßgeblich von der Länge der Speicherung ab. Wird das gebundene oder gespeicherte CO<sub>2</sub> nach wenigen Jahren wieder freigesetzt, hat die Entnahme keinen klimawirksamen Nutzen; bei einer Speicherung über viele Jahrzehnte oder Jahrhunderte ergibt sich eine Begrenzung des Temperaturanstiegs im 21. Jahrhundert. Allerdings ist die Speicherdauer endogen und von der Sorgfalt und der weiteren Boden- bzw. Waldbewirtschaftung oder der Wahl der geologischen Speicherstätte abhängig. Ein maximaler Anreiz zur Erhöhung der Speicherdauer ergibt sich, wenn Eigentümer:innen von CO<sub>2</sub>-Senken für entweichendes CO<sub>2</sub> haftbar gemacht würden.
- **Verhaltensökonomische Aspekte:** Gerade im land- und forstwirtschaftlichen Bereich gibt es kleinere und mittlere Betriebe und Familienunternehmen, die sich durch erhöhte Risikoaversion, verringerten Zugang zu Kapital und Informationen bzw. Wissen auszeichnen. Anreiz- und Regulierungsinstrumente zur CO<sub>2</sub>-Entnahme sollten diese Aspekte berücksichtigen, da diese Betriebe anders als professionelle und kommerzielle Betriebe auf Anreizsysteme reagieren.
- **Additionalität:** Durch Marktreaktionen (Gleichgewichtseffekte) kann die tatsächlich verringerte CO<sub>2</sub>-Menge geringer als die direkt entnommene und gespeicherte CO<sub>2</sub>-Menge ausfallen. Dies ist insbesondere bei der Nutzung von Biomasse und Aufforstung der Fall, die zu veränderter Landnachfrage und damit zu Landnutzungsänderungen an anderen Orten führen kann (z.B. Plevin et al. 2010, Searchinger et al. 2009, Overmars et al. 2011, Sant'Anna 2019). Allerdings kann auch der Aufbau von Bodenkohlenstoff durch räumliche Verlagerung von organischem Kohlenstoff erfolgen, was letztlich nicht klimawirksam ist (Wiesmeier et al. 2020, Jacobs et al. 2020).
- **Umweltwirkungen:** Die zahlreichen Umweltwirkungen (s. Abschnitt 1.2) stellen weitere, technologiespezifische externe Effekte dar. Daher bedarf es separater Instrumente, die positive Umweltwirkungen (wie z.B. Erhöhung der Biodiversität durch bestimmte Maßnahmen zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffs) zusätzlich honorieren und negative Umweltwirkungen (wie z.B. Stickstoffüberschüsse bei Energiepflanzenanbau für BECCS) sanktionieren.
- **Verteilungswirkungen:** Land- und energieintensive Entnahmeverfahren können zu Preisanstiegen bei Nahrungsmitteln oder Energieträgern (insbesondere Strom) führen: Fajardy et al. (2020) berechnen durchschnittliche Anstiege von Getreidepreisen um bis zu 5% (in einigen Weltregionen bis 15%) durch BECCS;<sup>8</sup> auch Aufforstung kann zu deutlichen Anstiegen in Nahrungsmittelpreisen führen (Doelman et al. 2020). Darüber hinaus können hohe Landrenten entstehen, wenn Aufforstung oder Einlagerung von Bodenkohlenstoff auf bestimmten Standorten besonders einfach (und kostengünstig) erfolgen kann. Die erhöhte Landnachfrage bei BECCS und Aufforstung, führt dann zu steigenden Landrenten, von denen Landbesitzer:innen profitieren.
- **Innovation:** Innovationen in technologischen Verfahren oder beim Management können die Kosten der CO<sub>2</sub>-Entnahme weiter senken bzw. die Energie- oder Ressourceneffizienz sowie die Permanenz verbessern. Weil Innovationen jedoch ein teilweise öffentliches Gut darstellen (Bloom et al. 2019, Jaffe et al. 2003) sind privatwirtschaftliche Innovationsanreize zu gering. Durch Patente können diese zwar erhöht werden, allerdings schaffen Patente ein zeitliches Monopol auf eine Innovation und führen damit zu einer zu geringen Verbreitung von Innovationen. Darüber

<sup>8</sup> Dabei werden global im Jahr 2100 21 GtCO<sub>2</sub> durch BECCS entnommen.

hinaus lassen sich Innovationen im Bereich der Grundlagenforschung oder der land- und forstwirtschaftlichen Praktiken nicht patentieren. Unabhängig von Anreizmechanismen zu einer aktuellen CO<sub>2</sub>-Entnahme bedarf es daher auch Anreize zur Technologieentwicklung und Innovation, um CO<sub>2</sub>-Entnahmen langfristig im großen Maßstab kostengünstig, ressourceneffizient und sicher nutzen zu können.

Externalität Technologie	Unmittelbare Anreize zur CO <sub>2</sub> -Entnahme				Nebeneffekte und weitere Externalitäten			
	Klima	Monitoring	Haftung	Verhaltensö konom. Aspekte	Additionalität	Umweltwirkungen	Verteilungswirkungen	Innovation
Wälder	1	1	0,5	0,5	1	1	1	0,5
Bodenkohlenstoff	1	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5
BECCS	1	0	0,5	0	1	1	1	0,5
DACCS	1	0	0,5	0	0,5	0,5	0	1
Verwitterung	1	0	0	0,5	0	0,5	0	0,5
Pflanzenkohle	1	0,5	0	0	1	1	1	0,5
CCU	0,5	1	0,5	0	1	0,5	0	1

**Tabelle 1: Technologie-Externalitäten-Matrix. 1-Externalität sehr relevant, 0-Externalität nicht relevant.**

Der verschiedenen Externalitäten sind in Tabelle 1 dargestellt. Dabei wurde eine qualitative Einschätzung anhand der Relevanz einzelner Externalitäten für die jeweiligen Entnahmeverfahren vorgenommen, denen die oben genannten Überlegungen zugrunde liegen. Aus der Matrix wird ersichtlich, dass es eines Politik-Mixes bedarf, damit die CO<sub>2</sub>-Entnahme kosteneffizient, effektiv und ohne ökologische Nebenwirkungen erfolgen kann. Die Politikmaßnahmen sind daher daran zu bewerten, wie zielgenau und zu welchen gesellschaftlichen Kosten sie die Externalitäten bzw. Probleme adressieren können. Im Folgenden betrachten wir daher zunächst Maßnahmen, die der unmittelbaren Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Entnahme dienen (2.2) und anschließend komplementäre Maßnahmen für die Bereiche Additionalität, Umweltwirkung, Verteilungswirkung und Innovation (2.3).

## 2.2. Grundlegende Instrumente zur Förderung der CO<sub>2</sub>-Entnahme

In diesem Abschnitt besprechen wir zunächst Anreizinstrumente, die auf einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung beruhen und die Entnahmemenge mit einem CO<sub>2</sub>-Preis vergüten (2.2.1). Darauf aufbauend werden alternative Instrumente zur Förderung von Praktiken, die der CO<sub>2</sub>-Entnahme dienen, vorgestellt (2.2.2).

### 2.2.1. CO<sub>2</sub>-Bepreisung

Grundlegende ökonomische Überlegungen analog zur Vermeidung von Emissionen legen nahe, dass ein einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis auf entnommene und dauerhaft gespeicherte Kohlenstoffmengen zu einem optimalen Portfolio an Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Entnahme führt, weil die Grenzkosten der Entnahme angeglichen werden. Darüber hinaus lässt sich mit einem einheitlichen CO<sub>2</sub>-Preis die größtmögliche Menge an CO<sub>2</sub> der Atmosphäre zu einem vorgegebenen gesellschaftlichen Kostenbudget erreichen bzw., umgekehrt, eine vorgegebene CO<sub>2</sub>-Entnahmemenge zu geringsten gesellschaftlichen Kosten realisieren. Aufgrund der Diversität der Verfahren, die je nach Kontext und Zeitpunkt unterschiedlich attraktiv und sinnvoll sind, werden bei der CO<sub>2</sub>-Bepreisung die kostengünstigsten Optionen über Raum, Zeit und Technologie ermittelt und eingesetzt.

Gelten zudem gleiche CO<sub>2</sub>-Preise für die Entnahme von CO<sub>2</sub> wie auch für die Emission von CO<sub>2</sub>, ergibt sich ein optimales Verhältnis zwischen CO<sub>2</sub>-Vermeidung und -Entnahme (Kalkuhl et al. 2021). Weil für die Klimawirkung letztlich unerheblich ist, ob eine Tonne CO<sub>2</sub> vermieden oder entnommen wird, ergibt sich

aus Kostenperspektive eine Gleichbehandlung bei der Förderung von (dauerhafter) CO<sub>2</sub>-Entnahmen durch verschiedene Technologien gegenüber der Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Diese Überlegungen zum „Gesetz des einen Preises“ gelten jedoch zunächst in einer idealisierten Modellwelt, in der es nur ein Marktversagen (Klimawandel) gibt und daher auch nur ein einziges Politikinstrument (der CO<sub>2</sub>-Preis) notwendig ist. Wenn bestimmte Verfahren bzw. CO<sub>2</sub>-Entnahme an sich mit weiteren sozialen, ökonomischen oder ökologischen Effekten (Externalitäten) verbunden ist, müssen diese Verzerrungen durch komplementäre Instrumente behoben werden (siehe die grundsätzlichen Überlegungen zu Instrumenten-Design bei multiplen Marktversagen in Benneer und Stavins 2007, Coulter und Parry 2008). Wenn diese weiteren Externalitäten nicht behoben werden (können), so können differenzierte CO<sub>2</sub>-Preise für Vermeidung und Entnahme bzw. auch für einzelne Entnahmetechnologien als Second-Best-Ansatz optimal sein (siehe auch Edenhofer et al. 2021).

Damit die CO<sub>2</sub>-Bepreisung jedoch kosteneffizient ist, bedarf es einer umfassenden Bepreisung aller entnommenen wie auch abgegebenen Emissionen: Erstens kann die Entnahme von CO<sub>2</sub> mit der Emission von CO<sub>2</sub> an anderer Stelle verbunden sein (z.B. Energiegewinnung für DACCS, Landnutzungsänderungen bei landintensiven Verfahren). Zweitens kann die entnommene CO<sub>2</sub>-Menge zu einem späteren Zeitpunkt wieder entweichen. Werden Emissionen unvollständig bepreist, so ergeben sich Fehlanreize zur Entnahme bzw. zur permanenten Speicherung von Emissionen.

Ein maximaler Anreiz zur Erhöhung der Speicherdauer (Permanenz) ergibt sich daher, wenn entweichende Mengen erfasst und mit der Zahlung eines CO<sub>2</sub>-Preises versehen würden. Analog zu Umweltkosten bei Havarien, würden dann die Anbieter:innen von CO<sub>2</sub>-Entnahmen vollständig für die Permanenz haften (Cohen 2010). Aufgrund von Haftungsbeschränkungen (z.B. in Folge von Insolvenzen) ergeben sich jedoch auch strategische Anreize, Sorgfaltspflichten zu reduzieren (Boyer und Laffont 1997). Dies kann durch eine Mithaftung von Finanzintermediären wie Banken oder Versicherungen verringert werden (Boyer und Laffont 1997, Held und Edenhofer 2009). Die EU-Richtlinie 2009/31/EG (Art. 16-18) sieht derartige Haftungsregelungen während des Betriebs von geologischen Lagerstätten und auch für einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren nach Abdichtung der Lagerstätte vor. Danach geht die Haftung für Leckagen an die Regierung über. Lagerstättenbetreiber:innen müssen darüber hinaus nach Art. 19 finanzielle Sicherheiten – auch über Versicherungen – nachweisen, mit denen Zertifikate zum Ausgleich von entweichendem CO<sub>2</sub> erworben werden können. Bei der geologischen Speicherung kann daher von einem umfassenden Haftungsregime ausgegangen werden, das einen sehr hohen Anreiz zur sicheren Lagerung von CO<sub>2</sub> bietet.

Eine letzte große Herausforderung für effiziente CO<sub>2</sub>-Bepreisung stellt das Monitoring der Emissions- und Entnahmemengen dar. Sowohl die CO<sub>2</sub>-Bepreisung als auch die Umsetzung von Haftungsregelungen setzen ein rechtssicheres Monitoring von CO<sub>2</sub>-Flüssen bzw. -Beständen voraus. Während dies bei Verfahren zur geologischen Speicherung als unproblematisch erachtet wird, ist jedoch die Verifizierung diffuser Quellen und Senken (wie im Land- und Forstbereich) mit hohen Monitoringkosten verbunden. Gerade im Bereich des Bodenkohlenstoffs könnten Monitoringkosten für ein exaktes Erfassen der Kohlenstoffmengen die Effizienzgewinne aus einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung überwiegen (Smith et al. 2020).

Darüber hinaus stellen sich gerade im Bereich CCU erhebliche Anforderungen an das Monitoring und damit verbunden an die Durchsetzung des Verursachendenprinzips (Haftung), wenn CO<sub>2</sub> nach temporärer Speicherung wieder entweicht. So wechselt der in Produkten gebundene Kohlenstoff entlang von Wertschöpfungsketten teilweise mehrfach die Benutzer:innen. Damit CO<sub>2</sub>-Bepreisung ein effizientes Anreizinstrument für alle Substitutions- und Innovationsmöglichkeiten darstellt, muss das Preissignal bzw. die Menge des in den Produkten enthaltenen CO<sub>2</sub> entlang der gesamten Wertschöpfungskette sichtbar sein. Eine Downstream-Bepreisung – also am Punkt des Freisetzens der Emissionen – würde dann entsprechend auf die Vorproduzent:innen bzw. Nutzer:innen zurückwirken. Ein produktscharfes Monitoring kann aber gerade bei Konsumgütern aufgrund ihrer hohen Vielfalt mit exzessiven Transaktionskosten verbunden sein: So müsste beispielsweise in jedem Kunststoffprodukt auf fossiler Rohstoffbasis der CO<sub>2</sub>-Gehalt ‚vermerkt‘ werden, der bei der Entsorgung (Verbrennung) letztlich entweicht. Bei CCU muss zudem geprüft werden, ab welcher Nutzungs- bzw. Speicherdauer die CO<sub>2</sub>-Entnahme sinnvoll mit einem CO<sub>2</sub>-Preis vergütet werden sollte. Denn bei sehr kurzlebigen Produkten (z.B.

Nahrungsmitteln) würde ein vollständiges Accounting des gespeicherten Kohlenstoffs mit entsprechender Bepreisung erhebliche Transaktionskosten verursachen. Hier wäre für einzelne Produktklassen zu prüfen, welche pragmatischen Alternativen zur Downstream-CO<sub>2</sub>-Bepreisung sinnvoll sind, ohne die Anreizwirkung der CO<sub>2</sub>-Bepreisung übermäßig abzuschwächen.

Für die Bereiche, in denen Monitoring und Haftungsfragen gelöst sind, ließe sich ein Anreizsystem zur CO<sub>2</sub>-Bepreisung dabei grundsätzlich auf drei verschiedene Arten implementieren (Edenhofer et al. 2021):

- als vorgegebener CO<sub>2</sub>-Preisfad (Subvention) auf eine entnommene Menge CO<sub>2</sub> (analog zu einer CO<sub>2</sub>-Steuer auf Emissionen);
- als Auktionspreis, der aus einem vorgegebenen Entnahmeziel und einer Rückwärtsauktionierung („Reverse Auction“) resultiert (wie z.B. für BECCS in Schweden geplant ist);
- als Zertifikatspreis, der auf einem Emissionsmarkt entsteht, wobei für entnommenes CO<sub>2</sub> ein Zertifikat generiert werden kann (Rickels et al. 2021).

## 2.2.2. Weitere Instrumente

### Förderung von Praktiken zur CO<sub>2</sub>-Entnahme in Land- und Forstwirtschaft

Die oben dargestellte CO<sub>2</sub>-Bepreisung entspricht einem ergebnisorientierten („results-based“ oder „performance-based“) Anreizsystem, bei dem sich die Vergütung nach der tatsächlich entnommenen CO<sub>2</sub>-Menge (sowie deren Permanenz) richtet. Wie bereits in 2.2.1 dargestellt, erscheint die CO<sub>2</sub>-Bepreisung für diffuse Senken aufgrund der hohen Monitoringkosten als wenig geeignet. Als Alternative bieten sich maßnahmenbasierte („action-based“) Programme an, bei denen Land- und Forstbesitzer:innen für bestimmte Maßnahmen, die dem CO<sub>2</sub>-Aufbau in Böden und Wäldern dienen, kompensiert werden. Dieser Ansatz zur Förderung ökologischer oder umweltfreundlicher Praktiken ist sowohl in der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU als auch in Programmen der internationalen Zusammenarbeit zur Aufforstung oder zum Schutz von Wäldern und Ökosystemen dominant (Bartkowski et al. 2019, Burton und Schwarz 2013). In der Literatur zu „Payments for Ecosystem Services“ sind die Stärken und Schwächen dieses Ansatzes umfangreich untersucht worden.

Zunächst sind die Monitoring- und Transaktionskosten bei maßnahmenbasierten Förderprogrammen oft niedriger, weil hier auf leicht verifizierbare Aktivitäten gesetzt wird. Weil Zahlungen von der Aktivität abhängig sind, ergibt sich zudem keine Unsicherheit über die Vergütung aufgrund der exogenen Variabilität von Naturereignissen. Letztere führen zu Risikoprämien und damit höheren Kosten von ergebnisorientierten Verfahren (Engel 2016, Bartkowski et al. 2019). Jedoch leiden maßnahmenbasierte Ansätze unter Informationsasymmetrien zu Opportunitätskosten der Bewirtschaftung. Dies führt in der Regel dazu, dass maßnahmenbasierte Programme wenig zielgenau sind, unter Mitnahmeeffekten leiden und nicht kosteneffizient sind (Börner et al. 2017, Schomers und Matzdorf 2013, Drechsler 2017). Insbesondere die ökologischen Förderprogramme im Rahmen der EU Agrarpolitik werden als wenig effektiv bzw. mit geringem Umweltnutzen bewertet (Batáry et al. 2015, Bartkowski et al. 2019, Zukunftskommission Landwirtschaft 2021).

Aus diesen Erkenntnissen werden Prinzipien für das Design von Kompensationszahlungen hergeleitet (Burton und Schwarz 2013): Sie sollten so eng wie möglich anhand der ökologisch relevanten Ergebnisse erfolgen; durch Basiszahlungen (Teilnahmeprämien) können Risiken für Land- und Forstwirt:innen reduziert werden. Darüber hinaus können durch Verwendung pauschalierter und modellbasierter Ansätze und Selbstmonitoring die Monitoringkosten gesenkt werden.

Gerade durch ergebnisorientierte Zahlungen mit pauschalierter oder vereinfachten Monitoringverfahren ergibt sich ein fließender Übergang zwischen klassischen Förderinstrumenten der Agrar- und Waldpolitik und der CO<sub>2</sub>-Bepreisung. Die Vergütung von CO<sub>2</sub>-Entnahme durch Aufforstung oder veränderte Waldmanagementpraktiken kann als maßnahmenbasiertes Programm (One Billion Trees Programme in Neuseeland) erfolgen. Es können aber auch – wie in Australien oder Kalifornien – durch modellgestützte Verfahren die CO<sub>2</sub>-Entnahmemengen durch Aufforstung und Waldmanagementpraktiken berechnet werden. Dabei werden auch Abschläge aufgrund von unvollkommener Permanenz oder auch individuell

möglicher Abweichung von den modellgestützt ermittelten Entnahmemengen verwendet. In Kalifornien zeigte sich, dass derartige Verfahren auch zu Fehlanreizen führen und es zu einer erheblichen Überschätzung der kalkulierten Entnahmemenge kommen kann (Badgley et al. 2021). Um solche Fälle zu vermeiden, sollten regelmäßige, stichprobenbasierte Überprüfungen der kalkulierten Entnahmemenge mit der tatsächlichen Entnahmemenge erfolgen, Abschläge entsprechend angepasst bzw. modellbasierte Verfahren zur Berechnung der Entnahmemengen überarbeitet werden.

Auch für die Ausbringung der Pflanzenkohle würden sich ergebnisorientierte Anreizinstrumente eignen, wobei die Menge an gebundenem Kohlenstoff anhand vereinfachter Berechnungsverfahren, in der die Bodenqualität und die Witterungsbedingungen berücksichtigt sind, ermittelt wird. Um eine hohe Permanenz und Stabilität der Pflanzenkohle zu gewährleisten, müssen Prozessstandards zur Gewinnung der Pflanzenkohle festgeschrieben werden. Das „European Biochar Certificate“ könnte dabei als bestehender freiwilliger Industriestandard, der eine hohe Stabilität der Pflanzenkohle gewähren soll, eine Orientierung bieten.

Zur Förderung des Aufbaus von Bodenkohlenstoff ergeben sich ähnliche Überlegungen (Smith et al. 2020). Die in der EU GAP bereits bestehende finanzielle Förderung von Fruchtfolgen, Gehölzstreifen, Verwendung von Gründünger o.ä. könnte sich stärker an der damit verbundenen, durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Entnahmemenge orientieren, die modellgestützt ermittelt würde. Hierbei bedarf es auch eines CO<sub>2</sub>-Schattenpreises, mit dem das Entnahmeniveau letztlich skaliert und festgesetzt würde. Langfristig könnte eine EDV-gestützte Kohlenstoffbilanz auf Hofebene den Einstieg in eine umfassende CO<sub>2</sub>-Bepreisung ermöglichen, weil hier Quellen wie Senken erfasst und bepreist werden können. Weil derartige Verfahren jedoch nicht auf Messungen, sondern auf Modellen basieren, die wiederum Modellgrößen aufgrund von örtlichen Gegebenheiten und Farmpraktiken (Aktivitäten) berechnen, kann dieser Ansatz auch als maßnahmenbasierter Ansatz verstanden werden.

Aus den oben genannten Überlegungen ergibt sich, dass Förderprogramme mit geringeren Monitoringkosten einhergehen können, aber hohe Anforderungen an die Regulierer:innen bzgl. des Designs und der Berechnung der Fördersätze legen. In den Fördersätzen müssen sich die erwarteten Mengen und Zeiträume gespeicherten Kohlenstoffs widerspiegeln. Damit ist letztlich auch eine Verschiebung der Haftung bei vorzeitigem Entweichen auf die Gesellschaft verbunden (mit den damit verbundenen Anreizproblemen).

### **Staatliches Flächen- und Waldmanagement bzw. Prämien zur Änderung der Nutzungsart**

Eine weitere Alternative zu Förder- und Anreizinstrumenten zur Erhöhung von Kohlenstoffsenken in Böden und Wäldern könnte auch ein staatlicher Flächenkauf und eine damit verbundene Bewirtschaftungsweise zur Erhöhung der Kohlenstoffentnahme und -bindung sein. Dadurch kann insbesondere eine Umwandlung der Nutzungsart erfolgen (z.B. Umwandlung von Acker- in Grünland oder Umwandlung von Agrarland in Wald). Die erworbenen Flächen können dann wiederum verpachtet werden. Allerdings ließe sich eine derartige Umwandlung prinzipiell auch durch eine einmalige Prämienzahlung an Landbesitzer:innen erreichen, die an eine Bewirtschaftung als Wald oder Grünland für einen bestimmten Zeitraum geknüpft ist. Eine spätere Rückumwandlung ist aufgrund des geltenden Schutzstatus von Wald und Grünland dabei nicht mehr ohne weiteres möglich. In beiden Fällen können CO<sub>2</sub>-Schattenpreise und zu erwartende CO<sub>2</sub>-Speichermengen als Grundlage für die Preise für den Flächenkauf bzw. für Prämienzahlungen verwendet werden. Dadurch würden insbesondere Flächen mit geringen Opportunitätskosten umgewandelt. Weil es bei diesen Maßnahmen um landintensive Nutzungsänderungen geht, ist vor allem die Additionalität der entnommenen CO<sub>2</sub>-Menge mit erheblichen Unsicherheiten behaftet (s. nächster Abschnitt).

### **Weitere Instrumente**

Neben der CO<sub>2</sub>-Bepreisung sind auch Standards in der Industrie vorstellbar, die für jede emittierte Tonne CO<sub>2</sub> eine bestimmte Menge an CO<sub>2</sub>-Entnahme vorschreiben (z.B. mittels DACCS). Sind diese Standards

handelbar, würden sie ähnlich einem differenzierten CO<sub>2</sub>-Preis für Emissionen und für Entnahme wirken. Andere Förderinstrumente für technologische Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Entnahme sind im Abschnitt Innovationspolitik aufgeführt, weil sie hier überwiegenden Charakter der Technologie- und Innovationsförderung aufweisen.

## 2.3. Komplementäre Politikinstrumente

### 2.3.1. Additionalität und Carbon Leakage

Ein Grundproblem von Vermeidung wie auch der Entnahme von CO<sub>2</sub> für die Klimapolitik sind mögliche Ausweich- und Gleichgewichtseffekte, die die beabsichtigte Klimaschutzwirkung durch vermehrte Emissionen an anderer Stelle reduzieren oder teilweise ausgleichen. Dies wurde unter dem Begriff ‚carbon leakage‘ insbesondere im Hinblick auf die Wirksamkeit unilateraler CO<sub>2</sub>-Bepreisung intensiv diskutiert (Jakob et al. 2014). Die Gefahr von Carbon Leakage bei der CO<sub>2</sub>-Vermeidung – gerade auch vor dem Hintergrund angebotsseitiger Preisanpassungen auf fossilen Rohstoffmärkten (Green Paradox) – könnte Politikinstrumente zur CO<sub>2</sub>-Entnahme besonders attraktiv machen und sogar höhere CO<sub>2</sub>-Preise als im Vermeidungssektor rechtfertigen (Kalkuhl et al. 2021).

Allerdings können sich auch bei der CO<sub>2</sub>-Entnahme problematische Gleichgewichtseffekte ergeben: Zunächst entstehen Fehlanreize, wenn vorgelagerte THG-Emissionen, die im Rahmen von Prozessen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme entstehen, nicht durch einen umfassenden und entsprechend hohen CO<sub>2</sub>-Preis abgedeckt sind. Dies ist einerseits bei energieintensiven Verfahren (wie DACCS) der Fall, aber auch bei der Nutzung von Bioenergie, bei der Emissionen durch Düngemiteleinsetz und Bodenbearbeitung entstehen. Darüber hinaus können gerade in der Land- und Forstwirtschaft (bei BECCS, AF, Pflanzenkohle, aber in geringerem Umfang auch Bodenkohlenstoff) räumliche Verschiebungs- und Anpassungseffekte über die Landmärkte bzw. steigende Landpreise auftreten. Entscheidend ist hier, dass auch im Vermeidungsbereich THG-Emissionen möglichst umfassend bepreist sind.

Innerhalb Deutschlands bzw. der EU sind Landnutzungsänderungen durch das Ordnungsrecht und andere Maßnahmen stark begrenzt. Durch die Effort-Sharing-Regulation müssen Emissionen durch mögliche indirekte Landnutzungsänderungen von den einzelnen Mitgliedstaaten wieder aufgefangen und durch vermehrte Vermeidungsmaßnahmen an anderer Stelle ausgeglichen werden. Dies setzt aber voraus, dass mögliche indirekte Landnutzungsänderungen beim Accounting der landbasierten Emissionen korrekt und rechtzeitig erfasst werden und dass die ESR einen starken Compliance-Mechanismus auf die Mitgliedstaaten ausübt. Dennoch besteht ohne umfangreiche CO<sub>2</sub>-Bepreisung im Landsektor das Risiko einer ineffizienten Allokation von CO<sub>2</sub>-Entnahme- und Vermeidungsmaßnahmen.

Darüber hinaus kann durch erhöhte Aufforstung oder Biomassenutzung für BECCS oder Pflanzenkohle die Nachfrage nach Land weltweit steigen und somit erhebliche Emissionen durch (indirekte) Landnutzungsänderungen in Ländern außerhalb der EU freisetzen (Labpola et al. 2010). Dies gilt auch für verändertes Waldmanagement, weil hier die Produktivität beeinträchtigt werden könnte (Böttcher et al. 2018) und die Nachfrage nach Forstprodukten durch Biomasseentnahme an anderer Stelle bzw. bei Handelspartnern erfolgt.

Die bisherige Literatur zu möglichen Politikmaßnahmen ist sehr überschaubar und konzentriert sich v.a. auf die Maßnahmen zur Vermeidung von indirekten Landnutzungsänderungen durch Bioenergie (z.B. Fritsche et al. 2010, Gawel und Ludwig 2011). Letztlich sind diese Vorschläge vor allem darauf bedacht, die steigende Nachfrage nach Land zu begrenzen (z.B. Fokus auf Residuen zur Energiegewinnung, Berechnung und Besteuerung der Life-Cycle-Emissionen von Produktion bzw. Besteuerung von landintensiven Importgütern wie z.B. Futtermitteln). Für eine allgemeine Reduktion der globalen Landnachfrage dürften kurzfristig Konsumsteuern auf landintensive Produkte – insbesondere eine Abschaffung des ermäßigten MwSt-Satzes auf Fleisch – in Deutschland und der EU eine bedeutende Rolle zukommen (s. auch Grethe et al. 2021). Dadurch würde die Nachfrage nach Land sowohl in der EU als auch bei Exporteur:innen von Futtermitteln begrenzt. Eine ähnliche Wirkung wäre auch mit einem angepassten Border-Carbon-Adjustment-Mechanismus denkbar, bei dem landwirtschaftliche Importe gemäß ihrer direkten und indirekten (landnutzungsbedingten) Emissionen bepreist würden. Aufgrund der



kaskadenartigen indirekten Landnutzungseffekte, die bisher kaum nach Produkt und Herkunftsland solide quantifiziert werden können, erscheint eine Umsetzung in naher Zukunft sehr problematisch. Darüber hinaus wäre auch vorstellbar, einen Abschlag in der Förderung von landintensiven Entnahmeverfahren vorzunehmen, der die erwarteten Emissionen durch indirekte Landnutzungsänderungen widerspiegelt. Weil die Unsicherheiten hierüber jedoch immens sind, sollten dazu zunächst weitere Studien durchgeführt werden, damit eine effektive CO<sub>2</sub>-Entnahme sichergestellt werden kann.

Bei BECCS und Pflanzenkohle kann der Anstieg der Landnachfrage verringert werden, wenn BECCS und Pflanzenkohle (bisher ungenutzte) Residuen verwenden; bei BECCS wäre auch die Verwendung von bisher energetisch verwendeten Residuen und energetisch verwendeter Biomasse möglich. In allen Fällen müsste durch zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. ein handelbares Quotensystem für Mengen an BECCS und Pflanzenkohle, sichergestellt werden, dass nachhaltig nutzbare Mengen eingehalten und eine erhöhte Landnachfrage und damit indirekte Landnutzungsänderungen vermieden werden. Darüber hinaus müsste zunächst ermittelt werden, welche Mengen an Biomasse für BECCS und Pflanzenkohle überhaupt ohne weitere Substitutions- und Nachfrageeffekte bei Agrar- und Forsterzeugnissen genutzt werden können. Aufgrund fehlender Daten zur Nutzung und zum Wert von Residuen im Land- und Forstbereich ist dieses Nutzungspotenzial bisher unklar.

### 2.3.2. Weitere Umweltwirkungen

Wie in Abschnitt 1 dargestellt, können insbesondere landbasierte Verfahren negative wie auch positive ökologische Nebenwirkungen haben. Hier bedarf es im Rahmen der Agrar- und Forstpolitik zusätzlicher Maßnahmen, um beispielsweise Stickstoffeintrag oder Verlust von Biodiversität zu begrenzen (siehe auch Vorschläge der ZKL 2021). Diese Maßnahmen sind unabhängig von landbasierten Entnahmepolitiken sinnvoll und notwendig, um eine nachhaltige Wirtschaftsweise in der Landwirtschaft sicherzustellen; eine großskalige landbasierte CO<sub>2</sub>-Entnahme macht derartige Reformen jedoch noch wichtiger.

### 2.3.3. Verteilungswirkungen

Geologische wie auch biophysikalische Senken sind begrenzt. CO<sub>2</sub>-Entnahme kann daher Knappheitsrenten generieren, die letztlich Landbesitzer:innen zufallen. Verursacht Klimapolitik eine Wertsteigerung von Böden, stellt sich dabei neben dem normativen Problem (wem sollte die Natur gehören) auch ein Akzeptanzproblem (warum sollten Steuerzahler:innen bzw. Konsument:innen einen Teil ihres Einkommens an Landbesitzer:innen transferieren). Das Ausmaß von möglichen Knappheitsrenten ist bisher unklar; empirische Untersuchungen zu Biogasanlagen in Deutschland identifizieren teilweise erhebliche lokale Preisanstiege (Habermann und Breustedt 2011, Emmann et al. 2013, Hennig und Latacz-Lohmann 2017); in Norddeutschland haben Biogasanlagen beispielsweise zu Preisanstiegen bei Neuverpachtungen von 61 EUR auf 141 EUR pro Hektar in 2008/2009 geführt (Henning und Latacz-Lohmann 2017). Bei durchschnittlichen Neupachtpreisen von 401,95 EUR/ha ergeben sich hier bereits erhebliche Zuwächse in Landrenten. Bodenwertsteuern könnten diese ‚windfall profits‘ abschöpfen und damit an die Allgemeinheit überführen (Kalkuhl und Edenhofer 2017). Zwar ermöglicht die im Jahr 2019 beschlossene Reform der Grundsteuer erhöhte Steuersätze für landwirtschaftliche Flächen mit Windkraftanlagen, allerdings werden damit keine großflächigen Anstiege von Landrenten durch Bioenergienutzung oder Aufforstung erfasst. Dies ließe sich über eine Erhöhung der allgemeinen Hebesätze für die Grundsteuer auf landwirtschaftliche Flächen erreichen.

Neben Steigerungen von Landrenten können insbesondere Nahrungsmittelpreise langfristig aufgrund der höheren Flächenkonkurrenz steigen. Dies würde vor allem einkommensschwache Haushalte betreffen, weil sie einen hohen Anteil ihrer Konsumausgaben für Nahrungsmittel aufwenden. Während Sozialtransfers (wie Sozialhilfe) an die Lebenshaltungskosten geknüpft sind und sich daher automatisch an steigende Nahrungsmittelpreise anpassen sollten, könnte sich jedoch zusätzlicher Handlungsbedarf für Geringverdiener:innen ergeben, etwa über Anpassungen bei der Einkommensteuer.

### 2.3.4. Innovationen

Weitere Innovationen bei technologischen Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Entnahme und unterirdischen Speicherung sowie die Ausnutzung von Skalen- und Lerneffekten könnten die Kosten dieser Verfahren erheblich reduzieren (s. Breyer et al. 2019). Hierbei ergeben sich verschiedene Ansätze, um Innovationen zu befördern:

#### **Technologieoffene Anreize über CO<sub>2</sub>-Bepreisung bzw. erwartete Marktchancen**

Die empirische Literatur zu Induced Technological Change belegt, dass steigende Energie- bzw. Kohlenstoffpreise Forschungsinvestitionen und Innovationen in energiesparende und CO<sub>2</sub>-arme Technologien induzieren (Popp 2002, Aghion et al. 2016, Caeli und Dechezleprêtre 2016, Caeli 2020). Übertragen auf CO<sub>2</sub>-Entnahme bedeutet dies, dass ein frühes und glaubwürdiges Commitment zur CO<sub>2</sub>-Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren bereits privatwirtschaftliche Anreize zur Forschung setzt. Auch die frühzeitige Schaffung von rechtlichen Rahmenbedingungen für eine Vergütung von CO<sub>2</sub>-Entnahme mit geologischer Speicherung könnte diesen Anreiz bieten – selbst wenn die Vergütung in den ersten Jahren oder Jahrzehnten aufgrund anfänglich hoher Kosten noch nicht abgerufen würde. Durch regelmäßige Review-Verfahren, in denen nach klar definierten Kriterien neue Technologien als CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologie zugelassen und förderfähig werden, können technologieoffene Innovationsanreize weiter verstärkt werden.

Die Erwartung, dass CCS-basierte Verfahren in der Zukunft marktreife Technologien zur kostengünstigen CO<sub>2</sub>-Entnahme darstellen, dürfte insbesondere auch erklären, warum zunehmend privatwirtschaftliche Initiativen die Entwicklung, Förderung und Anwendung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien mit bis zu dreistelligen Millionenbeträge finanzieren (siehe Tabelle A1 im Anhang).

#### **Lernkurven abfahren und Skaleneffekte induzieren**

Bei zahlreichen neuen Technologien ergeben sich erst durch die Produktion und Produktanwendung Innovationen zur Optimierung von Produktionsprozessen und zur Kostensenkung. Dies wird auch als Learning by Doing bezeichnet, weil Kostensenkungen sehr stark mit der kumulierten Produktionsmenge korreliert sind (Arrow 1962). Die Lerneffekte waren insbesondere in der Halbleiterindustrie, bei Computerchips, aber auch bei Solarzellen und Windrädern zu beobachten. Weil Learning by Doing zu einem gewissen Anteil aus externen Lerneffekten besteht, die als öffentliches Wissensgut allen Firmen zur Verfügung stehen (Irwin und Klenow 1994, Gruber 1998, Barrios und Strobl 2004), ergibt sich ein zu geringer privatwirtschaftlicher Anreiz, in Technologien mit hohen Lernraten zu investieren (Spence 1984, Ghemawat und Spence 1985, Fischer und Newell 2007). Der technologische Wandel wird damit verzögert und die Transformation verteuert (Kalkuhl et al. 2012). Förderprogramme oder Technologiequoten, die einen frühzeitigen Nischenmarkt für innovative Technologien schaffen, können dies ausgleichen. Insbesondere zeigen sich Quoten-Instrumente, die den Aufwuchs einer bestimmten Technologie über die Zeit mittels Rückwärtsauktionierung („Reverse Auctions“) ermöglichen, als robustes und effektives Instrument (ibd.).<sup>9</sup> Daraus folgt, dass gezielte Mengenziele für einzelne CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien, die beispielsweise über Rückwärtsauktionierung erreicht werden, ein sinnvolles Instrument zur Innovations- und Technologieförderung in frühen Phasen der Entwicklung sein können. Dabei sollten Mengenziele jedoch nach Technologie differenziert werden, um breite Innovationsanreize in verschiedenen Technologien zu setzen.

---

<sup>9</sup> Subventionen bzw. Förderprogramme können diesen Aufwuchs bei vollständiger Informationen noch kosteneffizienter erzielen, jedoch ist aufgrund der unvollkommenen Informationen über die exakte Höhe der Lernraten und der Technologiekosten eine sorgfältige Feinsteuerung und Anpassung von Fördersätzen nötig, um eine Über- oder Unterförderung zu vermeiden.



## Programme und Fördermaßnahmen

Neben CO<sub>2</sub>-Bepreisung und Fördermaßnahmen zur Aufskalierung und Erzielung der Marktreife können gezielte Programme wie F&E-Vorhaben, Finanzierung von Pilot- und Demonstrationsprojekten oder Forschungszuschüsse Innovationen beschleunigen. Dies kann über die bestehenden Förder-, Forschung und Demonstrationsprogramme des BMBF bzw. der jeweiligen Ministerien (wie BMWi oder BMEL) geschehen. Eine Übersicht über bestehende Programme in Deutschland sowie anderen Ländern im Bereich CO<sub>2</sub>-Entnahme ist in Tabelle 2 dargestellt. Beim EU Innovationsfund stehen bisher jedoch DACCS- und BECCS-Projekte in Konkurrenz mit fossilem CCS und CCU, was eine Qualifizierung von Entnahmetechnologien für eine Finanzierung sehr erschwert.

Land	Förderprogramm	Fördersumme	Förderschwerpunkt/-ziel	Auswahlverfahren
UK	<p><b>BEIS Direct Air Capture and Greenhouse Gas Removal Innovation Programme</b></p> <p>CO<sub>2</sub>-Entnahme Forschungs- und Demonstrationsprojekte können sich hier um Funding bewerben.</p> <p><a href="https://www.gov.uk/government/publications/direct-air-capture-and-other-greenhouse-gas-removal-technologies-competition">https://www.gov.uk/government/publications/direct-air-capture-and-other-greenhouse-gas-removal-technologies-competition</a></p>	81,9 Mio EUR (70 Mio. GBP)	Direct Air Capture und andere skalierbare Technologie, mit dem Ziel, CO <sub>2</sub> für unter 200 Pfund/tCO <sub>2</sub> Äq entnehmen zu können; Aufforstung ist ausgeschlossen	Wettbewerb
UK	<p><b>UKRI Strategic Priorities Fund</b></p> <p><a href="https://www.ukri.org/news/uk-invests-over-30m-in-large-scale-greenhouse-gas-removal/">https://www.ukri.org/news/uk-invests-over-30m-in-large-scale-greenhouse-gas-removal/</a></p>	36,9 Mio. EUR (31,5 Mio. GBP)	Umsetzbarkeit von fünf innovativen, groß angelegten Methoden der CO <sub>2</sub> -Entnahme aus der Atmosphäre testen.	Demonstrator Projects
DE	<p><b>BMBF CO<sub>2</sub>-Entnahme-Förderrichtlinie</b></p> <p><a href="https://www.bmbf.de/forderungen/bekanntmachung-3047.html">https://www.bmbf.de/forderungen/bekanntmachung-3047.html</a></p>	20 Mio. EUR, genaue Höhe ergibt sich bei Bewilligung der Projekte	Rolle von CO <sub>2</sub> -Entnahmen in der Klimapolitik besser verstehen und Forschungskapazitäten zu CO <sub>2</sub> -Entnahmemethoden in Deutschland weiterentwickeln bzw. aufbauen. Die Förderrichtlinie ist explizit technologieoffen.	Organisationen (Hochschulen, Institute, Firmen) können Anträge auf Fördergelder stellen

DE	<b>MARE:N – Küsten-, Meeres- und Polarforschung: Forschungsmission „Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung“</b> <a href="https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-3017.html">https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-3017.html</a>	10,5 Mio. EUR, die sich auf verschiedene Förderschwerpunkte verteilen	Geologische Methoden zur CO <sub>2</sub> -Speicherung, Erhöhung der Alkalität zur Steigerung der CO <sub>2</sub> -Aufnahme, Blue Carbon	Organisationen können Anträge auf Fördergelder stellen; Forschungsschwerpunkte und jeweils verfügbare Mittel sind relativ genau festgeschrieben
US	<b>Funding by U.S. Department of Energy</b> <a href="https://netl.doe.gov/node/10683">https://netl.doe.gov/node/10683</a>	79,8 Mio. EUR (95 Mio. USD)	Finanzierung von zwei ausgewählten Demonstrationsprojekten zu CCS	3 verschiedene Phasen des Fundings mit kompetitiver Auswahl zwischen den Phasen
NL	<b>Cato</b> <a href="https://www.co2-cato.org/cato/overview">https://www.co2-cato.org/cato/overview</a>		Entwicklung von CCS Technologien	Finanzierung von Forschung und Demonstrationsprojekten; starker Fokus auf dem Aufbau eines Netzwerks und Kooperationen zwischen Organisationen
AU	<b>CCS Flagships Programme</b> <a href="https://www.industry.gov.au/funding-and-incentives/low-emissions-technologies-for-fossil-fuels/carbon-capture-storage-flagships">https://www.industry.gov.au/funding-and-incentives/low-emissions-technologies-for-fossil-fuels/carbon-capture-storage-flagships</a>	1,2 Mrd. EUR (1,9 Mrd. AUD)	CCS	Finanzierung von ausgewählten Demonstrationsprojekten
EU	<b>EU Innovation Fund</b> <a href="https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/EU/eu-innovationsfonds.html">https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/EU/eu-innovationsfonds.html</a>	20 Mrd. EUR bis 2030	Kohlenstoffabscheidung und -Speicherung einer von vier Schwerpunkten	Finanzierung von Demonstrationsprojekten

Tabelle 2: Übersicht über bestehende Förderprogramme.

## 2.4. Programme zur CO<sub>2</sub>-Entnahme

Mehrere Länder haben bereits Programme zur Förderung von CO<sub>2</sub>-Entnahme aufgelegt. Dabei handelt es sich v.a. um Aufforstungs- und Waldschutzprojekte, bei denen zudem recht geringe Kosten je vermiedener

Tonne CO<sub>2</sub> anfallen (10-30 USD). Für technologische Verfahren finden sich weitaus höhere Kosten (100-200 USD/tCO<sub>2</sub>). Im Waldbereich wird überwiegend auf ergebnisorientierte Verfahren gesetzt, bei denen die Emissionsmengen gemessen bzw. modellgestützt ermittelt werden. Die entnommenen Mengen ergeben sich aus dem CO<sub>2</sub>-Preis (z.B. durch Offset-Märkte) oder werden – wie im Fall Schwedens – durch ein explizites Entnahmeziel gesetzt. In diesem Fall werden CO<sub>2</sub>-Preise über eine rückwärtsauktionierung ermittelt.

**Explizite CO<sub>2</sub>-Entnahme-Politikmaßnahmen**

Land	Politikmaßnahme	Technologie	In Kraft seit:	ergebnisorientiert/ maßnahmenbasiert	Kosten (USD/tCO <sub>2</sub> )	Entnahmemenge	Referenz
UK	Woodland Carbon Code <i>Staatlicher Standard für CO<sub>2</sub>-Entnahme durch Aufforstungsprojekte. Teilnehmer:innen verdienen WCUs (Carbon Credits) und können diese in einem freiwilligen Offset-Markt verkaufen.</i>	Aufforstung	2011	ergebnisorientiert	10-28 USD	11,1 MtCO <sub>2</sub> Prognose für bis März 2021 registrierte Projekte	Woodland Carbon Code (2021); Forest Research (2021)
UK	Woodland Carbon Garantie <i>Staatliche Abnahmegarantie/Mindestpreis für Aufforstungsprojekte im Woodland Carbon Code (Budget: 50 Millionen Pfund). Verträge werden über eine Rückwärtsauktionierung vergeben.</i>	Aufforstung	2019		Ø 24,5 USD Auktion Okt. 2020		Forestry Commission (2019)
Schweden	Rückwärtsauktionierung für BECCS <i>In Planung. Staatliche Abnahmegarantie für CO<sub>2</sub>-Entnahme durch BECCS. Verträge werden über Rückwärtsauktionierung vergeben.</i>	BECCS	vsl. 2022	ergebnisorientiert	~ Ø 120 USD	2,2 MtCO <sub>2</sub> /Jahr (Ziel bis 2032)	SEA (2021); Fuss und Johnsson (2021)
Australien	Emissions Reduction Fund <i>Staatlicher Standard für Vermeidungs- und Entnahmeprojekte. Teilnehmer:innen können ACCUs (Carbon Credits) verdienen und diese in einem freiwilligen Offset-Markt oder an die Regierung verkaufen. Verträge mit der Regierung werden über Rückwärtsauktionierung vergeben.</i>	Aufforstung Boden	2015	ergebnisorientiert, maßnahmenbasiert	Ø 12,4 USD Auktion April 2021		Australian Government (2021)
Neuseeland	One Billion Trees Programme <i>Aufforstungsprogramm, durch das bis 2028 eine Milliarde Bäume gepflanzt werden sollen (Budget ca. 167 Millionen USD). Die Höhe der Zuschüsse an Landbesitzer:innen richtet sich nach der Art der gepflanzten Bäume und wird pro Hektar ausgezahlt.</i>	Aufforstung	2018	maßnahmenbasiert		11,4 MtCO <sub>2</sub> Prognose der Entnahmemenge bis 2050	Ministry for Primary Industries (2021a)

Tabelle 3: Übersicht über bestehende explizite CO<sub>2</sub>-Entnahme-Politikmaßnahmen in verschiedenen Ländern.

**Weitere Politikmaßnahmen, die CO<sub>2</sub>-Entnahmen unterstützen**

Land	Politikmaßnahme	Technologie	In Kraft seit:	ergebnisorientiert/ maßnahmenbasiert	Kosten (USD/tCO <sub>2</sub> )	Entnahmemenge	Referenz
USA	Low Carbon Fuel Standard (LCFS) <i>U.a. Handel mit Emissionszertifikaten. Seit 2018 können die für den LCFS benötigten Carbon Credits auch bei DACCS-Betreibern weltweit gekauft werden.</i>	DACCS	erweitert in 2018	ergebnisorientiert	Ø 198 USD LCFS Credit Preis Q1 2021		Townsend und Havercroft (2019); CARB (2021a)
USA	45Q Tax Credit <i>Steuergutschrift für CCS im Allgemeinen, auch auf BECCS und DACCS anwendbar.</i>	DACCS, BECCS	erweitert in 2018	ergebnisorientiert	Steuergutschrift i.H.v. 50 USD/tCO <sub>2</sub>		Global CCS Institute (2020)
Neuseeland	Integration von Waldflächen im ETS <i>Landbesitzer:innen können durch Aufforstung Zertifikate generieren und im ETS verkaufen. Zudem müssen Waldflächen, die vor 1990 bestanden, am ETS teilnehmen und bei Abholzung Zertifikate kaufen.</i>	Aufforstung	2008	maßnahmenbasiert für kleine Projekte (Standard „Look-up“- Tabellen), ergebnisorientiert für größere Projekte (> 100ha)			Ministry for Primary Industries (2021b)
USA	Compliance Offset Program <i>Integration von Aufforstung und Waldmanagementpraktiken in das kalifornische Cap-and-Trade-System. Verifizierte Projekte können ARB Offset Credits generieren, die von den regulierten Sektoren gekauft werden.</i>	Aufforstung	2006	maßnahmenbasiert	13,7 USD	168 MtCO <sub>2</sub>  Die Menge der ausgegeben ARB Offset Credits wird kontrovers diskutiert (siehe Badgley et al. 2021)	Badgley et al. (2021); CARB (2021b)

Tabelle 4: Übersicht über weitere bestehende Politikmaßnahmen, die CO<sub>2</sub>-Entnahmen unterstützen.

## 2.5. Governance-Optionen für die Förderung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen

Aus den oben dargestellten Überlegungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen für die Entwicklung eines effektiven Governance-Rahmens zur CO<sub>2</sub>-Entnahme:

1. Die effektive Klimawirkung von **Aufforstung, modifiziertem Waldmanagement, Pflanzenkohle, Umwandlung von Ackerland in Grünflächen und BECCS** ist aufgrund ihrer Landintensität und den damit verbundenen indirekten Landnutzungsänderungen unklar. Wird der Umfang von Pflanzenkohle auf ungenutzte Residuen begrenzt und BECCS auf Flächen angebaut, auf denen derzeit Energiepflanzen (ohne CCS) angebaut werden, so lässt sich zumindest eine zusätzliche Landnachfrage vermeiden. Dies erfordert jedoch sorgfältig konzipierte Maßnahmen zur Begrenzung von BECCS und Pflanzenkohle, etwa durch ein Quotensystem. Dazu müsste zunächst Klarheit über die Menge an Reststoffen bestehen, die ohne Nachfrageeffekte in anderen Bereichen der Forst- und Landwirtschaft genutzt werden können. Solange keine umfassende Beschränkung oder Bepreisung von landbasierten Emissionen in Deutschland und bei seinen Handelspartner:innen erfolgt, besteht große Unsicherheit über den tatsächlichen Klimanutzen der landintensiven Verfahren. Eine Förderung dieser Optionen in größerem Umfang sollte daher erst erfolgen, wenn landbasierte Emissionen bepreist sind. Lassen sich die an anderer Stelle entstehenden Emissionen von indirekten Landnutzungsänderungen abschätzen, so könnte dies jedoch durch reduzierte Fördersätze (die die Entnahmemenge um einen Korrekturfaktor reduzieren) oder durch zusätzliche Konsumsteuern auf landintensive Produkte wie Fleisch berücksichtigt werden. Hierzu wären jedoch weitere Studien zu den erwarteten indirekten Landnutzungsänderungen durch Aufforstung, verändertes Waldmanagement, Pflanzenkohle und BECCS nötig.
2. Da eine Erhöhung des **Bodenkohlenstoffs** in vielen Fällen die Flächeneffizienz steigert, ist das Risiko von Emissionen durch indirekte Landnutzungsänderungen deutlich reduziert. Ohne umfassende Regulierung der landbasierten Emissionen ist aber auch ein lokaler Kohlenstoffaufbau durch räumliche Verlagerung von gebundenem Kohlenstoff möglich. Aus diesem Grund bietet sich hier kurzfristig eine maßnahmenbezogene Förderung von Praktiken an, die zusätzlichen Kohlenstoff binden (Gehölzstreifen; Fruchtfolgen etc.). Dazu könnten bestehende Fördermaßnahmen im Rahmen der GAP genutzt und weiterentwickelt werden. Fördermaßnahmen zu „carbon farming“ ließen sich hierzu auch aus den neu geschaffenen „eco schemes“ der überarbeiteten Gemeinsamen Agrarpolitik der EU finanzieren.
3. Die Förderung von Verfahren zur **beschleunigten Verwitterung** ist vergleichsweise einfach zu implementieren. Zunächst müssten Standards für die verwendeten Mineralien (Basalt) und den Mahlgrad gesetzt werden, auf dessen Basis CO<sub>2</sub>-Entnahmefaktoren bestimmt werden. Darauf aufbauend kann die Ausbringung anhand der zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Entnahmemenge und eines kalkulatorischen CO<sub>2</sub>-Preises vergütet werden. Darüber hinaus sollte eine stichprobenartige Überprüfung der Ausbringung erfolgen.
4. Die **CO<sub>2</sub>-Entnahme mit geologischer Speicherung (DACCS)** lässt sich aus regulatorischer Sicht zügig umsetzen, da mit der EU-CCS-Richtlinie bereits ein nationaler Rechtsrahmen vorgesehen ist, der Monitoring- und Haftungsfragen der CO<sub>2</sub>-Speicherung umfasst. Während im EU-ETS zwar für abgeschiedene und geologisch gelagerte Emissionen keine Zertifikate gebraucht werden, gibt es bisher jedoch keinen Anreiz zur Entnahme von CO<sub>2</sub> (beispielsweise durch Erzeugung von Zertifikaten, siehe Rickels et al. 2021). Hier wäre eine Überarbeitung der ETS-Richtlinie oder die Einführung eines separaten Instrumentes zur Bepreisung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen nötig. Ein frühzeitig umgesetzter Regulierungsrahmen sowie ein Pfad zur Vergütung der entnommenen Menge zur CO<sub>2</sub>-Bepreisen können langfristige Anreize zur Innovation und Technologieentwicklung setzen. Zusätzliche F&E- und Demonstrationsprogramme sowie Instrumente zur Schaffung von Nischenmärkten (Mengenziele mit Rückwärtsauktionierung) können die technologische Entwicklung beschleunigen und die zu geringen Innovationsanreize beheben. Überlegenswert ist zudem eine Neuauflage des ausgelaufenen CCS-Gesetzes (als

Umsetzung der EU-CCS-Richtlinie), um auch die geologische Speicherung in Deutschland langfristig zu ermöglichen. Jenseits der regulatorischen Sicht ist auch der schwierige Stand von CCS in der Öffentlichkeit zu bedenken, der über die Anreizmechanismen hinaus auch einen gesellschaftlichen Verständigungsprozess erfordert.

Obwohl land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen tendenziell geringere Vermeidungskosten aufweisen als Verfahren mit geologischer Speicherung, stellt die Schaffung eines effektiven und effizienten Anreizrahmens aufgrund der diffusen Senken- und Quellenstruktur eine Herausforderung dar. Nur wenn alle Emissionen erfasst und reguliert oder bepreist sind, lassen sich Ausweicheffekte und Emissionen durch indirekte Landnutzungsänderungen innerhalb und außerhalb der EU vermeiden. Dies lässt sich zunehmend durch EDV-gestütztes Selbstmonitoring, Fernerkundungsmethoden und Anwendung prozessbasierter Modelle kostengünstig vornehmen. Darüber hinaus gilt es, die traditionell vorherrschenden maßnahmenbasierten Förderprogramme in der Land- und Forstwirtschaft auf ergebnisorientierte Fördermaßnahmen umzustellen, bei denen entnommene und gespeicherte CO<sub>2</sub>-Mengen – ggf. auch pauschaliert und mit Abschlägen bei unvollständiger Permanenz – erfasst und entsprechend bepreist werden. Die Umstellung auf eine ergebnisorientierte Förderung in der Landwirtschaft wird seit Langem von Agrarökonom:innen gefordert, um eine zielgenaue Förderung öffentlicher Güter und Dienstleistungen zu erreichen (Zukunftskommission Landwirtschaft 2021). Eine derartige Umstellung der Förderpraxis sowie die Einführung einer umfassenden CO<sub>2</sub>-Bepreisung auf Emissionen wäre insbesondere EU-weit sinnvoll, um einheitliche Wettbewerbsbedingungen innerhalb der EU zu erhalten.

Für die Aufnahme einer Entnahmetechnologie in den EU-ETS wären dabei folgende Kriterien relevant:

1. Entnommene CO<sub>2</sub>-Mengen müssen korrekt erfasst werden:
  - a. Bei unvollständiger Permanenz muss sichergestellt werden, dass später abgegebene CO<sub>2</sub>-Mengen zertifikatepflichtig sind oder dass ein Abschlag entsprechend der erwarteten Speicherdauer (Tonnenjahre) bei der Zertifikatgenerierung berücksichtigt wird
  - b. Das Carbon-Leakage-Risiko (z.B. durch indirekte Landnutzungsänderungen innerhalb oder außerhalb der EU) sollte hinreichend klein sein und eine Additionalität bzw. hohe Klimawirkung durch entnommene CO<sub>2</sub>-Mengen sichergestellt sein.
2. Die Preisbildung auf dem EU-ETS sollte als (annähernd) dynamisch effizient eingeschätzt werden, weil sonst durch kurzfristig kostengünstige Entnahmeoptionen Investitionen in langfristig wichtige Vermeidungs- und Entnahmeoptionen verringert werden.

Aus dem ersten Kriterium folgt, dass bei vielen landintensiven Maßnahmen eine Einbeziehung in das EU-ETS derzeit problematisch erscheint – bei einer umfassenden CO<sub>2</sub>-Bepreisung aber sinnvoll ist. Das zweite Kriterium hängt dagegen vor allem von der Qualität des Emissionshandelssystems bzw. der Investitionsdynamik in Vermeidungstechnologien ab. Hier gibt es den Vorbehalt, dass der EU-ETS aufgrund von politischen Unsicherheiten bzw. Kurzsichtigkeit von Investor:innen nicht zu einem dynamisch effizienten Transitionspfad führt und vor allem kurzfristig kostengünstige Technologien bevorzugt (Vogt-Schilb et al 2018). Dieses Problem besteht unabhängig von der Einbeziehung von CO<sub>2</sub>-Entnahmemaßnahmen, könnte sich aber auf das gesellschaftlich optimale Verhältnis zwischen Vermeidung und Entnahme auswirken. Allerdings fehlen zu dieser Problematik umfassendere wissenschaftliche Studien zu Ausmaß und möglichen Lösungsansätzen durch das Politikdesign. Einerseits gibt es Überlegungen, mit einem separaten Sekundärmarkt für entnommene CO<sub>2</sub>-Mengen (über Rückwärtsauktionierung) CO<sub>2</sub>-Preise zu entkoppeln. Die Regierung könnte die Entnahmemenge beispielsweise anhand der erwarteten Höhe schwer vermeidbarer Emissionen ausrichten. Andererseits ergibt sich bei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Preisen immer auch ein Druck, die Preisdifferenziale auszugleichen, um die Kosten des Klimaschutzes zu reduzieren. Letztlich bedarf es daher einer genaueren Analyse zum Ausmaß, Ursachen und Lösungsansätzen zur dynamischen Ineffizienz von CO<sub>2</sub>-Preisen, um ggf. auch optimale Preisdifferenziale zwischen Vermeidung und Entnahme bestimmen zu können.



Neben der Einbeziehung in einen einheitlichen Emissionshandel wäre ein Sekundärmarkt für entnommene CO<sub>2</sub>-Mengen (über Rückwärtsauktionierung) denkbar. Hier könnten die Mengen kurz- bis mittelfristig nach Erwägungen zur Technologie- und Innovationsförderung gesetzt werden. Letzteres erfordert jedoch technologiespezifische Mengenziele um den unterschiedlichen Innovations- und Reifegraden gerecht zu werden.

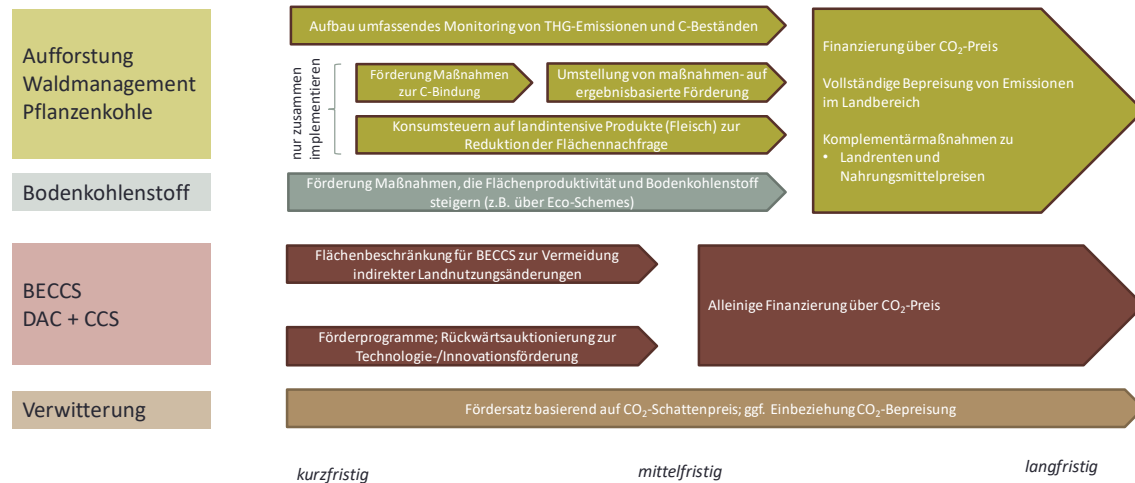


Abbildung 8: Phasenmodell zur Governance von CO<sub>2</sub>-Entnahmen bzgl. verschiedener Technologien.

Abbildung 8 fasst die möglichen Politikinstrumente in einem Phasendiagramm zusammen. Dabei würden Maßnahmen zunächst an bestehenden Förderstrukturen (EU GAP mit den neuen Eco-Schemes, Innovationsfonds etc.) anknüpfen. Mittelfristig ist eine umfassendere Erfassung und Bepreisung von landbasierten Emissionen in Deutschland und der EU notwendig, damit indirekte Landnutzungsänderungen und Gleichgewichtseffekte in der Agrar- und Forstwirtschaft durch konkrete Einzelmaßnahmen nicht zu vermehrten Emissionen an anderer Stelle führen. Darüber hinaus kann durch Innovationsförderung sowie die Schaffung eines Nischenmarktes (durch Demonstrationsprojekte und ein über die Zeit wachsendes Mengenziel) die Technologieförderung beschleunigt und der frühzeitige Ausbau von CO<sub>2</sub>-Speicher-Infrastruktur befördert werden. Perspektivisch ist jedoch ein einheitlicher CO<sub>2</sub>-Preis über alle Technologien und auch über den Vermeidungs- und Entnahmesektor ein wichtiger Fokuspunkt einer kosteneffizienten Klimapolitik.

Die hier dargestellten Überlegungen beziehen sich nicht nur auf die staatliche Förderung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen, sondern gelten analog für **freiwillige Offset-Märkte**. Hier besteht ebenfalls die Gefahr, dass die effektive Klimawirksamkeit einer entnommenen Tonne CO<sub>2</sub> aufgrund von unvollständiger Permanenz oder Additionalität überschätzt wird. Gerade weil freiwillige Offset-Märkte auch zu Vermarktungs- und Werbezwecken verwendet werden bzw. auch bei Konsument:innen die Nachfrage nach klimaneutral erzeugten Produkten wächst, entsteht hier auch ein Missbrauchspotenzial, die Klimawirkung einer entnommenen Tonne CO<sub>2</sub> ‚schönzurechnen‘. Hier wäre denkbar, dass der Staat bzw. die Staatengemeinschaft oder die EU verbindliche Kriterien festlegen, wie die kompensierte CO<sub>2</sub>-Menge ermittelt werden kann. Analog zum bestehenden Produktlabeln oder Siegeln könnte ein staatlich überwachtes Siegel dieses Informationsproblem vermeiden und damit die Zahlungsbereitschaft von Konsument:innen für klimaneutrale Produkte in maximale Klimawirksamkeit umsetzen. Weil bei landintensiven Verfahren (Aufforstung, BECCS, Pflanzenkohle) ohne umfassende CO<sub>2</sub>-Bepreisung von Emissionen Additionalitätsprobleme unvermeidbar sind, könnten damit anfänglich v.a. Verwitterung und DACCS als ‚sichere‘ Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Entnahme zertifiziert werden.

### 3. Fazit

Dieses Gutachten diskutiert den derzeitigen Wissensstand zu CO<sub>2</sub>-Entnahmen im Hinblick auf ihre mögliche Regulierung im deutsch-europäischen Kontext. Dabei werden zahlreiche Wissenslücken und dringender Forschungsbedarf aufgezeigt, jedoch auch eine Reihe von robusten Einsichten gewonnen.

Verzögerungen ambitionierter Klimapolitik erhöhen die Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-Entnahmen, um sowohl das Pariser Klimaziel als auch die europäischen und deutschen Klimaziele zu erreichen, da sie zu höheren Restemissionen führen. Für Deutschland werden die Restemissionen Mitte des Jahrhunderts auf einen zweistelligen Millionenbereich geschätzt. Zudem werden in der überwiegenden Mehrheit der 1,5°C-Szenarien CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien schon vor 2050 großskalig ausgebaut – ein bekanntes Ergebnis der globalen Szenarienkultur, das sich nun auch in den Szenarien der Europäischen Kommission niederschlägt.

In der globalen Szenarienkultur gibt es eine große Bandbreite an möglichen CO<sub>2</sub>-Entnahmepfaden in 1,5°C-Szenarien, die den gesellschaftlichen Diskurs informieren, der Risiken und Nutzen der verschiedenen Pfade abwägt und entscheidet, wie viel und auf welche Art und Weise der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzogen werden soll. Während es auf der europäischen Ebene eine gewisse Offenheit für Entnahmetechnologien gibt, was sich in Form eines breiteren Szenarienspektrums äußert, geht die Tendenz auf deutscher Ebene in Richtung des Ausgleichs über den Landnutzungssektor, was mit Risiken u.a. der Reversibilität und des nutzbaren Potenzials behaftet ist.

Alle Optionen der CO<sub>2</sub>-Entnahme zeigen ein relevantes Potential auf und sollten parallel zueinander gefördert werden, um ein robustes Entnahmeportfolio bereitstellen zu können. Dabei variieren die Zeitdynamiken der einzelnen CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien und -praktiken stark. Bei Praktiken zur Bodenkohlenstoffanreicherung und bei der Wieder-/Aufforstung treten schon nach wenigen Jahrzehnten Sättigungseffekte auf, die die Senkleistung mindern oder gar aufheben. Auf der anderen Seite braucht es noch Jahre bis Jahrzehnte der Entwicklung und Hochskalierung, bis technologisch anspruchsvolle Verfahren wie BECCS und DACCS großskalig zum Einsatz kommen können. Deutschland verfügt über ein erhebliches Potenzial an energetisch nutzbaren Reststoffen aus Land- und Forstwirtschaft, wodurch prinzipiell BECCS und Pflanzenkohle bis zu einem bestimmten Skalierungsgrad auch ohne Anbaubiomasse zu substantiellen CO<sub>2</sub>-Entnahmen negativen Emissionen beitragen könnten. Allerdings liegen über die aktuelle Verwendung der genannten Reststoffe nur wenige Daten vor. Es sollte demnach zeitnah Klarheit geschaffen werden, wie groß der Anteil der Reststoffe ist, die ohne Nachfrageeffekte für BECCS und Pflanzenkohle eingesetzt werden könnten. Für einige Industrieprozesse (insbesondere in der Zement- und Kalkproduktion) ist CCS (Carbon Capture and Storage) die einzige derzeit diskutierte Emissionsminderungsoption. Zur Treibhausgasneutralität wird also sehr wahrscheinlich CCS und entsprechend eine CCS-Infrastruktur benötigt, sollte die nationale Produktion nicht komplett eingestellt werden bzw. diese Emissionen durch zusätzliche CO<sub>2</sub>-Entnahme kompensiert werden.

Aus dieser Bewertung ergibt sich eine Strategie, die landbasierte Maßnahmen und Verfahren der beschleunigten Verwitterung schnell in den Fokus nimmt und kontinuierlich fördert, gleichzeitig aber jetzt auch schon einen Innovationsansatz bei Technologien mit CCS in Angriff nimmt.

Das Gutachten untersucht weiterhin grundlegende Politikinstrumente zur Förderung von CO<sub>2</sub>-Entnahmen und eine Reihe von komplementären Maßnahmen, die weitere Externalitäten adressieren. Obwohl es hier viele unbeantwortete Fragen gibt, vor allem hinsichtlich der effektiven Klimawirkung von Aufforstung, modifiziertem Waldmanagement, Pflanzenkohle, Umwandlung von Ackerland in Grünflächen und BECCS aufgrund ihrer Landintensität und den damit verbundenen indirekten Landnutzungsänderungen, identifiziert das Gutachten eine Reihe von Fördermaßnahmen und Möglichkeiten der Regulierung. Auf dieser Basis wird ein Phasenmodell formuliert, bei dem Maßnahmen zunächst an bestehenden Förderstrukturen (EU GAP mit Eco-Schemes, Innovationsfonds etc.) anknüpfen. Eine umfassendere Erfassung und Bepreisung von landbasierten Emissionen in Deutschland und der EU können später dazu führen, dass indirekten Landnutzungsänderungen und Gleichgewichtseffekten im LULUCF-Sektor besser beigesteuert werden kann. Verfahren zur beschleunigten Verwitterung mittels

Mineralisation könnten dagegen bereits zeitnah mittels CO<sub>2</sub>-Bepreisung gefördert werden. Innovationsförderung und Nischenmärkte durch separat auktionierte Entnahmemengen können weiterhin als Innovationsbeschleuniger dienen und den frühzeitigen Ausbau einer CO<sub>2</sub>-Speicher-Infrastruktur befördern. Die Analyse schließt mit einer Bewertung der Möglichkeit, Entnahme-Technologien in den EU-ETS aufzunehmen – und somit langfristig einen einheitlichen CO<sub>2</sub>-Preis anzusteuern. Hierzu wird eine Reihe von Voraussetzungen formuliert, bei der die korrekte Erfassung der entnommenen CO<sub>2</sub>-Mengen den Hauptaspekt darstellt.

## Dank

Das Gutachten wurde von der Wissenschaftsplattform Klimaschutz beauftragt und von Wissenschaftler:innen des MCC Berlin und des PIK gemeinsam erarbeitet. Hierbei profitierte das Projekt insbesondere für die Arbeit an Sektion 1.2.2 von der Zusammenarbeit mit Kolleg:innen des Kopernikusprojekts ARIADNE. Des Weiteren sind die Autor:innen dankbar für Rechercheunterstützung von Constantino Dockendorf (MCC), für kontinuierliches Feedback des WPKS Lenkungskreises und der Geschäftsstelle sowie für hilfreiche Kommentare von Artur Runge-Metzger.

## Glossar und Akronyme

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.
<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
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 Anscheidung 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 Klimailösungen)
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. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.09.003>
- Aghion, P., Dechezleprêtre, A., Hémous, 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. <https://doi.org/10.1086/684581>
- Agora Energiewende (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut.) (2020). Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020\\_10\\_KNDE/A-EW\\_195\\_KNDE\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf)
- Agora Energiewende (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut.) (2021). Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. 32. [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_04\\_KNDE45/A-EW\\_209\\_KNDE2045\\_Zusammenfassung\\_DE\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf)
- Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, A. A., & Rezaei, F. (2017). Carbon Capture and Utilization Update. *Energy Technology*, 5(6), 834–849. <https://doi.org/10.1002/ente.201600747>
- Arrow, K. J. (1962). The Economic Implications of Learning by Doing. *The Review of Economic Studies*, 29(3), 155–173. <https://doi.org/10.2307/2295952>
- Australian Government. (2021). About the Emissions Reduction Fund. <http://www.cleanenergyregulator.gov.au/ERF/About-the-Emissions-Reduction-Fund>
- Badgley, G., Freeman, J., Hamman, J. J., Haya, B., Trugman, A. T., Anderegg, W. R. L., & Cullenward, D. (2021). Systematic over-crediting in California’s forest carbon offsets program. *BioRxiv*, 2021.04.28.441870. <https://doi.org/10.1101/2021.04.28.441870>
- Barrios, S., & Strobl, E. (2004). Learning by Doing and Spillovers: Evidence from Firm-Level Panel Data. *Review of Industrial Organization*, 25(2), 175–203. <https://doi.org/10.1007/s11151-004-3536-y>
- Bartkowski, B., Droste, N., Ließ, M., Sidemo-Holm, W., Weller, U., & Brady, M. V. (2019). Implementing result-based agri-environmental payments by means of modelling. In UFZ

- Discussion Papers (Nr. 5/2019; UFZ Discussion Papers). Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ), Division of Social Sciences (ÖKUS).  
<https://ideas.repec.org/p/zbw/ufzdps/52019.html>
- Batáry, P., Dicks, L. V., Kleijn, D., & Sutherland, W. J. (2015). The role of agri-environment schemes in conservation and environmental management. *Conservation Biology*, 29(4), 1006–1016.  
<https://doi.org/10.1111/cobi.12536>
- BDI. (2018). Klimapfade für Deutschland. <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>
- Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R. et al. (2020). Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* 583, 242–248 (2020).  
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>
- Bellamy, R., Lezaun, J., & Palmer, J. (2019). Perceptions of bioenergy with carbon capture and storage in different policy scenarios. *Nature Communications*, 10(1), 743.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-08592-5>
- Benbear, L. S., & Stavins, R. N. (2007). Second-best theory and the use of multiple policy instruments. *Environmental and Resource Economics*, 37(1), 111–129. <https://doi.org/10.1007/s10640-007-9110-y>
- 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.  
<https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00010>
- Bloom, N., Van Reenen, J., & Williams, H. (2019). A Toolkit of Policies to Promote Innovation. *Journal of Economic Perspectives*, 33(3), 163–184. <https://doi.org/10.1257/jep.33.3.163>
- BMU. (2021). Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes. [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Glaeserne\\_Gesetze/19\\_Lp/ksg\\_aendg/Entwurf/ksg\\_aendg\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19_Lp/ksg_aendg/Entwurf/ksg_aendg_bf.pdf)
- Börner, J., Baylis, K., Corbera, E., Ezzine-de-Blas, D., Honey-Rosés, J., Persson, U., & Wunder, S. (2017). The Effectiveness of Payments for Environmental Services. *World Development*, 96.  
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.03.020>
- Böttcher, H., Hennenberg, K., Winger, C., & Öko-Institut e.V. (2018). Waldvision Deutschland. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Waldvision-Methoden-und-Ergebnisse.pdf>
- Boyer, M., & Laffont, J.-J. (1997). Environmental risks and bank liability. *European Economic Review*, 41(8), 1427–1459. [https://doi.org/10.1016/S0014-2921\(96\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0014-2921(96)00034-7)
- Breyer, C., Fasihi, M., Bajamundi, C., & Creutzig, F. (2019). Direct Air Capture of CO<sub>2</sub>: A Key Technology for Ambitious Climate Change Mitigation. *Joule*, 3(9), 2053–2057.  
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.010>
- BUND. (2010). Moorschutz – ein Beitrag zum Klima- und Naturschutz. [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/bund/standpunkt/moorschutz\\_standpunkt.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/standpunkt/moorschutz_standpunkt.pdf)
- Bundesregierung (2019): Projektionsbericht 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. [https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14\\_lcds\\_pams\\_projections/projections/envxnw7wq/](https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envxnw7wq/)

- Burton, R., & Schwarz, G. (2013). Result-oriented agri-environment schemes in Europe and their potential for promoting behavioural change. *Land Use Policy*, 30, 628–641. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.05.002>
- Calel, R. (2020). Adopt or Innovate: Understanding Technological Responses to Cap-and-Trade. *American Economic Journal: Economic Policy*, 12(3), 170–201. <https://doi.org/10.1257/pol.20180135>
- Calel, R., & Dechezleprêtre, A. (2016). Environmental Policy and Directed Technological Change: Evidence from the European Carbon Market. *The Review of Economics and Statistics*, 98(1), 173–191. [https://doi.org/10.1162/REST\\_a\\_00470](https://doi.org/10.1162/REST_a_00470)
- California Air Resources Board (CARB). (2021a). Monthly LCFS Credit Transfer Activity Report for May 2021. <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/credit/May%202021%20-%20Monthly%20Credit%20Transfer%20Activity.pdf>
- California Air Resources Board (CARB). (2021b). Compliance Offset Program | California Air Resources Board. <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/compliance-offset-program>
- Carbo, M. C., Smit, R., van der Drift, B., & Jansen, D. (2011). Bio energy with CCS (BECCS): Large potential for BioSNG at low CO<sub>2</sub> avoidance cost. *Energy Procedia*, 4, 2950–2954. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.203>
- Cardinael, R., Umulisa, V., Toudert, A., Olivier, A., Bockel, L., & Bernoux, M. (2018). Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environmental Research Letters*, 13(12), 124020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaeb5f>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G., Fisher-Vanden, K., Hourcade, J.-C., Krey, V., Kriegler, E., Löschel, A., McCollum, D., Paltsev, S., Rose, S., Shukla, P. R., Tavoni, M., van der Zwaan, B., & van Vuuren, D. P. (2014). Chapter 6—Assessing transformation pathways. Cambridge University Press. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_chapter6.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf)
- Cohen, M. A. (2010). Detering Oil Spills: Who Should Pay and How Much? Resources for the Future. [https://media.rff.org/documents/RFF-BCK-Cohen-DeteringOilSpills\\_update.pdf](https://media.rff.org/documents/RFF-BCK-Cohen-DeteringOilSpills_update.pdf)
- Coninck, H. de, Revi, A., Babiker, M., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., Dong, W., Ford, J., Fuss, S., Hourcade, J. C., Ley, D., Mechler, R., Newman, P., Revokatova, A., Schultz, S., Steg, L., & Sugiyama, T. (2018). Strengthening and Implementing the Global Response. *Global Warming of 1.5°C: Summary for Policy Makers*, 313–443. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15\\_Chapter4\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter4_Low_Res.pdf)
- Cormos, C.-C. (2015). Biomass direct chemical looping for hydrogen and power co-production: Process configuration, simulation, thermal integration and techno-economic assessment. *Fuel Processing Technology*, 137, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.04.001>
- Cuéllar-Franca, R. M., & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 9, 82–102. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>
- Dena – Deutsche Energie-Agentur. (2018). Dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_lang.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf)



- Doelman, J. C., Stehfest, E., Vuuren, D. P. van, Tabebu, A., Hof, A. F., Braakhekke, M. C., Gernaat, D. E. H. J., Berg, M. van den, Zeist, W.-J. van, Daioglou, V., Meijl, H. van, & Lucas, P. L. (2020). Afforestation for climate change mitigation: Potentials, risks and trade-offs. *Global Change Biology*, 26(3), 1576–1591. <https://doi.org/10.1111/gcb.14887>
- Drechsler, M. (2017). Performance of Input- and Output-based Payments for the Conservation of Mobile Species. *Ecological Economics*, 134, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.022>
- Drollinger, S., Maier, A., & Glatzel, S. (2019). Interannual and seasonal variability in carbon dioxide and methane fluxes of a pine peat bog in the Eastern Alps, Austria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 275, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.015>
- Drösler, M., Augustin, J., Bergmann, L., Förster, C., Fuchs, D., Hermann, J. M., & Wehrhan, M. (2012a). Beitrag ausgewählter Schutzgebiete zum Klimaschutz und dessen monetäre Bewertung. BfN-Skripten Bd, 328, 152.
- Drösler, M., Schaller, L., Kantelhardt, J., Schweiger, M., Fuchs, D., Tiemeyer, B., Augustin, J., Wehrhan, M., Förster, C., Bergmann, L., Kapfer, A., & Krüger, G.-M. (2012b). Beitrag von Moorschutz- und -revitalisierungsmaßnahmen zum Klimaschutz am Beispiel von Naturschutzgroßprojekten. *Natur und Landschaft*, 87,2: 70-76; Stuttgart.
- EBI. (2020). Mit Pflanzenkohle basierten Kohlenstoffsinken dem Klimawandel entgegenwirken. EBI Whitepaper. [http://www.biochar-industry.com/wp-content/uploads/2020/09/Whitepaper\\_Pflanzenkohle2020.pdf](http://www.biochar-industry.com/wp-content/uploads/2020/09/Whitepaper_Pflanzenkohle2020.pdf)
- Edenhofer, O., Eggers, J., Fuss, S., Kalkuhl, M., Merfort, A., Minx, J., & Strefler, J. (2021). Wissensstand zu CO<sub>2</sub>-Entnahmen. [https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18\\_MCC\\_Publications/2021\\_MCC\\_Wissensstand\\_zu\\_CO2-Emissionen.pdf](https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/2021_MCC_Wissensstand_zu_CO2-Emissionen.pdf)
- Emmann, C., Guenther-Luebbers, W., & Theuvsen, L. (2013). Impacts of Biogas Production on the Production Factors Land and Labour – Current Effects, Possible Consequences and Further Research Needs. *International Journal on Food System Dynamics*, 4, 38–50. <https://doi.org/10.18461/ijfsd.v4i1.414>
- Engel, S. (2016). The Devil is in the Detail: A Practical Guide on Designing Payments for Environmental Services. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 9(1–2), 131–177. <https://doi.org/10.1561/101.00000111>
- European Commission. (2019). A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, COM/2018/773 final.
- European Commission. (2021). Revision of the Regulation on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry. [https://ec.europa.eu/info/files/revision-regulation-inclusion-greenhouse-gas-emissions-and-removals-land-use-land-use-change-and-forestry\\_en](https://ec.europa.eu/info/files/revision-regulation-inclusion-greenhouse-gas-emissions-and-removals-land-use-land-use-change-and-forestry_en)
- Fajardy, M., Morris, J., Gurgel, A., Herzog, H., Mac Dowell, N., & Paltsev, S. (2020). The economics of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) deployment in a 1.5 °C or 2 °C world. Joint Program Report Series Report, 345. <http://globalchange.mit.edu/publication/17489>
- Fischer, C., & Newell, R. (2004). Environmental and Technology Policies for Climate Mitigation. In Discussion Papers (dp-04-05; Discussion Papers). Resources For the Future. <https://ideas.repec.org/p/rff/dpaper/dp-04-05.html>

- Fischer, C., & Newell, R. G. (2007). Environmental and technology policies for climate mitigation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 55(2), 142–162. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2007.11.001>
- Forest Research. (2021). Provisional Woodland Statistics: 2021 Edition. [https://www.forestresearch.gov.uk/documents/8092/PWS\\_2021.pdf](https://www.forestresearch.gov.uk/documents/8092/PWS_2021.pdf)
- Forestry Commission. (2019). Woodland Carbon Guarantee. <https://www.gov.uk/guidance/woodland-carbon-guarantee>
- Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE. (2020). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem—Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>
- Freibauer, A., Drösler, M., Gensior, A., & Ernst Detlef, S. (2009). Das Potenzial von Wäldern und Mooren für den Klimaschutz in Deutschland und auf globaler Ebene. *Natur und Landschaft*, 84, 20-25.
- Fritsche, U. R., Sims, R. E. H., & Monti, A. (2010). Direct and indirect land-use competition issues for energy crops and their sustainable production – an overview. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(6), 692–704. <https://doi.org/10.1002/bbb.258>
- Fuss, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Jones, C. D., Lyngfelt, A., Peters, G. P., & Van Vuuren, D. P. (2020). Moving toward Net-Zero Emissions Requires New Alliances for Carbon Dioxide Removal. *One Earth*, 3(2), 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.002>
- Fuss, S., & Johnsson, F. (2021). The BECCS Implementation Gap—A Swedish Case Study. *Frontiers in Energy Research*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.553400>
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W. de O., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., Dominguez, M. del M. Z., & Minx, J. C. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
- Gawel, E., & Ludwig, G. (2011). The iLUC dilemma: How to deal with indirect land use changes when governing energy crops? *Land Use Policy*, 28(4), 846–856. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.03.003>
- Ghemawat, P., & Spence, A. (1985). Learning Curve Spillovers and Market Performance. *The Quarterly Journal of Economics*, 100(Supplement), 839–852.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101432>
- Global CCS Institute. (2020). The US Section 45Q Tax Credit for Carbon Oxide Sequestration: An Update. [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/45Q\\_Brief\\_in\\_template\\_LLB.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/45Q_Brief_in_template_LLB.pdf)
- Gough, C., & Mander, S. (2019). Beyond Social Acceptability: Applying Lessons from CCS Social Science to Support Deployment of BECCS. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6(4), 116–123. <https://doi.org/10.1007/s40518-019-00137-0>
- Goulder, L. H., & Parry, I. W. H. (2008). Instrument Choice in Environmental Policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(2), 152–174. <https://doi.org/10.1093/reep/ren005>

- Grassi, G., Stehfest, E., Rogelj, J., van Vuuren, D., Cescatti, A., House, J., Nabuurs, G.-J., Rossi, S., Alkama, R., Viñas, R. A., Calvin, K., Ceccherini, G., Federici, S., Fujimori, S., Gusti, M., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Korosuo, A., Popp, A. (2021). Critical adjustment of land mitigation pathways for assessing countries' climate progress. *Nature Climate Change*, 11(5), 425–434. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01033-6>
- Grethe, H., Martinez, J., Osterburg, B., Taube, F., & Thom, F. (2021). Klimaschutz im Agrar- und Ernährungssystem Deutschlands: Die drei zentralen Handlungsfelder auf dem Weg zur Klimaneutralität. Stiftung Klimaneutralität. [https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/2021-06-01-Klimaneutralitaet\\_Landwirtschaft.pdf](https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/2021-06-01-Klimaneutralitaet_Landwirtschaft.pdf)
- Gruber, H. (1998). Learning by Doing and Spillovers: Further Evidence for the Semiconductor Industry. *Review of Industrial Organization*, 13(6), 697–711. <https://doi.org/10.1023/A:1007740416004>
- Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D. L., Rao, N. D., Riahi, K., Rogelj, J., De Stercke, S., Cullen, J., Frank, S., Fricko, O., Guo, F., Gidden, M., Havlik, P., Huppmann, D., Kieseewetter, G., Rafaj, P., Valin, H. (2018). A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy*, 3(6), 515–527. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>
- Habermann, H., & Breustedt, G. (2011). Einfluss der Biogaserzeugung auf landwirtschaftliche Pachtpreise in Deutschland. *German Journal of Agricultural Economics*, 60(02). <https://econpapers.repec.org/article/agsgjagec/169835.htm>
- Hanssen, S. V., Daioglou, V., Steinmann, Z. J. N., Doelman, J. C., Van Vuuren, D. P., & Huijbregts, M. A. J. (2020). The climate change mitigation potential of bioenergy with carbon capture and storage. *Nature Climate Change*, 10(11), 1023–1029. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0885-y>
- Held, H., & Edenhofer, O. (2009). CCS-Bonds as a superior instrument to incentivize secure carbon sequestration. *Energy Procedia*, 1(1), 4559–4566. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.275>
- Hennig, S., & Latacz-Lohmann, U. (2017). The incidence of biogas feed-in tariffs on farmland rental rates – evidence from northern Germany. *European Review of Agricultural Economics*, 44(2), 231–254. <https://doi.org/10.1093/erae/jbw023>
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E. A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J. C., Smith, P., & Williams, C. K. (2019). The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal. *Nature*, 575(7781), 87–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>
- Humpenöder, F., Karstens, K., Lotze-Campen, H., Leifeld, J., Menichetti, L., Barthelmes, A., & Popp, A. (2020). Peatland protection and restoration are key for climate change mitigation. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104093. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abae2a>
- IEAGHG. (2020). Monitoring and Modelling of CO<sub>2</sub> Storage: The Potential for Improving the Cost-Benefit Ratio of Reducing Risk, 2020-01, February, 2020.
- IPCC (2014). Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, et al., editors. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: 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 pre-industrial 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.)]. In press.  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_SPM\\_version\\_report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf)
- IPCC. (2019). Summary for Policymakers. 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, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.  
<https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>
- Irwin, D., & Klenow, P. (1994). Learning-by-Doing Spillovers in the Semiconductor Industry. *Journal of Political Economy*, 102(6), 1200–1227. <http://dx.doi.org/10.1086/261968>
- Jacobs, A., Heidecke, C., Jumshudzade, Z., Osterburg, B., Paulsen, H., & Poelplau, C. (2020). Soil organic carbon certificates -potential and limitations for private and public climate action. *Landbauforschung*, 70, 31–35. <https://doi.org/10.3220/LBF1605778405000>
- Jaffe, A. B., Newell, R. G., & Stavins, R. N. (2003). Chapter 11—Technological change and the Environment. K.-G. Mäler & J. R. Vincent (eds.), *Handbook of Environmental Economics* (vol. 1, pp. 461–516). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1574-0099\(03\)01016-7](https://doi.org/10.1016/S1574-0099(03)01016-7)
- Jakob, M., Steckel, J., & Edenhofer, O. (2014). Consumption- Versus Production-Based Emission Policies. *Annual Review of Resource Economics*, 6(1), 297–318.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100913-012342>
- Johnsson F, Normann F and Svensson E (2020) Marginal Abatement Cost Curve of Industrial CO<sub>2</sub> Capture and Storage – A Swedish Case Study. *Front. Energy Res.* 8:175.  
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00175>
- Kalkuhl, M., & Edenhofer, O. (2017). Ramsey meets Thünen: The impact of land taxes on economic development and land conservation. *International Tax and Public Finance*, 24(2), 350–380.  
<https://doi.org/10.1007/s10797-016-9403-6>
- 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.  
<https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2011.08.001>
- Kalkuhl, M., Franks, M., & Lessmann, K. (2021). Optimal Carbon Prices for Carbon Dioxide Removal. *EAERE* 2021.
- Kätelhön, A., Meys, R., Deutz, S., Suh, S., & Bardow, A. (2019). Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(23), 11187–11194. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821029116>
- Lapola, D. M., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Koch, J., Koelking, C., & Priess, J. A. (2010). Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(8), 3388–3393.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0907318107>

- Lenzi, D., Lamb, W. F., Hilaire, J., Kowarsch, M., & Minx, J. C. (2018). Don't deploy negative emissions technologies without ethical analysis. *Nature*, 561(7723), 303–305. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06695-5>
- Liu, G., Larson, E. D., Williams, R. H., Kreutz, T. G., & Guo, X. (2011). Making Fischer–Tropsch Fuels and Electricity from Coal and Biomass: Performance and Cost Analysis. *Energy & Fuels*, 25(1), 415–437. <https://doi.org/10.1021/ef101184e>
- Luderer, G. et al. (2021). Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich, (Ariadne-Report), Oktober 2021, <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>.
- MCC. (2021). MCC Kurzdossier Nr. 2—CO<sub>2</sub>-Entnahme. [https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18\\_MCC\\_Publications/MCC-Kurzdossier\\_CO2-Entnahme\\_DE.pdf](https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/MCC-Kurzdossier_CO2-Entnahme_DE.pdf)
- McLaren, D., Parkhill, K. A., Corner, A., Vaughan, N. E., & Pidgeon, N. F. (2016). Public conceptions of justice in climate engineering: Evidence from secondary analysis of public deliberation. *Global Environmental Change*, 41, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.09.002>
- Ministry for Primary Industries. (2021a). Introduction to the Emissions Trading Scheme or forestry | MPI - Ministry for Primary Industries. A New Zealand Government Department. Ministry for Primary Industries. <https://www.mpi.govt.nz/forestry/getting-started-forestry/forestry-rules-regulations/introduction-emissions-trading-scheme-ets-forestry/>
- Ministry for Primary Industries. (2021b). One Billion Trees Programme | MPI - Ministry for Primary Industries. A New Zealand Government Department. Ministry for Primary Industries. <https://www.mpi.govt.nz/forestry/funding-tree-planting-research/one-billion-trees-programme/>
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W. de O., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., & Dominguez, M. del M. Z. (2018). Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>
- Naturkapital Deutschland – TEEB DE. (2015). Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte. Hartje, V., Wüstemann, H., & Bonn, A. (eds.). Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ. Berlin, Leipzig., 28. [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_1N51DE/dn055209.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_1N51DE/dn055209.pdf)
- Nemet, G. F. (2019). *How Solar Energy Became Cheap: A Model for Low-Carbon Innovation*. Routledge.
- Nemet, G. F., Callaghan, M. W., Creutzig, 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. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabff4>
- Oehmichen, K., Klatt, S., & Gerber, K. (2018). Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung - Szenarientwicklung, Ergebnisse und Analyse. Johann Heinrich von Thünen-Institut. <https://doi.org/10.3220/REP1527686002000>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.12.012>

- Pearson, T. R. H., Brown, S., Sohngen, B., Henman, J., & Ohrel, S. (2014). Transaction costs for carbon sequestration projects in the tropical forest sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(8), 1209–1222. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9469-8>
- Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S. J., Joosten, H., Holmgren, P., Lehtonen, A., Menton, M. C., Pullin, A. S., & Wattenbach, M. (2012). Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 1(1), 6. <https://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6>
- Plevin, R. J., O'Hare, M., 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. *Environmental Science & Technology*, 44(21), 8015–8021. <https://doi.org/10.1021/es101946t>
- Popp, D. (2002). Induced Innovation and Energy Prices. *American Economic Review*, 92(1), 160–180. <https://doi.org/10.1257/000282802760015658>
- Riahi, K., Kriegler, E., Johnson, N., Bertram, C., den Elzen, M., Eom, J., Schaeffer, M., Edmonds, J., Isaac, M., Krey, V., Longden, T., Luderer, G., Méjean, A., McCollum, D. L., Mima, S., Turton, H., van Vuuren, D. P., Wada, K., Bosetti, V., Edenhofer, O. (2015). Locked into Copenhagen pledges—Implications of short-term emission targets for the cost and feasibility of long-term climate goals. *Technological Forecasting and Social Change*, 90, 8–23. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.09.016>
- Rickels, W., Proelß, A., Geden, O., Burhenne, J., & Fridahl, M. (2021). Integrating Carbon Dioxide Removal Into European Emissions Trading. *Frontiers in Climate*, 3, 690023. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.690023>
- Robinius, M., Markewitz, P., Lopion, P. et al. (2019). Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. (Kurzfassung). Forschungszentrum Jülich GmbH. [https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/ Documents/Downloads/transformationStrategies2050\\_studySummary\\_2019-10-31.pdf.pdf? blob=publicationFile](https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/ Documents/Downloads/transformationStrategies2050_studySummary_2019-10-31.pdf.pdf? blob=publicationFile)
- Sant'Anna, M. (2019). How green is sugarcane ethanol? FGV EPGE Economics Working Papers (Ensaio Economicos Da EPGE), EPGE Brazilian School of Economics and Finance - FGV EPGE (Brazil), No 807. <https://EconPapers.repec.org/RePEc:fgv:epgewp:807>
- Schmidt, H.-P., Anca-Couce, A., Hagemann, N., Werner, C., Gerten, D., Lucht, W., & Kammann, C. (2019). Pyrogenic carbon capture and storage. *GCB Bioenergy*, 11(4), 573–591. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12553>
- Schomers, S., & Matzdorf, B. (2013). Payments for ecosystem services: A review and comparison of developing and industrialized countries. *Ecosystem Services*, 6, 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.01.002>
- 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., Robertson, G. P., Schlesinger, W. H., & Tilman, G. D. (2009). Fixing a Critical Climate Accounting Error. *Science*, 326(5952), 527–528. <https://doi.org/10.1126/science.1178797>
- Sensfuß et al. (2021). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Smith, Steve. (2021). Personal communication, June 2021.



- Smith, P., Soussana, J.-F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. P., Batjes, N. H., Egmond, F. van, McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J. E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., & Klumpp, K. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26(1), 219–241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
- Spence, A. (1984). Cost Reduction, Competition, and Industry Performance. *Econometrica*, 52(1), 101–121. <https://doi.org/10.2307/1911463>
- Strefler, J., Bauer, N., Kriegler, E., Popp, A., Giannousakis, A., & Edenhofer, O. (2018a). Between Scylla and Charybdis: Delayed mitigation narrows the passage between large-scale CDR and high costs. *Environmental Research Letters*, 13(4), 044015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab2ba>
- Strefler, J., Amann, T., Bauer, N., Kriegler, E., & Hartmann, J. (2018b). Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c4>
- Swedish Energy Agency (SEA). (2021). Förslag på utformning av ett system för driftstöd, i form av omvänd auktionering eller fast lagringspeng, för avskiljning, infångning och lagring av koldioxid från förnybara källor (bio-CCS) Delredovisning.
- Tanneberger, F., Abel, S., Couwenberg, J., Dahms, T., Gaudig, G., Günther, A., & Joosten, H. (2021). Towards net zero CO<sub>2</sub> in 2050: An emission reduction pathway for organic soils in germany. *Mires and Peat*, 27. <https://doi.org/10.19189/MaP.2020.SNPG.StA.1951>.
- Tavakoli-Hashjini, E., Piorr, A., Müller, K., & Vicente-Vicente, J. L. (2020). Potential Bioenergy Production from *Miscanthus × giganteus* in Brandenburg: Producing Bioenergy and Fostering Other Ecosystem Services while Ensuring Food Self-Sufficiency in the Berlin-Brandenburg Region. *Sustainability*, 12(18), 7731. <https://doi.org/10.3390/su12187731>
- Tegetmeyer, C., Barthelmes, K.-D., Busse, S., & Barthelmes, A. (2020). Aggregierte Karte der organischen Böden Deutschlands. Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 01/2020 (self-published, ISSN 2627-910X), [https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2020-01\\_Tegetmeyer%20et%20al.pdf](https://greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2020-01_Tegetmeyer%20et%20al.pdf)
- Thrän, D., Lauer, M., Dotzauer, M., Oehmichen, K., Majer, S., Millinger, M., & Jordan, M. (2019). Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO). 130. <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Studien/technoekonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.pdf;jsessionid=78E21ABF3A774E727B53E2A5B708534A?blob=publicationFile&v=4>
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E. A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., Drösler, M. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators*, 109, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>



- Townsend, A., & Havercroft, I. (2019). The LCFS and CCS Protocol: An Overview for Policymakers and Project Developers. [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/05/LCFS-and-CCS-Protocol\\_digital\\_version.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/05/LCFS-and-CCS-Protocol_digital_version.pdf)
- Umweltbundesamt. (2019). Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - Rescue Studie. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue\\_studie\\_cc\\_36-2019\\_wege\\_in\\_eine\\_ressourcenschonende\\_treibhausgasneutralitaet.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf)
- Umweltbundesamt. (2020). Struktur der Flächennutzung. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#die-wichtigsten-flaechennutzungen>
- Umweltbundesamt. (2021a). Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2019.
- Umweltbundesamt. (2021b). Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung>
- UNFCCC. (2015). Adoption of the Paris Agreement. (Geneva: United Nations Framework Convention on Climate Change). <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
- United Nations Environment Programme. (2017). The Emissions Gap Report 2017: A UN Environment Synthesis Report. UN. <https://doi.org/10.18356/1cf881fb-en>
- van Vuuren, D. P., Stehfest, E., Gernaat, D. E. H. J., van den Berg, M., Bijl, D. L., de Boer, H. S., Daiglou, V., Doelman, J. C., Edelenbosch, O. Y., Harmsen, M., Hof, A. F., & van Sluisveld, M. A. E. (2018). Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies. *Nature Climate Change*, 8(5), 391–397. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0119-8>
- Vogt-Schilb, A., Meunier, G., & Hallegatte, S. (2018). When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment. *Journal of Environmental Economics and Management*, 88, 210-233.
- Whitmarsh, L., Xenias, D., & Jones, C. R. (2019). Framing effects on public support for carbon capture and storage. *Palgrave Communications*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0217-x>
- Wiesmeier, M., Mayer, S., Paul, C., Helming, K., Don, A., Franko, U., Franko, M., & Kögel-Knabner, I. (2020). CO<sub>2</sub>-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. *BonaRes Series*. <https://doi.org/10.20387/BONARES-F8T8-XZ4H>
- Woodland Carbon Code. (2021). Standard & Guidance—UK Woodland Carbon Code. <https://woodlandcarboncode.org.uk/standard-and-guidance>
- Zimmermann, A. W., Wunderlich, J., Müller, L., Buchner, G. A., Marxen, A., Michailos, S., Armstrong, K., Naims, H., McCord, S., Styring, P., Sick, V., & Schomäcker, R. (2020). Techno-Economic Assessment Guidelines for CO<sub>2</sub> Utilization. *Frontiers in Energy Research*, 0. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00005>
- Zukunftskommission Landwirtschaft. (2021). Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe.

[https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Landwirtschaft/abschlussbericht-zukunftskommission-landwirtschaft.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Landwirtschaft/abschlussbericht-zukunftskommission-landwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

# Anhang

**Tabelle A1: Übersicht über privatwirtschaftliche Initiativen zur Entwicklung, Förderung und Anwendung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien**

US (Stripe)	<b>Negative Emission Commitment - Stripe</b> <a href="https://stripe.com/blog/negative-emissions-commitment">https://stripe.com/blog/negative-emissions-commitment</a>	Mindestens 1 Mio. USD oder doppelt so viel, wie die Firma über andere Technologien für CO <sub>2</sub> Kompensation zahlt	(Neue) Technologien mit einer Permanenz von über einem Jahrhundert	Projekte die Kriterien erfüllen, können sich bewerben
US (Elon Musk)	<b>XPrize</b> <a href="https://www.xprize.org/prizes/elonmusk">https://www.xprize.org/prizes/elonmusk</a>	100 Mio. USD	Skalierbare Technologien, die mindestens 1000 tCO <sub>2</sub> pro Jahr entfernen können	Wettbewerb
US	<b>FedEx-Centre for Natural Carbon Capture</b> <a href="https://planetarysolutions.yale.edu/center-natural-carbon-capture">https://planetarysolutions.yale.edu/center-natural-carbon-capture</a>	100 Mio. USD	Nature-based solutions	Gründung eines Instituts an der Yale University (Centre for Natural Carbon Capture)

