



Ariadne-Report

Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045

Szenarien und Pfade im Modellvergleich

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Der vorliegende Ariadne-Report wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Er spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Herausgegeben von

Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

Oktober 2021

DOI: 10.48485/pik.2021.006

Bildnachweise

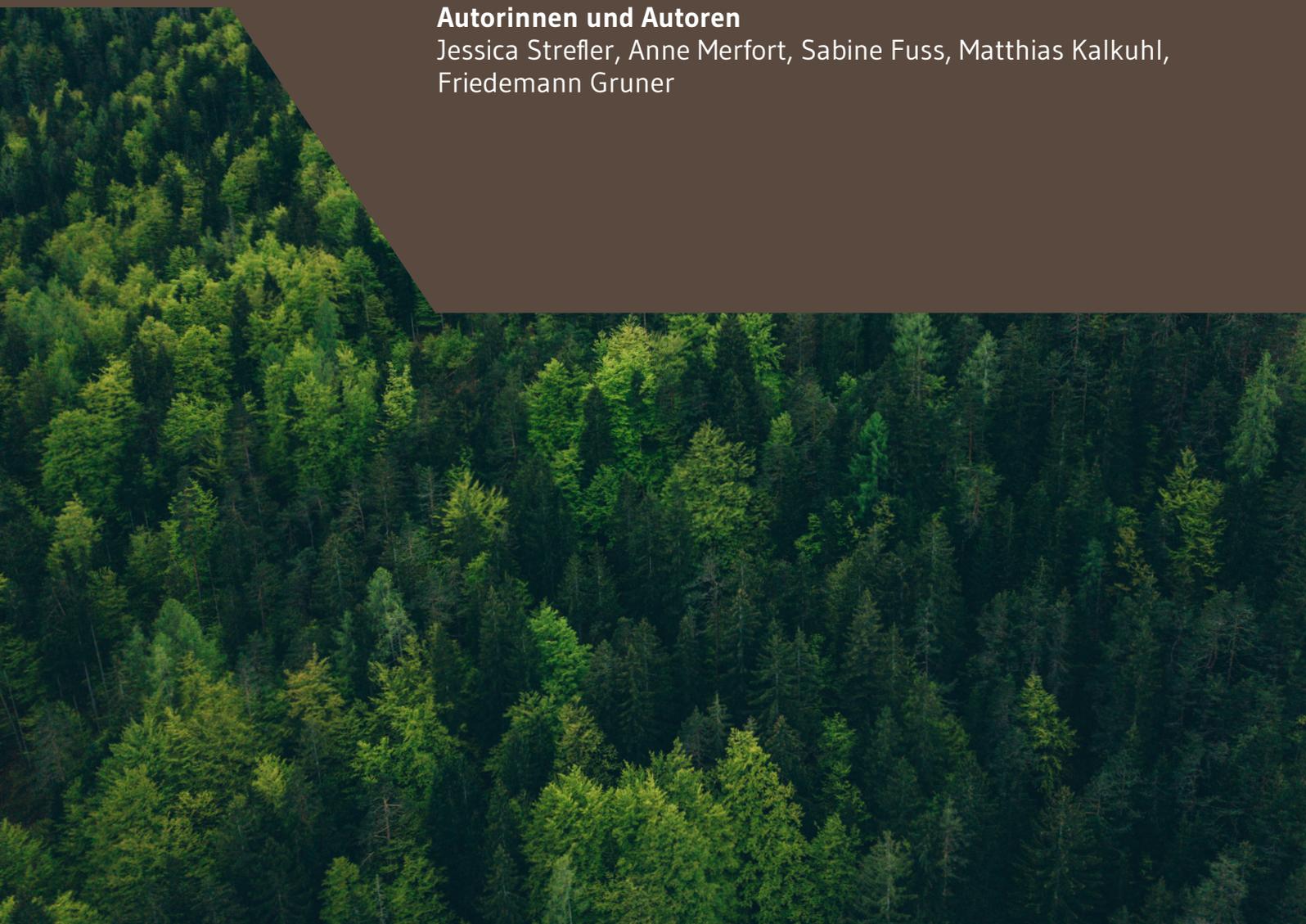
Titel: Yeshi Kangrangz / Unsplash; Kapitel 1: Andrea Boldizsar / Unsplash; Kapitel 2: funky-data / iStock; Kapitel 3: Julian Hochgesang / Unsplash; Kapitel 4: Robin Sommer / Unsplash; Kapitel 5: hungyifei / iStock; Kapitel 6: audioundwerbung / istock; Kapitel 7: Clint Adair / Unsplash; Kapitel 8: Adam Vradenburg / Unsplash; Kapitel 9: Dan Meyers / Unsplash; Kapitel 10: Micheile Henderson / Unsplash

8. CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre

8.1	Zusammenfassung	223
8.2	Mindestbedarf an CO ₂ -Entnahme	224
8.3	Angebot an CO ₂ -Entnahme	228
	<i>Geologische Speicherung</i>	229
	<i>BECCS</i>	230
	<i>DACCS</i>	233
	<i>Wieder-/Aufforstung</i>	234
	<i>Terrestrische Waldsenke, Waldverdichtung und Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten</i>	235
	<i>Beschleunigte Verwitterung</i>	237
	<i>Pflanzkohle</i>	238
	<i>Bodenkohlenstoffanreicherung</i>	240
	<i>Wiedervernässung von Mooren</i>	242
	<i>Langlebige Materialien</i>	243
8.4	Instrumente und Maßnahmen für die Zielerreichung	245
	Literaturangaben	248

Autorinnen und Autoren

Jessica Strefler, Anne Merfort, Sabine Fuss, Matthias Kalkuhl, Friedemann Gruner



8.1 Zusammenfassung

Das Ziel der Treibhausgasneutralität ist ohne CO₂-Entnahme nicht erreichbar.

Die aktive Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre kann zwei wichtige Beiträge zu Klimaschutzmaßnahmen leisten. Zum einen kann Treibhausgasneutralität nur erreicht werden, wenn Restemissionen, die nicht oder nur zu sehr hohen Kosten vermeidbar sind, durch entsprechend große CO₂-Senken ausgeglichen werden. Zum anderen können CO₂-Entnahmen, die die noch verbliebenen Emissionen übersteigen und damit netto-negative Emissionen ermöglichen, temporäre Überschreitungen des verbliebenen Emissionsbudgets nachträglich ausgleichen. Im europäischen und deutschen Kontext wird für den Zeithorizont bis 2050 bzw. 2045 die CO₂-Entnahme vor allem zum Erreichen der Treibhausgasneutralität diskutiert, perspektivisch können aber auch netto-negative Emissionen avisiert werden.

Der Mindestbedarf an CO₂-Entnahme ergibt sich aus den verbleibenden Restemissionen.

Restemissionen werden insbesondere aus industriellen Prozessemissionen und nicht-CO₂ Emissionen, die zu einem Großteil in der Landwirtschaft anfallen, erwartet. Die Höhe der Restemissionen bestimmt den Mindestbedarf an CO₂-Entnahmen, ist allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet. Diese Studie schätzt die Höhe der Restemissionen Deutschlands auf mindestens 41-74 MtCO₂äq/Jahr, in guter Übereinstimmung mit der Bandbreite bisheriger Studien von 36-63 MtCO₂/Jahr. Diese Abschätzungen sind eher als untere Grenze zu verstehen. Die Emissionen könnten auch höher ausfallen, wenn zugrundeliegende Annahmen nicht erfüllt sind, wie zum Beispiel die vollständige Vermeidung energiebedingter CO₂-Emissionen oder eine deutliche Reduktion von nicht-CO₂ Emissionen.

Es gibt verschiedene Optionen zur CO₂-Entnahme, deren technisches Potenzial sich bis 2045 in Deutschland auf über 100 MtCO₂ summieren könnte.

Es werden eine Reihe von verschiedenen Optionen zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre diskutiert, die über das in den Szenarien verfügbare Portfolio hinausgehen. Alle Optionen sind jedoch beschränkt, etwa durch ökonomische Kosten, einen potenziell hohen Energieverbrauch, physische Beschränkungen, notwendige technologische Entwicklungen oder potenzielle Umweltauswirkungen. Zusätzliche Einschränkungen können aus mangelnder Permanenz der Speicherung und fehlender gesellschaftlicher Akzeptanz resultieren. Diese Studie liefert erste Abschätzungen für ein mögliches CO₂-Entnahme Potenzial in Deutschland in Höhe von 34-42 MtCO₂/Jahr im Jahr 2030, wovon 22 MtCO₂/Jahr auf die Senkenleistung des Waldes entfallen. In 2045 könnte sich dieses Potenzial auf 103-116 MtCO₂/Jahr erhöhen, wovon 35 MtCO₂/Jahr auf die Senkenleistung

des Waldes entfallen. Das bedeutet, dass Deutschland in der Lage sein könnte, die zur Erreichung der Treibhausgasneutralität benötigte CO₂-Entnahme lokal zu decken, da in den Szenarien des REMIND-Modells dieser Studie die Restemissionen in den Jahren ab 2045 nur bei 49 MtCO₂äq/Jahr liegen (für eine detaillierte Modellbeschreibung siehe Appendix). Aufgrund der bestehenden Unsicherheit über die zukünftige Senkenleistung der Biosphäre sowie des Risikos, dass durch Umwelteinflüsse wie Waldbrände oder Schädlinge der Wald geschädigt und der darin gebundene Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre gelangt, sollten auch technische CO₂-Senken, beispielsweise durch Bioenergienutzung mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung, entwickelt werden. Diese erlauben auch eine Absicherung gegen das Risiko potenziell höherer Restemissionen.

Um Treibhausgasneutralität zu erreichen, müssen politische Rahmenbedingungen geschaffen werden, um CO₂-Entnahmen anzureizen.

Dafür sind finanzielle Anreize für den Einsatz von CO₂-Entnahmen, Monitoring, die Förderung von Forschung und Entwicklung unter Berücksichtigung von Externalitäten wie Verteilungseffekten und Umweltwirkungen sowie ein Deliberationsprozess zur Unterstützung einer breiten gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Trägerschaft notwendig.

8.2 Mindestbedarf an CO₂-Entnahme

In diesem Kapitel wird die Menge der in 2045 mindestens zu erwartenden Restemissionen diskutiert, die zur Erreichung der Treibhausgasneutralität durch CO₂-Entnahmen ausgeglichen werden müssten.

Das Klimaziel des Paris-Abkommens schreibt in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einen Ausgleich von Emissionsquellen und –senken vor. Dieses Ziel findet sich auch in den Klimazielen von Deutschland und der EU, die Treibhausgasneutralität bis 2045 bzw. bis 2050 anstreben. Dies bedeutet, dass die dann noch verbleibenden Restemissionen aller Treibhausgase, also neben CO₂ auch CH₄, N₂O, und F-Gase, durch eine aktive Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre ausgeglichen werden müssen. Das deutsche Klimaziel strebt darüber hinaus netto-negative Emissionen, also CO₂-Entnahmen, die über die Kompensation von Restemissionen hinausgehen, nach 2045 an. Die entscheidende Frage ist nun, wie weit die Emissionen gesenkt werden können und sollen, und welcher Anteil der Emissionen ausgeglichen werden muss. Ein Entwurf der Novelle des deutschen Klimaschutzgesetzes sieht eine Senkung der Emissionen um 97 % gegenüber 1990 vor, und deutet einen Ausgleich der verbleibenden 3 %, was etwas unter 40 MtCO₂ pro Jahr entsprechen würde, durch den Sektor der Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft an

(Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF) (BMU, 2021c). Beide Ziele, die Emissionsreduktion und die Stärkung des Beitrags des LULUCF-Sektors sind ambitioniert.

In 2019 wurden in Deutschland (ohne LULUCF) ca. 810 MtCO₂äq/Jahr emittiert. Davon waren ca. 650 MtCO₂/Jahr energiebedingte CO₂-Emissionen, 61 MtCO₂/Jahr aus Industrieprozessen, und 98 MtCO₂äq/Jahr nicht-CO₂-Emissionen, also CH₄, N₂O und F-Gase (davon 62 MtCO₂äq/Jahr aus der Landwirtschaft)(UBA, 2021a). Die im Rahmen von Ariadne analysierten Szenarien zeigen, dass die energiebedingten CO₂-Emissionen weitestgehend vermieden werden können. Die Ergebnisse der Gesamtsystemmodelle weisen Restemissionen in Höhe von 41-56 MtCO₂äq/Jahr auf. Eine Abschätzung der größten verbleibenden Beiträge basierend auf den jeweils in diesem Sektor spezialisierten Modellen und unter Einbeziehung verschiedener Annahmen ergibt eine leicht höhere Bandbreite der Restemissionen von 49-74 MtCO₂äq/Jahr in 2045. Dabei können Emissionen aus Industrieprozessen durch Effizienzgewinne bis 2045 auf 18 MtCO₂/Jahr reduziert werden (FORECAST Modell, Szenario *Technologiemix*, für eine detaillierte Modellbeschreibung siehe Appendix). Davon können ca. 10 MtCO₂/Jahr durch Kohlenstoffabscheidung und –speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) vermieden werden, so dass in 2045 noch 8 MtCO₂/Jahr verbleiben (FORECAST Modell, Szenario *Technologiemix*). Nicht-CO₂-Emissionen werden in den Szenarien durch den Stopp der Förderung fossiler Energien, die Reduktion des Einsatzes von Verbrennungsmotoren und verbesserte Industrieprozesse, durch effizienteren Einsatz von Düngemitteln und eine Reduktion des Tierbestands auf 41 MtCO₂äq/Jahr reduziert (REMIND Modell, Szenario *Technologiemix*). Ohne eine Reduktion des Tierbestandes würden in 2045 56 MtCO₂äq/Jahr an nicht-CO₂-Emissionen verbleiben. Eine Reduktion des Tierbestands würde zu einem geringeren Angebot tierischer Produkte für Konsumentinnen und Konsumenten führen; alternativ müsste der Export von tierischen Produkten reduziert werden. Eine reine Reduktion des Exports ohne Veränderung des globalen Konsums würde die Tierhaltung und damit die Emissionen lediglich in andere Länder verlagern.

In der RESCUE-Studie des Umweltbundesamt (UBA, 2019) werden Restemissionen von 36-57 MtCO₂äq/Jahr erreicht, ohne den Einsatz von CCS, aber zum Beispiel mit weniger Lebensmittelabfällen und reduzierten Tierbeständen aufgrund eines geringeren Konsums von Tierprodukten und nicht weiter steigendem Flugverkehr. Je nach Ausmaß der Änderung der Ernährungsgewohnheiten entfallen davon ca. 24-32 MtCO₂äq/Jahr auf die Landwirtschaft. Die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität und der Agora (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2021) kommt auf 63 MtCO₂äq/Jahr verbleibende Emissionen in

2045, davon 41 aus der Landwirtschaft. Abbildung 8.1 fasst die in 2045 verbleibenden Emissionen zusammen. Falls alle energiebedingten CO₂-Emissionen vermieden werden, CCS für Emissionen aus Industrieprozessen zur Verfügung steht und bei verbessertem Abfallmanagement, effizienterem Düngemittleinsatz und stark reduzierten Tierbeständen, können die Restemissionen auf 49 MtCO₂äq/Jahr gesenkt werden, was den in der Novelle des deutschen Klimaschutzgesetzes angedeuteten 3 % Restemissionen im Vergleich zu 1990 schon sehr nahe kommt. Ohne CCS und ohne Reduktion der Tierbestände kommen 10 bzw. 15 MtCO₂äq/Jahr dazu, so dass die Restemissionen dann bei ca. 74 MtCO₂äq/Jahr lägen. Die Restemissionen können natürlich auch noch höher sein falls zum Beispiel nicht alle energiebedingten CO₂-Emissionen vermieden werden.

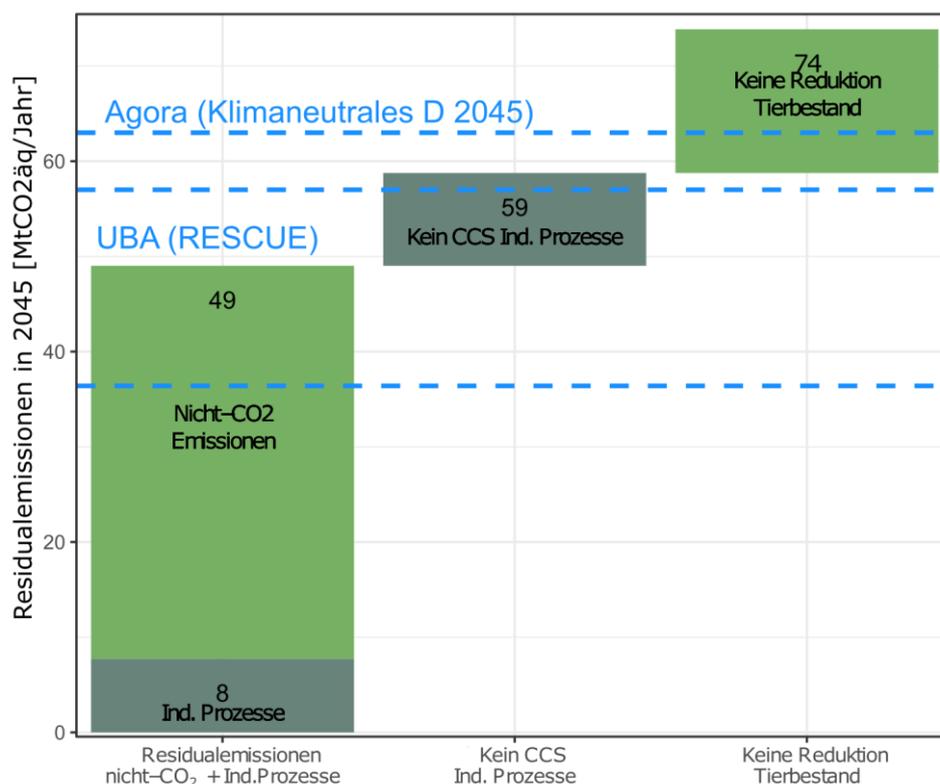


Abbildung 8.1: Residualemissionen in 2045 im Szenario TechnologiemiX unter verschiedenen Annahmen. Falls CCS für Emissionen aus Industrieprozessen zur Verfügung steht und die Tierbestände stark reduziert werden, können die Restemissionen auf ca. 49 MtCO₂äq/Jahr gesenkt werden. Ohne CCS und mit einer geringeren Reduktion der Tierbestände kommen 10 bzw. 15 MtCO₂äq/Jahr dazu, so dass die Restemissionen dann bei 74 MtCO₂äq/Jahr lägen. CCS-Emissionen basieren auf Berechnungen mit dem Modell FORECAST, nicht-CO₂-Emissionen auf dem Modell REMIND. Im Vergleich werden die Residualemissionen aus der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut et al., 2021) und die Bandbreite aus der RESCUE-Studie des UBA (UBA, 2019) gezeigt.

Der Entwurf der Novelle des deutschen Klimaschutzgesetzes sieht vor, dass die verbleibenden Restemissionen durch die Senkenleistung des LULUCF Sektors kompensiert werden. Im LULUCF-Sektor entsteht die CO₂-Entnahme maßgeblich durch das Wachstum der bestehenden Wälder. 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 (Böttcher et al., 2018; Oehmichen et al., 2018; UBA, 2017). Zudem steigt der Holzeinschlag durch zunehmende Waldschäden hauptsächlich aufgrund von Insektenbefall (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021). Da auch die Emissionen aus trockengelegten Moorböden in diesen Sektor fallen, kann der netto-Gesamtbeitrag dieses Sektors auch durch Wiedervernässung von Moorböden gestärkt werden (siehe Box Accounting des LULUCF-Sektors).

Neben den natürlichen Senken stehen weitere Optionen der CO₂-Entnahme zur Diskussion, wie etwa die Anreicherung von Kohlenstoff im Boden, die Erzeugung von Pflanzenkohle, der Einsatz von Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und geologischer Speicherung (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS) oder die direkte Entnahme von CO₂ aus der Luft mit geologischer Speicherung (direct air carbon capture and storage, DACCS). Alle Optionen sind jedoch auf die eine oder andere Art beschränkt, sei es durch physische Beschränkungen (wie zum Beispiel bei der Kohlenstoffanreicherung im Boden), durch Umweltauswirkungen, die nötige technologische Entwicklung, Kosten, Energiebedarf oder die gesellschaftliche Akzeptanz, die gerade bei CCS derzeit noch nicht gegeben ist. Das nächste Kapitel 8.3 geht auf verschiedene Optionen der CO₂-Entnahme, ihre Potenziale in Deutschland und mögliche Nebenwirkungen ein.

Box: Accounting des LULUCF-Sektors

Nach der europäischen LULUCF-Verordnung Verordnung (EU) 2018/841 (Europäisches Parlament, 2018) weist das Accounting in diesem Sektor einige nennenswerte Besonderheiten auf. Für die Landtypen bewirtschaftete Ackerflächen, bewirtschaftete Grünflächen und bewirtschaftete Feuchtgebiete gilt das sogenannte net-net-accounting. Bilanziert wird die Differenz der Emissionen gemäß nationalen Treibhausgasinventuren zum Wert aus dem Basisjahr 2005. Da schon in 2005 hohe Emissionen aus trockengelegten Moorböden auf diesen Flächen angefallen sind, würde eine Wiedervernässung von Mooren im Accounting zu Emissionen mit negativem Vorzeichen führen, ohne dass CO₂ aus der Atmosphäre entnommen wird. Das Accounting von *bewirt-*

schafteten Waldflächen erfolgt über ein *reference-level-accounting*. Dazu wird ein Referenzwert für Wälder (*Forest Reference Level, FRL*) eingeführt: eine Prognose der zukünftigen Entwicklung der nationalen Waldsenken oder -quellen bei Fortschreibung der aktuellen Nutzung und unter Berücksichtigung der Altersstruktur des Waldes. Die Differenz aus den berichteten Emissionen und den prognostizierten Emissionen wird schließlich bilanziert. Der FRL für Deutschland im Bilanzierungszeitraum 2021-2025 beträgt -34,4 MtCO₂ pro Jahr. Das Accounting von *aufgeforsteten Flächen* und *entwaldeten Flächen* erfolgt über das *gross-net-accounting*. Das heißt, es werden alle Netto-Emissionen ohne Abzug eines historischen oder prognostizierten Referenzwerts bilanziert.

Probleme des aktuellen Accountings bestehen darin, dass in der Bilanzierung negative Emissionen auftreten können, die keiner tatsächlichen CO₂-Entnahme entsprechen, da es sich lediglich um Emissionsreduktionen gegenüber dem Basisjahr 2005 handelt. Damit könnte in der Bilanzierung Treibhausgasneutralität erreicht werden, obwohl in der Realität noch Restemissionen vorhanden sind. Zudem unterliegt die zukünftige Waldentwicklung großen Unsicherheiten, wodurch sich substantielle Schwierigkeiten bei der Bestimmung der FRLs in den einzelnen Mitgliedsstaaten ergaben.

Das „Fit for 55-Paket“ der EU-Kommission schlägt vor, die aktuell geltenden Accounting Regeln für den LULUCF-Sektor ab 2026 zu vereinfachen. Es wird vorgeschlagen, keine Referenz- und Basiswerte mehr zu subtrahieren, sondern in allen Landbereichen die Netto-Emissionen für die Zielerreichung zu bilanzieren. Damit würden Emissionsreduktionen gegenüber dem Basisjahr 2005 als THG-Minderungsoption bilanziert und die Bestimmung der FRLs entfielen.

8.3 Angebot an CO₂-Entnahme

In diesem Kapitel wird auf Basis der bestehenden Literatur das technische Potenzial einer Reihe von CO₂-Entnahme-Methoden für Deutschland abgeschätzt, die über das in den Szenarien verfügbare Portfolio hinausgehen. Außerdem werden die Ausbauraten für CCS diskutiert, die nötig wären, um Treibhausgasneutralität in 2045 zu erreichen. Alle Optionen sind beschränkt, etwa durch ökonomische Kosten, einen potenziell hohen Energieverbrauch, physische Limitationen, notwendige technologische Entwicklungen oder potenzielle Umweltauswirkungen. Zusätzliche Einschränkungen können aus mangelnder Permanenz der Speicher und fehlender gesellschaftlicher Trägerschaft resultieren. Diese Studie liefert erste Abschätzungen für ein mögliches CO₂-Entnahme-Potenzial in Deutschland in Höhe von 34-42 MtCO₂/Jahr im Jahr 2030, wovon 22 MtCO₂/Jahr auf die Senkenleistung des Waldes entfallen. In 2045 könnte sich dieses Potenzial

auf 103-116 MtCO₂/Jahr erhöhen, wovon 35 MtCO₂/Jahr auf die Senkenleistung des Waldes entfallen. In Tabelle 8.1 sind Szenarien für ein mögliches CO₂-Entnahmeportfolio dargestellt, die alle hier diskutierten Optionen enthalten.

Das bedeutet, dass der Bedarf an CO₂-Entnahme um Treibhausgasneutralität zu erreichen, in Deutschland lokal gedeckt werden könnte, da in den Szenarien des REMIND-Modells dieser Studie die Restemissionen nur bei 49 MtCO₂äq/Jahr liegen. Aufgrund der bestehenden Unsicherheit über die zukünftige Senkenleistung der Biosphäre sowie des Risikos, dass durch Umwelteinflüsse wie Waldbrände oder Schädlinge der Kohlenstoffspeicher im Wald verloren geht, sollten auch technische CO₂-Senken, beispielsweise durch Bioenergienutzung mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung, entwickelt werden. Diese erlauben auch eine Absicherung gegen das Risiko potenziell höherer Restemissionen.

Geologische Speicherung

Die Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂ wird sowohl für Emissionen aus industriellen Prozessen benötigt, als auch für einige CO₂-Entnahme Optionen wie BECCS oder DACCS. Dabei wird CO₂ entweder aus den Abgasströmen abgeschieden oder direkt aus der Umgebungsluft gewonnen. Das hochkonzentrierte CO₂ muss dann sicher gespeichert werden, beispielsweise in salinen Aquiferen. Die geologische Speicherung von CO₂ wurde in Deutschland zum Beispiel am Pilotstandort Ketzin erprobt. Dort wurden von 2008 bis 2013 insgesamt 67 ktCO₂ gespeichert (GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam, 2021). Die Speicherkapazität wird für Deutschland auf 16 GtCO₂ Onshore und 3.8 GtCO₂ Offshore geschätzt. In Europa dürften 300 GtCO₂ Speicherkapazität vorhanden sein, davon 200 GtCO₂ in der Nordsee (Deutsche Energie-Agentur (dena), 2021). Global sind derzeit 26 CCS-Anlagen (Global CCS Institute, 2021) in kommerziellem Betrieb und einige weitere in verschiedenen Stufen der Entwicklung. Die Technologie befindet sich also noch am Anfang der Entwicklung und müsste schnell weiterentwickelt werden, um 2045 in ausreichendem Umfang zur Verfügung zu stehen.

Neben der technologischen Entwicklung der CO₂-Abscheidung und -speicherung müsste auch eine Infrastruktur zum Transport des CO₂, zum Beispiel über Schiffe oder Pipelines aufgebaut werden. Eine weitere Hürde besteht in den derzeitigen gesetzlichen Regelungen. Die Erforschung, Erprobung und Demonstration von Technologien zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid in unterirdischen Gesteinsschichten ist im Gesetz zur Demonstration und Anwendung von Technologien zur Abscheidung, zum Transport und zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid geregelt. Das Gesetz begrenzt die jährliche Speichermenge auf 1,3 MtCO₂/Jahr pro Speicher und auf 4 MtCO₂/Jahr insgesamt. Diese Menge müsste also erhöht werden. Derzeit wird

den Ländern das Recht eingeräumt, die Speicherung zu verbieten, wovon einige Länder auch Gebrauch gemacht haben. Nicht zuletzt bedarf die Anwendung von CCS einer breiten gesellschaftlichen Trägerschaft, die derzeit in weiten Teilen der Bevölkerung nicht gegeben ist.

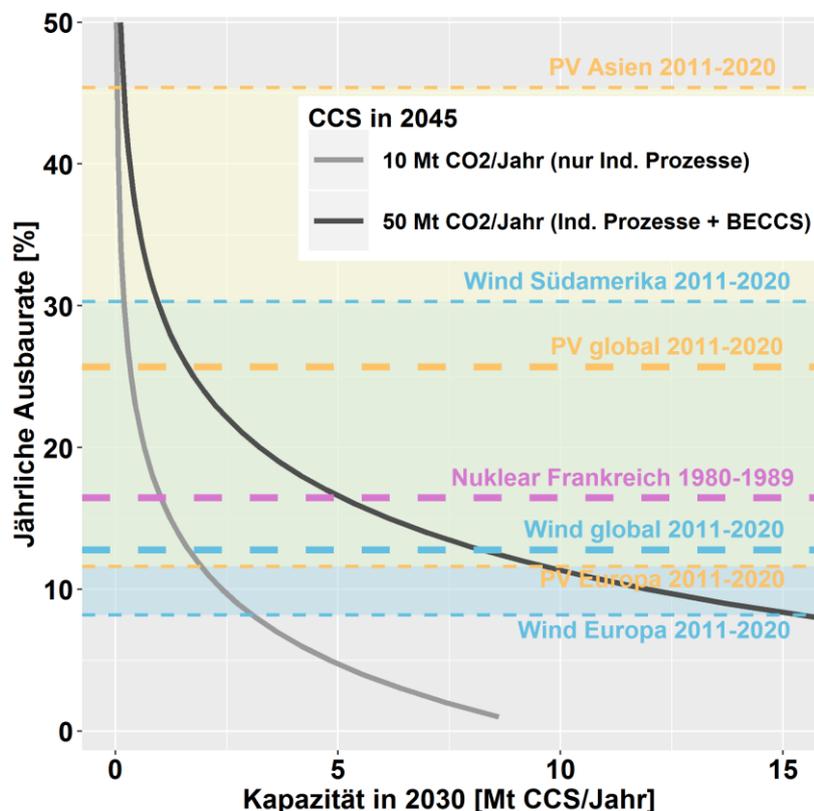


Abbildung 8.2: Jährliche Ausbaurrate vs. nötige Kapazität in 2030, um entweder 10 (graue Linie) oder 50 (schwarze Linie) MtCO₂/Jahr CCS in 2045 zu erreichen. Zum Vergleich werden historische Ausbauraten von Photovoltaik (PV, gelb), Wind (blau) (IRENA, 2021), und Nuklearenergie (pink) (EIA, 2021) gezeigt. Für Wind und PV werden die globalen Raten und Bandbreiten anhand verschiedener Weltregionen von 2011-2020 gezeigt, für Nuklearenergie nur Frankreich von 1980-1989.

Für die Vermeidung von Emissionen aus industriellen Prozessen werden in den Szenarien 10 Mt CCS/Jahr in 2045 genutzt, für BECCS zusätzlich 40 Mt CCS/Jahr in 2045. Abbildung 8.2 zeigt, wie die nötige Entwicklung von CCS bis zum Jahr 2030 sowohl von der gewünschten Menge in 2045 als auch von den erwarteten jährlichen Ausbauraten abhängt. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass die Ausbauraten von Photovoltaik (PV) die Erwartungen weit übertroffen haben. Allerdings sind solche hohen Ausbauraten bei einer granularen Technologie wie PV möglicherweise leichter zu erreichen als bei größeren Anlagen (Wilson et al., 2020). Es ist daher zu erwarten, dass die Ausbauraten von CCS eher im Bereich von Technologien wie Nuklearenergie oder Windkraft anzusiedeln sind. Diese liegen im Mittel bei 10-15 %/Jahr, obwohl zum Beispiel in Südamerika, wo der Ausbau der Windenergie noch am Anfang steht, auch deutlich höhere Raten von bis zu 30 %/Jahr zu beobachten waren (IRENA, 2021). Bei solch hohen Ausbauraten wären

Kapazitäten von 1 Mt CCS in 2030 schon ausreichend, um in 2045 50 Mt CCS zu erreichen. Bei einer Ausbaurate von 15 %/Jahr müssten hingegen in 2030 schon 6 Mt CCS erreicht werden, um in 2045 50 Mt CCS zu erzielen.

BECCS

Beim Wachsen entziehen Pflanzen der Atmosphäre CO₂ durch Photosynthese und binden es in den energiereichen Biomolekülen, aus denen sie aufgebaut sind. Durch die natürliche Zersetzung am Ende der Lebensdauer der Pflanzen aber auch durch die Verbrennung während der energetischen Nutzung wird genau der gebundene Kohlenstoff als CO₂ wieder freigesetzt und gelangt in der Regel so wieder zurück in die Atmosphäre. Bioenergie mit Carbon Capture und Storage (BECCS) wird hier als Oberbegriff für Technologien verwendet, die aus der Biomasse der Pflanzen nutzbare Energie produzieren und das im Prozess freiwerdende CO₂ abfangen und einer langfristigen (geologischen) Speicherung zuführen. In der Literatur wird der Begriff BECCS am häufigsten im Zusammenhang mit der Elektrizitätsgewinnung aus Biomasse verwendet. In diesem Kapitel wird auch eine Umwandlung in andere Energieträger, wie Biogas, Bioflüssigkraftstoffe oder biogenen Wasserstoff unter dem Oberbegriff BECCS betrachtet. Das CO₂-Abscheidungspotenzial hängt dabei maßgeblich 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 entsprechend ein kleinerer Anteil des biogen gebundenen Kohlenstoffes abgeschieden. Jedoch ergeben sich durch Substitution fossiler Energieträger zusätzliche CO₂-Minderungspotenziale.

Technisches Potenzial

Die Abscheidungsraten von CO₂ bezüglich des Kohlenstoffanteils der Biomasse für verschiedene beispielhaft vorgestellte BECCS-Prozesse sind: 99 % bei H₂-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., 2011) und 40 % Biogas Herstellung (Carbo et al., 2011). Das BECCS-Potenzial ist maßgeblich durch die Verfügbarkeit von nachhaltiger Biomasse limitiert. Die Ariadne-Szenarienannahme bezüglich der verfügbaren Biomasse liegt über die Zeit konstant bei 1 EJ/Jahr. Würde die Hälfte dieser Biomasse

für BECCS-Prozesse genutzt, könnten 20-49 MtCO₂ * abgeschieden werden. Derzeit liegt das in-nerdeutsche Potenzial für energetisch nutzbare Biomasse (Gülle und Klärschlamm ausgeschlos-sen) bei 1,28 EJ, wobei 0,855 EJ auf Reststoffe entfallen (Thrän et al., 2019).

* Pauschale Annahme: 1 EJ entspricht 54 Mio t. Trockenmasse, davon 50 % Kohlenstoff (27 MtC) entspräche umge-rechnet 100 MtCO₂

Einordnung

Bisher gibt es für verschiedene BECCS-Technologien nur einige wenige Demonstrationsprojekte (zum Beispiel Decatur, Illinois, USA, eine Bioethanol-Anlage mit geologischer Speicherung in sali-nen Aquiferen; ein Pilotprojekt einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage von Stockholm Exergi AB, Värtan, Stockholm, Schweden). Die Kosten wurden in Fuss et al. (2018) mit 100-200 \$/tCO₂ [ge-samte Spannweite aus der Literatur 25-1000 \$/tCO₂] angegeben. Eine adäquate geologische Speicherung zeichnet sich durch eine hohe Permanenz aus. Das Monitoring des geologisch ge-speicherten CO₂ ist dabei einfach, das Monitoring von direkten und indirekten Emissionen aus der Landnutzungsänderung im Fall von angebaute Biomasse stellt hingegen ein substanzielles Problem dar. Die Flächenintensität im Fall von angebaute Biomasse hängt von der Konversions-technologie sowie den gewählten Anbaupflanzen ab. Mit Mais würden 0,1 – 0,25 ha pro Tonne abgeschiedenen CO₂ benötigt, im Fall von Miscanthus 0,04 – 0,1 ha/tCO₂* (untere Grenze Biogas + CCS, obere Grenze Bio-H₂ + CCS). Die Vor- und Nachteile bzw. beabsichtigte oder unbeabsichtig-ten Nebeneffekte des Einsatzes von BECCS können hier nur kurz angerissen werden. Zu den po-sitiven Nebeneffekten von BECCS zählen Innovationspotenziale und daraus entstehende Absatz-chancen auf den Weltmärkten, wirtschaftliche Diversifizierung, Energieunabhängigkeit sowie Technologieentwicklung und -transfer. Zudem liefern die energetischen Outputs einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung von Transport und Industrie durch Substitution von fossilen Koh-lenwasserstoffen. Negative Nebeneffekte, insbesondere im Fall von Anbaubiomasse, sind direk-ter und indirekter Landnutzungswandel, Konkurrenz mit Nahrungsmittelproduktion und (Wie-der-)Aufforstung um Landflächen, potenzielle Auswirkungen auf die Gesundheit, Biodiversitäts-verluste, Entwaldung und Walddegradation sowie Auswirkungen auf Boden und Wasser. Zudem steht BECCS in Konkurrenz um die verfügbare Biomasse mit Pflanzenkohle und langlebigen Pro-dukten aus biogenen Rohstoffen. Je nach geologischem Speicherpotenzial und der zur Verfü-gung stehender CCS-Einspeisekapazität steht BECCS in Konkurrenzen zu DACCS und anderen CCS Anwendungen, wie beispielsweise der Vermeidung von industriellen Prozessemissionen. Nicht vernachlässigt werden sollte, dass geologische Speicher und Landnutzungsänderungen für den Biomasseanbau in der Bevölkerung häufig umstritten sind.

* Ertragsannahmen nach (Tavakoli-Hashjini et al., 2020) für Brandenburg: Mais 100 GJ/ha, Miscanthus 250 GJ/ha. Kohlenstoffanteil Annahme: vereinfacht konstant mit 18,5 GJ/t Trockenmasse.

DACCS

Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) ist der Oberbegriff für technische Verfahren zur Abscheidung von CO₂ direkt aus der Umgebungsluft mit anschließender langfristiger, geologischer Speicherung. Da die Konzentration des CO₂ in der Atmosphäre vergleichsweise klein ist, ist für diese Prozesse ein hoher Energieaufwand nötig. Mit Hilfe von Ventilatoren wird die Umgebungsluft in großen Mengen am Ab- oder Adsorbermaterial entlanggeführt. Das in der Umgebungsluft enthaltene CO₂ setzt sich am Ab- oder Adsorbermaterial ab, bis dieses gesättigt ist. Im Anschluss wird das dort gebundene CO₂ durch Ausheizen des Materials wieder freigesetzt und kann im Zuge dessen abgefangen und der langfristigen Speicherung zugeführt werden.

Technisches Potenzial

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 CO₂ aus der Atmosphäre werden perspektivisch nach Angaben eines der führenden DAC-Unternehmen Climeworks 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 illustratorisch das Abscheidungspotenzial berechnet, stünden für das Betreiben 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 einer Effizienz von COP 3 (Coefficient of Performance) bereitgestellt. Damit könnten 16 MtCO₂ bei Verfügbarkeit eines CO₂-neutralen Strommixes abgeschieden werden. Dieses Potenzial verringert sich auf 10 MtCO₂ bei aktuellem Strommix mit Emissionsfaktor 401g CO₂/kWh.

Einordnung

Bisher wird DACCS nur in Nischenmärkten angewendet. Die Kosten wurden in Fuss et al. (2018) mit 100-300 \$/tCO₂ [gesamte Spannweite aus der Literatur 25-1000 \$/tCO₂] angegeben. Eine adäquate geologische Speicherung zeichnet sich durch eine hohe Permanenz aus. Das Monitoring des geologisch gespeicherten CO₂ ist dabei einfach. Zu den positiven Nebeneffekten von

DACCS zählen Geschäftsmöglichkeiten, potenzielle Anwendungen zur Verbesserung der Raumluftqualität, atmosphärisches CO₂ als Rohstoff zur Herstellung klimaneutraler synthetischer Kraftstoffe (Carbon Capture and Utilization CCU). Negative Nebeneffekte umfassen den hohen Energiebedarf, potenzielle Effizienzeinbußen, wenn der hohe (thermische) Energiebedarf durch fossile Brennstoffe gedeckt wird und derzeit hohe Anfangsinvestitionskosten. Je nach geologischem Speicherpotenzial und der zur Verfügung stehenden CCS-Einspeisekapazität steht DACCS in Konkurrenzen zu BECCS und anderen CCS-Anwendungen, wie beispielsweise der Anwendung von CCS zur Abscheidung industrieller Prozessemissionen.

Material- und Abfallimplikationen sind derzeit noch nicht bekannt, können aber nicht ausgeschlossen werden. Die fehlende Akzeptanz von geologischen Speichern stellt eine politische Herausforderung dar.

(Wieder-)Aufforstung

Wälder binden durch das Wachstum der Bäume atmosphärisches CO₂ in der Biosphäre sowohl in lebender Biomasse als auch im Boden. Aktuell bilden die deutschen Wälder durch ihre verhältnismäßig junge Altersstruktur eine CO₂-Senke in Höhe von 57 MtCO₂ (UBA, 2021a). Studien prognostizieren eine deutliche Abnahme dieser CO₂-Senke für die Trendfortschreibung der aktuellen Nutzung und einen Erhalt der aktuellen Senkenleistung nur bei deutlicher Extensivierung der Holzentnahme und Renaturierung der Waldstruktur (Böttcher et al., 2018; Oehmichen, 2018). Um die Senkenleistung der Wälder über das aktuelle Maß hinaus zu erhöhen, würden demzufolge zusätzliche Flächen zur (Wieder-)Aufforstung benötigt werden.

Technisches Potenzial

Für eine stark vereinfachte Abschätzung des CO₂-Entnahme-Potenzials durch Aufforstung wurden aus Doelman et al. (2020) die CO₂ Abscheidungsraten für neu gepflanzte und junge Wälder im gemäßigten Klima mit 7,3 tCO₂/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. Daraus ergäbe sich eine Senkenleistung von 2 MtCO₂ jährlich. Dabei muss beachtet werden, dass dieser Wert nur für die ersten 25 Jahre nach der Pflanzung gilt und danach die Senkenleistung aufgrund des steigenden Alters des Waldes zunehmend abnimmt. Werden Ackerflächen aufgeforstet, kommt es darüber hinaus zu einer Erhöhung des Bodenkoh-

lenstoffgehalts (Abschätzungen dazu siehe Unterkapitel Bodenkohlenstoffanreicherung), wohingegen eine Aufforstung von Grasland nur einen vernachlässigbaren Anstieg des Bodenkohlenstoffgehalts zur Folge hat.

Einordnung

Bei der (Wieder-)Aufforstung handelt es sich um ausgereifte Praktiken, die ohne Weiterentwicklungsbedarf schon heute großflächig angewendet werden können. Die Kosten wurden in Fuss et al. (2018) mit 5-50 \$/tCO₂ [gesamte Spannweite aus der Literatur 0-240 \$/tCO₂] angegeben. Der Kohlenstoffspeicher ist reversibel und erfordert zur Aufrechterhaltung kontinuierliches Management. Zudem sind Wälder anfällig für natürliche und anthropogene Störungen. Es treten Sättigungseffekte innerhalb eines Zeitraums von Jahrzehnten bis Jahrhunderten ein. Das Monitoring der tatsächlich aufgenommenen Mengen an atmosphärischem CO₂ im Wald ist mit einigem Aufwand verbunden. Das Monitoring von direkten und indirekten Emissionen aus der Landnutzungsänderung stellt ein bislang nicht gelöstes substanzielles Problem dar. Die Flächenintensität beträgt 0,14 ha/tCO₂ für die jährliche CO₂ Abscheidung durch Neuzuwachs.

(Wieder-)Aufforstung hat positive Auswirkungen auf die Bodenqualität, die Biodiversität bei naturnaher Ausrichtung, den Wasserrückhalt und die Diversifizierung und kann den Bodenkohlenstoffgehalt erhöhen, wenn kohlenstoffverarmte Böden, wie beispielsweise Ackerflächen, aufgeforstet werden. Zu den negativen Nebeneffekten zählen Risiken für die Biodiversität bei Monokulturanbau, Risiken für die Ernährungssicherheit durch erhöhten Flächenbedarf und Reversibilität des Kohlenstoffspeichers durch Störungen wie Feuer, Dürren oder Schädlinge. Zu den politischen Herausforderungen zählen Widerstände im Zusammenhang mit Landnutzungskonkurrenz und Bedenken wegen der Unbeständigkeit der Speicherung.

Terrestrische Waldsenke, Waldverdichtung und Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten

Die deutschen Wälder nehmen beim Wachsen atmosphärisches CO₂ auf und leisten damit schon heute eine signifikante CO₂-Entnahme. In den IPCC-Szenarien werden die terrestrischen Waldsenken der bestehenden nationalen Wälder in der Regel jedoch als natürliche und nicht als anthropogene CO₂-Entnahme berücksichtigt. Damit besteht derzeit 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 berücksich-

tigt 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, müsste 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 das gleiche Klimaziel zu erreichen.

Im nationalen Treibhausgasinventurbericht von Deutschland wird für das Jahr 2019 die Senkenleistung des Waldes mit 57 MtCO₂ 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 (Böttcher et al., 2018; Oehmichen, 2018; UBA, 2017). Danach würde die Senkenleistung der Wälder bei Fortsetzung der aktuellen Bewirtschaftungstrends im Jahr 2030 nur noch 22 MtCO₂ betragen, in den Folgejahren aber wieder ansteigen. (Böttcher et al., 2018) geben für den Zeitraum 2012-2102 eine durchschnittliche jährliche Senkenleistung von 35 MtCO₂ pro Jahr an, wenn die aktuellen Bewirtschaftungstrends fortgesetzt werden. Änderungen in der Waldbewirtschaftung wirken sich auf die Senkenleistung der Wälder aus. 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 steigt die brutto Biomasse-Zuwachsrate bis 2050 um 9 % gegenüber dem Basisszenario (Fortschreibung aktueller Trends). Der renaturierte Wald wächst also schneller und bindet in der gleichen Zeit mehr atmosphärisches CO₂ als ein konventionell genutzter Wald. Das Waldvision-Szenario geht jedoch auch von einer Reduktion der Holzernte bis 2050 um 25 % aus. 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 potenziell 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 CO₂-Senke geschaffen werden, sondern es besteht auch CO₂-Minderungspotenzial durch Substitution

von CO₂-intensiven Baumaterialien wie Beton und Stahl (Churkina et al., 2020). Die Unsicherheiten in der bestehenden Literatur sind bezüglich dieses Zielkonflikts zwischen der Renaturierung mit einhergehender Extensivierung der Holznutzung oder einer Intensivierung der Holzproduktion und anschließender Verwendung in langlebigen Holzprodukten noch besonders groß, weswegen hier keine weiteren Potenzialabschätzungen gemacht werden können. Zur ganzheitlichen Bewertung müssen zusätzlich auch andere Gesichtspunkte neben der reinen Klimawirksamkeit herangezogen werden.

Beschleunigte Verwitterung

Die Verwitterung ist der natürliche Prozess der Gesteinszersetzung durch chemische Vorgänge, bei dem atmosphärisches CO₂ 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 CO₂ in Kontakt treten kann. Durch Mahlen des Gesteins würde die Kontaktfläche deutlich erhöht und der Verwitterungsprozess signifikant beschleunigt. Um mit ausreichend Wasser und atmosphärischem CO₂ 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 CO₂-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 Potenzial

Eine Tonne Basaltgestein bindet bei vollständiger Verwitterung etwa 0,3 tCO₂. Bei einer Korngröße von 20 µm hätte Basaltgestein in gemäßigttem Klima eine Halbwertszeit von 12 Jahren (Strefler et al., 2018). Bei einer maximalen Basaltgesteinsmenge von 15 kg/m² (Strefler et al., 2018) könnten 150 Tonnen Basalt auf einem Hektar Land nach 12 Jahren rund 25 Tonnen atmosphärisches CO₂ binden. Da Basaltgestein in ausreichenden Mengen zu Verfügung steht, werden die verfügbaren Ackerflächen zum limitierenden Faktor.

Würden 30 % (3,5 Mha) der gesamtdeutschen Ackerfläche von 11,7 Mha mit der maximalen Basaltgesteinsmenge bedeckt, könnten 9 MtCO₂ pro Jahr abgeschieden werden. Um die genannte, jährliche Abscheidungsrate aufrecht zu erhalten, müssten die bereits verwitterten Anteile regelmäßig durch neues Gestein aufgefrischt werden.

Einordnung

Bisher beschränkt sich die Anwendung auf kleinskalige Verwendung im Düngebereich. Die Kosten wurden in Fuss et al. (2018) mit 50-200 \$/tCO₂ [gesamte Spannweite aus der Literatur 15-3460 \$/tCO₂] angegeben. Der Kohlenstoff ist permanent gebunden und das Monitoring verhältnismäßig leicht. Die Flächenintensität beträgt 0,4 ha/tCO₂ für die jährliche CO₂ Abscheidung, steht aber nicht in Konkurrenz zu anderen Technologien und anderen landwirtschaftlichen Aktivitäten.

Insbesondere auf degradierten Böden kann das Aufbringen von Basaltgestein positive Auswirkungen auf die Ernteerträge, die Pflanzennährstoffversorgung, die Bodenfruchtbarkeit, die Feuchtigkeitsversorgung und die Erhöhung des pH-Werts haben sowie zur erhöhten Kationenaustauschkapazität beitragen. Wie groß die positiven Nebeneffekte auf die hoch gemanagten deutschen Böden sind, ist derzeit noch unklar. Zu den negativen Nebeneffekten zählen Risiken für die menschliche Gesundheit durch feinkörniges Material, ökologische Auswirkungen des Mineralienabbaus und -transports, eine mögliche Freisetzung von Schwermetallen und Veränderungen der hydraulischen Bodeneigenschaften. Zu den politischen Herausforderungen gehören der gesellschaftliche Widerstand gegen einen Mineralienabbau im großen Stil. Neuere Literatur weist auf Potenziale durch Wiederverwertung alkalischer Abfallprodukte aus der Industrie hin, die den großflächigen Abbau unnötig machen würde (Beerling et al., 2020). Es besteht Forschungsbedarf, um die zukünftige Relevanz von Verfahren zur beschleunigten Verwitterung besser einordnen zu können.

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 eine netto CO₂ Senke. Pflanzenkohle kann zur langfristigen Lagerung direkt 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 Potenzial 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, zum Beispiel von Lachgas und Methan. Pflanzenkohle kann vor

ihrer dauerhaften Lagerung auf dem Feld im landwirtschaftlichen Materialkreislauf verwendet werden, beispielsweise als Futtermittelzusatz oder Einstreu in Ställen. Auch eine materielle Verwendung außerhalb der Landwirtschaft als Beimischungen in Baumaterialien wird diskutiert.

Technisches Potenzial

Laut Schmidt et al. 2019 kann durch Pyrolyse 30-43 % des Kohlenstoffgehalts der Biomasse in Form stabiler Pflanzenkohle abgeschieden werden. Perspektivisch könnte auch das im Prozess anfallende Öl einer langfristigen Speicherung zugeführt werden, wodurch sich die Abscheidungsrate auf bis zu 74 % erhöhen würde. Würden 0,2 EJ Biomasse für die Produktion stabiler Pflanzenkohle verwendet, könnten 10 MtCO₂, bei zusätzlicher, langfristiger Speicherung des Öls sogar 15 MtCO₂ abgeschieden werden. 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 Pflanzenkohle-Produktion (mit Fokus auf die CO₂-Abscheidung) nur gering ausfällt, ergibt sich eine hohe Nutzungskonkurrenz, insbesondere wenn zur Herstellung Biomasse dediziert angebaut werden muss. Aus energetischer Sicht ist eine Verwendung insbesondere von Anbaubiomasse zur Pflanzenkohleproduktion ökonomisch eher unattraktiv gegenüber anderen energetischen Nutzungsarten (wie zum Beispiel BECCS). Die Kohlenstoffabscheidung durch Pflanzenkohle ist allerdings nicht an das Vorhandensein einer CO₂-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 Biomassepotenzials 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 Einstreu in Ställen).

Einordnung

Derzeitige Pyrolyse-Anlagen rentieren sich über den energetischen Nutzen des Pyrolyse-Gases und des Pyrolyse Öls und haben ihre Prozessparameter nicht auf die maximale Produktion von stabiler Pflanzenkohle ausgerichtet. Im Prinzip handelt es sich aber um eine marktreife Technologie, die schon heute zur Verfügung steht. Die Kosten wurden in Fuss et al. (2018) mit 30-120 \$/CO₂ [gesamte Spannweite aus der Literatur 10-345 \$/tCO₂] angegeben. Die Langzeitstabilität der Pflanzenkohle hängt von den gewählten Prozessparametern ab. Bei günstig gewählten

Parametern liegt die Permanenz bei mehreren Jahrhunderten. Bestimmte Bewirtschaftungsformen, wie beispielsweise das Verbrennen der Residuen auf den Äckern, und extreme Umweltbedingungen wie besonders häufige Wechsel von Frieren und Tauen können die Zersetzung von Pflanzenkohle dennoch signifikant beschleunigen. Da es möglich ist, die Qualität der Pflanzenkohle auch hinsichtlich ihrer Stabilität zu zertifizieren, ist das Monitoring einfach. Schon heute gibt es Zertifizierungsmöglichkeiten über das *European Biochar Certificate* (EBC). Zu den positiven Nebeneffekten zählen zusätzliches Minderungspotenzial durch Substitutionseffekte sowohl des Feedstocks als auch der Nebenprodukte. Zudem ist keine geologische Speicherung nötig, die mit Akzeptanzproblemen und Infrastrukturanforderungen verbunden ist. Weitere positive Nebeneffekte sind die potenzielle Reduktion der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen und eine Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit insbesondere in tropischen Regionen. Pflanzenkohle steht in Konkurrenz mit BECCS um nachhaltige Biomasse und weist einen wesentlich kleineren energetischen Nutzen auf als die BECCS-Technologien.

Bodenkohlenstoffanreicherung

Der Bodenkohlenstoffgehalt ergibt sich aus dem Fließgleichgewicht aus Kohlenstoffeintrag und Kohlenstoffaustritt (überwiegend als gasförmiges CO₂). Derzeit befinden sich die deutschen Ackerflächen nicht im Gleichgewicht, denn es geht im Jahresmittel mehr Kohlenstoff aus dem Boden in Form von CO₂ verloren, als wieder eingetragen wird und der Bodenkohlenstoffgehalt nimmt stetig ab. Wird der Kohlenstoffeintrag durch Veränderungen der landwirtschaftlichen Praktiken erhöht, kann das Gleichgewicht zwischen Eintrag und Austritt wiederhergestellt werden. Dies würde dem Verlust von weiterem Bodenkohlenstoff entgegenwirken. 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 verloren geht und der Boden erneut zur CO₂-Quelle wird. Zu möglichen Praktiken zur Anhebung des Bodenkohlenstoffgehalts zählen unter anderem die Optimierung der Fruchtfolgen, zum Beispiel durch die Integration von Zwischenfrüchten, oder der 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 im Boden aber auch oberirdisch signifikante Mengen CO₂ beim Wachsen.

Technisches Potenzial

Das Sequestrierungspotenzial hängt vom regionalen Mikroklima, der jeweiligen Praxis sowie den Bodenbeschaffenheiten vor Ort ab und die Literaturwerte für den europäischen Raum unterliegen größeren Schwankungen. Wiesmeier et al. (2020) geben für verbesserte Fruchtfolgen und Dauerkulturen auf Ackerflächen ein jährliches Sequestrierungspotenzial von 0,55 - 1,32 tCO₂/ha an. Für Agroforstsysteme auf Ackerflächen geben Wiesmeier et al. (2020) eine potenzielle Speicherung von Kohlenstoff im Boden von bis zu 2,5 tCO₂/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 CO₂-Speicherung im Boden CO₂ auch in der oberirdisch wachsenden 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 tCO₂/ha angegeben. Diese Werte sind abhängig von der gewählten Baumdichte und den klimatischen Bedingungen. Das Abscheidungspotenzial ist im Vergleich zu den Sequestrierungsraten der (Wieder-)Aufforstung hoch. Das ist zum einen damit zu begründen, dass die Rate für (Wieder-)Aufforstung ein Mittelwert aller aufforstbaren Flächen ist und damit auch degradierte Flächen mit geringer Produktivität umfasst. Zum anderen wachsen Bäume in Agroforstsystemen bis zu dreimal so schnell, wie gleichaltrige Bäume in entsprechenden Wäldern (Aertsens et al., 2013).

Sättigungseffekte treten bei der Bodenkohlenstoffanreicherung im Vergleich zu anderen CO₂-Entnahmemöglichkeiten besonders schnell ein. Wiesmeier et al. (2020) geben einen Zeitraum von 25 Jahren an. Für die erste Abschätzung des Potenzials wird der Einfachheit halber angenommen, dass die oben angegebene CO₂-Entnahmerate linear mit der Zeit abnimmt und nach 25 Jahren auf Null fällt. Desweiteren 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, könnten im 25. Jahr 3-6 MtCO₂ pro Jahr im Boden abgeschieden werden. Durch die Umwandlung von 1,2 Mha Ackerfläche oder Grünland in Agroforstsysteme innerhalb eines Zeitraums von 25 Jahren könnten durch Zunahme der oberirdischen Biomasse 1,5-12,5 MtCO₂ pro Jahr abgeschieden werden. Für den Fall, dass Ackerland umgewandelt wird, könnten zusätzlich dazu weitere 1,5 MtCO₂ pro Jahr

durch die Erhöhung des Bodenkohlenstoffes gespeichert werden. Bei einer Umwandlung von Grünland in Agroforstsysteme kommt es zu keiner nennenswerten Anhebung des Bodenkohlenstoffgehalts.

Einordnung

Die einzelnen Praktiken sind auch heute schon ausgereift und können im großen Maßstab umgesetzt werden. Die Kosten wurden in Fuss et al. (2018) mit 0-100 \$/tCO₂ [gesamte Spannweite aus der Literatur -45 - 100 \$/tCO₂] angegeben. Der negative Literaturwert gibt an, dass manche Praktiken jetzt schon lukrativ sind. Der Kohlenstoff ist im Boden reversibel gebunden, unterliegt Sättigungseffekten und geht wieder verloren, sollten die entsprechenden Praktiken eingestellt werden. Das Monitoring ist sehr kosten- und zeitaufwendig. Die Landintensität beträgt bei Agroforstsysteme 0,4 ha/tCO₂ und bei verbesserten Fruchtfolgen und Dauerkulturen 0,75 - 1,8 ha/tCO₂, aber ohne Flächenkonkurrenz zu anderen landwirtschaftlichen Praktiken oder CO₂-Entnahme Maßnahmen. 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 (zum Beispiel höhere Wasserhaltefähigkeit) erwartet werden. Zusätzlich werden in der Literatur eine verbesserte Resilienz des Bodens sowie positive Auswirkungen auf Boden-, Wasser- und Luftqualität als mögliche positive Nebeneffekte aufgeführt. Zu den negativen Nebeneffekten gehört ein möglicher Anstieg der N₂O-Emissionen und eine potenziell notwendige Zugabe von Stickstoff und Phosphor zur Aufrechterhaltung der Stöchiometrie der organischen Bodensubstanz. Zu den politischen Herausforderungen gehört, dass die Anreizsysteme aufgrund vieler dezentraler Akteure schwierig umzusetzen sind. Zusätzliche Schwierigkeiten entstehen bei der Überwachung, Berichterstattung und Verifikation der Kohlenstoffsenken (Smith et al., 2020).

Wiedervernässung von Mooren

Moore binden im Torfkörper große Mengen organischen Kohlenstoffs. Durch Trockenlegung der Moore dringt Sauerstoff in den Torfkörper ein und es kommt zu organischen Zersetzungen, die hohe Emissionen zur Folge haben, vorwiegend CO₂. In Deutschland sind 95 % aller Moorböden trockengelegt, was zu jährlichen Emissionen von 53 MtCO₂äq/Jahr (UBA, 2021a) auf einer Fläche von rund 1,8 Mha führt. Durch Wiedervernässungsmaßnahmen können der Zersetzungsprozess und die damit verbundenen Emissionen gestoppt werden. Das technische Minderungspotenzial

durch eine Wiedervernässung der Moorböden wird auf bis zu 35 MtCO₂q/Jahr geschätzt (Naturkapital Deutschland – TEEB DE, 2015). Obwohl es sich hier um eine wichtige Vermeidungsoption handelt, wird die Wiedervernässung häufig im Kontext von CO₂-Entnahmen angebracht. Nach dem aktuell geltenden Accounting der EU-Regulierung 2018/841 des LULUCF-Sektors werden Emissionen auf bewirtschafteten Ackerflächen, bewirtschafteten Grünflächen und bewirtschafteten Feuchtgebieten mit der Differenz der entsprechenden Emissionen zum Basisjahr 2005 angerechnet. Eine Wiedervernässung von Mooren führt nach diesem Accounting zu negativen Emissionen, obwohl kein CO₂ aus der Atmosphäre entnommen, sondern vor allem der Austritt von CO₂ verhindert wird.

Im „Fit for 55-Paket“ der EU-Kommission wird vorgeschlagen, das EU-LULUCF Accounting wieder abzuschaffen und direkt die Netto-Emissionen zur Zielerreichung heranzuziehen. Damit würden die Emissionen von trockengelegten Moorböden als anthropogene CO₂-Quellen angerechnet und eine Wiedervernässung würde auch im Accounting eine Vermeidungsoption darstellen.

Langlebige Materialien

Werden Materialien wie Holz oder Kunststoffe, die aus biogenen Rohstoffen oder atmosphärischem CO₂ gewonnen wurden, für die Herstellung langlebiger Produkte verwendet, so können diese Produkte zu temporären CO₂-Senken werden. Die Effektivität der Senkenleistung hängt dabei maßgeblich von der Lebensdauer der Produkte und deren Verbleib nach Ablauf der Nutzungsdauer ab. Plastik für Verpackungen wird kaum länger als ein Jahr verwendet, wohingegen Plastik in der Bauindustrie eine mittlere Lebensdauer von 35 Jahren aufweist (Geyer et al., 2017). Dort dürfte das größte Potenzial für CO₂-Entnahmen durch langlebige, biogene Kunststoffe liegen (Oliveira et al., 2021), wobei das Entnahmepotenzial noch unsicher ist.

Auch für Holz wird in der Bauindustrie im globalen Kontext ein beachtliches Potenzial gesehen (Churkina et al., 2020). Das lässt sich aber nicht unmittelbar auf den nationalen Kontext übertragen. Eine andere Studie zeigt ein höheres CO₂-Entnahmepotenzial, wenn die Biomasse im Wald belassen wird und den dortigen Kohlenstoffspeicher aufbaut und ein geringeres Potenzial, wenn die Biomasse geerntet und zur gezielten Substitution fossiler (Bau-)Materialien verwendet wird (Soimakallio et al., 2021). Für den deutschen Kontext besteht bezüglich dieses Zielkonflikts noch Forschungsbedarf. Ebenfalls fehlen Einsichten bezüglich der Nutzungskonkurrenz um Biomasse zwischen dem Material- und Energiesektor sowie der Nahrungsmittelproduktion.

Erhebliche Reduktionen der Emissionen können jedoch auch jetzt schon im Materialbereich durch Effizienzmaßnahmen wie Kaskadennutzungen, Recycling und Kreislaufwirtschaften erreicht werden.

Technologie	Annahmen zu limitierenden Faktoren (Relation zu Szenarien)				Szenario CO ₂ -Entnahme Kapazität 2030	Szenario CO ₂ -Entnahme Kapazität 2045
DACCS	Strombedarf in TWh		CCS Kapazität in MtCO ₂		DAC-Anlagen für CCU	16 MtCO ₂ /Jahr
	2030	2045	2030	2045		
	-	15 (0,7-1 % der Stromproduktion in 2045 aus den AriadneSzenarien)	-	16 (von 50)		
BECCS (Annahme hier: Biokerosin aus Fischer-Tropsch Synthese)	Biomasse in		CCS Kapazität in MtCO ₂		1 MtCO ₂ /Jahr	24 MtCO ₂ /Jahr
	2030	2045	2030	2045		
	0,02 EJ (von 1 EJ)	0,5 EJ (von 1 EJ)	1 (von 7)	24 (von 50)		
Pflanzkohle	Biomasse				5 MtCO ₂ /Jahr	10 MtCO ₂ /Jahr
	2030		2045			
	0,1 EJ		0,2 EJ			
Wieder-/Aufforstung	Flächen				1 MtCO ₂ /Jahr	2 MtCO ₂ /Jahr
	2030		2045			
	0,15 Mha		0,3 Mha (ungefähr die Fläche von München, 1 % der gesamtdeutschen Fläche)			
Bestehende Waldsenke (Eine Anrechnung der natürlichen Waldsenke müsste mit einer Reduktion des verbleibenden Emissionsbudgets einhergehen)	Trade-Off zwischen Renaturierung des Waldes und Intensivierung der Holznutzung unsicher, deshalb Trendfortschreibung als Mittelweg				22 MtCO ₂ /Jahr *UBA 2017	35 MtCO ₂ /Jahr *Illustrativ (Mittlere jährliche Senkenleistung im Basis-Szenario für den Zeitraum 2012-2102 aus Böttcher et al. 2018)

Technologie	Annahmen zu limitierenden Faktoren (Relation zu Szenarien)	Szenario CO ₂ -Entnahme Kapazität 2030	Szenario CO ₂ -Entnahme Kapazität 2045	
Beschleunigte Verwitterung	Ackerfläche (gesamt 11,7 Mha)	3 MtCO ₂ /Jahr	9 MtCO ₂ /Jahr	
	2030			2045
	10 %			30 %
Bodenkohlenstoffanreicherung durch Fruchtfolgen, Bodendecker, Dauerkulturen	Ackerfläche (gesamt 11,7 Mha)	2-4 MtCO ₂ /Jahr	3- 6 MtCO ₂ /Jahr	
	2030	2045	Vereinfachte Annahme: Lineare Abnahme des im Unterkapitel angegebenen Emissionsfaktors $EF(t=0)$ nach Beginn der neuen Praktiken der Bodenkohlenstoffanreicherung mit der Zeit t bis zur Sättigung nach 25 Jahren $EF(t)=EF(0) \cdot (25\text{Jahre} - t) / 25\text{Jahre}$ Die CO ₂ Entnahme wurde durch $CO_2\text{ Entnahme} = A_{BK} \cdot \sum_0^t EF_t$ für eine grobe Abschätzung approximiert.	
	30 %	75 %		
	Vereinfachte Annahme: Linearer Ausbau mit jährlich neu umgewandelter Fläche $A_{BK} = 0,35\text{ Mha}$ (3 % der Gesamtackerfläche)			
Agroforstsysteme	Ackerfläche (gesamt 11,7 Mha)	2 – 6 MtCO ₂ /Jahr (davon 1-5 MtCO ₂ /Jahr durch oberirdische Biomasse)	4 – 14 MtCO ₂ /Jahr (davon 1,5-12,5 MtCO ₂ /Jahr durch oberirdische Biomasse)	
	2030	2045	Annahme: Berechnung der CO ₂ Entnahme durch Bodenkohlenstoffanreicherung siehe oben; Noch keine Sättigungseffekte für CO ₂ Entnahme durch oberirdische Biomasse	
	4 %	10 %		
Summe		36 – 42 MtCO ₂ /Jahr (14 – 20 MtCO ₂ /Jahr ohne bestehende Waldsenken)	103 – 116 MtCO ₂ /Jahr (68 – 81 MtCO ₂ /Jahr ohne bestehende Waldsenken)	

Tabelle 8.1: Szenarien der Abscheidungspotenziale verschiedener Optionen für Deutschland unter der Annahme stringenter Klimapolitik und entsprechender Vergütung aller Optionen.

8.4 Instrumente und Maßnahmen für die Zielerreichung

Deutschland plant zur Erreichung der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 etwa 40 MtCO₂/Jahr Restemissionen durch die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre über Landsenken auszugleichen. Dies setzt eine Vermeidung der übrigen Emissionen voraus, was auf starken Annahmen beruht wie der Vermeidung aller energiebedingten CO₂-Emissionen, der Vermeidung von Prozessmissionen aus der Industrie durch CCS, der Reduktion der Tierbestände. Ob diese ambitionierten Annahmen tatsächlich eintreffen, kann derzeit nicht vorhergesagt werden. Treffen die Annahmen nicht ein, muss mit einem höheren Bedarf an CO₂-Entnahme gerechnet werden. Ob die am Ende tatsächlich benötigte Menge an CO₂-Entnahme alleine durch Landsenken erreicht werden kann, ist höchst unsicher. Prognosen gehen von einem deutlichen Nachlassen der aktuellen Waldsenken in den kommenden Jahrzehnten aufgrund der Altersstruktur der deutschen Wälder aus. Um bis 2045 eine ausreichende Menge von CO₂-Entnahme zur Verfügung zu haben, müssen

daher die entscheidenden Weichen jetzt gestellt und alternative Verfahren zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre entwickelt werden.

Handlungsbedarf besteht auf mindestens drei Feldern. Es müssen Anreize für die Entwicklung und den Einsatz von CO₂-Entnahme geschaffen werden, Externalitäten im Bereich Haftung, Innovation und Verteilungswirkungen müssen wirksam adressiert werden und es bedarf Deliberationsprozesse, um eine breite gesellschaftliche Trägerschaft zu unterstützen.

Um die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre anzureizen, ist eine finanzielle Vergütung erforderlich. Bezüglich der Höhe der Vergütung besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf. Eine Vergütung in Höhe des CO₂-Preises, etwa durch Integration in das EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS) ist langfristig vorstellbar, kurzfristig besteht jedoch zum einen die Gefahr einer "Wette" auf spätere günstige CO₂-Entnahme und dadurch Verzögerungen bei der Emissionsminderung, zum anderen würden die derzeitigen CO₂-Preise nicht ausreichen, um die nötige technologische Entwicklung voranzutreiben. Die Vergütung könnte alternativ durch einen vorgegebenen Subventionspfad oder durch ein separates Mengenziel für die CO₂-Entnahme erreicht werden. Eine solche Aufspaltung des netto-Null Ziels in separate Mengenziele für Emissionen und Entnahmen kann die Planungssicherheit sowohl bezüglich der Vergütung der CO₂-Entnahme als auch auf Seiten der Emissionsvermeidung erhöhen und die benötigten Innovationen anreizen. Das Entnahmeziel kann dann entweder über Ausschreibungen, die auch technologiespezifisch sein können, oder über ein eigenes ETS mit einem Preiskorridor erreicht werden. Die technologische Entwicklung kann durch Förderung von Forschung und Entwicklung, Subventionen und technologiespezifische Vergütungssätze vorangetrieben werden. Zudem muss die nötige Infrastruktur aufgebaut werden, etwa zum Transport von Biomasse, Gesteinsmehl, oder CO₂.

Bei landbasierten Optionen besteht der Entwicklungsbedarf weniger auf der technologischen Seite, sondern vielmehr hinsichtlich der politischen Rahmenbedingungen. Es bedarf neben einer entsprechenden Vergütung insbesondere der Sicherstellung der Permanenz bzw. einer Klärung der Haftungsfragen bei erneuter Freisetzung des CO₂ und der Überwachung und Verifikation der tatsächlich erfolgten CO₂-Entnahme. Um Emissionen durch indirekte Landnutzungsänderungen zu vermeiden, sollten möglichst umfassend Emissionen im Landsektor erfasst, bepreist oder reguliert werden. Dazu muss die Förderung und Regulierung im Agrar-, Forst- und Landsektor angepasst werden. Es bedarf zusätzlicher Instrumente, um positive Umweltwirkungen (wie z. B. Erhöhung der Biodiversität) zusätzlich zu honorieren und negative Umweltwirkungen (wie z. B. Stickstoffüberschüsse bei Energiepflanzenanbau für BECCS) zu adressieren. Auch Verteilungswirkungen, die z. B. durch einen hohen Energiebedarf und dadurch steigende Energiepreise oder

durch hohe Landrenten aufgrund erhöhter Landnachfrage durch BECCS und Aufforstung entstehen, müssen mitgedacht werden. Auch hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, wie diese Instrumente genau ausgestaltet werden sollten.

Die CO₂-Entnahme greift in viele Sektoren ein (Land-, Forstsektor, Energiewirtschaft), und benötigt daher breite gesellschaftliche und wirtschaftliche Trägerschaft. Diese muss in sehr kurzer Zeit aufgebaut werden. Es bedarf daher eines breit angelegten Deliberationsprozesses um zu entscheiden, mit welchen Optionen der Bedarf gedeckt werden soll und welche Instrumente nötig sind. Ein solcher Prozess könnte z. B. über eine CO₂-Entnahme-Kommission erfolgen, die verschiedene gesellschaftliche und wirtschaftliche Gruppen an einen Tisch bringt.

- Geyer R, Jambeck JR, Law KL, 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7):e1700782 DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
- GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam, 2021. Pilotstandort Ketzin: Überblick. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.co2ketzin.de/standort-ketzin/ueberblick>.
- Global CCS Institute, 2021. Facilities Database. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://co2re.co/FacilityData>.
- Grassi G, Stehfest E, Rogelj J, van Vuuren D, Cescatti A, House J, Nabuurs G-J, Rossi S, Alkama R, Viñas RA, et al., 2021. Critical adjustment of land mitigation pathways for assessing countries' climate progress. *Nat Clim Chang*, 11(5):425–434 DOI: 10.1038/s41558-021-01033-6.
- Hanssen SV, Daioglou V, Steinmann ZJN, Doelman JC, Van Vuuren DP, Huijbregts MAJ, 2020. The climate change mitigation potential of bioenergy with carbon capture and storage. *Nature Climate Change*, 10(11):1023–1029 DOI: 10.1038/s41558-020-0885-y.
- IRENA, 2021. Renewable Capacity Statistics 2021. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf.
- Liu G, Larson ED, Williams RH, Kreutz TG, Guo X, 2011. Making Fischer–Tropsch Fuels and Electricity from Coal and Biomass: Performance and Cost Analysis. *Energy Fuels*, 25(1):415–437 DOI: 10.1021/ef101184e.
- Naturkapital Deutschland – TEEB DE, 2015. Kapitel 5: Klimaschutz durch Wiedervernässung von kohlenstoffreichen Böden. In: *Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte*. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://literatur.thuenen.de/digbib_1N51DE/dn055209.pdf.
- Oehmichen K, 2018. Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung. *Szenarienentwicklung, Ergebnisse und Analyse*. Thünen Report 59. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059875.pdf.
- Oehmichen K, Klatt S, Gerber K, 2018. Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung - Szenarienentwicklung, Ergebnisse und Analyse. Johann Heinrich von Thünen-Institut, DE [Aufruf am: 19.07.2021] URL: <https://doi.org/10.3220/REP1527686002000>.
- Oliveira CCN de, Zotin MZ, Rochedo PRR, Szklo A, 2021. Achieving negative emissions in plastics life cycles through the conversion of biomass feedstock. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(2):430–453 DOI: 10.1002/bbb.2165.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, Wunsch M, Ziegenhagen I, 2021. Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. DOI: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf.
- 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 DOI: 10.1111/gcbb.12553.
- Smith P, Soussana J-F, Angers D, Schipper L, Chenu C, Rasse DP, Batjes NH, Egmond F van, McNeill S, Kuhnert M, et al., 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 DOI: 10.1111/gcb.14815.
- Soimakallio S, Kalliokoski T, Lehtonen A, Salminen O, 2021. On the trade-offs and synergies between forest carbon sequestration and substitution. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 26(1):4 DOI: 10.1007/s11027-021-09942-9.
- Statistisches Bundesamt (Destatis), 2021. Holzeinschlag erreicht 2020 aufgrund von Waldschäden neuen Rekordwert. Statistisches Bundesamt [Aufruf am: 06.08.2021] URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/04/PD21_192_413.html.

- Strefler J, Amann T, Bauer N, Kriegler E, Hartmann J, 2018. Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, 13(3):034010 DOI: 10.1088/1748-9326/aaa9c4.
- Tavakoli-Hashjini E, Piorr A, Müller K, Vicente-Vicente JL, 2020. Potential Bioenergy Production from *Miscanthus x giganteus* in Brandenburg: Producing Bioenergy and Fostering Other Ecosystem Services while Ensuring Food Self-Sufficiency in the Berlin-Brandenburg Region. *Sustainability*, 12(18):7731 DOI: 10.3390/su12187731.
- Thrän D, Lauer M, Dotzauer M, Oehmichen K, Majer S, Millinger M, Jordan M, 2019. Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/technoekonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- UBA, 2021a. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2019. Climate Change 23/2020. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_23-2020_nir_2020_en_0.pdf.
- UBA, 2017. Projektionsbericht 2017 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envwqc4_g/170426_PB_2017_-_final.pdf.
- UBA, 2019. Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - Rescue Studie. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf.
- Wiesmeier M, Mayer S, Paul C, Helming K, Don A, Franko U, Franko M, Kögel-Knabner I, 2020. CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. *BonaRes Series* DOI: 10.20387/BONARES-F8T8-XZ4H.
- Wilson C, Grubler A, Bento N, Healey S, Stercke SD, Zimm C, 2020. Granular technologies to accelerate decarbonization. *Science*, 368(6486):36–39 DOI: 10.1126/science.aaz8060.



Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:

 @AriadneProjekt

 ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf kopernikus-projekte.de

Wer ist Ariadne? Durch den Faden der Ariadne gelang Theseus in der griechischen Mythologie die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne. Im Konsortium von mehr als 25 Forschungseinrichtungen führt Ariadne durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, erforscht Optionen zur Gestaltung der Energiewende und erarbeitet wichtiges Orientierungswissen für politische Entscheider. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg (BTU) | Deutsche Energie-Agentur (dena) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Guidehouse Germany | Helmholtz-Zentrum Hereon | Hertie School | Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) | ifok | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität | Institute For Advanced Sustainability Studies (IASS) | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung 2° – Deutsche Unternehmer für Klimaschutz | Stiftung Umweltenergierecht | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Münster | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung