

*Ariadne-Analyse*

# Energiewende auf Netto-Null: Passen Angebot und Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen?

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**KOPERNIKUS**  
Ariadne **PROJEKTE**

Die Zukunft unserer Energie

## Autorinnen und Autoren



» Anne Merfort  
Potsdam-Institut für Klimafolgen-  
forschung



» Dr. Miodrag Stevanović  
Potsdam-Institut für Klimafolgen-  
forschung



» Dr. Jessica Strefler  
Potsdam-Institut für Klimafolgen-  
forschung

### Herausgegeben von

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

Januar 2023

Dieses Papier zitieren:

Anne Merfort, Miodrag Stevanović, Jessica Strefler (2023): Energiewende auf Netto-Null: Passen Angebot und Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen? Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.

Kontakt zu den Autorinnen und Autoren: Jessica Strefler, [strefler@pik-potsdam.de](mailto:strefler@pik-potsdam.de)

Die vorliegende Ariadne-Analyse wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Die Analyse 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.

# Inhalt

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Nach Energiewende verbleibende Restemissionen bestimmen den Bedarf an CO<sub>2</sub>-Entnahme in Deutschland in 2045.....</b>	<b>6</b>
Nachfrage nach tierischen Produkten .....	6
Geologische Speicherung von Kohlenstoff zur Reduktion industrieller Prozessemissionen .....	7
Wiedervernässung der Moore .....	8
Szenarienbeschreibung.....	10
<b>3. Angebot an CO<sub>2</sub>-Entnahme in Deutschland bis 2045.....</b>	<b>12</b>
Limitierende Faktoren .....	15
<i>Verfügbare Kapazität der geologischen Speicherung für BECCS und DACCS .....</i>	<i>15</i>
<i>Biomasse für BECCS und Pflanzenkohle .....</i>	<i>15</i>
<i>Flächenbedarfe .....</i>	<i>17</i>
Szenarienbeschreibung.....	18
<b>4. Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>24</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>27</b>
<b>Literaturangaben .....</b>	<b>30</b>

## Zusammenfassung

Bei der Energiewende auf dem Weg zur Emissionsneutralität gilt es vor allem, CO<sub>2</sub>-Emissionen so weit wie möglich zu vermeiden – durch eine zügige Umstellung auf Erneuerbare Energien, innovative klimaneutrale Produktionsverfahren etc. Für eine Netto-Null in der Emissionsbilanz reicht das allein jedoch nicht aus, denn in manchen Bereichen lassen sich Emissionen nicht oder nur sehr schwer vermeiden, zum Beispiel bei bestimmten Industrieprozessen oder in der Landwirtschaft. In dieser Analyse werden in Erweiterung des Ariadne-Szenarienreports (Luderer et al., 2021) die vielschichtigen Wechselbeziehungen zwischen Vermeidungsoptionen und CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzialen beleuchtet und Handlungsspielräume abgesteckt. Diese Analyse gibt Orientierungspunkte, unter welchen Bedingungen lokal in Deutschland Treibhausgasneutralität erreicht werden könnte. Es zeigt sich, dass nur die Ausnutzung aller verfügbaren Optionen, sowohl bei der Vermeidung von Restemissionen als auch bei der Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, Spielräume eröffnet, die gegen das hohe Risiko, dass nicht alle ambitionierten Annahmen in den Szenarien auch eintreffen werden, absichert.

Durch die vollständige Vermeidung aller energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen (Luderer et al., 2021) sowie der Emissionen aus der Abfallwirtschaft bis 2045 können die aktuellen Emissionen von 717 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr (Umweltbundesamt, 2022) auf 127 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr reduziert werden (Szenario „keine Zusatzoptionen“). Durch die zusätzlichen Einzelmaßnahmen Ernährungsumstellung und damit einhergehend eine Reduktion der Tierbestände, die Abscheidung von Kohlenstoff mit anschließender geologischer Speicherung (CCS) oder die Wiedervernässung von Mooren können diese Restemissionen auf je 107, 117 und 92 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr gesenkt werden. Werden alle Minderungsmaßnahmen kombiniert, könnten die Restemissionen im Szenario „alle Optionen“ sogar auf 62 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr reduziert werden.

Diese Maßnahmen haben aber auch einen entscheidenden Einfluss auf limitierende Faktoren von CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzialen, insbesondere CCS und die Verfügbarkeit von Land und Biomasse. Unter Berücksichtigung dieser limitierenden Faktoren vergleichen wir die Restemissionen mit den entsprechenden CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzialen, einmal unter der Prämisse, dass

die Fläche für Anbaubiomasse, wenn möglich, auf dem heutigen Stand bleibt (Priorität Anbaubiomasse) und einmal unter der Prämisse, dass die Fläche deutlich reduziert wird und potenziell freiwerdende Flächen für den Naturschutz genutzt werden (Priorität Naturschutz). Dabei werden folgende Entnahmeoptionen berücksichtigt: Direct Air Capture mit CCS (DACCS), Bioenergie mit CCS (BECCS), Pflanzenkohle, (Wieder-)Aufforstung, beschleunigte Verwitterung, die bestehende Waldsenke, Agroforstsysteme und andere Maßnahmen zur Bodenkohlenstoffanreicherung.

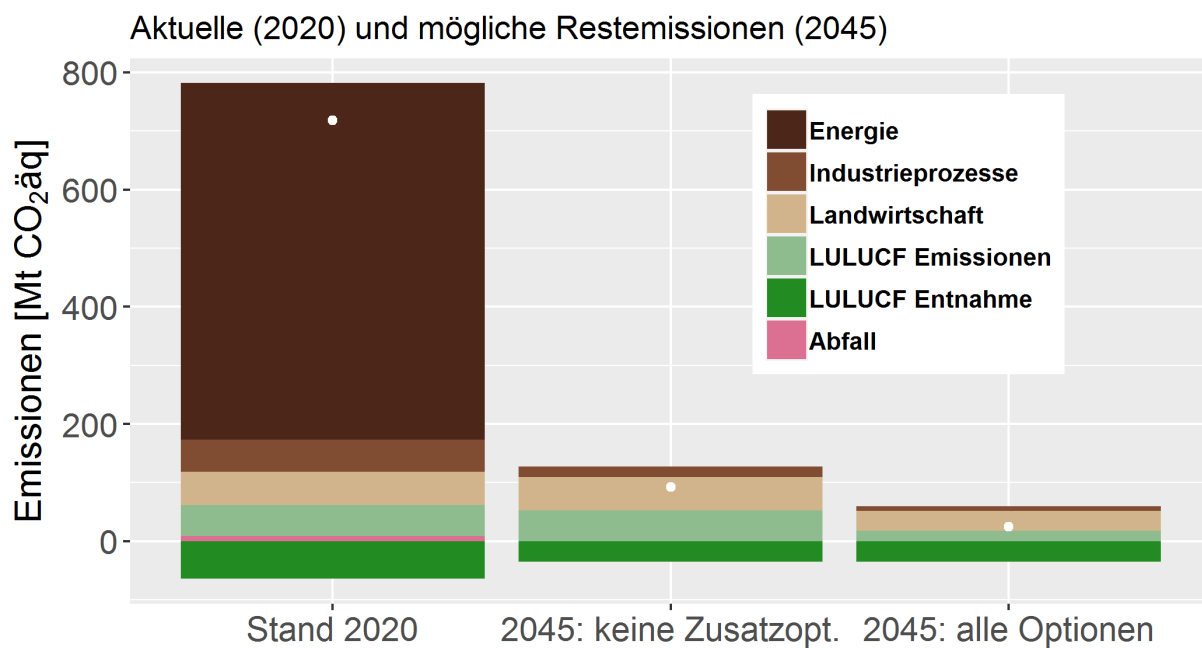


Abbildung 1: Emissionen Deutschlands Stand 2020 und für zwei Szenarien in 2045. Weiße Punkte markieren die Nettoemissionen. Durch vollständige Vermeidung aller energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Emissionen aus der Abfallwirtschaft verbleiben noch Brutto-Restemissionen von 127 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr (Szenario „keine Zusatzoptionen“). Im Szenario „alle Optionen“ können durch eine Ernährungsumstellung, durch CCS und die Wiedervernässung von Mooren die Brutto-Restemissionen auf 62 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr reduziert werden. Quelle: Eigene Darstellung

Für den Fall „keine Zusatzoptionen“ übersteigen die Restemissionen mit 13-45 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr (Priorität Anbaubiomasse) bzw. 31-64 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr (Priorität Naturschutz) das Entnahme-Angebot deutlich. Auch die Einzelmaßnahme *Wiedervernässung der Moore* ist für sich genommen nicht genug, um national Treibhausgasneutralität in 2045 zu erreichen. Ob eine *Ernährungsumstellung* unter Priorisierung von Anbaubiomasse Treibhausgasneutralität erreichen

kann, hängt von den bestehenden Unsicherheiten im Entnahme-Angebot ab. Gleiches gilt für die Verfügbarkeit von CCS unter Priorisierung von Naturschutz; unter Priorisierung von Anbaubiomasse kann auch bei niedrigerem Entnahme-Angebot lokal Treibhausgasneutralität erreicht werden. Im Szenario „*alle Optionen*“ können sowohl die Restemissionen am stärksten reduziert, als auch das größte Entnahmepotenzial realisiert werden. Hier liegt sowohl unter Priorität Anbaubiomasse mit -64 bis -97 MtCO<sub>2</sub>äq als auch unter Priorität Naturschutz mit -46 bis -79 MtCO<sub>2</sub>äq ein deutlicher Überschuss im Entnahme-Angebot vor. Demnach liefert nur das Szenario „*alle Optionen*“ einen gewissen Spielraum, um gegen die Risiken höherer Restemissionen und kleinerer Entnahmepotenziale abzusichern, z.B. falls die zugrundeliegenden optimistischen Annahmen nicht eintreffen. Um lokal in Deutschland Treibhausgasneutralität erreichen zu können, bedarf es daher nicht nur der vollständigen Vermeidung aller energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen und Emissionen aus der Abfallwirtschaft, sondern auch einer Kombination zusätzlicher Maßnahmen, um in allen Vermeidungs- und Entnahmeoptionen so viel Potenzial wie möglich zu realisieren.

# 1. Einleitung

Das deutsche Klimaziel strebt Treibhausgasneutralität in 2045 und netto-negative Emissionen danach an, also CO<sub>2</sub>-Entnahmen, die über die Kompensation von Restemissionen hinausgehen. Der Ariadne-Report „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045“ (Luderer et al., 2021), hat bereits dargestellt, wie eine Energiewende gelingen kann, die alle energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen vollständig vermeidet. In dieser Studie wird nun untersucht, wie weit die nicht energiebedingten Emissionen durch ausgewählte zusätzliche Maßnahmen gesenkt werden könnten, und welcher Anteil der Emissionen mit welchen Entnahmoptionen ausgeglichen werden kann. Grundlage dieser Analyse sind die Ergebnisse des Ariadne-Reports, aus dem wesentliche Annahmen zu Emissionsfaktoren und Potenzialen der CO<sub>2</sub>-Entnahme-Optionen übernommen werden.

In 2020 wurden in Deutschland inklusive des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung, und Forstwirtschaft (landuse, landuse-change and forestry (LULUCF)) ca. 717 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr emittiert. Davon waren ca. 608 MtCO<sub>2</sub>/Jahr energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, 55 MtCO<sub>2</sub>/Jahr aus Industrieprozessen und 56 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr aus der Landwirtschaft (Umweltbundesamt, 2022). Der Sektor LULUCF trug sowohl Bruttoemissionen in Höhe von 53 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr bei (hauptsächlich aus trockengelegten Moorböden), lieferte aber als einziger Sektor bereits einen Beitrag von -64 MtCO<sub>2</sub>/Jahr zur CO<sub>2</sub>-Entnahme durch die bestehende Waldsenke (-55 MtCO<sub>2</sub>/Jahr) und den Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten (-9 MtCO<sub>2</sub>/Jahr) (siehe Abbildung 1; Stand 2020).

Das novellierte deutsche Klimaschutzgesetz sieht eine Senkung der Bruttoemissionen um 97% gegenüber 1990 vor und deutet einen Ausgleich der verbleibenden 3% durch den Sektor LULUCF (Bundesregierung, 2021) an, was etwas unter 40 MtCO<sub>2</sub>/Jahr entsprechen würde. Beide Ziele, die Emissionsreduktion und die Stärkung des Beitrags des LULUCF-Sektors, sind ambitioniert.

Die zukünftige Entwicklung der Senkleistung des bestehenden Waldes unterliegt dabei großen Unsicherheiten, die insbesondere aus der Methodik zur Datenerfassung der aktuellen Waldsenke, aber auch aus den Annahmen zur zukünftigen Holzernte und zu zukünftigen

Waldschäden entstammen. Um das Sektorziel sicher erreichen zu können, sollten schnellstmöglich auch weitere CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden, die in diesen Sektor fallen, umgesetzt werden. Das betrifft insbesondere die Etablierung von Maßnahmen zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts sowie Agroforstsysteme.

Diese Studie analysiert die Wechselbeziehungen zwischen Restemissionen und CO<sub>2</sub>-Entnahme und die zugrunde liegenden politischen sowie gesellschaftlichen Entscheidungen und arbeitet Synergien sowie Zielkonflikte heraus. Hier wird basierend auf dem Ariadne-Report in allen Szenarien die Annahme zugrunde gelegt, dass sowohl energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch Emissionen aus der Abfallwirtschaft bis 2045 vollständig vermieden werden können. Es verbleiben dann noch Emissionen aus Industrieprozessen, der Landwirtschaft und aus trockengelegten Moorböden im LULUCF Sektor. Die Vermeidungsoptionen, die in diesen drei Bereichen zur Verfügung stehen, hängen nicht nur von politischen und gesellschaftlichen Entscheidungen ab, sondern beeinflussen auch die verfügbaren CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen. So kann zum Beispiel CCS sowohl anderweitig unvermeidbare Restemissionen reduzieren, als auch zusätzliche CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden wie Bioenergie mit CCS (BECCS) und direkte CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Luft (direct air carbon capture and storage (DACCS)) ermöglichen. Eine Reduktion des Konsums von Tierprodukten reduziert nicht nur Emissionen in der Landwirtschaft, sondern auch den Tierbestand und damit den Bedarf an landwirtschaftlichen Flächen, die dann u.a. für CO<sub>2</sub>-Entnahme genutzt werden können. Daher sollen im Folgenden die zusätzlichen Vermeidungsoptionen durch CCS, die Reduktion des Konsums von Tierprodukten und die Wiedervernässung von Mooren untersucht werden. Im Anschluss werden in Kapitel 3 unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen Szenarien zum Angebot an CO<sub>2</sub>-Entnahmen erarbeitet und in Kapitel 4 diskutiert.



## **2. Nach Energiewende verbleibende Restemissionen bestimmen den Bedarf an CO<sub>2</sub>-Entnahme in Deutschland in 2045**

Der Bedarf an CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre ist zum Zeitpunkt der Treibhausgasneutralität durch die Höhe der Restemissionen bestimmt. Unter der Annahme, dass energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Emissionen aus der Abfallwirtschaft vollständig vermieden werden können, verbleiben drei Hauptemissionsquellen: Erstens Methan-(CH<sub>4</sub>-) und Lachgas-(N<sub>2</sub>O-)Emissionen in der Landwirtschaft, deren Höhe maßgeblich von der zukünftigen Nachfrage nach tierischen Produkten abhängt, zweitens industrielle Prozessemissionen, die durch CCS reduziert werden können, und drittens CO<sub>2</sub>-Emissionen aus trocken gelegten Moorböden, die durch Wiedervernässungsmaßnahmen reduziert werden. In diesem Kapitel werden verschiedene Szenarien mit diesen drei Vermeidungsoptionen entworfen und die daraus resultierenden Restemissionen sowie die implizierten Nebeneffekte diskutiert.

### ***Nachfrage nach tierischen Produkten***

Die Emissionen aus der Landwirtschaft können zwar durch Optimierungen reduziert, aber bei Weitem nicht vollständig vermieden werden. Den größten Anteil an diesen Emissionen haben dabei Methanemissionen aus der Tierhaltung sowie Lachgasemissionen aus der Düngung. Die Höhe der Restemissionen aus diesem Sektor ist demnach maßgeblich von der zukünftigen Entwicklung der landwirtschaftlichen Produktion und im Speziellen von der Nachfrage nach tierischen Produkten abhängig.

Mit dem globalen Flächennutzungsmodell MAgPIE (Dietrich et al., 2019) wird die zukünftige Entwicklung der landwirtschaftlichen Produktion in Deutschland einmal unter Fortschreibung aktueller Trends und einmal für die Umstellung der Ernährung in Deutschland entsprechend den Empfehlungen der EAT-Lancet Kommission (Willett et al., 2019) untersucht. Die von EAT-Lancet empfohlenen Ernährungsweisen führen zu einem gesünderen und ökologisch nachhaltigeren Lebensmittelkonsum. Im Falle Deutschlands bedeutet dies, dass

mehr pflanzliches Eiweiß, Obst, Nüsse und Gemüse anstelle von tierischen Produkten verzehrt werden. Im Trend-Szenario sinkt die Nachfrage nach tierischen Produkten lediglich um 7%, während sie im EAT-Lancet Szenario um 66% sinkt. Für die Aufschlüsselung auf die einzelnen Produktgruppen siehe Tabelle 5 im Anhang.

Im Vergleich zur aktuellen landwirtschaftlichen Produktion könnten durch die Umstellung auf eine deutschlandweite EAT-Lancet-Ernährung die Methanemissionen von aktuell 32 auf 16 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr und die Lachgas-Emissionen um rund 20% von aktuell 22 auf 18 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr gesenkt werden. Durch die damit einhergehende starke Reduktion der Tierbestände würden 2,34 Mha Ackerfläche frei werden, die vorher für den Anbau von Futtermitteln gebunden waren. Diese freiwerdenden Flächen können in den Szenarien für den Naturschutz, zum Biomasseanbau oder zur Kompensation eines steigenden Flächenbedarfs durch die Wiedervernässung von Mooren genutzt werden. Die Auswirkungen der Ernährungsumstellung auf den landwirtschaftlichen Flächenbedarf sowie die nicht-CO<sub>2</sub> Emissionen sind in Tabelle 6 im Anhang zusammengetragen.

### ***Geologische Speicherung von Kohlenstoff zur Reduktion industrieller Prozessemissionen***

Die Abscheidung von Kohlenstoff mit anschließender geologischer Speicherung (CCS) ist nicht nur für die CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien *Bioenergie mit CCS (BECCS)* und die direkte Abscheidung aus der Atmosphäre (*Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)*) notwendig. CCS ist auch die bisher einzige bekannte Option zur Vermeidung einiger der Prozessemissionen, die im Industriesektor anfallen. Wenn CCS zur Verfügung steht, könnten die Restemissionen aus Industrieprozessen von 18 MtCO<sub>2</sub>/Jahr auf 8 MtCO<sub>2</sub>/Jahr reduziert werden (Luderer et al., 2021).

Für die geologische Speicherung von Kohlenstoff gibt es in der deutschen Bevölkerung allerdings nur eine geringe gesellschaftliche Trägerschaft, unter anderem auch, da die Technologie vor allem im Zusammenhang mit dem Weiterbetrieb fossiler Kraftwerke diskutiert wurde. Eine zusätzliche Hürde besteht in den derzeitigen gesetzlichen Regelungen. Die Erforschung, Erprobung und Demonstration von Technologien zur dauerhaften Speicherung von

Kohlendioxid in unterirdischen Gesteinsschichten sind 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 MtCO<sub>2</sub>/Jahr pro Speicher und auf 4 MtCO<sub>2</sub>/Jahr insgesamt. Derzeit wird den Bundesländern das Recht eingeräumt, die Speicherung in ihren Gebieten vollständig zu verbieten, wovon einige Länder auch Gebrauch gemacht haben. Alternativ zur Speicherung in deutschen Territorien besteht jedoch auch die Möglichkeit, die CO<sub>2</sub>-Speicherung zentral in der EU zu organisieren, so dass nicht alle Mitgliedsstaaten eigene Speicher betreiben müssten. Damit CCS zum Zeitpunkt der Treibhausgasneutralität in signifikanten Mengen zur Verfügung stehen kann, müsste allerdings zeitnah mit dem Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur sowie mit dem Ausbau der Speicherkapazitäten begonnen werden (Luderer et al., 2021). Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten zur zukünftigen Verfügbarkeit von CCS soll hier deshalb illustrativ ein Szenario mit einer maximalen jährlichen Speicherkapazität von 50 MtCO<sub>2</sub> in 2045 (Luderer et al., 2021)<sup>1</sup>, und ein Szenario ohne CCS-Verfügbarkeit untersucht werden. Im Szenario mit CCS wird hier nicht darauf eingegangen, ob die Speicherkapazität innerhalb Deutschlands oder im europäischen Ausland realisiert wird. Im letzteren Szenario folgt aus dem Verzicht auf CCS, dass höheren Restemissionen aus der Industrie ein kleineres Angebot an CO<sub>2</sub>-Entnahmen gegenüberstehen.

### ***Wiedervernässung der Moore***

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 CO<sub>2</sub>. In Deutschland sind 95% aller Moorböden trockengelegt, was zu jährlichen Emissionen von 53 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr (Umweltbundesamt, 2021) auf einer Fläche von rund 1,8 Mha führt. Durch Wiedervernässungsmaßnahmen kann der Zersetzungsprozess und die damit verbundenen Emissionen gestoppt werden.

---

<sup>1</sup> Wie im Ariadne Szenarienreport genauer ausgeführt, basiert diese Zahl auf der Annahme, dass bis 2030 eine CCS-Kapazität von 5 MtCO<sub>2</sub>/Jahr aufgebaut wurde, die danach analog zur Ausbaurate der Kernenergie in Frankreich in den 1980er Jahren um 16%/Jahr ausgebaut wird.

Die Renaturierung liefert zudem einen entscheidenden Beitrag zum Erhalt der Artenvielfalt. Deutschlandweit beträgt das theoretische Minderungspotenzial aus einer konsequenten Wiedervernässung auf naturnahe Wasserstände 35 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr (Naturkapital Deutschland – TEEB DE, 2015).

Durch die Wiedervernässung müsste allerdings die derzeitige landwirtschaftliche Aktivität auf diesen Flächen eingestellt werden, was bei gleichbleibender Nachfrage zu Verlagerungseffekten und damit zu einem zusätzlichen Flächenbedarf führt. Hierbei handelt es sich um 1,2 Mha, die derzeit als Grünland oder Ackerfläche landwirtschaftlich genutzt werden. Dieser zusätzliche Flächenbedarf kann im Rahmen dieser Analyse durch die Reduzierung der Nachfrage nach Tierprodukten oder durch die Reduzierung der Flächen für energetisch genutzte Anbaubiomasse erfolgen und beeinflusst damit auch das Potenzial der biomassebasierten CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen.

Für diese Analyse wird idealisiert angenommen, dass das gesamte theoretische Minderungspotenzial der Wiedervernässung von Mooren ausgeschöpft wird. Es zeichnet sich allerdings ab, dass in von zunehmender Trockenheit betroffenen Gebieten, wie beispielsweise Brandenburg, die Wiedervernässung von Mooren einen zusätzlichen Druck auf die schwindenden Wasservorräte ausübt. Auch ist die Wiedervernässung von Mooren ein regional differenziertes, zeitintensives und komplexes Unterfangen, das die Beteiligung einer Vielzahl von Akteurinnen und Akteuren, insbesondere den betroffenen Landwirtinnen und Landwirten, erfordert (Abel et al., 2019).

Hier wird außerdem die vereinfachte Annahme getroffen, dass durch die Wiedervernässung von Mooren diese Flächen nicht mehr zur landwirtschaftlichen Nutzung zur Verfügung stehen. Tatsächlich werden allerdings alternative Bewirtschaftungsformen, wie der Anbau von Paludikulturen wie Sphagnum, zur materiellen oder Schilf zur energetischen Nutzung oder die extensive Beweidung durch Wasserbüffel diskutiert.

## ***Szenarienbeschreibung***

Basierend auf den oben beschriebenen Vermeidungsoptionen *Ernährungsumstellung*, *CCS* und *Wiedervernässung der Moore* werden die folgenden fünf Szenarien untersucht: Im Szenario „keine Zusatzoptionen“ wird keine der erläuterten Vermeidungsoptionen umgesetzt, sodass sich nach vollständiger Vermeidung von energiebedingten CO<sub>2</sub> Emissionen und Emissionen aus der Abfallwirtschaft noch Restemissionen in Höhe von 127 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr ergeben. Hier entsteht keine Veränderung des Landflächenbedarfs. Im Szenario „*Ernährungsumstellung*“ können die Emissionen auf 107 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr reduziert und zusätzlich freie Flächen in Höhe von 2,3 Mha gewonnen werden. Im Szenario „*CCS*“ können 10 MtCO<sub>2</sub>/Jahr an Prozessemissionen vermieden werden. Dieses Szenario hat keinen Einfluss auf den Flächenverbrauch, jedoch ermöglicht CCS hier auf der CO<sub>2</sub>-Entnahmeseite auch die Optionen BECCS<sup>2</sup> und DACCS. Das größte Vermeidungspotenzial der hier betrachteten Einzelmaßnahmen besteht bei der Wiedervernässung der Moore. Im Szenario „*Wiedervernässung der Moore*“ können die Restemissionen auf 92 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr reduziert werden. Jedoch entsteht ein Flächenmehrbedarf von 1,2 Mha. Im Szenario „*Alle Optionen*“ werden alle Vermeidungsoptionen durchgesetzt, wodurch sich die Restemissionen mehr als halbieren lassen und hier nur bei 62 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr liegen. Der Flächenmehrbedarf durch die Wiedervernässung von Mooren wird durch die Ernährungsumstellung überkompensiert, sodass im Szenario „*Alle Optionen*“ 1,1 Mha zusätzlich frei werden, die für den Natur- und Biodiversitätsschutz genutzt werden können. Alle Szenarien sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

---

<sup>2</sup> In diesem Szenario wird nur die auch im Szenario „keine Zusatzoptionen“ schon energetisch genutzte Biomasse für BECCS verwendet, so dass hier kein zusätzlicher Flächenverbrauch entsteht.

	<b>Keine Zusatzoptionen</b>	<b>Ernährungs- umstellung</b>	<b>CCS</b>	<b>Wiederver- nässung Moore</b>	<b>Alle Optionen</b>
<b>Emissionen Landwirtschaft [MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr]</b>	56	36	56	56	36
<b>Prozessemissionen Industrie [MtCO<sub>2</sub>/Jahr]</b>	18	18	8	18	8
<b>Brutto LULUCF Emissionen [MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr]</b>	53	53	53	18	18
<b>Zusätzlicher Flächenbedarf [Mha/Jahr]</b>	0	-2,3 Mha	0	1,2 Mha	-1,1 Mha
<b>Restemissionen [MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr]</b>	<b>127</b>	<b>107</b>	<b>117</b>	<b>92</b>	<b>62</b>

Tabelle 1: Restemissionen in den Szenarien mit verschiedenen, zusätzlichen Vermeidungsoptionen. Rote Zellen weisen darauf hin, dass die sektoralen Restemissionen ohne die jeweilige Zusatzoption erreicht werden. Grüne Zellen bedeuten, dass in diesem Szenario das Minderungspotenzial der entsprechenden Zusatzoption in vollem Umfang ausgeschöpft wird. Negative Flächenbedarfe bedeuten, dass Flächen frei werden.

### 3. Angebot an CO<sub>2</sub>-Entnahme in Deutschland bis 2045

Für diese Analyse werden folgende CO<sub>2</sub>-Entnahme Optionen berücksichtigt: Kohlenstoffaufnahme des bestehenden Waldes, Beschleunigte Verwitterung, Agroforstsysteme, Bodenkohlenstoffanreicherung, Pflanzenkohle, BECCS, DACCS und (Wieder-)Aufforstung. Die Entnahmepotenziale basieren auf den im Ariadne-Szenarienreport (Luderer et al., 2021) beschriebenen Annahmen.

**Kohlenstoffaufnahme des bestehenden Waldes:** Die zukünftige Entwicklung der Senkenleistung des bestehenden Waldes unterliegt besonders großen Unsicherheiten, die insbesondere aus der Methodik zur Datenerfassung der aktuellen Waldsenke, aber auch aus den Annahmen zur zukünftigen Holzernte und zu zukünftigen Waldschäden entstammen. In dieser Analyse wird die mittlere jährliche Senkenleistung im Basis-Szenario für den Zeitraum 2012-2102 aus Böttcher et al., 2018 von 35 MtCO<sub>2</sub> für das Jahr 2045 zugrunde gelegt. Eine neue Studie (Hennenberg et al., 2022) des Öko-Instituts bewertet diese Senkleistung allerdings als konservativ, da in den zugrundeliegenden Annahmen der WEHAM Szenarien die Holznutzung über- und damit die Senkleistung unterschätzt würde.

**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. Durch Mahlen des Gesteins kann 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. Eine der vielversprechendsten Gesteinsarten ist Basalt. Es hat eine hohe CO<sub>2</sub>-Effizienz, ist nur wenig mit schädlichen Spurenelementen versetzt, in großen Mengen vorhanden und könnte den Böden sogar Nährstoffe wie Phosphor und Kalium liefern. Würden 30% (3,5 Mha) der gesamtdeutschen Ackerfläche von 11,7 Mha mit einer maximalen Basaltgesteinsmenge von 15 kg/m<sup>2</sup> bedeckt, könnten 9 MtCO<sub>2</sub> pro Jahr abgeschieden werden.

**Agroforstsysteme und Bodenkohlenstoffanreicherung:** Ein stabiler Bodenkohlenstoffgehalt ergibt sich, wenn der Kohlenstoffeintrag in und der Kohlenstoffaustritt aus dem Boden über

das Jahr gemittelt gleich groß sind, die beiden Prozesse sich also im Gleichgewicht befinden. Derzeit nimmt der Bodenkohlenstoffgehalt deutscher Ackerflächen stetig ab, weil der Kohlenstoffaustritt (überwiegend in Form von  $\text{CO}_2$ ) größer ist, als der Kohlenstoffeintrag (überwiegend in Form von organischem Material wie Pflanzenresten). Wird der Kohlenstoffeintrag allerdings durch Veränderungen der landwirtschaftlichen Praktiken erhöht, kann dem Verlust von weiterem Bodenkohlenstoff entgegengewirkt werden. Wird dabei sogar mehr Kohlenstoff eingetragen, als über das Jahr verloren geht, kann sogar eine Senkenleistung erzielt werden. Allerdings führt eine Zunahme des Bodenkohlenstoffgehalts auch zu höheren Kohlenstoffaustritten, da mehr organisches Material vorhanden ist, das zersetzt werden kann. Deshalb hält die Senkenleistung nur solange an, bis sich der Bodenkohlenstoffgehalt auf einem höheren Gleichgewichtsniveau stabilisiert hat. Eine solche Sättigung könnte bereits nach 25 Jahren erreicht werden (Wiesmeier et al., 2020). Auch danach müssen diese Praktiken beibehalten werden, damit der dazugewonnene Bodenkohlenstoff nicht wieder verloren geht und der Boden erneut zur  $\text{CO}_2$ -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 beim Wachsen auch oberirdisch signifikante Mengen  $\text{CO}_2$ . Agroforstsysteme und umfassende Maßnahmen zur Bodenkohlenstoffanreicherung sind nicht nur aus Klimaschutzsicht sinnvoll, sondern können auch einen entscheidenden Beitrag zum Biodiversitätsschutz sowie zur Verbesserung der Ökosystemfunktionen der Böden liefern (Drexler et al., 2021; Poschlod & Braun-Reichert, 2017). Das Sequestrierungspotenzial hängt vom regionalen Mikroklima, der jeweiligen Praxis sowie den Bodenbeschaffenheiten vor Ort ab, sodass die Literaturwerte für den europäischen Raum größeren Schwankungen unterliegen. Würden im Jahr 2045 auf 30% (3,5 Mha) der gesamtdeutschen Ackerfläche von 11,7 Mha verbesserte Fruchtfolgen oder Dauerkulturen als Maßnahmen zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts eingeführt, könnten 1-2  $\text{MtCO}_2$  in diesem Jahr abgeschieden werden. Würden auf weiteren 30% der gesamtdeutschen Ackerfläche Agroforstsysteme etabliert, könnten weitere 12-



43 MtCO<sub>2</sub> pro Jahr abgeschieden werden.<sup>3</sup> Die große Spannweite in der Potenzialabschätzung kommt daher, dass die Kohlenstoffbindung in der oberirdischen Biomasse maßgeblich von der Umsetzung des jeweiligen Agroforstsystems abhängt, d.h. den eingesetzten Spezies und der Dichte der Pflanzungen.

Für die beschleunigte Verwitterung, Agroforstsysteme und Bodenkohlestoff werden je 30% der Ackerfläche betrachtet, da die Zahlen sonst aufgrund von Abhängigkeiten und Interaktionen nicht addiert werden könnten, und weil das Ausmaß der Anwendung höchst unsicher ist und vor allem von politischen Gegebenheiten sowie der Annahme durch die Landwirte abhängt. Diese Zahlen sind daher eher illustrativ zu verstehen und verdeutlichen die Größenordnungen. Insgesamt stehen in allen Szenarien durch diese drei Optionen plus die bestehende Waldsenke 57-89 MtCO<sub>2</sub>/Jahr an CO<sub>2</sub>-Entnahme zur Verfügung.

Verschiedene Abhängigkeiten sind für die Umsetzung und die realisierten Potenziale der Entnahmemaßnahmen relevant: BECCS und DACCS sind von der Verfügbarkeit von CCS abhängig, BECCS und Pflanzenkohle von der Menge der verfügbaren Biomasse und die Biomasse selbst sowie Wieder-/Aufforstung von der Verfügbarkeit von Landflächen (Abbildung 2). Um die Wechselbeziehungen untereinander und auch mit den Vermeidungsoptionen zu verdeutlichen, sollen in diesem Kapitel zuerst die limitierenden Faktoren erläutert und im Anschluss daran CO<sub>2</sub>-Entnahme-Szenarien vorgestellt werden.

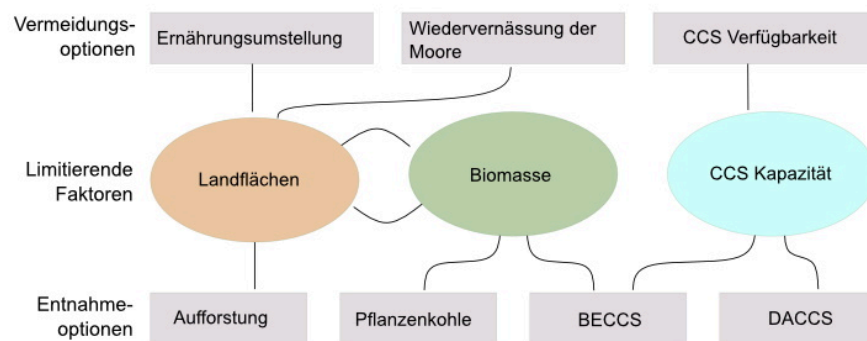


Abbildung 2: Veranschaulichung der Wechselwirkungen zwischen den untersuchten, zusätzlichen Vermeidungsoptionen, den sich daraus ergebenden limitierenden Faktoren und den Entnahmeoptionen. Quelle: Eigene Darstellung

<sup>3</sup> Für eine grobe Abschätzung der Entnahme im Jahr 2045 nehmen wir vereinfacht einen linearen Ausbau von 1,5% pro Jahr an. Sättigungseffekte für den Zuwachs der oberirdischen Biomasse bei Agroforstsystemen werden nicht erwartet. Für die Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts tritt nach 25 Jahren die Sättigung ein. Vereinfacht nehmen wir eine lineare Abnahme des Emissionsfaktors über diesen Zeitraum an. Erläuterungen zur Berechnung siehe (Luderer et al., 2021).

## ***Limitierende Faktoren***

### *Verfügbare Kapazität der geologischen Speicherung für BECCS und DACCS*

Zum einen wird CCS benötigt, um Prozessemissionen aus der Industrie zu vermeiden, und zum anderen für die Entnahmetechnologien BECCS und DACCS. In Szenarien, in denen CCS zur Verfügung steht, nehmen wir an, dass eine maximale jährliche Speicherkapazität von 50 MtCO<sub>2</sub>/Jahr in 2045 erreicht werden kann. Dafür wäre bei einer Ausbaurrate von 16%/Jahr, wie sie in den 1980er Jahren in Frankreich bei der Kernenergie erreicht wurde, in 2030 bereits eine Kapazität von 5 MtCO<sub>2</sub>/Jahr nötig (Luderer et al., 2021). Von den 50 MtCO<sub>2</sub>/Jahr werden 10 MtCO<sub>2</sub>/Jahr für die Vermeidung von Prozessemissionen aus der Industrie benötigt, sodass noch 40 MtCO<sub>2</sub>/Jahr für die geologische Speicherung durch BECCS oder DACCS verfügbar sind. Dabei wird maximal die Hälfte der in allen Szenarien ohnehin energetisch genutzten Biomasse (1 Exajoule (EJ)) für BECCS verwendet, der Bedarf an Biomasse steigt hier also nicht.

### *Biomasse für BECCS und Pflanzenkohle*

Biomasse ist ein vielseitig einsetzbarer, nachwachsender Rohstoff, der sowohl für die Dekarbonisierung als auch für die CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen BECCS und Pflanzenkohle bedeutsam ist. Da der Anbau von Biomasse große Flächen Land beansprucht und damit sowohl in Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion als auch zum Naturschutz steht, ist das nachhaltige Biomasseangebot stark beschränkt. Im Jahr 2021 wurde rund 1 EJ Biomasse für energetische Zwecke verwendet und deckte damit 8% des deutschen Primärenergiebedarfs (AGEB, 2022). Diese Biomasse setzt sich zusammen aus Anbaubiomasse, die in 2020 einen Flächenbedarf von 2,6 Mha (davon 2,34 Mha zur energetischen Nutzung (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2021)) hatte, und biogenen Reststoffen, vor allem aus der Forstwirtschaft und Stroh.

<b>Anbaufläche in 2045</b>	1 Mha	2,6 Mha
<b>Potenzial Anbaubiomasse</b>	0,3 EJ	0,8 EJ
<b>Potenzial Reststoffe</b>	0,7 EJ	0,7 EJ
<b>Biomassepotenzial gesamt</b>	1 EJ	1,5 EJ

Tabelle 2: Annahmen zur zukünftigen Anbaufläche und den resultierenden Biomassepotenzialen (Abel et al., 2019).

Das zukünftige Anbaubiomassepotenzial ist maßgeblich von den zur Verfügung gestellten Anbauflächen abhängig. Hier werden Szenarien zur Flächenbereitstellung und Annahmen über den resultierenden Primärenergieertrag aus einer aktuellen, detaillierten Studie des Deutschen Biomasseforschungszentrums (Thrän et al., 2019) entnommen.

Das Potenzial aus Anbaubiomasse bei gleichbleibender Anbaufläche von 2,6 Mha bzw. bei einer Reduktion der Anbaufläche auf 1 Mha entwickelt sich demnach zu rund 0,8 EJ/Jahr beziehungsweise 0,3 EJ/Jahr bis zum Jahr 2050, wobei den Szenarien Ertragssteigerungen und der Wechsel zum Anbau von *Miscanthus*<sup>4</sup> zugrunde liegen. Zusätzlich könnten laut der Studie in beiden Szenarien 0,7-0,9 EJ/Jahr aus Reststoffen bereitgestellt werden. Aufgrund der Unsicherheiten im Reststoffpotenzial wird für diese Analyse die konservative Annahme getroffen, dass nur 0,7 EJ/Jahr an energetisch verwendbaren biogenen Reststoffen mobilisiert werden. Damit ergeben sich die in Tabelle 2 gezeigten Annahmen zur Anbaufläche und dem resultierenden Biomassepotenzial.

Da Bioenergie ein Bestandteil der Dekarbonisierung des Energiesystems ist und der energetische Co-Output bei der Pflanzenkohle-Produktion (mit Fokus auf die CO<sub>2</sub>-Speicherung) nur gering ausfällt, ergibt sich eine hohe Nutzungskonkurrenz zwischen Bioenergie mit oder ohne CCS und Pflanzenkohle, 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 CO<sub>2</sub>-Infrastruktur gebunden

<sup>4</sup> *Miscanthus × giganteus* ist eine sterile Hybride aus *Miscanthus sinensis* und *Miscanthus sacchariflorus*, ein mehrjähriges Gras mit bambusähnlichen Stängeln, das in einer Saison (ab der dritten Saison) bis zu 3 bis 4 Meter hoch werden kann. Es ist eine sehr ertragreiche Energiepflanze mit wenig Ansprüchen an den Standort. (Laurent et al., 2015)

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.

Darüber hinaus könnte Pflanzenkohle auch Anwendung in der stofflichen Nutzung der Biomasse finden und somit Reststoffe verwenden, die nicht für eine energetische Nutzung zur Verfügung stehen. Das Potenzial dafür könnte durchaus hoch sein, es fehlen derzeit allerdings konsistente Studien, weshalb diese Anwendungen hier nicht weiter betrachtet werden.

In dieser Analyse wird angenommen, dass weiterhin 1 EJ Biomasse energetisch genutzt wird, wenn CCS zur Verfügung steht, dann teilweise in Kombination mit BECCS. Nur darüber hinaus zur Verfügung stehende Biomasse wird für Pflanzenkohle genutzt. In Szenarien mit gleichbleibender Anbaufläche steht also 0,5 EJ/Jahr Biomasse für Pflanzenkohle zur Verfügung und führt zu einer Sequestrierung von 25 MtCO<sub>2</sub>/Jahr (Luderer et al., 2021).

### *Flächenbedarfe*

Ein Blick auf die aktuelle Flächennutzung in Deutschland offenbart, dass der Großteil der gesamtdeutschen Fläche bereits in Benutzung ist. Dabei entfällt die Hälfte der Fläche auf die Landwirtschaft, 30% auf Wälder und 15% auf Siedlungs- und Verkehrsflächen. Dadurch wird deutlich, dass zusätzliche Flächenbedarfe, beispielsweise für den Anbau von Biomasse, durch Aufforstung oder durch die Wiedervernässung von Mooren in Nutzungskonkurrenz mit der aktuellen Flächennutzung treten und zu Verdrängungseffekten führen.

Der Anbau von Energiepflanzen wird im Kontext des Natur- und Biodiversitätsschutzes stark kritisiert (Heck et al., 2018) und steht zusätzlich in direkter Nutzungskonkurrenz zum Anbau von Lebensmitteln. Eine Ausweitung der Anbauflächen für Energiepflanzen über das aktuelle Maß hinaus wird deshalb ausgeschlossen. In den Szenarien soll der Zielkonflikt zwischen der Landnutzung im Sinne der Anbaubiomasse und im Sinne des Naturschutzes untersucht werden. In Szenarien mit Priorität Naturschutz wird die verfügbare Fläche für Anbaubiomasse auf 1 Mha bis 2045 reduziert und die eventuell freiwerdende Fläche extensiv im Sinne des Naturschutzes umgewandelt. Hierbei wird auch Kohlenstoff in der Biosphäre gespeichert.

Das genaue Entnahmepotenzial unterliegt hohen Unsicherheiten und ist unter anderem auch von den lokalen Faktoren wie der vorherigen Nutzung einer Fläche, der zukünftigen Baum- und Gehölzdichte und den Bodenbeschaffenheiten abhängig. Für diese Studie wird stark vereinfacht angenommen, dass die Hälfte der freiwerdenden Flächen in Grünland und die andere Hälfte in Wald umgewandelt wird. Dabei werden zur Abschätzung der Größenordnung die Entnahmefaktoren für Bodenkohlenstoffanreicherung und (Wieder-)Aufforstung aus dem Ariadne-Report (Luderer et al., 2021) zugrunde gelegt. In Szenarien mit Priorität Anbaubiomasse wird, wo möglich, die Anbaufläche auf dem heutigen Stand belassen und es finden nur dann Umwandlungen in Grünland und Wald statt, wenn zusätzliche Flächen, z.B. aufgrund einer Ernährungsumstellung, freiwerden.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Flächenänderungen werden zukünftig weitere Veränderungen relevant sein. Es zeichnet sich derzeit ein allgemeiner Trend zum Rückgang von Weideland ab, der auch in den Modellrechnungen zur Ernährungsumstellung in Kapitel 2 mit dem MAgPIE Modell sowohl im Trend als auch im EAT-Lancet Szenario beobachtet werden konnte. Demgegenüber steht ein Flächenmehrbedarf durch den massiven Ausbau von Windkraft- und Solaranlagen sowie die zunehmende Ausweitung der Siedlungs- und Verkehrsflächen. Diese Entwicklungen werden in dieser Studie allerdings nicht betrachtet.

### *Szenarienbeschreibung*

Die Annahmen der oben betrachteten Vermeidungsszenarien beeinflussen durch ihre Auswirkungen auf *Landflächen* und *CCS-Verfügbarkeit* auch die Potenziale einiger CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen. Die BECCS- und DACCS-Potenziale hängen von der CCS-Verfügbarkeit ab, BECCS und Pflanzenkohle sind vom Biomasseangebot abhängig. Das Biomasseangebot sowie das Potenzial für (Wieder-)Aufforstung hängen wiederum vom Angebot an zusätzlichen Landflächen ab (Abbildung 2). Weitere CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen, nämlich bestehende Waldsenken, beschleunigte Verwitterung, Bodenkohlenstoffanreicherung und Agroforstsysteme kommen in dieser Analyse in substantiellen Mengen zum Einsatz, hängen jedoch nicht maßgeblich von den hier betrachteten limitierenden Faktoren ab. Das technische Entnahmepotenzial

dieser Optionen wird daher nicht über die Szenarien variiert, sondern addiert sich stets in 2045 zu 57-89 MtCO<sub>2</sub>/Jahr.

Die zugrundeliegenden Annahmen des Potenzials der „sonstigen Optionen“ sowie eine kurze Bewertung selbiger sind in der angehängten Tabelle 4 zusammengetragen.

Die Szenarien auf der Vermeidungsseite sollen hier nun durch verschiedene Szenarien der CO<sub>2</sub>-Entnahme ergänzt werden. Auch hier spielen politische Priorisierungen der Land- und Biomassenutzung eine entscheidende Rolle. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass 1 EJ der nationalen Biomasse weiterhin im Energiesystem benötigt wird (Luderer et al., 2021). In Szenarien, in denen CCS zur Verfügung steht, kann die Biomasse durch BECCS gleichzeitig energetisch und auch zur CO<sub>2</sub>-Entnahme genutzt werden. Da der energetische Co-Output der Pflanzenkohleherstellung gering ist, wird in den Szenarien erst die Biomassenachfrage im Energiesektor gedeckt und nur Biomasse aus Reststoffen, die darüber hinaus zur Verfügung steht, zur Herstellung von Pflanzenkohle verwendet.

		keine Zusatzoptionen	Ernährungs-umstellung	CCS	Wiederver-nässung Moore	alle Optionen
<b>Restemissionen [MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr]</b>		<b>127</b>	<b>107</b>	<b>117</b>	<b>92</b>	<b>62</b>
<b>Auswirkungen auf CO<sub>2</sub>-Entnahme</b>		Kein BECCS, kein DACCS	Kein BECCS, kein DACCS 2,3 Mha mehr Landfläche		Kein BECCS, kein DACCS 1,2 Mha weniger Landfläche	1,1 Mh mehr Landfläche
<b>CO<sub>2</sub>-Entnahme [MtCO<sub>2</sub>/Jahr]</b>	Pflanzenkohle	25 (0,5 EJ)	25 (0,5 EJ)	25 (0,5 EJ)	0 (0)	25 (0,5 EJ)
	Aufforstung	0 (0 Mha)	9 (1,2 Mha)	0 (0 Mha)	0 (0 Mha)	4 (0,6 Mha)
	Umwandlung	0 (0 Mha)	1 (1,1 Mha)	0 (0 Mha)	0 (0 Mha)	0-1 (0,5 Mha)
	in Grünland					
<i>Priorisierung Anbaubiomasse</i>	BECCS	0 (kein CCS)	0 (kein CCS)	24	0 (kein CCS)	24
	DACCS	0 (kein CCS)	0 (kein CCS)	16	0 (kein CCS)	16
	Sonstige	57-89	57-89	57-89	57-89	57-89
	<b>Summe</b>	<b>Σ 82-114</b>	<b>Σ 92-124</b>	<b>Σ 122-154</b>	<b>Σ 57-89</b>	<b>Σ 126-159</b>
<b>Differenz [MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr]</b>		<b>13-45</b>	<b>-17 - 15</b>	<b>-37 -- -5</b>	<b>3 - 35</b>	<b>-97 -- -64</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Entnahme [MtCO<sub>2</sub>/Jahr]</b>	Pflanzenkohle	0	0	0	0	0
	Aufforstung	6 (0,8 Mha)	14 (1,9 Mha)	6 (0,8 Mha)	1 (0,2 Mha)	10 (1,4 Mha)
	Umwandlung	0-1 (0,8 Mha)	1-2 (1,8 Mha)	0-1 (0,8 Mha)	0 (0,2 Mha)	1-2 (1,3 Mha)
	in Grünland					
<i>Priorisierung Naturschutz</i>	BECCS	0	0	24	0	24
	DACCS	0	0	16	0	16
	Sonstige	57-89	57-89	57-89	57-89	57-89
	<b>Summe</b>	<b>Σ 63-96</b>	<b>Σ 72-105</b>	<b>Σ 103-136</b>	<b>Σ 58-90</b>	<b>Σ 108-141</b>
<b>Differenz [MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr]</b>		<b>31 – 64</b>	<b>2 – 35</b>	<b>-19 – 14</b>	<b>2 – 34</b>	<b>-79 – -46</b>

Tabelle 3: CO<sub>2</sub>-Entnahmeszenarien bei Umsetzung keiner, einzelner oder aller Zusatzoptionen auf der Vermeidungsseite. Hierbei wird auch zwischen der Priorisierung „Anbaubiomasse“ (Landfläche Anbaubiomasse konstant) und „Naturschutz“ (Reduktion Landfläche Anbaubiomasse auf 1 Mha) unterschieden. In den eingefärbten Zellen wird die Differenz zwischen den Restemissionen und dem CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzial gezeigt. Rote Färbung: Die Restemissionen übersteigen das Entnahmepotenzial deutlich; gelbe/orangene Färbung: Die Restemissionen und das Entnahmepotenzial sind ähnlich; grüne Färbung: Das Entnahmepotenzial übersteigt die Restemissionen deutlich. Sonstige CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen umfassen Kohlenstoffaufnahme des bestehenden Waldes, Beschleunigte Verwitterung, Agroforstsysteme und Bodenkohlenstoffanreicherung, die von den über die Szenarien variierten Annahmen nicht berührt werden und daher für alle Szenarien gleich sind.

In Tabelle 3 sind die CO<sub>2</sub>-Entnahme-Szenarien, die sich aus der Kombination der Annahmen *Priorisierung Anbaubiomasse* oder *Naturschutz* mit den Szenarien auf der Vermeidungsseite ergeben, zusammengefasst. Die Differenz zwischen den Restemissionen und dem Entnahme-

potenzial ist in der Zeile „Differenz“ berechnet und farbig hinterlegt, je nachdem, ob das Angebot in den Szenarien die jeweilige Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Entnahme decken kann. Für den Fall „keine Zusatzoptionen“, in dem keine Ernährungsumstellung und keine Wiedervernässung der Moore stattfindet und in dem CCS nicht zur Verfügung steht, übersteigen die Restemissionen am stärksten das Entnahme-Angebot. Die Diskrepanz beträgt zwischen 13-45 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr (Priorisierung Anbaubiomasse) bis zu 31-64 MtCO<sub>2</sub>äq/Jahr (Priorisierung Naturschutz). Durch eine radikale Ernährungsumstellung entsprechend den Empfehlungen der EAT-Lancet-Kommission (Willett et al., 2019) können insbesondere durch die Reduktion der Tierbestände sowohl die Restemissionen verringert, als auch die freiwerdenden Flächen für Naturschutzzwecke genutzt werden. Unter Priorisierung der Anbaubiomasse liegen so die Restemissionen im Bereich des Entnahme-Angebots, sodass die Differenz zwischen -17 und 15 MtCO<sub>2</sub>äq ergibt. Unter Priorisierung von Naturschutz verbleibt eine Diskrepanz von 2-35 MtCO<sub>2</sub>äq.

Im Szenario ohne Ernährungsumstellung, aber dafür mit CCS können zwar die Restemissionen nicht so stark reduziert, jedoch das Potenzial von BECCS und DACCS ausgeschöpft werden, wodurch zumindest mit Priorisierung der Anbaubiomasse die Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Entnahme gedeckt werden könnte. Hier entsteht ein leichter Überschuss von -37 bis -5 MtCO<sub>2</sub>äq. Im Falle der Priorisierung des Naturschutzes liegt das Entnahmepotenzial mit einer Differenz zwischen -19 und 14 MtCO<sub>2</sub>äq im Bereich der Restemissionen. Die Wiedervernässung von Moorböden bietet das größte Vermeidungspotenzial, jedoch kommt es durch den zusätzlichen Flächenbedarf auch zu Einschränkungen für die CO<sub>2</sub>-Entnahme, sodass im Szenario ohne Ernährungsumstellung und ohne CCS die Restemissionen das Entnahme-Angebot um 3-35 MtCO<sub>2</sub>äq (Priorität Anbaubiomasse) beziehungsweise 2-34 MtCO<sub>2</sub>äq (Priorität Naturschutz) übersteigen. Im Szenario „alle Optionen“ können sowohl die Restemissionen am stärksten reduziert, als auch das größte Entnahmepotenzial – durch das Vorhandensein von CCS und zusätzlicher Flächen – realisiert werden. Hier liegt sowohl unter Priorisierung Anbaubiomasse mit -97 bis -64 MtCO<sub>2</sub>äq, als auch unter Priorisierung Naturschutz mit -79 bis -46 MtCO<sub>2</sub>äq ein deutlicher Überschuss im Entnahme-Angebot vor. Abbil-



Abbildung 3 stellt die in 2045 verbleibenden Restemissionen der verfügbaren Menge an CO<sub>2</sub>-Entnahme für alle Szenarien mit der Priorität Anbaubiomasse gegenüber. Die entsprechende Abbildung mit der Priorität Naturschutz findet sich als Abbildung 4 im Anhang.

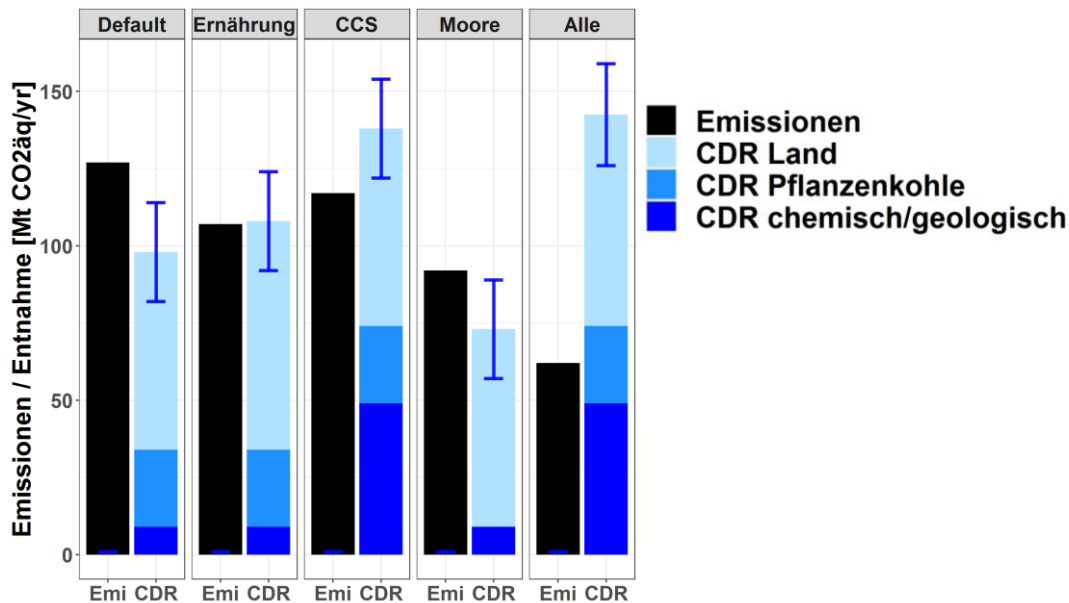


Abbildung 3: In 2045 verbleibende Restemissionen (schwarzer Balken) und zur Verfügung stehende CO<sub>2</sub>-Entnahme (Carbon Dioxide Removal (CDR)) in allen fünf Szenarien mit der Priorität Anbaubiomasse. Die CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen sind unterteilt in Maßnahmen, die den Kohlenstoff geologisch oder chemisch und damit langfristig und nicht reversibel speichern (dunkelblau: beschleunigte Verwitterung, BECCS, DACCS), Pflanzenkohle, die eine mittlere Speicherdauer und wenig Anfälligkeit für Reversibilität aufweist, und Maßnahmen, die die Landsenke erhöhen (hellblau: Waldsenke, Bodenkohlenstoff, Agroforstsysteme, Wiederaufforstung). Letztere sind potenziell reversibel und in ihrem Potential besonders unsicher, daher ist hier die obere und die untere Abschätzung angezeigt. Quelle: Eigene Darstellung

Die verschiedenen CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Stabilität und Reversibilität, aber auch hinsichtlich der bestehenden Erfahrungen (Babiker et al., 2022). Der Kohlenstoff, der durch die Verstärkung der Landsenken in der Biosphäre gespeichert wird, ist anfällig für Umweltstörungen beispielsweise durch Klimaschäden und kann auch durch Änderungen der Bewirtschaftungsweise schnell wieder freigesetzt werden. Andererseits gibt es mit diesen Methoden Jahrzehnte bis Jahrtausende lange Erfahrung. Der Kohlenstoff, der in Form von Pflanzenkohle auf den Äckern ausgebracht wird, speichert den

Kohlenstoff länger und ist deutlich weniger anfällig für Umweltstörungen und Veränderungen der Bewirtschaftungsweise. Kohlenstoff, der durch geologische Speicherung mit CCS (BECCS, DACCS) oder durch chemische Mineralisierung (Beschleunigte Verwitterung) gespeichert wird, ist langfristig und nahezu irreversibel gebunden. Doch diese Methoden sind neu, und auch wenn die Erfahrung wächst, werden sie zurzeit erst in kleinem Umfang eingesetzt.

## 4. Diskussion der Ergebnisse

Um die deutschen und europäischen Klimaziele zu erreichen, ist die Vermeidung der energiebedingten Emissionen durch die Energiewende unabdingbar. Doch obwohl die Vermeidung aller energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits für sich eine außerordentliche Herausforderung darstellt, kann damit auf nationaler Ebene keine Treibhausgasneutralität erreicht werden. Erst durch eine Kombination der zusätzlichen Minderungsmaßnahmen Wiedervernässung von Mooren, Ernährungsumstellung und CCS, und den damit verbundenen erhöhten CO<sub>2</sub>-Entnahmen, wird dies möglich.

Ob Deutschland in der Lage sein wird, die Restemissionen soweit zu senken und das lokale CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzial soweit zu steigern, dass es den Bedarf decken kann, hängt von gesellschaftlichen und politischen Entscheidungen ab. Eine konsequente Ernährungsumstellung kann – auch wenn bessere Information bereitgestellt und Anreize gesetzt werden – letztendlich nur durch persönlichen Konsumententscheidungen der Menschen erfolgen. Die großskalige Wiedervernässung von Moorböden führt gravierende Landschaftsveränderungen mit sich und beinhaltet die Notwendigkeit, die betroffenen Landwirtinnen und Landwirte zu konsultieren und zu kompensieren. CCS wird derzeit im deutschen Kontext sowohl in der Politik als auch in der Gesellschaft mit großer Skepsis bewertet. Auch die Nutzung von Landflächen unterliegt gesellschaftlichen und politischen Entscheidungen. Das betrifft sowohl die Nutzung von Flächen für Bioenergie oder Tierfutter als auch die Umwidmung von Flächen im Sinne des Naturschutzes. Daher wurden in dieser Analyse vor allem die Wechselwirkungen zwischen diesen gesellschaftlichen und politischen Entscheidungen beleuchtet. Um die in dieser Analyse dargestellten Emissionsreduktions- und CO<sub>2</sub>-Entnahmeziele zu erreichen, müssen ambitionierte Ziele erreicht werden. Die Vermeidung aller energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Emissionen aus der Abfallwirtschaft erfordert eine beispiellos zügige und tiefgreifende Transformation des gesamten Energiesystems. Die Ernährungsumstellung nach den Empfehlungen der EAT-Lancet-Kommission (Willett et al., 2019) bedeutet radikale Veränderungen im Konsumverhalten der Bevölkerung. Szenarien mit Wiedervernässung von Mooren schöpfen das gesamte theoretische Minderungspotenzial aus und der Ausbau der

CCS-Kapazität bis 50 MtCO<sub>2</sub>/Jahr in 2045 müsste zeitnah beginnen und zügig erfolgen. Zudem sind die Annahmen zu den CO<sub>2</sub>-Entnahmeoptionen, die nicht substantiell von den limitierenden Faktoren Landflächen, Biomasse und CCS abhängen, ambitioniert: Agroforstsysteme, Beschleunigte Verwitterung und Maßnahmen zur Bodenkohlenstoffanreicherung werden jeweils auf 30% der gesamten deutschen Ackerflächen bis 2045 implementiert (Luderer et al., 2021).

Bei der Bewertung der Entnahmeoptionen ist zu beachten, dass zum Einen bei neuen Methoden wie BECCS, DACCS und Beschleunigte Verwitterung noch Unsicherheiten bezüglich Potenzial und Skalierbarkeit bestehen, aber andererseits die Maßnahmen zur Verstärkung der Landsenken aufgrund der kürzeren Speicherdauer und durch die Möglichkeit der Reversibilität ebenfalls mit einem gewissen Risiko verbunden sind. Zusätzlich ist auch der Sättigungseffekt zu berücksichtigen, der insbesondere bei der Anreicherung des Bodenkohlenstoffgehalts dazu führt, dass die Senkenleistung über die Zeit wieder abnimmt. Die zukünftige Senkenleistung des bestehenden Waldes unterliegt großen Unsicherheiten und der Kohlenstoffspeicher Wald wird durch die zunehmenden Belastungen durch die Folgen des Klimawandels gefährdet. Außerdem gibt es eine Reihe an politischen und gesellschaftlichen Faktoren, die die Realisierung sowohl der Minderungs- als auch der Entnahmemaßnahmen beeinflussen, beispielsweise die Wahl der Politikinstrumente, der gesellschaftlichen Trägerschaft oder Schwierigkeiten bei Überwachung, Berichterstattung und Überprüfung. Aus diesen Gründen könnte es sein, dass in der Realität sowohl das Entnahmepotenzial geringer als auch die Restemissionen höher ausfallen könnten.

Wird zusätzlich zur vollständigen Vermeidung der energie- und abfallbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen nur auf Wiedervernässung der Moore gesetzt, ist Deutschland in den hier betrachteten Szenarien nicht in der Lage, die verbleibenden Restemissionen durch lokale CO<sub>2</sub>-Entnahmen zu decken. Unter idealisierten Bedingungen ist das CCS-Szenario mit Priorität auf Anbaubiomasse im Stande, mit einem kleinen Überschuss des CO<sub>2</sub>-Entnahmepotenzials, Treibhausgasneutralität in 2045 zu erreichen.

Nur das Szenario „*alle Optionen*“ liefert einen gewissen Spielraum, um gegen die Risiken höherer Restemissionen oder/und kleinerer Entnahmepotenziale abzusichern, z.B. falls die zugrundeliegenden optimistischen Annahmen nicht eintreffen. Um lokal in Deutschland Treibhausgasneutralität erreichen zu können bedarf es daher nicht nur der vollständigen Vermeidung aller energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen und Emissionen aus der Abfallwirtschaft, sondern auch einer Kombination der zusätzlichen Maßnahmen CCS, Ernährungsumstellung und Wiedervernässung der Moore, um in allen Vermeidungs- und Entnahmeoptionen so viel Potenzial wie möglich zu realisieren.

## Anhang

Maßnahme	Annahme in 2045	Einordnung
<b>Annahmen zu CO<sub>2</sub>-Entnahmen: sonstigen Optionen</b>		
Entwicklung der bestehenden Waldsenke	Entnahme von 35 MtCO <sub>2</sub> /Jahr	Konservativ - Entwicklung der Waldsenken unterliegt sehr großen Unsicherheiten (aufgrund der Entwicklung von Waldstörungen). Außerdem fehlen aktuelle Studien für eine Prognose bis 2045. Der hier angenommene Wert ist wahrscheinlich eine konservative Annahme, denn er beruht auf den Modellierungen der WEHAM Szenarien, die die Holzernte über- und damit die Waldsenke unterschätzen (Henninger et al. 2022)(Hennenberg et al., 2022).
Beschleunigte Verwitterung	Angewendet auf 30% der deutschen Ackerflächen, Entnahme von 9 MtCO <sub>2</sub> /Jahr	Ambitioniert - Es gibt über 260.000 landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland von denen ein signifikanter Teil Gesteinsmehl auf ihren Ackerflächen ausbringen müsste. Zudem unterliegt das zukünftige Potenzial Unsicherheiten, da weitere Forschung zu den Konsequenzen vom großskaligen Einsatz auf die Bodenqualität nötig ist.
Bodenkohlenstoffanreicherung (verbesserte Fruchtfolgen, Dauerkulturen, Bodendecker)	Angewandt auf 30% der deutschen Ackerflächen, Entnahme von 1-2 MtCO <sub>2</sub> /Jahr	Ambitioniert - Es gibt über 260.000 landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland von denen ein Großteil die bodenkohlenstoffanreichern Praktiken übernehmen müssen.
Agroforstsysteme	Angewandt auf 30% der deutschen Ackerfläche, Entnahme von 12-42 MtCO <sub>2</sub> /Jahr	Ambitioniert - Es gibt über 260.000 landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland von denen ein signifikanter Teil die auf Agroforstsysteme umstellen müsste. Das Potenzial unterliegt noch großen Unsicherheiten, hier bedarf es weiterer Forschung.
<b>Annahmen zu Vermeidungsmaßnahmen</b>		
Energie- und Abfallwirtschaft	Vollständige Vermeidung aller CO <sub>2</sub> -Emissionen	Ambitioniert - siehe Ariadne Szenarien Report
Wiedervernässung der Moore	Ausschöpfung des gesamten technischen Minderungspotenzials von -35 MtCO <sub>2</sub> /Jahr	Sehr ambitioniert - massive Landschaftsveränderung, Schwierigkeit der Wasserverfügbarkeit
Verringerung der Nachfrage nach tierischen Produkten	-66 % zum aktuellen Stand	Sehr ambitioniert - eine Fortschreibung aktueller Trends führt nur zu einer Reduktion um 7%.
Aufbau der CCS-Infrastruktur	Kapazität in 2030: 5 MtCO <sub>2</sub> /Jahr Nötige Ausbauraten 2030-2045: 16% pro Jahr	Ambitioniert - Ausbauraten von 16%/Jahr wurden beispielsweise bei der Nuklearenergie in Frankreich in 80er Jahren erreicht

Tabelle 4: Kernannahmen und deren Bewertungen für Entnahmeoptionen mit konstantem aber ambitioniertem Beitrag (zusammengefasst unter der Kategorie "sonstige Optionen") sowie zu den Vermeidungsmaßnahmen.

	Trend	EAT-Lancet Ernährungsempfehlung
Nachfrageänderung tierischer Produkte (2020-2045)	-7%	-66%
- Eier	unverändert	-48%
- Milchprodukte	-5%	-61%
- Schweinefleisch	-35%	-83%
- Geflügel	+33%	-32%
- Rindfleisch	+22%	-78%

Tabelle 5: Projektion der Nachfrageänderungen tierischer Produkte von 2020 bis 2045 bei Fortsetzung aktueller Trends sowie bei Ernährungsumstellung entsprechend den Empfehlungen der EAT-Lancet-Kommission (Willett et al., 2019) basierend auf Modellrechnungen mit dem MAgPIE Modell (Dietrich et al., 2019).

Veränderungen relativ zum Status quo durch Ernährungsumstellung		
Änderung der Ackerfläche	-19%	2,34 Mha würden frei werden
CH <sub>4</sub> Emissionen	- 49%	-16 MtCO <sub>2</sub> äq
N <sub>2</sub> O Emissionen	-18%	-4 MtCO <sub>2</sub> äq

Tabelle 6: Annahmen zu Flächenänderungen und Reduktionspotenzialen von nicht-CO<sub>2</sub> Emissionen durch eine Ernährungsumstellung nach den Vorgaben der EAT-Lancet-Kommission (Willett et al., 2019).

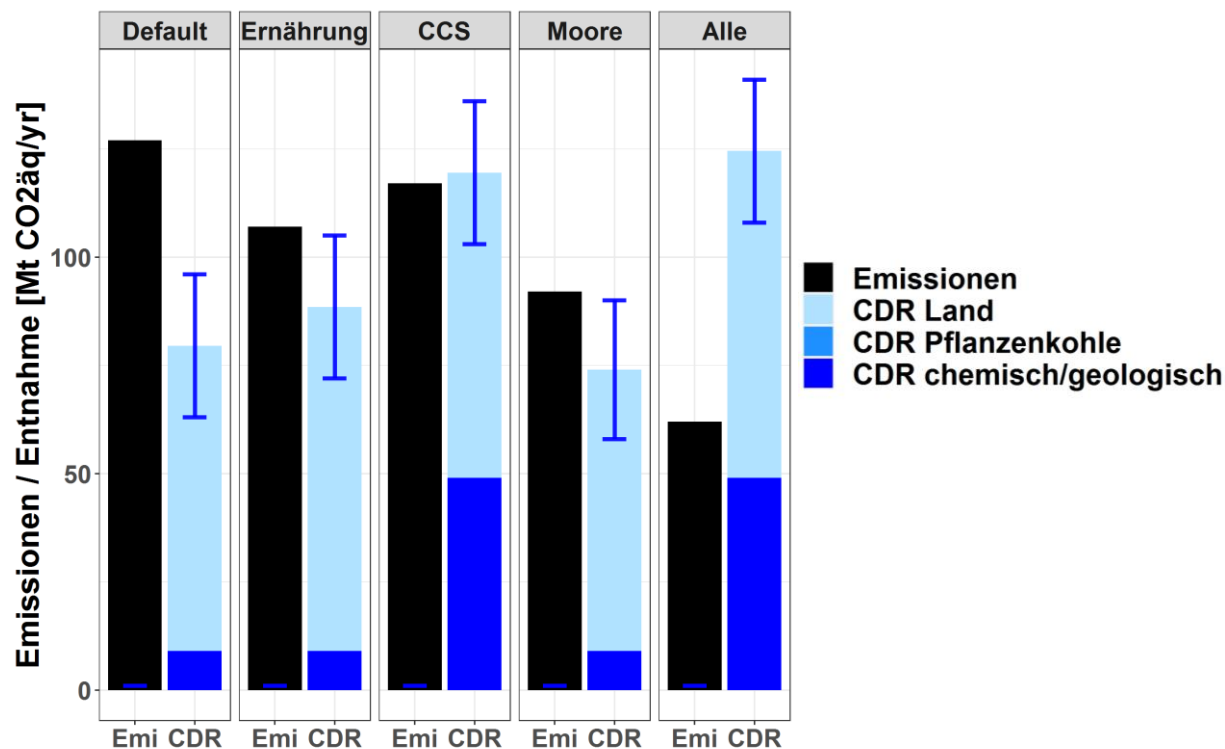


Abbildung 4: In 2045 verbleibende Restemissionen (schwarzer Balken) und zur Verfügung stehende CO<sub>2</sub>-Entnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) in allen fünf Szenarien mit der Priorität Naturschutz. Die CO<sub>2</sub>-Entnahmooptionen sind unterteilt in Maßnahmen, die den Kohlenstoff geologisch oder chemisch und damit langfristig und nicht reversibel speichern (dunkelblau: beschleunigte Verwitterung, BECCS, DACCS), Pflanzenkohle, die eine mittlere Speicherdauer und wenig Anfälligkeit für Reversibilität aufweist, und Maßnahmen, die die Land-senke erhöhen (hellblau: Waldsenke, Bodenkohlenstoff, Agroforstsysteme, Wiederaufforstung). Letztere sind potenziell reversibel und in ihrem Potential besonders unsicher, daher ist hier die obere und die untere Abschätzung angezeigt.



## Literaturangaben

- Abel, S., Barthelmes, A., Gaudig, G., Joosten, H., Nordt, A., & Peters, J. (2019). *Klimaschutz auf Moorböden—Lösungsansätze und Best-Practice-Beispiele*. Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 03/2019.  
[https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/201908\\_Broschuere\\_Klimaschutz%20auf%20Moorb%C3%B6den\\_2019.pdf](https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/201908_Broschuere_Klimaschutz%20auf%20Moorb%C3%B6den_2019.pdf)
- AGEB. (2022). *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2021*.
- Babiker, M., Berndes, G., Blok, K., Cohen, B., Cowie, A., Geden, O., Ginzburg, V., Leip, A., Smith, Peter, Sugiyama, M., & Yamba, F. (2022). Cross-sectoral perspectives. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press.
- Böttcher, H., Hennenberg, K., Winger, C., & K. (2018). *Waldvision Deutschland. Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Studie des Öko-Institut e.V.*  
<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Waldvision-Methoden-und-Ergebnisse.pdf>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (2021). *Naturschutz und Bioenergie*. <https://www.bmu.de/themen/naturschutz-artenvielfalt/naturschutz-biologische-vielfalt/naturschutz-und-energie/naturschutz-und-bioenergie>
- Bundesregierung. (2021). *Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes, Drucksache 19/30230*.  
<https://dserver.bundestag.de/btd/19/302/1930230.pdf>
- Dietrich, J. P., Bodirsky, B. L., Humpenöder, F., Weindl, I., Stevanović M., Karstens, K., Kreidenweis, U., Wang, X., Mishra, A., Klein, D., Ambrósio, G., Araujo, E., Yalaw, A. W., Baumstark, L., Wirth, S., Giannousakis, A., Beier, F., Chen, D. M.-C., Lotze-Campen, H., & Popp, A. (2019). MAGPIE 4 – a modular open-source framework for modeling global land systems. *Geoscientific Model Development*, 12(4), 1299–1317. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1299-2019>
- Drexler, S., Gensior, A., & Don, A. (2021). Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. *Regional Environmental Change*, 21(3), 74.  
<https://doi.org/10.1007/s10113-021-01798-8>
- Heck, V., Gerten, D., Lucht, W., & Popp, A. (2018). Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries. *Nature Climate Change*, 8(2), 151–155.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-017-0064-y>
- Hennenberg, K., Böttcher, H., Reise, J., Herold, A., Bohn, F., Gutsch, M., & Reyer, C. P. O. (2022). *Interpretation des Klimaschutzgesetzes für die Waldbewirtschaftung verlangt adäquate Datenbasis – Reaktion auf die Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Waldpolitik beim BMEL (vom 22.06.2021)*. Öko-Institut. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/03-WP-Klimaschutzgesetz-Waldbewirtschaftung.pdf>
- Laurent, A., Pelzer, E., Loyce, C., & Makowski, D. (2015). Ranking yields of energy crops: A meta-analysis using direct and indirect comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.023>
- Luderer, G., Kost, C., & Sörgel, D. (2021). *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045—Szenarien und Pfade im Modellvergleich*. <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>
- Naturkapital Deutschland – TEEB DE. (2015). *Kapitel 5: Klimaschutz durch Wiedervernässung von kohlenstoffreichen Böden*. In: *Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte*. [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_1N51DE/dn055209.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_1N51DE/dn055209.pdf)
- Poschold, P., & Braun-Reichert, R. (2017). Small natural features with large ecological roles in ancient agricultural landscapes of Central Europe—History, value, status, and conservation. *Biological Conservation*, 211, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.12.016>

- Thrän, D., Lauer, M., Dotzauer, M., Oehmichen, K., Majer, S., Millinger, M., & Jordan, M. (2019). *Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO)* (S. 130). [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/technoekonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/technoekonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- Umweltbundesamt. (2021). *National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2019. Climate Change 23/2020*. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change\\_23-2020\\_nir\\_2020\\_en\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_23-2020_nir_2020_en_0.pdf)
- Umweltbundesamt. (2022). *National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2020*.
- 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*. <https://doi.org/10.20387/BONARES-F8T8-XZ4H>
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., ... Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)



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



Kopernikus-Projekt Ariadne



ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf [kopernikus-projekte.de](https://www.kopernikus-projekte.de)

Wer ist Ariadne? In der griechischen Mythologie gelang Theseus durch den Faden der Ariadne die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne im Konsortium von mehr als 25 wissenschaftlichen Partnern. 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 | Forschungsinstitut für Nachhaltigkeit – Helmholtz-Zentrum Potsdam (RIFS) | 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 | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung KlimaWirtschaft | Stiftung Umweltenergierecht | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung