

Aus Wissenschaft und Verein

Ottmar Edenhofer* und Matthias Kalkuhl

Planetarische Müllabfuhr – Gamechanger der Klimapolitik?

Thünen-Vorlesung 2024

<https://doi.org/10.1515/pwp-2024-0028>

Zusammenfassung: Dieser Beitrag spiegelt die in englischer Sprache gehaltene Thünen-Vorlesung von Ottmar Edenhofer auf der Jahrestagung des Vereins für Socialpolitik am 16. September 2024 in Berlin unter dem Titel „The (Missing) Third Pillar“ wider. Der Klimaökonom zeigt auf der Basis der gemeinsamen Forschung mit Matthias Kalkuhl, dass die internationale Klimapolitik vor einem Paradigmenwechsel steht: Durch CO₂-Entnahmen („carbon dioxide removal“, CDR) sollen zusätzliche natürliche und technische Kohlenstoffsenken bereitgestellt werden, weil andernfalls die ambitionierten Klimaziele des Pariser Klimaabkommens nicht zu erreichen sind. CDR hat darüber hinaus die Funktion, die globale Kooperation zu erleichtern. Die Autoren entwickeln einen Vorschlag, wie eine Europäische Kohlenstoffzentralbank – die European Carbon Central Bank (ECCB) – eine Schlüsselrolle für Europas Beitrag zu einer planetarischen Müllabfuhr einnehmen kann. Den ökonomischen Anreiz liefern Clean-Up-Zertifikate, die die CO₂-Entnahmen im EU-Emissionshandel finanzieren sollen.

JEL-Klassifikation: H23, H41, H77, Q54, Q58

Schlüsselwörter: CDR, Emissionshandel, internationale Kooperation, Klimawandel, Klimapolitik, EU, Deutschland

1 Die klimapolitische Ausgangslage

Mit dem Europäischen Klimagesetz hat sich die EU bis 2050 zu Netto-Null-Emissionen verpflichtet. Deutschland will Klimaneutralität bereits bis 2045 erreichen. Auch viele

Städte und multinationale Konzerne verfolgen dieses Ziel, das politisch vernünftig und wissenschaftlich fundiert ist. Im Abkommen von Paris hat die Staatengemeinschaft vereinbart, den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf weniger als 2 Grad, wenn möglich sogar auf 1,5 Grad zu begrenzen. Damit wird die kumulative Menge an Treibhausgasen festgelegt, die noch in der Atmosphäre abgelagert werden kann: Auch global sollen bis Mitte des Jahrhunderts Netto-Null-Emissionen erreicht werden (UNFCCC 2023). Dennoch steigen die globalen Emissionen. Die Energiepolitik vieler Staaten deutet nicht auf einen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger hin (UNEP 2023a). Die internationale Klimapolitik droht an ihren Zielen zu scheitern.

Angesichts der zunehmenden Klimaschäden wird in Wissenschaft und Politik darüber diskutiert, durch die Injektion von Aerosolen in die Atmosphäre die Strahlungsbilanz direkt zu steuern. Die Staatengemeinschaft ist in dieser Frage gespalten (Biermann und Gupta 2024): Es ist ein gefährliches Unterfangen, die Strahlungsbilanz der Erde direkt steuern zu wollen. Die Niederschlagsmuster in vielen Regionen der Welt könnten sich verändern, die geopolitischen Risiken dieser Intervention sind kaum bekannt, und eine internationale Verständigung über den Einsatz dieser Techniken ist nicht in Sicht (UNEP 2023b).

Die Kernthese der diesjährigen Thünen-Vorlesung lautet daher: Die beiden traditionellen Säulen der Klimapolitik – die Verminderung der Emissionen und die Anpassung an den Klimawandel – sind zwar unverzichtbar, aber nicht ausreichend. Die Klimapolitik bedarf einer dritten Säule: der Technologien für negative Emissionen. Hierbei soll durch konventionelle Verfahren (zum Beispiel Aufforstung) oder technische Verfahren (zum Beispiel durch Luftfilter und anschließende geologische Speicherung) so viel Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus der Atmosphäre entzogen und in Kohlenstoffsenken gelagert werden, dass die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger und aus der Landnutzung überkompensiert werden. Dadurch könnten netto-negative Emissionen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts entstehen, was das Überschreiten der

*Kontaktperson: **Ottmar Edenhofer**, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Telegrafenberg, 14473 Potsdam, E-Mail: edenhofer@pik-potsdam.de

Matthias Kalkuhl, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, EUREF Campus 19, Torgauer Straße 12–15, 10829 Berlin, sowie Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät, Universität Potsdam, E-Mail: kalkuhl@mcc-berlin.net

Temperaturziele („Overshoot“) in der ersten Hälfte überkompensieren könnte (Smith et al. 2024).

Wir werden zeigen, wie die optimale Arbeitsteilung zwischen Vermeidung, Anpassung und CO₂-Entnahmen aus der Atmosphäre in einer wohlfahrtsökonomischen Betrachtung bestimmt werden soll. Wir werden ebenfalls zeigen, warum „Carbon dioxide removal“ (CDR) als „Gamechanger“ in der Klimapolitik betrachtet werden kann: Je stärker die Schäden des Klimawandels steigen – und damit die „Social cost of carbon“ (SCC) – und je höher das erwartete Kostensenkungspotenzial der Entnahme-Optionen ist, desto früher beginnt die Netto-Negativ-Phase der Klimapolitik.

Zwar besteht über das erwartete Kostensenkungspotenzial noch beträchtliche Unsicherheit (Smith et al. 2024); bei den SCC besteht hingegen soweit Klarheit, dass neuere Forschungsarbeiten auf deren starken Anstieg hindeuten. Kotz et al. (2024) zeigen mit Daten auf subnationaler Ebene, dass Extremwetter-Ereignisse, Klimavariabilität und Niederschlagsmuster zusätzlich zum Temperaturanstieg die globalen Klimaschäden erheblich erhöhen. Bilal und Känzig (2024) unterscheiden zwischen Schäden, die durch lokale und globale Temperaturänderungen verursacht werden. Sie geben eine Spannbreite für die SCC von 700 bis 1800 Dollar je Tonne CO₂ an. Beide Untersuchungen legen nahe, dass die Schadensabschätzungen gegenüber denen der amerikanischen Umweltbehörde EPA deutlich nach oben korrigiert werden müssten (EPA 2023).

Wir betten neue CDR-Optionen in das industrielle Management des globalen Kohlenstoffkreislaufs ein und beantworten auch die Frage, wie Kohlenstoffsinken ökonomisch bewertet werden sollen, die keine permanente Speicherung bieten. Der deutschen und europäischen Klimapolitik wird eine notorische Vernachlässigung der internationalen Kooperation vorgeworfen – nicht ganz zu Unrecht. Wir zeigen daher, warum das Thema der CO₂-Entnahmen in der Lage ist, die internationale Kooperation zu verbessern.

Die Bereitstellung von Kohlenstoffsinken erfordert eine dauerhafte Finanzierung. Es ist unwahrscheinlich, dass die europäischen Finanzminister die dazu nötigen Mittel bereitstellen. Der Aufbau eines CDR-Sektors in Europa (aber auch über den Kontinent hinaus) hat daher nur dann eine Chance, wenn der Europäische Emissionshandel in der Lage ist, Negativ-Emissionen zu finanzieren. Wir zeigen, dass dies durch die Einführung von sogenannten Clean-Up-Zertifikaten möglich wird. Das hierzu notwendige Management von Kohlenstoffmärkten könnte die EU-Kommission überfordern. Daher plädieren wir für die Errichtung einer Europäischen Kohlenstoffzentralbank – einer European Carbon Central Bank (ECCB). Der Zeitpunkt für diese Diskussion ist günstig, da die EU-Kommission gerade prüft, wie die nur schwer vermeidbaren Restemissionen in der Indus-

trie (zum Beispiel im Zementsektor) durch Entnahmen kompensiert werden sollen, um einen starken Preisanstieg im Emissionshandel zu verhindern.

2 Die drei Säulen der Klimapolitik – eine integrierte wohlfahrtsökonomische Betrachtung

Die wohlfahrtsoptimale Arbeitsteilung zwischen Vermeidung, Anpassung und CO₂-Entnahmen lässt sich durch ein einfaches statisches Optimierungsproblem bestimmen. In der sozialen Wohlfahrtsfunktion (*SWF*) werden die Schäden des Klimawandels (*D*) und die Kosten der Anpassung (*A*), der Vermeidung (*M*) und der Entnahmen (*R*) minimiert.¹ Die Netto-Emissionen erhöhen die Klimaschäden, die Anpassung vermindert sie. Dabei werden die Netto-Emissionen durch die Differenz zwischen den Emissionen im Business-as-usual-Pfad (*BAU*-Pfad) und den durch Vermeidung (*M*) und Entnahmen (*R*) reduzierten Emissionen bestimmt. Die Netto-Emissionen können positiv oder negativ sein. Die Gleichungen (1) und (2) beschreiben die notwendigen Bedingungen, die zugleich die optimale Arbeitsteilung zwischen den drei Sektoren bestimmen:

$$\begin{aligned} \min_{\{A,R,M\}} SWF &= D(E^n, A) + C^M(M) + C^R(R) + C^A(A) \\ \text{s.t. } E^n &= E^{BAU} - M - R \\ SCC &= \frac{\partial D}{\partial E^n} = C_M^M = C_R^R \\ &= \frac{\partial D}{\partial A} = C_A^A \end{aligned} \quad (1)$$

Dabei werden partielle Ableitungen nach einer Variablen tiefergestellt dargestellt, also $C_M^M = \frac{\partial C^M(M)}{\partial M}$, $C_{MM}^M = \frac{\partial^2 C^M(M)}{\partial M^2}$ usw. Die SCC – also die Grenzscha-den des Klimawandels – müssen nach Gleichung (1) den Grenzkosten des Vermeidungs- und Entnahme-Sektors entsprechen.

Gleichung (1) zeigt zwei weitere grundlegende Prinzipien: In einem First-best-Wohlfahrtsoptimum müssen die Emissionen zu den daraus entstehenden Klimaschäden, den SCC, bepreist werden. Das kann sowohl gemäß Verursacherprinzip geschehen („polluter-pays principle“) als

¹ Formal ergibt sich das Minimierungsproblem aus dem Maximierungsproblem der sozialen Wohlfahrt ohne Klimawandel, \widetilde{SWF} , abzüglich der Kosten durch Klimawandel und Klimapolitik, also $\max \left(\widetilde{SWF} - \left(D(E^n, A) + C^M(M) + C^R(R) + C^A(A) \right) \right)$.

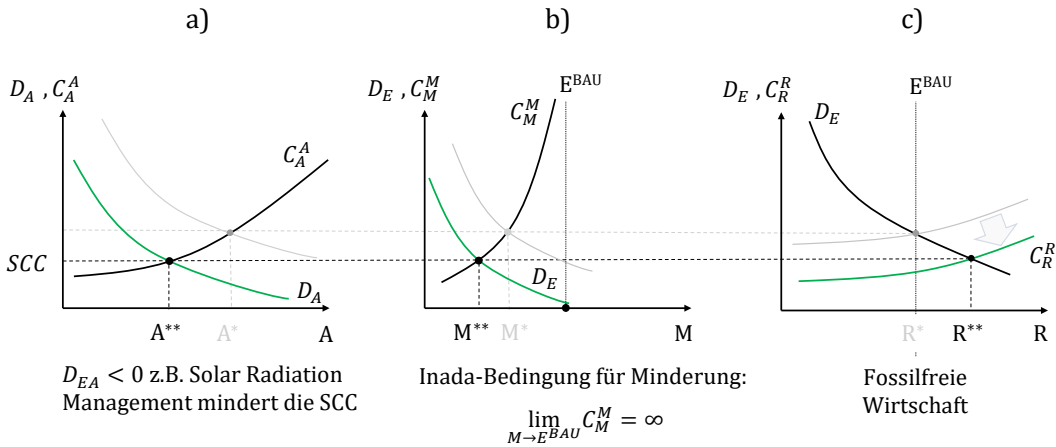


Abbildung 1: Die optimale Arbeitsteilung zwischen den drei Säulen der Klimapolitik
Quelle: eigene Darstellung

auch gemäß Kompensationsprinzip („compensating-the-polluter principle“). In gleicher Höhe muss auch die Bereitstellung der Kohlenstoffsenken entgolten werden, da diese die Atmosphäre als Deponieraum entlasten: „Clean up the mess“ ist hier, zusätzlich zum Polluter-pays-Prinzip, ein weiteres grundlegendes ethisches Prinzip, das in einer Neuaufstellung der internationalen Klimapolitik zum Tragen kommen muss. Da wir hier von der Geltung des zweiten Hauptsatzes der Wohlfahrtstheorie ausgehen, können die Verteilungsfragen unabhängig von den Effizienzfragen erörtert werden. Dies gilt zum Beispiel für die Überlegung, ob an der Finanzierung von Kohlenstoffsenken vor allem diejenigen beteiligt werden sollen, die den Deponieraum der Atmosphäre in der Vergangenheit besonders intensiv genutzt haben.

Um die Bedeutung von CDR für die Klimapolitik zu erfassen, muss die nach dem japanischen Ökonomen Ken-Ichi Inada (1963) benannte Bedingung berücksichtigt werden, die den Vermeidungssektor vom Entnahmesektor unterscheidet: Die Grenzkosten der Vermeidung konvergieren gegen unendlich, wenn nahezu alle Emissionen des Business-as-usual-Szenarios vermieden werden sollen. Diese Inada-Bedingung gilt für den Entnahmesektor nicht, denn dieser kann zu endlichen Grenzkosten große Mengen negativer Emissionen erzeugen. Überschreitet die Summe von Vermeidung und Entnahme die Emissionen des BAU-Szenarios, entstehen netto-negative Emissionen. Sinken die Grenzkosten der Entnahme (siehe Abbildung 1c), so sinken die Klimaschäden durch das zusätzlich entnommene CO_2 sinken. Damit wird auch das klimapolitische Gewicht, das auf der Anpassung und der Vermeidung lastet, vermindert (siehe Abbildung 1a und b).

Wir sind hier an der Frage interessiert, welche Rolle die CO_2 -Entnahme für die künftige Klimapolitik spielen soll.

Daher stellen wir einen Vergleich zwischen CDR und „Solar radiation management“ (SRM) als einer besonderen Form der Anpassung an. Wir gehen davon aus, dass letzteres zwar die Temperatur reduziert, indem durch das Einbringen von Aerosolen in die Stratosphäre oder durch das Aufspannen von Sonnensegeln im Weltall die Strahlungsbilanz der Erde direkt verändert wird. Gäbe es nur temperaturbedingte Schäden, wäre SRM ein perfektes Substitut zu Vermeidung und Entnahme. In Gleichung (2) würde dann schlicht die Übereinstimmung der Grenzkosten der Anpassung mit den SCC hergestellt werden. In Abbildung 1a haben wir diesen extremen Spezialfall zu illustrativen Zwecken angenommen: Das Ausmaß der Nutzung von SRM wird durch die SCC bestimmt. Wir können jedoch nicht davon ausgehen, dass es ein perfektes Substitut ist, weil zum Beispiel die Versauerung der Ozeane dadurch nicht vermindert wird. Auch verändert diese Technologie die regionalen Niederschlagsmuster nicht. Sie ist daher nur ein imperfektes Substitut (Heutel et al. 2018).

Damit lässt sich die Frage klären, unter welchen Bedingungen die CO_2 -Entnahme gegenüber den anderen Optionen als Gamechanger zu betrachten ist. Konkret: Unter welchen Bedingungen wird Entnahme gegenüber SRM vorgezogen, wenn sich in beiden Sektoren Kostensenkungen durchsetzen? Dabei unterstellen wir zur Illustration, dass der technische Fortschritt für beide Bereiche gleich hoch ist, und betrachten die Veränderung des „Portfolios“ der Klimapolitik, bestehend aus Vermeidung, Anpassung und Entnahme.² Eine Verschiebung des Portfolios hin zu Entnahme ist für den Fall eines perfekten Substituts dann (und

² Die Herleitung der folgenden Gleichungen findet sich im Anhang von Edenhofer et al. 2024b.

nur dann) vorteilhaft, wenn die Grenzkosten dort langsamer steigen als bei SRM:

$$C_{AA}^A > C_{RR}^R \quad (3)$$

Dies ist eine empirische Frage, die noch weitgehend ungeklärt ist. Bisherige Untersuchungen gehen von relativ flachen, aber auch steigenden technischen Grenzkosten für SRM aus (Meier und Traeger 2022). Zur Berücksichtigung der bisher nicht umfassend quantifizierten sozialen Schäden durch SRM werden oft quadratische Schäden angenommen (Moreno-Cruz und Keith 2013, Belaia et al. 2021 sowie Helwegen et al. 2019). Wichtig ist jedoch, dass dabei sämtliche sozialen Kostenbestandteile berücksichtigt werden müssen, vor allem die Terminierungskosten: Wird diese Technologie beispielsweise aufgrund einer globalen Krise, wie einer Pandemie oder einem großen geopolitischen Konflikt, eingestellt, steigt die Temperatur sprunghaft an. Dies wiederum hat dramatische Konsequenzen für die Gesellschaft, aber auch für das Erdsystem – beide können sich in so kurzer Zeit kaum an mehrere Grad Erwärmung innerhalb weniger Jahre anpassen.

In dem Fall, dass SRM ein imperfektes Substitut zu CDR ist und die Schäden des Klimawandels nur sehr begrenzt vermindern kann, wird diese Technologie wenig eingesetzt. Gleichung (4) zeigt, dass sie selbst bei Kostensenkung nur dann verstärkt eingesetzt wird, wenn die Grenzschaäden des Klimawandels steil sind, also D_{EE} entsprechend hoch ist, wenn also gilt:

$$C_{AA}^A - \frac{D_{EE} C_{MM}^M}{C_{MM}^M + D_{EE}} < C_{RR}^R \quad (4)$$

Mit anderen Worten: SRM wird bestenfalls moderat eingesetzt, um die schlimmsten Temperaturschäden zu glätten, spielt aber in der Klimapolitik keine tragende Rolle.

Ob einzelne Staaten oder gar die gesamte Staatengemeinschaft das Glätten der Temperatur erwägen, ist bislang offen. Die Schweiz hat sich für ein globales Engagement zu SRM ausgesprochen; die Afrikanische Union lehnt weitere Schritte in diese Richtung ab; China, Indien und Russland haben noch keine klare Position dazu entwickelt (Biermann und Gupta 2024). Möglicherweise wollen einige Staaten SRM vor allem als Drohung einsetzen, um die Hauptemittenten zum Handeln zu bewegen (vgl. Abschnitt 4).

3 Die grüne Null: Harte intertemporale Budgetbeschränkungen, steigende Klimaschäden und Erwartungen an den künftigen technischen Fortschritt

In der statischen Analyse konnte geklärt werden, unter welchen Bedingungen CO_2 -Entnahme aus gesamtgesellschaftlicher Perspektive vorteilhaft ist und auch, unter welchen Bedingungen CDR einem SRM vorgezogen wird, wenn es in beiden Sektoren zu einem kostensenkenden technischen Fortschritt kommt. Die Frage, in welchem Ausmaß es zu einem Überschießen von Temperatur und Emissionen kommt, und wann die Kompensation dieser Kohlenstoffschuld einsetzen soll, harrt noch einer Antwort. Man kann den statischen Modellrahmen auf eine recht einfache Weise dynamisieren:

$$SCC(t) = P(t)MAC \quad (5)$$

Gleichung (5) erweitert Gleichung (1) um einen Faktor P , der als Parameter für den technischen Fortschritt fungiert: Die Grenzschaäden des Klimawandels (die SCC) müssen gleich den effektiven Grenzkosten sein. Wir können für unsere Zwecke den Entnahmesektor und den Vermeidungssektor zusammenfassen, weil wir davon ausgehen können, dass die Entnahmetechnologien umso stärker genutzt werden, je stärker die Grenzkosten der Emissionsminderung („marginal abatement costs“, MAC) steigen. Mit anderen Worten: Ist die Inada-Bedingung im Vermeidungssektor erfüllt, so wird die Entnahme vermehrt genutzt. Wir unterscheiden nun drei Phasen der Klimapolitik, die wir mit Hilfe von Gleichung (5) charakterisieren können.

Wie Abbildung 2 zeigt, sind die SCC in der ersten Phase niedrig und die Grenzvermeidungskostenkurve (GVK) für Netto-Vermeidung liegt recht hoch ($t=1$). Als Resultat sind positive Netto-Emissionen optimal. Durch die positiven Emissionen verstärkt sich die Erderwärmung, die Klimaschäden werden größer – das heißt, die SCC erhöhen sich. Gleichzeitig verschiebt sich die GVK der Netto-Vermeidung durch den technischen Fortschritt nach unten und damit die SCC/P-Kurve nach oben: Die Klimapolitik wird immer ambitionierter, bis die Emissionen in der zweiten Phase netto-negativ werden ($t=2$). Wenn nun netto-negative Emissionen realisiert werden, können die SCC wieder sinken, bis in einem Steady state die Netto-Null erreicht ist. Ohne CO_2 -Entnahme wäre diese Dynamik nicht möglich – hier würden allenfalls die Emissionen langsam gegen null konvergieren, aber es gäbe keine Phase negativer Netto-Emissionen. Je stärker die SCC steigen und je höher das erwar-

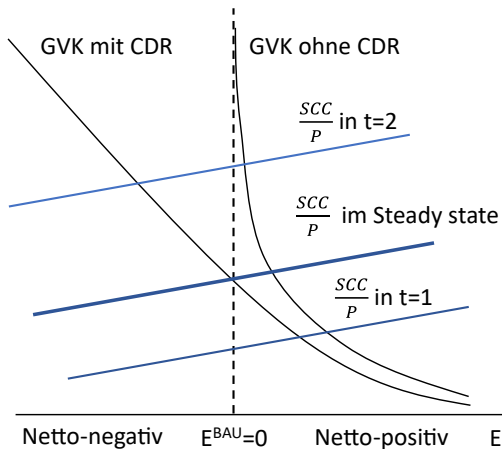


Abbildung 2: Optimale Overshoot-Pfade

Anmerkung: Je schneller die SCC steigen und je stärker die CDR-Kosten fallen, desto früher werden Netto-Negativ-Emissionen erreicht.

Quelle: eigene Darstellung

tete Kostensenkungspotenzial ist, umso schneller tritt die Klimapolitik in die Phase der Netto-Negativ-Emissionen ein; umso stärker wird auch der Overshoot ausfallen, das Überschießen von Temperatur und Emissionsbudget.

Die dritte Säule der Klimapolitik erweitert somit den Möglichkeitsraum in zwei Richtungen: Sie senkt die volkswirtschaftlichen Kosten der Klimapolitik – oder sie erlaubt ehrgeizigere Klimaziele. Möglich wird das durch eine größere sektorale und zeitliche Flexibilität. Einem vorübergehenden Überschießen des globalen Kohlenstoffbudgets, und damit auch der Temperatur, steht eine spätere Kompensation gegenüber. Ein Modell eines sozialen Planers liefert dann zeitkonsistente Ergebnisse, wenn die Klimaschäden berücksichtigt werden müssen. Verwendet der soziale Planer jedoch eine Kosten-Effektivitäts-Analyse, verschwindet die Zeitkonsistenz. Es ist für den sozialen Planer dann rational, die Rückzahlung der Kohlenstoffschuld ständig zu verschieben, weil die gewonnene Flexibilität für ihn keine Kosten in Form von zusätzlichen Klimaschäden verursacht. Das Einhalten einer grünen Null ist also nur dann eine zeitkonsistente Politik, wenn die Schäden des Klimawandels systematisch erfasst werden. Dies ist ein weiterer Grund, warum die SCC-Schadensmetrik in der Klimapolitik Verwendung finden sollte, um das Einhalten der grünen Null rational zu ermöglichen.

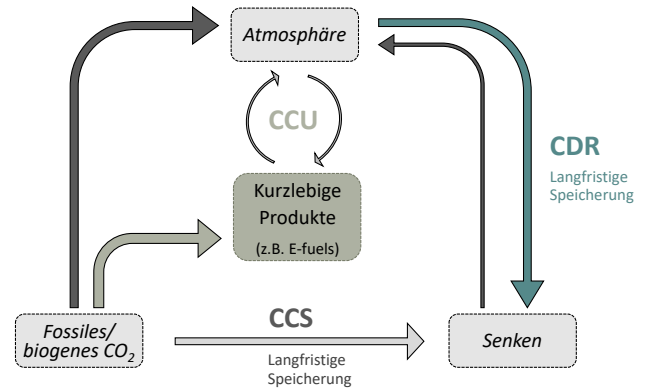


Abbildung 3: Der industrielle Kohlenstoffkreislauf

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Carbon Gap 2022 sowie Smith et al. 2023

4 Das Portfolio der CDR-Technologien und der globale Kohlenstoffkreislauf

Bei den CDR-Optionen handelt es sich um ein Portfolio von Techniken, die technische oder natürliche Kohlenstoffspeicher bereitstellen. Diese Techniken dürfen jedoch nicht isoliert betrachtet werden, sondern als Teil des industriellen Kohlenstoffkreislaufs, wie er in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre kann vor allem dann eine Klimawirkung entfalten, wenn sie mit dauerhafter Speicherung wie bei „Carbon capture and storage“ (CCS) kombiniert wird.

Bereits heute kommen konventionelle, insbesondere landbasierte Methoden der CO_2 -Entnahme zum Einsatz: die Aufforstung, die Nutzung von Holzprodukten und die Speicherung von Kohlenstoff im Boden gehören dazu. Die technischen Methoden zur Bereitstellung von Kohlenstoffsensken reichen von technischen Luftfiltern („direct air carbon capture and storage“, DACCS) über die Nutzung von Bioenergie zur Herstellung von Strom und Wärme mit gleichzeitiger Kohlenstoffspeicherung in geologischen Formationen („bioenergy with carbon capture and storage“, BECCS), bis hin zu Ozeandüngung und beschleunigter Verwitterung. Luftfilter müssen nicht unbedingt in Verbindung mit CCS verwendet werden; atmosphärisches CO_2 kann auch in Verbindung mit Wasserstoff zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe genutzt werden. Hierbei spricht man von „Carbon capture and usage“ (CCU). Dies ist dann lediglich treibhausgasneutral, erzeugt also entlang der Wertschöpfungskette keine negativen Emissionen.

Die Kernaufgabe eines industriellen Managements des Kohlenstoffkreislaufs besteht darin, für die Treibhausgase,

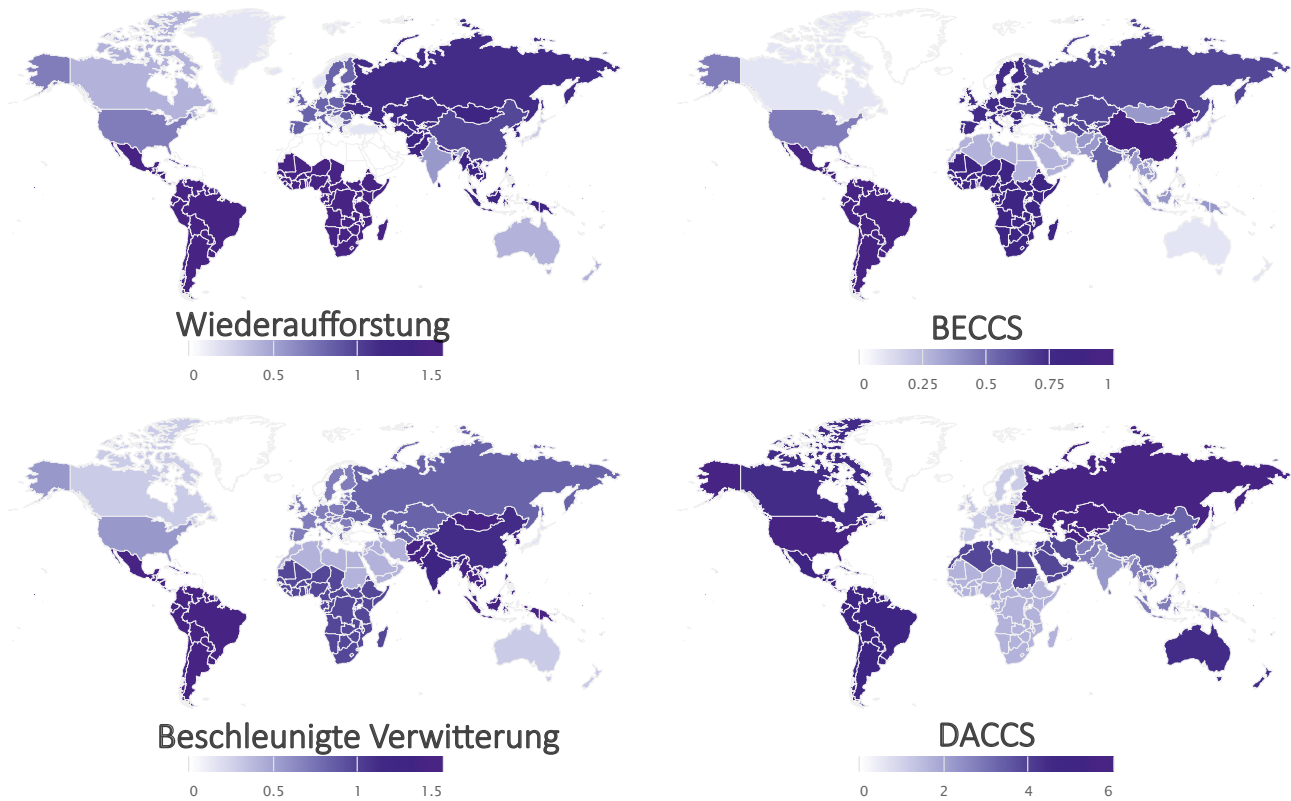


Abbildung 4: Die internationale Arbeitsteilung von CDR
 Anmerkung: Regionaler CDR-Einsatz im Jahr 2100 (Gigatonnen CO₂ pro Jahr)
 Quelle: Berechnung und Darstellung durch J. Streffler (PIK)

insbesondere für CO₂, einen zur Atmosphäre alternativen dauerhaften oder (bei CCU) zumindest vorübergehenden Speicher zu finden. Wir haben bislang vorausgesetzt, dass für CO₂ ein dauerhafter Speicher gefunden werden kann. Aber die verschiedenen Entnahmetechnologien unterscheiden sich nicht nur im Hinblick auf ihr technisches Potenzial und ihre Kosten, sondern vor allem im Hinblick auf die Speicherfähigkeit. Es zeigt sich, dass es sinnvoll ist, auch nicht-permanente Speichermethoden einzusetzen. Die später entweichenden Emissionen müssen entweder durch permanente Methoden oder durch neuerliche nicht-permanente Methoden entzogen werden. Werden sie durch permanente Methoden ersetzt, ist eine dauerhafte Speicherung erreicht und die Kohlenstoffschuld abgetragen. Werden sie neuerlich durch nicht-permanente Entnahme kompensiert, ist die Kohlenstoffschuld nur vorübergehend abgetragen. Es müssen wiederum neue Kohlenstoffspeicher in dem Umfang bereitgestellt werden, wie sich die alten entleeren. Das ständige Abtragen der Kohlenstoffschuld ähnelt dem Bemühen des Sisyphos: Die Menschheit muss immer wieder ihre Kohlenstoffschuld abtragen oder neue Kohlenstoffspeicher bereitstellen (Franks et. al. 2024).

Offenkundig ist der ökonomische Wert nicht-permanenter Kohlenstoffsinken geringer als der Wert von Senken, die Treibhausgase dauerhaft speichern. Eine Beispielrechnung kann dies verdeutlichen: Bei einer Diskonttrate von 2 Prozent und einer Speicherdauer von zehn Jahren hätte eine solche Kohlenstoffsinke nur 17 Prozent des Wertes einer dauerhaften Kohlenstoffsinke. Die SCC müssen mit dem Faktor $\frac{r}{r+\delta}$ abdiskontiert werden (Franks et. al. 2024). Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive ist die Nutzung von nicht-permanentem CDR dennoch sinnvoll, da die intertemporalen Kosten geglättet werden können. Auch ist der Einsatz von nicht-permanenten CDR-Optionen sinnvoll, wenn die permanenten Optionen noch nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen oder anfänglich noch zu teuer sind.

Einen Überblick über die Entnahmooptionen und ihre regionale Verteilung erhält man durch Szenarien integrierter Bewertungsmodelle („integrated assessment models“), wie sie zum Beispiel für unsere Zwecke mit dem REMIND-Modell gerechnet wurden. Wie Abbildung 4 zeigt, käme bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein breites Portfolio von Optionen zum Einsatz. Die Arbeitsteilung zwischen den verschiedenen Regionen ergibt sich aus den kompa-

rativen Kostenvorteilen: So könnte Russland vom Einsatz von DACCS profitieren, da dort ausreichend und kostengünstige geologische Lagerstätten zur Verfügung stehen. BECCS wäre vor allem eine Option für Lateinamerika und Afrika. Die Wiederaufforstung ist besonders in tropischen Regionen vorteilhaft, da dort pro Hektar mehr Kohlenstoff gespeichert werden kann als in den kühleren nördlichen Regionen; auch hier haben Lateinamerika und Afrika sowie Südostasien das größte Potenzial. Für die beschleunigte Verwitterung ist die Verfügbarkeit von Ackerland in warmen und feuchten Gegenden entscheidend, weshalb Indien, China und der lateinamerikanische Kontinent hier einen komparativen Vorteil besitzen.

5 CDR und internationale Kooperation

Die internationale Kooperation in der Klimapolitik scheitert im Kern an den Anreizen zum Trittbrettfahren, und dies aus zwei Gründen. Erstens profitieren alle von der Vermeidung der Klimaschäden, wodurch ein Ausscheren aus den Klimaabkommen attraktiv wird. Zweitens entsteht bei einer unilateralen Emissionsvermeidung Carbon leakage. Die verminderte (unilaterale) Nutzung fossiler Energieträger senkt deren Preise und reduziert die unilateralen Einsparbemühungen, weil andere Staaten die billigeren fossilen Energieträger nutzen können (Franks et al. 2023).

Der Einsatz von CO₂-Entnahmen beseitigt zwar nicht alle Anreize zum Trittbrettfahren, verbessert jedoch das Nash-Gleichgewicht und verringert den Abstand zum sozialen Optimum. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, gehen wir in zwei Schritten vor: Zunächst betrachten wir den Fall symmetrischer Länder und führen im zweiten Schritt Netto-Exportländer und Netto-Importländer fossiler Energieträger ein.³

Grundsätzlich entscheidet sich jedes Land für seine optimale Arbeitsteilung zwischen Emissionsminderung und Entnahmen. Dabei werden nicht nur die Grenzkosten der verschiedenen Optionen berücksichtigt, sondern auch das Ausmaß des Carbon leakage: Je höher die Carbon-leakage-Rate ist und je geringer die Grenzkosten von Entnahmen, desto stärker wird das Land in Entnahmen investieren. Entscheidend ist, dass sich bei der Entnahme die Anstrengungen aller Länder aufaddieren, sodass der Abstand zum sozialen Optimum verringert wird.

Wie verhält es sich mit der internationalen Kooperation, wenn zwischen Netto-Exportländern und Netto-Importländern fossiler Energieträger unterschieden wird? Eine verstärkte Investition in die Emissionsminderung reduziert die Nachfrage nach Kohle, Öl und Gas und damit deren Preise. In diesem Szenario profitieren die Netto-Importländer, während die Netto-Exportländer verlieren. Die Netto-Importländer investieren daher verstärkt in die Emissionsvermeidung.

Da jedoch die Netto-Exportländer durch diese Entwicklung ihre Ressourcenrenten verlieren, haben sie einen Anreiz, verstärkt in CO₂-Entnahmetechnologien zu investieren, was die Nachfrage nach fossilen Energieträgern erhöht. Denn im Übergang zur klimaneutralen Wirtschaft werden fossile Energieträger auch für Entnahmetechnologien genutzt. Durch die Veränderung der Terms-of-trade verlieren die Netto-Importländer, während die Netto-Exportländer gewinnen: Erstere werden weniger in Entnahmen investieren, letztere hingegen mehr. Die Terms-of-trade treiben also einen Keil zwischen den Preis für Entnahmen und den Preis für die Emissionsvermeidung. Die Netto-Exportländer subventionieren CO₂-Entnahmen, während die Netto-Importländer ihre fossilen Importe besteuern und sich damit einen Teil der Ressourcenrente der Besitzer von Kohle, Öl und Gas aneignen. Das globale Ambitionsniveau ändert sich im Vergleich zum symmetrischen Fall jedoch nicht; lediglich die Arbeitsteilung zwischen Export- und Importländern wird modifiziert.

Mit CDR verschwinden allerdings nicht alle Kooperationsprobleme der internationalen Klimapolitik. Nach wie vor besteht der Anreiz, dass sich jedes einzelne Land als Trittbrettfahrer verhält, da die Vermeidung von Klimaschäden ein öffentliches Gut ist. In der Literatur werden hierzu vor allem drei Klassen von Vorschlägen unterbreitet: Erstens könnten Koalitionen (Klima-Clubs) gebildet werden, die gegen Trittbrettfahrer Klimazölle verhängen (vgl. Nordhaus 2015 sowie Lessmann et al. 2009). Zweitens könnten solche Klima-Clubs Technologien untereinander gratis teilen (vgl. Lessmann und Edenhofer 2011). Drittens könnte die internationale Kooperation durch die Zahlung von Transfers über einen Fonds stabilisiert werden (vgl. Kornek und Edenhofer 2020).

Ein weiterer Vorschlag ist der Einsatz von SRM, um eine Koalition der Vermeidungswilligen zu stabilisieren: Durch den unilateralen Einsatz („free driver“) werden für die anderen Länder Externalitäten erzeugt, beispielsweise weil sich die Niederschlagsmuster verändern. Dadurch, so die Hoffnung, könnte sich eine Koalition von Vermeidungswilligen („anti drivers“) bilden, die das Kooperationsproblem zu lösen vermag (McEvoy et al. 2024), indem sie ihre Vermeidungsanstrengungen verstärkt, um

³ Die formalen Herleitungen zu diesem Modell sind in Edenhofer et al. 2024b dargelegt.

den drohenden Einsatz abzuwenden. Dies ist umso wahrscheinlicher, je heterogener die Länder sind. Denn die ungleich verteilten Wirkungen dieser Technologie erzeugen die Externalitäten, die einen Anreiz schaffen, den Einsatz durch verstärkte Emissionsminderung zu verhindern. Die unilaterale Drohung wird jedoch nur dann erfolgreich sein, wenn die anderen Staaten die Möglichkeit haben, darauf mit Emissionsminderung zu reagieren. Es könnte jedoch für sie vorteilhafter sein, sich an die Veränderung der Niederschlagsmuster anzupassen. In diesem Fall wäre die Weltgemeinschaft durch SRM noch weiter von einer kosteneffizienten Arbeitsteilung zwischen Vermeidung, Anpassung und Entnahme entfernt. Vor diesem Hintergrund könnten Klimazölle, Technologieclubs und internationale Fonds sehr viel vorteilhafter zur Stabilisierung internationaler Kooperationen sein.

6 Der Europäische Emissionshandel und die grüne Null

Die Europäische Union ist ein interessantes Laboratorium für den künftigen Regulierungsrahmen. Die europäischen Klimaziele setzen voraus, dass in beträchtlichem Ausmaß in CO₂-Entnahmen investiert wird. Bis 2050 könnte jährlich knapp 1 Prozent des europäischen Sozialprodukts in diesen Sektor fließen (Edenhofer und Leisinger 2024). Global würde dieser Anteil bei 3 Prozent liegen, wenn man davon ausgeht, dass bis 2050 bis zu 15 Gigatonnen CO₂ jährlich aus der Atmosphäre entzogen werden (Edenhofer et al. 2024a).

Nach der aktuellen Lage könnte der Europäische Emissionshandel dazu genutzt werden, CO₂-Entnahmen zu finanzieren. Sollte dies grundsätzlich gelingen, hätte es auch eine Signalwirkung auf andere Regionen der Welt, die vor ähnlichen Herausforderungen stehen und sich mit dem Aufbau eines nationalen Emissionshandels beschäftigen.

Bislang wird in der EU darüber diskutiert, wie im Europäischen Emissionshandel Netto-Null erreicht werden kann. Vermutlich wird im bestehenden Handelssystem für Energie und Industrie das letzte Zertifikat 2039 versteigert. Die Restemissionen in einigen Sektoren, beispielsweise in der Zementindustrie, können wahrscheinlich nur zu extrem hohen Kosten vermieden werden. Daher könnten die Preise in den vierziger Jahren des 21. Jahrhunderts drastisch steigen, wenn nicht die Möglichkeit geschaffen wird, diese Restemissionen durch Entnahmen zu kompensieren (Pahle et al. 2023 sowie Sultani et al. 2024). Da die Handelnden auf den Märkten bereits heute Investitionsentscheidungen treffen und auch Zertifikate horten, muss dieser Regulierungsrahmen bald geschaffen werden.

Damit ist jedoch noch nicht gesichert, dass im EU ETS netto-negative Emissionen generiert werden können. Wir schlagen daher zwei Reformschritte vor (Lessmann et al. 2024). In einem ersten Schritt sollte ein neuer Zertifikatstyp eingeführt werden – die Clean-Up-Zertifikate. In einem zweiten Schritt sollte eine ECCB, eine europäische Kohlenstoffzentralbank eingerichtet werden, um die Kohlenstoffmärkte zu regulieren.

Eine Einführung von Clean-Up-Zertifikaten würde die Finanzierung von netto-negativen Emissionen ermöglichen, da dies beispielsweise Öl- und Gasunternehmen erlauben würde, Zertifikate für zusätzliche Emissionen zu erwerben. Mit dieser Berechtigung gehen die Firmen jedoch gleichzeitig eine Kohlenstoffschuld ein, die sie zu einem späteren Zeitpunkt abtragen müssen. Für die Unternehmen ist dies nur dann eine lohnende Option, wenn sie damit rechnen können, dass die Kosten von CO₂-Entnahmen in Zukunft ausreichend gering sind; andernfalls wäre es kosteneffizienter, in die Verminderung von Emissionen zu investieren. Wenn die Unternehmen auf den technischen Fortschritt vertrauen, erwerben sie diesen neuen Zertifikatstyp; misstrauen sie ihm, ist diese Option für sie nicht lohnend. Der Erwerb der Clean-Up-Zertifikate führt zu sinkenden Preisen im Emissionshandel, weil eine kosten-senkende Flexibilität geschaffen wird. Im Kern ist die Einführung dieses neuen Zertifikatstyps gleichbedeutend mit einem Emissionshandel, in dem nicht nur Banking, sondern auch Borrowing erlaubt ist. Mit anderen Worten: Man leiht von der Zukunft, erzeugt aber bereits heute eine Nachfrage nach CDR.

Um zu verhindern, dass Kohlenstoffschulden generiert werden, die in Zukunft nicht abgetragen werden und zugleich die Verminderung von Emissionen unterminieren, bedarf es zweier Sicherungshaken. Zum einen kann die EU-Kommission in einem gewissen Umfang die herkömmlichen Zertifikate stilllegen. Die Unternehmen haben sich zwar individuell eine zusätzliche Flexibilität erkaufte, doch der Markt als Ganzes kann die Minderungsleistung nicht zur Gänze in die Zukunft verschieben. Würde die EU-Kommission die Ausgabe der Clean-Up-Zertifikate vollständig durch den Entzug der konventionellen Zertifikate kompensieren, käme dies einer Verschärfung des Klimaziels zu konstanten CO₂-Preisen gleich. Hier besteht also ein Verhandlungsspielraum zwischen Industrie, EU-Kommission, Umweltverbänden und Parlament. Es ist entscheidend, dass der Regulierer mit dieser Option ausgestattet wird, wenn sich herausstellen sollte, dass die Klimaschäden sehr viel höher sind – aufgrund einer höherer Klimasensitivität – und dass zugleich das Potenzial für CDR sehr viel begrenzter ist als erwartet. Unter dieser Voraussetzung ist es sinnvoll, das Klimaziel zu verschärfen (Schleussner et al. 2024).

Der zweite Haken muss das Ausfallrisiko bei Konkurs der Unternehmen absichern. Daher soll eine Sicherheitseinlage (Collateral) in Höhe der Kohlenstoffschuld an eine ECBB gezahlt werden. Wird der Kohlenstoff physisch der Atmosphäre entzogen, so wird die CO₂-Schuld von der ECBB an die Besitzer der Sicherheitszertifikate zurückbezahlt. Geschieht dies nicht, behält die ECBB diese in voller Höhe ein. Entscheidend ist, dass diese Sicherheiten handelbar sind. Hat das Unternehmen die Sicherheitseinlage bezahlt, kann es diese auf dem Markt verkaufen. Je nach Einschätzung des technischen Fortschritts und der Glaubwürdigkeit des Unternehmens wird sich auf diesem Markt ein Preis bilden. Dieser schafft bereits heute eine Nachfrage nach CDR. Zugleich ist deren Finanzierung gesichert. Die ECBB fungiert über die Sicherheitseinlagen als „Lender of last resort“, der verhindert, dass sich Kohlenstoffschulden anhäufen, die nie mehr zurückbezahlt werden.

7 CDR – Ein Gamechanger?

Das Aufkommen von Technologien zur Entnahme von CO₂ verändert die Klimapolitik grundlegend. Erstens senkt es die Kosten des Klimaschutzes durch erhöhte sektorale und intertemporale Flexibilität, insbesondere weil auch ein temporäres Überschreiten von Temperaturzielen kompensiert werden kann. Konventionelle Anpassungsmaßnahmen und SRM können in begrenztem Umfang eingesetzt werden, verlieren jedoch gegenüber CDR an Bedeutung – und zwar je stärker die SCC steigen und je mehr die Kosten von CDR sinken. Zweitens kann die Entnahme von CO₂ die internationale Kooperation erhöhen und damit in den künftigen Klimaverhandlungen ein neues politisches Momentum erzeugen. Drittens braucht die CO₂-Bepreisung institutionell ein neues Fundament, damit netto-negative Emissionen auch ohne zusätzliche Steuermittel finanziert werden können. Auf europäischer Ebene kann dies durch die Einführung neuartiger Clean-Up-Zertifikate und die Einrichtung einer ECBB bewerkstelligt werden.

Johann Heinrich von Thünen (1783–1850), der Namensgeber dieser Vorlesungsreihe, war nicht nur einer der Ahnherren der Allgemeinen Gleichgewichtstheorie (Samuelson 1983). Er gehört auch zu den ersten Ökonomen, die vor der Übernutzung lokaler Common-Pool-Ressourcen gewarnt haben (Nellinger 2014). Er antizipierte bereits zentrale Einsichten, die Elinor Ostrom 160 Jahre später in ihrem Buch „Governing the Commons“ analysiert hat (Ostrom 1990). Mit dem Klimawandel drohen die globalen Gemeinschaftsgüter wie Atmosphäre, Böden, Ozeane und Wälder in einem

Ausmaß übernutzt zu werden, wie es für das gesamte Holozän ohne Beispiel ist.

Thünen schlug Maßnahmen vor, um beispielsweise die Übernutzung lokaler Fischbestände zu verhindern. Es ging ihm um die Sicherung des Wohlstands im Mecklenburg des 19. Jahrhunderts. Die Anwendung seiner Einsichten und Vorschläge, die er für lokale Gemeinschaftsgüter entwickelte, stellt für die Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter eine große Herausforderung dar: Denn bereits in 26 Jahren soll ein Viertel der heutigen Emissionen der Atmosphäre entzogen und in geologischen Formationen gelagert werden (UNEP 2023a sowie Smith et al. 2024). CDR-Techniken sind keine Nischentechniken. Der Aufbau einer planetarischen Müllabfuhr ist eine gewaltige Aufgabe, die der Sicherung des künftigen Wohlstandes der Menschheit dient. Wir haben gangbare und doch mutige Schritte dazu skizziert und bewertet.

Danksagungen:

Wir danken Jacob Edenhofer, Friedemann Gruner, Ulrich von Lampe, Christopher Leisinger, Lennart Stern und Jessica Streffer für ihre Unterstützung und die wertvollen Hinweise zur Erstellung der Thünen-Lecture 2024 und dieses Beitrags.

Ethik-Erklärung:

Forschungsethik: Die Autoren haben hierzu keine Angaben zu machen.

Beiträge zur Veröffentlichung: Die Autoren haben die Verantwortung für den gesamten Inhalt dieses Manuskripts übernommen und dessen Einreichung genehmigt.

Interessenkonflikte: Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Forschungsfinanzierung: Die Autoren haben keine Forschungsfinanzierung angegeben.

Datenverfügbarkeit: Die Autoren haben hierzu keine Angaben zu machen.

Literaturverzeichnis

- Belaia, M., J. B. Moreno-Cruz und D. W. Keith (2021), Optimal climate policy in 3D: Mitigation, carbon removal, and solar geoengineering, *Climate Change Economics* 12(3), 2150008.
- Bilal, A.I. und D. R. Känzig (2024), The macroeconomic impact of climate change: Global vs. local temperature, *NBER Working Paper* w32450.
- Biermann, F. und A. Gupta (2024), A paradigm shift? African countries call for the non-use of solar geoengineering at UN Environment Assembly, *PLOS Climate* 3(5), e0000413.
- Carbon Gap (2022), A guide to certifying carbon removal, online verfügbar unter https://carbongap.org/wp-content/uploads/2022/11/Carbon_Gap_White_Pater_Oct22_updateCRCF.pdf.

- Edenhofer, O. und C. Leisinger (2024), Das Klimaschutzprogramm der EU und Bundesregierung, in: J. L. Lozán et al. (Hrsg.), *Warnsignal Klima: Herausforderung Wetterextreme – Ursachen, Auswirkungen & Handlungsoptionen*, S. 345–50, online verfügbar unter <https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/buchreihe/herausforderung-wetterextreme/>.
- Edenhofer, O. et al. (2024a), On the governance of carbon dioxide removal – A public economics perspective, *FinanzArchiv – Public Finance Analysis* 80(1), S. 70–110.
- Edenhofer, O. et al. (2024b), The Economics of Carbon Dioxide Removal: A Governance Perspective, online verfügbar unter <https://www.pik-potsdam.de/~lessman/docs/CDR-review.pdf>.
- EPA – United States Environmental Protection Agency (2023), Report on the social cost of greenhouse gases: Estimates incorporating recent scientific advances, online verfügbar unter <https://www.epa.gov/environmental-economics/scghg>.
- Franks, M., M. Kalkuhl und K. Lessmann (2023), Optimal pricing for carbon dioxide removal under inter-regional leakage, *Journal of Environmental Economics and Management* 117, 102769.
- Franks, M. et al. (2024), Pigou's advice and Sisyphus' warning: Carbon pricing with non-permanent carbon-dioxide removal, *SSRN Working Paper*, online verfügbar unter https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4828800.
- Helweggen, K. G. et al. (2019), Complementing CO2 emission reduction by solar radiation management might strongly enhance future welfare, *Earth System Dynamics* 10(3), S. 453–72.
- Heutel, G., J. Moreno-Cruz und S. Shayegh (2018), Solar geoengineering, uncertainty, and the price of carbon, *Journal of Environmental Economics and Management* 87, S. 24–41.
- Inada, Ken-Ichi (1963), On a two-sector model of economic growth: Comments and a generalization, *Review of Economic Studies* 30(2), S. 119–27.
- Kornek, U. und O. Edenhofer (2020), The strategic dimension of financing global public goods, *European Economic Review* 127(C), 103423.
- Kotz, M., A. Levermann und L. Wenz (2024), The economic commitment of climate change, *Nature* 628(8008), S. 551–57.
- Lessmann, K., F. Gruner, M. Kalkuhl und O. Edenhofer (2024), Emissions trading with clean-up certificates: Detering mitigation or increasing ambition?, *CESifo Working Paper* 11167.
- Lessmann, K., R. Marschinski und O. Edenhofer (2009), The effects of tariffs on coalition formation in a dynamic global warming game, *Economic Modelling* 26(3), S. 641–49.
- Lessmann, K. und O. Edenhofer (2011), Research cooperation and international standards in a model of coalition stability, *Resource and Energy Economics* 33(1), S. 36–54.
- McEvoy, D. M. et al. (2024), International climate agreements under the threat of solar geoengineering, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 11(4), S. 853–86.
- Moreno-Cruz, J. B. und D. W. Keith (2013), Climate policy under uncertainty: A case for solar geoengineering, *Climatic Change* 121(3), S. 431–44.
- Meier, F. und C. P. Traeger (2022), SolACE – Solar geoengineering in an analytic climate economy, *SSRN Working Paper*, online verfügbar unter https://ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3958821.
- Nellinger, L. (2014), An unexpected discovery: Johann Heinrich von Thünen and the tragedy of the commons, *Thünen-Series of Applied Economic Theory – Working Paper* 135, online verfügbar unter <https://www.econstor.eu/handle/10419/93143>
- Nordhaus, W. (2015), Climate clubs: Overcoming free-riding in international climate policy, *American Economic Review* 105(4), S. 1339–70.
- Ostrom, E. (1990), *Governing the Commons*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Pahle, M. et al. (2023), The emerging endgame: The EU ETS on the road towards climate neutrality, *SSRN Working Paper*, online verfügbar unter https://ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4373443.
- Samuelson, P. A. (1983), Thünen at two hundred, *Journal of Economic Literature* 21(4), S. 1468–88.
- Schleussner, C. F. et al. (2024), Overconfidence in climate overshoot, *Nature* 634, S. 366–73.
- Smith, S. M. et al. (2024), *The State of Carbon Dioxide Removal Report 2024 – 2nd Edition*, online verfügbar unter <https://www.stateofcdr.org/edition-2-resources>.
- Smith, S. M. et al. (2023), *The State of Carbon Dioxide Removal Report 2023*, online verfügbar unter <https://www.stateofcdr.org/first-edition>.
- Sultani, D. et al. (2024), Sequencing CDR into the EU ETS, *CESifo Working Paper* 11173.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2023a), Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures Hit New Highs, Yet World fails to Cut Emissions (Again), online verfügbar unter <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2023b), One Atmosphere: An Independent Expert Review on Solar Radiation Modification Research and Deployment, online verfügbar unter <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/41903>.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (2023), Outcome of the First Global Stocktake, Draft Decision/CMA.5 Proposal by the President, online verfügbar unter <https://unfccc.int/documents/636608>.

Autoreninformation



Ottmar Edenhofer

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Telegrafenberg
14473 Potsdam
edenhofer@pik-potsdam.de

Ottmar Edenhofer (geb. 1961) ist seit 2018 wissenschaftlicher Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und Gründungsdirektor des Mercator Research Institute on Global Commons and Climate (MCC). Seit 2021 leitet er den European Scientific Advisory Board on Climate Change (ESABCC). Außerdem ist er seit 2008 Professor an der Technischen Universität Berlin für die Ökonomie und Politik des Klimawandels. Von 2001 bis 2007 war er an der Erstellung des Vierten Sachstandsberichts des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) beteiligt, der 2007 den Friedensnobelpreis erhielt. Von 2008 bis 2015 leitete er als Co-Vorsitzender dessen Arbeitsgruppe 3. Er ist Mitglied der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften acatech. In seiner Forschung

beschäftigt er sich mit den Grundlagen der Klimaökonomik und der Klimapolitik. 2020 wurde er mit Umweltpreis der Bundesstiftung Umwelt ausgezeichnet. Foto: Matthias Lüdecke

**Matthias Kalkuhl**

Mercator Research Institute on Global
Commons and Climate Change
EUREF Campus 19
Torgauer Straße 12–15
10829 Berlin
kalkuhl@mcc-berlin.net

Matthias Kalkuhl (geb. 1982) ist seit 2023 Co-Leiter des Mercator Research Institute on Global Commons and Climate (MCC). Seit 2015 leitet er die Arbeitsgruppe Wirtschaftswachstum und menschliche Entwicklung am MCC und ist Professor für Klimawandel, Entwicklung und Wachstum an der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam. Zuvor war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung sowie am Zentrum für Entwicklungsforschung der Universität Bonn. In seiner Forschung arbeitet er vor allem zur CO₂-Bepreisung und der Verteilungswirkung der Klimapolitik. Foto: Tobias Hopfgarten