

Die Notwendigkeit negativer Emissionen für ein treibhausgasneutrales Deutschland – eine modellgestützte Analyse

1: Energie- / Klimapolitik

Thomas SCHÖB¹⁽¹⁾, Peter MARKEWITZ⁽¹⁾, Leander KOTZUR⁽¹⁾, Detlef STOLTEN^(1,2)

⁽¹⁾ Institut für Energie- und Klimaforschung: Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3),
Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich,

⁽²⁾ Lehrstuhl für Brennstoffzellen, RWTH Aachen University c/o Institut für Energie- und Klimaforschung:
Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich

Kurzfassung:

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt treibhausgasneutral zu werden. Entsprechend der aktuellen Novelle des Klimaschutzgesetzes ist vorgesehen, dass Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 erreicht werden muss. Hierfür müssen verbleibende Treibhausgasemissionen, deren Reduktion nicht möglich ist, durch negative Emissionen ausgeglichen werden. Die Analyse mit dem Optimierungsmodell FINE-NESTOR zeigt, dass im Jahr 2045 diese Residualemissionen größtenteils aus den Sektoren Landwirtschaft und Industrie stammen. Zur Kompensation dieser Treibhausgasemissionen sind negative Emissionen in Höhe von -76,5 Mt CO₂ notwendig, die durch die direkte Abscheidung von CO₂ aus der Luft oder die Nutzung von Biomasse mit Carbon Capture mit anschließender Speicherung in geologischen Lagerstätten erreicht werden kann. Werden die negativen Treibhausgasemissionen, die aus Wiederaufforstung, Landflächennutzungsänderung etc. (LULUCF-Sektor) resultieren, wie im Gesetzesentwurf vorgesehen mit -40 Mt CO₂-äq im Jahr 2045 in der Emissionsbilanz berücksichtigt, verringert sich der Bedarf an zusätzlichen negativen Emissionen auf -36,7 Mt CO₂. Dies bedeutet, dass der LULUCF-Sektor die für 2045 errechneten Residualemissionen nicht vollständig kompensieren kann und zusätzliche Maßnahmen notwendig sind, die eine Speicherung von CO₂ in geologischen Lagerstätten notwendig machen.

Keywords: Treibhausgasneutralität, negative Emissionen, LULUCF-Sektor

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich im Bundes-Klimaschutzgesetz vom Dezember 2019 [1] dazu verpflichtet bis zum Jahr 2050 das Ziel Treibhausgasneutralität zu verfolgen. Mit seinem Beschluss vom 24. März 2021 hat das Bundesverfassungsgericht [2] festgestellt, dass dieses Gesetz teilweise mit den Grundrechten unvereinbar ist, da es hohe Emissionsminderungen auf die Zeit nach dem Jahr 2030 verschiebt. Als Reaktion auf dieses Urteil hat die deutsche Bunderegierung am 11. Mai einen Gesetzesentwurf zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes vorgelegt [3], der am 24.6.2021 vom Deutschen Bundestag beschlossen wurde. Neben ambitionierteren Treibhausgasreduktionszielen für die Jahre 2030

¹ Jungautor, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Telefon: +491590 5332987, E-Mail: t.schoeb@fz-juelich.de, Web: https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/Home/home_node.html

und 2040 ist vorgesehen, Netto-Treibhausgasneutralität schon im Jahr 2045 zu erreichen. Zudem ist nun erstmalig der Beitrag von negativen Emissionen zur Zielerreichung dargelegt, um verbleibende Treibhausgasemissionen auszugleichen. Laut Gesetzentwurf soll der Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) im Jahr 2045 mit mindestens -40 Mt CO₂-äquivalente zur Erreichung der Netto-Treibhausgasneutralität beitragen, wobei der Beitrag des LULUCF-Sektors im Jahr 2020 bei -16,5 Mt CO₂-äq lag [4]. Ziel dieser Analyse ist es aufzuzeigen, dass für ein treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2045 negative Emissionen notwendig sind und den Emissionsbeitrag des LULUCF-Sektors im Hinblick auf das Gesamtsystem zu analysieren.

2 Modellierung

Die Analyse kostenoptimaler Emissionsminderungsstrategien bis hin zur Treibhausgasneutralität erfolgt mit dem Optimierungsmodell FINE-NESTOR [5], welches am Institut für Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3) des Forschungszentrum Jülichs entwickelt wurde und welches das deutsche Energiesystem abbildet. Das integrierte Energiesystemmodell bildet die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude und Verkehr detailliert stündlich aufgelöst durch ein Netzwerk aus Energiequellen, Transformationsprozessen, Speichern und Energienachfragen ab [6].

2.1 Emissionsbilanz des Optimierungsmodells FINE-NESTOR

Alle CO₂-Emissionen der oben genannten Sektoren sind durch die jeweiligen Prozesse in der Emissionsbilanz des Modells abgebildet. Zudem können die negativen Emissionen aus dem LULUCF-Sektor in der Emissionsbilanz des Modells durch exogene Annahmen berücksichtigt werden. Nicht-CO₂-Emissionen (z.B. Methan- oder Stickoxidemissionen) aus den modellierten Sektoren und den Sektoren Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft werden in der Treibhausgasbilanz durch die in Abbildung 1 dargestellten exogen vorgegebenen Emissionspfade berücksichtigt.

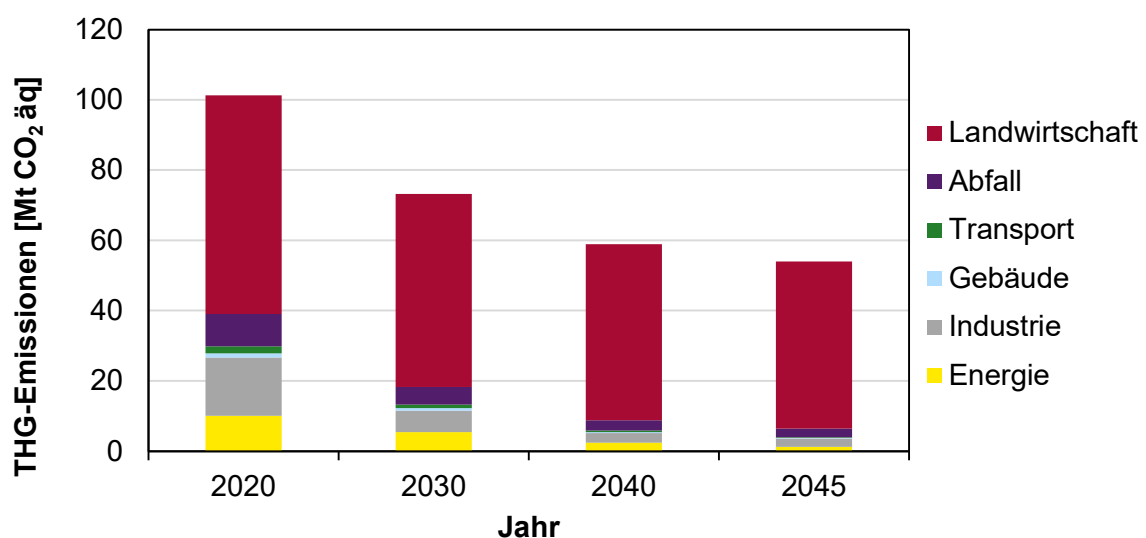


Abbildung 1: Exogen gesetzte Emissionspfade für Nicht-CO₂-Emissionen in Deutschland vom Jahr 2020 bis zur Treibhausgasneutralität im Jahr 2045

Während die Nicht-CO₂-Emissionen aus den Sektoren Energie, Industrie, Gebäude, Transport und Abfall zusammen im Jahr 2019 ca. 39,1 Mt CO₂-äq betragen [4], wird angenommen, dass diese bis 2045 auf insgesamt 6,4 Mt CO₂-äq reduziert werden können. Im Gegensatz dazu wird im Landwirtschaftssektor nur eine Emissionsreduktion auf 47,5 Mt CO₂-äq (2019: 62,1 Mt CO₂-äq) unterstellt. Es wird davon ausgegangen, dass im Landwirtschaftssektor eine Steigerung des ökologischen Landbaus erfolgt, die Stickstoff-Produktivität in der Düngung gesteigert wird und 80 % der anfallenden Gülle in Biogasanlagen vergärt wird [7]. Es wird das heutige Verhalten der Bevölkerung unterstellt, sodass die Nachfragen nach Energie, Gütern, Wohnfläche, Mobilität und die Essgewohnheiten fortgeschrieben werden. Dadurch bleiben auch die Viehbestände auf dem derzeitigen Niveau.

2.2 Negative Emissionstechnologien

Zur Erreichung der Netto-Treibhausgasneutralität stehen im Modell negative Emissionstechnologien zur Verfügung, die verbleibende Emissionen aus der Landwirtschaft oder der Industrie (z.B. Prozessemissionen) kompensieren können. Dazu können CO₂-Emissionen aus Gaskraftwerken oder Industrieprozessen durch Carbon Capture (CC) abgeschieden werden. Wird in diesen Prozessen Biomasse eingesetzt und das entstehende CO₂ abgeschieden (BECC), entstehen bilanziell negative Emissionen, sofern das CO₂ permanent in CO₂-Lagerstätten gespeichert wird. Das Potenzial zur Einspeicherung in geeigneten geologischen Lagerstätten wird in Deutschland auf eine Speicherkapazität von 12 Gt CO₂ geschätzt [8] und ist damit bei einer angenommenen Einspeicherung von jährlich 90 Mt CO₂ ausreichend für 133 Jahre. Außerdem stehen dem Modell Anlagen zur direkten Abscheidung von CO₂ (DAC) aus der Atmosphäre zur Verfügung, deren CO₂ ebenfalls permanent gespeichert werden kann, um damit negative Emissionen zu erzeugen.

3 Analyse der Rolle von negativen Emissionen für die Treibhausgasneutralität im Jahr 2045

Für diese Analyse mit dem Optimierungsmodell FINE-NESTOR wurde ein Emissionspfad bis zur Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 zugrunde gelegt, wie er sich aus den Vorgaben des Gesetzentwurfs zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes vom 11. Mai 2021 [3] ergibt. Im ersten Teil dieser Analyse werden die negativen Emissionen aus dem LULUCF-Sektor nicht in der Emissionsbilanz berücksichtigt, da die Entwicklungen in diesem Sektor zum einen mit erheblichen Unsicherheiten belastet sind. Zum anderen gibt es auch Einschätzungen, die davon ausgehen, dass sich dieser Sektor in den nächsten Jahren ohne zusätzliche Maßnahmen auch zu einer Emissionsquelle werden könnte [9]. Ziel des ersten Teils der Analyse ist es die Menge an negativen Emissionen aufzuzeigen, die für das Erreichen der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 benötigt werden.

Im zweiten Teil der Analyse wird dargestellt, wie sich der Bedarf an negativen Emissionen verändert, wenn der LULUCF-Sektor in der Treibhausgasbilanz berücksichtigt wird und den im Gesetzentwurf geforderten Beitrag zur Treibhausgasneutralität in Höhe von -40 Mt CO₂-äq im Jahr 2045 bereitstellt.

3.1 Ein treibhausgasneutrales Deutschland bis 2045

Für ein treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2045 ist eine Transformation des derzeit noch überwiegend auf fossilen Rohstoffen basierendem Energiesystem zu einem vollständig auf erneuerbaren Energien beruhendem System notwendig. Der Primärenergieverbrauch Deutschlands im Jahr 2045 in Höhe von 2004 TWh ist in Abbildung 2 dargestellt.

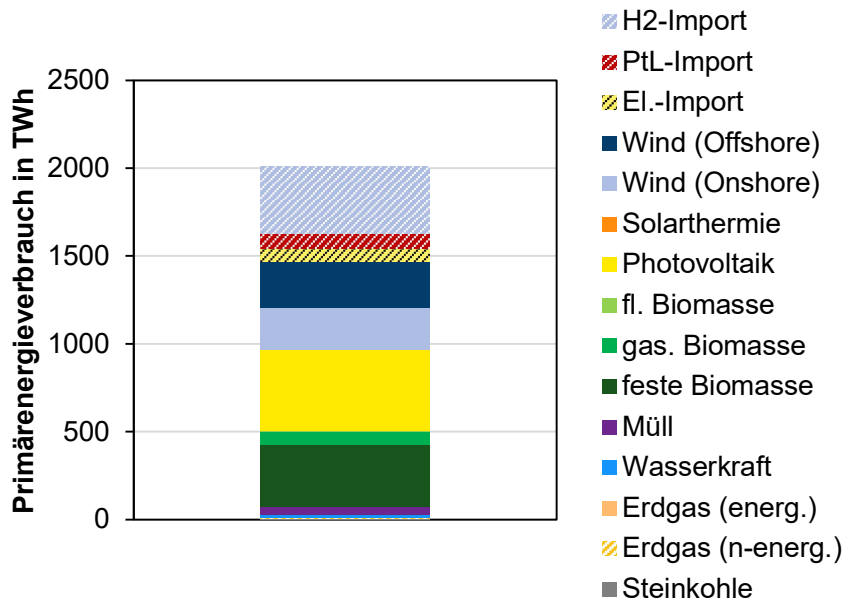


Abbildung 2: Primärenergieverbrauch Deutschlands im Jahr 2045

Von dieser Energiemenge entfallen 428 TWh auf den Sektor Biomasse, die Photovoltaik stellt 455 TWh bereit. Der Großteil des verbleibenden Primärenergiebedarfs wird durch die Windenergie (498 TWh) und die Importe von grünem Wasserstoff aus dem Ausland bereitgestellt (382 TWh). Abbildung 3 zeigt die Treibhausgasemissionen Deutschlands im Jahr 2045.

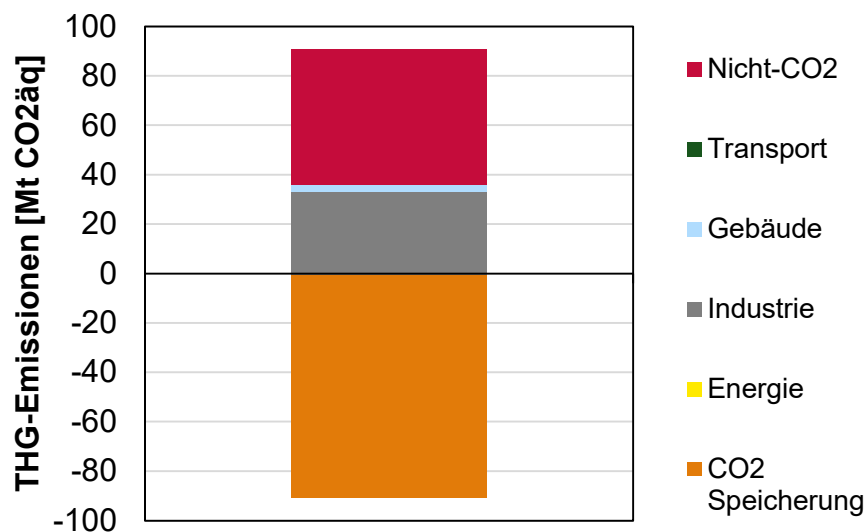


Abbildung 3: Treibhausgasemissionen Deutschlands im Jahr 2045

Während in den Sektoren Energie, Gebäude und Transport die CO₂-Emissionen im Jahr 2045 nahezu vollständig reduziert sind, verbleiben im Industriesektor noch Emissionen von 34 Mt CO₂. Diese setzen sich zu 82 % aus Prozessemissionen zusammen, die nur durch den Einsatz von Carbon Capture -Technologien reduziert werden könnten. Weiterhin fallen durch den exogen gesetzten Emissionspfad Nicht-CO₂-Emissionen in Höhe von 54 Mt CO₂-äq an, die zusammen mit den verbleibenden Emissionen im Industriesektor durch negative Emissionen kompensiert werden müssen, um die Treibhausgasneutralität zu erreichen.

3.2 Der Bedarf an negativen Emissionen für die Treibhausgasneutralität

Insgesamt müssen im Jahr 2045 Emissionen in Höhe von 90 Mt CO₂ in geologischen Lagerstätten permanent eingespeichert werden. Die abgeschiedenen CO₂ Mengen und deren Verwendung sind in einem Sankey-Diagramm (Abbildung 4) dargestellt.

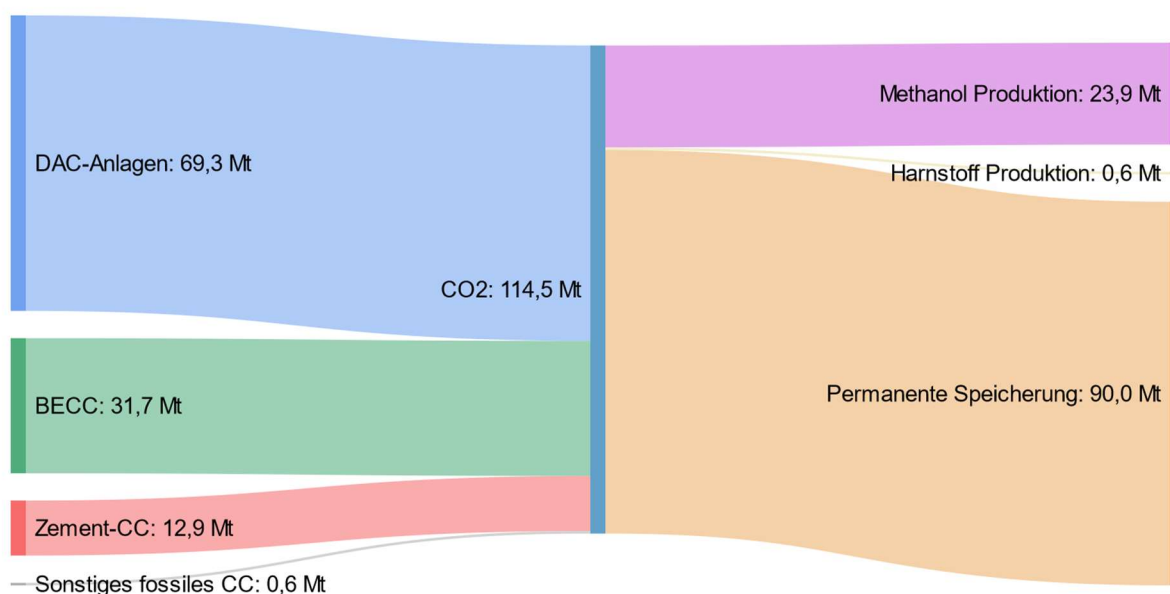


Abbildung 4: Quellen und Senken für das im Jahr 2045 abgeschiedene CO₂

Hierbei ist zu beachten, dass in dieser Analyse die stoffliche Verwendung von CO₂ in der chemischen Industrie nicht als negative Emissionen bilanziert wird, da die hergestellten Produkte (z.B. Plastik) nach ihrer Verwendung über den Abfallsektor verbrannt werden, falls sie nicht vollständig recycelt werden können. Eine CO₂-Emissionsmenge wird in Höhe von 69,3 Mt CO₂ von DAC-Anlagen direkt aus der Luft abgeschieden, die Verbindung von Biomasse mit Carbon Capture (BECC) trägt mit 31,7 Mt CO₂ bei. Nur auf diese Weise gewonnenes CO₂, welches auch permanent gespeichert wird, steht als negative Emission für die Kompensation der Residualemissionen zur Verfügung. Aus dem Industriesektor werden insgesamt 13,5 Mt CO₂ abgeschieden und gespeichert, sodass sich insgesamt ein Bedarf an negativen Emissionen in Höhe von -76,5 Mt CO₂ ergibt.

3.3 Veränderung des Bedarfs an negativen Emissionen durch die Berücksichtigung des LULUCF-Sektors

In diesem Teil der Analyse werden die negativen Emissionen aus dem LULUCF-Sektor in Höhe von $-40 \text{ Mt CO}_2\text{-Äq}$, wie im Gesetzentwurf zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes vom 11.5.2021 [3] vorgesehen, in der Treibhausgasbilanz berücksichtigt. Dadurch verringert sich die in geologischen Lagerstätten eingespeicherte CO_2 Menge um den gleichen Beitrag auf 50 Mt CO_2 . Abbildung 5 stellt dar, wie sich die CO_2 Flüsse unter dieser Annahme auf die verschiedenen Quellen und Senken verteilen.

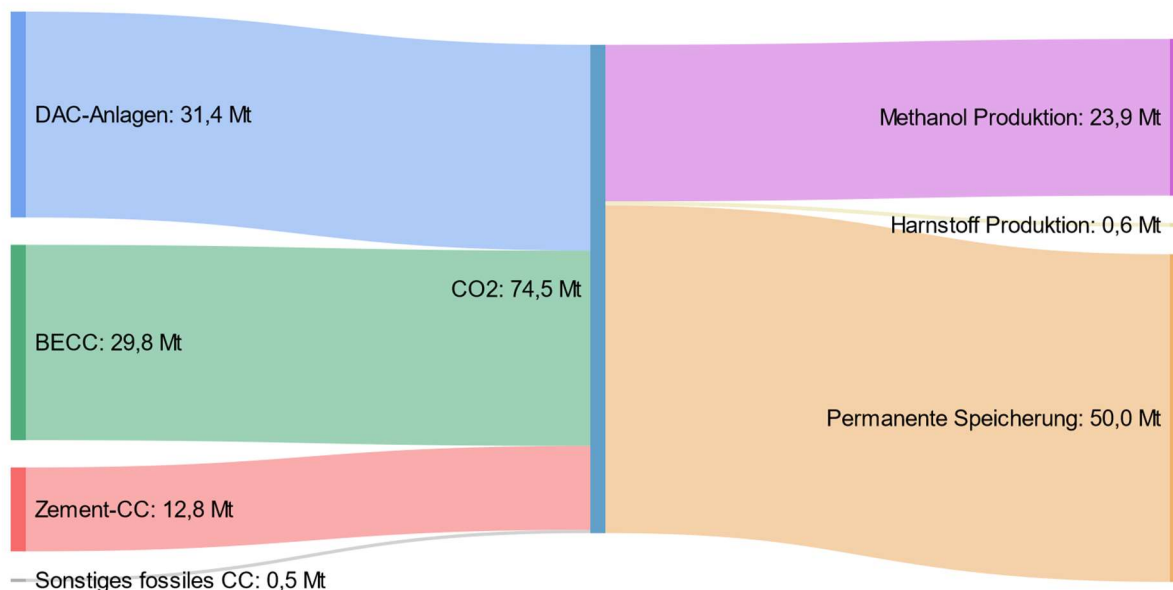


Abbildung 5: Quellen und Senken für das im Jahr 2045 abgeschiedene CO_2 bei Berücksichtigung der negativen Emissionen aus dem LULUCF-Sektor

Während der CO_2 -Bedarf in der Methanol- und Harnstoff-Produktion gleich bleibt und sich auch die abgeschiedene CO_2 -Menge in der Industrie nur geringfügig ändert, werden $1,9 \text{ Mt CO}_2$ weniger mit BECC-Technologien abgeschieden. Die von DAC-Anlagen aus der Luft gefilterte CO_2 -Menge sinkt um $37,9 \text{ Mt}$ auf $31,4 \text{ Mt CO}_2$, da diese Methode der CO_2 Abscheidung teurer ist als die Nutzung von Biomasse mit Carbon Capture. Durch die Berücksichtigung der negativen Emissionen aus dem LULUCF-Sektor sinkt der Bedarf an zusätzlichen negativen Emissionen somit auf $-36,7 \text{ Mt CO}_2$.

4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass für ein treibhausgasneutrales Deutschland bis zum Jahr 2045 negative Emissionen in Höhe von $-76,5 \text{ Mt CO}_2$ notwendig sind, um die verbleibenden Emissionen in der Landwirtschaft und dem Industriesektor zu kompensieren. Unter der Annahme, dass durch Wiedervernässung von Mooren und Aufforstung von Wäldern der LULUCF-Sektor im Jahr 2045 negative Emissionen von $-40 \text{ Mt CO}_2\text{-Äq}$ bereitstellen kann, verringert sich der Bedarf an zusätzlich notwendigen negativen Emissionen auf $-36,7 \text{ Mt CO}_2$. Die Modellergebnisse verdeutlichen, dass der LULUCF-Sektor nicht ausreichend negative Emissionen zur Kompensation der verbleibenden Treibhausgasemissionen bereitstellen kann und der Einsatz von Technologien mit anschließender CO_2 Speicherung unabdingbar ist. Dies

wiederum bedeutet, dass von politischen Entscheidungsträgern die entsprechenden Rahmenbedingungen gesetzt werden müssen. So ist es zwingend erforderlich, die derzeit in Deutschland durch das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz [10] stark eingeschränkte Möglichkeit zur permanenten Speicherung von CO₂ in geeigneten geologischen Lagerstätten geändert werden muss, um ausreichend negative Emissionen für das Erreichen von Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 bereitstellen zu können.

Literatur

- [1] Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513)
- [2] BVerfG: Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 – 1 BvR 2656/18 - Rn. 1-270.
http://www.bverfg.de/e/rs20210324_1bvr265618.html
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes. 11.05.2021
- [4] Umweltbundesamt: Vorjahreschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020. 15.03.2021
- [5] P. Lopion et al.: Cost Uncertainties in Energy System Optimization Models: A Quadratic Programming Approach for Avoiding Penny Switching Effects. *Energies* 2019, 12(20), 4006
- [6] M. Robinius, P. Markewitz, P. Lopion et al.: Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Band 499.* 2020
- [7] Umweltbundesamt: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. 2014
- [8] acatech: CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. 2018
- [9] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut: Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. 2021
- [10] Kohlendioxid-Speicherungsgesetz vom 17. August 2021 (BGBl. I S. 1726)