

This is the preprint of the contribution published as:

Thrän, D. (2026):

BECCS: Eine wichtige Option zum Klimaschutz

In: Lozán, J.L., Graßl, H., Kasang, D., Auerswald, K., Freibauer, A. (Hrsg.)

Warnsignal Klima: Die Landwirtschaft

23

Warnsignal Klima, Hamburg, S. 330 – 335

Klima- und Umweltschutz in der Landwirtschaft

Daniela Thrän

BECCS: Eine wichtige Option zum Klimaschutz
(Daniela Thrän, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung)

1. BECCS – Was ist das?

BECCS steht für Bioenergy with Carbon Capture and Storage (dt.: Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung). Grundlage der Bioenergie ist Biomasse, deren Aufbau einhergeht mit der CO₂-Abscheidung aus der Luft mittels Pflanzen. BECCS umfasst den Anbau von Biomasse, deren Umwandlung in Energie oder Kraftstoff, die Abscheidung des bei der Verbrennung oder Kraftstoffherstellung entstehenden CO₂ und die anschließende unterirdische Lagerung. Auch die Speicherung in sehr langlebigen Produkten, wie zum Beispiel Baumaterialien, ist möglich (Abb. 1).



Abbildung 1: Überblick BECCS (eigene Darstellung, basierend auf Sielemann/Helmholtz SynCom, unv.)

Zu beachten ist: Eine CO₂-Entnahme liegt nur dann vor, wenn der Kohlenstoff dauerhaft abgelagert ist, also mindestens einige Jahrzehnte, Jahrhunderte oder länger der Atmosphäre entzogen ist, also in geologischen oder ähnlichen Speichern eingelagert wird. Das heißt, die Nutzung des abgeschiedenen CO₂ in Produkten mit kürzerer Lebensdauer (z.B. Kunststoffe oder Kraftstoffe), die als BECCU (Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation; dt.: Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Nutzung) bezeichnet wird, trägt zwar zum Klimaschutz bei, ist aber wegen der fehlenden Permanenz nicht der CO₂-Entnahme zuzurechnen.

BECCS hat insbesondere durch eine Integration in IPCC Assessment Reports Prominenz erlangt. Für das IPCC ist BECCS eine grundlegende Option, um die globale Erwärmung möglicherweise noch unter 1,5°C zu halten (IPCC 2018). Damit ist BECCS eine der bekanntesten Technologien aus dem Bereich Carbon Dioxide Removal (CDR). Obwohl BECCS in Forschung und auch in Politik viel diskutiert wird, ist es in der praktischen Anwendung wenig erprobt.

v

2. Potenziale für BECCS in Deutschland

Auch für Deutschland wird BECCS als vergleichsweise aussichtsreiche Option beschrieben. Dies liegt darin begründet, dass naturbasierte Lösungen wie Moorwiedervernässung, Kohlenstoffanreicherung in Böden oder angepasste Waldbewirtschaftung zwar einfacher realisierbar sind, aber die dafür verfügbaren Flächenpotenziale begrenzt sind. Die daraus resultierenden Potenziale zur CO₂-Abscheidung werden auf ca. 15 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr geschätzt. Dem gegenüber werden die Potenziale zur CO₂-Abscheidung mittels BECCS auf ca. 60 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr geschätzt. Andere technische Verfahren wie die direkte CO₂-Entnahme aus der Luft („direct air capture and storage“ - DACS) stehen technologisch noch am Anfang und in den Potenzialen entsprechend unsicher (Borchers et al., 2022). Zum Vergleich: Im Jahr 2025 lagen CO₂-Emissionen in Deutschland bei 640 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent (Agora Energiewende 2026); 10% dieser Emissionen gelten als schwer vermeidbar (Mengis et al., 2022).

Auch wenn BECCS als eine der praktikabelsten und kosteneffizientesten Optionen zur Erzielung negativer Emissionen gilt, bestehen doch Bedenken hinsichtlich möglicher negativer Auswirkungen auf die Landnutzung (Konkurrenz um Ackerland und Wasser) und die Biodiversität (IPBES-IPCC, 2021; IPCC, 2022). Um negative Wechselwirkungen mit der Umwelt zu vermeiden, sollten nur nachhaltige Biomassequellen berücksichtigt werden. Dies erfordert die Weiterentwicklung des bestehenden Bioenergiesystems.

3. Ausgangspunkt für BECCS: das bestehende Bioenergiesystem

In Deutschland waren im Jahr 2025 etwas über 20% der eingesetzten Energie erneuerbar. Biomasse liefert mit 11% immer noch über die Hälfte der erneuerbaren Energie, ist allerdings – anders als Wind und Solar – in den vergangenen Jahren nicht weiter ausgebaut worden (BMWi 2026). Bioenergie umfasst die Nutzung von Biomasse aus der Land- und Forstwirtschaft sowie biogener Abfälle und Reststoffe mit den daraus resultierenden Bioenergieprodukten in fester, flüssiger oder gasförmiger Form (Abbildung 2; alle Angaben in Petajoule (PJ) für das Jahr 2021), die unterschiedliche Energiesektoren versorgen (Strom, Wärme, Kraftstoffe) und verschiedene Möglichkeiten für BECCS beinhalten. Dies wird nachfolgend näher erläutert.

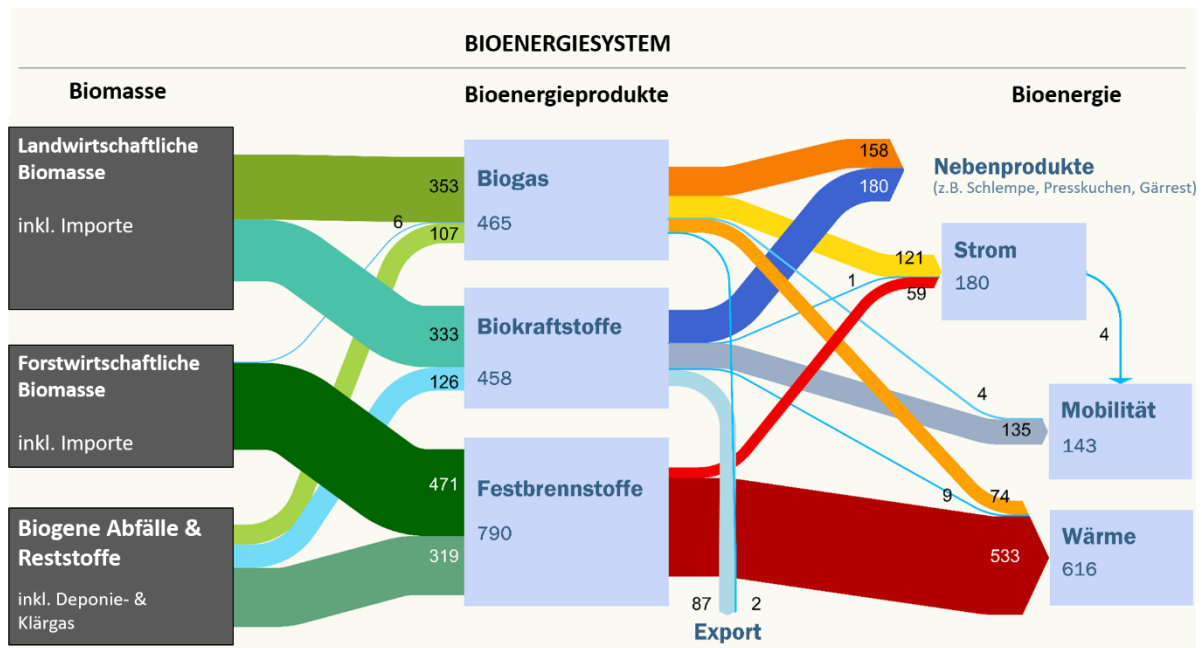


Abbildung 2: Energetische Biomassenutzung in Deutschland für das Jahr 2021 in Petajoule (PJ); die insgesamt eingesetzte Biomasse betrug 1.713 PJ (Thrän et al 2025)

Festbrennstoffe: Biomasse in Form von Festbrennstoffen liefert den größten Beitrag zur Bioenergiebereitstellung. Sie werden direkt verbrannt und die dabei frei werdende Wärme wird direkt oder in Kraft-Wärme-Kopplung genutzt. Eingesetzt wird forstwirtschaftliche Biomasse (471 Petajoule; PJ) und biogene Abfälle und Reststoffe (319 PJ, z.B. Sägespäne, Altholz). Zum Vergleich: der Einsatz von Windenergie in Deutschland lag im Jahr 2021 bei 322 PJ (BMWi, 2023). Diese werden zur Bereitstellung von Wärme in 11 Millionen Kaminen, Kaminöfen und Kesseln verschiedenster Leistungsgrößen direkt verbrannt (533 PJ). Gut zwei Drittel dieser erzeugten Wärme kommt aus sehr kleinen Anlagen (z.B. Kaminöfen in Einfamilienhäusern), die nicht zur Abscheidung von CO₂ (und damit BECCS) geeignet sind. Ca. ein Viertel der Wärmeerzeugung erfolgt in größeren Kesseln in der Industrie und den Heizwerken der öffentlichen Versorgung. Diese Anlagen sind teilweise um BECCS erweiterbar (Kaltschmitt et al., 2024, UBA 2024). Ebenso wird aus Rest- und Altholz in etwa 200 Heizkraftwerken Strom (59 PJ) und Wärme (ca. 50 PJ, in den 533 PJ enthalten) bereitgestellt – auch diese Anlagen können für BECCS geeignet sein (Kaltschmitt et al., 2024).

Biokraftstoffe: Biokraftstoffe werden über die Alkoholfermentation zucker- und stärkereicher Rohstoff zu Bioethanol oder über das Pressen und Aufbereiten ölhaltiger Rohstoffe zu Biodiesel gewonnen. Sie werden aus biogenen Abfällen und Reststoffen (126 PJ) und landwirtschaftlicher Biomasse (333 PJ, z.B. Raps, Getreide, Zuckerrüben etc.) in 13 Bioethanol- und 53 Biodieselanlagen produziert. Sie werden überwiegend in Fahrzeugen eingesetzt (135 PJ im Inland und 87 PJ als Exportprodukt), wo eine Abscheidung von CO₂ – und damit BECCS – nicht möglich ist (Schröder & Naumann, 2023). Bei der Biokraftstoffproduktion entstehen zusätzlich Nebenprodukte (180 PJ) wie Presskuchen oder Schlempe (Rückstand der Alkoholvergärung), die noch einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweisen. Ebenso fällt bei der Aufreinigung des Bioethanols CO₂ als Nebenprodukt an. Diese Nebenprodukte können in

Biokohle umgewandelt werden, sind aktuell aber oft anderweitig genutzt (z.B. als Futtermittel oder in der Lebensmittelindustrie).

Biogas: Die Biogasgewinnung beruht auf der Vergärung nasser Biomassen wie Gülle oder Bioabfall. Es entsteht ein Gasgemisch aus Methan und CO₂, das entweder verbrannt und zur Strom- und Wärmeversorgung genutzt wird oder zu Biomethan aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist werden kann. Am Ende des Gärprozesses verbleibt ein Gärrests als Nebenprodukt, der reich an Nährstoffen ist und noch ungefähr die Hälfte des Kohlenstoffs des Ausgangsproduktes enthält (Thrän et al., 2025). Landwirtschaftliche Biomasse (353 PJ, z.B. Mais, Gras, Gülle) und biogene Abfälle und Reststoffe (107 PJ, z.B. Bioabfall) werden in ca. 10.000, überwiegend kleinen Biogasanlagen zu Biogas umgewandelt (Rensberg et al., 2023). Auch hier entsteht in erheblichem Umfang ein kohlenstoffreiches Nebenprodukt (158 PJ, sogenannter Gärrest). Ein kleiner Teil der Anlagen bereitet das Biogas zu Biomethan auf, wodurch CO₂ als Nebenprodukt anfällt, das bisher in der Regel nicht genutzt wird. Diese Aufbereitung von Biogas zu Biomethan ist generell nur für große Biogasanlagen etablierbar, wodurch das damit verbundene CO₂-Abscheidungspotenzial an den bestehenden überwiegend kleinen Biogasanlagen begrenzt ist. Biogas wird hauptsächlich zur gekoppelten Erzeugung von Strom (121 PJ) und Wärme (74 PJ) genutzt oder als Kraftstoff eingesetzt (BMWi 2023). Eine Abscheidung von CO₂ wäre hier ebenfalls nur bei wenigen, größeren Anlagen möglich.

4. Herausforderung für BECCS: Bioenergiebereitstellung mit netto-negativer Klimabilanz

Bioenergie, egal ob mit oder ohne CO₂-Abscheidung, reduziert – wie andere erneuerbare Energien auch – Klimaemissionen, weil sie weniger CO₂ in die Luft lässt als Erdöl, Gas oder Kohle. Allerdings entstehen bei der Bereitstellung von Bioenergie auch Emissionen (z.B. beim Anbau, dem Transport oder der Umwandlung von Biomasse). Auch können die natürlichen Kohlenstoffspeicher (z.B. der Kohlenstoffspeicher im Boden oder im Wald) bei einer nicht nachhaltigen Biomassenutzung geschwächt werden, was den Beitrag der Bioenergie zur Emissionsminderung kleiner ausfallen lässt oder gar konterkariert. Bei BECCS entstehen durch die Abscheidung, den Transport und der Speicherung des CO₂ zusätzliche Emissionen, die bei der Gesamtbilanz beachtet werden müssen. Es sind also verschiedene Voraussetzungen zu schaffen, damit mit BECCS CO₂-Entnahme erzielt wird.

Eingesetzte Biomasse: Für den zukünftigen Klimaschutzbeitrag von Bioenergie ist es entscheidend, stärker auf biogene Abfälle und Reststoffe zu setzen und geeignete Maßnahmen (z.B. Nachhaltigkeitsanforderungen) zu ergreifen, um den Klimaschutzbeitrag von Waldholz und angebauter Biomasse zu gewährleisten. Vor diesem Hintergrund ist die Biomasse, die für die Bereitstellung von Bioenergie zur Verfügung steht, begrenzt. Angesichts der wachsenden Konkurrenz um deren Nutzung, insbesondere durch die steigende Nachfrage im Chemiesektor, wird sie voraussichtlich noch knapper werden.

Betrieb der Bioenergieanlage: Ein effizienter und mit geringen Klimagasemissionen verbundener Betrieb der Bioenergieanlagen ist notwendig, um einen hohen Klimaschutzbeitrag zu erzielen. Der Betrieb der Bioenergieanlagen ist zudem vor Herausforderungen gestellt, wenn künftig durch Erweiterung der Anlagen um BECCS-Elemente der Energieoutput aus der Anlage

eher sinkt.

Beitrag der Bioenergie zu einem klimaneutralen Energiesystem: Schließlich muss die Bioenergie künftig verstärkt dort im Energiesystem eingesetzt werden, wo andere erneuerbare Energie nicht oder nur zu sehr hohen Kosten nutzbar sind. Das bedeutet, dass künftig andere Anwendungen an Bedeutung gewinnen (z.B. bei der Bereitstellung von Hochtemperaturwärme für Industrieprozesse).

CO₂-Infrastruktur und -Speicher als Voraussetzung: Neben der zurzeit nur bedingten Eignung der existierenden Bioenergieanlagen für BECCS besteht das Problem, dass das abgeschiedene CO₂ aktuell nicht eingespeichert werden kann. Für die dauerhafte Speicherung des gasförmigen CO₂ müssen CO₂-Leitungen und für die Einlagerung erschlossene geologische CO₂-Speicher vorhanden sein. Dies ist in Deutschland aktuell nicht gegeben und dürfte – selbst wenn mit der Realisierung nun entschlossen begonnen würde – frühestens in 10 -15 Jahren verfügbar sein.

5. Chancen für BECCS: Potenzial innerhalb des bestehenden Bioenergiesystems

In Abbildung 3 wurde die energetische Biomassenutzung dargelegt. Die dabei aufgezeigten wesentlichen Bioenergieflüsse lassen sich in CO₂-Flüsse übersetzen. Dazu wird das CO₂-Potenzial berechnet, das freigesetzt werden würde, wenn die Biomassen vollständig in CO₂ umgewandelt werden würden. Diese Berechnung basiert auf dem Kohlenstoffgehalt der Biomasse und der Bioenergieprodukte sowie dem Wirkungsgrad der Bioenergieanlage. Insgesamt beträgt das CO₂-Potenzial, das durch die Biomasse in das Bioenergiesystem eingespeist wird, ca. 150 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr (Thrän et al., 2025). Davon stammen knapp 50 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr aus biogenen Abfällen und Reststoffen. Dieses Potenzial kann mit BECCS im aktuellen Anlagenbestand nur eingeschränkt erschlossen werden, weil beispielsweise eine CO₂-Abscheidung an Öfen oder Kaminen nicht aussichtsreich ist. Die vielversprechenden Routen stellen sich wie folgt dar:

- **CO₂ aus der Bereitstellung von Biogas und Biokraftstoffen:** Schon heute werden rund 2 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr aus der Aufbereitung von Bioethanol und Biogas, das Rest- und Abfallstoffen zugeordnet werden kann, abgeschieden. Die CO₂-Abscheidung könnte jedoch zeitnah verdoppelt werden, wenn große Biogasanlagen, die Abfälle und Reststoffe nutzen, auf die Produktion von Biomethan umstellen und eine entsprechende Aufbereitung mit CO₂-Abscheidung einrichten. Auf dieser Grundlage könnte die CO₂-Abscheidung aus der Fermentation zeitnah auf etwa 3 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr steigen (eigene Schätzung basierend auf Rensberg et al., 2023). Kostenschätzungen für BECCS aus der Bereitstellung von Biogas und Biokraftstoffen belaufen sich auf 80 € pro Tonne CO₂ (Wollnik et al. 2024).
- **CO₂ aus der Nutzung von Festbrennstoffen in Großanlagen:** 25-35 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr könnten aus der Verbrennung von Abfällen und Reststoffen (z.B. Altholz, Industrierestholz) in bestehenden Müllverbrennungsanlagen und großen Biomasseheizkraftwerken abgeschieden werden. Bei einer angenommenen Abscheidungsrate von 80 % (Löser et al., 2007, Markewitz et al., 2017; eigene Abschätzungen zu den weiteren Verlusten in der Praxis) könnte damit ein Beitrag von 20-28 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr aus biogenen Rest- und Abfallstoffen erreicht werden (Thrän et al., 2025). Kostenschätzungen für BECCS aus der Bereitstellung von Biogas und Biokraftstoffen

belaufen sich auf ungefähr 130 € pro Tonne CO₂ (Wollnik et al., 2024).

In Summe ist damit im aktuellen Bioenergiesystem auf Basis der eingesetzten Abfälle und Reststoffe bei Etablierung verschiedener BECCS-Optionen eine Entnahme von bis zu 30 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr denkbar. Hierbei ist zu beachten, dass die Umstellung nicht in allen Fällen brennstoff- oder anlagenseitig technisch und wirtschaftlich sinnvoll sein wird.

Darüber hinaus bestehen weitere Möglichkeiten zur CO₂-Abscheidung z.B. durch die Gewinnung von Biokohlen aus den Nebenprodukten der Biogas- und Biokraftstoffbereitstellung oder durch die Etablierung von Pyrolysesystemen in Heizwerken (Thrän et al., 2025), auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Auch Konkurrenzen mit diesen Technologien um die verfügbare Biomasse sind möglich.

6. Die Bedeutung von BECCS die Landwirtschaft

Wo und in welchem Umfang BECCS in einem künftigen klimaneutralen Energiesystem spielen kann, lässt sich mit Energiesystemmodellen abschätzen. Zum Beispiel können Optimierungsmodelle ermitteln, wie verschiedenen Energietechnologien und Technologien zur CO₂-Entnahme so kombiniert werden können, dass die Energiewende erfolgreich aber trotzdem möglichst kostengünstig ist. In Abbildung 3 werden Modellierungsergebnisse für den BECCS-Hochlauf für Deutschland dargestellt, bei dem die Biomasse und Anbauflächen für Bioenergie mit der heutigen Situation vergleichbar bleiben und bis 2045 Klimaneutralität erreicht wird (Sadr et al., 2024).

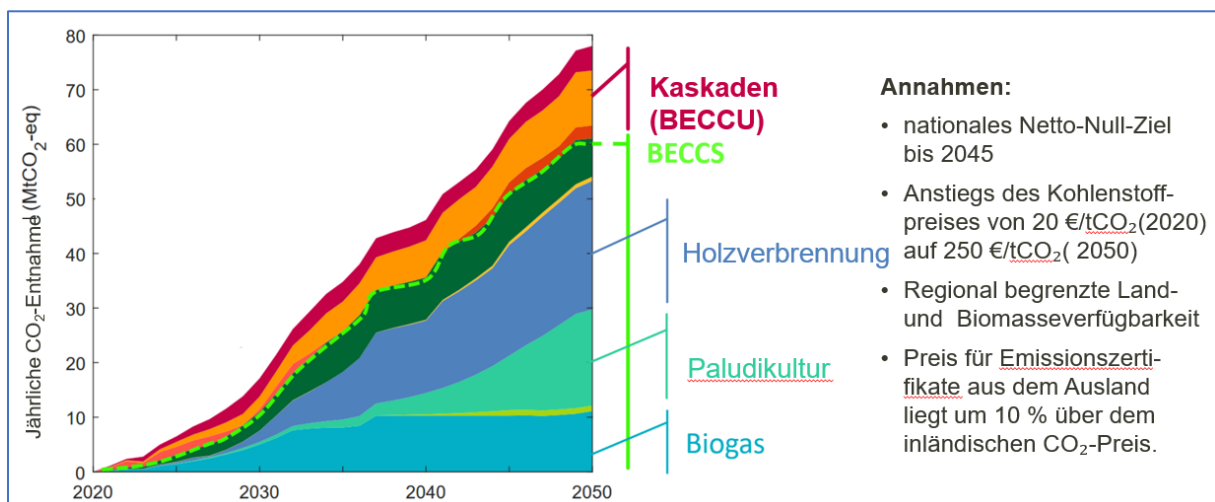


Abbildung 3: Entwicklung der CO₂-Entnahme in Deutschland (Basisszenario). Daten aus Sadr et al. (2024), vereinfachte Darstellung

Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass für die CO₂-Speicherung (BECCS) einen deutlich höheren Stellenwert als die Weiternutzung des biogenen CO₂ (BECCU) erwartet wird. Unter den verschiedenen BECCS-Technologien erscheint Biogas mit CCS in einer frühen Phase, erreicht aber bald ein Plateau: es stellt also die kostengünstigste BECCS-Option dar, die aber schon Mitte der 2030er Jahre erschöpft ist, weil nicht mehr Ressourcen für Biogas zur Verfügung stehen. Eine zweite wesentliche Option ist die Nutzung von Holz für Bioenergie mit

anschließender CO₂-Abscheidung. Hier sei darauf hingewiesen, dass dies sowohl Alt- und Abfallholz als auch Waldrestholz umfasst. Also dritte wichtige Option wird die Kombination von Moorwiedervernässung, dem Anbau von standortangepassten Rohstoffen (Paludikulturen wie zum Beispiel Rohglanzgras) und dessen Einsatz in BECCS-Konzepten erwartet. Diese Option ist zwar vergleichsweise teuer, erreicht aber hohe Klimaschutzbeiträge pro Hektar Landfläche, weil sowohl die Emissionen aus der Trockenlegung der Moore vermieden werden als auch Bioenergie bereitgestellt und CO₂-Entnahme erreicht wird. Darüber hinaus werden positive Umwelteffekte, z.B. auf die Biodiversität und den Wasserhaushalt beschrieben. Um solche BECCS-Systeme nennenswert zu realisieren, müssen allerdings geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Mit dem starken Bezug zu Flächen und biogenen Roh- und Reststoffen ist die Land- und Forstwirtschaft ein Schlüsselakteur bei der Realisierung von BECCS-Systemen. Untersuchungen zeigen aber auch, dass die effektive Umsetzung und der Betrieb von BECCS sowie aller damit verbundenen Zwischenschritte ein regionales und überregionales Netzwerk von Akteuren erfordern. Erste Studien zu regionalen Akteursanalysen in Deutschland zeigen ein komplexes Geflecht aus Herausforderungen und Chancen in gleichem Maße. Die von den Akteuren wahrgenommenen Herausforderungen im Zusammenhang mit BECCS sind: i) die umweltverträgliche Umsetzung, ii) der Stand der technischen Entwicklung, iii) die Verkehrsinfrastruktur, iv) der regulatorische Rahmen und v) das mangelnde Vertrauen in die politische und wirtschaftliche Machbarkeit. Chancen werden vor allem im Beitrag zum Klimaschutz durch die dauerhafte und großräumige Speicherung von CO₂ gesehen (Otto & Matzner, 2024; Matzner et al., 2025).

7. Zusammenfassung

BECCS-Technologien sind nah an der Marktreife und können auf das bestehende Bioenergiesystem aufbauen. Aus biogenen Abfällen und Reststoffen lässt sich mit BECCS in Deutschland bei entsprechenden Anlagenerweiterungen bis zu 30 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr entnehmen. Um mit BECCS Netto-Negativ-Effekte zu erzielen, müssen nachhaltig produzierte Biomassen eingesetzt und zielgerichtet für die Bereiche Energie bereitstellen, die schwer zu defossilisieren sind. Ebenso notwendig sind effiziente Technologien zur Abscheidung und die Etablierung dauerhaften Speichersystemen für das CO₂. Um Synergien mit einer nachhaltigen Landnutzung zu ermöglichen und Konkurrenzen um die begrenzte Biomasse mit anderen CO₂-Entnahmetechnologien (z.B. Biokohle) und weiteren Biomassenutzungen (z. B. im Chemiesektor) zu ordnen, müssen geeignete Rahmensetzung geschaffen werden.

BECCS technologies are nearing market readiness and can build on the existing bioenergy system. With appropriate plant expansions, BECCS can capture up to 30 million tons of CO₂ per year from biogenic waste and residues in Germany. To achieve net-negative effects with BECCS, sustainably produced biomass must be used and specifically allocated to energy sectors that are difficult to decarbonize. Equally necessary are efficient capture technologies and the establishment of permanent storage systems for CO₂. To enable synergies with sustainable land use and to manage competition for limited biomass with other CO₂ removal technologies (e.g., biochar) and other biomass uses (e.g., in the chemical sector), appropriate

policy frameworks must be established.

Referenzen

Agora Energiewende (2026): Die Energiewende in Deutschland – Stand der Dinge 2025. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2026. <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/die-energiewende-in-deutschland-stand-der-dinge-2025>

BMWi (2026) Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2025.pdf?__blob=publicationFile&v=2

BMWi. (2023). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Borchers, M., Förster, J., Thrän, D, Beck, S., Thoni, T., Korte, K., Gawel, E., Markus, T, Schaller, R., Rhoden, I., Chi, Y., Dahmen, N., Dittmeyer, R., Dolch, T., Dold, C., Herbst, M., Heß, D., Kalhori, A., Koop-Jakobsen, K., . . . Mengis, N. (2024). A Comprehensive Assessment of Carbon Dioxide Removal Options for Germany. *Earth's Future*, 12(5), Article e2023EF003986. <https://doi.org/10.1029/2023EF003986>

Borchers, M., Thrän, D, Chi, Y., Dahmen, N., Dittmeyer, R., Dolch, T., Dold, C., Förster, J., Herbst, M., Heß, D., Kalhori, A., Koop-Jakobsen, K., Li, Z., Mengis, N., Reusch, T. B. H., Rhoden, I., Sachs, T., Schmidt-Hattenberger, C., Stevenson, A., . . . Yeates, C. (2022). Scoping carbon dioxide removal options for Germany—What is their potential contribution to Net-Zero CO₂? *Frontiers in Climate*, 4, C9. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.810343>

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>.

IPCC (2022). *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>

IPCC-IPBES (2021). Pörtner, H.O., Scholes, R.J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, X., Barnes,

D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W.L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Jacob, U., Insarov, G., Kiessling, W., Leadley, P., Leemans, R., Levin, L., Lim, M., Maharaj, S., Managi, S., Marquet, P. A., McElwee, P., Midgley, G., Oberdorff, T., Obura, D., Osman, E., Pandit, R., Pascual, U., Pires, A. P. F., Popp, A., Reyes-García, V., Sankaran, M., Settele, J., Shin, Y. J., Sintayehu, D. W., Smith, P., Steiner, N., Strassburg, B., Sukumar, R., Trisos, C., Val, A.L., Wu, J., Aldrian, E., Parmesan, C., Pichs-Madruga, R., Roberts, D.C., Rogers, A.D., Díaz, S., Fischer, M., Hashimoto, S., Lavorel, S., Wu, N., Ngo, H.T. 2021. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC. DOI:10.5281/zenodo.4782538.

Kaltschmitt, M., Hofbauer, H., & Lenz, V. (2024). Energie aus Biomasse. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-41216-6>

Löser, J., Hellfritsch, S., Weigl, S., Wilhelm, R., & Klemm, M. (2007). Oxyfuel-Technologie: Von der Grundlagenforschung zum Großkraftwerk mit CO₂-Abscheidung. Wissenschaftliche Zeitschrift Der Technischen Universität Dresden(3-4), 56.

Matzner, N., Otto, D., Polzin, C., Hauck, J., Förster, J., Wollnik, R., Siedschlag, D., & Thrän, D. (2025). Bisher mehr Hürden als Chancen für bio-CDR: Berichte aus Stakeholder-Workshops zu biomassebasiertem Carbon Dioxide Removal (CDR) (UFZ Discussion Papers). <https://www.ufz.de/index.php?de=14487>

Markewitz, P., Zhao, I., & Robinius, M. (2017). Technologiebericht 2.3. CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende.

Mengis, N., Kalhori, A., Simon, S., Harpprecht, C., Baetcke, L., Prats-Salvado, E., Schmidt-Hattenberger, C., Stevenson, A., Dold, C., El Zohbi, J., Borchers, M., Thrän, D, Korte, K., Gawel, E., Dolch, T., Heß, D., Yeates, C., Thoni, T., Markus, T, . . . Dittmeyer, R. (2022). Net-Zero CO₂ Germany—A Retrospect From the Year 2050. *Earth's Future*, 10(2). <https://doi.org/10.1029/2021EF002324>

Otto, D.; Matzner, N. (2024): Let us get regional: exploring prospects for biomass-based carbon dioxide removal on the ground. In: *C – Journal of Carbon Research*, 10, 1. (<https://doi.org/10.3390/c10010025>).

Rensberg, N., Denysenko, V., & Daniel-Gromke, J. (2023). Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan (DBFZ Report No. 50). https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_50.pdf

Sadr, M., Esmaeili Aliabadi D., Jordan, M., Thrän D. (2024) A bottom-up regional potential assessment of bioenergy with carbon capture and storage in Germany. *Environmental Research Letters* 19, 114047, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad7edd>.

Schröder, J., & Naumann, K. (2022). Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH. <https://doi.org/10.48480/19nz-0322>

Thrän, D., Borchers, M., Lenz, V., Jordan, M., Markus, T., Matzner, N., Oehmichen, K., Otto, D.,

Radtke, K.S., Reshef, N., Sadr, M., Siedschlag, D., Wollnik, R. (2025): [The role of BECCS in Germany: a key to sustainable and permanent CO₂ removal?](#) *Environ. Res. Commun.* **7** (9), art. 091010 [10.1088/2515-7620/ae02ee](https://doi.org/10.1088/2515-7620/ae02ee)

UBA (2024): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). (<https://www.umweltbundesamt.de/dokument/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren>)

Wollnik, R., Borchers, M., Seibert, R., Abel, S., Herrmann, P., Elsasser, P., Hildebrandt, J., Mühlich, M., Eisenschmidt, P., Meisel, K, Henning, P., Radtke, K. S., Selig, M., Kazmin, S., Szarka, N, & Thrän, D. (2025). Factsheets for bio-based carbon dioxide removal options in Germany. <https://doi.org/10.48480/mj9d-6y33>