

Daniela Thrän, Malgorzata Borchers, Matthias Jordan,
Volker Lenz, Till Markus, Nils Matzner, Katja Oehmichen,
Danny Otto, Kai Sven Radtke, Nir Reshef, Mohammed
Sadr, Daniela Siedschlag, Ronja Wollnik

BECCS – ein nachhaltiger Beitrag zur dauerhaften CO₂-Entnahme in Deutschland? Diskussionspapier

Diskussionspapier

BECCS – ein nachhaltiger Beitrag zur dauerhaften CO₂-Entnahme in Deutschland?

Daniela Thrän^{1,2}, Malgorzata Borchers¹, Matthias Jordan¹,
Volker Lenz², Till Markus¹, Nils Matzner¹, Katja Oehmichen²,
Danny Otto¹, Kai Sven Radtke², Nir Reshef¹, Mohammad Sadr¹,
Daniela Siedschlag¹, Ronja Wollnik²

¹ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ

² Deutsches Biomasseforschungszentrum, gemeinnützige GmbH – DBFZ

Die Bundesregierung bereitet mit der Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) die Einführung von Technologien zur CO₂-Entnahme (Carbon Dioxid Removal – CDR) in Deutschland vor. Die Nutzung von Biomasse und die Bereitstellung von Bioenergie sind davon in vielfältiger Weise betroffen. BECCS ist hier das Stichwort der Stunde.

In diesem Diskussionspapier betrachten wir – ausgehend von den aktuellen Stoffströmen des Bioenergiesystems – die Frage, inwieweit das Bioenergiesystem für die nachhaltige Bereitstellung von CDR genutzt werden kann. Die Aussagen und Zahlen dieser Veröffentlichung basieren auf der aktuellen Bioenergiebereitstellung und können sich unter anderen politischen, rechtlichen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen verändern. Der optimale Beitrag von BECCS zur Klimaneutralität 2045 sollte auch mit Energie- und Klimamodellen ermittelt werden.

Zusammenfassung

BECCS (Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung) kombiniert die CO₂-Abscheidung und -Speicherung mit der Nutzung von Bioenergie. Wichtig ist, dass die CO₂-Speicherung dauerhaft ist, was BECCS von anderen Ansätzen wie BECCU (Nutzung von CO₂) unterscheidet.

In Deutschland trägt das bestehende Bioenergiesystem bereits zur erneuerbaren Energieversorgung bei, ist jedoch noch nicht auf BECCS ausgerichtet. Bei der Nutzung von biogenen Abfällen und Reststoffen könnten mit dem heutigen Bioenergieanlagenbestand über 25 Mio. t CO₂/Jahr in Form von CO₂ und Biokohle für die Abscheidung zugänglich gemacht werden. Dazu könnten bestehende Bioenergieanlagen mit hohem CO₂-Abscheidungspotenzial (z.B. Müllverbrennungsanlagen und Biomasseheizkraftwerke) für BECCS erweitert werden.

Für die erfolgreiche Etablierung von BECCS sind die Erprobung verschiedener BECCS-Methoden sowie ein gesichertes Investitionsumfeld für die Entwicklung von Geschäftsmodellen und Monitoringsystemen erforderlich. BECCS in Hochtemperaturindustrieprozessen ist für ein klimaneutrales Energiesystem von großer Bedeutung und bisher noch nicht etabliert. Bei geeigneter Förderung kann BECCS diese Transformation des Energiesystems unterstützen.

Für die erfolgreiche Umsetzung von BECCS sind inklusive Partizipationsstrategien notwendig, um eine breite gesellschaftliche Akzeptanz zu erreichen. Von entscheidender Bedeutung für die Umweltverträglichkeit sind die Kombination von BECCS mit naturbasierten Maßnahmen zur CO₂-Entnahme (z.B. Wiedervernässung von Mooren), die Kaskadennutzung von Biomasse und die gezielte Bioenergiebereitstellung in Sektoren, die schwer zu defossilisieren sind. Darüber hinaus muss BECCS in den bestehenden rechtlichen Rahmen integriert werden, um Umweltrisiken zu minimieren und die notwendige Infrastruktur für CO₂-Transport und -Speicherung zu schaffen.

Die Aussagen und Zahlen dieser Veröffentlichung basieren auf der aktuellen Bioenergiebereitstellung und können sich unter anderen politischen, rechtlichen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen verändern. Der optimale Beitrag von BECCS zur Klimaneutralität 2045 sollte auch mit Energie- und Klimamodellen ermittelt werden.

Inhalt

1. BECCS – Was ist das?	4
2. Ausgangspunkt für BECCS: das bestehende Bioenergiesystem	5
3. Herausforderung für BECCS: Bioenergiebereitstellung mit netto-negativer Klimabilanz .	7
4. Chancen für BECCS: Potenzial innerhalb des bestehenden Bioenergiesystems.....	8
5. Etablierung von BECCS: Voraussetzungen und zu beachtende Aspekte.....	9
5.1. Technik.....	9
5.2. Kosten	11
5.3. Umwelt.....	12
5.4. Sozial und institutionell	13
5.5. Recht	14
6. Künftige Anwendungen von BECCS	15
7. Zehn Handlungsempfehlungen für BECCS als nachhaltiger Beitrag zur dauerhaften CO ₂ -Entnahme.....	16
Literatur.....	18
Anhang	21

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 die technische Umwandlung von Biomasse in Bioenergieprodukte (z.B. Biokraftstoffe) oder Bioenergie (z.B. Wärme), bei gleichzeitiger Abscheidung von Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid (CO₂) oder festen Kohlenstoffprodukten (z.B. Biokohle), einschließlich dessen dauerhafter Speicherung (Abb. 1).

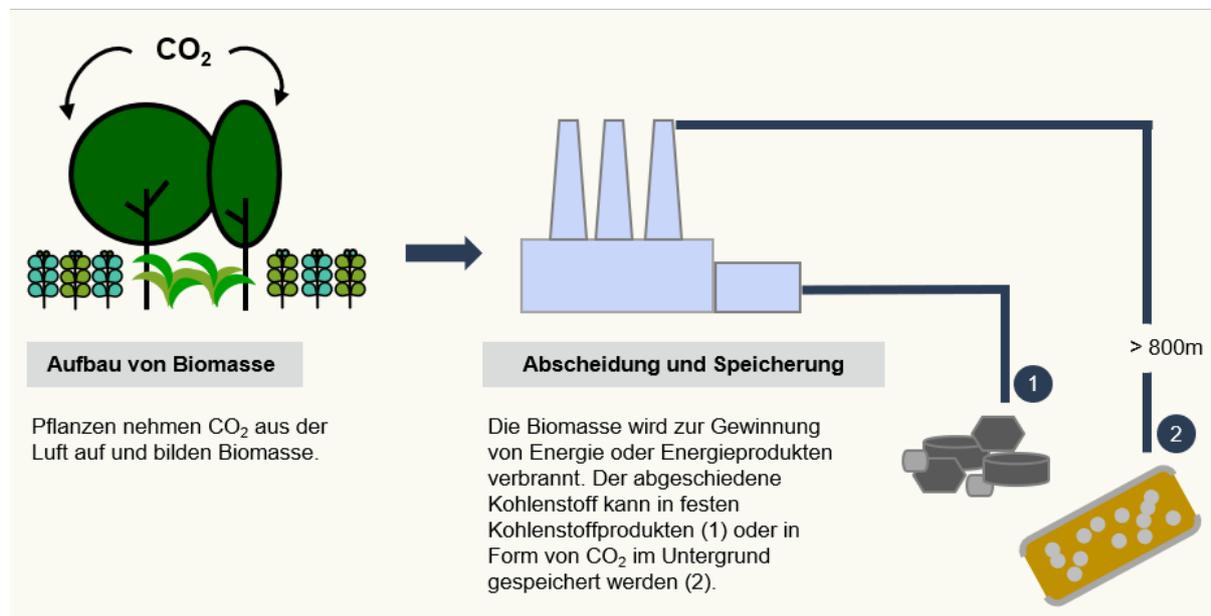


Abbildung 1: Überblick BECCS (eigene Darstellung, basierend auf Sielemann/Helmholtz SynCom, unv.)

Wichtig 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. 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.

Schlussfolgerung: Entscheidend für BECCS ist die Dauerhaftigkeit (Permanenz) der CO₂-Entnahme, z.B. durch langfristig stabile Kohlenstoffprodukte oder Untergrundspeicherungen. Damit unterscheidet sich die CO₂-Entnahme durch BECCS von der Technologie BECCU (Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation).

2. Ausgangspunkt für BECCS: das bestehende Bioenergiesystem

Bioenergie ist in Deutschland die am stärksten eingesetzte erneuerbare Energie (BMWi 2023). Sie 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. Folglich umfassen Bioenergieanlagen verschiedene Technologien zur Umwandlung von Biomasse in Energie (Strom, Mobilität, Wärme), wie in Abbildung 2 skizziert.

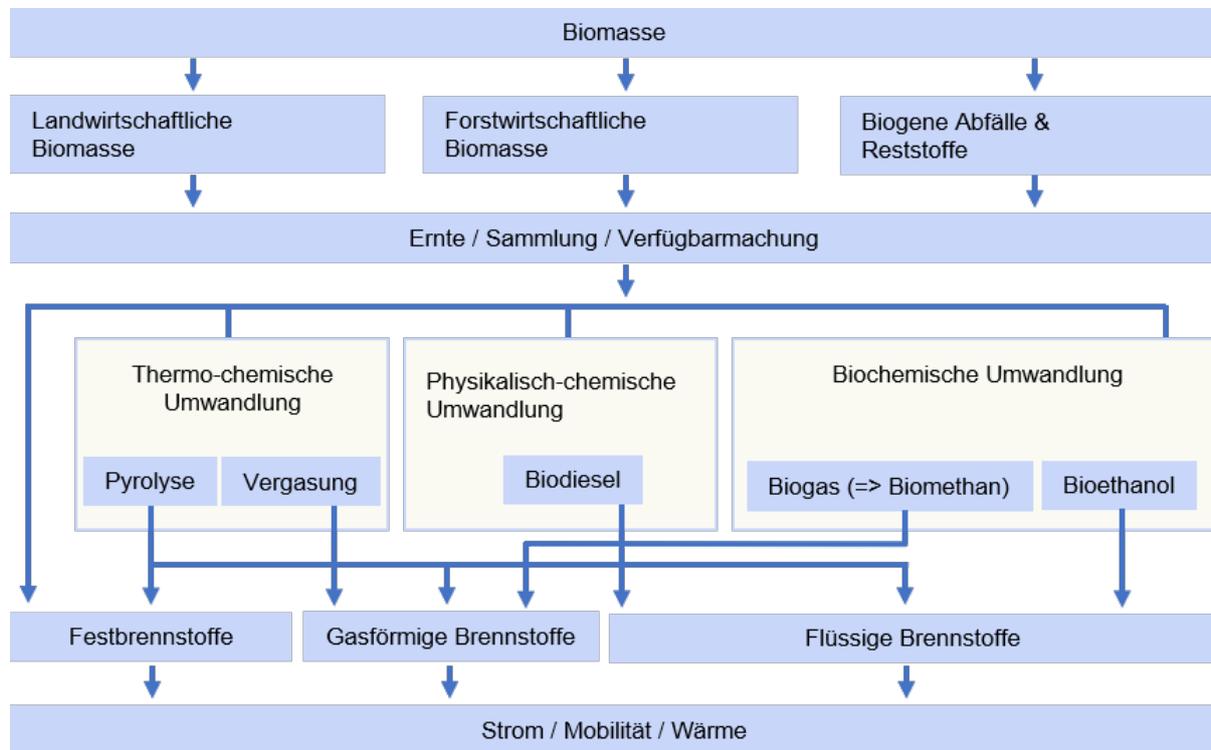


Abbildung 2: Überblick Bioenergieanlagen (eigene Darstellung, basierend auf Kaltschmitt 2024a)

Den Nutzungsstand von Biomasse für das Jahr 2021 zeigt Abbildung 3 (Seite 6). Mit der bereitgestellten Bioenergie wurden in diesem Jahr rund 10 % des deutschen Energiebedarfs gedeckt (BMWi 2023). Im Folgenden wird die in Abbildung 3 dargestellte Energiebereitstellung aus Biomasse näher erklärt und auf ihre generelle Eignung für BECCS eingegangen.

Festbrennstoffe: Biomasse in Form von Festbrennstoffen liefert den größten Beitrag zur Bioenergiebereitstellung und nutzt forstwirtschaftliche Biomasse (471 PJ) und biogene Abfälle und Reststoffe (319 PJ, z.B. Sägespäne, Altholz). 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. 2024b, 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. 2024b).

Biokraftstoffe: Flüssige Bioenergieträger 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 Schlempe oder Presskuchen, die noch einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweisen. Ebenso fällt bei der Aufreinigung des Bioethanols CO₂ als Nebenprodukt an. Diese Nebenprodukte können in Biokohle umgewandelt werden und sind damit prinzipiell für BECCS geeignet, auch wenn sie aktuell anderweitig genutzt werden (z.B. als Futtermittel oder in der Lebensmittelindustrie).

Biogas: 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 realisierbar, 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 (BMW 2023). Eine Abscheidung von CO₂ wäre hier ebenfalls nur bei wenigen, größeren Anlagen möglich.

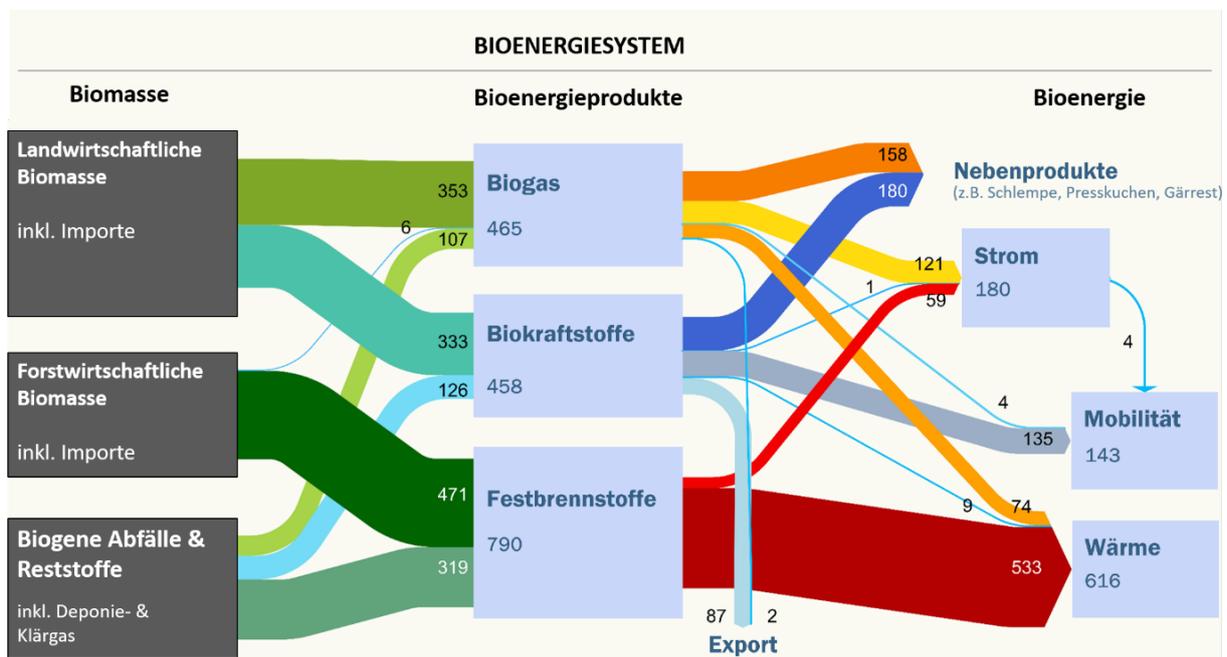


Abbildung 3: Energetische Biomassennutzung in Deutschland für das Jahr 2021 in Petajoule (PJ) (eigene Darstellung, basierend auf BLE (2022), DENA (2022), BMWi (2023), Bundesnetzagentur (2023), IHS Markit (2023a, b), die insgesamt eingesetzte Biomasse betrug 1.713 PJ).

Pyrolyse: Bisher in Deutschland keine Rolle für die Bioenergiebereitstellung, und somit auch nicht in Abbildung 3 ablesbar, spielen Vergasungs- und Verkohlungsverfahren für Biomasse, die auch als Pyrolyse bezeichnet werden und verschiedene Biomassen nutzen können. Die Pyrolyse, das heißt die thermische Zersetzung von Biomasse unter Sauerstoffmangel, erzeugt

eine Mischung aus Gas und Öl, die zur Bereitstellung von Wärme genutzt werden kann. Außerdem entsteht unter bestimmten Prozessbedingungen eine dauerhaft stabile Biokohle, die bei dauerhafter Ablagerung (z.B. in Bauelementen) zur CO₂-Entnahme beitragen kann. Zur Pyrolyse können Rohstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft oder biogene Abfälle und Reststoffe eingesetzt werden, aber auch die kohlenstoffreichen Nebenprodukte (Schlempe, Presskuchen, Gärrest) aus der Bioenergieproduktion. Wenn CDR mit Biomasse an Stellenwert gewinnt, könnten Pyrolyseverfahren, die technisch prinzipiell verfügbar sind, an Bedeutung gewinnen und das aktuelle Bioenergiesystem ergänzen.

Generell zu bedenken ist: 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.

Schlussfolgerung: Das bestehende Bioenergiesystem in Deutschland umfasst ein Portfolio an Technologien und eine Vielzahl von Anlagen, die einen substanziellen Beitrag zur Versorgung mit erneuerbaren Energien liefern, bisher aber nicht auf BECCS ausgerichtet sind.

3. 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 Biomassennutzung 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, siehe Kapitel 6).

Schlussfolgerung: Voraussetzungen, um mit BECCS Netto-Negativ-Effekte zu erzielen, sind Bioenergiesysteme mit nachhaltiger Biomassebereitstellung, effiziente Bioenergieanlagen und die zielgerichtete Nutzung von Bioenergie in Bereichen, die schwer zu defossilisieren sind.

4. Chancen für BECCS: Potenzial innerhalb des bestehenden Bioenergiesystems

Im Folgenden wird aufgezeigt, welchen Beitrag BECCS-Optionen in Deutschland für die Abscheidung von CO₂ in den kommenden Jahren liefern könnten. Dabei stehen Abfälle und Reststoffe im Fokus, weil diese Biomassen nachhaltig bereitgestellt und mit einem hohen Klimaschutzbeitrag verbunden sind (siehe Kapitel 5.3).

In Abbildung 3 wurde die energetische Biomassenutzung dargelegt. Die dabei aufgezeigten wesentlichen Bioenergieflüsse (>10PJ) werden in Abbildung 4 in CO₂-Flüsse übersetzt. 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 Mio. t CO₂/Jahr. Davon stammen knapp 50 Mio. t CO₂/Jahr aus biogenen Abfällen und Reststoffen.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist nicht jede Bioenergiebereitstellung in gleichem Maße für die Erweiterung um BECCS-Komponenten geeignet. Die aussichtsreichen Routen stellen sich wie folgt dar:

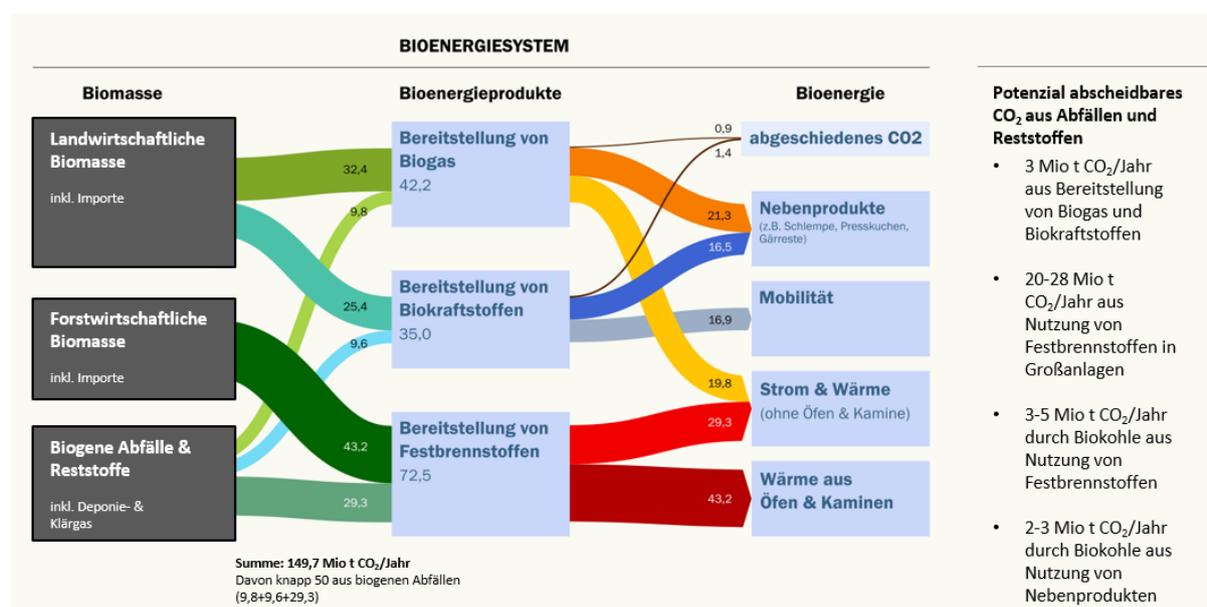


Abbildung 4: Wesentliche CO₂-Flüsse (Mio. t CO₂/Jahr) von der Biomasse bis zur Bioenergie für das Jahr 2021 (eigene Berechnung, basierend auf den Energieflüssen >10PJ in Abbildung 3)

Abgeschiedenes CO₂ aus der Bereitstellung von Biogas und Biokraftstoffen: Schon heute werden rund 2 Mio. t CO₂/Jahr aus der Aufbereitung von Bioethanol und Biogas 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 Mio. t CO₂/Jahr steigen (eigene Schätzung, basierend auf Rensberg et al. 2023).

Abscheidbares CO₂ aus der Nutzung von Festbrennstoffen in Großanlagen: 25-35 Mio. t CO₂/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 Mio. t CO₂/Jahr erreicht werden.

Abscheidbares CO₂ durch Biokohle aus der Nutzung von Festbrennstoffen: Auch Biokohle kann aus dem heutigen Bioenergiesystem heraus entwickelt werden. Unterstellt man die Weiterentwicklung und großskalige Umrüstung von Heizwerken und Heizkraftwerken auf Pyrolysegas, könnten bis zu 10 Mio. t CO₂/Jahr aus forstwirtschaftlichen Reststoffen in diesen Systemen umgesetzt werden. Klärschlamm, der wegen des sehr hohen Wassergehaltes zwar auch zu Biokohle umgewandelt werden kann, dabei aber keine Energie bereitstellt, ist bei dieser Abschätzung nicht berücksichtigt. Bei einer angenommenen Abscheidungsrate von 30-50 % (Kaltschmitt et al. 2024c) wären auf diese Weise weitere 3-5 Mio. t CO₂/Jahr abscheidbar.

Abscheidbares CO₂ durch Biokohle aus der Nutzung von Nebenprodukten: Auch die erzeugten Nebenprodukte aus der Biogas- und Biokraftstoffproduktion (38 Mio. t CO₂/Jahr) beruhen zu ca. 10 % auf Abfällen und Reststoffen. Sie könnten weitere 2-3 Mio. t CO₂/Jahr dauerhaft gespeichertes CO₂ in Form von Biokohle bereitstellen.

In Summe ist im aktuellen Bioenergiesystem, auf Basis der eingesetzten Abfälle und Reststoffe bei Etablierung verschiedener BECCS-Optionen, eine Entnahme von 28-39 Mio. t CO₂/Jahr denkbar. Hierbei ist zu beachten, dass die Umstellung nicht in allen Fällen brennstoff- oder anlagenseitig technisch und wirtschaftlich sinnvoll sein wird.

Schlussfolgerung: Innerhalb des bestehenden Bioenergiesystems könnte BECCS aus biogenen Abfällen und Reststoffen eine Entnahme von bis zu 28-39 Mio. t CO₂/Jahr etablieren.

5. Etablierung von BECCS: Voraussetzungen und zu beachtende Aspekte

Beim Umbau und der Weiterentwicklung des aktuellen Bioenergiesystems hin zu BECCS müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden.

5.1. Technik

Die CO₂-Abscheidung an Anlagen für Biomethan oder Bioethanol ist etabliert und zielt insbesondere bei Biomethananlagen hauptsächlich auf die Erhöhung des Methangehalts und weniger auf die Gewinnung hochreiner CO₂-Ströme. In der Praxis können über 90 % des CO₂ abgeschieden werden (Löser et al. 2007). Für diese Biogasanlagen liegt der Energieaufwand

bei rund 5 % des Heizwerts des Biomethans (FNR 2023). Bei der Nachrüstung dieser Anlagen wird die nötige Infrastruktur für den CO₂-Transport eine zentrale Herausforderung darstellen.

Bei großen, stationären Biomasseverbrennungsanlagen, die einen erheblichen Teil der potenziellen CO₂-Abscheidung realisieren könnten, stellt sich die Frage der technischen Nachrüstbarkeit der Anlagen. Die CO₂-Abscheidung nach der Verbrennung (post combustion) wurde bisher kaum für Biomasseverbrennungen untersucht. Studien für Kohlekraftwerke, die eingeschränkt auf Biomassekraftwerke übertragbar sind, zeigen, dass eine nachgeschaltete CO₂-Abscheidung mit über 95 % Effizienz den elektrischen Wirkungsgrad um 25-30 % verringern kann. Durch die Anwendung einer Oxyfuelverbrennung lässt sich dieser Verlust auf 20-25 % des elektrischen Wirkungsgrades reduzieren, wobei der CO₂-Gehalt des Abgases bei 90-95 % liegt (Löser et al. 2007, Markewitz et al. 2017). Dennoch ist bei der Erweiterung existierender Biomasse- und Müllheiz(kraft)werke bzw. Zufeuerungen in Industrieprozessen, die schwer zu dekarbonisieren sind, dieser energetische Verlust sowohl für die Kraftwerke als auch für die vertraglich gebundenen Abnehmer finanziell belastend. Zudem kann der Platzbedarf für die Abscheidung und Aufbereitung des CO₂ eine Herausforderung darstellen.

Die Umsetzung einer Oxyfuelverbrennung erfordert oft einen Neubau der gesamten Anlage, ermöglicht jedoch eine kleinere Dimensionierung der Kesselanlagen (ca. 50 % geringerer Massenstrom durch den Wegfall des Luftstickstoffs, aber unter Berücksichtigung der notwendigen Abgasrückführung (Löser et al. 2007). Damit muss der Platzbedarf nach der Umstellung nicht größer sein als bei der alten Anlage. Insgesamt stellt sich aber auch hier die Frage nach der CO₂-Infrastruktur. Diese benötigt entweder eine Kopplung mit einem CO₂-Verbrauch in der Nähe oder den Anschluss an ein Fernleitungsnetz. Künftige Anwendungen könnten dort entstehen, wo Industrieprozesse CO₂-Emissionen erzeugen (z.B. in der Zementindustrie) oder CO₂ benötigen (z.B. in der Düngerproduktion, siehe auch Kapitel 6).

Pyrolyseanlagen zur Herstellung von Biokohle sind bisher ebenfalls kaum verbreitet. In diesen Anlagen können zwischen 30-50 % des Kohlenstoffs aus der Biomasse in fester Form zurückgehalten werden. Bei gleichem Brennstoffeinsatz halbiert sich etwa die Energiefreisetzung (Kaltschmitt et al. 2024c). Grundsätzlich können bestehende Biomassekessel, wie sie in Nahwärmesystemen verwendet werden, durch Pyrolyseanlagen ersetzt werden. Da etwa die Hälfte des Kohlenstoffs in der Biokohle bleibt, ist für die gleiche Menge an Wärme etwa die doppelte Menge Biomasse erforderlich. Alternativ kann man auch hybride Lösungen in Betracht ziehen, bei denen Pyrolyseanlagen mit anderen erneuerbaren Energien, wie Wärmepumpen, kombiniert werden. Dies könnte jedoch zu einem höheren Platzbedarf und zusätzlichen Investitionen führen, um die gleiche Wärmeversorgung sicherzustellen.

Biokohle, die durch die Pyrolyse von Biomasse hergestellt wird, gilt als chemisch stabil und inert, besonders wenn sie einen hohen Verkohlungsgrad erreicht (Sanei et al. 2024). Allerdings können verschiedene Faktoren, wie die Art des Ausgangsmaterials und das Pyrolyseverfahren (z.B. Temperatur, Dauer, Kühlverfahren), die Eigenschaften der Biokohle beeinflussen. Das führt zu Unsicherheiten bei der Bewertung ihrer Beständigkeit (Smith et al. 2024). Je nach Verwendung der Biokohle ist die Speicherzeit des Kohlenstoffs unterschiedlich: In Materialien wie Teppichen oder Möbeln kann sie Jahre bis Jahrzehnte überdauern, während sie in Böden, Beton oder geologisch gespeicherter Biokohle sogar Hunderte bis Tausende von Jahren stabil bleiben kann (EBI Report 2024). Derzeit gibt es fünf

Protokolle für Monitoring, Reporting und Verification (MRV) von Biokohle, von denen vier auf den freiwilligen Markt ausgerichtet sind (Smith et al. 2024).

Schlussfolgerung: Langfristige Planungssicherheit ist ein wichtiger Punkt bei den technischen Umstellungen. Dies betrifft gleichermaßen i) die BECCS-Erweiterung von Müllverbrennungsanlagen, Altholzheizkraftwerke und ii) den Umbau von Biomasseheizwerken und -anlagen hin zur Biokohlebereitstellung. Zusätzlich bedarf es des Aufbaus einer CO₂-Transport- und -Speicherinfrastruktur, die Erstellung von Monitoring-, Reporting- und Verification-Systemen sowie Pilotanlagen, in denen die Technik erprobt wird.

5.2. Kosten

BECCS verursacht zusätzliche Kosten an Bioenergieanlagen, denen im aktuellen Energie- und Emissionsmarkt bisher in den seltensten Fällen ausreichend gesicherte Erlöse gegenüberstehen (Gründe u.a.: EU-ETS mit volatilen CO₂-Preisen, fehlende Ausschreibungen/Förderungen für die CO₂-Infrastruktur). Die Untersuchung verschiedener BECCS-Konzepte für Deutschland zeigt, dass die Zusatzkosten für die CO₂-Abscheidung und -Speicherung von vielen Faktoren abhängen, vor allem von den Rohstoffpreisen, der Verfügbarkeit der Infrastruktur für CO₂-Transport und -Speicherung sowie den Transportentfernungen (Irlam 2017, Fuss et al. 2018, Stavrakas et al. 2018, Borchers et al. 2022). Eine Studie (Stavrakas et al. 2018) ermittelt zusätzliche Kosten von 55-225 €/pro t CO₂ und nennt als Haupttreiber der BECCS-Kosten den fehlenden Markthochlauf von CCS-Technologien.

Wichtige Kostenfaktoren für die CO₂-Abscheidung an Bioenergieanlagen sind i) die Anlagengröße, ii) die verwendete CO₂-Abscheidungstechnologie und iii) die CO₂-Abscheidungsrate. Aufgrund der tendenziell kleineren Anlagengröße haben BECCS-Anlagen höhere Kosten als fossilbasierte CCS-Anlagen. Die Abscheidungstechnologie beeinflusst die Kosten ebenfalls, da sie zusätzlichen Energiebedarf verursacht, beispielsweise durch die Regeneration von Lösungsmitteln (Irlam 2017). Eine hohe CO₂-Abscheidungsrate in Bezug auf die eingesetzte Biomasse ist ein wichtiges Effizienzkriterium, das bei der Erprobung von BECCS-Konzepten und der Förderung ihrer Markteinführung berücksichtigt werden sollte. In diesem Bereich gibt es erhebliche Unterschiede zwischen den verschiedenen BECCS-Konzepten (siehe Anhang: Tabelle 1).

In Energiesystemmodellen, die auf eine kostenoptimierte Klimaneutralität bis 2045 abzielen, wird die begrenzte Biomasse in erheblichem Maße in BECCS-Konzepten eingesetzt (Kopenhagen-Projekt Ariadne 2021, Prognos et al. 2021). Der Grund dafür sind die hohen Potenziale zur CO₂-Entnahme im Vergleich zur Stärkung natürlicher Senken (z.B. Aufforstungen), deren Möglichkeiten in Deutschland durch die begrenzte Flächenverfügbarkeit eingeschränkt sind. BECCS bietet zudem flexible erneuerbare Energie, lässt sich schnell skalieren und ermöglicht eine hohe dauerhafte Kohlenstoffspeicherung mit präzisen Überwachungs- und Kontrollmechanismen. Allerdings zeigen die Modelle derzeit ein sehr uneinheitliches Bild davon, welche BECCS-Konzepte den optimalen Beitrag leisten können. Dies liegt auch an den erheblichen Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Kostenentwicklung für die einzelnen Komponenten. Deshalb sollte aktuell eine breite Palette von BECCS-Ansätzen weiterentwickelt werden (z.B. Biogas, Heizkraftwerke, Vergasung, Pyrolyse).

Schlussfolgerung: Aktuell sind die Hauptkostentreiber für BECCS infrastruktur- und technologiebedingt. Es sollte ein sicheres Investitionsumfeld geschaffen werden und eine Bandbreite unterschiedlicher BECCS-Ansätze gefördert werden. Die CO₂-Abscheidungsrate kann als Effizienzkriterium für die Einordnung von BECCS-Demonstratoren zugrunde gelegt werden, sollte aber gemeinsam mit der Energieeffizienz als Bewertungsmaßstab dienen.

5.3. Umwelt

Während naturbasierte Lösungen zur CO₂-Entnahme oft positive Umwelteffekte erzielen – wie die Verstärkung von Kohlenstoffsenken, den Schutz der Biodiversität und die Förderung der Klimaanpassung (Seddon et al. 2021) – wird BECCS häufig mit einem erhöhten Verbrauch land- und forstwirtschaftlicher Primärprodukte (z.B. Mais, Gräser, Holz) in Verbindung gebracht (Kato & Yamagata 2014, Köberle 2019). Dies kann Risiken für Boden, Wasser, Luft und Biodiversität mit sich bringen und die Klimaeffizienz mindern (Fajardy et al. 2018, Stoy et al. 2018). Die Umweltauswirkungen von BECCS hängen somit von zwei Faktoren ab: i) der Art und dem Umfang der verwendeten Biomasse und ii) der Kombination mit anderen CDR-Konzepten.

Art und Umfang der verwendeten Biomasse: Die Nutzung biogener Abfälle und Reststoffe für BECCS hat keine negativen Auswirkungen auf die Landnutzung. Sie bietet somit Vorteile für den Klimaschutz und trägt auch dazu bei, Umweltgefahren zu verringern. Es ist sinnvoll, Biomasse in Kaskaden zu nutzen, indem zunächst die stofflich verwertbaren Produkte verwendet und erst dann die nicht mehr nutzbaren Produkte in Energie (BECCS) umgewandelt werden.

Kombination von BECCS mit anderen CDR-Konzepten: Die Kombination von BECCS mit anderen CDR-Konzepten ist aus mehreren Gründen sinnvoll: i) naturbasierte Lösungen zur CO₂-Entnahme können nur einen begrenzten Beitrag zur CO₂-Entnahme leisten, verringern jedoch den Bedarf an technischen Konzepten wie BECCS und DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage), ii) der Aufbau von CO₂-Transport- und -Speicherinfrastrukturen wird stabiler, wenn verschiedene Technologien für die CO₂-Entnahme gemeinsam entwickelt werden (Scarlat et al. 2019) und iii) Synergien zwischen verschiedenen CDR-Optionen können die Umweltwirkungen reduzieren. Zum Beispiel kann die Kombination von BECCS mit kohlenstoffanreichernden Biomassekulturen (z.B. Paludikultur, Agroforstwirtschaft) positive Umwelteffekte erzielen. So liefert beispielsweise Paludikultur nicht nur Biomasse für BECCS, sondern hält zugleich die Hydrologie von Feuchtgebieten aufrecht und schützt die Lebensräume zahlreicher Arten, wodurch Klima- und Naturschutzziele gleichzeitig erreicht werden (Joosten et al. 2016). Die Nutzung kohlenstoffanreichernder Biomassekulturen (z.B. Paludikultur, Agroforstwirtschaft) in BECCS-Anlagen kann dazu beitragen, Märkte für diese Produkte zu etablieren (Agora Agrar 2024) – vorausgesetzt, sie erfolgt in einem geeigneten Umfang. Auch bei diesen Kombinationen gilt: Ein umfassender Klimaschutz ist die Voraussetzung, dass CDR sparsam und zielgerichtet eingesetzt werden kann.

Schlussfolgerung: BECCS kann mit Umweltrisiken verbunden sein, insbesondere aufgrund der Art und des Umfangs der verwendeten Biomasse. Neben dem Einsatz von biogenen Abfällen und Reststoffen unterstützen der Ausbau von Kaskaden und die Kombination mit anderen CDR-Konzepten eine umweltverträgliche Einführung von BECCS. BECCS-Konzepte, die potenziell positiv auf die Landnutzung wirken (z.B. Kombination von BECCS

mit Agroforstwirtschaft), haben zwar ein begrenztes Potenzial, können jedoch den natürlichen Klimaschutz auf lokaler Ebene unterstützen. Daher sollten sie in Demonstrationsprojekten weiter getestet werden.

5.4. Sozial und institutionell

Für die Betrachtung der sozialen und institutionellen Aspekte von BECCS ist es notwendig, zwei Teilprozesse zu unterscheiden: i) die Bereitstellung der Biomasse und ii) die Speicherung von CO₂. Beide Prozesse werden gesellschaftlich unterschiedlich bewertet. Zum einen besteht Konfliktpotenzial bei der Herstellung von Biomasse mithilfe limitierter Güter, wie Wasser (Coelho et al. 2012) und Land (Brack & King 2021). Die deutsche Tank-oder-Teller-Debatte wurde zwischen Umweltverbänden, Landwirtschaft und Industrie hitzig geführt. Zum anderen stimmen Studien darin überein, dass das Wissen über die Speicherung von CO₂ in einer Selbsteinschätzung von Befragten als gering zu erachten ist (Linzenich et al. 2021, Otto et al. 2022). Die Bewertung ist zugleich abhängig von der konkreten Konfiguration der Abscheidung, dem Transport und der Speicherung des CO₂ sowie von der Quelle der (fossilen oder biogenen) Vorprodukte (Merk et al. 2023, Anders et al. 2024).

Internationale Studien in Bezug auf BECCS-Anwendungen zeigen, dass die Wahrnehmung von Stakeholdern und Öffentlichkeiten wesentlich von der klima- und energiepolitischen Rahmung abhängt (Gough & Mander 2019, Bellamy et al. 2021). Beispielsweise werden Governance-Konzepte, die verschiedene CDR-Optionen einbeziehen und Anreize für ein ausgewogenes Portfolio schaffen – während sie gleichzeitig die Bedeutung der Emissionsreduzierung betonen – von Interessensgruppen positiver bewertet als solche, die sich ausschließlich auf BECCS konzentrieren (Bellamy et al. 2021, Cox et al. 2024). Die wenigen Studien, die soziale Aspekte der Etablierung von BECCS in Deutschland thematisieren, heben die folgenden vier Herausforderungen hervor: i) Risiken der Verschiebung von Emissionsreduktionsaktivitäten in die Zukunft, ii) Bedenken bezüglich Nachhaltigkeit, iii) Vertrauen in die Technologie und iv) intergenerationale Gerechtigkeit (Borchers et al. 2024).

Forschungsarbeiten zeigen auch, dass ein regionales und überregionales Netzwerk an Stakeholdern notwendig ist, damit BECCS mit allen zugehörigen Zwischenschritten implementiert werden und funktionieren kann. Die regionale Bewertung von BECCS ist daher von großer Bedeutung, wurde allerdings bisher kaum betrachtet. Erste Untersuchungen regionaler Stakeholdereinschätzungen in Deutschland finden ein komplexes Geflecht an Herausforderungen und Chancen gleichermaßen. Von den Stakeholdern wahrgenommene Herausforderungen in Bezug auf BECCS sind i) die umweltverträgliche Umsetzung, ii) der Stand der technischen Entwicklung, iii) die Transportinfrastruktur, iv) der regulatorische Rahmen und v) das fehlende Vertrauen in die politisch-ökonomische Umsetzbarkeit. Chancen werden primär im Beitrag zum Klimaschutz durch die dauerhafte und großskalige Speicherung von CO₂ gesehen (Otto & Matzner 2024).

Parallel zu den Erfahrungen mit CCS-Pilotanlagen in Deutschland (für Ketzin, siehe Szzybalski et al. 2014) sollten BECCS-Demonstratoren ein umfassendes Beteiligungsangebot für regionale und überregionale Öffentlichkeiten bieten (z.B. konkrete Einbeziehung von Anwohner*innen in Bewertung, Einsatz und Monitoring). Die Partizipationsformate sollten kontinuierlich einen möglichst vielschichtigen Austausch über Trade-offs (z.B. ökologische, gesellschaftliche, wirtschaftliche, politische Konflikte zwischen verschiedenen Zielen)

ermöglichen. Öffentliche Beteiligungsformate geben dabei keine Garantie für eine technisch gewünschte Umsetzung. Sie ermöglichen aber umfassende Bewertungen sowie Entscheidungen, die gesellschaftliche, politische und ökologische Kosten einbeziehen.

Schlussfolgerung: Die öffentliche Debatte von BECCS muss sich mit Fragen der Biomassekonkurrenz einerseits und begrenzten Kenntnissen sowie der Risikowahrnehmung rund um CO₂-Abscheidung und -Speicherung andererseits auseinandersetzen. Für eine effektive Partizipation der Akteure besteht daher ein Bedarf des kontinuierlichen Austauschs und der frühzeitigen Debatte um politische und finanzielle Teilhabe. Folglich geht es hierbei nicht allein um die Kommunikation von Informationen, sondern um breite und Adressat*innen orientierte Foren der Meinungsbildung über BECCS.

5.5. Recht

Das Recht soll einen Ordnungsrahmen für den nachhaltigen Einsatz von BECCS schaffen. Es muss dafür konkurrierende gesellschaftliche Interessen berücksichtigen und in einen fairen Ausgleich bringen. Dies gilt sowohl mit Blick auf die i) Bereitstellung der Biomasse, ii) Bereitstellung der Bioenergie als auch auf die iii) Prozessschritte Abscheidung, Transport und Speicherung des CO₂. Aus rechtlicher und rechtspolitischer Sicht verdienen in diesem Zusammenhang drei Themenkomplexe besondere Aufmerksamkeit.

Bereitstellung der Biomasse: Die Verzahnung mit den bestehenden Regelungen zur nachhaltigen Bereitstellung der Biomasse ist notwendig. Es ist sicherzustellen, dass die Bereitstellung der Biomasse für BECCS den Bedarf nach Biomasse insgesamt nicht signifikant erhöht. Hierzu bedarf es grundsätzlich einer Skalierung von BECCS, die sich an der Menge nachhaltig generierbarer Biomasse ausrichtet. Geeignet erscheinen Maßnahmen, die den Prozess der Verwertung auf den Einsatz von Restbiomasse oder Biomasse aus der Abfallwirtschaft beschränken. Dies könnte durch Anreizmechanismen oder ordnungsrechtliche Maßnahmen erfolgen.

Einbettung in rechtspolitische Strategien: Die Entwicklung von BECCS ist in den Kontext verschiedener Strategien der Bundesregierung einzubetten. Die Langfriststrategie Negativemissionen (Lne) entscheidet wesentlich darüber, welche Rolle BECCS bei der Erzeugung von Negativemissionen zukommen soll (insbesondere mit Blick auf die Erfüllung der nach § 3 lit b KSG festzulegenden Zielvorgaben für technische Senken). Die Nationale Biomassestrategie (NABIS) ist insbesondere für die nachhaltige Bereitstellung von Biomasse bedeutsam. Die Kraftwerksstrategie wiederum ist wesentlich für die Umwidmung bestehender oder die Entwicklung neuer Anlagen zur Durchführung von BECCS. Und schließlich identifiziert die Carbon Management Strategie den Bedarf an CO₂-Speicherstätten und definiert den Zugang und Ausbau zur CO₂-Transportinfrastruktur. Beispielsweise wäre klarzustellen, ob CO₂ aus umgewidmeten Kohlekraftwerken unter das im Gesetzesentwurf zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes festgelegte Einspeiseverbot für CO₂ aus Kohlekraftwerken fallen würde (Markus et al. 2024).

Ausblick gesetzliche Rahmenbedingungen: Perspektivisch gilt es weiterhin zu klären, unter welchen Voraussetzungen BECCS förderungswürdig ist. Dabei setzen sowohl die Unterstützung durch öffentliche Finanzmittel als auch die Integration in den freiwilligen oder verbindlichen Emissionshandel klare Nachhaltigkeitsstandards voraus. Bedeutsam sind hier

die aktuellen Bestrebungen der Europäischen Union, einen unionsweiten Rahmen für die Abscheidung, Speicherung und Weiterverwendung von CO₂ zu schaffen, sowie deren Absicht, die Einbeziehung negativer Emissionen in den verpflichtenden Emissionshandel bis 2026 zu prüfen.

Schlussfolgerung: BECCS muss in den bestehenden Rechtsrahmen integriert werden, um Umweltrisiken, insbesondere im Bereich der Biomassebereitstellung, zu minimieren. Gleichzeitig müssen gesetzliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine Etablierung von BECCS ermöglichen – hier besteht insbesondere Handlungsbedarf beim Transport und der Speicherung von CO₂.

6. Künftige Anwendungen von BECCS

Aktuell werden erst ca. 20 % des Energiesystems mit erneuerbaren Energien versorgt. Bioenergie stellt knapp die Hälfte (ca. 10 %) der erneuerbaren Energien bereit, hat aber – anders als Sonne und Wind – kaum ein nennenswertes weiteres Ausbaupotenzial. In einem zunehmend auf erneuerbare Energien ausgerichteten Energiesystem sollte Biomasse daher vor allem dort eingesetzt werden, wo andere erneuerbare Energien kaum oder nur zu sehr hohen Kosten nutzbar sind. Dies wird für Hochtemperaturprozesse in der Industrie, für ausgewählte Kraftstoffe (z.B. für den Flugverkehr) und für die ergänzende Strom- und Wärmeversorgung in bestimmten Zeiten (z.B. an sehr kalten Wintertagen mit überregionaler Windflaute) erwartet (Meisel et al. 2024). Die dafür notwendige Weiterentwicklung der aktuellen Bioenergienutzung sollte die Möglichkeit der CO₂-Abscheidung von Anfang an mit beachten. Hohe BECCS-Potenziale bietet dabei der Einsatz in Hochtemperaturindustrieprozessen, die eine CO₂-Abscheidung immanent benötigen (z.B. Zementherstellung).

Die Zementherstellung braucht viel Energie mit sehr hohen Temperaturen, die prozessbedingt auch nicht elektrisch bereitstellbar sind. Gleichzeitig wird beim Brennen des Kalksteins CO₂ aus dem Rohmaterial freigesetzt, sodass eine CO₂-Abscheidung und -Speicherung zur Emissionsreduktion unerlässlich ist. Beim Einsatz von Biomasse als Brennstoff können in einer solchen Anlage ohne weiteren Aufwand negative Emissionen erzeugt werden (Ige et al. 2024). Allerdings sind Zementwerke sehr groß und brauchen daher sehr viel Brennstoff. Generell gilt daher: i) Die Standorte großer Zementwerke und anderer Hochtemperaturindustrien sind für den Aufbau von BECCS-Kapazitäten unbedingt zu berücksichtigen – ggf. kann in bestimmten Regionen die Verfügbarkeit von biogenen Abfällen und Reststoffen für bestehende Bioenergieanlagen künftig geringer ausfallen und damit ihre Nachrüstung mit BECCS nicht empfehlenswert sein. ii) Voraussichtlich wird eine vollständige Umstellung dieser großen Anlagen auf Biomasse in der Regel nicht möglich sein. Die Anrechenbarkeit von BECCS in großen Anlagen mit verschiedenen Brennstoffen muss durch geeignete Bilanzierungs- und Zertifizierungsmethoden vorbereitet werden.

Andere Hochtemperaturindustrieprozesse, die aktuell Erdgas zur Wärmebereitstellung nutzen, werden eher am Einsatz von Biogas oder Biomethan interessiert sein. Das kann bedeuten, dass CO₂-Abscheidung aus Biogas oder Biomethan in diesen dann deutlich größeren Anlagen künftig besser realisiert werden kann, denn im aktuellen Bioenergiesystem sind die Anlagen, die Biogas oder Biomethan nutzen, in der Regel zu klein, um eine CO₂-Abscheidung zu realisieren.

Schlussfolgerung: BECCS in Hochtemperaturindustrieprozessen ist für ein klimaneutrales Energiesystem von großer Bedeutung und bisher noch nicht etabliert. Bei geeigneter Förderung kann BECCS diese Transformation des Energiesystems unterstützen, wenn ein nachhaltiger Einsatz von Biomasse sichergestellt werden kann.

7. Zehn Handlungsempfehlungen für BECCS als nachhaltiger Beitrag zur dauerhaften CO₂-Entnahme

- (1) BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) umfasst die CO₂-Abscheidung und -Speicherung bei gleichzeitiger Bereitstellung von Bioenergie. Verschiedene CO₂-Abscheidungen und -Speicherungen sind möglich, auch Biokohle kann entstehen. Essenziell ist die Dauerhaftigkeit (Permanenz) der CO₂-Speicherung. Dies unterscheidet BECCS von BECCU (Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation) und muss eindeutig definiert werden.
- (2) Das bestehende Bioenergiesystem in Deutschland umfasst ein Portfolio an Technologien und eine Vielzahl von Anlagen, die einen substanziellen Beitrag zur Versorgung mit erneuerbaren Energien liefern, bisher aber nicht auf BECCS ausgerichtet sind. Voraussetzung, um mit BECCS Netto-Negativ-Effekte zu erzielen, sind i) eine nachhaltige Biomassebereitstellung, ii) ein effizienter Anlagenbetrieb und iii) die zielgerichtete Nutzung von Bioenergie in Bereichen, die schwer zu defossilisieren sind. Gefördert werden sollte die Bereitstellung von BECCS aus biogenen Abfällen und Reststoffen.
- (3) Aus biogenen Rest- und Abfallstoffen kann mit dem heutigen Bioenergieanlagenbestand eine Größenordnung von bis zu 28-39 Mio. t CO₂/Jahr für die Abscheidung zugänglich gemacht werden.
- (4) Ein Einstieg in BECCS sollte durch die Erweiterung bestehender Bioenergieanlagen mit hohem CO₂-Abscheidungspotenzial (u.a. Müllverbrennungsanlagen, große Biomasseheizkraftwerke) und der Option zur Anlagenumstellung auf eine gekoppelte Biokohlebereitstellung erfolgen. Die notwendige Planungssicherheit muss durch den Aufbau einer CO₂-Transport- und -Speicherinfrastruktur, die Vorbereitung von Geschäftsmodellen und Monitoring-, Reporting- und Verificationsystemen geschaffen und in Pilotprojekten erprobt werden.
- (5) Aktuell sind die Mehrkosten für BECCS nicht darstellbar. Bei steigenden CO₂-Preisen kann sich das ändern – dabei stellt sich beim jetzigen Kenntnisstand ein breites Portfolio an BECCS-Ansätzen als vorteilhaft dar und sollte in der technischen Weiterentwicklung und Markteinführung gefördert werden.
- (6) BECCS kann mit Umweltrisiken verbunden sein, insbesondere aufgrund der Art und des Umfangs der verwendeten Biomasse. Neben dem Einsatz von biogenen Abfällen und Reststoffen unterstützen der Ausbau von Kaskaden und die Kombination mit anderen CDR-Konzepten eine umweltverträgliche Einführung von BECCS.
- (7) Potenziell günstig auf die Landnutzung wirkende BECCS-Konzepte (z.B. Kombination von BECCS mit Agroforstwirtschaft), die eher ein begrenztes Potenzial haben, aber den natürlichen Klimaschutz lokal unterstützen können, sollten in Demonstrationsprojekten weiter erprobt werden.
- (8) Für eine effektive, gerechte und sozial sowie ökologisch nachhaltige Umsetzung von BECCS bedarf es einer breit angelegten, inklusiven und vielfältigen Partizipationsstrategie. Sie soll es gesellschaftlichen Akteuren ermöglichen, nicht nur Informationen

über BECCS zu erhalten, sondern ebenfalls Vorstellungen (z.B. bezüglich Biomassekonkurrenz oder den Risiken von CO₂-Abscheidung, -Transport und -Speicherung) einzubringen.

- (9) BECCS muss in den bestehenden Rechtsrahmen integriert werden, um Umweltrisiken, insbesondere im Bereich der Biomassebereitstellung, zu minimieren. Gleichzeitig müssen gesetzliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine Etablierung von BECCS ermöglichen – hier besteht insbesondere Handlungsbedarf beim Transport und der Speicherung von CO₂.
- (10) BECCS in Hochtemperaturindustrieprozessen ist für ein klimaneutrales Energiesystem von großer Bedeutung und bisher noch nicht etabliert. Bei geeigneter Förderung kann BECCS diese Transformation des Energiesystems unterstützen. Hierfür sind standort-spezifische Analysen erforderlich, um sicherzustellen, dass ausreichend biogene Abfälle und Reststoffe verfügbar sind. Zudem muss ein Bilanzierungs- und Zertifizierungsrahmen geschaffen werden, der auch die Berücksichtigung von Teilströmen aus Industrieprozessen ermöglicht.

Literatur

Agora Agrar (2024): Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Ernährung in einer klimaneutralen EU. Die Landnutzungssektoren als Teil eines nachhaltigen Ernährungssystems und der Bioökonomie. Deutsche Zusammenfassung. (<https://www.agora-agrar.de/publikationen/landwirtschaft-forstwirtschaft-und-ernaehrung-in-einer-klimaneutralen-eu>), (letzter Zugriff: 14.11.2024).

Anders, S.; Liebe, U.; Meyerhoff, J. (2024): Cross-border CO₂ transport decreases public acceptance of carbon capture and storage. In: *Nature Climate Change*, 14. (doi: 10.1038/s41558-024-02023-0).

Bellamy, R.; Fridahl, M.; Lezaun, J.; Palmer, J.; Rodriguez, E.; Lefvert, A.; Grönkvist, S.; Haikola, S. (2021): Incentivising bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) responsibly: Comparing stakeholder policy preferences in the United Kingdom and Sweden. In: *Environmental Science & Policy*, 116. (<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.09.022>).

BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung) (2022): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2021. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung, Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. (https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2021.pdf;jsessionid=31F25E44C8BC81F5E6504BFA25C3ACA2.intern-et001?__blob=publicationFile&v=3), (letzter Zugriff: 14.11.2024).

BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (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), (letzter Zugriff: 14.11.2024).

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.; Thoni, T.; Wu, J.; Yeates, C. (2022): Scoping carbon dioxide removal options for Germany – What is their potential contribution to Net-Zero CO₂? In: *Frontiers in Climate*, 4. (<https://doi.org/10.3389/fclim.2022.810343>).

Borchers, M.; Förster, J.; Thrän, D.; Beck, S.; Thoni, T.; Korte, K.; Gawel, E.; Markus, T.; Schaller, R.; Rhoden, I.; Chi, X.; Dahmen, N.; Dittmeyer, R.; Dolch, R.; Dold, C.; Herbst, M.; Heß, D.; Kalhori, A.; Koop-Jakobsen, K.; Li, Z.; Oshlies, A.; Reusch, T. B. H.; Sachs, T.; Schmidt-Hattenberger, C.; Stevenson, A.; Wu, J.; Yeates, C.; Mengis, N. (2024): A comprehensive assessment of carbon dioxide removal options for Germany. In: *Earth's Future*, 12, 5. (<https://doi.org/10.1029/2023EF003986>).

Brack, D.; King, R. (2021): Managing land-based CDR: BECCS, forests and carbon sequestration. In: *Global Policy* 12, S1. (<https://doi.org/10.1111/1758-5899.12827>).

Bundesnetzagentur (2023): Daten des Marktstammdatenregisters (MaStR) / Erneuerbare-Energien-Gesetz. <https://www.marktstammdatenregister.de> (letzter Zugriff: 14.11.2024).

Coelho, S.; Agbenyega, O.; Agostini, A.; Erb, K.; Haberl, H.; Hoogwijk, M.; Lal, R.; Lucon, O.; Maser, O.; Moreira, J. R. (2012): Land and water: linkages to bioenergy. In: Johansson, T. B.; Patwardhan, A.; Nakićenović, N.; Gomez-Echeverri, L. (Hrsg.): *Global energy assessment: toward a sustainable future*. Cambridge, Laxenburg, Austria: Cambridge University Press.

Cox, E.; Bellamy, R.; Waller, L. (2024): Public attitudes and emotions toward novel carbon removal methods in alternative sociotechnical scenarios. In: *Environmental Research Letters*, IOP Publishing, 19, 8. (doi: 10.1088/1748-9326/ad5dd0).

DENA (2022): DENA Biogasregister Auswertung 2022, persönliche Auskunft.

EBI (European Biochar Industry) (2024): European Biochar Market Report 2023/24. (<https://www.biochar-industry.com/2024/european-biochar-market-report-2023-2024-available-now>), (letzter Zugriff: 14.11.2024).

Fajardy, M.; Chiquier, S.; Mac Dowell, N. (2018): Investigating the BECCS resource nexus: delivering sustainable negative emissions. In: *Energy & Environmental Science*, 11, 12. (<https://doi.org/10.1039/c8ee01676c>).

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (2023): Jahresbericht 2022/23. (https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2024/Mediathek/FNR_Jahresbericht_2022-23_240419_bf.pdf), (letzter Zugriff: 14.11.2024).

Fuss, S.; Lamb, W. F.; Callaghan, M. W.; Hilaire, J.; Creutzig, F.; Amann, T.; Beringer, T.; de Oliveira Garcia, W.; Hartmann, J.; Khanna, T.; Luderer, G.; Nemet, G. F.; Rogelj, J.; Smith, P.; Vicente Vicente, J. L.; Wilcox, J.; del Mar Zamora Dominguez, M.; Minx, J. C. (2018): Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. In: *Environmental Research Letters*, 13, 6. (<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>).

Gough, C.; Mander, S. (2019): Beyond social acceptability: applying lessons from CCS social science to support deployment of BECCS. In: *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6, 4. (<https://doi.org/10.1007/s40518-019-00137-0>).

Ige, O. E.; von Kallon, D. V.; Desai, D. (2024): Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. In: *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26. (<https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0>).

IHS Markit (2023a): *World Ethanol & Biofuels Report*, 21, 13.

IHS Markit (2023b): *World Ethanol & Biofuels Report*, 21, 14.

IPCC (2018): *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.; Zhai, P.; Pörtner, H.-O.; Roberts, D.; Skea, J.; Shukla, P.R.; Pirani, A.; Moufouma-Okia, W.; Péan, C.; Pidcock, R.; Connors, S.; Matthews, J. B. R.; Chen, Y.; Zhou, X.; Gomis, M. I.; Lonnoy, E.; Maycock, T.; Tignor, M.; Waterfield, T. (Hrsg.). Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Irlam, L. (2017): *Global costs of carbon capture and storage. Update*. Global CSS Institute. Australia.

Joosten, H.; Gaudig, G.; Tanneberger, F.; Wichmann, S.; Wichtmann, W. (2016): *Paludiculture: sustainable productive use of wet and rewetted peatlands (Vol. 10)*. Cambridge: Cambridge University Press.

Kaltschmitt, M.; Stampfer, K. (Hrsg.) (2024a): *Energie aus Biomasse. Ressourcen und Bereitstellung. Band 1*. Wiesbaden: Springer.

Kaltschmitt, M.; Bornemann, L.; Daniel-Gromke, J.; Denysenko, V.; Drawer, C.; Ehmen, S.; Fink, L.; Lange, J.; Lenz, V.; Maslaton, M.; Mazlum, L. E.; Mendler, F.; Prieß, T.; Rensberg, N.; Schulthoff, M.; Szarka, N. (2024b): *Erneuerbare Energien in Deutschland. Stand 2023*. Hamburg: Ortsverein Hamburg. (https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/vor_ort/bv/hamburger-bv/dateien/Erneuerbare_Energien_in_Deutschland_-_Stand_2023.pdf), (letzter Zugriff: 14.11.2024).

Kaltschmitt, M.; Hofbauer, H.; Lenz, V. (Hrsg.) (2024c): *Energie aus Biomasse. Thermo-chemische Konversion. Band 2*. Wiesbaden: Springer.

Kato, E.; Yamagata, Y. (2014): BECCS capability of dedicated bioenergy crops under a future land-use scenario targeting net negative carbon emissions. In: *Earth's Future*, 2, 9. (<https://doi.org/10.1002/2014ef000249>).

Köberle, A. C. (2019): The value of BECCS in IAMs: a review. In: *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6, 4. (<https://doi.org/10.1007/s40518-019-00142-3>).

Kopernikus-Projekt Ariadne (2021): *Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich*. (<https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>), (letzter Zugriff: 14.11.2024).

Linzenich, A.; Arning, K.; Ziefle, M. (2021): Acceptance of energy technologies in context: comparing laypeople's risk perceptions across eight infrastructure technologies in Germany. In: *Energy Policy*, 152. (<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112071>).

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

Markewitz, P.; Zhao, I.; Robinius, M. (2017): *Technologiebericht 2.3. CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende*. Forschungszentrum Jülich GmbH.

Markus, T.; Otto, D.; Thrän, D. (2024): Die Carbon Management Strategie und CCS im Lichte klima- und energierechtlicher Weichenstellungen. In: *Zeitschrift für Umweltrecht*, 7-8.

Meisel, K.; Jordan, M.; Dotzauer, M.; Schröder, J.; Lenz, V.; Naumann, K.; Cyffka, K.-F.; Dögnitz, N.; Schindler, H.; Daniel-Gromke, J.; Costa de Paiva, G.; Schmid, C.; Szarka, N.; Majer, S.; Müller-Langer, F.; Thrän, D. (2024): Quo vadis, biomass? Long-term scenarios of an optimal energetic use of biomass for the German energy transition. In: *International Journal of Energy Research*, 2024. (<https://doi.org/10.1155/2024/6687376>).

Merk, C.; Andersen, G.; Nordø, Å. D.; Helfrich, T. (2023): Carbon capture and storage: publics in five countries around the North Sea prefer to do it on their own territory. In: *Kiel Working Paper*, 2252.

Otto, D.; Sprenkeling, M.; Peuchen, R.; Nordø, Å. D.; Mendrinós, D.; Karytsas, S.; Veland, S.; Polyzou, O.; Lien, M.; Heggelund, Y.; Gross, M.; Piek, P. (2022): On the organisation of translation – an inter- and transdisciplinary approach to developing design options for CO₂ storage monitoring systems. In: *Energies*, 15, 15. (<https://doi.org/10.3390/en15155678>).

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 Reserch*, 10, 1. (<https://doi.org/10.3390/c10010025>).

Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora*

-
- Energiewende und Agora Verkehrswende. (https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf), (letzter Zugriff: 14.11.2024).
- Rensberg, N.; Denysenko, V.; Daniel-Gromke, J. (2023): Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan. DBFZ Report Nr. 50. (https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_50.pdf), (letzter Zugriff: 14.11.2024).
- Sanei, H.; Rudra, A.; Møller Moltesen Przewitt, Z.; Kousted, S.; Benkhettab Sindlev, M.; Zheng, X.; Nielsen, S. B.; Petersen, H. I. (2024): Assessing biochar's permanence: an inertinite benchmark. In: *International Journal of Coal Geology*, 281. (<https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104409>).
- Scarlat, N.; Fahl, F.; Lugato, E.; Monforti-Ferrario, F.; Dallemand, J. F. (2019): Integrated and spatially explicit assessment of sustainable crop residues potential in Europe. In: *Biomass and Bioenergy*, 122. (<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.021>).
- Schröder, J.; Naumann, K. (Hrsg.) (2023): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. DBFZ Report Nr. 44. (<https://www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/dbfz-report-nr-44#c19594>), (letzter Zugriff: 14.11.2024).
- Seddon, N.; Smith, A.; Smith, P.; Key, I.; Chausson, A.; Girardin, C.; House, J.; Srivastava, S.; Turner, B. (2021): Getting the message right on nature-based solutions to climate change. In: *Global Change Biology*, 27, 8. (<https://doi.org/10.1111/gcb.15513>).
- Smith, S. M.; Geden, O.; Gidden, M. J.; Lamb, W. F.; Nemet, G. F.; Minx, J. C.; Buck, H.; Burke, J.; Cox, E.; Edwards, M. R.; Fuss, S.; Johnstone, I.; Müller-Hansen, F.; Pongratz, J.; Probst, B. S.; Roe, S.; Schenuit, F.; Schulte, I.; Vaughan, N. E. (Hrsg.) (2024): The state of carbon dioxide removal 2024 – 2nd Edition. (doi 10.17605/OSF.IO/F85QJ).
- Stavrakas, V.; Spyridaki, N.-A.; Flamos, A. (2018): Striving towards the deployment of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS). In: *Sustainability* 10. (<https://doi.org/10.3390/su10072206>).
- Stoy, P. C.; Ahmed, S.; Jarchow, M.; Rashford, B.; Swanson, D.; Albeke, S.; Bromley, G.; Brookshire, E. N. J.; Dixon, M. D.; Haggerty, J.; Miller, P.; Peyton, B.; Royem, A.; Spangler, L.; Straub, C.; Poulter, B. (2018): Opportunities and trade-offs among BECCS and the food, water, energy, biodiversity, and social systems nexus at regional scales. In: *BioScience*, 68, 2. (<https://doi.org/10.1093/biosci/bix145>).
- Szizybalski, A.; Kollersberger, T.; Möller, F.; Martens, S.; Liebscher, A.; Kühn, M. (2014): Communication supporting the research on CO₂ storage at the Ketzin pilot site, Germany – a status report after ten years of public outreach. In: *Energy Procedia*, 51.
- 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>), (letzter Zugriff: 14.11.2024).
- 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.; Thrän, D.; Szarka, N. (2023): Factsheets for bio-based carbon dioxide removal options in Germany [Data set]. Open Agrar Repository. (https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00088415), (letzter Zugriff: 14.11.2024).
-

Anhang

Tabelle 1 zeigt die Abscheidungsraten und Kosten für BECCS-Konzepte, bei denen die BECCS-Technologie an bestehenden Anlagen nachgerüstet wird (Add-on). Die angegebenen Kosten (Investitions- und Betriebskosten) berücksichtigen die zusätzlichen Kosten im Vergleich zum regulären Betrieb einer Bioenergieanlage. Diese zusätzlichen Kosten entstehen durch die Abscheidung, den Transport und die Speicherung von CO₂.

Eine alleinige Betrachtung der Abscheidungsrate ist nicht ausreichend, um die Effizienz von BECCS zu bewerten. Oftmals ist eine niedrigere Abscheidungsrate mit der Produktion wertvoller Energieträger verbunden. Zum Beispiel stehen die geringen CO₂-Abscheidungsraten bei der Vergasung und der Herstellung von Biomethan einer Wertschöpfung durch Fischer-Tropsch (FT)-Kraftstoffe und Biomethan gegenüber, das als Ersatz für Erdgas genutzt werden kann.

Tabelle 1: Daten zu ausgewählten BECCS-Add-on Referenzkonzepten (Wollnik et al. 2023)

BECCS Add-on Konzepte	Energieeffizienz (Nur Bioenergie)	Abscheidungsrate [mol C in CO₂/mol C in Biomasse]	Kosten [€/tCO₂]
Biogas Kraft-Wärme-Koppelung, 500 kWel	90 %	34 %	307*
Biomethan, 2.500 kWel	56 %	24 %	106
Verbrennung thermisch, 800 kWth	65-80 %	66 %	149
Verbrennung elektrisch, 500 MWel	55-70 %	80 %	298*
Vergasung + FT, 100 MWth	25-75 %	25 %	125
Bioethanol Zuckerrübe	60 %	41 %	113
Biogas + Biokohle	90 %	34 % + 31 %	198
Biomethan + Biokohle	56 %	24 % + 19 %	95
Bioethanol + Biokohle	60 %	40 % + 60 %	92
Biomethan PostCCS	-	24 % + 28 %	138

*bei 3.000
Volllaststunden

Impressum

Herausgeber:

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung für Umweltforschung GmbH – UFZ

Projektleitung:

Prof. Dr. Daniela Thrän

Stand:

November 2024

Bitte zitieren als:

Thrän, D.; Borchers, M.; Jordan, M.; Lenz, V.; Markus, T.; Matzner, N.; Oehmichen, K.; Otto, D.; Radtke, K. S.; Reshef, N.; Sadr, M.; Siedschlag, D.; Wollnik, R. (2024): BECCS – ein nachhaltiger Beitrag zur dauerhaften CO₂-Entnahme in Deutschland? Diskussionspapier. DOI: <https://doi.org/10.57699/edk7-mc18>.

Projekt BioNET: <https://cdrterra.de/consortia/bionet>

Forschungsprogramm CDRterra: <https://cdrterra.de>



Helmholtz –Zentrum für
Umweltforschung – UFZ
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
www.ufz.de