



Zentrum
Libérale
Moderne

BELLONA

ECKPUNKTE ZUR TECHNISCHEN ENTNAHME VON BIOGENEM KOHLENSTOFF

LibMod Policy Paper

Dieses Policy Paper wurde erstellt von

Zentrum Liberale Moderne

Das Zentrum Liberale Moderne (LibMod) ist ein politischer Think Tank und eine Debattenplattform. LibMod steht für die Verteidigung und Erneuerung der liberalen Demokratie, für den Aufbruch in die ökologische Moderne und für eine fundierte Osteuropa-Expertise.

Im Programm Ökologische Moderne finden wir Antworten darauf, wie Klimaschutz, post-fossile und zirkuläre industrielle Moderne und freiheitliche Demokratie zusammen funktionieren. Unser Projekt Stakeholder-Dialog Carbon Management / Negativemissionen ist eine Plattform für Politik, Wissenschaft, Industrie und Zivilgesellschaft zum Austausch darüber, wie langfristig Negativemissionen in den jeweiligen Sektoren erreicht werden können.

Bellona Deutschland

Bellona setzt sich für die Entwicklung und Umsetzung von Lösungen zu drei grundlegenden Herausforderungen unserer Zeit ein: Klimawandel, Umweltverschmutzung und die Zerstörung von Ökosystemen. Die gemeinnützige Klima- und Umweltschutzorganisation steht ein für demokratische und gerechte Gesellschaften mit freiem Zugang zu Informationen – denn nur diese können die wirksamsten Antworten auf unsere Herausforderungen entwickeln und umsetzen.

Um nachhaltige Lösungen zu identifizieren, entwickeln und zu fördern, verfolgt Bellona einen systemischen Ansatz. Dabei arbeitet die Organisation wissenschaftsbasiert und lösungsorientiert mit allen relevanten Akteuren – denn die Entwicklung wirksamer Lösungen erfordert eine enorme gemeinsame Anstrengung von Wissenschaft, Industrie, Finanzwesen, Zivilgesellschaft, öffentlichem Sektor und politischen Entscheidungsträger/innen. Bellona Deutschland mit Sitz in Berlin arbeitet schwerpunktmäßig zum Klimaschutz in der Industrie.

Hauptautoren

Milan Loose, milan@bellona.org

Bruno Naredo, bruno.naredo@libmod.de

Co-Autorinnen und Autoren

Dr. Lukas Daubner (Libmod)

Dr. Georg Kobiela (Bellona Deutschland)

Amrei Milch (Bellona Deutschland)

Danksagung

Dieses Papier ist das Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen dem Zentrum Liberale Moderne und Bellona Deutschland sowie der Diskussionen im Rahmen mehrerer Multi-Stakeholder-Workshops. Einen besonderen Dank an alle Teilnehmenden, die mit ihrer Expertise und ihren Diskussionsbeiträgen zur Realisierung dieses Papiers beigetragen haben. Darüber hinaus danken wir herzlich all jenen, die das Papier kenntnisreich kommentiert haben, sowie unseren Kolleg/innen Julia Hönnecke, Rena Barghusen, Moritz Schauerhammer und Eliane Hochsprung sowie dem Team von Bellona Europa für ihre Unterstützung. Zudem danken wir herzlich der Stiftung Mercator für die finanzielle Unterstützung.

INHALT

Zusammenfassung	4
Abkürzungen, Abbildungen, Infoboxen	5
1. Einführung: Bio-CCS und Pflanzenkohle als low-hanging fruits für Negativemissionen?	6
2. Biomasse und Bio-CCS: Probleme und Potenziale	9
2.1. Klima- und umweltpolitische Zielkonflikte in der Biomassenutzung	9
2.2. Biomassenutzung im heutigen Energiesystem	12
2.3. Das Potenzial von auf Rest- und Abfallstoffen basierenden Bio-CCS-Verfahren	13
Festbrennstoffe	14
Flüssige und gasförmige Energieträger	14
Pflanzenkohleproduktion aus Nebenprodukten	16
Pflanzenkohleherstellung aus forstwirtschaftlichen Reststoffen	16
Zukünftiges Potenzial insgesamt	16
3. Herausforderungen für das künftige Bio-CCS-System	18
3.1. Nachhaltigkeitsanforderungen	18
Kohlenstoffbilanzierung	18
Kaskadennutzung	19
Recycling	19
Abfallreduktion	20
3.2. Wirtschaftlichkeit, Infrastruktur- und Technologiekosten	20
Wirtschaftlichkeit	20
Infrastruktur- und Investitionskosten	22
Technologische und operationelle Hürden	23
3.3. Räumliche Verteilung und Skaleneffekte	23
3.4. Gesellschaftliche Akzeptanz	25
Förderung von Akzeptanz	25
4. Politische Empfehlungen	27
4.1. Ein integriertes Zielsystem für Bio-CCS entwickeln	27
4.2. Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit sicherstellen	27
4.3. Technologieförderung stärken	28
4.4. Nachfrage sowie faire Wettbewerbsbedingungen schaffen	29
4.5. Infrastruktur bereitstellen und Investitionskosten absichern	29
4.6. Gesellschaftliche Akzeptanz und Beteiligung fördern	30
5. Fazit	31
6. Literatur	33

ZUSAMMENFASSUNG

- Bio-CCS hat Potenzial für Negativemissionen: In Deutschland könnten jährlich theoretisch ca. 10 Mt. CO₂ auf Basis der heute im deutschen Energiesystem eingesetzten biogenen Abfall- und Reststoffe nachhaltig entnommen werden. Das ist ein relevanter Beitrag zur Erreichung der Ziele der Klimaneutralität bis 2045 und Netto-Negativemissionen ab 2050.
- Neben Bio-CCS hat die Produktion von Pflanzenkohle aus Rest- und Abfallbiomasse ein Potenzial für Negativemissionen von 2 bis 3 Mt. CO₂-Entnahme jährlich. Sie ist eine wichtige Ergänzung für das Negativemissionen-Portfolio und muss integriert mit Bio-CCS betrachtet werden, da beides auf Biomasse zurückgreift.
- Aktuell spielen Bio-CCS-Anwendungen (etwa Biomethan oder Biomasse in Müllverbrennungsanlagen mit CCS) in Deutschland und der EU eine Nischenrolle. Eine Skalierung dieser Anwendungen unterliegt vielfältigen Zielkonflikten, die sorgfältig aufgelöst werden müssen. Die Entwicklung eines Bio-CCS-Systems ist auf politische Unterstützung und steuernde Eingriffe angewiesen.
- Nachhaltige Biomasse ist der zentrale Engpass: Die größte Herausforderung von Bio-CCS und der Pflanzenkohleproduktion ist sicherzustellen, dass mit der eingesetzten Biomasse tatsächlich dauerhafte Netto-Negativemissionen erzeugt werden. Dafür sollte die Verwendung von biogenen Rest- und Abfallstoffen priorisiert werden. Zur Bestimmung nachhaltiger Potenziale ist zudem eine vollumfängliche THG-Bilanzierung nötig, die auf belastbaren, projektbasierten MRV-Systemen fußt. So können Zielkonflikte mit Biodiversität, Ernährungssicherheit und natürlichen Senken abgeschwächt werden.
- Eine strategische Technologieförderung ist zentral für den Hochlauf: Frühzeitig sollten Forschung, Pilotprojekte und Innovation breit und technologieoffen gefördert werden. Mit dem Übergang in den Betrieb sollten ökologische Kriterien politisch stärker gewichtet und risikoarme Anwendungen priorisiert werden. Diese Kombination aus Anschubförderung, Priorisierung anhand des Klima- und Umweltnutzen und einem Ausstieg aus der Förderung bei Marktreife fördert den Hochlauf und vermeidet dauerhafte Subventionierungen.
- Tragfähige Geschäftsmodelle und CO₂-Infrastruktur fehlen: Hohe Investitions- und Betriebskosten sowie unzureichende ökonomische Anreize verhindern derzeit den Markthochlauf von Bio-CCS und anderen Negativemissionstechnologien. Öffentliche und privatwirtschaftliche Nachfrage nach CO₂-Entnahme müssen daher geschaffen werden. Ohne CO₂-Infrastruktur ist eine Skalierung von Bio-CCS nicht möglich.
- Gesellschaftliche Akzeptanz ist ein zentraler Erfolgsfaktor: Sie steigt mit der Vertrautheit und der wahrgenommenen Natürlichkeit der Methode, während fehlendes Wissen und Vertrauen, ökologische Risiken und soziale Konflikte sie schwächen können. Gestärkt werden kann Akzeptanz insbesondere durch transparente Kommunikation, vertrauenswürdige Akteur/innen, frühzeitige und faire Beteiligungsprozesse sowie eine gerechte Verteilung von Kosten und Nutzen.

Abkürzungen

BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage	KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
BIK	Bundesförderung Industrie und Klimaschutz	KSG	Klimaschutzgesetz
Bio-CCS	Biomass with Carbon Capture and Storage	kW	Kilowatt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	LNe	Langfriststrategie Negativemissionen
BMHKW	Biomasseheizkraftwerk(e)	LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionsausgaben)	MRV	Monitoring, Reporting and Verification
CCS	Carbon Capture and Storage	Mt	Megatonnen (Millionen Tonnen)
CCU	Carbon Capture and Utilization	MW	Megawatt
CDR	Carbon Dioxide Removal (Permanente CO ₂ -Entnahme)	MVA	Müllverbrennungsanlage
CEF	Connecting Europe Facility	NET	Negativemissionstechnologien
CMS	Carbon Management Strategie	OPEX	Operating Expenditures (Betriebsausgaben)
CRCF	Carbon Removals and Carbon Farming	PyCCS	Pyrolysis and Carbon Capture and Storage
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage	RED	Renewable Energy Directive (Erneuerbare-Energien-Richtlinie)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	TAB	Thermische Abfallbehandlung
ETS / EU-ETS	(EU-)Emissions Trading System ([EU-]Emissionshandelssystem)	TRL	Technology Readiness Level
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	TWh	Terawattstunden
		VCM	Voluntary Carbon Market (Freiwilliger Kohlenstoffmarkt)

Abbildungen

Infografik 1: Was sind Negativemissionen?	6
Infografik 2: Bio-CCS- und Pflanzenkohle-Kette	7
Infografik 3: Energetische Biomassenutzung in Deutschland	12
Infografik 4: CO ₂ -Entnahmepotenziale durch Bio-CCS und Pflanzenkohle	16
Infografik 5: Herausforderungen eines Bio-CCS-Systems	26
Infografik 6: Empfehlungen für ein nachhaltiges Bio-CCS-System	30

Infoboxen

Fallstudie Biomethanaufbereitung	11
Fallstudie Pflanzenkohle	15
Fallstudie Thermische Abfallbehandlung	17

1. EINFÜHRUNG: BIO-CCS UND PFLANZENKOHLE ALS LOW-HANGING FRUITS FÜR NEGATIVEMISSIONEN?

Bio-CCS bezeichnet eine Vielzahl von Verfahren zur chemischen Umwandlung von Biomasse in Energie und/oder Chemikalien mit anschließender Abscheidung und permanenter Speicherung des CO₂. Der in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff wird zur Wärmeerzeugung, zur Stromproduktion sowie zur Herstellung von Treibstoffen oder Chemikalien wie beispielsweise Bioethanol, Biomethan, Flugzeugtreibstoff und Wasserstoff genutzt. Zukünftig soll das in diesen Prozessen der Umwandlung entstandene CO₂ abgeschieden, transportiert und permanent gespeichert werden. Bio-CCS geht damit über BECCS hinaus, das nur die Umwandlung von Biomasse in Energie mit anschließender CO₂-Abscheidung und -Speicherung bezeichnet.

Wichtig aus der Perspektive des Klimaschutzes und somit für die Erzeugung von Negativemissionen (siehe Infografik 1) ist, dass der biogene Kohlenstoff dauerhaft in Reservoirs gespeichert oder in Stoffen gebunden bleibt. So können mittels Bio-CCS-Verfahren bspw. biogene Emissionen aus der Abfallverbrennung abgeschieden werden.

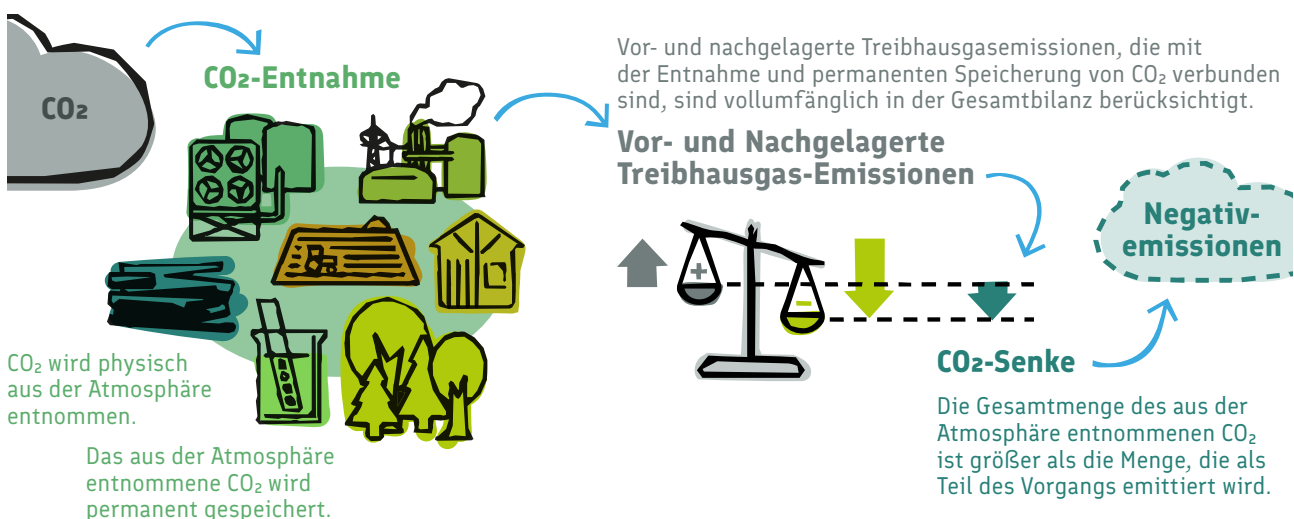
Das ist relevant und nötig, da Deutschland sich das Ziel gesetzt hat, bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral zu sein. Für das Erreichen des Ziels von Netto-Null-Emissionen werden

künftig Negativemissionstechnologien (NET) benötigt¹, die die schwer vermeidbaren und unvermeidbaren Emissionen ausgleichen.

Die Schätzungen der in Deutschland bis 2045 bestehenden Restemissionen reichen von 33 bis 204 Mt. CO₂ äq.² Bisher enthält das deutsche Klimaschutzgesetz (KSG) in §3a ausschließlich Ziele für natürliche CO₂-Entnahme in Ökosystemen. Vorgesehen ist für 2045 eine Zielgröße von 40 Mt. CO₂ äq CO₂-Entnahme. Darüber hinaus werden im laufenden Prozess zur Erstellung der Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) Zielgrößen für „technische Senken“ nach §3b KSG definiert, die die natürlichen Senken ergänzen sollen.

- 1 Laut allen großen Klimamodellierungsstudien und dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) müssen Entnahmemethoden, die auf Carbon Capture and Storage (CCS) basieren – wie Bioenergie und CCS (BECCS) oder Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) – zum Einsatz kommen, um ein ausreichendes Maß an Netto-Negativemissionen erreichen zu können (IPCC 2022a, Europäische Kommission 2025).
- 2 In der Kommunikation zur Langfriststrategie Negativemissionen hat das ehemalige Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz eine Spannbreite von 33-90 Mt. CO₂ äq. angegeben (BMWK 2024). In Merfort et al. (2023) lässt sich eine Spannbreite von 62-167 Mt. CO₂ äq. finden. Der neueste Projektionsbericht des Umweltbundesamts bildet in Szenarien eine Spannbreite von 163-204 Mt. CO₂ äq. ab (UBA 2025). Wichtig ist, dass laut KSG ein Teil dieser Restemissionen durch natürliche Senken und naturbasiertes CDR im LULUCF-Sektor abgedeckt werden sollen. Der LULUCF-Sektor ist aktuell als Netto-Emissions-Quelle in 2045 prognostiziert.

Infografik 1: Was sind Negativemissionen?



Bisher ist offen, welche Rolle und welchen Beitrag Bio-CCS im künftigen Zusammenspiel unterschiedlicher Negativemissionstechnologien in Deutschland einnehmen soll. Klar ist, dass Bio-CCS (bzw. BECCS) und Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) auch in Deutschland als die zwei entscheidenden industriellen CO₂-Entnahme-Methoden wissenschaftlich und politisch diskutiert werden (Thrän et al. 2024).

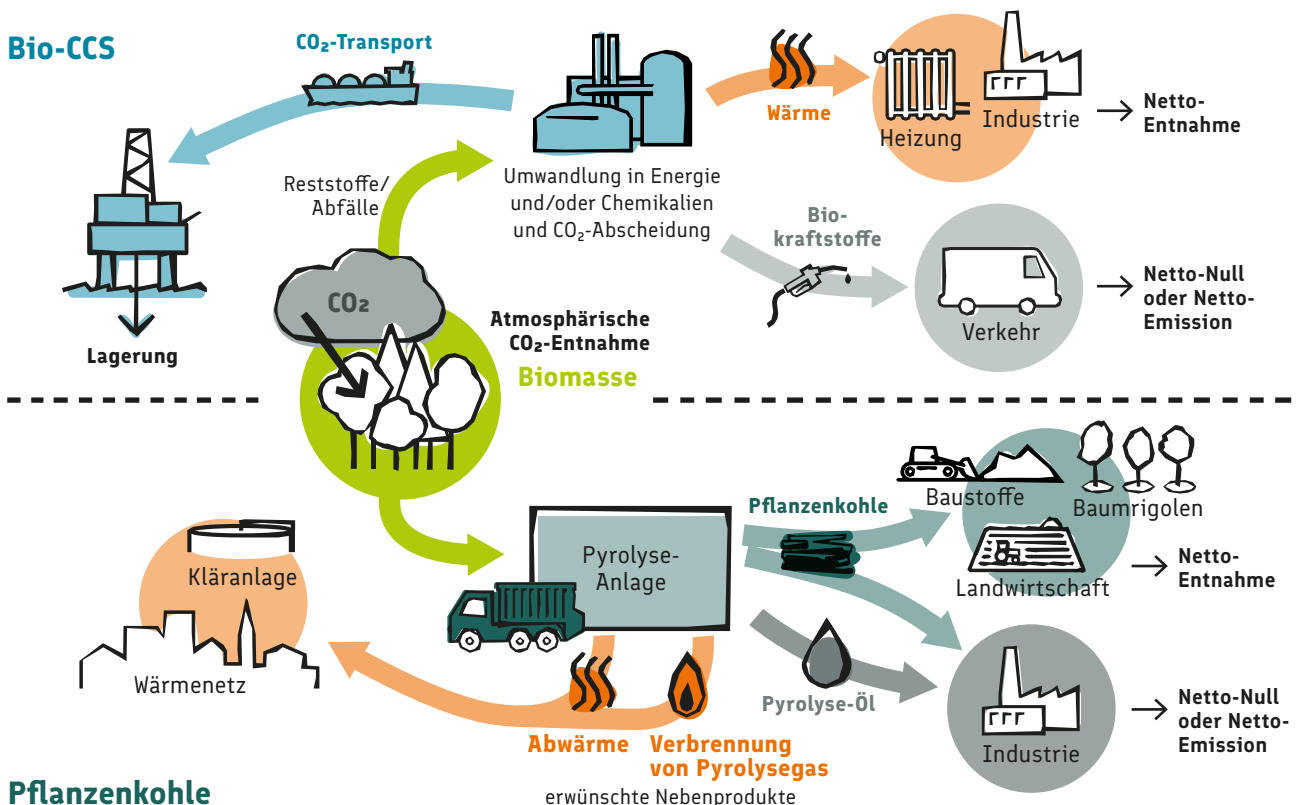
Bio-CCS gilt in der Debatte um Carbon Management und CO₂-Entnahme (LibMod 2024) oft als low-hanging fruit, da der Einsatz der Biomasse als klimaneutral angenommen wird – eine Annahme, die bei genauerer Betrachtung der gesamten Treibhausgasbilanz differenziert bewertet werden muss (siehe Kapitel 2.1). Daher wird die Nachrüstung bestehender Anlagen, die Biomasse für die Energie- und oder Chemikalienherstellung nutzen, mit CCS als sinnvolle Maßnahme für den Klimaschutz angesehen, da damit potenziell Kohlenstoff dauerhaft der Atmosphäre entzogen werden kann.

Neben der Abscheidung und Speicherung des biogenen Kohlenstoffs spielt die Umwandlung von Biomasse in Pflanzenkohle eine zunehmend größere Rolle im Portfolio der CO₂-Entnahme.

Bei der Herstellung von Pflanzenkohle durch Pyrolyse wird der Kohlenstoff, der zuvor durch das Pflanzenwachstum der Atmosphäre entnommen wurde, durch die Verbrennung ohne Sauerstoff in eine chemisch stabilere Form gebracht, die langfristig gespeichert werden kann (siehe Fallstudie: Pflanzenkohle S. 15 und Infografik 2). Da sowohl Bio-CCS-Verfahren als auch die Pyrolyse auf Biomasse zurückgreifen, betrachten wir sie hier gemeinsam – auch, um die Verfahren und ihre Potenziale strategisch aufeinander abzustimmen.

Es existieren Definitionen, die die Herstellung von Pflanzenkohle als PyCCS beschreiben (CDRterra 2025), da der biogene Kohlenstoff durch das Pflanzenwachstum aufgenommen und durch die Pyrolyse „gespeichert“ wird. Wir sprechen hier ausschließlich von Pflanzenkohle, da PyCCS aus unserer Sicht eine Nachrüstung von CCS an Pyrolyseanlagen bedürfte, um PyCCS zu heißen. Da die Pyrolysegase zudem sehr heterogen sind und keinen hohen CO₂-Gehalt aufweisen, ist die Aufbereitung der Gase und die Abscheidung von CO₂ sehr kostenintensiv und rechnet sich bislang nicht. Zudem ist das Ziel der Pyrolyse nicht CO₂ abzuscheiden, sondern Pflanzenkohle und Wärme als Nebenprodukt zu produzieren.

Infografik 2: Bio-CCS- und Pflanzenkohle-Kette



Bio-CCS-Verfahren sind technisch teilweise erprobt. In Europa gibt es bereits erste große Pilotvorhaben in der Planungsphase wie das BECCS-Projekt von Stockholm Exergi³ an einem Biomasseheizkraftwerk (BMHKW), oder das dänische Projekt Kredslob⁴ zur Abscheidung an einer Müllverbrennungsanlage. Diese sind aktuell auf staatliche und europäische Förderprogramme angewiesen. In Deutschland gibt es Anlagen, in denen Biogas dauerhaft in Abbruchbeton durch Mineralisierung eingelagert wird (Neustark 2025). Daneben ist die Produktion von Pflanzenkohle weiter fortgeschritten, auch weil sie selbst der Träger der CO₂-Entnahme ist, und im Vergleich zu Bio-CCS nicht auf eine CO₂-Transportinfrastruktur angewiesen ist. In der EU sind derzeit 185 Biomasse-Pyrolyseanlagen in Betrieb, die auf etablierte Geschäftsmodelle zurückgreifen können.

Ein Blick auf den freiwilligen Kohlenstoffmarkt (Voluntary Carbon Market, VCM) zeigt, dass für die CO₂-Entnahme aus Biomasse bisher hauptsächlich die Produktion von Pflanzenkohle genutzt wird. 90% der am Markt verkauften, also vertraglich zugesagten CO₂-Entnahme-Zertifikate kommen durch die Produktion von Pflanzenkohle zustande (CDR.fyi 2025). BECCS-Projekte dagegen haben bislang kaum CO₂-Entnahmen realisieren können.

BECCS und Bio-CCS werden allerdings sowohl international als auch in Deutschland hohe Potenziale zugeschrieben (IPCC 2018, Ariadne 2021, Sadr et al. 2024). Doch insbesondere die Modellierungen des IPCC überschätzen das Potenzial von BECCS, da sie die Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse global stark überbewerten (NEGEM 2022). Die Potenzialschätzungen sollten daher am Maß der nachhaltig verfügbaren Biomasse ausgerichtet werden.

In Deutschland stehen BECCS-Verfahren aktuell vor großen Hürden – hohe Kosten, legislative Unklarheiten und fehlende Infrastruktur hemmen die Umsetzung (Sadr et al. 2024). Für die Bestimmung des Potenzials von Negativemissionen für Pflanzenkohle fehlt es derzeit an einer wissenschaftlich fundierten Methode, um die Langfristigkeit und die Höhe der CO₂-Entnahme angesichts noch bestehender Unsicherheiten zu bestimmen. Für die Potenzialeinschätzung muss zudem die zentrale Frage beantwortet werden, wo und wie der Klimanutzen der eingesetzten Biomasse in Bio-CCS-Anwendungen im Vergleich zu alternativen Nutzungsarten am höchsten ist und wie dieses Verhältnis akkurat bilanziert werden kann (siehe Kapitel 3.1.).

Aktuell besteht neben der Klimaschutzgesetzgebung gesellschaftspolitisch keine Strategie (etwa eine Kohlenstoffstrategie), wie ein Umgang mit biogenen und gemischten Kohlenstoffströmen mittel- und langfristig aussehen sollte. Eine kohärente Vorstellung davon könnte allerdings einigen politischen Zielkonflikten vorbeugen. Zentrale Aspekte dafür sollten Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit, technologische Entwicklung und Infrastrukturaufbau, wirtschaftliche Tragfähigkeit sowie gesellschaftliche Akzeptanz und Teilhabe sein.

Das Ziel dieses Papieres ist es, einige Vorschläge für eine solche Strategie des zukünftigen Bio-CCS-Systems in Deutschland zu skizzieren und Politikempfehlungen für einen nachhaltigen Aufbau und Einsatz von Bio-CCS zu formulieren.

3 Mit Stockholm Exergi entsteht in Stockholm eine der weltweit größten BECCS-Anlagen. Geplant ist, ab 2028 jährlich 800.000 Tonnen biogenes CO₂ an dem Biomasseheizkraftwerk abzuscheiden und in Offshore-Speichern zu speichern. Die Anlage erhielt 180 Mio. € EU-Förderung und 20 Mrd. SEK staatliche Förderung (BECCS Stockholm 2025; Capsol Technologies 2025).

4 Vgl. Kredslob. (2025). Für eine gute Übersicht über andere in Planung befindliche Projekte siehe Clean Air Task Force (CATF) (o.D.).

2. BIOMASSE UND BIO-CCS: PROBLEME UND POTENZIALE

2.1. Klima- und umwelt- politische Zielkonflikte in der Biomassenutzung

Biomasse kann zur Defossilisierung⁵ der Gesellschaft beitragen, ihre positive Klimawirkung wird jedoch häufig überschätzt: Der heutige Verbrauch von Biomasse in Deutschland ist inkohärent mit den existierenden Klimaschutzzielen für natürliche Senken im Landnutzungssektor (UBA 2024), und damit auch mit den Zielen des Umwelt- und Biodiversitätsschutzes. Die derzeitige Treibhausgasbericht-Konvention sieht vor, dass die Ernte von Biomasse als Emission im Sektor Landnutzung, -änderung, und Forstwirtschaft (LULUCF) berichtet und verbucht wird – die Nutzung derselben Biomasse in anderen Sektoren gilt dann als „klimaneutral“. Infolgedessen werden die von der Biomasse in anderen Sektoren verursachten Emissionen – unabhängig von der Art und Dauer der Nutzung der Biomasse – als emissionsfrei oder Null-Emissionen eingestuft (Zero-Rating).

Die Annahme der „Klimaneutralität“ von Biomasse verdeckt wichtige Unterschiede in ihrer Nutzung: Mit fortschreitender Dekarbonisierung sinkt der Klimanutzen der energetischen Nutzung, während der stoffliche Einsatz, etwa im Holzbau oder in der Chemieindustrie, an Bedeutung gewinnt, weil der Umfang der CO₂-Entnahmen zunehmend größer wird als der Umfang der Minderung fossiler CO₂-Emissionen durch Substitution.

Wird im LULUCF-Sektor „zu viel“ Biomasse für die Erreichung der für den Sektor beschriebenen Klimaziele entnommen – sinken also die Kohlenstoffspeicher und die Fähigkeit der Ökosysteme, CO₂ zu binden und zu speichern – kann der Sektor seine Funktion innerhalb der Klimaschutzpolitik nicht erfüllen. In den vergangenen Jahren hat sich der LULUCF-Sektor von einer Netto-Senke zu einer Netto-Quelle von CO₂ gewandelt. Ein häufiger Grund dafür waren die Folgen von Waldschäden (siehe für LULUCF-Bilanz Thünen Institut 2025). Eigentlich ist durch die europäische und deutsche Klimaschutzgesetzgebung ein sukzessiver Ausbau der natürlichen Senken im LULUCF-Sektor vorgesehen. Da die Ernte insbesondere von holzartiger Biomasse direkt mit der Bilanz des LULUCF-Sektors korreliert, muss die Biomassenutzung daher gegenüber diesen Zielen bilanziert und bewertet werden.

Bislang geschieht keine Kurskorrektur bei der Verfehlung der Ziele, da die Verbindung zwischen Biomassenutzung und Klimazielen im Landnutzungssektor nicht ausreichend in politischen und wirtschaftlichen Entscheidungen berücksichtigt wird. Dies zeigt sich insbesondere in der für die Klimaziele zu hohen Nutzung von Holz zur Wärmegewinnung in den Sektoren Gebäude und Energiewirtschaft (UBA 2023). Hier konkurriert der gesellschaftliche Bedarf an Energie mit dem gesellschaftlichen Bedarf an CO₂-Entnahme durch die Natur.

Auf EU-Ebene setzt die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) Ziele zum Ausbau und der Nutzung erneuerbarer Energien. Die energetische Nutzung von Biomasse ist darin als erneuerbar klassifiziert und kann damit auf Mitgliedsstaatebene subventioniert werden. Daraus ergaben und ergeben sich Zielkonflikte zu den Senkenzielen im LULUCF-Sektor. Diese sind trotz ambitionierter Nachhaltigkeitsanforderungen der RED III noch nicht ausgeräumt. Nach wie vor besteht damit ein

⁵ Wir sprechen hier bewusst davon, dass Biomasse durch die Substitution des fossilen durch biogenen Kohlenstoffs zur Defossilisierung der Gesellschaft und ihrer Wirtschaft beitragen kann. Dies gilt hauptsächlich für die stoffliche Substitution. Das größere Ziel muss die Vermeidung von THG-Emissionen sein, wobei für den THG-Effekt egal ist, ob der Kohlenstoff aus biogenen oder fossilen Quellen kommt.

Ungleichgewicht zwischen unterschiedlichen Biomasseverwendungen durch die öffentliche Subventionierung von Bioenergie.⁶

Die RED III beschreibt, dass eine Kaskadennutzung von holzartiger Biomasse zum höchsten wirtschaftlichen und ökologischen Wert beitragen soll ([Richtlinie \(EU\) 2023/241, 2023](#)). Doch die Definition der Kaskadennutzung ist zu unkonkret, um sie aus der RED in die nationalstaatliche Gesetzgebung zu übersetzen und in der Praxis zu implementieren.

Die Kaskadennutzung von Biomasse hat von allen Nutzungsvarianten die beste Ökobilanz, stellt daher eine optimale Nutzung der begrenzten Ressource Biomasse dar und sollte das politische Ziel sein (vgl. [BMWK & BMBF 2020](#)). Gleichwohl ist die Verringerung des Ressourcenverbrauchs und -umsatzes unabdingbar, um die Klima- und Umweltschutzziele zu erreichen. Die Notwendigkeit, den Biomasseverbrauch zu reduzieren, um eine klimapositive Nutzung der Biomasse zu ermöglichen, wird durch den fortschreitenden Klimawandel und die dadurch entstehende Verringerung des Biomasseangebots verstärkt. Klimawandelbedingte Ereignisse wie Dürreperioden, Starkregen oder Schädlingsausbreitung haben einen negativen Effekt auf die Kohlenstoffbindung und -speicherfähigkeit von Ökosystemen. Die damit einhergehenden Verluste in Wachstumsraten von Biomasse und Ökosystemresilienz sowie das Anfallen von „Schadholz“ werden das Biomasseangebot langfristig voraussichtlich verringern.

Nur ein gezielter Einsatz von Biomasse verhindert, dass sie dort genutzt wird, wo sie dem Klima wenig oder gar nicht nützt. Entscheidend ist daher eine Neubewertung ihrer Rolle,

die Klima- und Umweltkosten ebenso berücksichtigt wie Zielkonflikte mit Ernährungssicherheit und Biodiversität. Diese Neubewertung steht jedoch in der Praxis vor Hürden, da oft keine ökonomisch attraktiven Alternativen für die energetische Nutzung bestehen.

Doch es bestehen Herausforderungen: Bisher existiert keine gute Definition davon, was Rest- und Abfallbiomasse ausmacht, auf die sich eine Kaskadennutzung stützen könnte. Daneben ist offen, ob die Begrifflichkeit sinnvoll ist, da auch Rest- und Abfallstoffe nützlich sind, entweder für den Verbleib in Ökosystemen (für Bodenbildung und den Nährstoffhaushalt) oder in der stofflichen Verwertung. Neben der Definition stehen der möglichst langen Kreislauflführung von Biomasse fehlende Einkommensmöglichkeiten und Geschäftsmodelle gegenüber. So ist es ökonomisch attraktiver, holzartige Biomasse für die Umwandlung in Energie zu nutzen, statt daraus Produkte zu machen. Die Abfall- und Reststoff-Biomasse ist zudem nur dann als nachhaltig einzuschätzen, wenn die Nachfrage nach ihr keine weiteren Flächeninanspruchnahme oder indirekte Landnutzungsänderungen nach sich zieht ([Öko-Institut 2025](#)).

Neue Nutzungsformen von Biomasse in Bio-CCS-Verfahren müssen in diesen politischen und wirtschaftlichen Kontext eingebettet werden. Auf EU-Ebene hat das European Scientific Advisory Board on Climate Change (ESABCC) gezeigt, dass die EU-weite Förderung der energetischen Nutzung von holzartiger Biomasse bereits zu einer Schwächung der natürlichen Senken geführt hat ([ESABCC, 2025](#)). Vor diesem Hintergrund muss die Verwendung von Biomasse in Bio-CCS-Verfahren bewertet werden. Führt ein Hochlauf dazu, dass die Nachfrage nach Biomasse steigt, wird die angenommene netto-negativ-Bilanz durch ein weiteres Absenken der natürlichen Kohlenstoff-Pools und -senken rückgängig gemacht ([Öko-Institut 2024](#)).

Eine Förderung von Bio-CCS, die diese Aspekte nicht berücksichtigt, könnte bestehende Zielkonflikte verschärfen. Damit rückt eine politische Strategie in den Vordergrund, die Bio-CCS konsequent auf Rest- und Abfallstoffe fokussiert, diese weiter definiert und gleichzeitig mögliche Herausforderungen der Nutzung adressiert.

⁶ Die RED III ist in Deutschland bisher noch nicht implementiert. Sie enthält Vorgaben dazu, dass die energetische Verwendung bestimmter Holzsortimente finanziell nicht unterstützt werden darf. Hier bestehen Nachweispflichten, die bspw. nicht ausreichen, um eine Verarbeitung von stofflich nutzbaren Holzklassen in Holzpellets auszuschließen ([NABU 2025](#)). Eine umfassende Integration und Umsetzung der RED III ist daher notwendig, um die bisherige „Übervorteilung“ der energetischen Nutzung der Biomasse zu verringern und so zu implementieren, dass die Förderung der energetischen Nutzung, wie in der RED III vorgegeben, nur dann geschieht, wenn die LULUCF-Bilanz keine Netto-Emissionen aufweist. Bisher lässt sich festhalten, dass es kein level-playing field für Biomasse in unterschiedlichen Anwendungen gibt, da weiterhin öffentliche Subventionen für die energetische Verwendung bestehen, die den Zielen zum Klimaschutz in der Landnutzung im Groß entgegenstehen.

Fallstudie: Biomethanaufbereitung

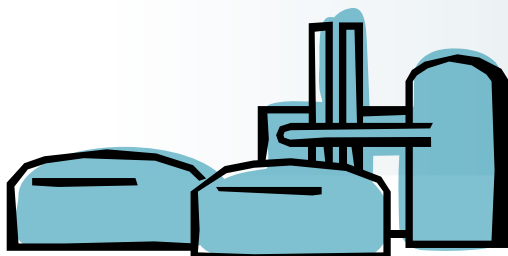
Biomethan wird durch die Aufbereitung von Rohbiogas gewonnen. Rohbiogas besteht zu etwa 50 bis 70 % aus Biomethan, zu 30 bis 50 % aus CO₂ und enthält darüber hinaus je nach Substrat, der Vergärungstechnologie sowie der Temperatur der Vergärung weitere Nebenbestandteile wie bspw. Wasserdampf, Schwefelwasserstoff und Stickstoff. Um Biomethan zu gewinnen, wird das Rohbiogas zunächst entschwefelt und getrocknet, wodurch der Methangehalt auf nahezu 100 % erhöht wird. Das anfallende CO₂ wird bereits heute abgeschieden, aber bisher nicht gespeichert, sondern emittiert. Künftig könnte dieses zum Speicherort transportiert oder weiterverarbeitet werden. Ziel der Aufbereitung ist es, das Biomethan als Erdgasersatz in industriellen Anwendungen zu nutzen oder in das Erdgasversorgungsnetz einzuspeisen.

Voraussetzung für die mögliche Klimawirksamkeit der dadurch erreichten CO₂-Entnahme sind die Nachhaltigkeit der Biomasse und die Vermeidung möglicher Methan-Leckagen entlang der Produktionskette.

Im Jahr 2024 speisten etwa über 250 Biomethananlagen ca. 11 TWh ins deutsche Gasnetz ein (DENA 2025). Das entspricht etwa 1,3 % des gesamten deutschen Erdgasverbrauchs (Bundesnetzagentur 2025).

- Vermeidungskosten: etwa 140 €/t CO₂⁷
- Abscheide-/Speicher-Potenzial: Aktuell 0,9 Mt. CO₂ / Jahr (Steigerungspotenzial auf 1,6 Mt. CO₂/Jahr nach Methan-Umrüstung großer Biogasanlagen (Thrän et al. 2024))
- Notwendige Infrastruktur: Pipeline, Schiff, LKW, Zug
- Technischer Reifegrad (TRL): 9 (European Commission 2024)

Daneben bestehen weitere Möglichkeiten, CO₂ in der Nutzung von Biomethan abzuscheiden, wie etwa nach der Verbrennung in Blockheizkraftwerken, die hier aber nicht weiter verfolgt werden.



⁷ Kosten für eine Modellanlage von der CO₂-Aufbereitung bis zur endgültigen Speicherung. Der normale Anlagenbetrieb ohne CCS wird dabei nicht berücksichtigt (Wollnik et al. 2024).

Die Nachhaltigkeitsbewertung ist stets vor dem Hintergrund einer nachhaltig verfügbaren Biomasse vorzunehmen. Denn es gibt alternative Land- und Biomassenutzungsformen, die ein Mehrangebot an Biomasse ermöglichen. Dazu gehören der Ausbau von Agroforst, Paludikulturen oder das frei werden von Ackerfläche durch eine Verringerung der Futtermittel- und Energiepflanzenproduktion.

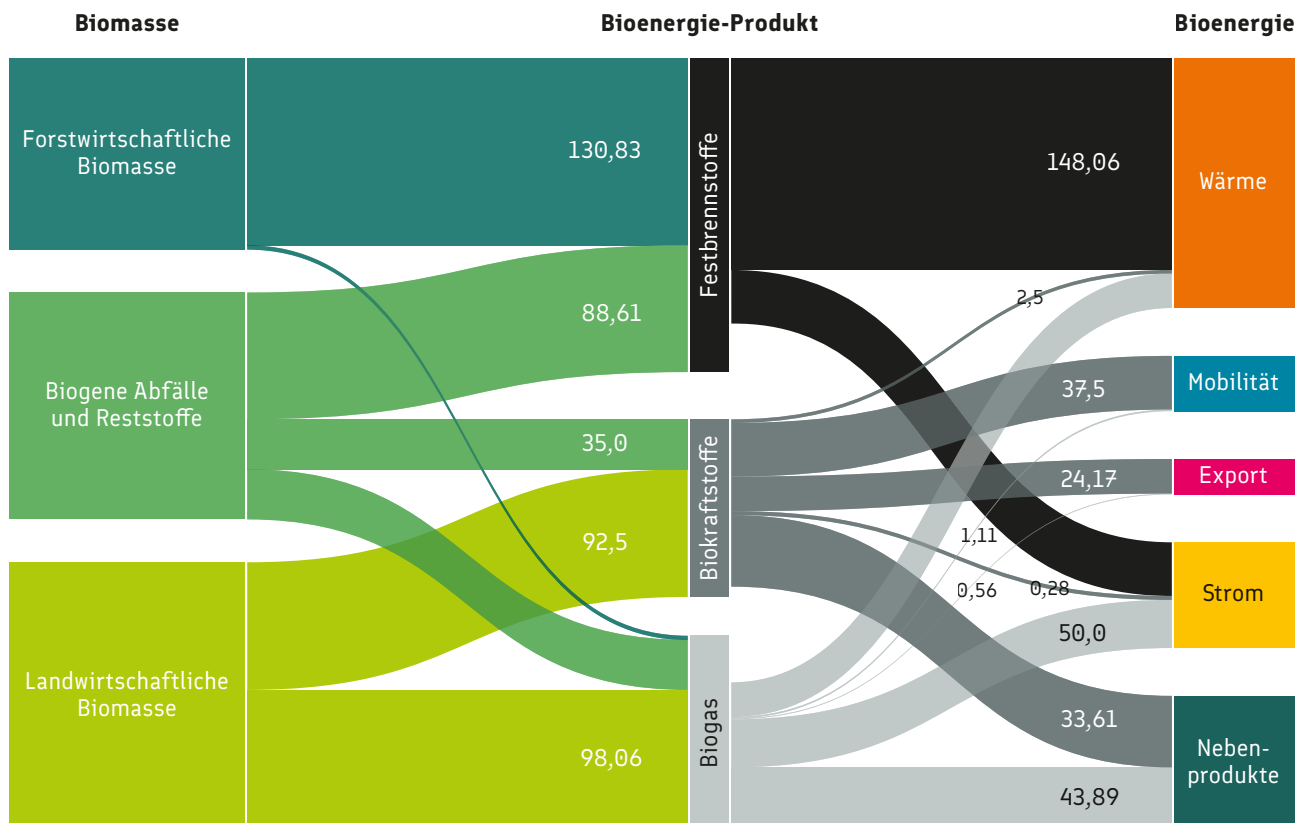
2.2. Biomassenutzung im heutigen Energiesystem

Um ein Verständnis für den künftigen Einsatz von Bio-CCS und seine nachhaltigen Potenziale zu gewinnen, bedarf es der Analyse des aktuellen Einsatzes von Biomasse im deutschen Energiesystem. Die aktuell verwendete Biomasse stammt aus drei Hauptquellen: 1) nachwachsende Rohstoffe aus der Landwirtschaft, 2) biogene Abfälle und Reststoffe, und 3) forstwirtschaftliche Biomasse (siehe Infografik 3).

Die Nachhaltigkeitsbewertung ist stets vor dem Hintergrund einer nachhaltig verfügbaren Biomasse vorzunehmen.

2021 wurden in Deutschland insgesamt 476,4 TWh an Biomasse energetisch genutzt (Thrän et al. 2024). Den größten Anteil daran hatten die nachwachsenden Rohstoffe aus der Landwirtschaft, die etwa 40 % (190,6 TWh) ausmachten (98,1 TWh für Biogas, 92,5 TWh für Biokraftstoffe). Zu diesen zählen Energiepflanzen wie Mais, Gras, Raps und Zuckerrüben, Stroh sowie Wirtschaftsdünger und tierische Nebenprodukte. Der Anbau der nachwachsenden Rohstoffe für die energetische Verwendung nutzt rund 2,4 Millionen Hektar, also etwas mehr als 20 % der gesamten inländischen Ackerfläche.

Infografik 3: Energetische Biomassenutzung in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Thrän, et al. (2024). BECCS – ein nachhaltiger Beitrag zur dauerhaften CO₂-Entnahme in Deutschland? Diskussionspapier. UFZ Report 2/2024. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig. 22 Seiten. <https://doi.org/10.57699/edk-mc18>

Aktuelle Studien prognostizieren in Tendenz einen Rückgang dieser Potenziale (Hennenberg et al. 2023). Um Ziele wie Ernährungssicherheit, Klima- und Biodiversitätsschutz zu erreichen, gilt das derzeitige Produktions- und Konsumniveau – insbesondere bei Wirtschaftsdünger und Biokraftstoffen – als zu hoch. Daher wird eine Reduzierung der Tierbestände empfohlen und damit einhergehend eine sinkende Wirtschaftsdüngermenge erwartet (Agora Agrar 2024). Andere Studien gehen davon aus, dass der Flächenanteil bis 2050 auf 2,16 Millionen Hektar sinken könnte, wodurch die Verfügbarkeit von Energiepflanzen z. B. für die Biogaserzeugung zurückgehen würden (BLE 2022; Rensberg et al. 2023). Insgesamt verändern sich durch neue Anforderungen an die Flächennutzung die Potenziale für den Einsatz von Biomasse im deutschen Energiesystem.

Die zweitwichtigste Quelle sind biogene Abfälle und Reststoffe (z. B. Sägespäne, Siedlungsabfälle, Altöl und Klärschlämme). Diese Biomasse trug im Jahr 2021 mit 153,3 TWh rund 32 % zur Energieerzeugung aus Biomasse in Deutschland bei (88,6 TWh für thermische Energie durch Verbrennung, 35,0 TWh für Biokraftstoffe, 29,7 TWh für Biogas) (Thrän et al. 2024).

Perspektivisch könnte der Anteil biogener Abfälle und Reststoffe bis 2050 steigen. Aktuelle Szenarien prognostizieren sowohl eine Verschiebung hin zur stärkeren Nutzung vorhandener Stoffströme als auch ein wachsendes Reststoffaufkommen – unter anderem durch den Rückgang von Energiepflanzenflächen, eine verstärkte Nutzung von Siedlungsabfällen und Klärschlamm sowie technologische Fortschritte bei der Rohstoffrückgewinnung und der digitalisierten Stoffstromerfassung (Thrän et al. 2024, DENA 2022).

An dritter Stelle liegt forstwirtschaftliche Biomasse (Industrierestholz, Waldrestholz, Altholz und Stammholz). Sie trug 2021 mit 132,5 TWh, etwa 28 %, den größten Anteil an biogenen Festbrennstoffen zur Energiebereitstellung bei (Thrän et al. 2024).

Studien weisen auf einen künftigen Rückgang dieser Menge hin, da ihre stoffliche Nutzung in einer zunehmend dekarbonisierten Gesellschaft an Bedeutung gewinnt. Gleichzeitig steht die Nutzung holzartiger Biomasse im Spannungsfeld zu den Zielen des Erhalts und Ausbaus natürlicher Kohlenstoffsenken, insbesondere der Wälder (UBA 2024; BMW 2023). Es ist zu erwarten, dass der Einsatz von holzartiger Biomasse zu einem geringeren Grad als heute zur Energieerzeugung, etwa in Biomasseheizkraftwerken, erfolgen wird.

In der Tendenz werden folglich der Einsatz nachwachsender Rohstoffe sowie forstwirtschaftlicher Biomasse im Energiesystem sinken – auch aufgrund von Zielkonflikten mit dem natürlichen Klimaschutz, während eine Erhöhung der Abfall- und Reststoffaufkommen erwartbar ist.

2.3. Das Potenzial von auf Rest- und Abfallstoffen basierenden Bio-CCS-Verfahren

Aufbauend auf Potenzialabschätzungen des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) zu BECCS werden im Folgenden die Potenziale von Bio-CCS unter engen Nachhaltigkeitsaspekten diskutiert. Dieses Papier vertritt den Standpunkt, dass nicht alle darin enthaltenen Potenziale tatsächlich als nachhaltig gelten können, da es theoretisch alternative längerfristige Nutzungsformen mit höherem Klimanutzen für Teile der Rest- und Abfallbiomasse gibt. Für eine genaue Nachhaltigkeitsbewertung der Bio-CCS-Potenziale braucht es eine erweiterte Treibhausgasbilanzierung sowie die Einbettung und Umsetzung der Abfall- und Reststoffbiomassenutzung in diversen Nachhaltigkeitszielen.

Potenzialberechnungen des UFZ zeigen, dass auf Basis der derzeit im deutschen Energiesystem eingesetzten biogenen Rest- und Abfallstoffe jährlich zwischen 28 und 39 Mt. CO₂ abgeschieden werden könnten. Diese Schätzung quantifiziert das theoretisch abscheidbare CO₂,

Berechnungen zeigen, dass mit biogenen Rest- und Abfallstoffen in Deutschland jährlich 28 bis 39 Mt. CO₂ abgeschieden werden könnten.

wenn der in den Prozessen der Umwandlung entstehende biogene Kohlenstoff unter Annahme bestimmter Abscheideraten abgeschieden und permanent gespeichert würde (Thrän et al. 2024). Dieses Potenzial lässt sich in verschiedene Anwendungsfelder untergliedern, darunter die Nutzung von Festbrennstoffen, flüssigen Energieträgern, Nebenprodukten für die stoffliche Nutzung von Biomasse bspw. in der Herstellung von Pflanzenkohle.⁸

Relevante Einsatzbereiche einer CCS-Nachrüstung lassen sich demnach insbesondere in Müllverbrennungsanlagen und großen, Wärme bereitstellenden Industriekesseln in Heizkraftwerken mit Strom- und Wärmeerzeugung sowie in Biogasanlagen finden. Daneben existieren laut UFZ zusätzliche Potenziale für Negativemissionen in der Nutzung von Nebenprodukten wie Schlempe, Presskuchen oder Gärresten aus der Biogas- und Biokraftstoffproduktion, die perspektivisch vermehrt zur Herstellung von Pflanzenkohle genutzt werden könnten (BLE 2022; Rensberg et al. 2023; Thrän et al. 2024).

Festbrennstoffe

Nach Daten des UFZ liegt das größte Potenzial für Bio-CCS bei Festbrennstoffen. Eine Nachrüstung von Müllverbrennungsanlagen und großen Biomasseheizkraftwerken, die Festbrennstoffe zur Wärme- und Stromgewinnung einsetzen, könnte zu einer CO₂-Abscheidung von jährlich 20 bis 28 Mt. führen. Allein in Müllverbrennungsanlagen wurden im Jahr 2021 rund 8,2 Mt. biogenes CO₂ emittiert, während große Industriekessel zur Wärmebereitstellung 7,9 Mt. CO₂-Äquivalente verursachten (UBA 2022). Auch Heizkraftwerke, die gleichzeitig Strom und Wärme erzeugen, könnten als Anwendungsfälle Relevanz haben: 2021 emittierten sie laut UBA rund 10,5 Mt. CO₂-Äquivalente durch die Verbrennung von Biomasse.

Laut der Deutschen Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe (FNR) lag die Sekundärinputrate von Großfeuerungsanlagen im Jahr 2020 bei 91,4%. Damit wird in diesen nahezu ausschließlich

Rest- und Recyclingholz genutzt (FNR 2023, Tabelle 4.5: Sekundärinputraten holzwirtschaftlicher Nutzungen, S. 106).

Diese Potenziale müssen vor dem Hintergrund eines zukünftig dekarbonisierten Energiesystems differenziert betrachtet werden. Für eine CCS-Nachrüstung großer Biomasseheizkraftwerke ist entscheidend, in welchen Bereichen eine vollständige Elektrifizierung der Wärme- und Stromversorgung technologisch oder ökonomisch nicht sinnvoll ist. Dazu ist eine Fallbetrachtung notwendig, die bspw. prüfen muss, woher alternativ Strom und Wärme kommen können und wie stattdessen biogene Stoffströme genutzt werden könnten. Eine Nachhaltigkeitsbewertung der in Heizkraftwerken eingesetzten Rest- und Abfallbiomasse muss zusätzlich die begrenzte nachhaltige Holzmenge, Senkeneffekte der Wälder, vorgelagerte Emissionen, falsch deklarierte Altholzklassen und kontaminiertes Altholz einbeziehen.

Eine CCS-Nachrüstung bei Müllverbrennungsanlagen scheint in den meisten Fällen sinnvoll, da selbst unter ambitionierter Umsetzung der Kreislaufwirtschaft und einer Müllvermeidung weiterhin biogene Abfallströme verbrannt werden.

Flüssige und gasförmige Energieträger

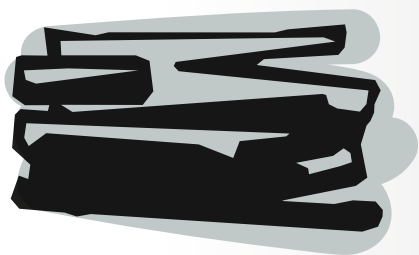
Ein weiteres Anwendungsfeld ergibt sich bei flüssigen und gasförmigen Energieträgern. Die Herstellung dieser aus biogenen Rest- und Abfallstoffen belief sich 2021 auf 64,7 TWh, vor allem in Form von Bioethanol und Biogas. Bereits heute werden daraus rund 2,3 Mt. CO₂ pro Jahr bei der Aufbereitung abgetrennt, welche jedoch nicht gespeichert, sondern emittiert werden. Bei der Aufbereitung von Biomethan beträgt dieser Wert etwa 0,9 Mt. CO₂ pro Jahr. Es wird angenommen, dass sich das Volumen auf 1,6 Mt. CO₂ erhöhen könnte, sofern große Biogasanlagen auf die Produktion von Biomethan umgestellt werden. Gemäß den Prognosen des UFZ würde folglich das jährliche Abscheidepotenzial für flüssige und gasförmige Energieträger auf ca. 3 Mt. CO₂ ansteigen (Thrän et al. 2024).

⁸ Das UFZ diskutiert in der Studie zu BECCS-Potenzialen auch die Herstellung von Pflanzenkohle ohne CCS Nachrüstung. Zudem nutzt es eine erweiterte Definition von BECCS, die mit unserer Definition von Bio-CCS übereinstimmt.

Fallstudie: Pflanzenkohle

Pflanzenkohle ist eines der Nebenprodukte, die bei der Pyrolyse organischer Stoffe (z. B. Stroh, Holzspäne oder Gülle) entstehen. Bei diesem chemischen Prozess werden unter Ausschluss von Sauerstoff und Einsatz hoher Temperaturen ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$), Biomasse in Pflanzenkohle, Bioöle, Gase und Asche (anorganische Rückstände wie Spurenmetalle und Silikate) umgewandelt. Für die Pyrolyse eignen sich biogene (Rest-)Stoffe, mit unter 30 % Wassergehalt. Je nach Pyrolysetemperatur verbleiben ca. 35 bis 60 % des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs in der Pflanzenkohle.

Pflanzenkohle wird häufig als Mittel zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit und zur Verbesserung der Wasserrückhaltung eingesetzt und ist besonders nützlich für degradierte Böden (IPCC 2022b). Daneben kann sie als Substitut für fossile Rohstoffe in unterschiedlichen Industrien genutzt werden, was allerdings dann zu keiner permanenten Entnahme führt. Aktuell fehlt allerdings eine ausreichend breite Erfassung der Permanenz von Pflanzenkohle in offenen Systemen (wie Ausbringung in Böden) sowie ihre langfristige Wirkung auf Ökosysteme.



Im Vergleich zu Bio-CCS-Verfahren ist die Effizienz bei der Biomassenutzung bei Pflanzenkohle geringer, denn für dieselbe Menge entnommenen CO_2 wird etwa zwei- bis dreimal mehr Biomasse benötigt. Dafür bietet Pflanzenkohle Vorteile bei Kosten, Skalierbarkeit und dezentraler Umsetzung. Der Kohlenstoffanteil in der Pflanzenkohle selbst beträgt je nach verwendeter Biomasse etwa 70 bis 90 % und ist langfristig sehr stabil.

Eine Nachrüstung mit CCS ist kostenintensiv und das zusätzliche Potenzial für CO_2 -Entnahme gering. Die Pyrolysegase enthalten ca. 10 bis 40 % CO_2 . Die weiteren Gase (Kohlenmonoxid, Methan, Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe) könnten zur Verbrennung genutzt werden. Bei hinreichend großen Anlagen ist die CO_2 -Abscheidung zwar technisch umsetzbar, aber ökonomisch nicht attraktiv.

In Deutschland werden 55 Pyrolyse-Anlagen betrieben. Diese sind klein bis mittelgroß (100 kW bis einige MW).

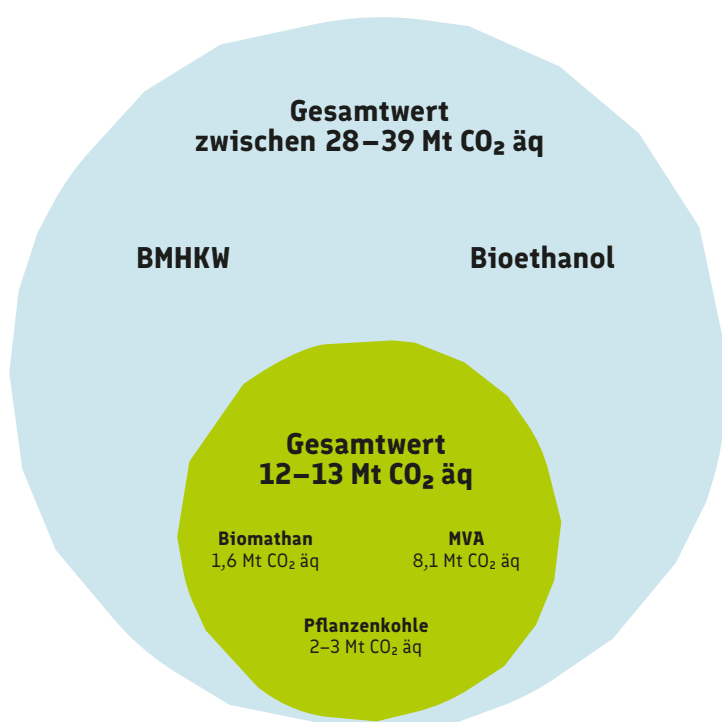
- Vermeidungskosten: etwa 150 €/t CO_2 ⁹
- Entnahmepotenzial: 2–3 Mt. $\text{CO}_2\text{eq/Jahr}$ (Thrän et al. 2024)
- Notwendige Infrastruktur: Bahn, LKW, Schiffe
- Technischer Reifegrad (TRL): 8–9 (European Commission 2024)

⁹ Preis für Projekte in Europa inkl. CO_2 -Entnahme ab 2030 (Biochar Europe 2025)

Das Potenzial der technischen biogenen Kohlenstoffentnahme, welches keiner erweiterten THG-Bilanzierung bedarf, dürfte bei ca. 12 Mt. CO₂ liegen.

Die Nachrüstung von Bioethanolanlagen birgt Potenziale, jedoch auch Risiken und erfordert daher eine erweiterte Nachhaltigkeitsbewertung. Es besteht die Gefahr, dass Zielkonflikte mit dem natürlichen Klimaschutz – insbesondere durch Landnutzungsansprüche – in bisherigen Bilanzen übersehen oder unterschätzt werden. Zudem ist unklar, ob die Nachrüstung von Bioethanolanlagen tatsächlich zu CO₂-Entnahme führt oder lediglich bestehende Emissionen verschiebt. Die Verbrennung der Kraftstoffe im Verkehr verursacht Emissionen und kann die Gesamtbilanz der Bio-CCS Prozesskette relevant verschlechtern. Da die Erfassung der Klimawirkung komplex ist, drohen ohne eine systemweite Bilanzierung Fehleinschätzungen der tatsächlichen Klimawirkung solcher Anwendungen.

Infografik 4: CO₂-Entnahmepotenziale durch Bio-CCS und Pflanzenkohle



Pflanzenkohleproduktion aus Nebenprodukten

Nebenprodukte aus der Biogas- und Biokraftstoffproduktion wie Schlempe und Presskuchen oder Gärreste summierten sich 2021 auf rund 38 Mt. CO₂, wovon etwa 10% auf Rest- und Abfallstoffe entfielen (Thrän et al. 2024). Aus diesen Mengen könnten jährlich 2 bis 3 Mt. CO₂ durch die Herstellung von Pflanzenkohle entzogen werden, wenngleich die tatsächliche Entnahmeleistung noch präziser bestimmt werden muss.

Pflanzenkohleherstellung aus forstwirtschaftlichen Reststoffen

Bei einer großskaligen Umrüstung von Heiz-(kraft)werken zur Pyrolysegasherstellung aus forstlichen Reststoffen, kann Pflanzenkohle als „Nebenprodukt“ anfallen. Das UFZ schätzt das damit verbundene Entnahmepotenzial jährlich auf 3 bis 5 Mt. CO₂ (Thrän et al. 2024), unter der Annahme, dass zwischen 30 und 50% des ursprünglichen Kohlenstoffgehalts nach der Pyrolyse erhalten bleiben.

Zukünftiges Potenzial insgesamt

Das künftige Biomassepotenzial verteilt sich also unterschiedlich: Nachwachsende Rohstoffe aus der Landwirtschaft werden voraussichtlich zurückgehen, biogene Abfälle und Reststoffe eher zunehmen, während forstwirtschaftliche Biomasse begrenzt bleibt und eher abnehmen wird.

Aus unserer Sicht liegt das Potenzial technischer Entnahme von biogenem Kohlenstoff, welches keiner erweiterten THG-Bilanzierung bedarf, bei ca. 12 Mt. CO₂ (biogene Abfallverbrennung: 8,2 Mt., Biomethan: 1,6 Mt. und Pflanzenkohleproduktion aus Reststoffen: 2–3 Mt.). Darüber hinaus bestehen weitere nachhaltige Potenziale, die aber einer genaueren Bestimmung bedürfen, die über die hier genutzte Heuristik auf Abfall- und Reststoffe hinausgeht (siehe Infografik 4).

Bei einer konsequenten Umsetzung der Kaskadennutzung und damit einer stärkeren Kreislauf-führung sowie einer Elektrifizierung des Wärme- und Verkehrssektors kann die Notwendigkeit von Bio-CCS verringert werden. Gleichzeitig könnte durch dieselben Trends sowie ein höheres Aufkommen an Rest- und Abfallstoffen in Zukunft mehr Biomasse für Bio-CCS-Anwendungen zur

Verfügung stehen. Gegenläufig steht dem die hohe Nachfrage nach Biomasse aus der Chemieindustrie gegenüber oder die Verwendung der Biomasse für Kraftstoffe im Verkehrssektor (inkl. Flugverkehr). Daher wird es neben einer erweiterten Treibhausgasbilanzierung darauf ankommen, ebenfalls die Perspektive auf ansonsten fehlende

Optionen zur Defossilisierung anderer Sektoren einzubeziehen. Nur so kann die Nachhaltigkeit des Biomasseeinsatzes vollständig bewertet werden.

Um die Potenziale von Bio-CCS zu heben, braucht es eine politische Ausrichtung auf „low-risk“-Verfahren, die auf Rest- und Abfallbiomasse basieren. Dieser Fokus bewegt sich allerdings in einem Spannungsfeld: Eine strikte Begrenzung auf solche Stoffe minimiert Nachhaltigkeitsrisiken, birgt jedoch die Gefahr, dass nachhaltige CO₂-Entnahmepotenziale nicht vollständig ausgeschöpft werden. Damit rückt die Notwendigkeit einer politischen Strategie in den Vordergrund, die Bio-CCS konsequent, aber nicht ausschließlich, auf Rest- und Abfallstoffe fokussiert und Spannungen zwischen Ausschöpfung des Potenzials und Erhalt und Ausbau der natürlichen Senken gleichwohl berücksichtigt.

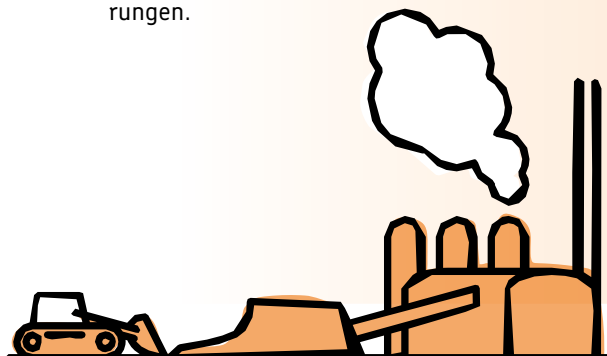
Notwendig ist eine Strategie, die Bio-CCS auf Rest- und Abfallstoffe fokussiert, aber gleichwohl die Spannungen zwischen Ausschöpfung des Potenzials und natürlichen Senken berücksichtigt.

Fallstudie: Thermische Abfallbehandlung

CO₂ kann aus den Abgasströmen thermischer Abfallbehandlungsanlagen (TAB) abgeschieden werden. Zwischen 50 % und 60 % der Abgasströme in TAB sind biogenen Ursprungs (ITAD 2023). Durch die Abscheidung dieses Anteils kann CO₂-Entnahme realisiert werden, während die Abscheidung des fossilen Anteils eine Emissionsreduktion darstellt. Die Technologie ist grundsätzlich ausgereift und es gibt Projekte in Dänemark, Norwegen, Schweden und Nordamerika, die vor der Umsetzung stehen. Es bestehen jedoch Herausforderungen durch die hohen Investitionskosten bei der Nachrüstung, dem großen Platzbedarf und den Verlusten der Wärme für den Betrieb der Abscheideanlage. Außerdem steht die Bestimmung der tatsächlichen Netto-Negativ-Emissionen bei gemischten CO₂-Strömen biogenem und fossilem Ursprungs vor besonderen regulatorischen Herausforderungen.

Sowohl kurz- als auch langfristig gilt CCS an TAB als vergleichsweise kosteneffizienter als DACCS, da die CO₂-Konzentration im Abgas höher ist als in der Umgebungsluft. Im Jahr 2021 verursachten die MVA in Deutschland einen CO₂-Ausstoß von insgesamt 20,5 Mt. (rund 10,3 Mt. biogenen Ursprungs) (UBA 2022). Bei einer angenommenen CO₂-Abscheiderate von 80 % wäre es möglich, 8,2 Mt. CO₂ aus biogenen Quellen an MVA abzuscheiden.

- Vermeidungskosten: etwa 240 €/t CO₂¹⁰
- Abscheide-/Speicherpotenzial: ca. 8,2 Mt./Jahr (Thrän et al. 2024)
- Notwendige Infrastruktur: Pipeline, Schiff, LKW, Zug



¹⁰ Durchschnittskosten für Abscheidung, Transport und Speicherung von CO₂ bei TAB und BMHKW, inkl. Investitions- und Betriebskosten der Abscheideanlage bei Start 2030. TAB allein könnte geringere Kosten aufweisen – dank größerer Kapazitäten und niedrigerer spezifischer Abscheidekosten (MVV Energie AG, 2025).

3. HERAUSFORDERUNGEN FÜR DAS KÜNFTIGE BIO-CCS SYSTEM

Um der Realisierung von nachhaltigen Bio-CCS Potenzialen näher zu kommen, Eckpunkte eines deutschen Bio-CCS Systems sowie dessen Herausforderungen und Lösungsansätze zu beschreiben und konkrete politische Empfehlungen (Kap. 4) zu entwickeln, fokussiert sich der folgende Teil auf diese drei Verfahren: 1.) thermische Abfallbehandlung von Biomasse mit CCS, 2.) Aufbereitung von Biogas zu Biomethan mit CCS sowie 3.) Pflanzenkohleproduktion. Diese können als „low-risk“-Optionen definiert werden. Sie nutzen zu einem Hauptanteil Reststoff- und Abfallbiomasse, da ihre Rohstoffbasis nicht anderweitig mit höherem Klimanutzen¹¹ verwendet werden kann. Andere Verfahren, die diesen genannten Kriterien nicht (vollständig) entsprechen, müssen separat betrachtet werden. Wie bereits reflektiert, ist diese Einschränkung kein Garant für die Bestimmung der nachhaltigen Potenziale, aber ein geeigneter Startpunkt.

3.1. Nachhaltigkeitsanforderungen

Kohlenstoffbilanzierung

Die größte Herausforderung von Bio-CCS besteht darin, sicherzustellen, dass Biomasse tatsächlich zu dauerhaften Netto-Negativ-Emissionen beiträgt. Das gelingt nur, wenn am Ende des gesamten Lebenszyklus relevant mehr CO₂ gespeichert wird, als bei Anbau, Ernte, Transport und Umwandlung der Biomasse, sowie beim Transport und der Speicherung des CO₂ freigesetzt wird. Zusätzlich muss der Effekt der Biomassenutzung auf den Zustand der natürlichen Kohlenstoffspeicher bilanziert werden.

Hier treten zentrale Zielkonflikte auf: Biomasseumwandlung mit CCS sowie die Herstellung von Pflanzenkohle konkurriert mit der Kohlenstoffbindung in Ökosystemen. Eine Nachrüstung von CCS an Anlagen der Biomasseumwandlung trägt zur Reduktion biogener Emissionen bei und kann zu Negativemissionen führen. Für die Bestimmung davon, ob Bio-CCS-Anwendungen tatsächlich netto-negativ sind, braucht es eine akkurate und verlässliche Kohlenstoffbilanzierung. Zusätzlich braucht es Indikatoren für den tatsächlichen Klimanutzen unterschiedlicher Biomasseverwendungen. Studien ([Fehrenbach et al. 2022](#)) zeigen, dass Holz im Bau einen deutlich höheren Klimanutzen entfalten kann als in der energetischen Verwertung ([FERN 2025](#)). Für eine verlässliche Bilanzierung sind präzise Daten zur Herkunft, Energie- und Kohlenstoffeffizienz der Biomasse sowie zu Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich. Auch indirekte Landnutzungsänderungen müssen berücksichtigt werden, da sie erhebliche zusätzliche Emissionen verursachen können.

Die aktuellen Modelle zum künftigen Beitrag von BECCS und waldbasierten Senken enthalten keine Werte für Biodiversität, Bodenfruchtbarkeit und andere Ökosystemleistungen sowie zur Nachhaltigkeit der Biomasse und ihren Effekt auf Ökosysteme. Eine solche Modellierung, die auch den „Wert der Natur“ ([Fehrenbach et al. 2022](#)) einschließen, ist zurzeit nicht realisierbar, da der Wert der Biodiversität und anderer Ökosystemleistungen nicht so einfach wie der Wert der Kohlenstoffspeicherung modelliert werden kann. Dadurch wird das technische Potenzial von Bio-CCS im Verhältnis überschätzt, während der Wert der natürlichen Senken entlang unterschiedlicher Ökosystemleistungen und Wertkategorien unterbewertet wird.

¹¹ Eine Differenzierung des Klimanutzens ist kein eindeutiges Kriterium, da dieser in sich auch eine soziale und wirtschaftliche Nutzenkomponente beinhaltet. Bspw. kann der Vergleich zwischen dem Klimanutzen der stofflichen Nutzung von Biomasse im Gebäudesektor nicht eins zu eins mit dem der energetischen Nutzung getroffen werden, da die Anforderungen an das Wohnen nicht einfach durch die Bereitstellung von Wärme gedeckt werden. Dennoch braucht es hier eine heuristische Annäherung ([dena 2025](#)).

Eine umfassende Kohlenstoffbilanzierung des Biomasseeinsatzes in Bio-CCS-Anwendungen sollte anfangs auf Projektebene stattfinden, um ihren tatsächlichen Klima- und Umweltschutzwert innerhalb unterschiedlicher Nutzungsformen zu bewerten. Die Entwicklung dieser Kriterien und Vergleichbarkeit auf Projektebene ist wichtig, da regionale Gegebenheiten, Art der Biomasse, Kohlenstoffintensität, Strommix, etc. erhebliche Unterschiede in der Bewertung hervorbringen können. Eine solche erweiterte Kohlenstoffbilanzierung wird gebraucht, um das Nachhaltigkeitskriterium der Rest- und Abfallbiomasse zu ergänzen, so dass weitere nachhaltige Potenziale für Bio-CCS bestimmt werden können.

Kaskadennutzung

Die Kaskadennutzung stellt eine optimale Nutzung der begrenzten Ressource Biomasse dar. Derzeit ist allerdings offen, wie eine sinnvolle Kaskadennutzung gesteuert werden kann. Eine Top-down-Vorgabe der Biomassenutzung scheint nicht realistisch, gleichzeitig bedarf es einer politischen Erwartungslenkung, die marktwirtschaftlich nicht erreicht werden kann. Hinzu kommt, dass – wie bereits geschildert – kein level playing field zwischen der energetischen und der stofflichen Nutzung besteht (siehe Kapitel 2.1). Dadurch wird eine konsequente Umsetzung der Kaskadennutzung erschwert.

Darüber hinaus fehlen etwa auf Ebene von Städten und Landkreisen Strukturen, die eine enge Vernetzung zwischen Unternehmen und Behörden fördern. Ohne solche Strukturen können regionale Stoffkreisläufe nur begrenzt koordiniert werden. Dies verdeutlicht, dass die Realisierung der Kaskadennutzung nicht allein von übergeordneten Regelungen abhängt, sondern auch von regionalen, bottom-up getriebenen Ansätzen, die lokale Potenziale besser erschließen und miteinander verzahnen.

Recycling

Der Auf- und Ausbau von Bio-CCS kann zu Zielkonflikten mit der Kreislaufwirtschaft führen, selbst wenn diese ausschließlich auf Rest- und Abfallstoffen basieren.

Viele Abfall- und Reststoffe biogenen Ursprungs (z. B. Altholz, Bioabfälle etc.) können stofflich recycelt werden bevor sie in Energie und oder Chemikalien umgewandelt werden. Die thermische Verwertung konkurriert allgemein mit anderen langfristigeren Nutzungsformen. Durch die Subventionierung der energetischen Biomassenutzung im Rahmen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) besteht ein ökonomischer Vorteil in der energetischen Nutzung der Biomasse (siehe Kap. 2.1.). Eingebettet in den größeren Trend nach einer Bioenergienachfrage, führt dies dazu, dass Geschäftsmodelle für die Wiederverwendung von Altholz gegenüber der energetischen Verwendung in Nachteil geraten (FAZ 2023).

Ohne den Ausbau von Recyclingkapazitäten wird der Druck, leicht und „kostengünstig“ verwertbare Biomasse für die Energieproduktion und künftig potenziell für BECCS zu nutzen, bestehen bleiben oder steigen. Das führt bereits heute dazu, dass Wertschöpfung durch stoffliche Nutzung gegenüber der Wertschöpfung durch Wärmebereitstellung verloren geht.¹² Politisch ist dafür eine Priorisierung notwendig, beispielsweise durch die Erarbeitung einer Nationalen Biomassestrategie. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, die Bereitstellung von Niedrigtemperatur in der Industrie sowie in Haushalten so umzugestalten, dass sie möglichst rasch mit möglichst wenig Biomasse auskommt – beispielsweise durch Elektrifizierung (inkl. Geothermie).¹³

12 Ein direkter Vergleich zwischen den unterschiedlichen Nutzungsformen ist schwierig, da der gesellschaftliche Nutzen von Wärmebereitstellung nicht mit dem der stofflichen Nutzung gleichgesetzt werden kann. Dennoch lassen sich Nachhaltigkeitsprinzipien wie eine Abfallhierarchie anwenden, die stoffliche Nutzungen vorrangig gegenüber der thermischen Verwertung als zielführend ansehen. Diese Prinzipien lassen sich mehr oder weniger gut in die Praxis, etwa durch die Kaskadennutzung, übersetzen.

13 Die Bereitstellung von Hochtemperatur in der Industrie (bspw. in der Kalk- oder Zementproduktion) kann in einigen Fällen gut mit BECCS kombiniert werden. Auch hier gilt, dass die Nachhaltigkeitsbewertung den gesamten Biomassekonsum im Auge behalten muss.

Nur durch die Verringerung des Biomasseverbrauchs insgesamt kann die steigende Nachfrage nach Biomasse als Rohstoff in der chemischen Industrie oder für den Einsatz in Bio-CCS-Anwendungen befriedigt werden, ohne bestehende Zielkonflikte zu verschärfen.

Abfallreduktion

Weitere Zielkonflikte betreffen die Abfallreduktion. Es gibt bereits heute in einigen Fällen einen ökonomischen Anreiz dafür, das Verbrennen von Abfall für Energiegewinnung im bestehenden Maß aufrechtzuerhalten. Diese können sich daraus ergeben, dass der Betrieb von Verbrennungsanlagen nur bei bestimmten Abfallvolumina wirtschaftlich ist, die regionale Wärmeversorgung stark von der Müllverbrennung abhängt oder, dass eine intensivere thermische Abfallbehandlung (TAB) als Mittel zur Erreichung niedriger Deponierungsquoten betrachtet wird (Istrate et al. 2023, SZ 2022, Pizarro-Alonso et al. 2018).

Es ist unwahrscheinlich, dass eine Förderung von CCS an TAB zu einer Verstärkung der bereits bestehenden Anreize zum Erhalt der Abfallvolumen für die Energieerzeugung führt. Dennoch muss auch weiterhin daran gearbeitet werden, dass die Abfallmengen reduziert werden und hochwertiges Recycling ermöglicht wird. In der Ausgestaltung der Förderung muss daher auf Kohärenz zu Kreislaufwirtschaft geachtet werden, auch um die gesellschaftlichen Kosten durch konsequente Kreislaufführung von „Müll“ und die kostenintensive Nachrüstung von CCS an TAB zu minimieren.

3.2. Wirtschaftlichkeit, Infrastruktur- und Technologiekosten

Die zentrale Herausforderung für den Markthochlauf von Bio-CCS-Technologien ist die derzeit mangelnde Wirtschaftlichkeit. Diese kann durch ein Zusammenspiel aus Entwicklung gesetzlicher Grundlagen, einer staatlichen Förderung und Nachfrage von CO₂-Entnahme-Zertifikaten auf privaten Märkten entstehen. Offen ist, wie eine Nachfrage nach Negativemissionen sowie der dafür notwendigen CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur geschaffen werden kann.

Wirtschaftlichkeit

Zur Finanzierung von Negativemissionstechnologien wird derzeit hauptsächlich die Integration von CO₂-Entnahmezertifikaten in das EU-Emissionshandelssystem (ETS I) diskutiert. Diese Option könnte zwar Anreize für Investitionen schaffen, indem eine Nachfrage im zentralen Klimapolitikinstrument der EU durch einen möglichen Ausgleich von Emissionen durch CO₂-Entnahmezertifikate geschaffen wird. Die Integration erfordert jedoch eine sorgfältige Abwägung der Chancen und Risiken, insbesondere bei NETs, die Biomasse nutzen. Für eine korrekte Quantifizierung von Entnahme-Einheiten müssen physische Äquivalenz, zeitliche Verzögerungen und mögliche Kohlenstoffschulden berücksichtigt werden. Eine entnommene Tonne CO₂ gleicht nicht zwangsläufig eine emittierte Tonne vollständig aus. Zudem wirken Emissionsminderungen sofort, während Entnahmen – besonders bei Bio-CCS – zeitlich versetzt greifen (CarbonBrief 2021).¹⁴ Hinzu kommt, dass durch Landnutzungsänderungen anfänglich eine CO₂-Schuld entstehen kann. Werden diese Unsicherheiten nicht einbezogen, besteht das Risiko, den Klimanutzen von Bio-CCS zu überschätzen und damit die Funktionsfähigkeit des EU-ETS zu schwächen (Bellona 2025a).

Darüber hinaus werden schon jetzt CO₂-Entnahmezertifikate auf dem VCM gehandelt. Bisher ist der Anteil dauerhafter CO₂-Entnahmen am Gesamtmarkt jedoch gering und diese werden

¹⁴ Klimamodellierungen ergeben, dass es keine direkte Äquivalenz zwischen einer Emission und einer CO₂-Entnahme gibt. Eine Tonne CO₂-Emission wirkt stärker auf den THG-Effekt, als eine entnommene Tonne CO₂.

nur von wenigen Akteuren nachgefragt. Während der Großteil der zwischen 2022 und 2024 ausgestellten Zertifikate Vermeidungs-/Minderungszertifikate waren, machten Entnahmezertifikate nur rund 4% aus. Umgerechnet entspricht dies lediglich 0,16 Mt. dauerhafter CO₂-Entnahmen (Carbon Direct 2024). Zudem stammt der Großteil der Nachfrage von wenigen Akteuren – 2024 entfielen rund 80% aller Vorabkäufe auf ein großes US-Unternehmen (CDR.fyi 2023, Carbon Direct 2024).

Eine natürliche Nachfrage nach CO₂-Entnahmen kann durch freiwillige Märkte aktuell nicht geschaffen werden. Der VCM leidet unter einer Knappheit qualitativ hochwertiger Zertifikate, weitreichenden Integritätsrisiken wie unzureichender Zusätzlichkeit, Permanenz oder Doppelzählung sowie einer hohen Nachfrage nach minderwertigen Offsets, die die Klimaglaubwürdigkeit des gesamten Markts schwächt (Probst et al. 2023; Trencher et al. 2024). Auch mangelt es an robusten Standards und unabhängiger Governance, da der Markt von privaten Zertifizierungssystemen mit teils unklarer Qualität dominiert wird (VCM Primer 2023).

Durch die Erarbeitung der Carbon Removals and Carbon Farming (CRCF) Regulation plant die EU, robuste Standards für unterschiedliche NETs zu schaffen, die dann durch private Märkte finanziert werden können. Das CRCF soll ein

freiwilliges Rahmenwerk¹⁵ für die Zertifizierung von CO₂-Entnahmen werden. Die darin entwickelten Methoden reichen aktuell aber nicht aus, um neue und höherwertige Standards zu setzen und damit das für Investitionen nötige Vertrauen zu schaffen (Bellona Europa 2025a).

Insgesamt stellt der VCM zwar ein wichtiges Experimentierfeld für die Entwicklung und Validierung von Bio-CCS-Ansätzen dar, da er die Erprobung neuer Methoden, Kostensenkungen und Investorenvertrauen ermöglicht, doch seine derzeitige Leistungsfähigkeit für den breiten Hochlauf permanenter CO₂-Entnahmen bleibt aufgrund dieser strukturellen Defizite begrenzt. Somit ist die mögliche Finanzierung von CO₂-Entnahme durch die Integration in das ETS, die aktuellen Strukturen des VCMs sowie das Schaffen des CRCFs nicht ausreichend, um eine ausreichende Nachfrage zu schaffen.

Bei der Abscheidung von CO₂ in der Biogas-aufbereitung spielen Skaleneffekte, die Kosten der Verflüssigung des CO₂, sowie Messinstrumente eine erhebliche Rolle. Eine Nachrüstung mit CCS rechnet sich bei kleinen Anlagen nicht. Zudem kann die Verflüssigung des CO₂ die Gesamtkosten der Anlagen verdoppeln. Ein weiterer erheblicher Kostenpunkt sind derzeit Sensoren zur Messung der Reinheit des erzeugten Biomethans, die technisch anspruchsvoll und teuer sind.

In der Pflanzkohleproduktion könnten CCS-Module theoretisch an Pyrolyseanlagen angeschlossen werden. Dies rechnet sich jedoch derzeit nicht, da die Reinigung der Pyrolysegase zu kostenaufwendig ist. Wichtig ist, dass das Potenzial zur CO₂-Entnahme in der Pflanzkohle liegt und nicht in der Reinigung und Abscheidung der Pyrolysegase.

In thermischen Abfallbehandlungsanlagen hängen die Kosten für CCS stark von standortspezifischen Faktoren ab. Größere Anlagen profitieren von Skaleneffekten. Ein wesentlicher Kostenpunkt ist der Transport des abgeschiedenen CO₂, wobei die Distanz und die Transportart entscheidend sind. Pipelines stellen langfristig die günstigste Option dar, während der Transport

Die Beispiele zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit von Bio-CCS von multiplen Faktoren abhängt. Für ein breites Portfolio an Bio-CCS-Verfahren benötigt die staatliche und privatwirtschaftliche Förderung einen Mix an Finanzierungsinstrumenten und Geschäftsmodellen.

¹⁵ Werden permanente CO₂-Entnahme Methoden in das ETS integriert, und wird weiterhin das CRCF als alleiniges Instrument zur Bewertung der Methoden genutzt, würde sich der freiwillige Charakter des CRCFs in Teilen ändern.

per Schiff oder Schiene deutlich teurer ist. Auch die Art der Speicherung beeinflusst die Gesamtkosten: Onshore-Speicherung ist in der Regel kostengünstiger als Offshore-Lösungen (MVV Energie AG, 2025).

Diese Beispiele zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit von Bio-CCS von multiplen Faktoren abhängt. Für ein breites Portfolio an Bio-CCS-Verfahren wird daher für die staatliche und privatwirtschaftliche Förderung von Bio-CCS ein Mix an Finanzierungsinstrumenten und Geschäftsmodellen benötigt.

Infrastruktur- und Investitionskosten

Ein entscheidendes Hemmnis für NETs und damit für Bio-CCS-Technologien, ist das Fehlen einer CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur sowie offene Fragen zur Finanzierung. Der Aufbau einer CO₂-Infrastruktur in Deutschland erfordert erhebliche Investitionen (Bellona 2025b). Zudem braucht es eine europäische Koordinierung für den Auf- und Ausbau der Transport- und Speicherinfrastruktur, etwa über länderübergreifende Pipeline-Netze und eine Verständigung über die Nutzung der in Deutschland begrenzt verfügbaren Injektionskapazitäten.

Offen ist, wie die Kostenaufteilung für die Bereitstellung und Instandhaltung der CO₂-Infrastruktur für unterschiedliche Akteure gestaltet werden soll. Der Aufbau der Transportinfrastruktur wird in der Verantwortung von Pipelinebetreibern liegen, die erhebliche Investitionskosten übernehmen müssen. Diese hohen Vorlaufinvestitionen sollen sich aus den erwarteten Erlösen der Infrastruktur in Form von Nutzungsentgelten der Pipelineteilnehmern amortisieren. Vor allem in der Anfangsphase, in der sich die Kosten auf nur wenige Einspeiser verteilen, wären First Mover ohne einen Umlagemechanismus mit hohen Transportkosten konfrontiert (IN4Climate.NRW 2024).

Neben den Kosten der Infrastruktur werden insbesondere in der Hochlaufphase des Bio-CCS-Systems hohe Kapital- und Betriebskosten (CAPEX und OPEX) entstehen, die von verschiedenen privatwirtschaftlichen Akteuren getragen werden müssen. Für viele Bio-CCS-Anwendungen wird anfangs eine Förderung notwendig sein, um die hohen Kapitalkosten für den Bau von Pilotanlagen abzufedern. Viele Anwendungen sind bereits technologisch weit entwickelt, dennoch fehlt es an Erfahrung mit Anlagen im Industriemaßstab, insbesondere im Verbund mit weiteren Unternehmen.

Die Betriebskosten werden bei Bio-CCS-Anwendungen einen erheblichen Teil der Gesamtkosten ausmachen. Ohne stabile Rahmenbedingungen, die eine langfristige Perspektive bieten sowie Finanzierungsinstrumente für CAPEX und OPEX besteht die Gefahr eines ineffizienten Markthochlaufs: hohe Anfangskosten, insbesondere für den Transport von CO₂, könnten Akteure dazu zwingen, auf Alternativen wie Bahn oder Schiff auszuweichen. Dies würde die Pipeline-Auslastung verringern und die Wirtschaftlichkeit der Infrastruktur gefährden. Daneben könnten Anlagen mit ansonsten unvermeidbaren Restemissionen zu langsam oder zu spät in die Nachrüstung von CCS investieren, was die Klimaziele gefährdet.

Auf EU-Ebene existieren bereits Förderprogramme für CO₂-Infrastruktur wie der EU Innovation Fund und die Connecting Europe Facility (CEF). In Deutschland gibt es verschiedene Ansätze für Forschungszuschüsse (z. B. BMBF für CO₂-Entnahmeprojekte), Zuschüsse für Pilot- und Demonstrationsprojekte (über die Bundesförderung Industrie und Klimaschutz, BIK) sowie günstige Kredite wie die Klimaschutzoffensive der KfW für Investitionen in CCS/CCU-Technologien und Infrastruktur. Diese Instrumente sollen künftig ausgebaut werden, gelten für Antragsteller jedoch oft als komplex und unübersichtlich – eine Vereinfachung der Antragsverfahren ist daher entscheidend.

Technologische und operationelle Hürden

Die Umsetzung von CO₂-Abscheidung ist zudem mit erheblichen technologischen und operationellen Herausforderungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, räumlicher Verfügbarkeit und Größenvorteilen verbunden. Durch die Nachrüstung einer Abscheideanlage entstehen je nach Technologie, Wirkungsgradverluste von 25 bis 30 % des thermischen Outputs bzw. 20 bis 25 % des elektrischen Outputs.¹⁶ Damit verringert sich die Wirtschaftlichkeit der Anlagen, was u. a. in der Wärmebereitstellung durch TAB eine Änderung der regionalen Wärmeplanung nach sich ziehen wird.

Eine Nachrüstung mit Abscheidetechnologie steht zudem räumlichen Herausforderungen gegenüber. Post-Combustion-Module führen zu einer Vergrößerung der gesamten Anlage. Die Oxyfuel-Technologie hingegen ist kompakter und lässt sich räumlich besser in bestehende Anlagen integrieren. Allerdings gestaltet sich die Nachrüstung bestehender Anlagen als schwierig, da das Eindringen von Luft in das System die Prozessstabilität gefährden kann. In der Praxis erfordert die Umstellung daher meist den vollständigen Neubau der Anlage, was mit erheblichen Investitionskosten verbunden ist und die Wirtschaftlichkeit zusätzlich belastet (Thrän et al. 2024).

Der Hochlauf von Bio-CCS wird durch ein komplexes Zusammenspiel aus wirtschaftlicher Unsicherheit, fehlenden Investitionsanreizen, hohen Infrastruktur- und Betriebskosten sowie technologischen Herausforderungen gebremst. Für einen erfolgreichen Hochlauf braucht es daher eine Technologie- und gezielte Nachfrageförderung, die Investitionssicherheit schafft.

Hubs können als Real-labore dienen, in denen neue Governance-Modelle, sektorübergreifende Kooperationen und praxisnaher Wissensaufbau erprobt werden.

3.3. Räumliche Verteilung und Skaleneffekte

Die Entwicklung des künftigen Bio-CCS-Systems wird sich im Spannungsfeld von Zentralisierung und Aufrechterhaltung einer dezentralen Anlagenverteilung, Skaleneffekten und mittelfristig der Anbindung an die CO₂-Transportinfrastruktur entwickeln.

Anlagen, die Biomasse zur Umwandlung in Energie und/oder Chemikalien nutzen, sind heute üblicherweise dezentral im Land verteilt, da sie in der Nähe zu lokal verfügbaren Biomassen entstanden sind. Das gilt etwa für Biomethan- sowie für Pyrolyseanlagen. Eine Bündelung, und damit der Gewinn von Skaleneffekten, ist hier denkbar durch die Schaffung von Biomethan-Hubs, zu denen Landwirt/innen ihre biogenen Reststoffe liefern, oder von Bioraffinerien. Pyrolyse-Hochtemperaturanlagen könnten sich zukünftig in der Nähe von Industrieparks ansiedeln.

Ein Vorteil solcher Hubs liegt in der Möglichkeit, Infrastruktur gemeinsam zu nutzen, Anlagen integriert zu planen und umzusetzen sowie Kostenvorteile zu erzielen. Berechnungen zufolge können Biogaserzeuger durch die Nutzung einer zentralen Aufbereitungs- und Einspeiseinfrastruktur Investitionsausgaben im Vergleich zu Einzellösungen um bis zu 50 % senken (FNR 2025). Dies ist auch bei der Aufbereitung, Lagerung und Transport des CO₂ von Bedeutung. Dabei ist die Clusterung vor allem dann von Vorteil, wenn das CO₂-Volumen noch nicht ausreicht, um eine eigene Pipeline-Infrastruktur zu rechtfertigen. In solchen Fällen können die Bündelung von Quellen und die koordinierte Nutzung bestehender Infrastruktur insbesondere kleine Anlagen

¹⁶ Beim Post-Combustion-Verfahren, etwa der Aminwäsche, entsteht ein hoher Wärmebedarf. Die Oxyfuel-Verbrennung hingegen nutzt reinen Sauerstoff anstelle von Luft, was den Einsatz einer Luftzerlegungsanlage sowie große Mengen an Strom erfordert (Thrän et al. 2024).

wirtschaftlich tragfähiger machen.¹⁷ Auch die administrativen Prozesse lassen sich vereinfachen, wenn Genehmigungs- und Konsultationsverfahren besser aufeinander abgestimmt sind. Hubs bieten außerdem die Möglichkeit, als Reallabore zu dienen, in denen neue Governance-Modelle, sektorübergreifende Kooperationen und praxisnaher Wissensaufbau rund um Bio-CCS erprobt werden können. Auf regionaler Ebene ermöglichen sie eine gezielte Unterstützung von Dekarbonisierungsstrategien. Indem Emissionsquellen räumlich gebündelt werden, werden außerdem Fortschritte bei der Treibhausgasreduktion sichtbarer und greifbarer.

Gleichzeitig dürfen die potenziellen Kostenvorteile jedoch nicht überschätzt werden. Hauptkostentreiber für CCS bleibt voraussichtlich die CO₂-Abscheidung selbst, die stark von den abscheidbaren Mengen abhängt. Sobald ein ausreichendes Volumen erreicht ist, das eine Pipeline-Infrastruktur wirtschaftlich rechtfertigt, sinkt der zusätzliche Nutzen einer Clusterung. Für eine finale Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von CCS ist Clustering allerdings nicht allein entscheidend und muss daher projektspezifisch bewertet werden.

Eine offene Frage dabei ist, wie die Entstehung von regionalen Hubs und die Verzahnung komplexer Prozesse sinnvoll gesteuert werden kann. Zu beantworten ist darüber hinaus, wie die Nachfrage nach (nachhaltiger) Biomasse logistisch und langfristig gedeckt werden kann.

Im Falle der TAB sind Anlagen dort angesiedelt, wo Abfallaufkommen bestehen. Mit einer stärkeren Kreislaufführung von Rohstoffen wird das Abfallaufkommen künftig sinken. Wodurch evtl. weniger TAB-Anlagen betrieben werden müssen. Sollte dann das verbliebene Abfallaufkommen dort verwertet werden, wo eine CCS-Nachrüstung erfolgt ist, würde eine gewisse Zentralisierung eintreten. Bei der Nachrüstung von TAB mit CCS besteht die Herausforderung darin, Veränderungen des Abfallaufkommens

einzubeziehungen und Szenarien zu entwickeln, um technologische und ökonomische Lock-ins zu vermeiden.

Die Müllaufkommen sollten künftig dort verarbeitet werden, wo eine CCS-Nachrüstung und eine Anschließung an eine CO₂-Transportinfrastruktur möglich ist. Wo das nicht möglich ist, müssen andere Wege zur Kompensierung gefunden werden.¹⁸

Aus Perspektive der Ressourcensicherheit, regionalen Wertschöpfung und der bereits bestehenden Infrastruktur ist es grundsätzlich wichtig, die bestehenden dezentralen Strukturen zur Biomasseverwertung zu erhalten. Biogas- und Biomethananlagen spielen eine wichtige Rolle im Stickstoff-Recycling. Die enge Kopplung an die Verfügbarkeit von Gülle etc. als Substrat für die Anlagen reduziert zugleich die Ausbaupotenziale. Zudem besteht das politische Ziel (und die ökologische Notwendigkeit), den Stickstoffeinsatz zu reduzieren. Anlagenbetreiber stehen daher perspektivisch vor der Wahl, welche Biomasse sie für ihre Anlagen nutzen können. Das ist u. a. für die Pyrolyse relevant, wenn die Ausweitung der Rohstoffbasis auf Reststoffe aus der Landwirtschaft, wie Stroh, oder auf kommunale Klärschlämme voranschreitet. Letztere weist ein großes Potenzial für die Rückgewinnung von Phosphor auf, dessen Vorkommen stark begrenzt ist.

Ein entscheidender Faktor für die Beibehaltung einer dezentralen Struktur wird der Aufbau einer Infrastruktur zur CO₂-Speicherung an Land sein. Sollte diese Option in Deutschland genutzt werden, könnten dezentrale Transportwege realisiert und der Umfang einer teuren zentralen CO₂-Pipeline-Infrastruktur reduziert werden.

¹⁷ Zudem kann eine gezielte Wärmeintegration die Energieeffizienz von CO₂-Abscheideanlagen – insbesondere bei Systemen, die auf Aminbasis arbeiten – verbessern.

¹⁸ Hier gilt zu beachten, dass Emissionen permanent wirken, während sogenannte nicht-permanente CO₂-Entnahmefunktionen physisch nicht die gleiche Permanenz erbringen können und selbst durch vertragliche Verpflichtungen eine Äquivalenz nicht hergestellt werden kann (Bellona 2025a).

44 % bzw. 46 % der Befragten in Deutschland gaben an, noch nie von CCS- bzw. CO₂-Entnahme gehört zu haben.

3.4. Gesellschaftliche Akzeptanz

Neben den ökologischen, technischen und ökonomischen Herausforderungen stellt die Sicherung der gesellschaftlichen Akzeptanz eine zentrale Hürde für die erfolgreiche Umsetzung von Bio-CCS-Projekten dar. Erfahrungen aus Deutschland und anderen Regionen der Welt zeigen, dass öffentliche Kritik für bestimmte Technologien nicht nur gesetzliche Regelungen prägt, sondern teilweise auch zur Verzögerung oder zum Stopp einzelner Projekte führen kann. Wie Bio-CCS-Methoden in der Bevölkerung wahrgenommen und bewertet werden, wirkt sich daher direkt auf die Umsetzbarkeit und den wirtschaftlichen Erfolg entsprechender Vorhaben aus.

Befragungen zeigen, dass die Akzeptanz von CO₂-Entnahmetechnologien stark von der jeweiligen Methode abhängt. Entscheidend sind dabei Faktoren wie die wahrgenommenen Umweltauswirkungen, das Vertrauen in die verantwortlichen Akteure und die empfundene Natürlichkeit des Verfahrens. Insgesamt gilt, je vertrauter und natürlicher eine Technologie erscheint, desto höher ist ihre Akzeptanz (Merk 2025). Projekte, die bestehende Prozesse oder Infrastrukturen nutzen, werden daher tendenziell positiver bewertet, selbst wenn sie technisch anspruchsvoll sind.

Gleichzeitig sind Konzepte wie CCS oder CO₂-Entnahme in großen Teilen der Bevölkerung noch immer wenig bekannt. So hatten in den vergangenen Jahren 44 % bzw. 46 % der Befragten in Deutschland angegeben, noch nie von CCS- bzw. CO₂-Entnahme gehört zu haben (Merk 2025). Außerdem zeigen Befragungen, dass die Mehrheit die Priorität in der Vermeidung von Emissionen sieht und CO₂-Entnahme als nachrangig betrachtet.

Für die Akzeptanz von Bio-CCS sind darüber hinaus ökologische Bedenken von zentraler Bedeutung. Besonders kritisch eingeschätzt werden die knappe Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Flächen, der Ausbau von Transportinfrastrukturen sowie die Sicherheit unterirdischer Speicherstätten (Merk 2025). Hinzu kommen Fragen der sozialen Gerechtigkeit und des Strukturwandels. Die großskalige Einführung von CO₂-Entnahmetechnologien wirft Verteilungsfragen auf – etwa hinsichtlich der Risiken, der finanziellen Belastungen zwischen Generationen sowie der potenziellen Arbeitsplatzgewinne und -verluste in verschiedenen Wirtschaftssektoren (Daubner 2025).

Förderung von Akzeptanz

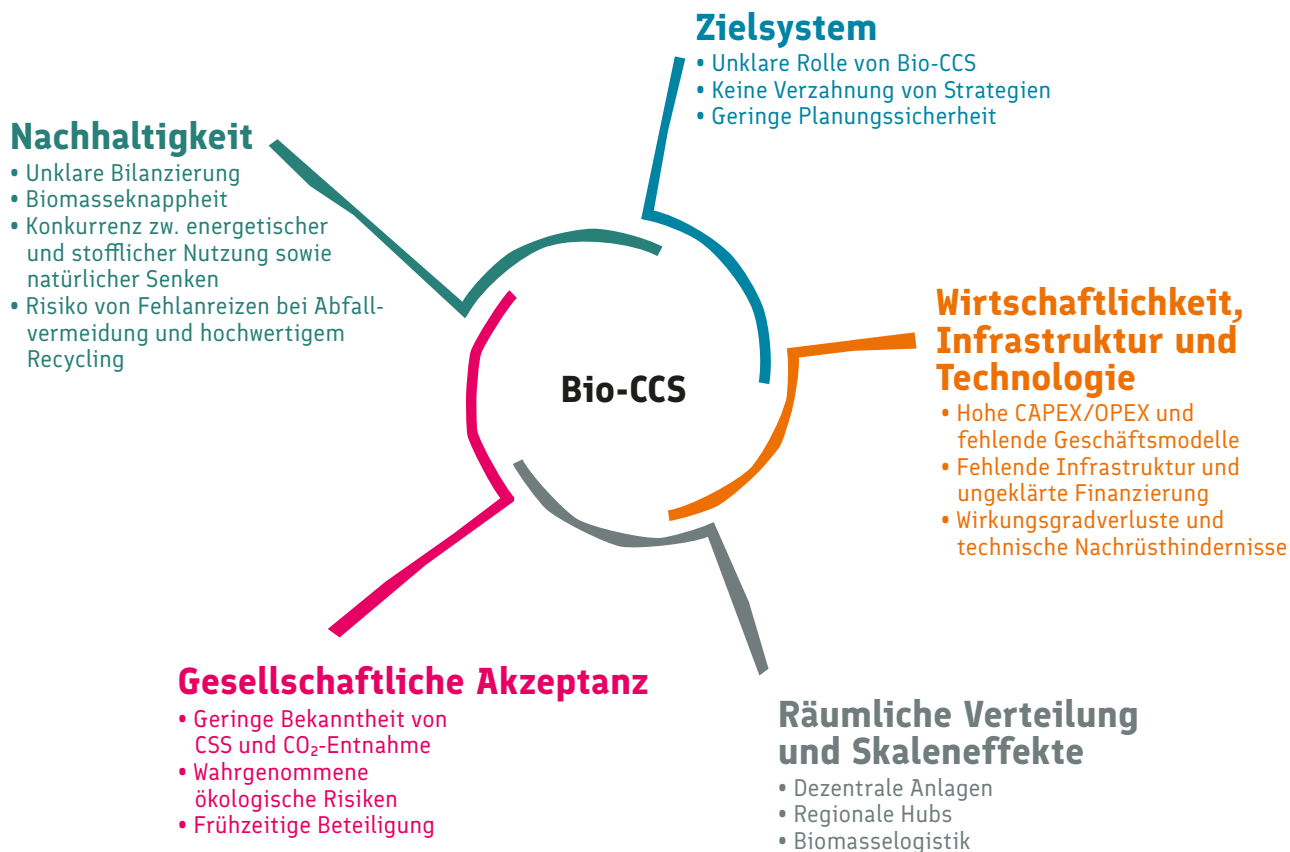
Studien zeigen erstens, dass eine klare, nachvollziehbare und transparente Kommunikation über Projektziele, Risiken und Nutzen entscheidend für die Akzeptanz von CO₂-Entnahmeprojekten ist. Dabei hängt die Akzeptanz auch vom Vertrauen in die Absender/innen ab. Eine zurückliegende Havarie kann in den betroffenen Regionen zu nachhaltigem Misstrauen führen und somit die Unterstützung für größere Projekte fast unmöglich machen (Merk 2025).

Zweitens ist die frühzeitige und faire Beteiligung der Bevölkerung eine Grundvoraussetzung für Akzeptanz. Beteiligungsverfahren müssen nicht nur inhaltlich, sondern auch verfahrensmäßig gerecht gestaltet werden. Dazu gehört die transparente Festlegung von Zielen (informieren, konsultieren, mitentscheiden), Formaten (z. B. Online- oder Präsenzveranstaltungen) und Zeitplänen (Eberenz et al. 2024). In frühen Entwicklungsphasen können offene Diskussionsforen dazu beitragen, unterschiedliche Perspektiven einzubringen, während in späteren Phasen strukturierte Beteiligungsprozesse konkrete Entscheidungsfindungen unterstützen sollten. Bei der Gestaltung von Kommunikations- und Beteiligungsprozessen müssen die Risiken gezielter Desinformationsstrategien berücksichtigt werden.

Drittens zeigt die Akzeptanzforschung, dass eine faire Verteilung von Kosten und Nutzen die Wahrnehmung in der Bevölkerung verbessern kann (Merk 2025). Direkte Vorteile für die lokale

Bevölkerung – etwa durch Arbeitsplätze, die Stärkung regionaler Wertschöpfung oder Investitionen in die Infrastruktur – können dazu beitragen, Akzeptanz zu schaffen und Widerstände abzubauen.

Infografik 5: Herausforderungen eines Bio-CCS-Systems



4. POLITISCHE EMPFEHLUNGEN

4.1. Ein integriertes Zielsystem für Bio-CCS entwickeln

Für einen erfolgreichen Markthochlauf von Bio-CCS-Verfahren in Deutschland, ist ein integriertes Zielsystem nötig (siehe Kap.3). Entscheidend dafür ist:

- **Die Definition einer politischen Zielsetzung des Beitrags von Bio-CCS zu den Klimaschutzziele.** Es sollte eine klar definierte politische Zielsetzung für Bio-CCS beschrieben werden. Diese muss qualitative Ziele – etwa die Aufrechterhaltung einer dezentralen Verwertung von Abfall- und Restbiomassen – und quantitative Ziele für die Menge der CO₂-Entnahme sowie deren Einbettung in die Langfriststrategie Negativemissionen (LNe) enthalten.

- **Eine strategische Ausrichtung und Abstimmung unterschiedlicher Strategien.** Der Beitrag von Bio-CCS innerhalb der LNe sowie die Wechselwirkungen mit der Carbon Management-Strategie (CMS) müssen definiert werden. Die CMS soll die zu transportierenden CO₂-Mengen beschreiben. Dafür ist eine Zielvorstellung des Bio-CCS-Systems notwendig. Die Strategien und Politikinstrumente zur Erreichung der Klimaziele sowohl für natürliche (§3a KSG) als auch für technische Senken (§3b KSG) müssen in Zukunft sinnvoll kombiniert werden. Das Fehlen einer politischen Zielsetzung und strategischen Ausrichtung schränkt sowohl das potenzielle Angebot als auch die Nachfrage nach Bio-CCS durch fehlende Planungssicherheit ein und erschwert den Markthochlauf von Bio-CCS-Verfahren und ihren Technologien.

4.2. Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit sicherstellen

Damit Bio-CCS in Deutschland mittelfristig einen echten Beitrag zu CO₂-Entnahme und langfristig zu Negativemissionen leisten kann, müssen Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit sichergestellt werden. Grundlegend dafür sind die Umsetzung des Kaskadenprinzips und die Einführung einer erweiterten THG-Bilanzierung.

Für die Umsetzung des Kaskadenprinzips ist es notwendig, dass:

- **die nationale Umsetzung und kohärente Implementierung der Vorgaben der RED III sowie die Ausgestaltung des EEG konsequenter auf den Vorrang stofflicher Anwendungen und Wiederverwertung ausgerichtet werden.** Energetische Nutzung und Bio-CCS sollten dagegen auf die Nutzung von nicht recycelbaren Rest- und Abfallstoffen beschränkt bleiben, bevor durch erweiterte Bilanzierungen ausgeschlossen werden kann, dass ihr wirtschaftlicher und ökologischer Wert in stofflichen Anwendungen geringer wäre. Da bei der Herstellung von Pflanzenkohle durch Pyrolyse Rest- und Abfallstoff recycelt werden, sollte die Pflanzenkohle in der Kaskade vor der thermischen Verwertung eingeteilt werden.
- **der zielgerichtete Ausbau von Recyclingkapazitäten vorangetrieben und klare Abfallhierarchien etabliert werden.** Vorrangig sind daher Abfallvermeidung und die Reduktion kurzlebiger Produkte zu verfolgen sowie bessere Sammel- und Trennsysteme zu etablieren.
- **regionale Stoffkreisläufe und Bottom-up-Ansätze gestärkt werden,** um Kaskadennutzung praktisch umzusetzen und lokale Potenziale auszuschöpfen.
- **innovative Konzepte unterstützt werden,** die Bio-CCS mit Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft verbinden.

Damit Bio-CCS einen echten Beitrag zu CO₂-Entnahme und Negativemissionen leisten kann, müssen Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit sichergestellt werden. Grundlegend dafür sind das Kaskadenprinzip und eine erweiterte THG-Bilanzierung.

Zudem braucht es für die Bestimmung nachhaltiger Potenziale eine erweiterte THG-Bilanzierung, die der Komplexität der Nachhaltigkeit der Biomassen und ihrer Nutzungspfade gerecht wird. Zentral dafür sind:

- **Eine projektspezifische Kohlenstoffbilanzierung** der meisten Biomassenutzungen außer Rest- und Abfallbiomasse, die entlang der Wertschöpfungskette auch Auswirkungen auf Biodiversität, Ökosystemleistungen und natürliche Senken berücksichtigt.
- **Die Entwicklung von vergleichbaren Indikatoren**, die den relativen Klimanutzen verschiedener Biomassenutzungen – also Substitutionspotenzial oder langfristige Bindung in Produkten – bspw. im Gebäudesektor, der Landwirtschaft oder der Chemiebranche – in Bezug zu ihrem Verbleib in Ökosystemen und dem damit verbundenen Potenzial für den natürlichen Klimaschutz abbilden. Solange Unsicherheiten bestehen, sollten konservative Werte für die Substitutionspotenziale und Klimanutzen angesetzt werden.
- **Der Aufbau eines MRV-Systems** für die Reinheit des CO₂, Permanenz und Nachhaltigkeit der CO₂-Speicherung.

Anhand der Kohlenstoffbilanzierung mittels neuer Indikatoren und MRV-Systemen kann eine notwendige Bewertung der Wechselwirkungen zwischen Bio-CCS und Pflanzenkohle mit landbasierter CO₂-Entnahme und natürlichen Senken ermöglicht werden. Diese Bewertung muss die Wirkung von Bio-CCS und landbasierter CO₂-Entnahme sowie den natürlichen Senken auf den Erhalt und den Ausbau weiterer Ökosystemleistungen vergleichbar machen. Damit können potenzielle Zielkonflikte mit den Klimaschutzzielen nach KSG §3a beschrieben und quantifiziert werden. Nur so können Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit von Bio-CCS-Anwendungen langfristig sichergestellt werden.

4.3. Technologieförderung stärken

Angesichts des Transformationsdrucks braucht es einen Planungsrahmen für die Förderung von Bio-CCS-Technologien. Trotz erkennbarer Trends bezüglich Biomasseverfügbarkeit und Nachhaltigkeit bleibt unklar, welche Verfahren langfristig Klima, Umwelt und regionale Wertschöpfung am besten dienen werden – daher ist eine umfassende Technologieförderung essenziell.

Nötig ist:

- **Eine langfristige Förderstrategie**, die den Hochlauf von Bio-CCS in klar definierten Phasen unterstützt. In der Anfangsphase sollte die Förderung im Sinne eines Portfolio-Ansatzes breit angelegt und technologieoffen sein. Ziel ist es, Grundlagenforschung, Pilotprojekte und Innovation zu ermöglichen und gleichzeitig Risiken sowie Unsicherheiten einzelner Technologien abzufedern. Für den Übergang in die betriebliche Umsetzung sollten Förderinstrumente stärker an ökologische Kriterien geknüpft werden und „Low-Risk“-Anwendungen priorisiert werden, um Risiken zu minimieren und Skaleneffekte zu sichern. Das Ziel ist die Entstehung wirtschaftlich tragfähiger Geschäftsmodelle, in denen Bio-CCS zügig ohne dauerhafte staatliche Unterstützung realisiert werden kann. Diese Kombination aus Anschubförderung, ökologischer Priorisierung und einem klaren Ausstieg aus der Förderung bei Marktreife schafft Investitionssicherheit und beschleunigt den Hochlauf.

4.4. Nachfrage sowie faire Wettbewerbsbedingungen schaffen

Bei der Finanzierung sollte grundlegend zwischen Maßnahmen unterschieden werden, die Versuchsanlagen und damit das Lernen über Bio-CCS im realweltlichen Kontext ermöglichen, und solchen Maßnahmen, die eine Skalierung der Anwendungen unterstützen.

Um die Investitions- und Betriebskosten von Bio-CCS-Technologien wirksam zu adressieren, sollte ein Policy-Mix entwickelt werden, der mindestens die folgenden Maßnahmen umsetzt:

- **Die öffentliche Nachfrage nach CO₂-Entnahme fördern.** Etwa durch staatliche Ankaufprogramme von CO₂-Entnahme-Zertifikaten, inkl. Ziele für die öffentliche Beschaffung, die auf den Klimazielen nach KSG §3b fußen.
- **Das Schaffen einer privatwirtschaftlichen Nachfrage durch Aufsetzen eines Compliance-Mechanismus.** Unternehmen sollen entweder in ihren eigenen Wertschöpfungsketten CO₂-Entnahme-Zertifikate generieren oder müssen durch den Einkauf von Zertifikaten, bspw. über verpflichtende „Clean-up Zertifikate“, ihre unvermeidbaren Restemissionen ausgleichen können. Es sollte keine Integration zwischen Negativemissionen (insb. von NETs, die Biomasse nutzen) in den Emissionshandel erfolgen (ETS I bzw. auch der entstehende ETS II), damit die Instrumente zur THG-Minderung und zum Schaffen einer Nachfrage nach CO₂-Entnahme-Zertifikaten getrennt und somit effektiv bleiben.
- **Eine Verbesserung der Methoden des CRCFs und eine Umsetzung von Standards für CO₂-Entnahme auf EU-Ebene** voranbringen.
- **Eine Weiterentwicklung von Klimaschutzverträgen.** Diese sind bisher auf CO₂-Vermeidung und Reduktion ausgelegt, sollten aber auch für Bio-CCS-Anwendungen weiterentwickelt werden.

Daneben braucht es weitere Maßnahmen:

- **Die Schaffung eines *level playing fields* zwischen Nutzungsformen von Biomasse.** Wettbewerbsverzerrungen zugunsten einzelner Anwendungen – etwa der energetischen Holznutzung – sollen abgeschafft werden, damit in Zukunft die Förderung der energetischen Nutzung nicht zu einer Bevorzugung von BECCS führt, die negative Effekte auf die natürlichen Senken haben. Zusätzlich sollte die Kaskadennutzung aus der bestehenden EU-Gesetzgebung (RED III) national stärker implementiert werden, innerhalb derer flexible und wirtschaftlich tragfähige Nutzungspfade nicht unnötig eingeschränkt werden.
- **Die Einführung einer *Extended Producer Responsibility* für Inverkehrbringer von Plastik.** Diese kann mittels eines Fonds, der durch Abgaben auf die Produktion von Plastik finanziert wird, umgesetzt werden. Durch diesen Fonds könnten produzentenseitige Maßnahmen zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit, Recyclinginfrastruktur, sowie die Nachrüstung von CCS an TAB kofinanziert werden. Hierdurch können die Plastikproduktion mittel- bis langfristig reduziert und die Kosten an TAB verteilt werden.

4.5. Infrastruktur bereitstellen und Investitionskosten absichern

Ermöglicht werden kann dies durch:

- **Konsequente Nutzung von Synergien der unterschiedlichen Infrastrukturen.** Konkret: Dort, wo CCS-Technologien ohnehin notwendig sind, um ansonsten unvermeidbare fossile Emissionen zu reduzieren (bspw. in Müllverbrennungsanlagen), empfiehlt es sich, auch biogene Emissionen aus Abfallströmen und biogenen Brennstoffen abzuscheiden. Zusätzlich sollten die Vernetzung und der Zusammenschluss relevanter Akteure gestärkt werden – etwa in Chemieparks, bei Bioraffinerien oder Biomethan-Hubs.

- **Ausrichtung der Förderinstrumente und Infrastrukturplanung auf Skaleneffekte und regionale Konzentration.** Für die Bewertung des Zusatznutzens solcher Cluster ist die Größe der Anlagen entscheidend, da sich eine Pipelineanbindung nur bei ausreichend großen CO₂-Mengen lohnt.
- **Eine klare, transparente und anwenderfreundliche Gestaltung von bestehenden und zu schaffenden Fördermechanismen,** um Investitionsentscheidungen zu erleichtern.
- **Eine Risikoabsicherung der Kapitalinvestitionen.** Es sollen Instrumente zur Minimierung von Investitionsrisiken – etwa staatliche Garantien oder Bürgschaften – geschaffen und durch Umlagemechanismen zur zeitlichen Streckung der Amortisation von CO₂-Infrastruktur ergänzt werden.

4.6. Gesellschaftliche Akzeptanz und Beteiligung fördern

Politische Maßnahmen zur Förderung von Bio-CCS sollten neben ökologischen, technischen und ökonomischen Fragen auch die gesellschaftliche Akzeptanz der Bevölkerung in den Mittelpunkt stellen.

Nötig dafür sind:

- **Eine Kommunikationsstrategie zu Negative-missionen.** Unternehmen, Staat, Bundesländer und Projektträger sollten eine langfristige Kommunikationsstrategie entwickeln, die Projektziele, Risiken, Nutzen und Alternativen klar erläutert und auch jene Bevölkerungsgruppen erreichen, die bisher kaum Berührungspunkte mit CO₂-Entnahmetechnologien hatten.
- **Frühzeitige und faire Beteiligungsverfahren.** Bürger/innen müssen frühzeitig über Projekte informiert und sinnvoll eingebunden werden. Dazu gehören klare Zielsetzungen (informieren, konsultieren, mitentscheiden) und transparente Zeitpläne. Beteiligungsprozesse müssen durch professionelle Mediator/innen begleitet werden, um Desinformation und Polarisierung zu vermeiden. Schnellere Genehmigungsverfahren sind zwar wünschenswert, dürfen jedoch nicht zu akzeptanzgefährdenden Einschränkungen der Beteiligung führen.

Infografik 6: Empfehlungen für ein nachhaltiges Bio-CCS-System

Zielbild

1. Ein integriertes Zielsystem ist notwendig, das die Rolle von Bio-CCS im Klimaschutz klar definiert und die Ausrichtung unterschiedlicher Politiken und Strategien miteinander verzahnt.

Nachhaltigkeit

2. Die begrenzte Biomasse muss so effizient wie möglich genutzt werden. Eine konsequente Fokussierung auf Rest- und Abfallstoffe, strenge Nachhaltigkeitskriterien, die Priorisierung der Kaskadennutzung sowie robuste projektbasierte CO₂-Bilanzen und einheitliche MRV-Systeme sind dafür zentrale Voraussetzungen.

Technologie

3. Es bedarf einer langfristig angelegten, phasenweisen Technologieförderung, die anfänglich technologieoffen und forschungsorientiert, später stärker auf ökologische Kriterien und risikoarme Anwendungen ausgerichtet sein soll.

Wirtschaftlichkeit

4. Ergänzend dazu braucht es einen Policy-Mix, der Nachfrage schafft und Skalierung ermöglicht – etwa durch staatliche Ankaufprogramme oder private Nachfrage über Compliance-Mechanismen. Diese Kombination aus Technologie und gezielte Nachfrageförderung schafft Investitionssicherheit und beschleunigt den Hochlauf.

Infrastruktur

5. Der Aufbau einer leistungsfähigen CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur ist zentral. Investitionen in Pipelines und Speicherstätten sowie die Bildung regionaler Cluster können Skaleneffekte heben und Kosten senken. Staatliche Garantien, Bürgschaften und Amortisationsmechanismen sind nötig, um hohe Investitionsrisiken abzufedern.

Akzeptanz

6. Maßnahmen zur Förderung der gesellschaftlichen Akzeptanz müssen mitgedacht werden. Eine transparente, wissenschaftlich fundierte Kommunikationsstrategie, frühzeitige und faire Beteiligungsverfahren sowie sozialpolitische Leitplanken zur gerechten Verteilung von Lasten und Nutzen sind unverzichtbar, um Vertrauen aufzubauen und langfristige Akzeptanz zu sichern.

- **Klare Strategien zur Kosten-Nutzen-Verteilung.** Da Bio-CCS-Projekte Fragen der Verteilung von Risiken, finanziellen Lasten und Vorteilen berühren, sollte die Politik frühzeitig sozialpolitische Leitplanken setzen – also Grundprinzipien für faire Beteiligung, Transparenz und Ausgleich möglicher Landnutzungskonflikte. Maßnahmen, die direkte Vorteile für die Bevölkerung schaffen – etwa kommunale Investitionen oder neue Arbeitsplätze – können entscheidend dazu beitragen, Akzeptanz und langfristige Unterstützung aufzubauen.
- **Glaubwürdige Berücksichtigung ökologischer Risiken.** Die Akzeptanz von Bio-CCS hängt maßgeblich davon ab, ob ökologische Bedenken ernst genommen und adressiert werden. Politische Entscheidungsträger/innen sollten verbindliche ökologische Mindeststandards festlegen – etwa zur nachhaltigen Nutzung landwirtschaftlicher Flächen oder zur Sicherheit von Speicherstätten. Kontinuierliche MRV-Systeme sind notwendig, um Vertrauen zu schaffen.

5. FAZIT

Bio-CCS und Pflanzenkohle verfügen zusammen in Deutschland über ein Potenzial zur nachhaltigen CO₂-Entnahme von mindestens 13 Mt. CO₂ jährlich. Das entspräche 20 bis 30 % des zu erwartenden unteren Endes der Restemissionen in 2045. Darüber hinaus bestehen zusätzliche Potenziale, deren Bestimmung eine erweiterte THG-Bilanzierung erfordert, um negative Wechselwirkungen mit dem LULUCF-Sektor und der Kreislaufwirtschaft möglichst zu vermeiden. Damit kann Bio-CCS einen relevanten Beitrag zur Erreichung der Netto-Null- und Netto-Negativ-Emissionsziele leisten. Als Ergänzung zu anderen Klimaschutzmaßnahmen bieten die Technologien die Möglichkeit, unvermeidbare Restemissionen langfristig zu kompensieren und echte Negativemissionen zu realisieren.

Dem stehen jedoch zentrale Zielkonflikte gegenüber. Nachhaltige Biomasse als wichtigste Ressource ist begrenzt und ihre Nutzung konkurriert mit Biodiversität, Ernährungssicherheit und natürlichem Klimaschutz. Zudem bestehen weiterhin Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen Klimawirkung, da belastbare projektbasierte CO₂-Bilanzen bislang weitgehend fehlen. Auch der Hochlauf von Bio-CCS ist mit erheblichen Hürden verbunden. Wirtschaftlich tragfähige Geschäftsmodelle existieren kaum, da hohe Investitions- und Betriebskosten bislang weder durch Förderinstrumente noch durch funktionierende Marktmechanismen gedeckt werden können. Ohne eine leistungsfähige CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur lässt sich die CO₂-Abscheidung und Speicherung im größeren Maßstab nicht umsetzen. Schließlich hängt der Erfolg von Bio-CCS-Projekten maßgeblich von seiner gesellschaftlichen Akzeptanz ab.

Bio-CCS und Pflanzenkohle verfügen zusammen über das Potenzial, 20 bis 30 % des zu erwartenden unteren Endes der Restemissionen in 2045 auszugleichen.

Damit Bio-CCS sein Potenzial entfalten kann, braucht es eine Reihe strategischer Weichenstellungen:

1. Ein integriertes Zielsystem ist notwendig, das die Rolle von Bio-CCS im Klimaschutz klar definiert und die Ausrichtung unterschiedlicher Politiken und Strategien miteinander verzahnt.
2. Die begrenzte Biomasse muss so effizient wie möglich genutzt werden. Eine konsequente Fokussierung auf Rest- und Abfallstoffe, strenge Nachhaltigkeitskriterien, die Priorisierung der Kaskadennutzung sowie robuste projektbasierte CO₂-Bilanzen und einheitliche MRV-Systeme sind dafür zentrale Voraussetzungen.
3. Es bedarf einer langfristig angelegten, phasenweisen Technologieförderung, die anfänglich technologieoffen und forschungsorientiert, später stärker auf ökologische Kriterien und risikoarme Anwendungen ausgerichtet sein soll.
4. Ergänzend dazu braucht es einen Policy-Mix, der Nachfrage schafft und Skalierung ermöglicht – etwa durch staatliche Ankaufprogramme oder private Nachfrage über Compliance-Mechanismen. Diese Kombination aus Technologie und gezielter Nachfrageförderung schafft Investitionssicherheit und beschleunigt den Hochlauf.

5. Der Aufbau einer leistungsfähigen CO₂-Transport- und Speichereinfrastuktur ist zentral. Investitionen in Pipelines und Speicherstätten sowie die Bildung regionaler Cluster können Skaleneffekte heben und Kosten senken. Staatliche Garantien, Bürgschaften und Amortisationsmechanismen sind nötig, um hohe Investitionsrisiken abzufedern.
6. Maßnahmen zur Förderung der gesellschaftlichen Akzeptanz müssen mitgedacht werden. Eine transparente, wissenschaftlich fundierte Kommunikationsstrategie, frühzeitige und faire Beteiligungsverfahren sowie sozialpolitische Leitplanken zur gerechten Verteilung von Lasten und Nutzen sind unverzichtbar, um Vertrauen aufzubauen und langfristige Akzeptanz zu sichern.

Insgesamt können Bio-CCS und Pflanzkohle das deutsche Klimaschutzportfolio bedeutend ergänzen. Damit dieses Potenzial jedoch tatsächlich gehoben werden kann, braucht es eine klare Vision und einen verlässlichen gesetzlichen Rahmen, der Nachhaltigkeit, Marktwirtschaft und gesellschaftliche Teilhabe konsequent zusammen denkt.

6. Literatur

- Agora Agrar (2024). Agriculture, forestry and food in a climate neutral EU. The land use sectors as part of a sustainable food system and bioeconomy. https://www.agora-agriculture.org/fileadmin/Projects/2024/2024-09_EU_Agriculture_forestry_and_food_in_a_climate_neutral_EU/AGR_336_Land-use-study_WEB.pdf
- Ariadne (2021). Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich. 8. CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre. https://ariadneprojekt.de/media/2021/10/Ariadne_Szenarienreport_Oktober2021_Kapitel8_CO2Entnahme.pdf
- Biochar Europe (2025). Fourth European Biochar Market Report 2024/2025. https://cdn.prod.website-files.com/66d0896fda2fb8a0d53224d6/685ab16e9f55f3266c7d640e_European-Biochar-Market-Report_2024%262025.pdf
- BECCS Stockholm (2025). Stockholm Exergi to Build One of the World's Largest Facilities for Removing Carbon Dioxide from the Atmosphere. <https://beccs.se/news/stockholm-exergi-to-build-one-of-the-worlds-largest-facilities-for-removing-carbon-dioxide-from-the-atmosphere/#:~:text=and%20private%20purchases%20of%20negative,where%20it%20mineralises%20over%20time>
- Bellona (2025a). How Could CDR interact with the EU ETS. Bellona Report. <https://eu.bellona.org/publication/how-could-cdr-interact-with-the-eu-ets/>
- Bellona (2025b). CO₂-Speicherkapazität: Von der Potenzialabschätzung zur realistischen Erschließbarkeit. Policy Paper. https://network.bellona.org/content/uploads/sites/5/2025/08/Bellona-Policy-Paper_CO2-Speicherkapazitat-1.pdf
- Bergero, C., Wise, M., Lamers, P., Wang, Y. & Weber, M. (2024). Environ. Res. Lett. 19 074076. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ad52ab>
- Bundesanstalt für Landwirtschaft (BLE) (2022). Evaluationsbericht 2021: Nachhaltige Biomasseherstellung. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2021.pdf
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) (2023). Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024). Meta-Analyse zu Restemissionen und CO₂-Entnahmepotenzialen in Deutschland. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/Negativemissionen-Dokumente/240829-l-ne-l-plenum-beratungsunterlage-metaanalyse.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) & Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2020). Nationale Bioökonomiestrategie. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Dossier/Industrielle-Bioökonomie/neue_Dossierseite/nationale-bio%C3%B6konomiestrategie-pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Capsol Technologies (2025). Stockholm Exergi, the first large-scale project with Capsol's technology, awarded EUR 1.7 billion by the Swedish government. <https://www.capsoltechnologies.com/Stockholm-Exergi-awarded-funding-by-Swedish-government#:~:text=Stockholm%20Exergi%E2%80%99s%20Bio,scale%20negative%20emissions%20plants>
- CarbonBrief (2021). Guest post: Why CO₂ removal is not equal and opposite to reducing emissions. Kirsten Zickfeld. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-co2-removal-is-not-equal-and-opposite-to-reducing-emissions/>
- CDR.fyi (2025). CDR.fyi 2025 Q2 Durable CDR Market Update. CDR.fyi Portal. <https://www.cdr.fyi/blog/2025-q2-durable-cdr-market-update-biggest-quarter-ever>
- CDRterra (2025). PyMiCCS. Pflanzenkohle und Gesteinsmehl sinnvoll kombinieren. <https://cdrterra.de/consortia/pymiccs/https://cdrterra.de/consortia/pymiccs/>
- Clean Air Task Force (CATF). (o.D.) Europe Carbon Capture Activity and Project Map. <https://www.catf.us/ccsmap/europe/>
- Deutsche Energie-Agentur (DENA) (Hrsg.). (2022). Marktmonitoring Bioenergie – Teil 2: Datenerhebungen, Einschätzungen und Prognosen zu Entwicklungen, Chancen und Herausforderungen des Bioenergiemarktes. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/ANALYSE_Marktmonitoring_Bioenergie_2022_Teil_2.pdf
- Daubner, L. (2025). Klimaschutz in einer Overshoot-Welt – zur Realität jenseits des 1,5-Grad-Ziels. <https://www.klimareporter.de/gesellschaft/klimaschutz-in-einer-overshoot-welt-zur-realitaet-jenseits-des-1-5-grad-ziels>
- Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2025) „Gezielte Nutzung von Biomasse für eine klimaneutrale und wettbewerbsstarke Industrie“ <https://www.dena.de/infocenter/gezielte-nutzung-von-biomasse-fuer-eine-klimaneutrale-und-wettbewerbsstarke-industrie/>
- Eberenz, S., Dallo, I., Marti, M., Becattini, V., Holenstein, M., Wiemer, S., & Mazzotti, M. (2024). Nine recommendations for engaging with the public and stakeholders for Carbon Capture, Transportation, Utilization, and Storage. Energy Research & Social Science, 118, 103804. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103804>
- ESABCC (2025). Scaling up carbon dioxide removals : recommendations for navigating opportunities and risks in the EU. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/3499931>
- European Commission (2024). Clean Energy Technology Observatory: Carbon Capture, Utilisation and Storage in the European Union – 2024 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139285/JRC139285_01.pdf
- Europäische Kommission (2025). Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EU) 2021/1119 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität. 2025/0524 (COD). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=COM:2025:524:FIN>
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.) (2023). Holzrohstoffbilanzierung, Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung – 20 Jahre Rohstoffmonitoring Holz. https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2024/Mediathek/FNR_Brosch_Rohstoffmonitoring_Holz_2024.pdf
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.) (2025). Clusterung von Biogasanlagen Leitfaden für die Bereitstellung von Biomethan. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe. 41. Ausgabe. https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2025/Mediathek/SR41_BGA-Cluster_250512_web_bf.pdf

Fawzy, S., Osman, A., Mehta, N., Moran, D., Al-Muhtaseb, A., Rooney, D. (2022). Atmospheric carbon removal via industrial biochar systems: A techno-economic-environmental study, *Journal of Cleaner Production*, Volume 371, 2022, 133660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133660>

Fehrenbach, H., Bischoff, M., Böttcher, H., Reise, J., & Hennenberg, K. J. (2022). The missing limb: including impacts of biomass extraction on forest carbon stocks in greenhouse gas balances of wood use. *Forests*, 13(3), 365.

Fehrenbach, H., Köppen, S., Paar, A. (2024). Bilanzierung von Holz im CO₂-Rechner. Kurzpapier Biomasse im UBA CO₂-Rechner. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/Biomasse/03052024_Kurzpapier_Biomasse_Bilanzierung_von_Holz_im_CO2-Rechner.pdf

FERN (2025). The Heat is On. A study comparing the use of wood for insulation and fuel. https://www.fern.org/fileadmin/uploads/fern/Documents/2025/Fern_The_Heat_is_On_February_2025.pdf

Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ) (2023). Anstieg durch Holzheizungen. Holz ist überall teurer geworden. <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/immobilien-wohnen/anstieg-durch-holzheizungen-holz-ist-ueberall-teurer-geworden-19238652.html>

Hennenberg, K., Köppen, S., Banse, M., Böttcher, H., Brödner, R., Cyffka, K., Fehrenbach, H., Iost, S., Jordan, M., Kilian, D., Morland, C., Pfeiffer, M., Reise, J., Richter, S., Schweinle, J., Schindler, H. & Weimar, H. (2023). Hintergrundinformationen zum Status Quo der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und zukünftigen Biomassepotenzial für die Erarbeitung der NABIS. Kurzbericht. <https://denkhausbremen.de/wp-content/uploads/2025/03/Hintergrundinformationen-NABIS.pdf>

IEA (2020). IEAGHG Technical Report 2020-06 December 2020 CCS on Waste to Energy. <https://www.club-co2.fr/files/2021/01/2020-06-CCS-on-Waste-to-Energy.pdf?utm>

IN4climate.NRW (Hrsg.) (2024). Damit der Aufbau einer CO₂-Infrastruktur gelingt: Anforderungen an die Entwicklung und Finanzierung. Diskussionspapier der Initiative IN4climate.NRW. Düsseldorf. https://www.kalk.de/fileadmin/user_upload/2024_08_20_IN4CLIMATE_finanzierung_CO2_infrastruktur.pdf

Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. (ITAD). ITAD Jahresbericht 2022/2023. <https://www.itad.de/ueber-uns/itad-jahresbericht-2022-23.pdf>

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. <https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC. (2022a). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf

IPCC. (2022b) Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change (Cambridge University Press, 2023). doi:10.1017/9781009157926.009

Istrate, I.-R., Galvez-Martos, J.-L., Vázquez, D., Guillén-Gosálbez, G., & Dufour, J. (2023). Prospective analysis of the optimal capacity, economics and carbon footprint of energy recovery from municipal solid waste incineration. *Resources, Conservation and Recycling*, 193, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106943>

Kredsløb. (2025). Kredsløb Carbon Capture. <https://kredsløb.com/>

LibMod (2024). Eckpunkte für ein integriertes Carbon Management. Zentrum Liberale Moderne. <https://libmod.de/eckpunktepapier-fuer-ein-integriertes-carbon-management/>

Lucquiaud, M., Herraiz Palomino, L., Su, D., Thomson, R.C., Chalmers, H., Becidan, M., Ditaranto, M., Roussanaly, S., Anantharaman, R., Moreno Mendaza, J., Schmid, M., Akram, M., Finney, K.N., Pourkashanian, M., van Os, P., Veronezi Figueiredo, R., Moretz-Sohn Monteiro, J. (2021). Negative Emissions in the Waste-to-Energy Sector: An Overview of the Newest-CCUS Programme. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3812571>

Materazzi, M., Chari, S., Sebastiani, A., Lettieri, P., Paulillo, A. (2024). Waste-to-energy and waste-to-hydrogen with CCS: Methodological assessment of pathways to carbon-negative waste treatment from an LCA perspective, *Waste Management*, Volume 173, Pages 184-199. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.020>

Merfort, A., Stevanović, M., Streffer, J. (2023): Energiewende auf Netto-Null: Passen Angebot und Nachfrage nach CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen? Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam. https://ariadneprojekt.de/media/2023/01/Ariadne-Analyse_CO2-Entnahme_Januar2023.pdf

Merk, C. (2025). Factsheet CO₂-Entnahme: zwischen Akzeptanz und Ablehnung. Zentrum Liberale Moderne. Berlin. <https://libmod.de/factsheet-co2-entnahme-zwischen-akzeptanz-und-ablehnung/>

MVV Energie AG (2025). Wege zur Skalierung von Negativemissionstechnologien – Empfehlungen für Marktdesign, Infrastruktur und Finanzierung. Mannheim. <https://www.mvv.de/beccus-studie>

NABU (2025). Stellungnahme des NABU zur Novelle der Biomasseverordnung (BiomasseV) zur Umsetzung der RED III im Bereich Bioenergie. 28.11.2025 <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/biomasse/20251128-nabu-stellungnahme-biomasseverordnung.pdf>

Neustark (2025). Wir entfernen CO₂ aus der Atmosphäre – und speichern es dauerhaft. Home Neustark. <https://www.neustark.com/de>

Öko-Institut (2025). Revised methodologies under the EU Carbon Certification Removal Framework continue to lack integrity. Blogpost. <https://www.oeko.de/blog/revised-methodologies-under-the-eu-carbon-certification-removal-framework-continue-to-lack-integrity/>

Öko-Institut (Hrsg.). (2024). Working Paper 4/2024: Accounting of negative and neutral emission technologies (NETs): Finnish case studies on the coverage of BECCS, FoCCS, enforced concrete carbonation, biochar and e-fuels in GHG inventories and EU targets: EU ETS, ESR, LULUCF and ECL / EU NDC 2030. Öko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-NET-Accounting-2024.pdf>

- Pizarro-Alonso, A., Cimpan, C., Ljunggren Söderman, M., Ravn, H., & Münster, M. (2018). The economic value of imports of combustible waste in systems with high shares of district heating and variable renewable energy. *Waste Management*, 79, 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.031>
- Probst, B., Toetzke, M., Kontoleon, A., Díaz Anadón, L., Minx, J., Haya, B., Schneider, L., Trotter, P., West, T., Gill-Wiehl, A. & Hoffmann, V. (2024). Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects. *Nat Commun* 15, 9562. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53645-z>
- Rensberg, N., Denysenko, V., & Daniel-Gromke, J. (2023). Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland – Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan. DBFZ Report Nr. 50. Leipzig: DBFZ. <https://doi.org/10.48480/zptb-yy32>
- Richtlinie (EU) 2023/241(2023). RICHTLINIE (EU) 2023/2413 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates. 31.10.2023 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302413
- Sadr, M., Esmaili Aliabadi, D., Jordan, M., & Thrän, D. (2024). A bottom-up regional potential assessment of bioenergy with carbon capture and storage in Germany. Focus on carbon dioxide removal (CDR). *Environmental Research Letters*, 19(11), 114047. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad7edd>
- Süddeutsche Zeitung (SZ) (2022). Stadtwerke befürchten Engpässe bei der Müllverbrennung. https://www.sueddeutsche.de/muenchen/energiekrise-muellverbrennung-fernwaerme-muenchen-1.5648669?utm_source=chatgpt.com
- Tanzer, S. E., & Ramírez, A. (2019). When are negative emissions negative emissions?. *Energy & Environmental Science*, 12(4), 1210-1218.
- 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. UFZ Report 2/2024. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig. 22 Seiten. <https://doi.org/10.57699/edk7-mc18>
- Thünen Institut (2025). Treibhausgasemissionen durch Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/treibhausgas-emissionen-lulucf>
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2025). Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland (Projektionsbericht 2025). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionsbericht_2025.pdf
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2024). Treibhausgas-Projektionen 2024. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-projektionen-2024-ergebnisse-kompakt>
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2023). Treibhausgas-Projektionen 2023. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11740/publikationen/2023_08_21_climate_change_39_2023_projektionsbericht_2023_0.pdf
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2022). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-12-09_climate-change_50-2022_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2021_bf.pdf
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019). BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-24_texte_115-2019_biorest.pdf
- VCM Primer (2023). The Voluntary Carbon Market Explained. <https://vcmprimer.org/wp-content/uploads/2023/12/vcm-explained-full-report.pdf>
- 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). Steckbriefe für biobasierte Kohlenstoffdioxid-entnahme-Optionen in Deutschland. https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00063572/Alle_Steckbriefe.pdf



Zentrum
Liberale
Moderne



Die unter Bio-CCS zusammengefassten Anwendungen haben das Potenzial, eine bedeutende Ergänzung im deutschen Klimaschutzportfolio zu werden. Damit das vorhandene Potenzial gehoben werden kann, braucht es eine klare Vision, einen verlässlichen gesetzlichen Rahmen, der Nachhaltigkeit, Marktwirtschaft und gesellschaftliche Teilhabe zusammen denkt.

Gefördert durch

STIFTUNG
MERCATOR

Veröffentlicht im
Januar 2026 vom

Zentrum Liberale Moderne
Reinhardtstraße 15
10117 Berlin

+49 (0)30 - 13 89 36 33
info@libmod.de

www.libmod.de