

Negative Emissionen durch Nutzung von Biomasse

NABU-Standpunkt zu BECCS/BioCCS und Pyrolyse (PyCCS)



Zum Ausgleich von unvermeidbaren Restemissionen und der Verringerung der CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre werden künftig auch „negative Emissionen“ benötigt. Das heißt, der Atmosphäre wird dauerhaft CO₂ entzogen. Dies kann über natürliche Wege (z.B. durch Aufbau von Wäldern, Seegraswiesen, Moorvernässung) oder über technische Lösungen erfolgen. Eine technische Lösung ist die direkte Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre und anschließende Einlagerung des CO₂ in geologische Speicher (DACCS – Direct Air Carbon-dioxide Capture and Storage). Solche Verfahren sind jedoch sehr energieintensiv, ressourcenverbrauchend und teuer. Eine naheliegende Lösung ist daher, den Schritt der CO₂-Entnahme den Pflanzen zu überlassen: Diese nehmen CO₂ aus der Luft auf und speichern den Kohlenstoff mit Hilfe der Sonnenenergie (Photosynthese). Nach dem Verbrennen oder Vergären von Biomasse kann das entstandene CO₂ aufgefangen und gespeichert werden (BECCS/BioCCS – Bioenergy/Biomass with CCS). Der Haken an diesem Ansatz: Naturverträgliche Mengen an Biomasse sind knapp. Werden Waldholz oder Biomasse aus intensiver Landwirtschaft für BECCS verwendet, können die Kohlenstoffspeicherfunktionen der natürlichen Ökosysteme verringert werden. So droht ein Nullsummenspiel für das Klima - auf Kosten der Biodiversität. Im Folgenden werden die Risiken, aber auch sinnvollen Einsatzmöglichkeiten von BECCS (sowie Pyrolyse/PyCCS als Sonderform) beleuchtet und die Anforderungen des NABU an diese Technologien formuliert.

Die Notwendigkeit von negativen Emissionen

Das Wichtigste vorab: Für den NABU hat die **Vermeidung der Entstehung von Treibhausgasemissionen überall und jederzeit grundsätzlich Vorrang**. Doch laut IPCC-Berichten ist die Entnahme von CO₂ aus der Luft (CDR - Carbon Dioxide Removal) essenziell, um das Weltklima zu stabilisieren und unvermeidbare Restemissionen aus industriellen Prozessen (bspw. Zementherstellung) oder der Landwirtschaft (Methan, Lachgas bspw. bei Reisanbau oder der Tierhaltung) auszugleichen.¹ Aus Sicht des NABU sollte dafür vor allem auf die **Speicherung von CO₂ in sogenannten natürlichen Senken** wie Böden, Wäldern und Meeren fokussiert werden, welche von naturverträglich gestalteten technischen Senken nur ergänzt werden sollten.

Bei natürlichen Senken sind zusätzlich **positive Effekte für die Wiederherstellung intakter Ökosysteme** zu erwarten, die zur Eindämmung der Biodiversitätskrise beitragen können. Diese Optionen werden aber nicht ausreichen, auch weil negative Einflüsse der Klimakrise auftreten können, wie Waldverlust durch Dürre und Waldbrände oder das Austrocknen von Moorflächen. In Deutschland sowie auch Europa liegt das Erreichen

Kontakt

NABU-Bundesgeschäftsstelle

Katharina Fey
Referent*in für Carbon Management
Tel. +49 (0) 30 2849841607
Katharina.Fey@NABU.de

Michaela Kruse
Referentin für Bioenergie
Tel. +49 (0)162.2953083
Michaela.Kruse@NABU.de

Die Speicherung von CO₂ in natürlichen Senken kann positive Nebeneffekte für die Biodiversität haben.

der Klimaziele für den Landnutzungssektor (LULUCF - land-use, land-use-change and forestry) derzeit in weiter Ferne.ⁱⁱ

Neben **konsequenten politischen Bemühungen zur Stärkung der natürlichen Senken**, muss daher ernsthaft geprüft werden, wie das überschüssige CO₂ langfristig auch technisch aus der Atmosphäre entfernt werden kann. Vor allem BECCS (Bioenergie mit CCS) und DACCS (Abscheidung aus der Luft und CCS) werden für die benötigten großen Mengen an Negativemissionen eingeplant.

Bei DACCS wird das CO₂ direkt aus der Luft abgetrennt und konzentriert, doch diese Technologie ist sehr teuer und würde einen enormen zusätzlichen Energiebedarf in Deutschland verursachen, der vermutlich kaum durch den naturverträglichen Ausbau erneuerbarer Energie zu decken wäre. CO₂-Abscheideanlagen dagegen sind schon heute an Bioenergieanlagen nachrüstbar und einsatzbereit, sobald Lösungen für die Speicherung und den Transport von CO₂ vorhanden sind. Deshalb wird diese Technologie oftmals als großer Hoffnungsträger für die Erreichung von negativen Emissionen gehandelt. **Doch diese Hoffnung birgt auch Risiken¹** und es drohen Zielkonflikte, welchen durch Priorisierung und frühzeitige Regulierung vorgebeugt werden muss.

Naturverträgliche Einsatzmöglichkeiten mit begrenztem Potenzial

Akzeptabel für den NABU wäre BECCS an Bioenergieanlagen, die **systemdienlich – also flexibel und nicht im Grundlastbetrieb – Energie erzeugen und dabei ausschließlich Rest- und Abfallstoffe verwenden**. Diese Biomassensortimente sind jedoch nur in geringen Mengen vorhanden und nicht *per se* unproblematisch: Auch bei Gülle, Mist, Stroh sowie Altholz sind zahlreiche Einschränkungen zu beachtenⁱⁱⁱ und es drohen Verschiebungseffekte, wenn nicht für alle Biomasseanlagen – ob mit oder ohne BECCS – dieselben strengen Anforderungen für nachhaltige Biomasse gelten.

Sinnvoll wäre BECCS an Anlagen, die echte Rest- und Abfallstoffe verwerten und Energie flexibel erzeugen.

Sinnvolle Möglichkeiten für BECCS in der Abfallwirtschaft sieht der NABU, wenn **Klärschlamm zur Entsorgung verbrannt oder Bioabfälle in Biogasanlagen vergoren** werden. Ein Beispiel ist hier eine Bioabfallvergärungsanlage in Dresden, bei der das CO₂ abgeschieden und in Baustoffen langfristig gespeichert wird.^{iv} Solche innovativen Projekte sollten weiter erprobt, wissenschaftlich begleitet und auf Skalierbarkeit geprüft werden.

Drohende Konflikte durch BECCS

1. Konflikte mit dem Schutz von Klima und Ökosystemen

Allen voran besteht das Risiko, dass die (finanziellen) Anreize für negative Emissionen dazu führen, dass **nicht nachhaltige Mengen an Biomasse genutzt werden** und dies zur weiteren Degradierung, Übernutzung und Zerstörung von Ökosystemen führen wird.^v Damit würde nicht nur deren wichtige Funktion als Lebensraum beeinträchtigt, sondern auch deren Funktion als natürliche CO₂-Senke. Wird beispielsweise Waldholz für BECCS verbrannt, wird die Senkenfunktion der Wälder gleichzeitig reduziert und damit das Ziel bilanziell negativer Emissionen konterkariert. Ein signifikanter Teil der negativen Emissionen findet dann lediglich auf dem Papier statt, da die Verbrennung von Holz in der Energieerzeugung fälschlicherweise als klimaneutral definiert ist.^{vi} Im Endeffekt wird

BECCS mit Waldholz und Anbaubiomasse gefährdet die Ökosysteme – und damit auch ihre CO₂-Speicherfunktionen.

¹ An dieser Stelle wird nur auf die Risiken durch die Nutzung von Biomasse eingegangen – zu den Risiken durch die Abscheidungstechnologie sowie die unterirdische Lagerung von CO₂ verweisen wir auf andere NABU-Publikationen zum Thema wie das Positionspapier Carbon Management.

das im Wald gespeicherte CO₂ durch die Holzverbrennung mit CO₂-Abscheidung (BECCS) lediglich in das geologische CO₂-Endlager verschoben. Das ist bestenfalls ein Nullsummenspiel für das Klima, aber keine CO₂-Entnahme.^{vii}

Eine weitere Gefahr ist, dass die **negativen Emissionen als Zertifikate an Unternehmen verkauft werden, welche auf diesem Weg eigentlich vermeidbare Emissionen** (zum Beispiel durch Umstieg auf erneuerbare Energien oder Ausgangsstoffe) **kompensieren wollen**. Damit ist für das Klima im Zweifel nicht nur nichts gewonnen, sondern sogar ein Schaden aufgetreten.

Die **Sorge, dass vor allem Waldholz für BECCS verwendet werden könnte**, ist nicht unbegründet. Aktuell sprechen hauptsächlich die Betreiber von großen Hackschnitzelheizkraftwerken (Stockholm Exergi in Schweden^{viii}, HOFOR und Ørsted in Dänemark^{ix}) sowie von auf Holzpellets umgerüsteten Kohlekraftwerken (Drax in UK^x und RWE in den Niederlanden^{xi}) davon, BECCS anzuwenden. Auch am geplanten Altholz-Großkraftwerk in Stade soll CO₂ abgeschieden werden.^{xii} Keine Überraschung, denn in Großanlagen lohnt sich die Investition eher, es winken Fördermittel und ein grünes Image.

Diese Kraftwerke haben allerdings eine verheerende Klima- und Umweltbilanz. Die verbrannten Holzpellets bei den genannten Beispielen stammen zu großen Teilen aus den USA oder Kanada, wo für die Pelletproduktion der weltgrößten Hersteller Enviva und Drax **artenreiche Wälder kahlgeschlagen** werden.^{xiii} Die Wälder in Skandinavien und dem Baltikum sind ebenfalls schon jetzt durch den massiven Holzeinschlag unter Druck und ihre Kohlenstoffspeicherfunktion bereits stark herabgesetzt.^{xiv}



Pelletproduktion von Drax in Kanada für das gleichnamige umgerüstete Kohlekraftwerk in Großbritannien. Drax bezieht regelmäßig Holz aus Kahlschlägen in wertvollen Natur- und Urwäldern. Das Kraftwerk soll mit CCS-Technologie ausgestattet werden - das Unternehmen erhofft sich weitere Subventionen.

Neben (Heiz-)Kraftwerken für die öffentliche Strom- und Wärmeversorgung könnten auch Betreiber von Industrieanlagen auf Holzverbrennung im großen Stil setzen. Durch **Umstellung der Prozesswärmeproduktion von fossilen Energieträgern auf Biomasse mit BECCS** könnte unter Umständen durch die auf dem Papier negativen Emissionen sogar Geld verdient werden. Dabei wird die Industrie meistens auf feste Biomasse, also Holz, zurückgreifen.^{xv}

Eine Studie im Auftrag des NABU kommt zu dem Ergebnis, dass die Industrie in Deutschland für Prozesswärme bis 2045 **mehr als dreimal so viel Holz pro Jahr wie heute** verbrennen könnte.^{xvi} BECCS könnte dieser sehr kritischen Entwicklung noch weitere Dynamik geben und finanzielle Anreize hinzufügen. Zudem könnte der Druck nachlassen, zur Emissionsminderung alternative Produktionsweisen und Produkte zu entwickeln.

BECCS könnte im Industriesektor weitere Anreize für die Umstellung auf Biomasse setzen und den Innovationsdruck für klimafreundliche Alternativen senken.

Zusätzlich gibt es Bestrebungen, Holz unter Luftabschluss in der Erde zu vergraben oder im Meer zu versenken, um den Kohlenstoff aus der Atmosphäre fernzuhalten.^{xvii}

Auch die **Ausweitung von Flächen für den Anbau von Energiepflanzen** zur anschließenden Verwendung mit BECCS birgt Gefahren für Klima und Ökosysteme. Der damit verbundene Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, Dünger und Energie führt dazu, dass die gewonnene Biomasse nicht klimaneutral ist, und zudem können Ökosysteme durch die Nähr- und Schadstoffeinträge sogar zusätzlich belastet oder gar zerstört werden. Dazu kommen die direkten und indirekten Landnutzungsänderungen (sogenannter I-LUC-Effekt). Wenn durch den Flächenbedarf für Anbaubiomasse Wälder zurückgedrängt, Böden ausgezehrt oder Moore trockengelegt werden, droht **die Senkenfunktion der natürlichen Ökosysteme durch BECCS reduziert** zu werden. Bis zu 80 Prozent der weltweiten Anbaufläche müsste für die Produktion von Energiepflanzen genutzt werden, um die in manchen IPCC-Szenarien eingeplanten BECCS-Mengen zu erreichen.^{xviii}

Die Politik berücksichtigt die oben aufgeführten Gefahren bisher nur unzureichend. Die von der Europäischen Kommission in ihrem „Unionsrahmen für die Zertifizierung von CO₂-Entnahmen“ (CRCF - Carbon Removal Certification Framework) vorgeschlagenen **Nachhaltigkeitskriterien für die bei BECCS genutzte Biomasse lehnen sich an die der EU-Erneuerbaren-Energien-Richtlinie an und sind damit völlig ungenügend.**^{xix} Ebenso wird die unvollständige Treibhausgasbilanzierung übernommen, so dass Biomasse pauschal als klimaneutral bewertet wird.

2. Nutzungskonflikte bei der begrenzt naturverträglich verfügbaren Biomasse

Künftig wird ein hoher Bedarf an biogenem Kohlenstoff für die stoffliche Nutzung erwachsen, wenn in der Grundstoffchemie fossiler Kohlenstoff ersetzt werden muss (Bioökonomie). Hier ist also ein Zielkonflikt vorhanden, denn **der Kohlenstoff aus der Biomasse kann nur endgelagert oder stofflich genutzt werden.** Als Mischform tritt BECCU auf (Bioenergy with carbon dioxide capture and usage), in deren Fall der abgeschiedene Kohlenstoff in Produkten genutzt wird.

Eine Bewertung dieser Nutzungsform hängt davon ab, wie lange der Kohlenstoff in diesen Produkten gespeichert bleibt. Wird er für die Methanisierung von Wasserstoff genutzt und dann als Treibstoff verwendet, was an sich schon eine äußerst schlechte Energiebilanz hat, findet sich das CO₂ bereits nach kurzer Zeit wieder in der Atmosphäre. Wenn er aber zum Beispiel in Baustoffen eingelagert wird, kann eine jahrzehntelange Speicherung erfolgen und **die CO₂-Belastung der Atmosphäre langfristig verzögert werden.** Derzeit besteht hier allerdings eine Fehlsteuerung, weil die Hersteller für die Verwendung von abgeschiedenem biogenem CO₂ in der Regel keine CO₂-Zertifikate kaufen müssen, da es auf dem Papier als klimaneutral gilt – anders als bei CO₂ aus beispielsweise der Verbrennung von unvermeidbaren Abfällen.^{xx} Die Biomassenachfrage wird also im schlechtesten Fall erhöht, während anderswo fossiles CO₂ ungenutzt in der Atmosphäre landet.

3. Konflikte mit der Kreislaufwirtschaft von Rohstoffen

Da heutzutage ein pauschaler Anteil von 50 Prozent des Restmülls als biogenen Ursprungs angenommen wird, würde auch CCU bei Müllverbrennungsanlagen (MVA) zur Hälfte als Biomasse mit CCS bzw. CCU gelten. Jedoch könnten **durch konsequentes Recycling und Abfallvermeidung viele CO₂-Emissionen eingespart** werden. Durch CCS/U an Müllverbrennungsanlagen drohen Fehlanreize, die einer besseren Kreislaufwirtschaft von wertvollen Rohstoffen entgegenwirken könnten. So sollte die Getrenntsammlung von Abfällen verbessert und biogene Abfälle nicht verbrannt, sondern allenfalls für die Biogasherstellung vergoren werden.

(BE)CCS droht zu einem Fehlanreiz für weitere Müllmengen zu werden.

Wenn die oben aufgeführten Ansprüche an die Naturverträglichkeit der Biomasse beachtet werden, ergeben sich für BECCS absehbar signifikant geringere Potenziale als in europäischen und deutschen Szenarien eingepreist. Es müssen sich daher aus Sicht des NABU finanzielle Anreize und Anstrengungen vor allem auf die Vermeidung von Emissionen und die Stärkung der natürlichen Senken konzentrieren. Innovative technische Ansätze sollten aber weiter erforscht und auf Skalierbarkeit geprüft werden.

Der NABU appelliert an die politischen Entscheidungsträger*innen, jegliche Formen von BECCS, die eine erhöhte Nachfrage nach Anbaubiomasse oder Waldholz zu Folge haben könnten, frühzeitig zu unterbinden. Lediglich schärfere Nachhaltigkeitskriterien reichen nicht aus, um eine Fehlsteuerung zu vermeiden. Dementsprechend sollte BECCS grundsätzlich nur in eng begrenztem Rahmen als Option für negative Emissionen zertifiziert werden.

Pyrolyse (PyCCS) als Sonderform von BECCS

Die Herstellung von Pflanzenkohle beziehungsweise flüssigen oder festen chemischen Produkten erfolgt durch unvollständige Verbrennung (aufgrund von Sauerstoffmangel) von Biomasse, der sogenannten Pyrolyse. Die Jahrtausende alte Herstellung von Holzkohle ist eine Form der Pyrolyse. Ebenso war Pflanzenkohle ein Bestandteil der „Terra Preta“, mit der die indigenen Bewohner*innen die Bodenfruchtbarkeit im Amazonasgebiet erhöhten. Es entstehen je nach Temperatur und Länge des Pyrolyseprozesses unterschiedliche Produkte: Bei der schnellen Pyrolyse (500 °C, wenige Sekunden) entstehen vorwiegend flüssige Stoffe, bei der „klassischen“ langsamen Pyrolyse (250-400 °C über Stunden bis Tage) mehr feste (Pflanzenkohle/Biokohle), aber auch flüssige (Pyrolyseöl) und/oder gasförmige (Pyrolysegas) Stoffe. Das Pyrolyseöl, aber auch die Pflanzenkohle, können krebserregende Stoffe enthalten.

Wird die Kohle in den Boden eingebracht oder stofflich genutzt, kann der enthaltene Kohlenstoff im Idealfall über längere Zeiträume gespeichert werden. Das Verfahren zur Herstellung von Pflanzenkohle ist größtenteils technisch ausgereift, die Einsatzstoffe sind rechtlich geregelt und es kann somit bereits angewendet werden. Wenn Pyrolyse genutzt wird, um das im Prozess sowie das durch die Verbrennung des Pyrolysegases entstehende CO₂ zusätzlich geologisch durch CCS zu speichern, wird dies auch als PyCCS bezeichnet.

Ein Vorteil von Pyrolyse ist, dass der Prozess unter gewissen Umständen Energie freisetzt, die genutzt werden kann – im Gegensatz dazu ist die technische Abscheidung von CO₂ aus dem Rauchgas nach der Verbrennung (BECCS) sehr energieintensiv und braucht aktuell etwa ein Drittel der durch die Verbrennung der Biomasse erzeugten Energie.^{xxi} Allerdings wird im Vergleich zur Verbrennung der Biomasse im Pyrolyseprozess auch nur ein Teil der in der Biomasse enthaltenen Energie genutzt, da der Kohlenstoff zum Teil in der Pflanzenkohle enthalten bleibt. Soll zudem das CO₂ aus der Verbrennung des Pyrolysegases technisch abgeschieden oder das Pyrolysegas aufgereinigt werden, muss wiederum Energie investiert werden.

Auch im Pyrolyseprozess gelangen große Mengen (50-75 Prozent) des Kohlenstoffs aus der Biomasse in die Atmosphäre. Wenn dieses nicht ebenfalls abgeschieden wird, ist dem Klima vor allem bei der Nutzung von Waldholz also überhaupt nicht geholfen, sondern es wird sogar zusätzliches CO₂ frei.

Pyrolyse von Waldholz setzt unter dem Strich sogar zusätzliches CO₂ frei.

Für diese nur auf dem Papier „negativen Emissionen“ können dann sogar noch Zertifikate auf Kompensationsmärkten an Unternehmen verkauft werden, die stattdessen weniger Aufwand in echte Emissionsminderung investieren müssen. Ein Beispiel dafür ist das Unternehmen Novocarbo, welches in Deutschland erste CDR-Projekte mit Pyrolyse durchführt und die Zertifikate gewinnbringend verkauft. Novocarbo will außerdem in Bochum für „grüne“ Fernwärme durch eine Pyrolyseanlage sorgen.^{xxii}

Solche Ansätze sieht der NABU sehr kritisch, da Wärme aus Biomasse maximal für die Spitzenlastabdeckung genutzt werden sollte, wenn die Wärme aus Solarthermie, Geothermie und Großwärmepumpen kurzzeitig nicht ausreicht. So wird der Biomasseverbrauch auf ein naturverträgliches Maß reduziert. Bei Novocarbo in Bochum handelt es sich also eher um nicht bedarfsgerecht erzeugte industrielle Abwärme als um „grüne“ Fernwärme.

Ein anderes Risiko – neben der hohen Nachfrage nach Biomasse – besteht in der entstehenden Pflanzenkohle. Diese kann in den Boden eingearbeitet werden und soll dort die Bodenfruchtbarkeit und Wasserhaltefähigkeit erhöhen. Und sie wird angeblich nur sehr langsam abgebaut, so dass der Kohlenstoff langfristig gespeichert wird. **Doch alle diese wünschenswerten Eigenschaften sind mit großen Fragezeichen versehen.**^{xxiii} So können je nach Herstellungsverfahren, aber auch bei der Verwendung belasteter Ausgangsstoffe, Giftstoffe entstehen, die dann auf den Acker aufgebracht werden. Die Bodenverbesserung hängt stark von den Gegebenheiten und der Vorbehandlung der Kohle ab.

Studien kommen daher zu inkonsistenten Ergebnissen. Auch die langfristige Stabilität im Boden ist von verschiedenen Faktoren abhängig wie dem Zerkleinerungsgrad. Entsprechende **Studien mit Langzeitbeobachtungen fehlen noch**. Wie heute häufig bei der Gülle um große Tierhaltungsanlagen bereits zu beobachten, könnte es im Umkreis um Pyrolyseanlagen dazu kommen, dass zu große Mengen Pflanzenkohle in die Böden gebracht werden, weil man sie „loswerden“ muss. Dadurch droht unter anderem die Belastung von Gewässern.

Auch könnte die Pflanzenkohle Missstände in der industriellen Landwirtschaft, wo das Bodenökosystem durch Pestizide und ungenügenden Humusaufbau häufig in keinem guten Zustand ist, eher kaschieren als beheben. Hier **könnten andere Emissionsminderungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft unter den Tisch fallen**, obwohl diese weniger Risiken haben und oft dazu einen Mehrwert auch für die Artenvielfalt und Ökosystemfunktionen bieten (Ökolandbau, Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Moore, Verringerung der Massentierhaltung, reduzierte mineralische Stickstoffdüngung, reduzierte Bodenbearbeitung, etc.).

Für den NABU ergeben sich folgende Schlussfolgerungen bezüglich Pyrolyse: Auch hier gilt, dass die verwendeten Biomasse-Substrate naturverträglich sein müssen, also Waldholz und Anbaubiomasse ausgeschlossen werden müssen, und auch bei den Rest- und Abfallstoffen sind Einschränkungen und Mengennachhaltigkeit zu beachten.

Es muss garantiert werden, dass auszubringende Pflanzenkohle keine gefährlichen Bestandteile enthält. Langzeitstudien zur Wirkung auf die Ökosysteme sowie auf die Klimabilanz müssen durchgeführt werden, bevor die Technologie in die breite Anwendung gehen und klimabilanziell angerechnet werden kann. Andere Klimaschutzbemühungen in der Landwirtschaft, die ohne Risiko auch die Ökosysteme stärken, sollten bevorzugt gefördert werden.

In der Landwirtschaft gibt es bereits viele Möglichkeiten, den Kohlenstoffspeicher zu erhöhen und gleichzeitig Ökosysteme zu verbessern.



Quellen

ⁱ IPCC, 2023 „AR6 Synthesis Report - Climate Change 2023“:

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr>

ⁱⁱ Expertenrat für Klimafragen, 2024 „Gutachten zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024“: https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2024/06/ERK2024_Sondergutachten-Pruefung-Projektionsdaten-2024.pdf

ⁱⁱⁱ NABU, 2024 „NABU-Standpunkt Biogas aus Stroh, Gülle und Mist“: <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/biomasse/240415-nabu-standpunkt-biogas-stroh-guelle-mist.pdf>

NABU, 2023 „NABU-Hintergrund Biomasse“: <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/biomasse/230929-hintergrund-biomasse-nabu.pdf>

NABU, ROBIN WOOD, DUH und Biofuelwatch, 2022 „Energieerzeugung aus Altholz“: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/biooekonomie/220706_infopapier_altholz_pdf.pdf

^{iv} MVV, 2023 „MVV realisiert erste #klimapositive Bioabfallvergärungsanlage“: <https://www.mvv.de/journalisten/pressemitteilungen/detail/mvv-realisiert-erste-klimapositive-bioabfallvergaerungsanlage>

^v Deprez et al. 2024 „Sustainability limits needed for CO2 removal“: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adj6171>

^{vi} Hennenberg et al., 2024 „Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK)“: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_33-2024_biosink.pdf

^{vii} NRDC, 2021 „A Bad Biomass Bet“: <https://www.nrdc.org/sites/default/files/bad-biomass-bet-beccs-ib.pdf>

^{viii} Stockholm Exergi in Schweden: <https://beccs.se/>

^{ix} Ørsted in Dänemark: <https://www.iwr.de/ticker/kohlenstoffabscheidung-ørsted-und-microsoft-schliessen-weiteren-grossvertrag-ueber-ccs-zertifikate-aus-co2-hub-ab-artikel6624>

^x Drax in UK: <https://www.gov.uk/government/news/drax-bioenergy-with-carbon-capture-and-storage-project-development-consent-decision-announced>

^{xi} RWE in den Niederlanden: <https://www.rwe.com/en/press/rwe-generation/2023-06-20-beccus-project-to-play-crucial-role-in-climate-neutral-dutch-energy-system/> sowie <https://benelux.rwe.com/en/press/2022-12-12-rwe-launches-project-beccus-for-large-scale-capture-and-storage-of-co/>

^{xii} Hansekraft in Stade-Bützfleth: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/biomasse/241112-infopapier-stade_b_tzfleth.pdf

-
- ^{xiii} BBC, 2024 „Drax: UK power station still burning rare forest wood“: <https://www.bbc.com/news/science-environment-68381160>
- ^{xiv} Statistics Finland, 2022 „Greenhouse gas emissions in 2021 remained on level with the previous year, the land use sector a net source of emissions for the first time“: <https://stat.fi/en/publication/cktlcpwag38sg0c5561iqop0y>
- ^{xv} Agora Energiewende, 2021 „Klimaneutrales Deutschland 2045“: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf
- ^{xvi} Fehrenbach & Bürck, 2022 „Holz statt Kohle, Gas und Öl? Wie gelingt die Defossilisierung des Industriesektors ohne Gefahr für Wälder und Klima?“: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/biomasse/2211123_studie_holzbioenergieindustrie.pdf
- ^{xvii} MIT Technology Review, 2022 “A stealth effort to bury wood for carbon removal has just raised millions“: <https://www.technologyreview.com/2022/12/15/1065016/a-stealth-effort-to-bury-wood-for-carbon-removal-has-just-raised-millions/>
- ^{xviii} Fajardy et al., 2019 „BECCS deployment: a reality check“: <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/grantham-institute/public-publications/briefing-papers/BECCS-deployment---a-reality-check.pdf>
- ^{xix} Duncan Brack/FERN, 2024 „An analysis of BECCS industries’ methodology for certifying industrial carbon removals“: https://www.fern.org/fileadmin/uploads/fern/Documents/2024/Fern_An-analysis-of-BECCS-industries%E2%80%99-methodology-for-certifying-industrial-carbon-removals.pdf
- ^{xx} IKEM, 2024 „Rechtliche Fragestellungen bei der Herstellung grünen Methanols“: https://usercontent.one/wp/www.ikem.de/wp-content/uploads/2024/05/20230405_Studie-Herstellung-Methanol.pdf?media=1715784751
- ^{xxi} Boundary Dam, ein Kohlekraftwerk in Kanada, braucht 30% der erzeugten Energie für die CO₂-Abscheidung: https://ieefa.org/wp-content/uploads/2018/11/Holy-Grail-of-Carbon-Capture-Continues-to-Elude-Coal-Industry_November-2018.pdf
- ^{xxii} Novocarbo, 2024 „Grüne Fernwärme durch Pflanzenkohle: Novocarbo kooperiert mit Stadtwerken Bochum“: <https://www.novocarbo.com/de/news/gruene-fernwaerme-durch-pflanzenkohle-fuer-stadtwerke-bochum/>
- ^{xxiii} Biofuelwatch, 2024 „Biochar: a critical perspective“: <https://www.biofuelwatch.org.uk/wp-content/uploads/Biochar-briefing-2024.pdf>