

Unvermeidbare Emissionen aus der Abfallbehandlung – Optionen auf dem Weg zur Klimaneutralität

Karin Arnold, Alexander Scholz, Ansgar Taubitz und Henning Wilts

Auch die thermische Abfallbehandlung in Deutschland kann zu einem Baustein des klimaneutralen Wirtschaftens werden. Allerdings sind dafür noch verschiedene Voraussetzungen zu schaffen. Technisch sind neben den bereits bekannten weitere innovative Verfahren in der Entwicklung; nicht zu vernachlässigen ist zudem die anspruchsvolle Aufgabe des CO₂-Handlings. Hier ist zum einen der Aufbau der benötigten Infrastruktur zu nennen. In Bezug auf die Nutzung des abgetrennten CO₂ ist auch die Industrie gefragt, um sektorübergreifende, klimafreundliche Use-Cases und Geschäftsmodelle rund um CCU und die weitmöglichste Schließung von Kohlenstoffkreisläufen zu entwickeln. Entsprechende Regularien und Marktanreize sind politisch zu setzen.

Mammutaufgabe Klimaneutralität

Mit der Änderung des Klimaschutzgesetzes 2021 hat sich die Bundesrepublik das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu werden, also alle noch entstehenden Treibhausgas-Emissionen zu kompensieren und so die „Netto Null“ zu erreichen [1]. Ab 2050 soll dann sogar eine Überkompensation, also bilanziell negative Emissionen erzielt werden, eine Strategie, die auch in EU-Szenarien eine zunehmend wichtige Rolle spielt [2]. Dieses ambitionierte Ziel kann nur erreicht werden, wenn über alle Sektoren konsequent an der Dekarbonisierung und parallel an Lösungen zur Entnahme und Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre gearbeitet wird.

Für die Energieerzeugung und -umwandlung bedeutet das vor allem eine Abkehr von fossilen Energieträgern (flankiert durch entsprechende Effizienzsteigerungen); für die Industrie und insbesondere die Umwandlung von Grundstoffen ist eine Umstellung von fossilen Feedstocks erforderlich. Zudem müssen prozessbedingte Emissionen durch die Umstellung auf andere Herstellungsprozesse adressiert werden.

Es gibt aber noch einen Bereich, der derzeit in Deutschland immerhin 10 Mio. t CO₂ produziert und in der klimapolitischen Debatte bislang noch wenig repräsentiert ist: die Abfallwirtschaft mit der Entsorgung von Müll [3]. In thermischen Abfallbehandlungsanlagen (TAB) werden in Deutschland jährlich rund 20 Mio. t Abfall verbrannt, davon rund 12 Mio. t Restabfälle aus Haushalten und 4 Mio. t Gewerbeabfälle. Als Nebenprodukt



Bei der Abfallverbrennung (im Bild eine Anlage links hinten) ist der Kohlenstoffkreislauf zwar zur Hälfte „geschlossen“, dennoch verbleibt im Kontext der Klimaneutralität mit der anderen Hälfte weiterhin hoher Handlungsbedarf

Bild: MVV Energie AG

werden in der TAB Strom und auch Wärme erzeugt, welche in das Strom- bzw. oftmals auch in ein Wärmenetz fließen.

Durch den Verbrennungsprozess werden im Mittel etwa 1,1 Tonnen CO₂ je Tonne durchschnittlichem Restmüll emittiert. Die Hälfte davon gilt typischerweise als biogenen Ursprungs, so dass nur 0,5 t CO₂/t Abfall bilanziell erfasst werden. Der Kohlenstoffkreislauf ist damit zwar zur Hälfte „geschlossen“, trotzdem verbleibt im Kontext der Klimaneutralität mit der anderen Hälfte weiterhin hoher Handlungsbedarf.

Unvermeidbare Emissionen

Obwohl Strom und Wärme aus dem Prozess ausgekoppelt und zur Verfügung gestellt wer-

den, ist die Kernaufgabe der TAB nicht die Bereitstellung von Energie, sondern die Entsorgung des Abfalls. In dieser Folge werden die entstehenden CO₂-Emissionen derzeit als „unvermeidbar“ eingestuft, was nach einer Definition von [4] zutrifft, wenn

- sie prozessbedingt anfallen, also ihre Entstehung trotz Optimierung des Produktionsverfahrens oder des Produktes nicht vermieden werden kann oder
- keine alternativen Prozesse und keine alternativen Produkte oder Ressourcen für denselben Anwendungsfall verfügbar (bzw. deren Potenziale begrenzt) sind.

Diese Definition ist für industrielle Prozesse aufgestellt worden und nicht 1:1 auf die Entsorgung von Abfall übertragbar. Es ist aller-

dings unstrittig, dass die Emissionen einer TAB nicht dadurch gemindert werden können, dass ein alternativer Prozess oder ein anderer Feedstock für die Verbrennung gewählt wird, da dies der Kernaufgabe der TAB widerspricht. Für den Umgang mit diesen unvermeidbaren Emissionen werden derzeit verschiedene Ansätze diskutiert (siehe auch Abb.):

- **CCS:** Carbon Capture and Storage bezeichnet die Abscheidung von CO₂ aus [industriellen] Punktquellen und dessen dauerhafte Einspeicherung in geologischen Lagerstätten. Anwendungsbeispiele sind etwa TAB, Zementwerke, chemische Prozesse etc.
- **CCU:** Carbon Capture and Usage unterscheidet sich nicht in der Abscheidung von CCS, sondern nur im nachgelagerten Umgang mit dem abgetrennten CO₂. Dieses wird nicht durch geologische Einlagerung, sondern durch Nutzbarmachung als Rohstoff in Produkten wie z.B. chemischen Grundstoffen gespeichert.
- **CCUS** wird als Begriff verwendet, wenn bei Abscheidung noch nicht abschließend geklärt ist, ob das CO₂ eingelagert oder als Rohstoff genutzt werden soll. Beides ist für die TAB potentiell relevant.
- **BECCS/BECCUS:** Bioenergy with CCS/CCUS zielt darauf ab, biogenes CO₂ abzuscheiden und einzulagern, um damit der Atmosphäre Kohlendioxid zu entziehen und negative Emissionen zu erreichen. Dieses Konzept ist potentiell sehr relevant für die TAB, da typischerweise etwa die Hälfte des verwerteten Abfalls biogenen Ursprungs ist.

Gesellschaftliche Dimension – Aufgabe Abfallvermeidung

Die Menge an Abfall, die entsorgt werden muss und damit für die Entstehung von Emissionen sorgt, ist ein Abbild des gesellschaftlichen Umgangs mit Konsum und Konsumgütern. Technisch besteht die derzeit einzige Lösung in der Abscheidung und Speicherung von CO₂ (oder Weiter-Verwertung, siehe unten) – bei dieser Betrachtung darf aber der Hebel der Abfallvermeidung nicht außer Acht gelassen werden.

Mit der Reduktion der Abfallmenge wird auch die Aufgabe der Abfallentsorgung reduziert und so auf die dabei entstehenden „unvermeidbaren“ Emissionen eingewirkt. Bevor im Folgenden auf die Implikation einer CO₂-Abscheidung eingegangen und vor allem der Frage nachgegangen wird, was für den Auf- bzw. Ausbau einer solchen Technologie notwendig ist, wird daher noch ein Schlaglicht auf die Aufgabe des Recyclings und der Abfallvermeidung geworfen. Dabei kann dieser Forschungsbereich, der im Kontext der Kreislaufwirtschaft, „Circular Economy (CE)“ steht, im Rahmen dieses Artikels nur kurz eingeführt werden.

Relevante Entwicklungen, die potentiell zu einer Verminderung des Abfallaufkommens für die TAB führen werden, sind veränderte Produktions- und Konsummuster, ökonomische Anreize über intelligente Systeme der Herstellerverantwortung, ein auf Recyclingfähigkeit angepasstes Produktdesign, eine Verbesserung von mechanischem sowie die Neueinführung von chemischem Recycling

für Plastik, eine bessere Sammlung und Abtrennung, die gezielte Umwandlung des Bio-Abfalls sowie der weitere Einsatz von abfallstammigen Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie. Prominente Studien wie [5, 6] kommen – verkürzt gesprochen – zu dem Schluss, dass eine ZeroWaste-Gesellschaft (wie Initiativen z.B. in Kiel, aber auch München [7] und Berlin-Spandau [8]) auf jeden Fall anzustreben ist und Vorteile in Richtung Nachhaltigkeit bietet – auch auf der gesellschaftlichen / sozialen Ebene, durch z.B. einen bewussteren Umgang mit Konsum, was zu mehr Gesundheit führt etc. – dass aber das „ZeroWaste“ eher mit „keine Verschwendung“ als „null Abfall“ zu übersetzen ist.

Spruch: eine Reduktion des derzeitigen Abfallaufkommens um die Hälfte, wie es die EU-Kommission bis 2030 vorsieht [10], wäre für Deutschland schon eine ganz erhebliche Verbesserung, die aber grundlegende und langwierige Veränderungsprozesse erfordern wird. Diese Halbierung ist als Ziel für die EU durchaus sinnvoll, für Deutschland im Vergleich zu anderen EU-Mitgliedern aber weit weniger realistisch – die Ausgangslage ist sehr anders, z.B. aufgrund des Deponieverbots, der Aufstellung bezüglich Recycling etc. In der Konsequenz bleibt, was im vorigen Absatz schon angeklungen ist: in einem Betrachtungszeitraum bis etwa zur Mitte des Jahrhunderts und darüber hinaus werden Emissionen aus der thermischen Abfallbehandlung entstehen, die als „unvermeidbar“ betrachtet und entsprechend gehandhabt werden müssen.

Von der gesellschaftlichen zur technischen Aufgabe

Dabei muss die Betrachtung von Transformationspfaden hin zu einer dekarbonisierten Welt immer dynamisch erfolgen. Zum einen entwickelt sich das Zielbild immer weiter, indem etwa das Energiesystem, aber auch industrielle Prozesse immer stärker treibhausgasneutral werden, zum anderen werden auch die Technologien und die dafür benötigten Infrastrukturen für ein Handling von CO₂ immer weiter fortgeschritten. In diesem Kontext wird sich auch das Aufkommen, vor allem aber auch die Zusammensetzung des produzierten und zu entsorgenden Mülls verändern, was die TAB vor die Her-

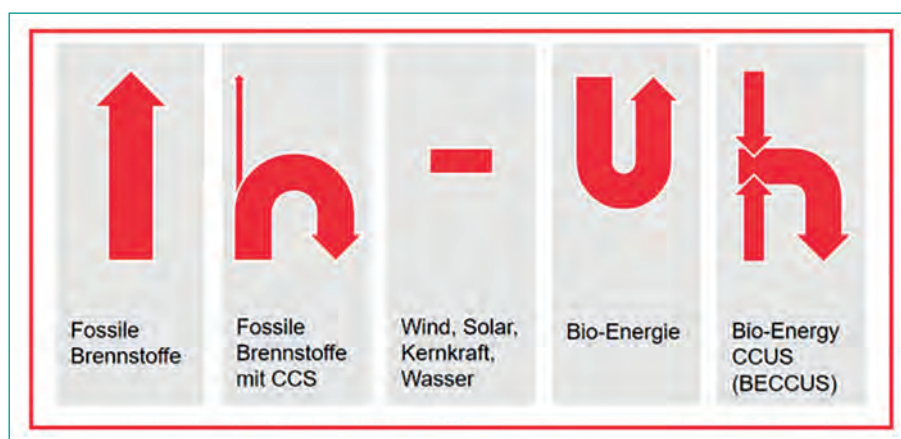


Abb. Schematische Darstellung der Emissionsströme bei fossilen Brennstoffen mit/ohne CCS, erneuerbaren Energien, Bio-Energie und Bio-Energie mit CCUS

Grafik: Wuppertal Institut

ausforderung stellt, sich diesen Änderungen anzupassen. Anlagenparks unterliegen fortlaufend Konsolidierungsprozessen bzw. müssen fortlaufend beweisen, dass sie den notwendigen technischen Anforderungen entsprechen – oder aber anderen, effizienter arbeitenden Anlagen Platz machen. Das wird auch in Zukunft weiterhin für den Anlagenpark der TAB gelten, wobei die techno-ökonomische Performance der zu installierenden CO₂-Abscheidung zu beachten sein wird.

Bei zukünftig dreistelligen CO₂-Preisen könnte CCUS an TAB trotz hoher Investitionskosten wirtschaftlich betreibbar sein, insbesondere, wenn sich ein Markt für negative Emissionen entwickelt. Im Folgenden werden daher einige technoökonomische und ökologische Aspekte der CO₂-Abscheidetechnik an TAB-Anlagen vorgestellt und diskutiert.

Erste Schritte zur Umsetzung werden bereits gegangen

Während in anderen industriellen Sektoren (z. B. Zementindustrie) bereits im großen Umfang über CO₂-Abscheidung diskutiert wird, nimmt die Thematik in der Abfallwirtschaft erst langsam Fahrt auf. Dabei existieren aktuell bereits sieben CCUS-Projekte an TAB-Anlagen (sechs in Europa, eins in Japan), zudem sind in Deutschland zwei Projekte [11] in Planung bzw. Umsetzung [12]. Die chemische Absorption mit Lösungen auf Aminbasis (Aminwäsche) stellt dabei die naheliegende Abscheidungstechnologie im Zusammenhang mit TAB-Anlagen dar – von den bestehenden sieben Projekten setzen sechs auf die Aminwäsche. Einige damit verbundene technische und ökonomische Effekte werden hier kurz andiskutiert.

Durch die Aminwäsche wird ein zusätzlicher Energieverbraucher in den TAB-Prozess eingebunden, so dass sich bei Betrachtung der gesamten Anlage der Eigenenergiebedarf der TAB deutlich erhöht. Dies kann als „Wirkungsgradverschlechterung“ interpretiert werden, welche je nach Alter und Effizienz der Anlage erheblich sein kann. Der Mehrbedarf an thermischer Energie resultiert hierbei hauptsächlich aus der Regeneration der Amine zur erneuten Verwendung und der Freisetzung des gebundenen CO₂. Der Wärmebedarf liegt üblicherweise bei 4 GJ_{therm.} pro t abgeschiedenem CO₂, neu entwickelte

effizientere Lösungsmittel senken den Bedarf auf etwa 2,3 bis 2,6 GJ_{therm.} pro abgeschiedener t CO₂ [12].

Die Nutzung einer CO₂-Abscheidungsanlage mit Aminwäsche stellt deutlich höhere Anforderungen an die Reinheit des Rauchgases der TAB-Anlage als die bisherigen Umweltauflagen [12]. So können durch Verunreinigungen im Rauchgas (z.B. mit SO_x und NO_x) Amine leicht abgebaut werden – diese stehen dem Abscheidungsprozess nicht mehr zur Verfügung, sodass eine strengere Vorbehandlung des Rauchgases erforderlich ist. Die Etablierung einer Reinigungskette mit solch hohem Standard erfordert Neuinvestitionen und während des Betriebs einen höheren Bedarf an Energie und Reaktionsmitteln – z. B. mehr Kalkstein für die nasse Rauchgasentschwefelung.

Für die Eingliederung der Aminwäsche in eine bestehende Anlage sollte weiterhin bedacht werden, dass genügend Fläche für die räumliche Integration zur Verfügung stehen muss und die Inbetriebnahme mit einer Betriebsunterbrechung von zwei bis drei Monaten einhergeht [12].

Neben der konventionellen Aminwäsche befinden sich mit Solid Sorbent und Hot Potassium Carbonate zwei weitere aussichtsreiche Verfahren zur CO₂-Abscheidung in der Entwicklung. Erstgenanntes nutzt feste hochporöse Sorptionsmittel zur CO₂-Aufnahme anstatt wässriger Aminlösung und wird derzeit in Pilotprojekten getestet [13]. Ein wesentlicher Vorteil liegt in deutlich reduzierten Energiebedarfen zur Regeneration der Amine [14]. Letztgenanntes wird bereits als Pilotprojekt [15] eingesetzt und zeichnet sich durch eine einfache Nachrüstbarkeit aus, zudem sind keine teuren und oft patentierten Amine erforderlich [16]. Auch das aus der Energiewirtschaft bekannte Oxyfuel-Verfahren gilt für TAB als aussichtsreich, da sich potentiell sehr hohe Abscheideraten erzielen lassen und keine Amine benötigt werden.

Zentrale Voraussetzung: Aufbau einer CO₂-Infrastruktur

Neben der CO₂-Abscheidungstechnologie selbst wird für eine erfolgreiche Umsetzung von CCUS an TAB-Anlagen eine Einbindung in eine adäquate CO₂-Infrastruktur benötigt. Diese wird nicht eigenständig für TAB ent-

wickelt werden, vielmehr geht es um die Verzahnung mit einer für große prozessbedingte Emissionsquellen benötigten CO₂-Infrastruktur, wie etwa der Zement- und Chemieindustrie. Für die dann zu betrachtende Größenordnung wird in der Regel ein Pipelinesystem benötigt [17], mit deren Realisierung in Anbetracht von langen Planungs-, Genehmigung- und Umsetzungsdauern zeitnah begonnen werden sollte – das Bottleneck ist aus anderen großmaßstäblichen Infrastrukturprojekten in Deutschland bekannt.

Die allgemeine Transportaufgabe besteht darin, je nach Anwendung für das CO₂ die abgeschiedenen Mengen zu einer dauerhaften Lagerstätte zu bringen. Diese wird nach heutigem Kenntnisstand etwa in der Nordsee liegen; entsprechende Speicherkapazitäten werden von den Niederlanden oder in Skandinavien bereits angeboten. Im Fall von CCU wird CO₂ als Rohstoff zu einem Abnehmer bzw. Weiterverarbeiter transportiert. Die chemische Industrie kann dabei sowohl als Quelle als auch als Senke auftreten, beide Seiten werden von der Verbindung über eine Transportpipeline ebenfalls profitieren. Dagegen ist ohne die Verfügbarkeit einer CO₂-Infrastruktur weder eine Speicherung noch eine Nutzung im großen Maßstab denkbar.

Fehlender regulatorischer Rückhalt und marktwirtschaftlicher Anreiz

Obwohl die Notwendigkeit von CO₂-Abscheidungstechnologien für die Erreichung der Klimaziele im Allgemeinen erkannt wurde und die politische Diskussion zumindest auf europäischer Ebene in den letzten Jahren an Fahrt gewonnen hat, ist das regulatorische Umfeld in vielerlei Hinsicht nach wie vor unklar. Zwar bietet der EU-Emissionshandel (EU-ETS) bereits erste generelle Marktanreize für CCS, da abgeschiedene und dauerhaft eingelagerte Emissionen von der Verpflichtung zur Abgabe von Zertifikaten befreit sind – allerdings sind TAB noch nicht im ETS verankert, so dass hier derzeit nur begrenzt Einfluss genommen werden kann.

Auch besteht für Staaten inzwischen die rechtliche Möglichkeit, CO₂ über Landesgrenzen hinweg zu transportieren und offshore im Meer einzulagern. Was bislang durch die sogenannte Londoner Konvention

verboten war, ist seit 2019 durch die provisorische Anwendung einer Ergänzungsklausel möglich, wozu sich bis dato jedoch lediglich Norwegen und die Niederlande, nicht aber Deutschland bekannt haben [18]. Da eine Einspeicherung von CO₂ auf deutschem Boden durch nationale Gesetzgebungen ebenfalls untersagt wird, ist CCS für deutsche Unternehmen derzeit faktisch unmöglich.

Für den Umgang mit CCU-Anwendungen und/oder negativen Emissionen ist das regulatorische Umfeld noch weitaus unschärfer. Dabei stellt gerade dieses eine wesentliche Voraussetzung für die Etablierung der entsprechenden Technologien dar, wie zahlreiche Positionspapiere der letzten Jahre betonen, u.a. [19-24]. So herrscht in Deutschland beispielsweise Unsicherheit, inwieweit die Errichtung von CCU-Anlagen überhaupt einer

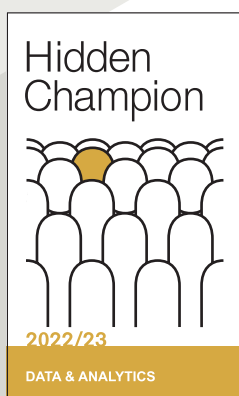
immissionsschutzrechtlichen Genehmigungspflicht unterliegt. Das entsprechende Gesetz (BImSchG) umfasst derzeit ausschließlich CCS, obwohl es sich um dieselbe Abscheidetechnik handelt [25].

Ferner ist unklar, inwiefern und unter welchen Bedingungen sich negative Emissionen in Form von Entfernungsgutschriften im EU-ETS anrechnen lassen. Ein entsprechendes Zertifizierungssystem stellt jedoch eine Grundlage für die Etablierung von Geschäftsmodellen und generell eines Binnenmarkts für den Handel mit negativen Emissionen dar. Die europäische Kommission hat daher bereits angekündigt, zum Ende dieses Jahres einen entsprechenden Rechtsrahmen zu präsentieren [26], eine Klärung sämtlicher Fragen wird jedoch nicht erwartet [25].

Zwar sind TAB derzeit nicht Teil des EU-ETS und sollen auch im Rahmen des „Fit for 55-Pakets“ erst einmal nicht von dessen Ausweitung betroffen sein, eine Aufnahme in den europäischen Emissionshandel wird aber bereits vom EU-Parlament gefordert und ist vermutlich nur eine Frage der Zeit [27]. Zudem wären TAB indirekt von der Regulierung betroffen, wenn aus der CO₂-Abscheidung ein Geschäftsmodell entstehen soll – beispielsweise indem sie Kohlenstoff für CCU-Anwendungen an die chemische Industrie liefern oder die Anrechenbarkeit ihrer negativen Emissionen an Kunden weiterverkaufen möchten. Auch im Rahmen der Unternehmensberichterstattung ist bislang völlig unklar, wie zukünftig mit negativen Emissionen umzugehen ist und inwieweit diese gegen positive Emissionen aufgerechnet werden dürfen. Bislang gibt es dazu kei-

d-fine

—
analytisch.
technologisch.
quantitativ.



Profitieren Sie von unserem Know-how

Lösungen für digitale Geschäftsmodelle

Erzeuger, Verbraucher und Betreiber von Energieinfrastruktur rücken in Zeiten zunehmend dezentraler Energieerzeugung durch Vernetzung und Echtzeit-Informationsaustausch eng zusammen. Wir unterstützen Sie beim Aufbau Ihrer digitalen Geschäftsmodelle:

- Umsetzung digitaler Investitions- und Wartungsstrategien
- Machine-Learning-Verfahren und skalierbare Data- und Analytics-Plattformen in Vertrieb, Handel, Netzplanung und -steuerung
- Softwarebasierte Szenarioplanung zur Dekarbonisierung des Energie-, Verkehrs-, Industrie- und Immobiliensektors
- Systemanalysen für den europäischen Markthochlauf von Wasserstoff

ne offiziellen Positionen, für nächstes Jahr ist aber eine neue Richtlinie zum Umgang mit CO₂-Entnahmen für den Bilanzierungsstandard GHG Protocol angekündigt [28].

Handlungsbedarf – Wer ist gefordert?

Vonseiten der europäischen, nationalen und regionalen Politik ist eine schnelle Klärung des regulatorischen Umfelds gefordert, damit Unternehmen Planungs- und Investitionssicherheit für die benötigten Technologien erhalten. Hierzu gehören die rechtlichen Anforderungen an die Abscheidung, den Transport und die Nutzung von abgeschiedenem CO₂ sowie den Umgang mit negativen Emissionen durch TAB mit hohen Biomasseanteilen. Ganz praktisch muss die Infrastruktur dann auch zeitnah bereitgestellt werden.

Auch wenn es diese Optionen zum Umgang mit den „unvermeidbaren“ Emissionen aus der Abfallbehandlung gibt, darf die gesellschaftliche Komponente um die Reduktion von Abfall nicht vergessen werden: je weniger Abfall entsteht, umso geringer ist der Bedarf an CCUS.

Quellen und Anmerkungen

- [1] Bundesregierung (2021): Klimaschutzgesetz 2021 – Generationenvertrag für das Klima. www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672, accessed December 22, 2021.
- [2] European Commission (2018): A Clean Planet for All – A European Strategic Long-Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773>, accessed March 9, 2020.
- [3] Hoffmeister, Jochen, Bärbel Birnstengel, Arno Häusler, und Martin Faulstich (2020): Perspektiven der thermischen Abfallbehandlung – Roadmap 2040 -. Prognos AG und TU Dortmund. https://www.itad.de/service/downloads/tab_roadmap-2040.pdf
- [4] IN4climate.NRW, Christoph, ed. (2021): CO₂ in einer klimaneutralen Grundstoffindustrie: Infrastrukturanforderungen für NRW. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Kohlendioxidwirtschaft. https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2021/in4climatenem-klimaneutralen-nrw-impuls-fuer-eine-infrastrukturgestaltung-cr-sci4climatenrw.pdf
- [5] Koop, Carina, Henning Wilts, Sabine Nanning, et al. (2020): Zero Waste-Konzepte. Gemeinsam Abfälle vermeiden und Ressourcen schonen. Kiel auf dem Weg zur Zero.Waste.City. Wuppertal / Berlin: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; Stakeholder Reporting; Büro für Umweltwissenschaften. https://www.kiel.de/de/umwelt_verkehr/zerowaste/_dokumente_zero-waste/zerowaste_kiel_konzept.pdf.
- [6] Flamme, Simone, Jörg Hanewinkel, Peter Quicker, und Kathrin Weber (2018): Energieerzeugung aus Abfällen – Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. Texte, 51/2018. Dessau: Umweltbundesamt; BMU.
- [7] <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/1865>
- [8] <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/1889>
- [9] Diese Halbierung ist als Ziel für die EU durchaus sinnvoll: für Deutschland aufgrund der anderen Ausgangslage im Vergleich zu andere EU-Mitgliedern aber weit weniger realistisch.
- [10] European Commission (2020): Circular Economy Action Plan. https://ec.europa.eu/environment/pdf/circular-economy/new_circular_economy_action_plan.pdf, accessed April 13, 2022.
- [11] In Zella-Mehlis und Salzbergen.
- [12] IEAGHG (2020): CCS on Waste to Energy. <https://www.club-co2.fr/files/2021/01/2020-06-CCS-on-Waste-to-Energy.pdf>, accessed March 22, 2022.
- [13] Z.B. im Projekt „Vienna Green CO₂“ am Biomassekraftwerk Simmering in Wien.
- [14] Littel, Rob (2017): ViennaGreenCO₂ – Neues Verfahren für die CO₂-Abscheidung aus Abgasen. <https://www.energy-innovation-austria.at/article/viennagreenco2/>, accessed March 23, 2022.
- [15] Am mit Biomasse befeuerten Heizkraftwerk Värtan (Stockholm, Schweden).
- [16] Levihn, Fabian, Linus Linde, Kare Gustafsson, and Erik Dahlen (2019): Introducing BECCS through HPC to the Research Agenda: The Case of Combined Heat and Power in Stockholm. Energy Reports 5 1381-1389. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352484719301829?token=CB-DA06195A480539B77F3FA3C9BE012F201A02F7FEE2BD24746CF09A730A7B37D236C645346C96BE5B51AD3D1B5B87F9&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220329101028>, accessed March 22, 2022.
- [17] Zeiss, Christoph, Georg Holtz, Ansgar Taubitz, und Dario Zander (2021): CO₂-Entstehung der Industrie in einem klimaneutralen NRW. Für eine Infrastrukturgestaltung. <https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/co2-entstehung-der-industrie-in-einem-klimaneutralen-nrw-impuls-fuer-eine-infrastrukturgestaltung-cr-sci4climatenrw.pdf>
- [18] Benrath, Daniel (2021): RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN EINER KOHLENDIOXIDWIRTSCHAFT. IN4climate.NRW GmbH. https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Nachrichten/2021/Gutachten_KdW/in4climate.nrw-gutachten-ag-kdw-rechtliche-rahmenbedingungen-kohlendioxidwirtschaft.pdf.
- [19] IEA (2011): Combining Bioenergy with CCS. <https://www.iea.org/reports/combining-bioenergy-with-ccs>.
- [20] SWP, ed. (2020): Unconventional Mitigation. <https://www.swp-berlin.org/publikation/eu-climate-policy-unconventional-mitigation>, accessed April 12, 2022.
- [21] Ecologic, ed. (2020): EU Framework for CO₂ Removals – Targets and Commitments. <https://www.ecologic.eu/de/17590>.
- [22] IfW Kiel, Mathias, ed. (2021): Integrating Carbon Dioxide Removal Into European Emissions Trading. *Frontiers in Climate* 3: 690023.
- [23] Climate Analytics, ed. (2021): Governing Large-Scale Carbon Dioxide Removal: Are We Ready? – An Update.
- [24] BDI, ed. (2021): Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS). Anforderungen der Deutschen Industrie an die Nutzung von Kohlenstoff im Kreislauf.
- [25] Becker Büttner Held (2022): Rechtliche Rahmenbedingungen für Carbon Capture and Storage (CCS) in Deutschland.
- [26] EU Kommission (2021): Proposals to Remove, Recycle and Sustainably Store Carbon. Text. European Commission – European Commission. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6687, accessed April 12, 2022.
- [27] Schulz, Florence (2022): Parlamentarier wollen Müllverbrennung in ETS aufnehmen. *Tagesspiegel* Background Energie & Klima. Verlag Der Tagesspiegel GmbH. <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/parlamentarier-wollen-muellverbrennung-in-ets-aufnehmen>, accessed April 12, 2022.
- [28] GHG Protocol (2021): Update on Greenhouse Gas Protocol Carbon Removals and Land Sector Initiative | Greenhouse Gas Protocol. <https://ghgprotocol.org/blog/update-greenhouse-gas-protocol-carbon-removals-and-land-sector-initiative>, accessed April 12, 2022.

K. Arnold, A. Scholz, A. Taubitz und H. Wilts, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal
karin.arnold@wupperinst.org