

Hintergrund

Unser Wirtschaften beruht zu einem großen Teil auf der Nutzung von Kohlenstoff. Zahlreiche kohlenstoffbasierte Stoffe und Materialien kommen täglich als Energieträger, Kraftstoffe, Papier, Kunststoffe, Medikamente, Baustoffe u.v.m. zum Einsatz. Ein umweltverträgliches Wirtschaftssystem zeichnet sich in einem wesentlichen Aspekt dadurch aus, ob und wie Kohlenstoff gebunden, genutzt und verarbeitet wird. Nur durch eine weitreichende Minderung der additiven CO₂-Freisetzung aus fossilen Rohstoffen und die dauerhafte Kreislaufführung des bereits jetzt zur Verfügung stehenden Kohlenstoffs können die Auswirkungen des Klimawandels eingedämmt werden. Derzeit stammt der Kohlenstoff, den wir als Energieträger oder stofflich nutzen, überwiegend aus fossilen Quellen. Nach seiner Zweckerfüllung innerhalb der jeweiligen Anwendung wird dieser zum größten Anteil durch Verbrennung (bzw. im Energiesektor ist die Verbrennung selbst die Zweckerfüllung) in Form von Kohlenstoffdioxid (CO₂) in die Atmosphäre freigesetzt. Aufgrund der immer wiederkehrenden Nachspeisung aus fossilen – bislang im Boden abgeschirmten C-Quellen anstatt einer Kreislaufführung des vorhandenen Kohlenstoffes wird permanent immer mehr Kohlenstoff in Form von CO₂ in die Atmosphäre überführt. Dort trägt das klimaschädliche Gas mit zum Treibhauseffekt bei und mit dem daraus resultierenden Klimawandel gehen weitere globale Umweltauswirkungen einher. Die vorhandene globale Vegetation (einziger mittels Photosynthese arbeitender, natürlicher CO₂-Großverbraucher) ist nicht in der Lage, die aktuell freigesetzten Mengen vollständig in Biomasse zu binden, weswegen der CO₂-Gehalt der Atmosphäre steigt.

Ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf findet momentan ausschließlich in der Natur statt, wo CO₂ durch Photosynthese gebunden und in Biomasse umgewandelt wird. Die Biomasse verrottet nach ihrem Ableben oder wird durch Verzehr verstoffwechselt und der Kohlenstoff

Ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf findet momentan ausschließlich in der Natur statt, wo CO₂ durch Photosynthese gebunden und in Biomasse umgewandelt wird.

als CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt, ein Netto-Null-Emissionen-Szenario, das energetisch von Sonnenenergie gespeist und aufrechterhalten wird. Durch die Einlagerung von Biomasse ohne Verrottung, z.B. in Mooren, bestünde tatsächlich ein natürliches Netto-Minus-Emissionen-Szenario. Dabei variiert der Zeitraum der Speicherung des Kohlenstoffs je nach Pflanzenart. Mais und Zuckerrüben binden in kürzester Zeit sehr große Mengen an CO₂ (ca. 30 t CO₂/ha

jährlich¹). Wälder bauen Biomasse deutlich langsamer auf (ca. 11 t CO₂/ha jährlich²), speichern den Kohlenstoff aber wesentlich länger, sofern das Holz nicht als Energieträger verwendet und gleich wieder verbrannt wird.

1 <https://maisfakten.de/story/Verschlechtert%20Mais%20die%20Klimabilanz%3f>, aufgerufen am 9.11.22.

2 <https://www.baysf.de/de/wald-verstehen/wald-kohlendioxid.html>, aufgerufen am 9.11.22.

Beides ist mit Vor- und Nachteilen verbunden. Laut des Berichts des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) von 2018 könnte mit einer Milliarde Hektar zusätzlicher Waldfläche die Erderwärmung bis zum Jahr 2050 auf 1,5 Grad Celsius begrenzt werden.³ Schnell assimilierende Pflanzen (wie Zuckerrüben oder Mais) würden die gleiche Leistung sogar mit deutlich kleinerer Fläche erreichen, wenn die entstehende Biomasse entsprechend stofflich in langlebige Produkte überführt wird. Zucker und Maisstärke bieten sich daher als schnell wirkende CO₂-Senke an, wenn diese neben der Verwendung als Lebensmittel auch als Grundstoff für die Herstellung längerlebiger chemischer Grundbausteine verwendet werden würden.

Zur Umsetzung der Transformation zu einer biobasierten Lebens- und Wirtschaftsweise ist ein Umdenken bei der Nutzung des Kohlenstoffs notwendig. Insbesondere bereits

Zur Umsetzung der Transformation zu einer biobasierten Lebens- und Wirtschaftsweise ist ein Umdenken bei der Nutzung des Kohlenstoffs

im Umlauf befindlicher Kohlenstoff muss, solange es geht, genutzt und im Kreislauf geführt werden. Am Ende eines möglichst langen Zyklus wird er aber schließlich auch in CO₂ überführt.

Zur Reduktion des in der Atmosphäre befindlichen CO₂ und zur Bindung von in Prozessen entstehendem CO₂ schon bevor es in die Atmosphäre gelangt, gibt es

Möglichkeiten, das Treibhausgas wieder zu binden und damit als alternative Kohlenstoffquelle nutzbar zu machen oder einzuspeichern.

Verschiedene Lösungsansätze bieten dazu die Methoden von Carbon Capture and Utilization (CCU) bzw. von Carbon Capture and Storage (CCS).

- **Carbon Capture and Utilization (CCU)** beschreibt die Abscheidung und anschließende Nutzung von CO₂. Wichtige Aspekte bei der Kohlenstoffabscheidung und -verwertung sind einerseits der hierfür notwendige Energiebedarf und andererseits die Eignung der potenziellen CO₂-Quellen für die verschiedenen Verfahren. CCU-Technologien können zur Substitution fossiler Rohstoffe und Energieträger beitragen, indem damit Ressourcen für industrielle und chemische Prozesse erschlossen werden – die stoffliche Nutzung von Kohlenstoff aus fossilen Ressourcen ist dann nicht mehr nötig. Natürliche, CO₂-bindende, biologische Prozesse und die Produktion von Baustoffen, Kraftstoffen und Chemikalien aus Biomasse können ebenfalls als CO₂-Entnahme (*CDR – Carbon Dioxide Removal*) und Nutzung des Kohlenstoffs verstanden werden. Die technische Nutzung von CO₂ als

Kohlenstoffquelle bedarf erheblicher Energiemengen.⁴ Die Energie für diese Teilprozesse muss aus erneuerbaren Energiequellen stammen und darf keinesfalls aus fossilen Energieträgern bereitgestellt werden. Als bester Energieträger und Reaktant bei der stofflichen Konversion bietet sich für die Mehrheit der Anwendungsfälle grüner Wasserstoff an, der mit erneuerbaren Energien erzeugt werden muss.

- **Carbon Capture and Storage (CCS)** umfasst innovative Technologien zur Kohlenstoffabscheidung aus CO₂-Punktquellen (z.B. Zementwerke oder andere energieintensive Industrien) und dauerhaften unterirdischen Speicherung (z.B. durch Einbringung von Biokohle in den Boden). Der technische Aufwand für Abscheidung, Transport und Speicherung von CO₂ aus der Luft (*Direct Air Capture*) ist aufgrund der sehr geringen CO₂-Konzentration (>400 ppm bzw. ein Volumenanteil von 0,04 %⁵) allerdings sehr groß, weil dabei enorme Volumenströme zu bewegen und zu verarbeiten sind. Von daher ist eine baldige großtechnische Umsetzung in Deutschland sehr unwahrscheinlich. Alternativen kann die Sicherung und Erschließung natürlicher Kohlenstoffsenken, wie Wälder, Feuchtgebiete, Grünland, marine Seegraswiesen und Salzmarschen bieten.⁶
- **Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)** steht für die Abscheidung, Nutzung und Speicherung von Kohlenstoff. Wie beim CCU wird das Ziel verfolgt, die verbleibenden fossilen Rohstoffe in ihren Lagerstätten zu belassen und den fossilen Kohlenstoff möglichst durch Mehrfachverwendung des CO₂ zu substituieren. Ergänzend zum CCU wird hierbei auch betrachtet, dass das auf diese Weise erzeugte Produkt bereits kurz- oder längerfristig als Kohlenstoffspeicher wirkt und auch am Ende der Nutzungskette der Kohlenstoff möglichst dauerhaft der Lithosphäre oder einem langlebigen Produkt zugeführt wird.⁶

Lösungsansätze

Auch in Zukunft wird der Industriesektor für die Bereitstellung u.a. von Konsumgütern einen hohen Bedarf an Kohlenstoff haben, der beispielsweise zu organischen Grundchemikalien und Folgeprodukten verarbeitet wird. Das Umweltbundesamt rechnet auch nach Berücksichtigung bestehender Einsparungspotenziale noch mit einem Gesamtbedarf an Kohlenstoff pro Jahr in Deutschland von 20 bis 40 Mio. Tonnen.⁷ Um die notwendigen Ressourcen nachhaltig zur Verfügung zu stellen und im Sinne einer Kreislaufwirtschaft einzusetzen, ist ein Umdenken hinsichtlich der

3 IPCC (2018): Special Report – Global Warming of 1.5 °C.

4 Umweltbundesamt (2021): Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization, S.24.

5 Umweltbundesamt (2022): online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid->, aufgerufen am 02.11.22.

6 Adaptiert von C.A.R.M.E.N. e.V. (2022): Carbon Capture, Utilization and Storage – Stand und Perspektiven von biomasseassoziierten Verfahren.

Wertigkeit des CO₂ notwendig – es muss als kreislauffähiger und erneuerbarer Rohstoff betrachtet werden.

Zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs stehen drei erneuerbare Quellen zur Verfügung: Biomasse, recycelter Kohlenstoff und CO₂. Für CCU(S)-Maßnahmen kommen derzeit zwei CO₂-Quellen in Frage, die mittel- bis langfristig zur nachhaltigen Deckung des Kohlenstoffbedarfs beitragen können. Wird CO₂ direkt aus der Atmosphäre entnommen, liegt ein geschlossener Kreislauf vor, wenn entlang der gesamten Prozesskette der CCU-Maßnahmen keine weiteren Treibhausgasemissionen entstehen. In Industriesektoren, die aus

Zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs stehen drei erneuerbare Quellen zur Verfügung: Biomasse, recycelter Kohlenstoff und CO₂.

derzeitiger Sicht unvermeidbare Emissionen verursachen, bietet sich ebenfalls der Einsatz von CCU-Technologien an, um das ausgestoßene CO₂ zu nutzen. Nutzbare industrielle Restemissionen dürften auch in Zukunft noch beispielsweise in (Heiz-)Kraftwerken, bei der Herstellung

von Baustoffen, bei der Gas- und Kraftstoffherzeugung und in Bioenergieanlagen entstehen. Voraussetzung für einen nachhaltigen Kohlenstoffkreislauf ist, dass der Energiebedarf der CO₂-emittierenden Industrie sowie der CCU(S)-Maßnahmen ausschließlich aus erneuerbaren Energien gedeckt wird.

Die Rolle der Bioökonomie ist bei der Betrachtung von CCU und CCS elementar. Dabei sind zwei Bereiche zu unterscheiden: Einerseits kann CO₂ sowohl aus der Biosphäre stammen und ebenso kann der daraus gewonnene Kohlenstoff wieder in die Natur eingebracht werden. Die Nutzung von CO₂ als Rohstoff ist also Teil einer zirkulären Bioökonomie. Zum anderen können bioökonomische Innovationen bestehende CCU(S)-Verfahren verbessern oder neue Möglichkeiten zur Bindung und Nutzung von CO₂ eröffnen. Ein Beispiel sind biobasierte Filtermaterialien, die zur Abscheidung des CO₂ in industriellen Prozessen genutzt werden können. Es sind aber auch biotechnologische Verfahren in Vorbereitung, bei denen unter Verwendung von Mikroorganismen und (idealerweise grünem) Wasserstoff chemische Grundbausteine aufgebaut werden. Hierzu muss das CO₂ von Punktquellen stammen (Fermentationsprozesse oder Verbrennungsprozesse) oder zuvor angereichert werden. Die Herstellung von biologisch abbaubaren Polymeren unter Verwendung von CO₂-Emissionen als Ausgangsmaterial ist einer der Lösungsansätze, wie ein klimafreundlicher Kohlenstoffkreislauf implementiert werden kann: durch Elektrochemie, biologische Umwandlung oder Thermokatalyse –

letztere ist die ausgereifteste Technologie zur CO₂-Nutzung – werden entweder direkt Polymere auf CO₂-Basis hergestellt oder indirekt in Form von chemischen Grundstoffen (Bausteine wie Methanol, Ethanol, Acrylatderivate oder Monoethylenglykol [MEG]) für Polymerisationsreaktionen produziert.⁸

Am Ende dieser Prozesse liegen Materialien vor, die vielseitig Verwendung finden können. Eine Möglichkeit dazu zeigt der Schweizer Sportartikelhersteller *On*, der mit *Cloudprime* den ersten Turnschuh aus Kohlenstoffemissionen präsentiert. Bei dem biotechnologischen Verfahren von *LanzaTech* wird Kohlenmonoxid aus industriellen Quellen wie Stahlwerken abgefangen. Nach der Abscheidung werden diese Emissionen einem patentierten Fermentationsprozess unterzogen. Bakterien wandeln das kohlenstoffreiche Gas auf natürliche Weise in Ethanol um, welches in weiteren Schritten dehydriert wird, um z.B. Ethylen zu erzeugen (eine vieler Möglichkeiten der Ethanol-Folgechemie), das in der Folge zu EVA (Ethylenvinylacetat) in Form von festen kleinen Kunststoffpellets polymerisiert wird.⁹

Aber auch rein biologisch kann durch die Bindung bzw. Anreicherung von CO₂ aus der Atmosphäre im Boden, beispielsweise als Wurzelmasse und Humus sowie in Mooren oder Gehölzen, die atmosphärische CO₂-Konzentration gesenkt werden. Das sogenannte *Carbon Farming* ist eine Form der natürlichen Kohlenstoffspeicherung, die ohne Transport- und Verbringungsinfrastruktur und mit relativ kleinem Energieaufwand auskommt. Hierbei übernehmen Boden und Pflanzen die gesamte Senkleistung einschließlich Abscheidung und Speicherung. Der große Vorteil beim Carbon Farming liegt in der schnellen und unkomplizierten Umsetzung, die im Vergleich zu technischen CCUS-Verfahren auch aus ökonomischen Aspekten vorteilhaft ist.

Insbesondere für Klimaschutz-Regularien sollte die Rolle biologischer Kohlenstoffsinken stärker berücksichtigt werden. Maßnahmen in diesem Bereich leisten nicht nur einen Beitrag durch die Kohlenstoffspeicherung, sondern haben auch positive Effekte auf die Biodiversität, den Wasserhaushalt und die ökologische Intaktheit der Ökosysteme.

Ein weiteres Beispiel für die stoffliche Nutzung und Speicherung von CO₂ ist die Herstellung von Carbonfasern auf Algenbasis. Im Verbund mit Granit oder anderem Hartgestein ermöglichen nachhaltige Carbonfasern aus Algen völlig neue Materialien, die beispielsweise in der Flug- und Automobilindustrie eingesetzt werden können. Laut den Forschenden der TU München sind die neuartigen Konstruktionsmaterialien nicht nur klimaneutral, sondern sind leichter

7 Umweltbundesamt (2021): Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization, S.25.

8 Bioplastics Magazine (2022): online verfügbar unter <https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20220711-emissions.php?viewmode=print>, aufgerufen am 09.11.22.

9 <https://biooekonomie.de/nachrichten/neues-aus-der-biooekonomie/erster-laufschuh-aus-recycelten-industrieabgasen>, aufgerufen am 09.11.22.

als Aluminium und stabiler als Stahl.¹⁰

Entscheidend ist aber, wie lange der Kohlenstoff gespeichert wird. Um einen möglichst langen Zeitraum zu erzielen, sollte Kohlenstoff im Sinne der kaskadierenden Bioökonomie zunächst in eine stoffliche Nutzung gebracht werden und am Ende des Produktlebenszyklus einer möglichst dauerhaften Kohlenstoffspeicherung zugeführt werden – sofern eine weitere Kreislaufführung des Produkts nicht möglich ist. Da der Kohlenstoff in den meisten Fällen früher oder später wieder in die Atmosphäre gelangt, trägt die Nutzung des CO₂ nur dann effektiv zum Klimaschutz bei, wenn das für CCU(S)-Maßnahmen verwendete CO₂ bzw. in weiteren Prozessschritten damit in Verbindung gebrachter Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen stammen und damit treibhausgasneutral sind.¹¹

Auf diese Weise bietet CCUS allerdings große Chancen, um technisch nicht vermeidbare Treibhausgasemissionen der Industrie oder Landwirtschaft zu nutzen und damit klimaschädliche Auswirkungen in diesen Sektoren zu reduzieren. Der Aufbau einer technischen Wasserstoffinfrastruktur ist hierbei entscheidend (Produktion von grünem Wasserstoff sowie dessen Bereitstellung durch ein entsprechendes Leitungsnetz).

Handlungsempfehlungen

1. Gezielte Regulierung durch Gesetzgebung

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind CCUS-Verfahren meist nicht wirtschaftlich umsetzbar. Dies unterstreicht die Bedeutung von Steuerungsinstrumenten wie der CO₂-Bepreisung, die schrittweise zu einer Veränderung der Wettbewerbssituation führen und letztendlich biobasierte Chemikalien und Folgeprodukte, die mittels CCU-Verfahren hergestellt werden, gegenüber Produkten aus fossilen Rohstoffen konkurrenzfähig machen können. Vergleichbare Beispiele dafür sind mitunter die sogenannten „grünen Zertifikate“, die in Belgien an Netzbetreiber zur Förderung der erneuerbaren Stromerzeugung ausgegeben werden: Ökostrombetreibende bekommen sogenannte Grüne Zertifikate (je eines pro MWh Ökostrom bzw. pro 217 kg vermiedenen CO₂-Ausstoß). Diese Zertifikate können die Betreibenden am Markt in ihrer Region verkaufen. Für den Ökostrom, den die Stromversorger selbst produzieren, bekommen sie Zertifikate; für den Strom aus fossilen Rohstoffen können sie Zertifikate zukaufen.

Unternehmen, die in energieeffiziente Technologien und erneuerbare Energien investieren, erhalten einen Steuerbonus von 13,5 %; kleine Unternehmen erhielten bis 2020 sogar 20 %.¹² Eine Vergabe ähnlicher Zertifikate ließe sich

auch auf die langfristige Speicherung von Kohlenstoff in biobasierten Produkten übertragen.

Außerdem müssen die politischen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die die Etablierung bioökonomischer Produktionsprozesse und die Anwendung von CCU-Verfahren als wesentlichen Beitrag für eine nachhaltigere Zukunft fokussieren und damit eine ökologische Bewertung von Produkten und Verfahren ins Zentrum des Wirtschaftssystems stellen. Dies erfordert auch eine Vereinfachung der Genehmigungsverfahren zur Umsetzung von Vorhaben zur Abscheidung von kohlenstoffhaltigen Abgasströmen in der Industrie. Außerdem findet aktuell keine Anerkennung der CO₂-Abscheidung aus fossilen Quellen im EU-Emissionshandelssystem statt, sofern nicht der Nachweis der permanenten chemischen Bindung erfolgt. Auch deshalb ist der Handel mit CO₂ (aktueller Marktwert von 100-150 EURO/t) derzeit unattraktiv und nicht kostendeckend.

2. Synergien mit anderen Technologien identifizieren und ausbauen

Um Kohlenstoff aus CO₂ vielseitig in der chemischen Industrie einsetzen zu können, ist ein nachhaltiges Reduktionsmittel notwendig. Dazu wird bereits heute Wasserstoff eingesetzt, um mithilfe verschiedener Verfahren Kohlenwasserstoffe oder Alkohole wie Methan, Methanol, Ethanol u.v.m., zu erzeugen. Für ein treibhausgasneutrales und nachhaltiges Wirtschaftssystem ist entscheidend, dass dabei zukünftig ausschließlich „grüner“ Wasserstoff genutzt wird, d.h. bei der Produktion kommen nur erneuerbare Energien zum Einsatz. Um Wasserstofftechnologien im Kontext des CCU(S) weiter voranzubringen, muss die stoffliche Nutzung von Wasserstoff mit der energetischen Nutzung gleichgestellt werden.

Die Synergien bei der Verwendung von CO₂ und Wasserstoff sollten bereits bei der weiteren Entwicklung der jeweiligen Verfahren und Infrastrukturen bedacht werden.

Eine Möglichkeit zur Implementierung geeigneter Vernetzungs- und Infrastrukturen ist der gezielte Ausbau von Wasserstoffnetzen in räumlicher Nähe zu Kraftwerken oder Industrieanlagen mit bestehender oder potenzieller CO₂-Abscheidung. Werden industrielle CO₂-Punktquellen¹³ beim Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur berücksichtigt, können Energieaufwand sowie zusätzliche Treibhausgasemissionen durch Lagerung und Transport reduziert werden. Die Bereitstellung von grünem Wasserstoff ist ein Key-Faktor für die Bioökonomie. Dieser muss physisch bereitstehen und kostentechnisch mit anderen Energieträgern vergleichbar sein. Ohne eine politische Regelung und Initiierung ist das allerdings kaum erreichbar. Der Aufbau von CO₂-Pipelines

¹⁰ Vgl. <https://www.ch.nat.tum.de/wssb/forschung/projekte/greencarbon/>, aufgerufen am 09.11.22.

¹¹ Umweltbundesamt (2021): Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization.

¹² Deutsch-Belgisch-Luxemburgische Handelskammer (2019): Factsheet Belgien. Allgemeine Energiemarktinformationen, online verfügbar unter https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Publikationen/Kurzinformationen/Standardfactsheets/2020/fs-belgien-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=3, aufgerufen am 09.11.22

¹³ Fröhlich et al. (2019): CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland – Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit.

in Bayern bzw. die Anbindung Bayerns an bestehende CO₂-Knotenpunkte im Norden Deutschlands ist zur Überwindung des aktuellen Standortnachteils zwingend erforderlich.

3. Weitere Forschung & industrielle Umsetzung fördern/ vorantreiben

Insbesondere CCU(S)-Technologien zur Nutzung von atmosphärischem CO₂ und nicht vermeidbaren Emissionen aus der Industrie leisten voraussichtlich in der Zukunft einen wesentlichen Beitrag zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs. Auch wenn zum jetzigen Zeitpunkt CCU(S)-Maßnahmen bis auf wenige Ausnahmen kaum wirtschaftlich umgesetzt werden können, sind die weitere Forschung und Weiterentwicklung der Prozesse eine wichtige Voraussetzung, um die Verfahren zu gegebenem Zeitpunkt technologisch und wirtschaftlich gewinnbringend einsetzen zu können.

Forschungsvorhaben oder die Umsetzung von Verfahren im Demonstrationsmaßstab sollten nicht davon ausgebremst werden, dass nicht genügend grüner Wasserstoff für die Umwandlungsprozesse der CO₂-Nutzung zur Verfügung steht. Es müssen sowohl Verfahren zur CO₂-Abscheidung und Konversion als auch Verfahren zur Produktion grünen Wasserstoffs weiterentwickelt werden. So können beide Technologien in Zukunft kombiniert und nachhaltig in CCU(S)-Maßnahmen eingesetzt werden.

Stand November 2022

