

CO₂ – Treibhausgas und Lebensbaustein

Ein kurzer Überblick über Möglichkeiten und Grenzen der CO₂-Nutzung

Kohlenstoffdioxid (CO₂) wird vor allem als klimaschädliches Treibhausgas wahrgenommen. In CO₂ steckt aber auch Kohlenstoff (C). Kohlenstoff ist der Grundstoff allen organischen Lebens und zudem die Basis für eine Vielzahl chemischer Produkte. Daher sind Prozesse, die statt Kohlenstoff aus fossilen Quellen CO₂ einsetzen wollen, weltweit Gegenstand der technischen Forschung. Hierbei wurden in den vergangenen Jahren erste entscheidende Durchbrüche erzielt. Diese industriellen Prozesse zur Abscheidung und sinnvollen Nutzung von Kohlenstoffdioxid, sogenannte CCU-Technologien (Carbon Capture and Utilisation) bzw. CO₂-Nutzungstechnologien, können im Sinne einer Kreislaufwirtschaft eine alternative Perspektive auf den Umgang mit CO₂-Emissionen eröffnen.

Kohlenstoff – Grundbaustein des Lebens

Kohlenstoff ist ein Grundbaustein unseres Planeten: Er ist in allen Lebewesen und in den Gesteinen enthalten. Tiere, Pflanzen, Pilze und der Mensch bestehen gleichermaßen aus Kohlenstoffverbindungen. Die größten Mengen an Kohlenstoff auf der Erde stellen anorganische Carbonatgesteine, wie z.B. Gebirge dar (ca. 28 Mio. Gt) (Quelle: www.chemie.de/lexikon/Kohlenstoff.html). Kohle, Erdöl und Erdgas sind bekannte und wichtige Kohlenstoffverbindungen: Wir nutzen sie als fossile Brennstoffe, denn sie haben einen besonders hohen Energiegehalt.

Kohlenstoff kommt außerdem in der Luft als Kohlenstoffdioxid (CO₂) vor. Diese Kohlenstoffverbindung macht aktuell etwa 0,04 % unserer Atmosphäre aus. CO₂ ist eine besonders energiearme und somit reaktionsträge Verbindung. Aufgrund dieser Eigenschaften gilt es heute als Abfall- und Endprodukt.

Kohlenstoffdioxid ist aber ebenfalls ein wichtiger Grundbaustein des Lebens auf der Erde. Pflanzen wandeln es beim Wachstum durch Photosynthese in organische Verbindungen um. Mittlerweile ist CO₂ jedoch durch den starken Anstieg vor allem industrieller Emissionen durch die Verbrennung fossiler Kohlenstoffvorräte als klimaschädliches Treibhausgas zu einer Bedrohung für Natur und Menschheit geworden.

Kraftstoff, Kunststoff, Minerale – hergestellt mit CO₂?

Die Nutzung von Kohlenstoffdioxid in unterschiedlichen Produktionsprozessen wird „Carbon Capture and Utilisation“ (CCU) oder auch „Carbon Dioxide Utilisation“ (CDU) genannt. Hiermit werden Technologien und Prozesse bezeichnet, die Kohlenstoffdioxid direkt oder nach chemischer Umwandlung als Teil einer Kohlenstoffverbindung in Materialien oder Energieträgern verwenden und so nutzbar machen. Ein CCU-Prozess umfasst die Abscheidung und Verdichtung von Kohlenstoffdioxid, falls erforderlich dessen Transport und die separate, funktionale Nutzung des CO₂.

Da CO₂ sehr reaktionsträge ist, sind in der Regel Hilfsmittel nötig, um es an chemischen Reaktionen zum Aufbau energetisch höherwertiger Materialien zu beteiligen. Dies kann durch zusätzliche Energie ermöglicht werden. Alternativ können chemische Katalysatoren eingesetzt werden, um einen energetisch effizienteren Prozess zu entwickeln. Die dafür erforderliche Katalysatorforschung ist ein Schlüsselfaktor für die Entwicklung erfolgreicher CCU-Technologien.

Katalyse:

Der Begriff „Katalyse“ bezeichnet die Einflussnahme auf den Verlauf einer chemischen Reaktion mithilfe eines Katalysators mit dem Ziel, eine Reaktion zu initiieren, sie zu beschleunigen bzw. die notwendige Energiezufuhr zu reduzieren oder aber auch einen bestimmten Reaktionsverlauf herbeizuführen. Für CCU Prozesse waren und sind Durchbrüche in der Katalysatorforschung essenziell, da durch sie Prozesse erst möglich bzw. energetisch sinnvoll werden, die das an sich reaktionsträge CO₂ weiterverarbeiten.

CO₂-Nutzungstechnologien – ein Kreislauf?

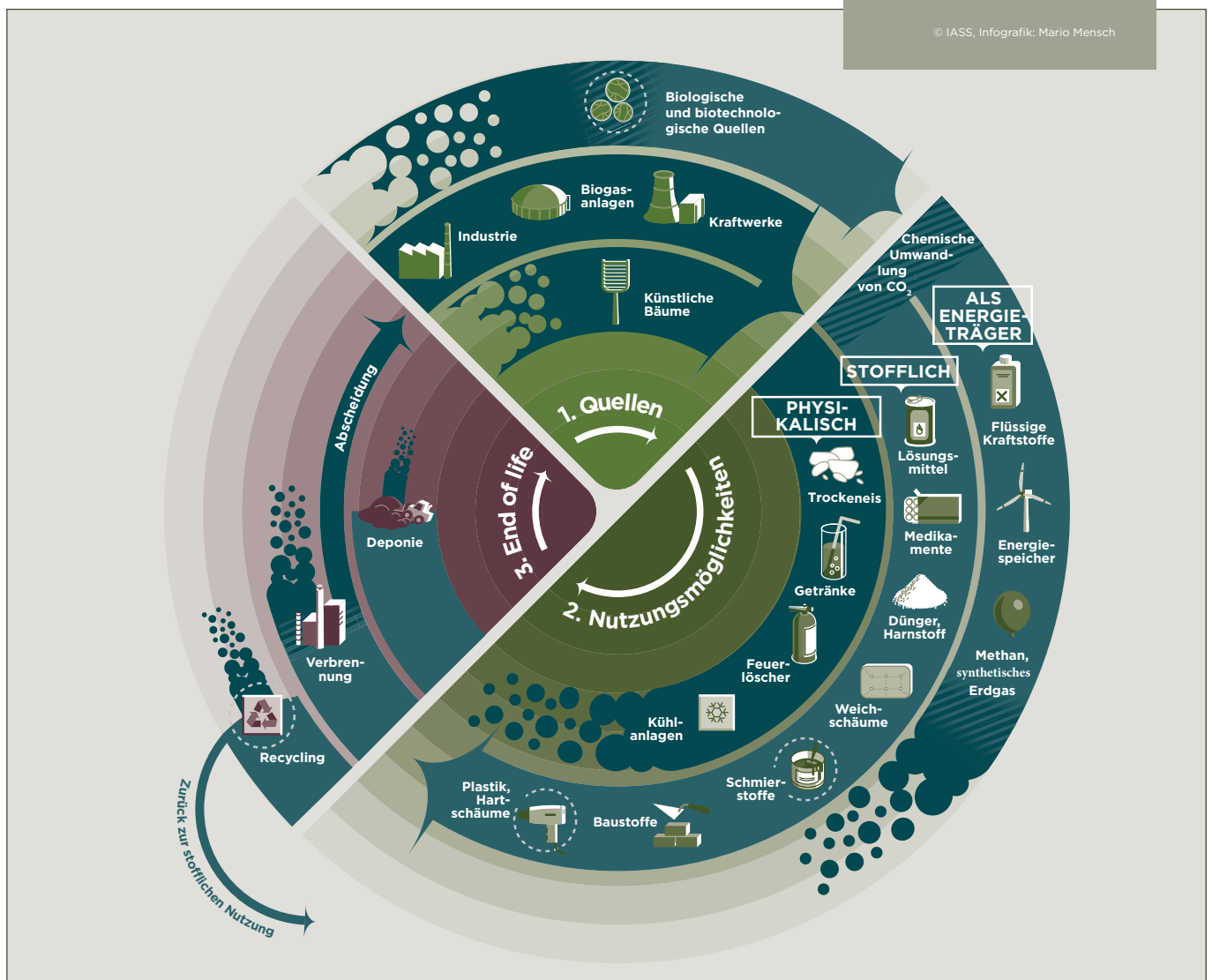
Die Kreisgrafik beschreibt einen möglichen Kohlenstoffdioxid-kreislauf und zeigt auch, welche Bereiche durch CCU-Technologien abgedeckt werden könnten, und welche Lücken auch perspektivisch noch zu schließen sind.

Sie ist unterteilt in die Abschnitte CO₂-Quellen (1.), Nutzungsmöglichkeiten (2.) und „End of life“ (3.). Die dunkelblauen Pfeile stellen die direkte Nutzung von CO₂, die etwas helleren die indirekte als umgewandelte Kohlenstoffverbindung dar. Auf dem Weg zu einem CO₂-Kreislauf bestehen Lücken vor allem noch in der „End of life“-Phase mit den Optionen Verbrennung, Deponie oder Recycling und bei der (erneuten) Emission nach der physikalischen Nutzung oder der Nutzung als Energieträger. Die Punkte stellen einen Übergang zu CO₂ in der Atmosphäre dar, je nach Richtung also eine Emission oder einen Gewinnungsprozess.

Legende:

-  Kohlenstoffdioxid
-  Kohlenstoffverbindungen
-  Umwandlung
-  Abgabe an die Atmosphäre
-  Bezeichnet Technologien, die technisch machbar sind, deren Umsetzung derzeit jedoch, zum Beispiel aus Effizienzgründen, nicht in naher Zukunft wahrscheinlich ist

© IASS, Infografik: Mario Mensch



CO₂-Quellen (Abschnitt 1. in der Kreisgrafik)

Das für CCU-Technologien benötigte CO₂ kann aus unterschiedlichen Quellen gewonnen werden, die jeweils mit unterschiedlichen Umweltauswirkungen und Kosten verbunden sind.

In einigen chemischen Prozessen, beispielsweise bei Gärungsprozessen oder bei der Ammoniakproduktion, entsteht sehr reines CO₂ als Nebenprodukt. Mithilfe von kommerziell etablierten Rückgewinnungstechnologien lässt sich dieses CO₂ isolieren und in höchster Reinheit für die Nutzung bereitstellen.

Aber auch CO₂ aus Rauchgasen, sei es aus Kraftwerken oder anderen industriellen Punktquellen, kann mithilfe von Technologien zur CO₂-Abscheidung, wie etwa mithilfe der Aminwäsche, herausgefiltert und für eine weitere Nutzung oder Speicherung bereitgestellt werden. Dieser Prozess wird im Kontext von CCU-Technologien als Abscheidung verstanden. Ziel ist es dabei, dass am Ende des Abscheidungsprozesses CO₂ in ausreichend hoher Reinheit vorliegt, um genutzt werden zu können. Dieselben Abscheidungstechnologien sind auch für die Anwendung im Kontext von Carbon Capture and Storage (siehe Abschnitt CCU und CCS) vorgesehen.

Aminwäsche und Amine

Die Aminwäsche ist ein nasschemisches Wäscheverfahren, bei dem mithilfe stark alkalischer Lösungen CO₂ aus Rauchgasen abgetrennt werden kann. Dieses Verfahren ist seit den 1930er Jahren bekannt und wird erfolgreich eingesetzt. Es ist grundsätzlich möglich, bereits bestehende Industrieanlagen nachträglich mit Anlagen zur Aminwäsche und für andere chemische Wäscheverfahren auszurüsten („Retrofit“). Für den Fall einer großskaligen Anwendung des Verfahrens steht eine Bewertung möglicher Umweltauswirkungen noch aus.

Als Amine werden Moleküle bezeichnet, die auf dreifach gebundenem Stickstoff basieren. Sie sind damit sogenannte organische Abkömmlinge des Ammoniaks. Bestimmte Amine wie zum Beispiel Monoethanolamin (MEA) bilden den Grundbestandteil stark alkalischer Lösungen, die gut zur Abscheidung von CO₂ aus Rauchgasen eingesetzt werden können.

Die CO₂-Konzentration der jeweiligen Quelle bestimmt im Wesentlichen, welche Technologien zur Abscheidung von CO₂ eingesetzt werden können. In der Regel gilt dabei, dass der technische Aufwand für die Abscheidung umso geringer ist, je höher die CO₂-Konzentration in dem Gasgemisch ist, aus dem die Abscheidung erfolgen soll. Die potenziellen industriellen CO₂-Quellen sind zahlreich und reichen von kleineren Industrieschornsteinen bis hin zu großen Kraftwerken. Mit bereits existierenden Verfahren könnten sie heute schon große Mengen CO₂ in unterschiedlichen Reinheitsgraden bereitstellen. Aufgrund der anfallenden Abscheidungskosten und der bislang geringen Nachfrage nach CO₂ kommen diese Technologien jedoch noch nicht verbreitet zum Einsatz, obwohl sie prinzipiell verfügbar wären.

Eine weitere CO₂-Quelle ist die Atmosphäre. Ein kommerziell noch nicht umsetzbarer Ansatz sieht vor, durch chemisch-technische Verfahren bereits emittiertes CO₂ wieder aus der Atmosphäre herauszufiltern. Solche Verfahren beschreibt der Begriff ‚Direct Air Capture‘. Diese Technologien sind energetisch allerdings noch aufwendig und daher kostspielig, werden aber bereits von einigen Firmen im Pilotmaßstab getestet. Für eine breitere Umsetzung ist langfristig allerdings ein technologischer Sprung erforderlich, zum Beispiel in Form neuer Materialien, die als Absorber eingesetzt werden können. Sie werden aber immer nachteilig gegenüber höher konzentrierten CO₂-Punktquellen sein. Auch ist es wichtig, dass erneuerbare Energien zum Einsatz kommen, damit die Abscheidung aus der Luft eine positive Klimabilanz aufweist.

Sowohl für die CO₂-Abscheidung aus der Luft als auch für die CO₂-Abscheidung aus industriellen Quellen gilt, dass die dafür herangezogenen Technologien in Abhängigkeit von den eingesetzten Materialien auch unerwünschte Umweltauswirkungen zur Folge haben können, die in manchen Fällen noch nicht hinreichend untersucht worden sind.

Gegenstand der Forschung sind zudem biologische Verfahren der CO₂-Aufnahme, zum Beispiel durch Mikroalgen. Diese Verfahren stellen nur insofern eine „CO₂-Quelle“ dar, als dass hier CO₂ aus der Atmosphäre aufgenommen und zum Beispiel in Form von entstehenden Mikroorganismen weiterverarbeitet werden können. Reines CO₂ für die weitere Verarbeitung in unterschiedlichen industriellen Prozessen, wie die anderen genannten Quellen, stellen diese Verfahren nicht zur Verfügung.

Nutzungsmöglichkeiten (Abschnitt 2. in der Kreisgrafik)

Direkte Nutzung von CO₂

Die sogenannte direkte oder physikalische Nutzung von Kohlenstoffdioxid, das heißt seine Verwendung in industriellen Prozessen ohne eine chemische Umwandlung in fester oder flüssiger Form, ist heute bereits in verschiedenen Produkten gebräuchlich. Hierzu gehört der Einsatz

- als Kohlensäure in Getränken,
- als Trockeneis zur Kühlung von Lebensmitteln,
- in Feuerlöschern,
- als Düngemittel in Gewächshäusern,
- in Verpackungen bzw. zur Verbesserung der Haltbarkeit von Lebensmitteln.

Als Industriegas findet CO₂ darüber hinaus in speziellen Prozessen in begrenzter Menge Anwendung. Auch Klimaanlage in Autos könnten in naher Zukunft verbreitet CO₂ als Kühlmittel nutzen. Eine nennenswerte direkte industrielle Anwendung findet CO₂ auch in etlichen Ländern in Enhanced Oil/Gas Re-recovery (EOR/EGR). Hierbei wird Kohlenstoffdioxid zur tertiären Förderung in die entsprechenden geologischen Reservoirs gedrückt, um mehr Rohöl oder Erdgas aus der jeweiligen Quelle fördern zu können.

Schon länger bekannte und gebräuchliche Anwendungen der direkten Nutzung sind in der Regel nicht mit einer ökologischen Motivation entwickelt worden.

CO₂-Nutzung nach chemischer Umwandlung

Darüber hinaus kann CO₂ in einer chemischen Umwandlung zur Produktion sowohl energetisch höherwertiger als auch niederwertiger Kohlenstoffverbindungen als Rohstoff dienen. Diese sogenannte stoffliche Nutzung als Baustein für Materialien, Chemikalien und Minerale ist seit Langem üblich in:

- pharmazeutischen Produkten (z. B. Kopfschmerztabletten),
- Lösungsmitteln,
- Düngemitteln (z. B. Harnstoff).

Darüber hinaus ist die stoffliche Nutzung von CO₂ heute bereits technisch möglich bei der Herstellung von:

- Kunststoffen und Schäumen,
- zementähnlichen Baustoffen (sog. Mineralen).

Bei diesen neuen Verfahren handelt es sich in der Regel um innovative Prozesse, die herkömmliche Produktionsprozesse ersetzen sollen, sich aber derzeit noch in einem sehr früheren

Entwicklungsstadium befinden oder erst kürzlich durch Durchbrüche in der Katalysatorforschung möglich wurden und deshalb zunächst in einem industriellen Maßstab demonstriert werden müssen.

Minerale / Mineralisierung:

Als „Mineralisierung“ wird ein Prozess der stofflichen Nutzung von CO₂ bezeichnet, durch den zum Beispiel industrielle Abfälle wie Asche und Sand mit CO₂ aus Abgasen zu sogenannten Mineralen verarbeitet werden können. Solche Minerale können zum Beispiel als zement- oder betonähnliche Baustoffe unter anderem für den Straßenbau genutzt werden.

Es ist auch möglich, Kohlenstoffdioxid als Rohstoff zu nutzen, um Energieträger wie flüssige Kraftstoffe in Form von Methanol, Diesel oder synthetischem Erdgas herzustellen. Insbesondere für solche sogenannten Power-to-X-Prozesse ist allerdings der Einsatz erneuerbarer Energie erforderlich, damit die Ökobilanz positiv ist. Mit CO₂ hergestellte Energieträger können der direkten Nutzung im Mobilitätsbereich dienen oder aber auch in Zukunft als Energiespeicher sinnvoll sein, um Spitzen in der Erzeugung erneuerbarer Energien zu nutzen.

Power-to-X – PtX/PtG/PtL:

„Power-to-X“ bezeichnet als Oberbegriff Prozesse, die Energie aus erneuerbaren Quellen, zum Beispiel in Form von Wasserstoff oder Strom gemeinsam mit CO₂ in unterschiedliche Energieträger umwandeln (zum Beispiel „Power-to-Gas“ – PtG, oder „Power-to-Liquids“ – PtL). Diese Technologien spielen in der Energiewende als Option zur Flexibilisierung und Speicherung von Spitzen in der Produktion von erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle, stellen aber auch eine großskalige Anwendungsmöglichkeit von CCU-Technologien dar. Aufgrund der niedrigen Preise fossiler Energie sind diese neuen Technologien derzeit allerdings nicht wettbewerbsfähig gegenüber konventionellen Kraftstoffen.

„End of life“ (Abschnitt 3. in der Kreisgrafik)

Auf dem Weg zu einem CO₂-Kreislauf bestehen Lücken vor allem noch in der „End of life“-Phase mit den Optionen Verbrennung, Deponie oder Recycling und bei der (erneuten) Emission nach der physikalischen Nutzung oder der Nutzung als Energieträger.

Kann die CO₂-Nutzung insgesamt CO₂-Emissionen reduzieren?

Der Einsatz von CCU-Technologien kann verschiedene schädliche Umweltauswirkungen der Industrie reduzieren, indem:

- fossile Rohstoffe durch CO₂ ersetzt werden können
- die eingesetzte Energie in manchen Prozessen reduziert werden kann
- CO₂-Emissionen zumindest temporär gespeichert werden können.

Die Nutzung von CO₂, das andernfalls emittiert worden wäre, ermöglicht über die Lebensdauer eines Produkts eine zeitliche Verzögerung von Emissionen. Möglicherweise kann sie diese sogar durch eine dauerhafte Bindung, z. B. in Zement, langfristig verhindern. Ein substantieller Beitrag zum Klimaschutz ist aufgrund der begrenzten Nutzungsmengen in Materialien jedoch momentan noch nicht absehbar. Nach Schätzungen der Dechema (2017) könnten in einem optimistischen Szenario 2050 in Europa jährlich etwa 290 Mio. Tonnen CO₂ in Polymeren und anderen Chemiebasisprodukten eingebaut werden. Bei der Produktion synthetischer Kraftstoffe – beispielsweise Methanol oder Dimethylether (DME) – wäre in Europa eine Verwendung von etwa 380 Mio. Tonnen CO₂ jährlich möglich. Hierbei ist zu beachten, dass das verwendete CO₂ nicht direkt dem Einsparpotential entspricht. Dieses läge für die genannte Schätzung der Dechema bei etwa 210 Mio. Tonnen CO₂ jährlich durch Basischemikalien und 288 Mio. Tonnen jährlich durch synthetische Kraftstoffe. Zum Vergleich: Der globale anthropogene CO₂-Ausstoß betrug im Jahr 2017 etwa 36.200 Mio. Tonnen (Quelle: www.global-carbonproject.org).

Ein Produkt, dessen Bestandteile mit CCU-Technologien hergestellt wurden, muss allerdings nicht zwingend verbesserte Umwelteigenschaften haben. Um eine Bewertung über den gesamten Lebenszyklus zu erstellen, sind viele Kriterien notwendig, welche die CO₂-Quellen und den Transport, den Produktionsprozess, die Nutzungsdauer sowie die Recycling- und Entsorgungsoptionen einbeziehen. Dieses Life Cycle Assessment (LCA) von CCU-Produkten zielt auf eine transparente Bewertung ihrer Umweltauswirkungen. Für eine Vergleichbarkeit sind jedoch einheitliche Kriterien notwendig, die bislang nur in Form von wissenschaftlichen Empfehlungen existieren.

Schafft CO₂-Nutzung ökonomischen Mehrwert?

Viele Unternehmen aus der Chemieindustrie und der Energiebranche sowie der Baustoffindustrie haben in den vergangenen Jahren in die industrielle Nutzung von CO₂ investiert. Die Gründe hierfür sind vielfältig: schwankende Rohstoffpreise, endliche fossile Ressourcen, neue Geschäftschancen sowie das Bestreben, die Emissionen zu reduzieren. Eine lokale ‚Versorgung‘ mit CO₂ für CCU-Technologien wäre dagegen langfristig gesichert, und im Vergleich zu fossilen Quellen teilweise sogar mit Kosteneinsparungen verbunden. Für Unternehmen bietet sich die Chance, Emissionen aus eigenen Industrieanlagen oder von Kooperationspartnern zu recyceln und somit unabhängiger von Rohstofflieferanten zu werden. Durch CCU-Prozesse kann im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren ein verbesserter ökologischer Fußabdruck möglich werden. Somit bieten CCU-Technologien die Chance kombinierter ökologischer und ökonomischer Vorteile im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung.

Auch aus volkswirtschaftlicher Sicht bergen CCU-Technologien Potenziale. Eine neue, lokale Rohstoffquelle könnte die regionale Chemie- und Baustoffindustrie im internationalen Wettbewerb stärken. Außerdem kann ein Innovationsvorsprung erreicht und das Know-how exportiert werden. Dies könnte zum wirtschaftlichen Wachstum beitragen und Arbeitsplätze schaffen bzw. erhalten. Die mögliche Kopplung von Sektoren durch CCU könnte Synergien schaffen und zu industriellen Symbiosen beitragen. Aufgrund gegenwärtig höherer Produktionskosten vieler CCU-Produkte im Vergleich zu herkömmlichen Produkten werden allerdings nicht alle technisch machbaren Technologien von der Industrie weiterverfolgt. Die Anreize, in CCU zu investieren, können auch von der CO₂-Preisentwicklung im EU-Emissionshandelssystem abhängig sein. Wegen der Unklarheiten über Kosten und Zugang zu erneuerbaren Energien bergen Investitionen insbesondere in CCU-basierte Kraftstoffe derzeit Risiken, die wenige Marktteilnehmer bereit sind, einzugehen.

Können Produkte mit CO₂ den

Kohlenstoffkreislauf schließen?

Die Möglichkeit der CO₂-Nutzung stellt nicht nur eine Prozessveränderung für die Chemie- und Baustoffindustrie dar. Vielmehr ist sie als Komponente eines Perspektivenwechsels zu verstehen: Die Entwicklung hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft verlangt eine Neubewertung des Umgangs mit vermeintlichem Abfall und endlichen Ressourcen. CCU-Technologien adressieren beide Aspekte: Die Nutzung eines Abgases, das als zentraler Treiber des Klimawandels gilt, kann gleichzeitig den Verbrauch fossiler Ressourcen reduzieren. In Kombination mit erneuerbaren Energien bietet CCU vielfältige Möglichkeiten, industrielle CO₂-Kreisläufe zu verbessern oder gar zu schließen.

Damit die Anwendung dieser Technologien ihr volles Potenzial als Beitrag zu einer Kreislaufwirtschaft entfalten kann, sind noch offene Fragen wie zum Beispiel zur Lebenszyklusanalyse und den politischen sowie wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der CO₂-Nutzung zu beantworten, zu bewerten und mögliche Auswirkungen aufzuzeigen. Dies sollte auf technischer wie auf gesellschaftlicher Ebene unter Beteiligung von Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik geschehen.

Was hat CCS mit CCU zu tun?

CCU wird häufig verwechselt oder gemeinsam betrachtet mit CCS (Carbon Capture and Storage), nicht zuletzt auch aufgrund der sehr ähnlichen Namensgebung und Abkürzung. Trotz einiger technologischer Überschneidungen weisen die beiden Konzepte jedoch erhebliche Unterschiede auf, sodass eine Vermischung von CCU und CCS aus vielerlei Gründen problematisch ist.

CCS – „Carbon Capture and Storage“ – bezeichnet die Abscheidung und anschließende geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid aus industriellen Abgasen mit dem Ziel, das CO₂ dauerhaft aus der Atmosphäre zu entfernen. Eine Speicherung gilt zum Beispiel als möglich in Salzwasser führenden unterirdischen Schichten und ehemaligen Lagerstätten von Erdöl und Erdgas. Trotz Gemeinsamkeiten in der möglichen Abscheidung von CO₂ aus industriellen Emissionen unterscheidet sich CCU grundlegend von der sogenannten „Carbon Capture and Storage“ (CCS)-Technologie. CCS als „End-of-Pipe“-Technologie strebt eine dauerhafte unterirdische Speicherung von CO₂ im Kontext der Nutzung fossiler Energieträger zur Emissionsreduktion an. Ein mögliches Anwendungsvolumen von CCS-Technologien wird als erheblich größer eingeschätzt als das von CCU-Technologien. Neben der Speicherung von CO₂ bieten CCS-Technologien keinen weiteren Nutzen. CCU hingegen bietet die Möglichkeit, CO₂-Emissionen als alternative

Kohlenstoffquelle ökonomisch sinnvoll zu verwenden und perspektivisch industrielle Kohlenstoffkreisläufe zumindest teilweise zu schließen.

In einigen Ländern, zum Beispiel China und den USA, werden CCU und CCS auch unter dem gemeinsamen Oberbegriff „Carbon Capture, Utilisation and Storage“ (CCUS) zusammengefasst. Häufig werden somit in der Forschungsförderung und Wissenschaftskommunikation beide Technologiekonzepte gemeinsam behandelt, wodurch die notwendige Differenzierung verloren geht.

„End-of-Pipe“ oder „integriert“?

Eine End-of-Pipe-Technologie (aus dem Englischen „end of pipe“: am Ende der Röhre) ist eine nachträglich hinzugefügte Umweltschutzmaßnahme. Solche Umweltschutzmaßnahmen verändern nicht den Produktionsprozess selbst, sondern verringern die Umweltbelastung durch nachgeschaltete Maßnahmen, wie etwa Abgasreinigungsanlagen. Solchen sogenannten additiven Umweltschutzmaßnahmen stehen integrierte Umweltschutzmaßnahmen gegenüber. Als solche bezeichnet man Maßnahmen, die bereits Herstellungsprozesse und Produkte umweltfreundlicher gestalten.

Weiterführende Informationen im Internet:

- 1. Studie IASS: CO₂ als Wertstoff. Herausforderungen und Potenziale für die Gesellschaft.
http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/iass_study_nov2016_de_co2-als-wertstoff.pdf
- 2. Studie Dechema [nur in englischer Sprache erhältlich: Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry].
https://dechema.de/dechema_media/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry-p-20002750.pdf
- 3. Zwischenstandsbroschüre der Fördermaßnahme CO₂Plus des BMBF
http://www.chemieundco2.de/fileadmin/Statuskonferenz/CO2plus_2018_A4_ezl.pdf