

# Welchen Beitrag grünes CO<sub>2</sub> zu einer klimaneutralen Wirtschaft leisten kann

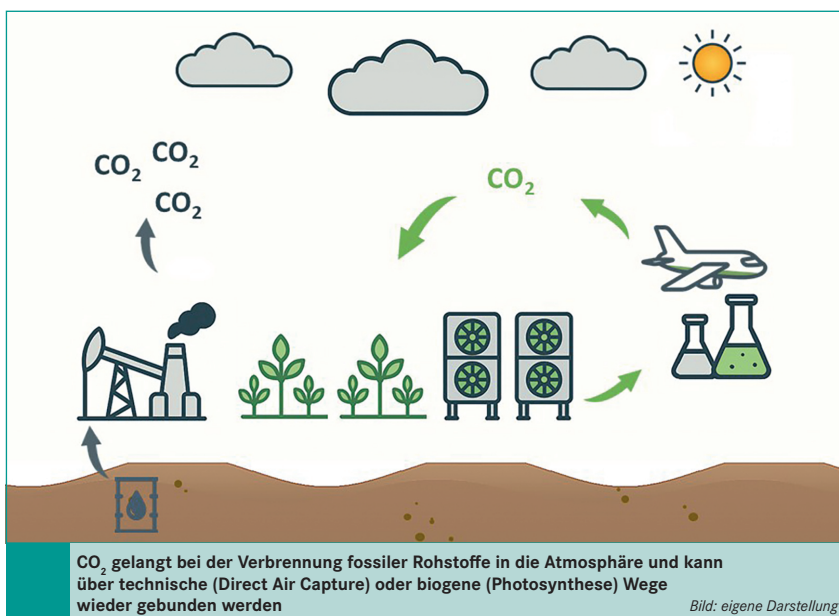
Christoph Zeiss, Alexander Scholz und Karin Arnold

*Kohlenstoff bleibt auch in einer klimaneutralen Wirtschaft unverzichtbar – ob für Kunststoffe, Spezialmaterialien oder innovative Chemikalien. Bisher stammen diese Rohstoffe fast ausschließlich aus fossilen Quellen, deren Einsatz künftig stark eingeschränkt werden muss. „Grünes CO<sub>2</sub>“ – biogen oder durch Direct Air Capture gewonnen – gilt daher als vielversprechende Alternative. Doch die Nutzung steckt noch in den Anfängen: Hoher Energiebedarf, fehlende Infrastruktur und mangelnde Wirtschaftlichkeit bremsen den Durchbruch, obwohl es für manche Bereiche kaum klimaneutrale Alternativen geben dürfte. Damit grünes CO<sub>2</sub> zur tragfähigen Kohlenstoffquelle wird, braucht es klare politische Rahmenbedingungen, gezielte Forschung und eine schrittweise Einführung.*

## Klimaneutrales Wirtschaften braucht andere Kohlenstoffquellen

Kohlenstoff stellt heute eine zentrale Grundlage für die Wertschöpfung in vielen Wirtschaftszweigen dar. Der Übergang zur Klimaneutralität wird sich daher auf alle diese Sektoren in unterschiedlicher Intensität auswirken [1]. Während in der Energieversorgung eine nahezu vollständige Abkehr vom Kohlenstoff möglich ist, werden einige Bereiche auch langfristig darauf angewiesen sein. So basiert die gesamte organische Chemie auf Kohlenstoff, aus der unverzichtbare Alltagsprodukte wie Kunststoffe, Lösungsmittel und Medikamente hervorgehen. Weitere Anwendungen reichen von Massengütern wie Düngemitteln bis hin zu Spezialprodukten wie Carbonfasern, Graphitelektroden, Abgasreinigungsmitteln, Schutzgasen, Trockeneis, Kohlensäure oder Filtermaterialien [2].

Auch wenn an Prozessalternativen geforscht wird, werden viele dieser Anwendungen auch in einer klimaneutralen Wirtschaft weiterhin Kohlenstoff benötigen. Die bisherigen fossilen Quellen wie Erdöl, Erdgas oder Kohle sollten dann jedoch nur sehr begrenzt genutzt werden, um klimawirksame CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden. Kompensationsmöglichkeiten bestehen zwar prinzipiell durch negative Emissionen, Verhinderung der Emissionen via Carbon Capture and Storage (CCS) oder auch eine geschlossene Kreislaufführung – diese werden aber aufwändig, mit hohen Systemkosten verbunden und nicht beliebig verfügbar sein [3]. Daher wird in naher Zukunft die Nutzung nicht-fossiler Kohlenstoffquellen sowie



die Kreislaufführung der bereits im System befindlichen Kohlenstoffe wichtiger.

Bereits heute ist CO<sub>2</sub> kein reines Abfallprodukt, sondern wird gezielt für unterschiedliche Prozesse als Rohstoff aufgefangen und erneut eingesetzt. Ein Beispiel hierfür ist die Lebensmittelindustrie, die seit Jahrzehnten CO<sub>2</sub> aus Punktquellen wie der Ammoniaksynthese für die Herstellung von Kohlensäure, Schutzgasen und Trockeneis nutzt. Dabei ist jedoch wichtig zu betonen, dass es sich um vergleichsweise sehr kleine Mengen und zudem überwiegend um graues CO<sub>2</sub> handelt (siehe Textkasten „CO<sub>2</sub>-Farbenlehre“). Das mögliche Anwendungsspektrum von CO<sub>2</sub> umfasst jedoch auch forschungsintensive, innovative Lösungen mit größerem Einsatzpotenzial.

Eine besondere Rolle nehmen sog. „Power-to-X“(PtX)-Prozesse ein, bei denen CO<sub>2</sub> eingesetzt, aber nicht dauerhaft gebunden

wird. Bei diesen Verfahren wird CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff zu Chemikalien und Treibstoffen umgesetzt. So kann mithilfe von grüner Energie und grünem Wasserstoff über eine Methanisierung (Power-to-Gas) synthetisches Methan als Erdgasersatz oder Treibstoff produziert werden. Alternativ lassen sich mithilfe der Methanol- oder Fischer-Tropsch-Synthese (Power-to-Liquid) aber auch zentrale Basischemikalien für Kunststoffe und synthetische Treibstoffe erzeugen.

Derzeit sind die Kosten für Produkte, die über PtX-Routen gewonnen werden, bedingt durch die hohe Energieintensität noch sehr hoch. Der breite Einsatz dieser Technologien zur Defossilisierung der Industrie hängt daher stark mit der Verfügbarkeit von kostengünstiger erneuerbarer Energie und grünem Wasserstoff zusammen. Diese Kraftstoffe könnten essenziell für eine Defossilisierung der

schwer elektrifizierbaren Sektoren wie dem Luft- und Schiffsverkehr sowie dem Schwerlastbereich sein, für die sich aktuell die größten Einschränkungen bei klimaneutralen Alternativen abzeichnen.

In den genannten Bereichen ist der Bedarf an Kraftstoffen bereits ebenso groß wie der Bedarf der chemischen Industrie [4], sodass ein Nachfragesog nach CO<sub>2</sub> als Rohstoff entstehen kann, wenn sich die Notwendigkeit für klimaneutrales Fliegen etc. aufgrund der normativen Rahmensetzung durchsetzt. Es ist aber zu beachten, dass es sich nur bei der Nutzung von grünem CO<sub>2</sub> um einen klimaneutralen Pfad handelt, da durch die Verbrennung der Kraftstoffe das CO<sub>2</sub> unmittelbar wieder klimawirksam wird.

Neben PtX produziert bzw. entwickelt die chemische Industrie zunehmend Kunststoffprodukte wie z. B. Polyurethane, die in Variation zu konventionellen Verfahren auch teilweise auf CO<sub>2</sub> basierend hergestellt werden können [5]. Einen weiteren wichtigen Verwertungsweg stellt die Einbringung von CO<sub>2</sub> in Baustoffen dar. Durch Mineralisierung kann CO<sub>2</sub> in Zement, Kalk oder Recyclingbeton als Carbonat gespeichert werden [6]. Dieses Verfahren hat zukünftig das Potenzial – abhängig von der „Farbe“ des eingesetzten CO<sub>2</sub> – Negativemissionen, also eine Senke für das Treibhausgas, zu generieren.

Darüber hinaus wird an Verfahren gearbeitet, über die CO<sub>2</sub> direkt mithilfe von Strom, Licht oder Mikroorganismen in wertvolle Basischemikalien umgewandelt werden kann. Hierzu zählen elektrochemische Verfahren, wie die CO<sub>2</sub>-Elektrolyse (z. B. iNEW-Projekt am Forschungszentrum Jülich), photokatalytische Reaktionen (z. B. FlowPhotoChem-Projekt am DLR) sowie biotechnologische Ansätze über Bakterien (z. B. Kopernikus-Projekt Rheticus). All diese hoch innovativen Verfahren könnten ein breites Produktspektrum erschließen, erfordern aber noch erhebliche Fortschritte bei Energieeffizienz, Selektivität, Skalierbarkeit und Wirtschaftlichkeit.

## Aktuelle Herausforderungen beim Einsatz von grünem CO<sub>2</sub>

### Physikalische Herausforderungen

Bei CO<sub>2</sub> handelt es sich um ein thermodynamisch sehr stabiles Molekül, wel-

ches zunächst unter hohem Energieeinsatz – durch die Nutzung von grünem Wasserstoff oder erneuerbarem Strom – in eine reaktive Form überführt werden muss. Daher ist die Herstellung von CO<sub>2</sub>-basierten Produkten technisch anspruchsvoll und sehr energieintensiv.

Für viele Anwendungen gibt es energetisch effizientere Alternativen. Batterieelektrische Fahrzeuge weisen z. B. im Personenverkehr eine fünfmal höhere energetische Effizienz auf als Fahrzeuge, die mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden [9]. Das chemische oder mechanische Recycling in der Kunststoffproduktion oder die Nutzung biogener Rohstoffe für chemische Synthesen vermeidet die vollständige Oxidation zu CO<sub>2</sub> und damit den hohen Energieaufwand zur Synthese komplexerer Moleküle.

### Wirtschaftliche Herausforderungen

Da die Aktivierung von CO<sub>2</sub> mit einem hohen Energiebedarf verbunden ist, resultieren daraus auch erhebliche Kosten, insbesondere solange grüne Energie

und grüner Wasserstoff begrenzt und teuer sind. Produkte auf Basis von grünem CO<sub>2</sub> konkurrieren aktuell noch mit Produkten aus fossilen Prozessen, die am Markt verfügbar und deutlich billiger sind – nicht zuletzt, weil Klima- und Umweltkosten nur unzureichend eingepreist werden.

Außerdem existieren bisher für die Nutzung von CO<sub>2</sub> kaum skalierbare Verfahren, die über Demonstrationsanlagen hinausgehen, weshalb für ein breites Produktspektrum die technologische Basis noch nicht vorhanden ist. Eine flächendeckende Entwicklung und anschließende Marktdurchdringung sind erst zu erwarten, wenn Produzenten tragfähige Gewinnerwartungen realisieren können. Dies hängt zentral an finanziellen und politischen Rahmenbedingungen, die aufgrund der gesellschaftlichen Ziele zur Erreichung der Klimaneutralität gesetzt werden.

### Systemherausforderung

Ein zentrales Hindernis für die Etablierung alternativer Nutzungsrouten von

#### CO<sub>2</sub>-Farbenlehre

Ebenso wie vom Wasserstoff bekannt, kann auch CO<sub>2</sub> nach „Farben“ unterschieden werden. Diese geben einen Hinweis auf die Art der Bereitstellung, während das Molekül sich technisch nicht unterscheidet. Aus der Verknüpfung der Herkunft mit den beschriebenen Nutzungspfaden lässt sich der Effekt der mehr oder weniger dauerhaften Emissionsminderung ableiten.

**Graues CO<sub>2</sub>** basiert auf fossilen Kohlenstoffen. In der Industrie fällt graues CO<sub>2</sub> an Punktquellen, wie z. B. in der Zementindustrie, an und kann dort aufgefangen bzw. abgeschieden werden. Es sollte perspektivisch nur für die Herstellung von Produkten genutzt werden, in denen das CO<sub>2</sub> dauerhaft gespeichert wird, anstatt nach kurzer Zeit in die Atmosphäre zu gelangen und so zur Klimaerwärmung beizutragen. Das Verfahren, in dem zunächst CO<sub>2</sub> an einer Punktquelle abgeschieden und anschließend in andere Produkte umgewandelt oder geologisch eingelagert wird, nennt sich Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS).

**Grünes CO<sub>2</sub>** wird hingegen in der Bilanzierung als klimaneutral angesehen. Es entsteht heute z. B. aus dem biogenen Anteil des Hausmülls in Müllverbrennungsanlagen oder bei der Herstellung von Biomethan aus Biogas. Der Großteil des biogenen CO<sub>2</sub> wird heute noch nicht eingefangen und stofflich genutzt, sondern in die Atmosphäre ausgestoßen. Biomasse selbst wird allerdings schon umfangreich als grüne Kohlenstoffquelle genutzt und ist zentraler Bestandteil wichtiger Wertschöpfungsketten wie Bio-Polymere oder Treibstoffe. Eine Ausweitung dieser Ressourcen für den Ersatz fossiler Kohlenstoffquellen könnte wegen Nutzungskonkurrenzen und Nachhaltigkeitsanforderungen auf Widerstände stoßen. Zusätzlich zu biogenem CO<sub>2</sub> zählt auch aus der Luft über das Direct-Air-Capture-Verfahren (DAC) abgeschiedenes CO<sub>2</sub> als grün. Aufgrund des hohen Bedarfs an Flächen und erneuerbaren Energien, wird die Erzeugung von CO<sub>2</sub> aus DAC in Deutschland jedoch keine große Rolle spielen [7]. Es besteht aber die Möglichkeit, langfristig über diesen Technologiepfad Grundstoffe für die chemische Industrie oder Kraftstoffe außerhalb Deutschlands zu erzeugen und zu importieren [8].

grünem CO<sub>2</sub> liegt derzeit in der noch unzureichend gelösten Rohstoffbereitstellung und -sammlung. Viele grüne CO<sub>2</sub>-Emissionen fallen dezentral an. Dies gilt insbesondere für Biogasanlagen, Biomasseheizkraftwerke, Kläranlagen oder kleinere industrielle Fermentationsprozesse, etwa in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie.

Aber auch größere Punktquellen wie Müllverbrennungsanlagen mit biogenem Anteil oder Bioethanolanlagen liegen nicht immer direkt an möglichen CO<sub>2</sub>-Nutzungsstandorten. Die Erschließung dieser CO<sub>2</sub>-Mengen benötigt daher eine aufwändige Sammlung, Aufreinigung und Logistik, um sie zu den zentral liegenden chemischen Verwertungsanlagen zu bringen.

Zur Verdeutlichung: Aus einer durchschnittlichen Ammoniak-Anlage werden jährlich rund 200.000 t CO<sub>2</sub> zur Verfügung gestellt. Eine schon recht große Biomethananlage scheidet im Jahr rund 15.000 t CO<sub>2</sub> ab. Es müssten also – grob überschlagen – etwa zehn Punktquellen zusammengefasst werden, um einem potenziellen Abnehmer dieselbe Menge an Rohstoff bereitzustellen.

Die dafür benötigte CO<sub>2</sub>-Infrastruktur befindet sich aktuell noch in der Planung und bietet daher kurz- und mittelfristig keine Lösung für diese Herausforderung. Zusätzlich ist sie aktuell eher auf die Verbindung zentraler fossiler CO<sub>2</sub>-Punktquellen wie Zement- und Kalkwerke mit Nordseehäfen ausgelegt als auf die Verbindung inländischer Produktions- und Nutzungsstandorte von grünem CO<sub>2</sub>.

Soll etwa in der chemischen Industrie eine Produktlinie testweise auf biogenes CO<sub>2</sub> umgestellt werden, so wird dafür oft schon mehr CO<sub>2</sub> benötigt, als aus dem lokalen Umfeld zur Verfügung gestellt werden kann. Daher benötigt auch eine erste, möglicherweise noch nicht dauerhafte Entscheidung für einen solchen Testbetrieb bereits erheblichen Infrastrukturaufwand. Der Transport würde in solchen Fällen per LKW durchgeführt, wofür das CO<sub>2</sub> energieaufwendig verflüssigt werden muss. Das würde in manchen Fällen die Einsparung von Emissionen ad absurdum führen.

## Zentrale Schritte zur sinnvollen Nutzung von grünem CO<sub>2</sub>

### Schritt 1: Identifikation von Einsatzoptionen mit Vorteilen für grünes CO<sub>2</sub>

Grünes CO<sub>2</sub> kann aufgrund des hohen Energieaufwandes nicht mit jeder klimafreundlichen Option zum Ersatz fossiler Kohlenstoffe konkurrieren. Es sind aber Anwendungen denkbar, die aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Alternativen ihre Berechtigungen haben oder sogar explizite Vorteile bieten, bspw. die Produktion von nachhaltigen Flugkraftstoffen.

Damit Unternehmen in solche Prozesse investieren, braucht es im Vorfeld eine Einschätzung, welche CO<sub>2</sub>-basierten Produkte (z. B. Kunststoffe) gegenüber welchen Alternativen aus heutiger Sicht langfristig wettbewerbsfähig sind oder werden. Aufgrund der hohen Systemkomplexität zukünftiger klimaneutraler Wertschöpfungsoptionen sollte dies verstärkt Gegenstand wissenschaftlicher und angewandter Forschung sein.

### Schritt 2: Eine politische Flankierung für grünes CO<sub>2</sub> zur Wettbewerbsfähigkeit

Grünes CO<sub>2</sub> muss sich als Kohlenstoffquelle mit fossilen Alternativen messen. Damit das zum Erfolg führt, muss es eine politische Flankierung geben, die es Unternehmen erleichtert, in solche innovativen Prozesspfade zu investieren. Dazu sind unterschiedliche Instrumente vorstellbar, welche sowohl auf das Angebot zielen (bspw. über Investitionszuschüsse oder Carbon Contracts for Difference) als auch die Nachfrage adressieren – denkbar sind hier Einsatzquoten für grünes CO<sub>2</sub> in schwer elektrifizierbaren Sektoren.

Allerdings braucht es mit Blick auf die investitions- und klimapolitische Richtungssicherheit auch klare Regeln zur Zulässigkeit der CO<sub>2</sub>-Quelle, Zertifizierung, Nachweisführung und Klimawirkung über den Lebenszyklus. Auf europäischer Ebene sind mit RED III und ReFuelEU bereits erste Bausteine vorhanden, diese müssen aber weiterentwickelt und konkretisiert werden, damit grünes CO<sub>2</sub> einen nennenswerten Anteil an einer klimaneutralen Wirtschaft haben kann.

### Schritt 3: Sammlung und Transport von grünem CO<sub>2</sub> an Verbrauchsschwerpunkte

Grünes CO<sub>2</sub> fällt dezentral, z. B. in Biogasanlagen, an und muss zu den Abnehmern transportiert werden, die daraus weitere Produkte herstellen. Die dafür notwendige Infrastruktur hat Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Produkte und muss zum großen Teil neu errichtet werden.

Derzeit sind solche Projekte nicht Bestandteil der Planung der CO<sub>2</sub>-Infrastruktur, es könnten aber flexible Optionen wie z. B. CO<sub>2</sub>-Hubs (an denen CO<sub>2</sub> aus diversen Transportmitteln zusammengebracht, umgeschlagen und weitertransportiert wird) mitgedacht und geplant werden. Dies setzt aber zuerst Planungen für Projekte mit grünem CO<sub>2</sub> in größerem Maßstab voraus, die es derzeit noch nicht gibt.

### Schritt 4: Schrittweiser Einstieg in die Nutzung von grünem CO<sub>2</sub>

Die Notwendigkeit einer vollständig klimaneutralen Wirtschaft beginnt in Deutschland im Jahr 2045, auf europäischer Ebene 2050. Für den Erhalt der Industrie in Deutschland ist es aber gefährlich, auf diesen Zeitpunkt zu warten und dann zu versuchen, auf einen Schlag die Produktion auf Klimaneutralität umzustellen.

Deswegen ist es nötig, den Einsatz von grünem CO<sub>2</sub> schrittweise vorzubereiten, damit die Technologien entwickelt, Kosteneffizienzpotenziale gehoben und neue Wertschöpfungsketten eingeführt werden können. Ähnliche Strategien gibt es bei dem Einsatz erneuerbarer Energien im Strom- und Wärmebereich oder bei der Abkehr von fossilen Kraftstoffen. Wenngleich es für Teilbereiche wie den Luftverkehr bereits stufenweise Einsatzquoten gibt, fehlt bislang eine integrierte, sektorübergreifende Roadmap für den Markthochlauf von grünem CO<sub>2</sub> jenseits einzelner Nischen.

## Quellen

- [1] Zeiss, Christoph: Kohlenstoffwirtschaft im Wandel: Strategien für Klimaneutralität im Mitteldeutschen Revier. Wuppertal, 2025.
- [2] In4climate.RR: Vielseitigkeit fester Kohlenstoffe und Herausforderungen der klimaneutralen Substitution. Düsseldorf, 2025, abrufbar unter: <https://www.rheinisches-revier.nrw/>

- fileadmin/user\_upload/2025\_FesterKohlenstoff\_cr-IN4climateRR.pdf
- [3] Block, Simon et al.: Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementierung von CCU, CCS und CDR. Handlungsempfehlungen für die Carbon-Management-Strategie des Bundes. Zukunftsimpuls, Nr. 30. Wuppertal, März 2025, abrufbar unter: [https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/publications/ZI30\\_Carbon-Management-Strategie.pdf](https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/publications/ZI30_Carbon-Management-Strategie.pdf)
- [4] Koste, Ines und Oliver Opel: Defossilisierung der chemischen Industrie und des Schwerlastverkehrs durch grünes CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle. Schriftenreihe Interdisziplinäre Energieforschung des ITE. Heft 12, 2024, online abrufbar unter: <https://doi.org/10.48591/2qyy-hh11>
- [5] Scholz, Alexander et al.: Das petrochemische System in Deutschland und Westeuropa: regionale Analyse der Polymer-Produktion in Deutschland, den Niederlanden und Belgien. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Green Feedstock for a Sustainable Chemistry - Energiewende und Ressourceneffizienz im Kontext der dritten Feedstock-Transformation der chemischen Industrie“. Wuppertal, Februar 2023, abrufbar unter: <https://doi.org/10.48506/OPUS-8146>
- [6] Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, November 2020, abrufbar unter: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/dekarbonisierung-von-zement-und-beton-minderungspfade-und-handlungsstrategien>
- [7] Block, Simon und Peter Viebahn: „Direct Air Capture in Deutschland: Kosten und Ressourcenbedarf eines möglichen Rollouts im Jahr 2045“. In: „et“, 72. Jg., Heft 4, S. 14-17.
- [8] Kloo, Ylva et al.: Wege zu einer Netto-Null-Chemieindustrie – eine Meta-Analyse aktueller Roadmaps und Szenariostudien. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GreenFeed. Teilbericht 2. Wuppertal, April 2023, abrufbar unter: [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8168/file/8168\\_GreenFeed\\_Chemieindustrie.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8168/file/8168_GreenFeed_Chemieindustrie.pdf)
- [9] Transport & Environment: „E-fools: why e-fuels in cars make no economic or environmental sense“. April 2021, abrufbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/842490/8b933a33b2c9fdedac375996de237bbf/Artikel-1-Jekaterina-Boening-data.pdf>

---

*Dipl.-Biol. C. Zeiss, Senior Researcher,  
A. Scholz, M. Sc., Senior Researcher,  
Dr.-Ing. K. Arnold, Co-Leiterin des  
Forschungsbereichs Systeme und  
Infrastrukturen, Wuppertal Institut für  
Klima, Umwelt, Energie gGmbH,  
Wuppertal  
karin.arnold@wupperinst.org*