



Strombasierte Kraftstoffe: Die Rolle des Kohlenstoffs

Die Bundesregierung hat im Bundes-Klimaschutzgesetz verbindliche Treibhausgas-Emissionsminderungen festgelegt. Auch der Verkehr muss hierzu einen signifikanten Beitrag leisten. Um diese Ziele zu erreichen, spielen erneuerbare Kraftstoffe (biogene und strombasierte Kraftstoffe) eine entscheidende Rolle, denn nicht jede Anwendung im Verkehr lässt sich elektrifizieren. Für Anwendungen wie die Luftfahrt oder die internationale Schifffahrt werden auch langfristig flüssige Kraftstoffe benötigt, deren Verbrennung CO₂ ausstößt. Um einen treibhausgasmindernden Gesamteffekt zu erzielen, muss dieses CO₂ mittelfristig Nachhaltigkeitskriterien erfüllen.

Kohlenstoff als Bestandteil strombasierter Kraftstoffe

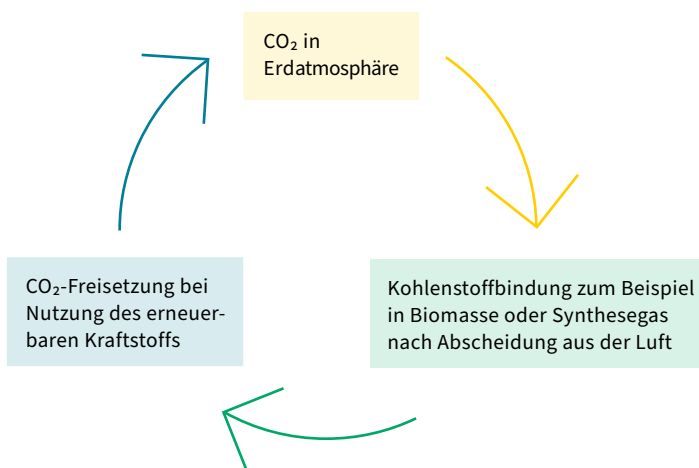
Was sind strombasierte Kraftstoffe?

Strombasierte Kraftstoffe werden aus erneuerbarem Wasserstoff (H₂) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) hergestellt. Der dafür benötigte Wasserstoff (H₂) wird durch Elektrolyse gewonnen. Dabei wird Wasser (H₂O) mit Hilfe von erneuerbarem Strom in seine Bestandteile Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O) aufgespalten. Der entstandene Wasserstoff wird dann mit CO₂ zu einem Synthesegas umgewandelt und zu Kraftstoff weiterverarbeitet. Strombasierte Kraftstoffe werden daher auch Power-to-Liquid (Strom zu Flüssigkraftstoffen, kurz PtL) Kraftstoffe, renewable

fuels of non-biological origin (erneuerbare Kraftstoff nicht-biogenen Ursprungs, kurz RFNBO) oder im regulatorischen Zusammenhang auch E-Fuels genannt. Die meisten strombasierten Kraftstoffe bestehen aus Kohlenwasserstoffen, also chemischen Verbindungen aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Der dabei genutzte Kohlenstoff muss aus bestimmten Quellen stammen, um einen treibhausgasmindernden Gesamteffekt zu erzielen. Eine Ausnahme bilden reiner Wasserstoff und Ammoniak, welche auch in Reinform als Kraftstoff verwendet werden können.

Grafik 1: Der Kohlenstoffkreislauf

Vereinfachte Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs mit erneuerbaren Kraftstoffen



Wie funktioniert der Kohlenstoffkreislauf?

Kohlenstoff (C) ist in großen Mengen als CO₂ in der Erdatmosphäre enthalten. Pflanzen, Algen und Mikroorganismen betreiben Photosynthese, wobei sie CO₂ aus der Erdatmosphäre ziehen. Dabei bauen sie den Kohlenstoff aus dem CO₂ in neue Moleküle ein (beispielsweise in Kohlenhydrate) und binden ihn in Form von Biomasse. Bei der energetischen Nutzung dieser Biomasse (als Nahrung oder Biokraftstoff) wird der Kohlenstoff in Form von CO₂ wieder an die Atmosphäre gegeben – es entsteht ein Kohlenstoffkreislauf (siehe Grafik 1).

Kann auch Technologie den Kohlenstoffkreislauf schließen?

Neben der Photosynthese in der Natur gibt es auch technische Verfahren, die CO₂ aus der Luft filtern. Aus dem gewonnenen CO₂ kann dann wie oben beschrieben ein Kraftstoff hergestellt werden. Während der Verbrennung dieses Kraftstoffs wird das darin gebundene CO₂ wieder in die Erdatmosphäre ausgesetzt. Erneut entsteht ein Kreislauf.

Welche rechtlichen Vorgaben gelten für erneuerbare strombasierte Kraftstoffe?

Erneuerbare strombasierte Kraftstoffe müssen einen bestimmten Prozentsatz an Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) gegenüber dem Referenzwert für fossile Kraftstoffe einsparen. Nach Definition der Erneuerbaren Energien Richtlinie ([Renewable Energy Directive, RED III](#)) der Europäischen Union (EU) gilt die Vorgabe, dass für RFNBOs mindestens 70 Prozent weniger THG-Emissionen anfallen müssen als für fossile Kraftstoffe. Übergangsweise erlaubt die europäische Kommission hierfür auch die Verwendung von CO₂ aus nicht-erneuerbaren Quellen. Zudem gibt es regulatorische Anforderungen hinsichtlich erneuerbarem Strombezug, CO₂ Bezug und THG-Bilanzierung.

Verfahren zur Gewinnung von Kohlenstoff

Für die Erzeugung von strombasierten Kraftstoffen werden große Mengen an Kohlenstoff benötigt, wobei dieser nur aus bestimmten Quellen zulässig ist. Der Kohlenstoff für die Produktion von kohlenwasserstoffbasierten erneuerbaren Kraftstoffen kann auf verschiedene Weisen gewonnen und zur Verfügung gestellt werden.

Für RFNBOs darf das CO₂ bis 2036 aus Stromerzeugungsprozessen, bis 2041 aus Prozessemissionen (z. B. Zementherstellung) und auf unbestimmte Zeit aus Atmosphärenabscheidung sowie aus biogenen Reststoffen stammen ([Europäische Kommission 2023](#)).



Direct Air Capture (DAC) für die Kohlenstoffgewinnung

Hierunter fallen Technologien mit deren Hilfe CO₂ direkt aus der Atmosphäre extrahiert werden kann. Dabei wird das CO₂ entweder in einer Lösung oder auf einem Trägermaterial gebunden und anschließend wieder gelöst.

- + nur geringe Anforderungen an Standort und dadurch theoretisch sehr gut skalierbar
- + direkte Reduzierung der CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre (essenziell, um die CO₂-Konzentrationen auf ein Vorindustrialisierungsniveau zu reduzieren)
- aufgrund geringer CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre sehr energieintensiv und teuer
- noch nicht ausgereift genug für die Anwendung im industriellen Maßstab

Fossile Punktquellen für die Kohlenstoffgewinnung

Punktquellen sind Orte oder Einrichtungen von welchen CO₂-reiche Abgase ausgehen, wie zum Beispiel Zementwerke, Stahlwerke, Heizkraftwerke oder auch große Containerschiffe. Bei fossilen Punktquellen sind nur solche erlaubt, die in einem Staat mit einem „wirksamen CO₂ Bepreisungssystem“ ([Europäische Kommission 2023](#)) angesiedelt sind. Das umfasst derzeit nur Länder, welche Teil des Emissionshandelssystems der EU (European Union Emissions Trading System, EU ETS) sind sowie die Schweiz und Großbritannien. Die nutzbaren CO₂-Mengen sind deshalb begrenzt.

- + hohe CO₂-Konzentrationen erleichtern die Extraktion
- + an Industriestandorten ist Infrastruktur bereits vorhanden, ermöglicht unter Umständen die Weiterverarbeitung zu erneuerbaren Kraftstoffen vor Ort
- CO₂ stammt aus fossilen Quellen und soll langfristig nicht mehr in die Atmosphäre emittiert werden, die Nutzung wäre also nur eine Übergangslösung. Langfristig soll fossiles CO₂ zur Erreichung der Klimaziele vermieden und nur unvermeidbares CO₂ abgeschieden und gespeichert werden.
- Abgase enthalten oft Verunreinigungen, die die Extraktion des CO₂ behindern können. Zudem besteht bei unbegrenzter Anrechenbarkeit die Gefahr von Lock-in Effekten.

Biogene Punktquellen für die Kohlenstoffgewinnung (Bioenergy with Carbon Capture and Utilisation, BECCU)

Biomasse wird zum Beispiel in Biogasanlagen zur Methanherzeugung eingesetzt. Das dabei entstehende CO₂ kann gesammelt und für die Erzeugung von RFNBOs genutzt oder langfristig gelagert werden.

- + Biomasse ist ein nachwachsender Rohstoff
- + Verwendung von biologischen Abfall- und Reststoffen möglich
- Biomasse ist ein begrenzter Rohstoff
- Nach der RED darf für RFNBOs kein CO₂ aus Biomasse genutzt werden, die nur für diesen Zweck verbrannt wird

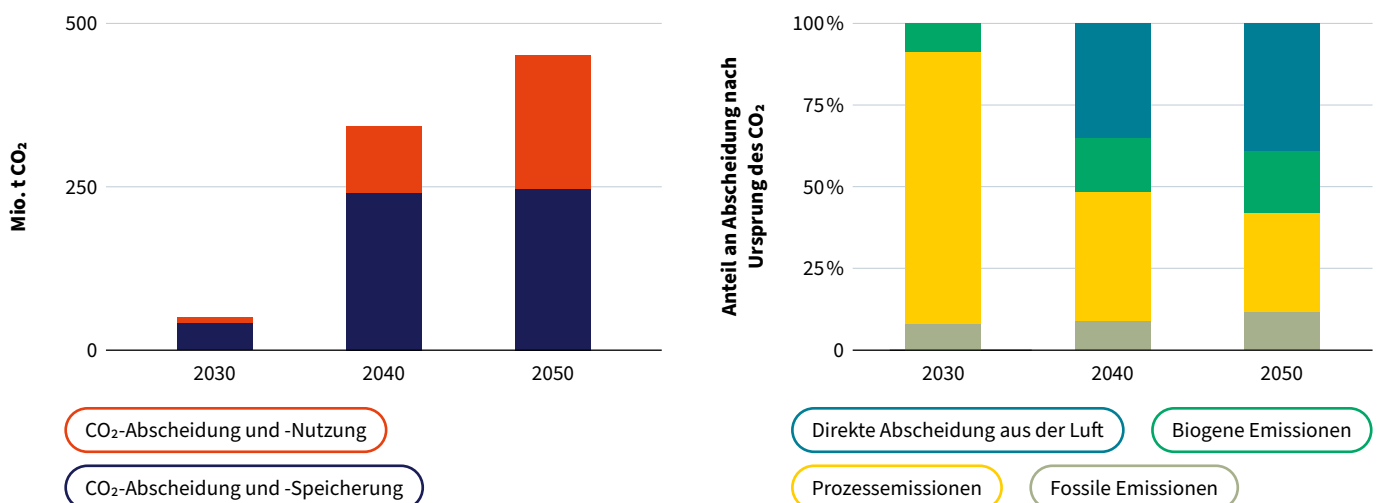
Verfügbarkeit und Bedarf von Kohlenstoff als Ressource

Bei der Nutzung des CO₂ für die Produktion von erneuerbaren Kraftstoffen spricht man vom sogenannten CCU (Carbon Capture and Utilisation) beziehungsweise von Kohlenstoffabscheidung und -nutzung. Die Nutzung ist dabei nicht auf erneuerbare Kraftstoffe begrenzt, sondern kann auch Chemikalien und Werkstoffe einschließen. Alternativ zu CCU, kann auch CCS (Carbon Capture and Storage), also Kohlenstoffabscheidung und -speicherung, betrieben werden. Das Ziel ist ein möglichst dauerhafter Entzug des CO₂ aus der Erdatmosphäre, beispielsweise durch unterirdische Speicherung in tiefen Sedimentschichten.

Um ihren Treibhausgasausstoß zu verringern, plant die EU bis 2040 etwa 280 Millionen Tonnen CO₂ zu speichern

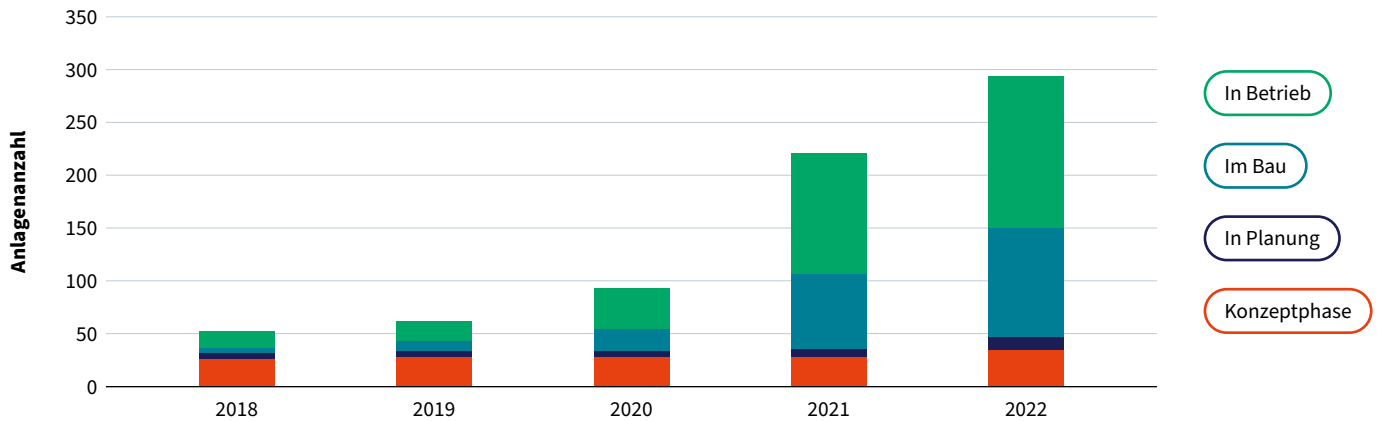
oder weiterzuverwenden. Bis 2050 ist sogar eine Abscheidung von 450 Millionen Tonnen CO₂ vorgesehen (siehe Grafik 2). Vorhersagen, um wie viel der CCUS-Markt bis 2030 wachsen wird gehen aktuell noch auseinander. Die Anzahl der weltweit geplanten Projekte zur CO₂-Abscheidung hat in den letzten Jahren stark zugenommen (siehe Grafik 3). Studien deuten jedoch darauf hin, dass ab Mitte der 2030er-Jahre mit einem starken Anstieg des Bedarfs und einer geringeren Verfügbarkeit auf Grund von regulatorischen Verpflichtungen zu rechnen ist. Dieser Nachfrageüberhang könnte durch DAC-Projekte adressiert werden. Ein Technologiehochlauf hängt jedoch stark von der Zahlungsbereitschaft ab.

Grafik 2: Prognostizierte Menge des in der EU zur Speicherung und Nutzung abgeschiedenen CO₂ (linkes Schaubild) und Anteile des abgeschiedenen CO₂ nach Ursprung (rechtes Schaubild)



Quelle: [EU industrial carbon management strategy 2024](#)

Grafik 3: Entwicklung von CCUS-Projekten in den Jahren 2018 bis 2022



Quelle: [International Energy Agency IEA 2022](#)

Infrastruktur und Verteilung von Kohlenstoff: Carbon Management Strategien

Neben der Bereitstellung von CO₂ als Rohstoff, ist auch die Frage nach seiner Verteilung noch offen. Eine Möglichkeit bietet ein CO₂-Pipelinennetz ähnlich dem für Wasserstoff oder Erdgas. Die EU Industrial Carbon Management Strategie zielt daher darauf ab, CCU/CCS-Technologien durch die Entwicklung eines regulatorischen und investiven Rahmens zu unterstützen. Im Rahmen des geplanten Kohlendioxid-speicherungs- und -transportgesetzes (KSpTG) werden rechtliche Rahmenbedingungen für den Transport und die Speicherung von CO₂ in Deutschland festgelegt. Weiterhin soll das Hohe-See-Einbringungsgesetz (HSEG) angepasst sowie Artikel 6 des London-Protokolls ratifiziert werden, um CCS in Offshore-Speichern zu ermöglichen.

Einen breiteren Ansatz fasst die deutsche Bundesregierung mit ihrer Carbon Management-Strategie (CMS) ([Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, BMWK 2024](#)) in welcher die Grundlagen zur Nutzung von CCU/CCS-Technologien, von CO₂-Transport und von CO₂-Speicherung festgelegt werden sollen. Neben der CMS plant die Bundesregierung, im Rahmen der Langfriststrategie Negativemissionen ([BMWK 2024](#)), den Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen festzulegen.

Die geplanten Inhalte der deutschen CMS umfassen:

- Anwendungsgebiete für CCUS
- Förderung von CCUS
- Klimaneutralität 2045 sicherstellen
- Transportinfrastruktur für CO₂
- Speicherung von CO₂

Innerhalb der Strategie besteht noch Klärungsbedarf, welches CO₂ für Speicherung und welches für Nutzung vorgesehen ist. Auch die Ausgestaltung der Preise für den Rohstoff CO₂ im Bezug auf die Produktion von strombasierten Kraftstoffen ist noch offen.