

Global Energy Perspectives

gefördert aus Kapitel 2302, Titel 687 01

BMZ-Abschlussreport / Basisdokument

Global Energy Solutions e.V.

Teil 1: Grundelemente zur Vermeidung von Treibhausgasen und Herstellung klimaneutraler Energieträger (technischer Werkzeugkasten)

Stand 08. August 2023

Kapitel 2-9

Autorenteam:	
Siddhant Bane	Joern Becker
Ulrich Begemann	Leon Berks
Christof von Branconi	Simon Göss
Prof. Dr. Estelle Herlyn	Dr. Wilfried Lyhs
Dr. Tobias Orthen	Dr. Ludolf Plass
Dr. Hans-Peter Sollinger	Dr. Jens Wagner
Dr. Hans Jürgen Wernicke	

Erklärung zum Urheberrecht

Das nachfolgende Dokument ist grundsätzlich ausschließlich für den Empfänger bestimmt. Eine Weitergabe an Dritte oder die Nutzung für Dritte ist – auch auszugsweise – nicht gestattet.

Dem Empfänger des Dokuments wird eine einfache, nicht übertragbare, nicht unterlizenzierbare, eingeschränkte Lizenz gewährt, das Dokument für persönliche, nicht kommerzielle, private Zwecke zu nutzen.

Ulm, im Juni 2023

Global Energy Solutions e.V.

Lise-Meitnerstr. 9

89081 Ulm

Vorsitzender: Christof v. Branconi (Christof.Branconi@Global-Energy-Solutions.org)

2.9 Carbon Capture and Usage (CCU)

2.9.1 Einleitung

Der Klimawandel stellt uns vor die Herausforderung, CO₂-Emissionen drastisch zu reduzieren und neue Wege zu finden, um mit den verbleibenden Emissionen umzugehen. Eine wichtige Möglichkeit ist das Abfangen von CO₂ aus Abgasen z.B. von Kraftwerken oder aus industriellen Prozessen (z.B. der Zementindustrie). Man spricht in diesem Zusammenhang von „Carbon Capture“ (CC). CO₂ kann auch direkt aus der Atmosphäre – dies allerdings zu deutlich erhöhten Energie- und Kostenaufwendungen – gefiltert werden („Direct Air Capture“ oder DAC). Mit den unterschiedlichen Verfahren, deren Vor- und Nachteilen beschäftigt sich der vorliegende Bericht ausführlich im vorangegangenen Kapitel 2.8.

Es gibt im Wesentlichen zwei Wege, wie mit dem abgefangenen CO₂ umgegangen werden kann. Bei „Carbon Capture and Storage“ (CCS) wird das CO₂ dauerhaft verpresst, z.B. in geologischen Formationen tief im Erdboden. Hierauf geht dieser Bericht ebenfalls in Kapitel 2.8 ein. Eine weitere Möglichkeit ist, das CO₂ einer weiteren Nutzung zuzuführen, entweder in einem Kohlenstoff-Kreislauf oder produktgebunden. Als Überbegriff dafür wird häufig der Begriff „Carbon Capture and Utilization“ (CCU) verwendet. In seinem 2022 veröffentlichten sechsten Sachstandsbericht nennt das Intergovernmental Panel on Climate Change die Abscheidung und Nutzung von Kohlenstoff erstmalig als geeignete Lösung zur Eindämmung des Klimawandels.⁴⁴⁴ Mehrere Zukunftsszenarien für eine Netto-Null in der Chemieindustrie bis zum Jahr 2050 zeigen weiterhin, dass zwischen 10 – 30 % der Nachfrage des produktgebundenen Kohlenstoffs aus der Nutzung von CO₂ stammen könnte.⁴⁴⁵

Heute ist noch das sogenannte „Enhanced Oil / Gas Recovery (EOR / EGR)“ die wichtigste Nutzungsform von CO₂. Bei EOR z.B. wird CO₂ in aktive Ölreservoirs injiziert, um mehr Öl zu fördern. Eine andere, ganz bedeutende mögliche Verwendung von CO₂ ist die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen. Dieser, für die Klimaneutralität im Bereich der Mobilität ganz essentielle Baustein, wird in diesem Bericht ausführlich im Kapitel 2.7 dargestellt. CO₂ kann aber auch in Produkte der chemischen Industrie wie Methanol, Harnstoff oder Plastik umgewandelt werden. Die Verwendung von CO₂ kann in diesem Zusammenhang nicht nur dazu beitragen, die Abhängigkeit von fossilen Ausgangsstoffen zu verringern, sondern auch neue Märkte und Technologien schaffen.

Dies ist aus Sicht der chemischen Industrie wichtig, die für erhebliche Mengen CO₂-Emissionen verantwortlich ist. Diese entstehen zum großen Teil durch die Nutzung fossiler Brennstoffe, die für die benötigte Prozesswärme vieler chemischer Reaktionen notwendig ist. Die

⁴⁴⁴Vgl. (IPCC, 2022)

⁴⁴⁵Vgl. (Kähler, 2023).

Nutzung eines steigenden Anteils erneuerbarer Energien kann dazu beitragen, die Energieversorgung klimaneutraler zu machen. In der chemischen Wertschöpfung wird Kohlenstoff allerdings weiterhin für die meisten Produkte benötigt werden. Neben der Energieversorgung muss es daher ein Ziel sein, die chemische Produktion unabhängig von fossilem Kohlenstoff zu machen. Hier kann ausgerechnet CO₂ Abhilfe schaffen. Es kann fossile Rohstoffe wie Öl und Gas ersetzen und damit den Einstieg in die Kreislaufwirtschaft von CO₂ ermöglichen. Damit könnte beispielsweise der CO₂-Fußabdruck der chemischen Industrie verringert und ein weiterer Abnehmer für die Nutzung von zuvor aus der Atmosphäre entfernten CO₂ gefunden werden. Dr. Helmut Leibinger, Leiter Anlagen- und Verfahrenstechnik bei Rohrdorfer Zement sagt: „Mit CO₂ als Kohlenstoffquelle kann Deutschland das Klima schützen und zugleich unabhängiger von Erdöl und Erdgas werden. Zudem bleiben die Wertschöpfung und damit auch Arbeitsplätze im Land“.⁴⁴⁶ Allerdings sind in der Regel neue Verfahrensabläufe erforderlich, um CO₂ als chemischen „building block“ verwenden zu können.

Alternativ können diese Aufgabe z.B. Mikroorganismen erledigen. Folglich befasst sich dieses Kapitel auch mit der Erzeugung von Biomasse unter Verwendung von zuvor abgefangenem CO₂. Abschließend wird die sog. Mineralisierung oder Karbonatisierung von CO₂ geschildert. Die bei letzterem generierten Produkte können z.B. der Bauindustrie dienen und deren CO₂-Fußabdruck absenken.

Abbildung 178 gibt einen guten Überblick über die verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten von CO₂. Sie kann als Einführung in die Thematik dienen, obwohl dieses Kapitel nur ausgewählte Wege behandelt.

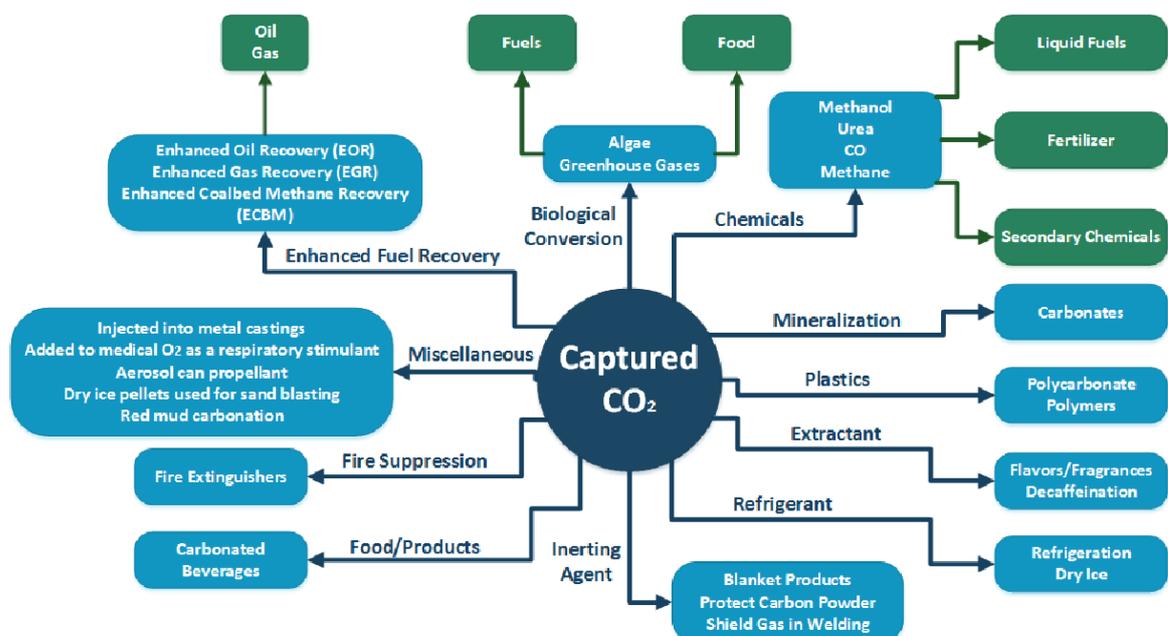


Abbildung 178: Übersicht über die unterschiedlichen Verwendungsmöglichkeiten von abgefangenem CO₂ (CCU)
Quelle: R. Debek, „Catalysts for Chemical CO₂ Utilization“, Thesis, Sorbonne Univ., 2016

⁴⁴⁶ Vgl. (Ingenieur.de, 2022)

2.9.2 CO₂-Verwendung in der chemischen Industrie

Die chemische Industrie ist weltweit für etwa 12 % der CO₂-Emissionen verantwortlich.⁴⁴⁷ Etwa 30 % des CO₂-Fußabdrucks der Produkte entstammen aus der aufgebrauchten Energie, 70 % aus den verwendeten Rohstoffen.⁴⁴⁸ Um die Klimabilanz der chemischen Industrie zu verbessern, gewinnt die Verwendung von CO₂ als Rohstoffersatz zunehmend an Bedeutung.⁴⁴⁹ Es ist sowohl ein vielversprechender Ansatz zur Reduzierung der CO₂-Emissionen als auch zur Förderung der Nachhaltigkeit im Sinne einer CO₂-Kreislaufwirtschaft. Die Umwandlung von CO₂ in wertvolle Chemikalien, Kunststoffe und Materialien bietet zudem das Potenzial, die Abhängigkeit von fossilen Kohlenstoffquellen zu reduzieren, da bis heute ca. 90 % der Ausgangsstoffe für chemische Produkte aus fossilen Quellen wie Erdöl, Kohle oder Erdgas stammen.⁴⁵⁰ CO₂ kann beispielsweise in der Produktion von Kunststoffen, Düngemitteln und Treibstoffen verwendet werden (zu Treibstoffen siehe Kapitel 2.7). Dabei kann das Gas entweder direkt als Rohstoff oder als Ausgangsstoff für die Synthese anderer Produkte verwendet werden. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von CO₂ als Ausgangsstoff für die Herstellung von Methanol. Hierbei wird das CO₂ mit Wasserstoff zu Methanol umgesetzt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, CO₂ als Ausgangsstoff für die Herstellung von Polyolen zu verwenden, die in der Produktion von Polyurethanen eingesetzt werden können. CO₂-Emissionen aus der Verwendung fossiler Energie können u.a. durch Elektrifizierung von Verfahren – wo immer möglich – und verfahrenstechnische Verbesserungen vermindert werden.

2.9.2.1 Einsatz von CO₂ zur Herstellung von chemischen Rohstoffen

Kohlendioxid ist nicht nur ein Treibhausgas und ein Abfallprodukt der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Es kann auch ein potenzieller Rohstoff für die chemische Industrie sein. CO₂ kann z.B. als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Chemikalien wie Methanol, Formaldehyd und anderen verwendet werden.⁴⁵¹ Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff kann damit dazu beitragen, den Kohlenstoffkreislauf zu schließen und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern.⁴⁵² Durch die Verwendung von CO₂ als Rohstoff bei der Herstellung von Chemikalien kann ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden. In diesem Abschnitt

⁴⁴⁷ Vgl. (Bundesamt, 2023).

⁴⁴⁸ Vgl. (BASF, BASF, 2023)

⁴⁴⁹ Vgl. (Handelsblatt, 2021)

⁴⁵⁰ Vgl. (BMBF, 2023)

⁴⁵¹ Vgl. (Handelsblatt, 2021)

⁴⁵² Vgl. (BMBF, 2023) <https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/umwelt-und-klima/ressourcen/kohlendioxid-als-rohstoff.html>

werden verschiedene Chemikalien vorgestellt, die aus CO₂ hergestellt werden können, darunter Methanol, Harnstoff und Synthesegas.

2.9.2.2 Methanol

Die Methanolherstellung ist ein großtechnisches Verfahren und Methanol (CH₃OH) wird heute überwiegend aus Synthesegas hergestellt. Synthesegas wird durch das Steamreforming oder die partielle Oxidation von Erdgas und die Vergasung von Kohle gewonnen,⁴⁵³ wobei in Nordamerika und Europa meist Erdgas, in China eher Kohle als Rohmaterial genutzt wird. Methanol findet Anwendung als Lösungsmittel, Brennstoff und Vorprodukt für eine Vielzahl von Chemikalien. Bei einer weltweiten Methanolproduktion von etwa 110 Millionen Tonnen im Jahr 2020 entsteht ein großer Bedarf an fossilen Rohstoffen.⁴⁵⁴ Die Synthese von Methanol aus abgefangenem CO₂ stellt somit eine interessante Möglichkeit dar, um das Treibhausgas CO₂ als Rohstoff zu nutzen.

Die Synthese von Methanol aus CO₂ erfolgt entweder durch direkte katalytische Reaktion mit (vorzugsweise CO₂-arm erzeugtem) Wasserstoff oder – aus Effizienzgründen – zweistufig durch katalytische Umwandlung des CO₂ in CO („Reverse Water Gas Shift“, RWGS) und anschließende katalytische Reaktion mit Wasserstoff.

Die Synthese von Methanol aus abgefangenem CO₂ bietet mehrere Vorteile. Zum einen kann Methanol als erneuerbarer Brennstoff genutzt werden und somit dazu beitragen, den Bedarf an Energieträgern zu reduzieren. Zum anderen kann Methanol auf Basis von CO₂ als Rohstoff für die chemische Industrie fossilen Kohlenstoff teilweise ersetzen und den CO₂-Kreislauf schließen bzw. in einigen Fällen auch als CO₂-Senke wirken.⁴⁵⁵

2.9.2.3 Methan

Die Synthese von Methan aus abgefangenem CO₂, auch bekannt als Power-to-Gas-Prozess, ist eine vielversprechende Methode zur Umwandlung von Kohlenstoffdioxid in ein wertvolles und erneuerbares Gas. Die Methansynthese kann durch mehrere Verfahren erreicht werden, einschließlich der thermischen Methanisierung, der katalytischen Methanisierung und der biologischen Methanisierung. In diesem Kapitel werden wir uns auf die katalytische Methanisierung konzentrieren.

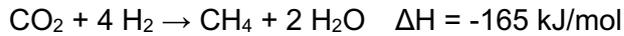
Die katalytische Methanisierung ist ein Prozess, bei dem CO₂ und Wasserstoff (H₂) und unter Verwendung eines Katalysators zu Methan (CH₄) umgewandelt werden, wobei bevorzugt der

⁴⁵³ Vgl. (Chemie.de, 2023)

⁴⁵⁴ Vgl. (Mordor Intelligence, 2023)

⁴⁵⁵ Vgl. (Biomasse-Nutzung.de, 2023)

Wasserstoff durch die Elektrolyse von Wasser gewonnen und das CO₂ entweder aus Industrieabgasen oder aus der Atmosphäre abgefangen wird oder aus Biomasse stammt. Die Reaktion verläuft gemäß folgender Reaktionsgleichung:



Diese Reaktion ist stark exotherm. Die Reaktionsbedingungen, wie z.B. der Druck und die Temperatur, beeinflussen die Ausbeute und die Selektivität des Prozesses. Typischerweise wird der Prozess bei hohen Temperaturen (300 – 500 °C) und Drücken (10 – 30 bar) durchgeführt. Es ist also entscheidend, dass die hierfür notwendige Energie klimaneutral zur Verfügung gestellt wird.

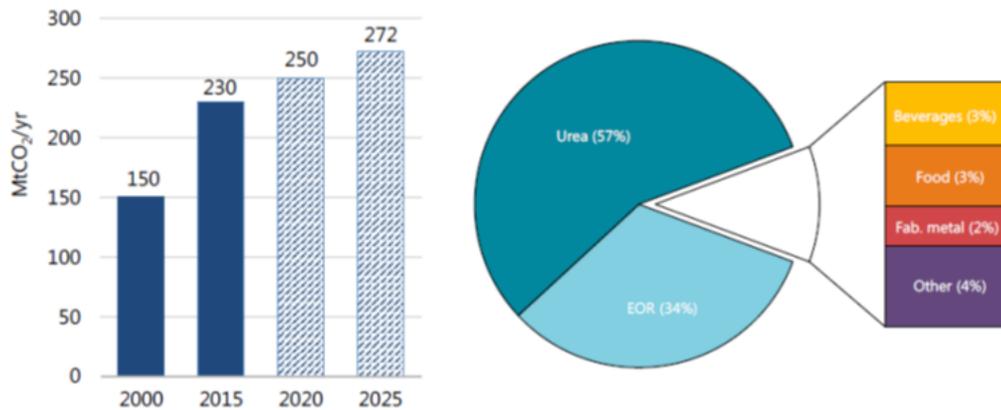
Ähnlich wie bei der Methanolsynthese aus CO₂, ist die Auswahl des Katalysators ein wichtiger Faktor bei der katalytischen Methanisierung, insbesondere hinsichtlich seiner Verkokungsbeständigkeit und Standzeit.

Die katalytische Methanisierung hat das Potenzial, einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung der Industrie und der Energiewirtschaft zu leisten. Methan ist ein vielseitiger Brennstoff, der in der Industrie, im Transportwesen und in der Stromerzeugung eingesetzt werden kann. Darüber hinaus kann die Methansynthese als eine Methode zur saisonalen Speicherung von erneuerbarer Energie dienen, indem der überschüssige Strom aus erneuerbaren Quellen in Wasserstoff umgewandelt und dann zu Methan synthetisiert wird.

2.9.2.4 Harnstoff

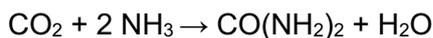
Harnstoff ist ein wichtiger Stickstoffdünger, der in großen Mengen in der Landwirtschaft eingesetzt wird. Herkömmlich wird Harnstoff mit Hilfe von Ammoniak aus Erdgas und Kohlenstoffdioxid (auch aus dem Erdgas) durch die Harnstoff-Synthese produziert. Aus Klimaschutzgesichtspunkten ist anzustreben, dass Ammoniak aus Luftstickstoff und Elektrolysewasserstoff hergestellt wird. Für diesen Fall steht dann natürlich das Kohlenstoffdioxid aus dem Erdgas nicht mehr zur Verfügung und kann durch zuvor abgefangenes ersetzt werden.

Abbildung 179 zeigt, dass heute die Verwendung von CO₂ zur Harnstoffsynthese mit rund 57 % des gesamten CO₂-Verbrauchs zu Buche schlägt.

Abbildung 179: Globaler Verbrauch von CO₂

Quelle: Analysis based on ETC (2018), Carbon Capture in a Zero-Carbon Economy ; IHS Market (2018), Chemical Economics Handbook – Carbon Dioxide; US EPA (2018), Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990 – 2016.

Die Synthese von Harnstoff wird durch eine Reaktion von Ammoniak und CO₂ über die Zwischenstufe Ammoniumcarbonat durchgeführt. Die chemische Formel für die Synthese von Harnstoff aus CO₂ ist:



Es handelt sich also um eine der wenigen „CO₂-verbrauchenden“ chemischen Reaktionen. Harnstoff kann dann für eine Vielzahl von Anwendungen verwendet werden, vor allem in Düngemitteln, als Bestandteil von Harnstoffharzen oder als Ausgangsmaterial für die Synthese anderer chemischer Verbindungen. Weltweit werden derzeit jährlich ca. 185.000 Tonnen Harnstoff produziert.

2.9.2.5 Synthesegas

Synthesegas, eine Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, ist eines der wichtigsten Bausteine für die Herstellung von Chemikalien und Kraftstoffen. Die derzeitige Synthesegasproduktion beruht auf fossilen Brennstoffen, wie Kohle und Erdgas. Steht eine alternative Quelle für Wasserstoff zur Verfügung, kann abgefangenes CO₂ entweder direkt oder über den RWGS-Zwischenschritt (s.o.) zur Herstellung von CO eingesetzt werden. Dies eröffnet verschiedene Alternativen, um den Kohlenstoffkreislauf zu schließen und den Kohlenstoff-Fußabdruck zu reduzieren.

Eine effektive Methode zur Herstellung von Synthesegas aus CO₂ ist die so genannte trockene Reformierung von Methan mit CO₂. Die Reaktion findet bei hohen Temperaturen und Drücken statt und wird durch einen Katalysator unterstützt, um eine höhere Ausbeute zu erreichen. Um die Abhängigkeit von fossilem Methan zu verringern, kann für diesen Weg Biogas, das aus organischen Abfällen gewonnen wird, als Quelle für Methan dienen. Durch die Reformierung

von Biogas mit CO₂ kann Synthesegas hergestellt werden, das als erneuerbarer Rohstoff für die chemische Industrie dienen kann.

Weitere Forschung ist jedoch erforderlich, um die Effizienz und Wirtschaftlichkeit dieser Prozesse zu verbessern.

2.9.3 Verwendung von CO₂ für die Produktion von Kunststoffen und Polymeren

Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff für die Produktion von Kunststoffen und Polymeren ist ein vielversprechender Ansatz im Hinblick auf die Reduzierung von CO₂-Emissionen und die Nutzung von Abfallprodukten. Das Treibhausgas CO₂ wird dabei als wertvoller Ausgangsstoff für die Herstellung von Kunststoffen genutzt, anstatt als Abfallprodukt entsorgt zu werden. So hat z.B. die steigende Nachfrage nach nachhaltigen Materialien zu einem Interesse an der Verwendung von Kohlenstoffdioxid als Ausgangsstoff für die Herstellung von Polymeren geführt.⁴⁵⁶ CO₂ kann als Baustein bei der Produktion von Polycarbonaten und Polyurethanen verwendet werden, die in der Automobil-, Elektronik- und Bauindustrie vielfältige Anwendungen haben. Die Verwendung von CO₂ als Komponente für die Polymerherstellung kann somit dazu beitragen, CO₂ zu binden und seine Verwendung zu fördern.

In diesem Kapitel werden verschiedene Verfahren zur Herstellung von Kunststoffen und Polymeren aus CO₂ vorgestellt und deren Potenzial für eine nachhaltige und umweltfreundliche Produktion diskutiert.

2.9.3.1 Polycarbonate

Eine spezielle Anwendung von CO₂ in der chemischen Industrie ist die Herstellung von Polycarbonaten. Polycarbonate sind thermoplastische Polymere, die für ihre ausgezeichnete Kombination aus Transparenz, Härte und Schlagfestigkeit bekannt sind. Sie finden in vielen Bereichen Verwendung, wie zum Beispiel in der Elektronik, der Automobilindustrie, der Medizintechnik und der Bauindustrie. Derzeit werden Polycarbonate aus fossilbasierten Rohstoffen hergestellt, die zur Emission von Treibhausgasen beitragen. Der am häufigsten verwendete Baustein für Polycarbonate ist Bisphenol A (BPA), der aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird. Er steht zudem im Verdacht gesundheitsschädlich zu sein. Alternativ kann CO₂ als Baustein bei der Herstellung von Polycarbonaten verwendet werden, der BPA ersetzt. Die am häufigsten verwendete Synthesemethode für CO₂-basierte Polycarbonate ist die Reaktion zwischen CO₂ und Epoxiden. Die Reaktion wird durch Metallkomplexe oder organische Basen

⁴⁵⁶ Vgl. (Nova Institut, 2023)

katalysiert und produziert zyklische Carbonate, die dann polymerisiert werden, um Polycarbonate zu bilden.

Die erste Synthese von Polycarbonaten aus CO₂ wurde in den 1960er Jahren durchgeführt. Seitdem haben viele Forscher und Unternehmen die Entwicklung von effizienten und selektiven Katalysatoren vorangetrieben, um die Umwandlung von CO₂ und Epoxiden zu verbessern). In den letzten Jahren wurden mehrere fortschrittliche Katalysatoren entwickelt, die eine hohe Aktivität und Selektivität für die Synthese von Polycarbonaten aus CO₂ aufweisen.

Die Verwendung von abgeschiedenem CO₂ für die Polycarbonatproduktion hat mehrere Vorteile. Erstens ersetzt es zum Teil fossil basierte Komponenten. Zweitens reduziert es die Treibhausgasemissionen, indem CO₂ als Rohstoff verwendet wird, anstatt es in die Atmosphäre freizusetzen.

Die Herstellung von Polycarbonaten aus abgefangenem CO₂ ist jedoch nicht ohne Herausforderungen. Eine wichtige Herausforderung ist die begrenzte Verfügbarkeit von CO₂-Quellen und die Schwierigkeit, CO₂ in ausreichender Reinheit und Menge zu gewinnen. Ein weiteres Problem ist die hohe Energieintensität der Synthese von Polycarbonaten aus CO₂. Diese Energie muss natürlich klimaneutral bereitgestellt werden können, um den Gesamtprozess aus umweltlicher Perspektive sinnvoll zu machen.

2.9.3.2 Polyole / Polyurethane

Polyole sind eine Gruppe von chemischen Verbindungen, die mehrere Hydroxylgruppen (-OH) enthalten, während Polyurethane synthetische Polymere sind, die durch Reaktion von Polyolen mit Diisocyanaten hergestellt werden. Polyole werden als Rohstoffe in der Herstellung von Polyurethanen verwendet. Die Hydroxylgruppen der Polyole reagieren mit den Isocyanatgruppen der Diisocyanate, um Polyurethan-Polymere zu bilden. Polyurethane finden in einer Vielzahl von Anwendungen Verwendung, z.B. als Dämmstoffe, Beschichtungen, Klebstoffe, Schaumstoffe und Elastomere.

Ein vielversprechender Ansatz zur Herstellung von Polyurethanen aus abgefangenem CO₂ ist die Verwendung von CO₂-Polyolen. Diese Polyole werden durch die Reaktion von Epoxiden mit CO₂ hergestellt und können als Teil der Polyurethan-Herstellung eingesetzt werden. Durch die Verwendung von CO₂-Polyolen kann der Anteil an fossilen Rohstoffen in Polyurethanen reduziert werden, was zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen beiträgt und die Abhängigkeit der chemischen Kunststoffindustrie von fossilen Ausgangsstoffen abmindert.

Die Herstellung von CO₂-Polyolen kann auf verschiedene Weise erfolgen, einschließlich der Verwendung von unterschiedlichen Epoxiden wie Propylenoxid, Ethylenoxid und

Glycidylmethacrylat. Die Reaktion von Epoxiden mit CO₂ erfolgt in Gegenwart von Katalysatoren und Co-Katalysatoren wie beispielsweise Aminen und Metallverbindungen.

Insgesamt bietet die Herstellung von Polyurethanen aus abgefangenem CO₂ ein vielversprechendes Potenzial zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen und zur Senkung der CO₂-Emissionen. Es sind jedoch weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um die Effizienz und Wirtschaftlichkeit dieser Technologie zu verbessern.

Tabelle 44 gibt einen Überblick über aus CO₂ hergestellte Produkte und deren Produktionskapazitäten im Jahr 2022 und einen Ausblick auf das Jahr 2023.⁴⁵⁷

⁴⁵⁷ Vgl. (Nova Institut , 2023)

Tabelle 44: CO₂-basierte Produkte Produktionskapazitäten 2022 und Aussichten 2030. Abgeändert nach einer Pressemitteilung des nova Institutes vom 17. April 2023

Produkte	CO ₂ - basierter Kohlenstoffgehalt	Produktionskapazität 2022	Ausblick 2030
Neuartige Produkte auf CO₂-Basis - insgesamt 1,3 Mt/a im Jahr 2022, Ausblick auf mehr als 6 Mt/a im Jahr 2030			
Aromatisches Polycarbonat (PC)	5 %	900.500 t/a	1,2 Mt/a
Aliphatische Polycarbonate (APC)	11-12 %	120.000 t/a	300.000 t/a PPC, PEC
Methanol	100 %	ca. 115.000 t/a	1 Mt/a
Polyhydroxyalkanoate (PHA)	100 %	5.000 – 10.000 t/a	30.000 t/a
Methan	100 %	mehrere Pilotanlagen	325.000 t/a

2.9.4 Beispiele für Anwendungen von CO₂ in der chemischen Industrie Covestro

Das deutsche Unternehmen Covestro ist ein führender Hersteller von Polymeren und Kunststoffen. In einem Verbundprojekt mit der RWTH Aachen hat der Konzern ein Verfahren entwickelt, mit dem CO₂ als Rohstoff zur Herstellung von Polyurethan-Schaumstoffen verwendet werden kann. Das CO₂ wird dabei in einem chemischen Prozess mit anderen Ausgangsstoffen zu einem Polyol umgewandelt, das dann in der Schaumstoffproduktion eingesetzt wird. Die Produkte werden den Kunststoffen von Covestro beigemischt und sind schon im kommerziellen Einsatz: Neben Sportböden auch in Schäumen für Matratzen oder Schuhpolstern. In einer ersten großtechnischen Anlage von Covestro werden jährlich ca. 5.000 t Polyol (ausreichend für 500.000 Matratzen) mit einer jährlichen Wertschöpfung von ca. 75 Mio € hergestellt. In dieser ersten Anlage werden im dem Entstehungsprozess der Endprodukte 20 % zuvor abgefangenes CO₂ eingebaut und entsprechend wird als Ausgangsprodukt 20 % weniger fossiler Rohstoff benötigt. Damit einher geht eine entsprechende CO₂-Reduktion über die gesamte Wertschöpfungskette. Covestro sieht sich mit diesem Verfahren an der Spitze eines Technologietrends, der die Produktion von Kunststoffen und Chemikalien grundlegend verändern könnte. Bisher holt sich die Industrie den notwendigen Kohlenstoff aus Öl und Gas – verbunden mit einem massiven Ausstoß an Emissionen. Künftig soll er verstärkt aus CO₂ gewonnen werden.⁴⁵⁸

⁴⁵⁸ Vgl. (Covestro, ohne Zeitangabe)

Carbon Recycling International (CRI)

CRI ist ein isländisches Unternehmen, das seit dem Jahr 2006 CO₂ aus der Luft oder aus Abgasströmen erfasst und in Methanol umwandelt, das als Kraftstoff oder als Ausgangsprodukt für die chemische Industrie dienen kann. Das Unternehmen nutzt erneuerbare Energiequellen wie Geothermie und Wasserkraft, um den CO₂-Abscheidungsprozess zu betreiben. Auch der notwendige Wasserstoff wird mit Hilfe von Erneuerbaren Energien über Wasserelektrolyse gewonnen. Alternativ wird aber auch Wasserstoff aus Nebenprodukten oder Abgasen verwendet. Dies führt dann nicht zu e-Methanol, sondern low-carbon-Methanol. Die Abscheidung von CO₂-Emissionen, deren Kombination mit grünem oder rückgewonnenem H₂ zur Herstellung von Methanol und deren Rückführung in industrielle Prozesse als erneuerbare Energiequelle und Ausgangsmaterial, bietet einen beschleunigten Weg zu einer Kreislaufwirtschaft. So war im Jahr 2012 CRI nach eigenen Angaben das erste Unternehmen, das erneuerbares Methanol im industriellen Maßstab produzierte, und im Jahr 2022 wurde die weltweit erste Produktionsanlage für Methanol aus recyceltem Kohlenstoff mit einer Kapazität von 110 kt/a in Betrieb genommen.⁴⁵⁹

2.9.4.1 Potenzielle Vorteile der Verwendung von CO₂ als Rohstoff in der chemischen Industrie

CO₂ kann als Rohstoff in der chemischen Industrie eingesetzt werden. Forscher suchen nach geeigneten molekularen Katalysatoren und Produktionsverfahren, um CO₂ in Methanol und andere chemische Rohstoffe und Materialien umzuwandeln.⁴⁶⁰ Diese neuen Produkte haben eine verbesserte Ökobilanz und zum Teil sogar bessere Eigenschaften als ihre fossilen Vorgänger.⁴⁶¹ So hat die Nutzung von CO₂ als Rohstoff in der chemischen Industrie in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, da sie einen vielversprechenden Weg darstellt, um die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen zu reduzieren und gleichzeitig einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Zunehmend interessiert sich auch die Industrie und Unternehmen um CCU-Verfahren in diesem Bereich.⁴⁶² Die Vorteile sind:

- **Verringerung der Treibhausgasemissionen:** Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff in der chemischen Industrie kann dazu beitragen, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, indem es als Ersatz für fossile Rohstoffe eingesetzt wird. Durch die Nutzung

⁴⁵⁹ Vgl. (Carbon Recycling International, 2023)

⁴⁶⁰ Vgl. (Hergersberg, 2019)

⁴⁶¹ Vgl. (BMBF, 2023)

⁴⁶² Vgl. (Nova Institut, 2023)

von CO₂ als Rohstoff wird verhindert, dass es in die Atmosphäre entweicht, wo es als Treibhausgas wirkt.

- **Ressourcenschonung:** Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff kann auch zur Ressourcenschonung beitragen. Durch die Nutzung von CO₂ als Rohstoff können fossile Rohstoffe eingespart werden.
- **Innovative Produkte:** Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff kann auch dazu beitragen, innovative Produkte zu entwickeln. Ein Beispiel hierfür sind Polyurethane, die aus CO₂ und Polyolen hergestellt werden können. Diese Polyurethane weisen ähnliche Eigenschaften wie konventionelle Polyurethane auf, können aber aus nachhaltigen Rohstoffen hergestellt werden.
- **Wirtschaftliche Vorteile:** Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff kann auch wirtschaftliche Vorteile bieten. Zum einen können Unternehmen, die CO₂ als Rohstoff nutzen, von steigenden Rohstoffpreisen unabhängiger werden. Zum anderen können Unternehmen, die CO₂ als Rohstoff nutzen, von öffentlichen Förderprogrammen profitieren, die auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen abzielen. Mit zunehmenden Kosten für CO₂-Emissionen, z.B. im Rahmen vom EU-ETS werden Maßnahmen zum Einsparen von CO₂ wirtschaftlich in Zukunft immer sinnvoller.

2.9.5 Herausforderungen bei der Umsetzung der CO₂-Verwendung in der chemischen Industrie

Eine der größten Herausforderungen bei der Verwendung von CO₂ als Rohstoff in der chemischen Industrie ist die Tatsache, dass die Entwicklung von geeigneten Katalysatoren und Produktionsverfahren.⁴⁶³ Laut Hepburn könnte die Verwendung von CO₂ in chemischen Reaktionen zum Bau von Produkten wie Methanol, Harnstoff oder Polymere jährlich 0,3 – 0,6 Gt CO₂ bis zum Jahr 2050 verbrauchen. Die von ihm angegebenen Kosten zwischen 80 – 300 USD/t CO₂ liegen allerdings teilweise über den CO₂.⁴⁶⁴ Es ist also wichtig, die Kostenseite zu reduzieren.

Auch existieren bislang nur vergleichsweise wenige chemische Prozesse, bei denen Kohlendioxid dauerhaft gebunden bleibt.⁴⁶⁵ Das im Zuge des Nutzungsverlaufs in den Produkten gebundene CO₂ wird – solange der CO₂-Kreislauf noch nicht vollständig geschlossen ist – am Ende des Produktlebens wieder freigesetzt.⁴⁶⁶

⁴⁶³Vgl. (Hergersberg, 2019)

⁴⁶⁴Vgl. (Hepburn, 2019)

⁴⁶⁵ Vgl. (Deutscher Bundestag - Wissenschaftliche Dienste, 2009)

⁴⁶⁶ Vgl. (BMWK, ohne Zeitangabe)

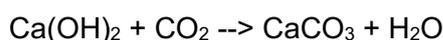
„Die stoffliche CO₂-Nutzung kann das Klimaproblem zudem nicht lösen“, stellt Carus in einem Artikel aus 2012 klar. So gibt er an, dass für den Fall, dass die chemische Industrie der EU im Jahr 2009 statt Erdöl CO₂ als Kohlenstoffquelle genutzt hätte, hätte sie 233 Mio t CO₂ benötigt. Das entspricht knapp mehr als 5 % der gesamten CO₂-Emissionen der EU. „Das ist aber mindestens doppelt so viel, wie die chemische Industrie selber an CO₂ emittiert“, ergänzt Carus. Die Chemieindustrie könne also theoretisch eine Senke für das Klimagas werden – wenn die benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen stammt.⁴⁶⁷ Erst wenn chemische Grundstoffe zunehmend aus weniger fossilen Rohmaterialien hergestellt werden, wird sich die Nachfrage nach CO₂ als Rohstoff deutlich ändern. Dabei wird es allerdings auch darauf ankommen, die entsprechenden Mengen an Strom aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung zu stellen.⁴⁶⁸ Trotz dieser Herausforderungen gibt es bereits einige Projekte und Forschungsarbeiten, die sich mit der Verwendung von CO₂ als Rohstoff in der chemischen Industrie befassen. Die Nutzung von CO₂ als Rohstoff kann dazu beitragen, den Kohlenstoffkreislauf zu schließen und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern.⁴⁶⁹

2.9.6 Mineralisierung von CO₂ zur Gewinnung von Carbonaten und Baumaterialien

Carbonate finden in zahlreichen Branchen Anwendung, wie z.B. in der Bauindustrie, als Lebensmittelzusatzstoffe, als Füllstoff bei Papier und in der chemischen Industrie. Vor allem für Infrastrukturprojekte werden riesige Mengen natürlichen Kalksteins (Calciumcarbonat, CaCO₃) umgesetzt, um daraus Zement und letztendlich Beton herzustellen. Bei dem hierfür notwendigen Prozess der Kalzinierung entweichen große Mengen CO₂ (vgl. Kapitel 3.2.2. dieses Berichts). Er kann vereinfacht wie folgt dargestellt werden:



Bei entgegengesetzten Prozessen kann das CO₂ allerdings wieder genutzt werden, um daraus Carbonate herzustellen. „Bei der sog. Carbonatisierung von Festbeton z.B. handelt es sich um eine natürlich vorkommende, chemische Reaktion, bei der CO₂ aus der Umgebungsluft in den Beton eindringt und mit den Hydratationsprodukten im Zementstein reagiert.“⁴⁷⁰ Die vereinfachte chemische Gleichung ist nachfolgend angegeben:



⁴⁶⁷ Vgl. (Ahrens, 2012).

⁴⁶⁸ Vgl. (DECHEMA und FutureCamp für den VCI, 2020)

⁴⁶⁹ Vgl. (Hergersberg, 2019).

⁴⁷⁰ Vgl. (VDZ, 2020)

Die Herstellung von Carbonaten aus Kohlendioxid (CO_2) ist auch ein in der chemischen Industrie ein wichtiger Prozess. Ein Beispiel ist die Herstellung von Calciumcarbonat, das in vielen Anwendungen wie Papierherstellung, Farben und Lacken sowie als Füllstoff in Kunststoffen verwendet wird.

Die Verwendung von Kohlendioxid als Rohstoff zur Herstellung von Carbonaten und Baumaterialien gewinnt zuletzt immer mehr an Bedeutung. Seine Umwandlung wird als Möglichkeit angesehen, um die Emissionen von CO_2 in die Atmosphäre zu reduzieren und gleichzeitig wertvolle Produkte zu gewinnen.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Einsatz von CO_2 zur Herstellung von Carbonaten und Baumaterialien. Es wird sich mit verschiedenen Technologien auseinandergesetzt, die den Einsatz von CO_2 in der Herstellung von z.B. Beton, Ziegeln, Kalksandstein und Carbonaten ermöglichen.

2.9.6.1 Carbonate

Carbonate sind anorganische Salze und organische Ester der Kohlensäure (H_2CO_3). Der Einsatz von CO_2 zur Herstellung von künstlichen Carbonaten bietet eine vielversprechende Alternative zur Nutzung von natürlichen Rohstoffen, z.B. Kalkstein. Es gibt verschiedene Verfahren zur Herstellung von Carbonaten aus CO_2 . Ein Verfahren ist z.B. die Reaktion von CO_2 mit Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) zu Calciumcarbonat (CaCO_3). Ein anderes Verfahren ist die Reaktion von CO_2 mit Natriumhydroxid (NaOH) zu Natriumcarbonat (Na_2CO_3).

Künstliche Carbonate, die aus CO_2 hergestellt werden, können Anwendung in verschiedenen Bereichen finden, wie zum Beispiel als Baumaterialien, als Füllstoffe für Kunststoffe oder als Katalysatoren in der chemischen Industrie.

Es gibt verschiedene Verfahren zur Herstellung von Carbonaten aus CO_2 , wie zum Beispiel das sogenannte Mineralisierungsverfahren, bei dem CO_2 und Wasser mit mineralischen Rohstoffen wie Silikaten reagieren, um z.B. Calciumcarbonat (CaCO_3) zu bilden. Eine andere Methode ist die Carbonatisierung von Abfällen und Nebenprodukten, bei der CO_2 in Abfälle wie Flugasche, Schlacke oder anderem Material injiziert wird, um diese in Carbonate umzuwandeln.

Ein Beispiel für ein Projekt, das sich mit der Verwendung von CO_2 als Rohstoff in der chemischen Industrie befasst, ist Carbon2Chem von Thyssenkrupp. Das Projekt zielt darauf ab, das Hüttengas aus der Stahlproduktion direkt zur Nutzung in Chemieanlagen weiterzuleiten.⁴⁷¹

⁴⁷¹ Vgl. (Handelsblatt, 2021)

2.9.6.2 Baustoffe

Beton ist der am weitesten verbreitete Baustoff der Welt und wird für eine Vielzahl von Anwendungen wie Fundamente, Stützmauern und Straßenbau eingesetzt. Die konventionelle Herstellung von Beton erfordert jedoch große Mengen an Zement, der durch Brennen von Kalkstein hergestellt wird und zur Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre beiträgt. Daher wird seit einigen Jahren an der Entwicklung von Verfahren zur Herstellung von Beton aus CO₂ und dem Wiederverwenden (Recycling) von Beton gearbeitet. Die Verwendung von CO₂ in der Herstellung von Baumaterialien kann dazu beitragen, den Kohlenstoff-Fußabdruck von Gebäuden und Infrastruktur zu verringern und somit zur Erreichung der Klimaziele beizutragen.

Wie in der Einleitung dieses Kapitels bereits erwähnt, findet an den Oberflächen von Baustoffen aus Zement oder Kalk eine sogenannte Recarbonatisierung durch Aufnahme von CO₂ aus der Luft statt. So wird abgeschätzt, dass zwischen den Jahren 1930 und 2013 43 % der weltweiten CO₂-Prozessemissionen der Zementherstellung durch die Recarbonatisierung wieder aufgenommen wurden.⁴⁷² Bezieht man auch die CO₂-Emissionen der dabei benötigten Brennstoffe mit ein, wurden rechnerisch rund 25 % der ursprünglichen Emissionen wieder gebunden.⁴⁷³ Diese natürliche Reaktion kann durch den Einsatz hoher CO₂-Konzentrationen und guter Reaktionsbedingungen gezielt beschleunigt und optimiert werden.⁴⁷⁴ „Alternativ bedarf es großer Oberflächen wie beispielsweise bei aufbereitetem Altbeton“.⁴⁷⁵

Folgerichtig ist beim CCU-Pfad der Recarbonatisierung oder Mineralisierung (dem Recycling) von altem Baumaterial die Zerkleinerung des Altbetons essenziell, um eine möglichst große Oberfläche zu erhalten. Der gemahlene Altbeton wird dann mit abgedehntem CO₂ versetzt, was dem Beton nicht mehr Festigkeit verleiht, sondern zusätzliche 30 % CO₂ in wenigen Stunden statt Jahrzehnten absorbiert werden.⁴⁷⁶

Kritisch anzumerken an dieser Stelle ist, dass die für den Mahl- und Zerkleinerungsvorgang zusätzlich benötigte Energie klimaneutral bereitgestellt werden muss, um die CO₂-Bilanz des Betonrecyclings nicht wieder zu verschlechtern.

Das Potenzial für die Recarbonatisierung ist ansonsten riesig. Bauschutt stellt z.B. in Europa mengenmäßig die größte Abfallart dar und macht ca. 30 % der Mülldeponien aus.⁴⁷⁷ Erste Unternehmen versuchen dieses Potenzial bereits umzusetzen. Das Start-Up Neustark AG beispielsweise hat eine Pilotanlage entwickelt, in der pro Stunde 100 kg CO₂ im Betongranulat gespeichert werden kann. Zum Vergleich: Schnell wachsende Fichten oder Tannen nehmen

⁴⁷² Vgl. (Xi & al., 2016)

⁴⁷³ Vgl. (VDZ, 2020)

⁴⁷⁴ Vgl. (CO₂ Value Europe, 2020)

⁴⁷⁵ Vgl. (VDZ, 2020)

⁴⁷⁶ Vgl. (Joas, 2020)

⁴⁷⁷ Vgl. (Holcim, 2020)

pro Jahr und Baum etwa 20 kg CO₂ auf. Eine Anlage leistet – so die Angaben des Unternehmens – binnen einer Stunde das, wofür fünf Fichten ein ganzes Jahr benötigen.

Allerdings muss für die Aufbereitung und Lagerung des Bauschutts Platz gefunden werden. Dieser Vorprozess braucht außerdem Zeit, Energie und die entsprechenden gesetzliche Rahmenbedingungen, so dass es heutzutage immer noch einfacher ist neuen Beton herzustellen als Recycling-Beton, so Peter Lukas von HeidelbergCement.

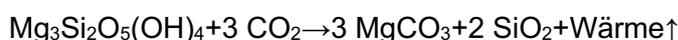
Alternativ zum Recycling von Altbeton durch Recarbonatisierung mit CO₂ kann das Klimagas auch im Rahmen der sog. CO₂-Mineralisierung genutzt werden, um aus Mineralien oder Industrieabfällen stabile Carbonatmineralien zu bilden. Die entstehenden Produkte sollen im Anschluss dann verwertet werden. Die Verwendung führt dann ggf. dazu, dass die CO₂-Emissionsminderungen zusätzliche Einnahmen bringen können, anstatt Kosten zu verursachen.

Diese Reaktionen führen zu einer langfristigen Speicherung von CO₂. Frühe Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Produkte zusätzlich zur CO₂-Speicherung potenziell in einer Reihe von Anwendungen eingesetzt werden können, darunter als Füllstoffe, Polymeradditive, zur Landgewinnung oder als ergänzende zementartige Materialien (SCM) wodurch Einnahmen von 14 – 700 €/t abgeschiedenem CO₂ erzielt werden.⁴⁷⁸

Es wurden mehrere Ausgangs- oder Rohstoffe für die CO₂-Mineralisierung vorgeschlagen, hauptsächlich natürliches Gestein, das magnesium- oder kalziumreiche Silikatminerale enthält, sowie alkalische Industrierückstände (z.B. Stahlschlacke oder Flugasche). Während natürliche Gesteine attraktiv sind, weil sie eine reichlich vorhandene Ressource sind, die weltweit genutzt werden könnte, sind Industrieabfälle attraktiv, weil sie in Industrieregionen verfügbar sind und nicht abgebaut werden müssen.

Um eine erhebliche Emissionsreduzierung durch CO₂-Mineralisierung mit einem hochgradig vorhersagbaren Ausgangsmaterial zu ermöglichen, konzentriert man sich auf die Verwendung von natürlichem Gestein als Ressource für die CO₂-Mineralisierung. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass bei CCS ähnliche Prinzipien genutzt werden, indem CO₂ in basaltartige Gesteinsschichten verpresst wird. Das CO₂ mineralisiert dann und wird so dauerhaft gebunden.

Beispiele für natürliche Mineralien sind Forsterit (Mg₂SiO₄), das in olivinhaltigem Gestein vorkommt, Lizardit (Mg₃Si₂O₅(OH)₄) in serpentinhaltigem Gestein und Wollastonit (CaSiO₃). Die allgemeinen CO₂-Mineralisierungsreaktionen für diese Beispielfminerale sind



⁴⁷⁸ Vgl. (Ostovari, 2020)



Die Autoren eines im Jahr 2022 veröffentlichten Artikels in *Nature – Communications Earth & Environment* konnten zeigen, „dass unter den richtigen Umständen positive Business Cases vorliegen, wenn Einnahmen durch die Verwendung von Mineralisierungsprodukten als SCM erzielt werden können“.⁴⁷⁹

Abschließend sei noch ein Projekt der Firma Saudi Aramco genannt, bei dem für zuvor abgefangenes CO₂ im Beton eine „Senke“ geschaffen werden soll, ohne die Festigkeit des Endprodukts zu beeinträchtigen oder negativ zu beeinflussen. Um dies zu erreichen, wurden verschiedene Betonhärtungskombinationen mit unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen getestet. Der Schlüssel war die Kombination von CO₂ und Dampf, was zu einer CO₂-Aufnahme von 20 % im Beton führte. Der entstandene Beton zeigte laut Aramco darüber hinaus noch verbesserte Eigenschaften. Er härtete wesentlich schneller aus, war haltbarer als herkömmlicher Beton, zeigte eine erhöhte Chlor- und Sulfatbeständigkeit und geringere Wasserdurchlässigkeit.⁴⁸⁰

2.9.6.3 Beispiele für Anwendungen von CO₂ in der Baustoff-Industrie

CarbonCure

Das kanadische Unternehmen CarbonCure entwickelt Technologien zur CO₂-Entfernung für Betonhersteller aller Größen. Die Technologie injiziert während des Mischens eine präzise Menge von recyceltem CO₂ (zuvor abgefangenes CO₂) in frischen Beton, um dessen CO₂-Fußabdruck zu reduzieren, ohne die Leistung des Produktes zu beeinträchtigen. Nach der Injektion durchläuft das CO₂ einen Mineralisierungsprozess und wird (als CaCO₃) dauerhaft im Beton eingebettet. Dadurch wird die Druckfestigkeit des Betons verbessert, was eine Mischungsoptimierung und eine deutliche Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks sowie Kosteneinsparungen ermöglicht.⁴⁸¹

Solidia Technologies inc.

Solidia Technologies wurde im Jahr 2008 in den USA gegründet und ist heute ein Unternehmen der BASF Venture Capital GmbH. Solidia Technologies hat eine Technologieplattform entwickelt, die die Produktion von Bau- und Konstruktionsmaterialien der nächsten Generation mit hervorragenden physikalischen Eigenschaften, niedrigeren Lebenszykluskosten und einem geringen ökologischen Fußabdruck ermöglicht. Die „Low Temperature Solidification

⁴⁷⁹ Vgl. (Strunge, Renforth, & Spek, 2022)

⁴⁸⁰ Vgl. (Aramco, 2023)

⁴⁸¹ Vgl. (Carbon Cure, 2023)

(LTS)“-Technologie von Solidia beschleunigt den natürlichen Bindungsprozess von CO₂ mit Mineralien, um Feststoffe zu bilden, und stellt sicher, dass dies in Stunden statt in Jahren geschieht. In der Baustoffindustrie ermöglicht dies die Herstellung stärkerer und langlebigerer Produkte. Solidia Technologies arbeitet auch an der Entwicklung von Materialien, die Beton ersetzen können. Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass die Festigkeit und Eigenschaften dieser Materialien die von herkömmlichem Beton bei weitem übertreffen. Die Bindung von CO₂ im Produktionsprozess bietet den zusätzlichen Vorteil, einen klimaneutralen Betonersatz zu schaffen.⁴⁸²

2.9.7 Enhanced Fuel Recovery

Enhanced Fuel Recovery (EFR) zielt darauf ab die Ausbeute von Kohlenwasserstoffen in Öl- und Gasreservoiren zu erhöhen. Es gibt hier verschiedene Verfahren. Die Verwendung von CO₂ als sogenanntes „Einspritzgas“ ist eine der am häufigsten angewandten Methoden, um die Ausbeute von Öl und Gas zu verbessern. Vor allem in den USA wird diese Methode intensiv genutzt. Zu diesem Zweck wurde dort sogar ein CO₂-Pipeline-Netz von mehr als 5.500 km Länge installiert. Diese Methode wird auch als Carbon Capture and Storage Enhanced Oil Recovery (CCS-EOR) bezeichnet. Bei CCS-EOR wird CO₂ in das Reservoir injiziert, wodurch der Druck im Reservoir erhöht und das im Reservoir eingeschlossene Öl und Gas mobilisiert werden. Darüber hinaus kann CO₂ die Viskosität von schweren Ölen und Bitumen verringern und somit den Fluss von Öl und Gas erleichtern. Die Verwendung von CO₂ zur EFR hat den zusätzlichen Vorteil, dass das Treibhausgas CO₂ aus der Atmosphäre entfernt und in unterirdischen Reservoiren dauerhaft gelagert wird.

Neben CCS-EOR gibt es auch andere Methoden, die bei EFR angewandt werden, wie beispielsweise die Verwendung von Wasser oder Chemikalien zur Erhöhung der Ausbeute von Öl und Gas. Auf diese Verfahren wird hier nicht eingegangen.

2.9.7.1 Enhanced Oil Recovery

Enhanced Oil Recovery (EOR), auch als tertiäre Ölgewinnung bekannt, bezeichnet verschiedene Technologien, die angewendet werden, um Öl aus Ölfeldern zu gewinnen, die bereits primär (durch natürlichen Druck) und sekundär (durch Wasserflutung) erschlossen wurden. EOR-Technologien werden eingesetzt, um verbliebene Ölvorkommen zu erschließen, die mit primären und sekundären Methoden nicht mehr wirtschaftlich produziert werden können. EOR kann mit verschiedenen Verfahren durchgeführt werden, darunter thermische Verfahren,

⁴⁸² Vgl. (BASF Venture Capital GmbH, 2023).

chemische Verfahren und Gasinjektion von CO₂. Die Gasinjektion mit CO₂ hat in den letzten Jahren aufgrund der Zunahme von CO₂-Abscheidungstechnologien an Bedeutung gewonnen. Vor allem in den USA, aber auch in anderen Regionen wird diese Methode intensiv eingesetzt. Das Verfahren der EOR mit CO₂ umfasst die Injektion von CO₂ in das Ölreservoir, um das darin eingeschlossene Öl freizusetzen. Dies wird erreicht, indem das injizierte CO₂ das Öl verdünnt und den Druck erhöht, was wiederum dazu führt, dass sich das Öl ausdehnt und durch die Poren des Gesteins fließt, in dem es eingeschlossen ist.

Es gibt verschiedene CO₂-EOR-Methoden, darunter:

- Gasförmige CO₂-Einspritzung: Bei dieser Methode wird komprimiertes CO₂ in das Ölreservoir injiziert.
- Flüssige CO₂-Einspritzung: Flüssiges CO₂ wird in das Ölreservoir injiziert und löst sich dann in der Ölphase auf.
- Überkritische CO₂-Einspritzung: Bei dieser Methode wird CO₂ in überkritischem Zustand (höherer Druck und höhere Temperatur) in das Ölreservoir injiziert.

Vorteile der CO₂-EOR-Technologie sind die Steigerung der Ölförderung und die Reduzierung der Kohlenstoffemissionen, da CO₂ als Treibhausgas aus der Atmosphäre entfernt und zur Ölgewinnung wiederverwendet wird.

Die Methode ist unter dem Strich aber nicht klimaneutral, da das zuvor abgeschiedene CO₂ zwar überwiegend dauerhaft in den Ölreservoirs verbleibt, es ja aber verwendet wird, um neue Kohlenwasserstoffe aus dem Boden zu holen, die bei ihrer Verwendung meist CO₂-Emissionen zur Folge haben. Weitere Herausforderungen sind unter anderem die erhöhten Kosten der CO₂-Abscheidung und -Injektion sowie die begrenzte Verfügbarkeit von geeigneten CO₂-Quellen bzw. das Nichtvorhandensein von CO₂-Netzen (Pipelines).

2.9.7.2 Enhanced Gas Recovery

Analog zum EOR ist Enhanced Gas Recovery (EGR) ein Verfahren zur Steigerung der Erdgasproduktion aus unterirdischen Lagerstätten. Dabei wird CO₂ als Treibmittel eingesetzt, um das Gas aus den Poren des Gesteins zu lösen und zu fördern. EGR ist ein wichtiger Bestandteil der CO₂-Nutzungstechnologie und kann dazu beitragen, die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren.

EGR-Verfahren werden eingesetzt, wenn herkömmliche Fördermethoden nicht mehr ausreichend sind, um den natürlichen Druck in der Lagerstätte aufrechtzuerhalten und die Förderung zu ermöglichen. Durch die Injektion von CO₂ wird der Druck in der Lagerstätte erhöht und das Gas aus den Poren des Gesteins gelöst.

EGR kann dazu beitragen, die Förderung von Erdgas zu erhöhen und den Bedarf an neuen Bohrungen und Lagerstätten zu reduzieren. Da das verpresste CO₂ zu überwiegenden Teilen dauerhaft im Erdreich verbleibt und damit der Atmosphäre entzogen ist, hilft EGR bei dem Aufbau einer CCS Infrastruktur. Im Vergleich mit anderen CCS-Verfahren, bei denen es lediglich um eine Entsorgung zuvor abgefangenem CO₂ geht, kann bei CCS-EGR ein wirtschaftlicher Vorteil generiert werden. Dieses macht dann die Etablierung der hierfür notwendigen Infrastruktur vergleichsweise einfacher. So wurden zu diesem Zweck in den USA ein CO₂-Pipeline-Netz von über 5.500 km Länge erbaut.

2.9.8 Biologische Umwandlung von CO₂ in Algen

Die Produktion von Biomasse ist eine wichtige Komponente in der Energiewende, da sie als erneuerbarer Energieträger zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen beitragen kann. So werden z.B. bei der energetischen Nutzung von Biomasse nur die CO₂-Mengen in die Atmosphäre abgegeben, die zuvor von den Pflanzen durch Photosynthese gebunden worden sind. Biokraftstoffe gelten so z.B. als Alternative zum Erdöl. Für Treibstoffe aus Getreide, Zuckerrüben oder Raps bräuchte man allerdings riesige Ackerflächen, die dann für den Nahrungsmittelanbau fehlen würden, es sei denn, man stellt auf Verfahren der 2. Generation um, die zelluloseartige Reststoffe einsetzen. Eine andere Lösung könnten Mikroalgen sein, die sich schnell und unproblematisch züchten lassen.⁴⁸³ Die Verwendung von zuvor abgefangenem CO₂ bei der Herstellung von Biomasse aus Algen ist ein vielversprechender Ansatz, um diesen Prozess noch umweltfreundlicher und nachhaltiger zu gestalten. „Algen speichern die durch Photosynthese eingefangene Energie des Sonnenlichts in Form von Zuckern und Fetten. Die Fette sind das eigentlich Interessante bei der Suche nach neuen Treibstoffquellen, denn aus ihnen kann man durch einen chemischen Prozess Kraftstoff gewinnen, dessen Eigenschaften mit Dieselmotoren vergleichbar sind.“⁴⁸⁴ Gegenüber herkömmlichen Biokraftstoffen haben solche aus Algen den Vorteil, dass sie neben Süßwasser auch in Salzwasser wachsen. Sie beanspruchen weder große Flächen, die für die Lebensmittelproduktion notwendig sind, noch verbrauchen sie große Mengen an Süßwasser. Aus Algen gewonnenes Öl kann möglicherweise auch in normalen Raffinerien zu Kraftstoffen weiterverarbeitet werden, die sich nicht von herkömmlichem Dieselmotoren mit hoher Energiedichte unterscheiden.⁴⁸⁵ Das Öl lässt sich eventuell auch als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Chemikalien nutzen.⁴⁸⁵

Darüber hinaus kann der Anbau von Algen auch aus Klimaschutzgründen von Nutzen sein. Algen können große Mengen an CO₂ umsetzen und gedeihen auch unter schwierigen

⁴⁸³ Vgl. (Decker, 2018)

⁴⁸⁴ Vgl. ebenda

⁴⁸⁵ Vgl. (Exxon Mobil, ohne Zeitangabe).

Umweltbedingungen. Sie können das Kohlenstoffdioxid, welches sie zum Wachsen und zur Produktion von Pflanzenöl benötigen direkt aus der Luft entnehmen. Versorgt man die Organismen allerdings mit angereicherterem, zuvor abgefangenem CO₂, so können nicht nur die Wachstumsbedingungen verbessert werden. Der Prozess bietet vielmehr die Chance eine wirtschaftlich sinnvolle Abnahmequelle für abgefangenes CO₂ darzustellen. Biokraftstoffe aus Algen haben so im Gegensatz zu herkömmlichen Brennstoffen das Potenzial, Treibhausgase abzubauen. Dazu kommt ein weiterer Vorteil: Mikroalgen wachsen schnell und lassen sich relativ unproblematisch züchten. Im Vergleich zu den Landpflanzen ist der Ertrag an Biomasse pro Fläche und Jahr wesentlich höher. Und im Vergleich zu Raps könnte man mit ergiebigen Algenkulturen mehr als das Zehnfache an Öl erzeugen. Vor allem aber kann man Mikroalgenkulturen unabhängig von wertvollen Ackerflächen betreiben.⁴⁸⁶ Exxon Mobil, die seit dem Jahr 2009 an der Verwendung von Algen als Biokraftstoff forschen, nennen weitere Vorteile von Biomasse aus Algen gegenüber der Nutzung von herkömmlichen Landpflanzen:

- Hohe Erträge: Jeder Hektar Algen bringt mehr als 2.000 Gallonen Kraftstoff. Zum Vergleich: Palmöl bringt pro Hektar 650 Gallonen (2.460 Liter), Sojabohnenöl kommt auf 50 Gallonen (190 Liter) pro Hektar.
- Ganzjährige Ernte: Während andere Rohstoffe, Mais beispielsweise, nur einmal im Jahr geerntet werden, ist dies bei Algen anders: hier ist eine ganzjährige und mehrfache Ernte möglich.
- Wasserreiniger: Algen können beispielsweise in industriellem Abwasser angebaut werden. Mehr noch: Sie können verunreinigtes Wasser säubern und gleichzeitig energiereiche Biokraftstoffe produzieren.
- Sofort nutzbar: Algenbasierte Biokraftstoffe können für bereits existierende Autos verwendet werden ohne, dass es dafür großer Anpassungen am Motor oder der Infrastrukturbedarf“.

Noch gilt es allerdings, sowohl die bestmögliche Algenart als auch die optimalen Zuchtbedingungen zu finden. Bei den Algen stehen dabei eine größtmöglichen Fettproduktion und eine hohe Umsetzungsrate von CO₂ zu Öl im Vordergrund. „Die Mikroalge *Botryococcus braunii* ist zum Beispiel eine vielversprechende Kandidatin. Sie produziert große Mengen an Algenfett, das sie dann direkt nach außen in das sie umgebende Medium abgibt“.⁴⁸⁷

Bei den Anlagen zur Zucht der Mikroalgen gibt es sowohl geschlossen wie offene Systeme. Bei den geschlossenen Systemen, sog. Bioreaktoren, werden die Algen in schlauchförmigen Plastiksäcken, kilometerlangen Röhrensystemen oder plattenförmigen Reaktoren, die sich

⁴⁸⁶ Vgl. (Decker, 2018)

⁴⁸⁷ Vgl. (Decker, 2018)

nach dem Stand der Sonne ausrichten, gezüchtet.⁴⁸⁷ Hier wird dann CO₂, das zuvor z.B. abgefangen wurde, in hohen Konzentrationen zugeführt. „2012 veröffentlichten Forscher des MIT, von ExxonMobil und von SGI in der Fachzeitschrift *Environmental Science and Technology* einen Bericht, der zu dem Schluss gelangte, dass Biokraftstoffe aus Algen, wenn entscheidende Forschungshindernisse überwunden werden, über den gesamten Lebenszyklus rund 50 % weniger Treibhausgase ausstoßen als Kraftstoffe auf Erdölbasis.“⁴⁸⁸ Der Betrieb dieser Bioreaktoren ist allerdings noch sehr aufwändig.

Auch in offenen Systemen, wie z.B. flachen Wasserbecken, werden Versuchsreihen durchgeführt. Diese sind mit anderen Herausforderungen konfrontiert. Vor allem das Einwandern von Fremdorganismen ist problematisch.⁴⁸⁷

Neben Mikroalgen sind auch Cyanobakterien Beispiele für Mikroorganismen, die CO₂ als Kohlenstoffquelle nutzen können. Auch diese Organismen sind in der Lage, CO₂ direkt aus der Luft aufzunehmen und zu nutzen, um Biomasse zu produzieren. Ein weiterer Ansatz zur Nutzung von CO₂ in der Produktion von Biomasse ist die Verwendung von methanogenen Bakterien. Diese Bakterien sind in der Lage, CO₂ und Wasserstoff zu Methan umzuwandeln, das dann als erneuerbarer Brennstoff genutzt werden kann. Die Verwendung von methanogenen Bakterien zur Herstellung von Methan aus CO₂ hat den Vorteil, dass der Prozess sehr effizient ist und nur geringe Mengen an Nebenprodukten produziert. Allerdings benötigt man eine Wasserstoffquelle, bevorzugt aus der Elektrolyse von Wasser und regenerativem Strom.

Die Herstellung von Biokraftstoffen aus Mikroorganismen wie Algen hat großes Potenzial, mit Hilfe von zuvor abgefangenem CO₂ Ersatzstoffe für z.B. Diesel zu erzeugen. Mit diesem könnten dann die Bestandsflotte von Verbrennerfahrzeugen klimaneutraler als mit Kraftstoffen auf Basis von z.B. Erdöl betrieben werden. Allerdings bräuchte es für die Versorgung all dieser Fahrzeuge mit Algen-Diesel riesige Flächen von Bioreaktoren, die alle gewartet und betrieben werden müssten. Dies ist heute noch sehr teuer. Insofern ist es von großer Bedeutung, dass der gesamte Entstehungsprozess des Algen-Biokraftstoffes, vor allem auch aus Kostengesichtspunkten, weiter verbessert wird.

2.9.8.1 Beispiele für Anwendungen von Mikroorganismen, die CO₂ umsetzen

LanzaTech

Das US-amerikanische Unternehmen LanzaTech hat eine Technologie entwickelt, mit der CO₂ aus industriellen Prozessen, Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse sowie Agrar- und Siedlungsabfällen zur Herstellung von Biokraftstoffen genutzt werden. Dabei wird letztendlich das CO₂ von Mikroorganismen umgewandelt, die als Ausgangsstoff für die Herstellung von Bio-

⁴⁸⁸ Vgl. (Exxon Mobil, ohne Zeitangabe)

Ethanol dienen. Die wesentlichen Prozessschritte sind hierbei Vergasung, Verdichtung, Reinigung und Fermentierung der Ausgangsstoffe. Das Endprodukt Bio-Ethanol kann z.B. genutzt werden, um die Bestandsflotte von Verbrennungsautos klimaneutraler anzutreiben. Oder es dient als Ausgangsstoff für die chemische Industrie. Letztendlich landet das CO₂ wieder in der Atmosphäre oder als Agrar- oder Siedlungsabfall und der Prozess startet von Neuem – ein Beispiel für den Einstieg in eine CO₂-Kreislaufwirtschaft.⁴⁸⁹

2.9.9 Ausblick und Schlussfolgerungen

2.9.9.1 Bewertung des Potenzials von CO₂ als Rohstoff

Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff, z.B. in der chemischen Industrie, kann das Potenzial haben, die CO₂-Emissionen zu reduzieren und gleichzeitig wertvolle Produkte herzustellen und die Branchen so unabhängiger von fossilen Rohstoffen und deren schwankenden Preisen zu machen. Allerdings muss das Potenzial dieser Verwendung sorgfältig bewertet werden, um sicherzustellen, dass sie tatsächlich eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Methoden darstellt.

Zu den Faktoren, die bei der Bewertung des Potenzials der Verwendung von CO₂ als Rohstoff in der Industrie berücksichtigt werden müssen, gehören:

- **Verfügbarkeit von CO₂:** Die Verfügbarkeit von CO₂ ist ein wichtiger Faktor bei der Bewertung des Potenzials seiner Verwendung als Rohstoff in der Industrie. CO₂ ist ein Nebenprodukt vieler industrieller Prozesse. Grundsätzlich steht es somit ausreichend zur Verfügung. Die Herausforderung besteht darin, es in einem ausreichenden Volumen und einer ausreichenden Qualität abzufangen und an den Ort seiner möglichen Weiternutzung zu transportieren.
- **Technologieentwicklung:** Die Technologie zur Erfassung und Verwendung von CO₂ als Rohstoff entwickelt sich schnell weiter. Es ist jedoch wichtig sicherzustellen, dass die Technologien effektiv und nachhaltig sind, sowohl in Bezug auf die Emissionen als auch auf die Kosten.
- **Wirtschaftlichkeit:** Die wirtschaftliche Machbarkeit der Verwendung von CO₂ als Rohstoff hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie der Verfügbarkeit von CO₂, der Art der Chemikalien, die hergestellt werden sollen, und den Kosten für die CO₂-Verarbeitung.
- **Umweltverträglichkeit:** Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff kann dazu beitragen, die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Es ist jedoch wichtig sicherzustellen, dass die Verwendung von CO₂ tatsächlich umweltverträglich ist und dass die Umweltauswirkungen

⁴⁸⁹Vgl. (LanzaTech, 2023)

des CO₂-Abfangens und Verarbeitung sowie der notwendigen Begleitprozesse berücksichtigt werden. Ein Beispiel ist der Abbau von Calciumsilikatmineralien als Ausgangspunkt für eine CO₂-Mineralisierung. Hierbei ist dafür Sorge zu tragen, dass die Umwelt durch den Abbau möglichst wenig in Mitleidenschaft gezogen wird.

- **Marktpotenzial:** Das Potenzial für die Verwendung von CO₂ als Rohstoff hängt auch von der Nachfrage auf dem Markt ab. Es ist wichtig, das Marktpotenzial zu bewerten, um sicherzustellen, dass die Verwendung von CO₂ als Rohstoff wirtschaftlich rentabel ist. Nova sieht in einer Pressemitteilung das sich zunehmend mehr Unternehmen für CCU-Technologien interessieren.⁴⁹⁰

2.9.9.2 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und Trends in diesem Bereich

In Zukunft wird die Verwendung von CO₂ als Rohstoff in der Industrie wahrscheinlich weiter zunehmen. Es gibt mehrere Entwicklungen und Trends, die darauf hindeuten:

- **Fortschritte in der CO₂-Erfassungstechnologie:** Neue Technologien zum Abfangen von CO₂ werden entwickelt und alte werden verbessert, um die Menge und Qualität des gesammelten CO₂ zu erhöhen und die Kosten zu senken (siehe auch Kapitel 2.8).
- **Zunahme von staatlichen Anreizen und Vorschriften:** Regierungen auf der ganzen Welt setzen Anreize und Vorschriften ein, um die Reduzierung von CO₂-Emissionen zu fördern. Diese politischen Maßnahmen könnten die Verwendung von CO₂ als Rohstoff in der Industrie weiter vorantreiben. Ein weltweiter Cap-and-Trade-System für die Preisung und den Handel mit CO₂-Zertifikaten (analog dem EU-ETS) würde die (wirtschaftlichen) Anreize weiter erhöhen.
- **Wachsendes Bewusstsein für Nachhaltigkeit:** Verbraucher und Unternehmen werden zunehmend umweltbewusster und suchen nach Produkten und Herstellern, die umweltfreundlich sind. Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff in der Industrie kann ein wichtiger Schritt in Richtung Nachhaltigkeit sein, was das Interesse von Unternehmen und Verbrauchern an diesen Produkten weiter steigern könnte.
- **Neue Produkte und Anwendungen:** Die Verwendung von CO₂ als Rohstoff ermöglicht die Herstellung neuer Produkte und Anwendungen, die zuvor nicht möglich waren. Beispiele hierfür sind synthetische Kraftstoffe, Polymermaterialien und Baustoffe. Es ist zu erwarten, dass sich diese Produkte und Anwendungen weiterentwickeln und zu einem breiteren Einsatz von CO₂ als Rohstoff führen werden.

⁴⁹⁰Vgl. (Nova Institut , 2023).