

# CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle für Kunststoffprodukte

## Vergleichende Analyse von CO<sub>2</sub>- und fossilbasierten Wertschöpfungsketten

Emissionen und Kosten

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

U N I K A S S E L | C E N T E R F O R  
V E R S I T Ä T | E N V I R O N M E N T A L  
S Y S T E M S  
R E S E A R C H

**CO<sub>2</sub>WIN**  
Nachhaltig Kohlenstoff nutzen

# Impressum

## Autoren

Simon Kaiser, Finn-Erik Digulla, Stefan Bringezu

## Herausgeber

Center for Environmental Systems Research (CESR)  
Universität Kassel  
Wilhelmshöher Allee 47  
34119 Kassel  
[www.CESR.de](http://www.CESR.de)

## Förderung

Bundesministerium für Bildung und Forschung  
Referat 726: Ressourcen, Kreislaufwirtschaft, Geoforschung Dr. Vera Grimm  
Fördermaßnahme: CO<sub>2</sub>WIN – CO<sub>2</sub> als nachhaltige Kohlenstoffquelle – Wege zur industriellen Nutzung  
Förderkennzeichen: 033RC016B

## Betreuung

Dr. Ole Mallow und Dr. Julian Brüning  
Projektträger Jülich  
Projektträgerschaft Ressourcen, Kreislaufwirtschaft, Geoforschung

## Bezug

Dieses Dokument ist ebenfalls online verfügbar.  
Nähere Infos finden Sie außerdem unter: [www.CESR.de](http://www.CESR.de) und [www.co2-utilization.net](http://www.co2-utilization.net)

## Stand

3. Version, März 2024

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	3
Tabellenverzeichnis.....	4
Zusammenfassung .....	5
1 Einleitung .....	6
2 CO <sub>2</sub> -Nutzung und Kreislaufwirtschaft .....	7
3 Analyse der Wertschöpfungsketten.....	9
3.1 Von der Chemikalie zum Produkt .....	9
3.2 Fossilbasierte Produktion .....	10
3.3 CO <sub>2</sub> -basierte Produktion.....	10
3.4 Fallbeispiele .....	11
3.5 Betrachtete Szenarien .....	11
4 Ergebnisse .....	13
4.1 Produktionskosten.....	13
4.2 Kostenaufteilung .....	13
4.3 CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	14
5 Fazit und Ausblick.....	16
6 Dashboard .....	17
6.1 Zugang .....	17
6.2 Aufbau und Anwendung.....	17
6.3 Ergebnisse und Interpretation.....	17
7 Literaturverzeichnis.....	18

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Möglichkeiten der Kreislaufführung für Kohlenstoff im Chemie- und Kunststoffsektor. ....	7
Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der untersuchten Kohlenstoff-, Energie- und Geldflüsse.....	9
Abbildung 3: Matrix zur Charakterisierung von Kunststoffprodukten auf für den Einsatz von CO <sub>2</sub> -basierter Polymere. ....	11
Abbildung 4: Relative Mehrkosten bei CO <sub>2</sub> -basierter Produktion für drei Fallbeispiele und zwei Szenarien.....	13
Abbildung 5: Benötigte Investitionen, zusätzliche operative Kosten und mögliche Markterlöse. ....	13
Abbildung 6: Unterschiede in der Emissionsstruktur zwischen einer CO <sub>2</sub> und einer fossil-basierten Wertschöpfungskette.. ....	14
Abbildung 7: Relative Reduktion des kunststoffbedingten Klimafußabdruckes bei CO <sub>2</sub> -basierter Produktion....	14

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der Bewertungsindikatoren.....	10
Tabelle 2: Angenommene Marktpreise für die fossilbasierte Produktion von Kunststoffen.....	10
Tabelle 3: Beschreibung der Fallbeispiele.....	11
Tabelle 4: Übersicht über die wichtigsten Szenarioparameter.....	12

# Zusammenfassung

Die Nutzung von Kohlenstoff stellt eine wichtige Materialbasis der Chemie- und Kunststoffindustrie dar, weil dieser für die Produktion von organischen Chemikalien, Kunststoffen und darauf basierender Produkte unabdingbar ist. Als Kohlenstoffquellen werden aktuell größtenteils fossile Rohstoffe verwendet. Gleichzeitig werden kohlenstoffhaltige Produkte hauptsächlich linear genutzt, wodurch der Kohlenstoff am Ende des Lebenszyklus in Form von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre emittiert wird, anstatt ihn zu recyceln. In der deutschen Chemie- und Kunststoffindustrie gehen so jährlich ca. 56 % des verwendeten Kohlenstoffs verloren (Bringezu et al. 2020).

Neben den Technologien des mechanischen und chemischen Recyclings von Kunststoffen bietet die Abscheidung und Nutzung von CO<sub>2</sub> die Möglichkeit, eine effektive Kreislaufführung von Kohlenstoff zu ermöglichen und dabei Chemikalien herzustellen, welche die gleiche Qualität aufweisen wie fabrikneue Produkte. Gleichzeitig kann der entsprechende Klimafußabdruck signifikant reduziert werden. Für den Aufbau geschlossener Kohlenstoffkreisläufe in Form von CO<sub>2</sub>-basierter Wertschöpfungsketten bedarf es der Verknüpfung von CO<sub>2</sub>-Quellen mit erneuerbaren Energiequellen und Produzenten von Chemikalien und Kunststoffen. Allerdings liegen bei der Nutzung von CO<sub>2</sub> die Produktionskosten für Basischemikalien bislang z.T. deutlich über denen für die fossilbasierte Produktion. Welche ökonomischen und ökologischen Effekte ein Wechsel der Kohlenstoffquelle auf die gesamte Wertschöpfungskette von Kunststoffprodukten haben würde, wurde bisher kaum untersucht. Im Rahmen des Forschungsprojektes CO<sub>2</sub>-WIN Connect wurden deshalb Wertschöpfungsketten für ausgewählte Kunststoffprodukte mit Hilfe einer Materialflusskostenanalyse untersucht.

Die Analysen zeigen beispielhaft, welche Gesamtkosten CO<sub>2</sub>-basierte Wertschöpfungsketten haben und wie hoch diese im Vergleich zur fossilbasierten Variante ausfallen, wo Investitionsbedarf besteht und wie viel CO<sub>2</sub>-Emissionen an welcher Stelle eingespart

werden könnten. In Form von Szenarien wird ebenfalls untersucht, welchen Einfluss die Weiterentwicklung der zugrundeliegenden Technologien und die Preise für fossile Rohstoffe auf die jeweiligen Ergebnisse haben.

Je nach Kostenstruktur von Kunststoffprodukten kann eine Umstellung auf eine CO<sub>2</sub>-basierte Produktion geschehen, ohne dass es dadurch zu einer signifikanten Erhöhung der Gesamtkosten kommen würde. Für Produkte mit einem niedrigen Materialkostenanteil bei gleichzeitig hohem Kunststoffanteil wäre eine kostentragende Produktion möglich bei Mehrkosten von weniger als einem Prozent. Gleichzeitig könnten bereits im Status quo die kunststoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen entlang der Wertschöpfungskette um mehr als die Hälfte gesenkt werden. Zukünftig könnte ein klimaneutraler Lebenszyklus für die betrachteten Chemikalien und Kunststoffe erreicht werden, was eine Voraussetzung für einen klimaneutralen Lebenszyklus der darauf basierenden Kunststoffprodukte ist.

Derzeit sind Kosten und Nutzen zwischen den Akteuren der Wertschöpfungskette noch recht ungleich verteilt und es herrscht Unklarheit, wie diese gerecht aufgeteilt werden können. Um für alle Beteiligten Vorteile zu bringen und die nötigen Investitionsanreize zu schaffen, können Kooperationen entlang der Produktionskette helfen. Diese können durch strategische Entscheidungen auf Unternehmensebene vorbereitet werden. Die vorliegende Zusammenstellung soll Unternehmen dabei unterstützen abzuklären, inwieweit eine solche Kooperationen zum Aufbau CO<sub>2</sub>-basierter Wertschöpfungsketten für sie lohnend sein könnten. Mit dem beigefügten Dashboard können zusätzlich eigene Abschätzungen durchgeführt werden.

# 1 Einleitung

Die Art der Kohlenstoffnutzung in unserer Industriegesellschaft verursacht in großen Teilen sowohl die derzeitige Energie- als auch die Klimakrise. Beide gründen auf einer großskaligen, linearen Nutzung von fossilen Kohlenwasserstoffen. In Deutschland werden derzeit ca. 90 % der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) durch deren energetische und stoffliche Nutzung verursacht (BMWK 2021). Gleichzeitig werden weniger als 10 % der verbrauchten Kohlenwasserstoffen in Deutschland gefördert (UBA 2022).

In vielen Bereichen existieren bereits Lösungen, um zukünftig auf Kohlenstoff, bzw. Kohlenwasserstoffe verzichten zu können, zum Beispiel durch den Umstieg auf erneuerbare Energien zur Produktion von Elektrizität und Wärme. In bestimmten Industriesektoren, allen voran im Chemie- und Kunststoffsektor, ist eine Substitution des Kohlenstoffes allerdings nicht möglich, da dieser als Material benötigt wird. So werden ca. 15 % des in Deutschland jährlich verbrauchten Erdöls stofflich eingesetzt und dienen zur Produktion von Chemikalien und Kunststoffen, die aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken sind (VCI 2019). Gleichzeitig stammen weniger als 1 % des in der Chemieindustrie und weniger als 10 % des in der Kunststoffindustrie eingesetzten Kohlenstoffes aus Sekundärquellen (Bringezu et al. 2020). Zusätzlich wird ein Großteil der Produkte am Lebensende nicht recycelt, sondern energetisch verwertet, wodurch wiederum CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen (Conversio 2018). Folglich handelt es sich um weitestgehend lineare Stoffströme und es besteht ein großer Bedarf bei der verstärkten Erschließung von Quellen für Sekundärkohlenstoff, z.B. durch eine verstärkte Kreislaufführung. Dadurch können CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert, auf fossile Rohstoffquellen verzichtet und die Versorgungssicherheit für Kohlenstoff erhöht werden.

Um einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf zu erreichen, müssen die bestehenden, fossilen Kohlenstoffquellen ersetzt werden. In Deutschland

wären dies beispielsweise bis zu 17 Megatonnen an Kohlenstoff pro Jahr (Bringezu et al. 2020). Die Nutzung von CO<sub>2</sub> stellt dabei eine vielversprechende Lösung dar, weil dadurch organische Chemikalien in hoher Qualität und unter Nutzung regionaler Kohlenstoffquellen hergestellt werden können. Gleichzeitig können unter den richtigen Rahmenbedingungen die CO<sub>2</sub>-Emissionen, bzw. der Klimafußabdruck, der Chemikalienproduktion signifikant gesenkt werden (Hoppe et al. 2017; Kätelhön et al. 2019). Im Optimalfall wird über den gesamten Lebenszyklus gesehen Klimaneutralität erreicht.

In Europa gibt es derzeit zahlreiche Industrieinitiativen, die diesen Weg testen und versuchen, eine CO<sub>2</sub>-basierte Wertschöpfungskette für Kunststoffe hochzuskalieren. Beispiele hierfür sind ein Joint Venture von Total und L’Oreal (TotalEnergies 2020), die Supermarktkette Migros (MIGROS 2021) oder die Drogeriemarktkette dm (dm 2021). Erste Produkte sind dabei bereits im Markt erhältlich. Obwohl sich die Initiativen bezüglich der konkreten Produkte unterscheiden, haben sie gemeinsam, dass bisher auf Rohöl produzierte Kunststoffprodukte zukünftig auf CO<sub>2</sub>-basis hergestellt werden sollen.

Im Rahmen dieser Kurzstudie soll deshalb analysiert werden, wie die CO<sub>2</sub>-Nutzung im Sinne einer Kreislaufwirtschaft einzuordnen ist. Weiterhin soll anhand von drei Fallbeispielen dargestellt werden, wie eine CO<sub>2</sub>-basierte Wertschöpfungskette für Kunststoffprodukte aufgebaut sein könnte und welche Unterschiede zu der fossilbasierten Variante bestehen. Dabei wird insbesondere auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Produktionskosten und den Investitionsbedarf eingegangen<sup>1</sup>. Das im letzten Kapitel beschriebene Dashboard dient schließlich als Ausgangspunkt für interessierte Leserinnen und Leser, um eigene Abschätzungen durchführen zu können.

---

<sup>1</sup> Die präsentierten Rechnungen und Ergebnisse sind ein Auszug aus Kaiser et al. (2022). Weitere

Fallbeispiele und Details befinden sich in dem Fachartikel.

## 2 CO<sub>2</sub>-Nutzung und Kreislaufwirtschaft

Eine Kreislaufwirtschaft zielt darauf ab, die Inputs an Ressourcen und Energie zu reduzieren, kombiniert mit einer Reduktion der Outputs an Abfällen und Emissionen. Dies kann erreicht werden, indem Stoffkreisläufe geschlossen, verlangsamt und effizienter werden (Geissdoerfer et al. 2017). Dieser Umstieg vom linearen zum zirkulären Wirtschaften erfordert allerdings eine Umstellung von Geschäftsmodellen und deren Wertschöpfungsstruktur. Dies bietet gleichzeitig Chancen zur Erschließung neuer Geschäftsfelder und verbessert die Versorgungssicherheit für Rohstoffe. Zum Beispiel werden neue Prozesse zur Bereitstellung von Sekundärrohstoffen benötigt, die zum einen Material in ausreichender Qualität bereitstellen und dabei ergänzend zu linearen Wirtschaftsmodellen eine zusätzliche Dienstleistung liefern, in Form von reduzierten Umweltwirkungen.

Prinzipiell existieren zahlreiche Wege, um Kohlenstoff im Kreislauf zu führen und Stoffkreisläufe zu schließen (Abbildung 1). Die

verschiedenen Verfahren der technischen Kreislaufführung unterscheiden sich dabei hauptsächlich in Bezug auf der erforderlichen Qualität der Abfallströme, die Qualität des produzierten Recyclates und dem hierfür benötigten Energieaufwand.

Beispielsweise verfügen mechanisch recycelte Kunststoffe tendenziell über eine geringere technische Qualität und Reinheit als fabrikneue

Kunststoffe (Keim 2006), können aber mit relativ geringem Energieaufwand hergestellt werden. Deshalb unterscheiden sich die verschiedenen Recyclingwege in ihren Kosten und die jeweiligen Verfahren sind nicht für alle Einsatzfelder gleich gut geeignet.

Die Nutzung von CO<sub>2</sub> ermöglicht die Bereitstellung von Basischemikalien und daraus hergestellten Kunststoffen in Neuqualität. Bereits mit dem aktuellen Technologiestand könnte ein Großteil der bisher fossilbasierten organischen Chemikalien und darauf basierender Produkte auf CO<sub>2</sub>-Basis

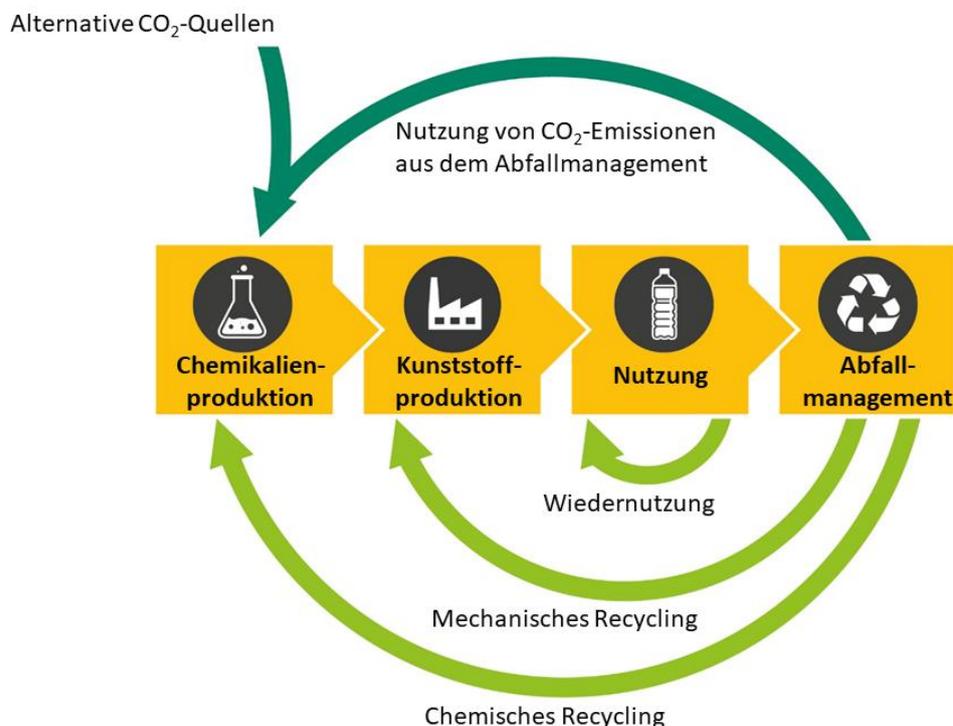


Abbildung 1: Möglichkeiten der Kreislaufführung für Kohlenstoff im Chemie- und Kunststoffsektor.

hergestellt werden (Bringezu et al. 2020). Je nachdem, welche CO<sub>2</sub>-Quelle verwendet wird, kann der im CO<sub>2</sub>-Molekül enthaltene Kohlenstoff im Kreislauf geführt oder aber Kohlenstoffemissionen von anderen Sektoren als Rohstoffquelle genutzt werden. In beiden Fällen wird der Bedarf an fossilen Primärrohstoffen, wie Erdöl oder Erdgas reduziert. Beispielhafte CO<sub>2</sub>-Quellen für eine Kreislaufführung wäre die Nutzung von Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen oder die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft. Gleichzeitig könnten rohstoffbedingte Emissionen aus der Zementindustrie in großem Umfang genutzt werden. Prinzipiell wären aktuell und zukünftig in Deutschland ausreichend industrielle CO<sub>2</sub>-Punktquellen vorhanden, um einen Großteil des Kohlenstoffbedarfs der Chemie- und Kunststoffindustrie zu decken (Kaiser und Bringezu 2020). Dies ist auch dann der Fall, wenn nur diejenigen CO<sub>2</sub>-Punktquellen betrachtet werden, die als technisch und gesellschaftlich unvermeidbar gelten oder nichtfossilen Ursprungs sind. In diesem Fall kann die Nutzung von CO<sub>2</sub> im Sinne einer Kreislaufwirtschaft als Recyclingtechnologie bezeichnet werden (Kaiser et al. 2022). Es würden auf rezykliertem Kohlenstoff basierende Chemikalien und Kunststoffe hergestellt, während gleichzeitig die Nettoemissionen an THG der Wertschöpfungskette im Optimalfall auf null gesenkt werden. Gleichzeitig ist die Verfügbarkeit der benötigten CO<sub>2</sub>-Quellen auch langfristig gegeben.

Zusätzlich zur Reduktion des Klimafußabdruckes (Summe der THG-Emissionen) kann durch die Nutzung einer nicht-fossilen, sekundären Kohlenstoffquelle ebenfalls der Rohstoffbedarf gesenkt werden. Während für die Produktion fossilbasierter Chemikalien die Förderung von Primärrohstoffen notwendig ist, basiert die CO<sub>2</sub>-basierte Herstellung auf sekundären Rohstoffen und erneuerbaren Energien. Wenngleich letztere einen nicht vernachlässigbaren, indirekten Rohstoffbedarf verursachen, können CO<sub>2</sub>-basierte Chemikalien in Abhängigkeit des Produktionsstandortes mit einem geringeren Rohstoffverbrauch hergestellt werden, insbesondere falls Windkraft zur Elektrizitätserzeugung genutzt wird (Kaiser et al. 2021). So könnten neben dem Klimafußabdruck durch potenziell sinkende Ressourcenfußabdrücke auch weitere

Umweltbelastungen der Wertschöpfungskette reduziert und ressourcen-effizienter produziert werden.

In den nächsten Kapiteln werden deshalb beispielhafte Wertschöpfungsketten für CO<sub>2</sub>-basierte Kunststoffprodukte beschrieben und deren Performance im Hinblick auf die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten analysiert.

# 3 Analyse der Wertschöpfungsketten

## 3.1 Von der Chemikalie zum Produkt

Die bisherigen ökonomischen und ökologischen Analysen CO<sub>2</sub>-basierter Chemikalien und Kunststoffe fokussieren auf die Herstellung der benötigten Basischemikalien (Hank et al. 2018; Hoppe et al. 2018; Kaiser et al. 2021). Die Studien kommen zu dem Ergebnis, dass im Falle der Verwendung von erneuerbaren Energien der Klimafußabdruck signifikant gesenkt werden kann. Gleichzeitig liegen die Produktionskosten für CO<sub>2</sub>-basierte Chemikalien im Status quo signifikant oberhalb derer für fossilbasierte Chemikalien, könnten mittelfristig allerdings deutlich gesenkt werden.

Der Fokus auf den Produktionsschritt der Basischemikalien lässt außer Acht, dass der Anteil an Materialkosten an den Gesamtkosten von Produkten mit steigender Wertschöpfung abnimmt. Der Kostenanteil für Kunststoffe an den Gesamtkosten eines fertigen Produktes kann deshalb sehr gering sein (Wilting und Hanemaaijer 2014). Die signifikanten Preissteigerungen beim Rohmaterial, also der Produktion von CO<sub>2</sub>-basierter Basischemikalien, machen sich deshalb potenziell nur in sehr geringem Ausmaß im späteren Verkaufspreis der Kunststoffprodukte bemerkbar.

Um genauere Aussagen über die Auswirkungen eines Umstiegs von fossilbasierten auf CO<sub>2</sub>-basierte Basischemikalien auf die Gesamtkosten und -emissionen treffen zu können, muss der Untersuchungsrahmen der bestehenden Analysen entsprechend erweitert werden. Deshalb wurde eine Materialflusskostenrechnung nach DIN 14051 durchgeführt. Hierzu wurden mit Hilfe einer Systemanalyse die Kohlenstoff-, Energie- und Geldflüsse von CO<sub>2</sub>- und fossilbasierter Wertschöpfungsketten für unterschiedliche Fallbeispiel modelliert und miteinander verglichen. (Abbildung 2). Im Systemraum sind die Prozesse Energiebereitstellung, Rohstoff-, Chemikalien- und Kunststoffproduktion sowie Produktherstellung enthalten. Der Markt ist ebenfalls im System enthalten, da er die Quelle für den operativen Cashflow darstellt. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die Produkte, bzw. darin enthaltenen Kunststoffe am Ende ihres Lebenszyklus verbrannt werden, wodurch CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen.

Zur Bewertung werden im Rahmen dieser Analyse zwei Indikatoren verwendet (Tabelle 1). Zum einen wird die mögliche Reduktion des kunststoffbedingten Klimafußabdruckes entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermittelt. Zum anderen wird berechnet, inwiefern sich die

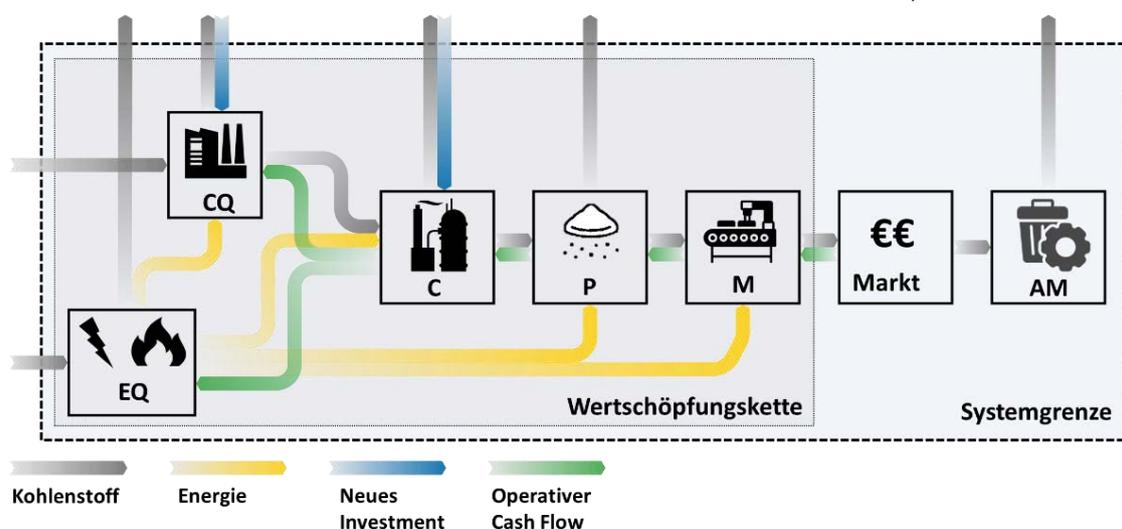


Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der untersuchten Kohlenstoff-, Energie- und Geldflüsse anhand eines Produktsystems (CQ = Kohlenstoffquelle; EQ = Energiequelle; C = Chemikalienproduktion; P = Polymerproduktion; M = Produktherstellung; AM = Abfallmanagement). Grafik verändert übernommen aus: Kaiser et al. (2022).

### 3 | Analyse der Wertschöpfungsketten

Gesamtkosten, bzw. der Nettomarktpreis eines Produktes ändern würde.

*Tabelle 1: Beschreibung der Bewertungsindikatoren.*

Indikator	Beschreibung
Mögliche Emissionsreduktion	Reduktion des kunststoffbedingten Klimafußabdruckes entlang des kompletten Produktlebenszyklus
Relative Kostenänderung	Kostenveränderung, in Bezug auf die aktuellen Nettomarktpreise, welche durch eine CO <sub>2</sub> -basierte Produktion entstehen würden

### 3.2 Fossilbasierte Produktion

Die fossilbasierte Produktion stellt den Stand der Technik dar. Die entsprechenden Prozesse basieren auf der Förderung und Verarbeitung von Rohöl. Für deren Modellierung wurden Daten aus bestehenden Prozessdatenbanken der europäischen Chemieindustrie und geeigneter Literatur genutzt sowie aktuelle Marktdaten herangezogen (Tabelle 2).

*Tabelle 2: Angenommene Marktpreise für die fossilbasierte Produktion von Kunststoffen (HDPE/LDPE = High Density/Low Density Polyethylene, POM = Polyoxymethylen).*

Chemikalie/Kunststoff	Marktpreis
Ethylen	1057 €/t
HDPE	1449 €/t
LDPE	1428 €/t
Methanol	336 €/t
POM	2878 €/t

### 3.3 CO<sub>2</sub>-basierte Produktion

Die Produktion von CO<sub>2</sub>-basierten Kunststoffprodukten unterscheidet sich von einer fossilbasierten vor allem im Hinblick auf die verwendeten Rohstoff- und Energiequellen und die Produktion der Basischemikalien. Die restlichen

Produktionsschritte der Kunststoff- und Produktherstellung, sind hingegen identisch. CO<sub>2</sub>-basierte Basischemikalien könnten somit in bestehenden Wertschöpfungsketten als Drop-in verwendet werden. Deshalb wurden zusätzlich zu den Prozessen im Bereich der Kunststoffproduktion und -verarbeitung folgende Produktionsschritte für die Herstellung von CO<sub>2</sub>-basierten Basischemikalien modelliert:

- CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus einem Zementwerk
- H<sub>2</sub>-Produktion mit Hilfe eines Proton-Exchange-Membran (PEM) Elektrolyseur
- Methanolsynthese
- Methanol-to-Olefines (MTO) Prozess zur Herstellung von Ethylen

Grundlage für die Modellierung bildeten aktuelle Literaturdaten. Das so produzierte Methanol und Ethylen kann identische und bisher auf fossiler Basis hergestellte Ausgangsstoffe ersetzen, beispielsweise bei der Produktion von Polyethylen (PE) bzw. Polyoxymethylen (POM). Es wurde angenommen, dass mangels Pipelineinfrastruktur für CO<sub>2</sub> oder H<sub>2</sub> in Deutschland die H<sub>2</sub>- und Methanolproduktion in unmittelbarer Nähe zur CO<sub>2</sub>-Quelle stattfindet. Das Methanol wird anschließend per LKW zur MTO-Anlage weitertransportiert. Um die bestehenden Skaleneffekte bei der Kunststoffproduktion weiterhin nutzen zu können, wurde angenommen, dass sich die MTO-Anlage in unmittelbarer Nähe dazu befindet und das CO<sub>2</sub>-basierte Ethylen, bzw. Methanol als Drop-in genutzt wird. Die konkreten Annahmen für die einzelnen Produktionsschritte sind in Tabelle 4 dargestellt. Als Energiequelle wurde angenommen, dass die Elektrolyse mit CO<sub>2</sub>-neutralem Windstrom gespeist wird, während für alle weiteren Prozesse eine Strom- und Gasversorgung basierend auf dem aktuellen Netzmix in Deutschland verwendet wird.

Die modellierte Wertschöpfungskette besitzt eine Produktionskapazität von 100 kt Methanol, bzw. 39 kt Ethylen oder 83 kt Formaldehyd pro Jahr. Hierfür werden jährlich 142 kt CO<sub>2</sub> und 20 kt H<sub>2</sub> benötigt. Die daraus herstellbare Menge an PE, bzw. POM entspricht 2 %, bzw. 22 % der jährlichen Produktionsmenge in Deutschland, oder 23 %, bzw. 149 % der durchschnittlichen Produktionsmenge eines einzelnen Produzenten (Destatis 2022).

### 3.4 Fallbeispiele

Die untersuchten Fallbeispiele wurden so ausgewählt, dass sie unterschiedliche Kostenstrukturen, Sektoren und Kunststofftypen abdecken. Ziel war es, verschiedene Kombinationen des Kunststoffanteils und der Materialkosten für Kunststoffe in weiterverarbeiteten Produkten abzubilden (Abbildung 3).

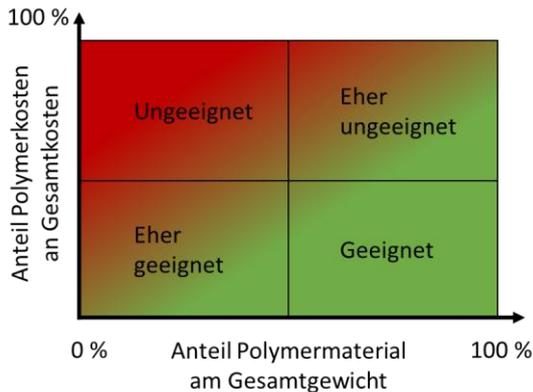


Abbildung 3: Matrix zur Charakterisierung der Eignung von Kunststoffprodukten für den Einsatz von CO<sub>2</sub>-basierten Polymeren.

Für die Nutzung CO<sub>2</sub>-basierter Kunststoffe sind insbesondere solche Kunststoffprodukte interessant, die einen geringen Kosten- bei einem hohen Kunststoffanteil aufweisen. Hier könnten verhältnismäßig viele CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Wertschöpfungskette vermieden werden und gleichzeitig würden die benötigten Mehrkosten einen geringen Umfang ausmachen. Produkte mit einem hohen Kostenanteil sind dahingegen eher uninteressant.

Der Unterschied zwischen fossil- und CO<sub>2</sub>-basierter Produktion wird im Rahmen dieser Studie anhand von drei verschiedenen Fallbeispielen erläutert werden. Diese repräsentieren aufgrund ihrer Kosten- und Materialstruktur die Felder *eher ungeeignet*, *eher geeignet* und *geeignet* (Tabelle 3). Gleichzeitig erlaubt die Analyse eine Aussage darüber, welche Unterschied es macht, wenn CO<sub>2</sub> zur Herstellung von hochwertigen Kunststoffen (POM) oder Massenkunststoffen (HDPE, LDPE) eingesetzt würde.

Tabelle 3: Beschreibung der Fallbeispiele (HDPE = High Density Polyethylene, PVC = Polyvinylchlorid, POM = Polyoxymethylen).

Produkt	Kunststoff-anteil	Kosten-anteil
Plastikflasche: Desinfektionsmittel (HDPE)	12 %	0,6 %
Luftpolsterfolie (LDPE)	100 %	19 %
Zahnrad (POM)	100 %	1 %

### 3.5 Betrachtete Szenarien

Um neben dem aktuellen Stand der Technik auch mögliche Weiterentwicklungen - sowohl bei der Technologienentwicklung als auch den Hintergrundprozessen wie z.B. dem Strommix und Rohölpreisen - mit zu berücksichtigen, wurden in der Analyse zwei Szenarien betrachtet. Zuerst ein Szenario, welches den Status quo beschreibt. Zweitens ein Szenario für das Jahr 2050, in welchem zukünftige Entwicklungen für diejenigen Parameter angenommen wurden, welche in einer Beitragsanalyse der Status quo-Ergebnisse als entscheidend identifiziert wurden. Dies sind der Klimafußabdruck des Stromnetzes sowie die Investitionskosten und Prozesseffizienzen der CO<sub>2</sub>-basierten Wertschöpfungskette. Die entsprechenden Parameter sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Stromkosten für den Elektrolyseur basieren auf Kostenschätzungen für Strom aus Onshore Windkraftanlagen in Deutschland (Fraunhofer ISE 2021). Es wird angenommen, dass dieser in Form von Power Purchase Agreements direkt durch den Anlagenbetreiber bezogen wird. Die Kosten für Netzstrom basieren auf (DENA 2018). Die Kosten der Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus einem Zementwerk basieren auf eigenen Prozessmodellen. Sie liegen im mittleren Bereich aktueller Schätzungen der Internationalen Energieagentur (IEA 2022).

Generell sind die Kostensenkungen und gesteigerten Anlageneffizienzen bei Produktionsprozessen der CO<sub>2</sub>-basierten Wertschöpfungskette hauptsächlich auf eine erwartete Industrialisierung zurückzuführen. So liegt die Skalierung der Produktion von

### 3 | Analyse der Wertschöpfungsketten

CO<sub>2</sub>-basierten Chemikalien aktuell im hundert-kilotonnen Maßstab (CRI 2020), während fossilbasierte Prozesse häufig ein jährliches Produktionsvolumen mehrere Megatonnen aufweisen. Mit steigenden Produktionsvolumina und Erfahrungswerten kann aber davon ausgegangen werden, dass ökonomische und technische Lern- und Skalierungseffekte eintreten.

Dadurch können die Investitionskosten gesenkt und die Prozesseffizienzen gesteigert werden, sowohl in Bezug auf den Energiebedarf als auch auf die Kohlenstoffumsetzung. Auch im Bereich der CO<sub>2</sub>-Abscheidung wird davon ausgegangen, dass aufgrund einer breiteren Anwendung signifikante Kostensenkungen erwartet werden können (IEA 2020).

Table 4: Übersicht über die verwendeten Szenarioparameter.

Parameter	Wert 2020	Wert 2050
GWI-Strommix [kg CO <sub>2</sub> -äq./MJ]	0,1	0
GWI-Wärmemix [kg CO <sub>2</sub> -äq./MJ]	0,1	0
Elektrizitätskosten (Netzstrom) [€/MJ]	0,05	0,05
Elektrizitätskosten (Windstrom) [€/MJ]	0,02	0,02
Capex Elektrolyseur [M€/MW]	1,4	0,3
Systemeffizienz Elektrolyseur	67 %	74 %
Kosten CO <sub>2</sub> -Abscheidung [€/tCO <sub>2</sub> ]	93	50
H <sub>2</sub> -Bedarf Methanolsynthese [kg <sub>H2</sub> /kg <sub>Methanol</sub> ]	0,2	0,19
Methanolbedarf der Ethylenherstellung [kg <sub>Methanol</sub> /kg <sub>Ethylen</sub> ]	2,6	2,3

# 4 Ergebnisse

## 4.1 Produktionskosten

Insgesamt liegen die Produktionskosten der betrachteten CO<sub>2</sub>-basierten Basischemikalien im Status quo und im Jahr 2050 oberhalb derer für die fossilbasierte Alternativen<sup>2</sup>. So liegen die Kosten für CO<sub>2</sub>-basiertes Ethylen um das 4,6-fache (Status quo) bis 1,6-fache (2050) höher und für Formaldehyd zwischen dem 3,5-fachen (Status quo) und 1,4-fachen. Die Break-even Preise für Rohöl liegen zwischen 200 (POM) und 584 (LDPE) €/Barrel im Jahr 2020 sowie zwischen 82 (POM) und 115 (LDPE) €/Barrel im Jahr 2050. Diese Mehrkosten wirken sich allerdings unterschiedlich auf die Gesamtkosten der Kunststoffprodukte aus (Abbildung 4). Für hochwertige Produkte, bzw. Verpackungen von hochwertigen Produkten, liegen die Mehrkosten *bereits im Status quo unter 1 % und perspektivisch unterhalb von 0,1 %*. Daneben liegen die relativen Mehrkosten für eine reine Verpackung um fast eine Größenordnung höher. Es wird also deutlich, dass für hochpreisige Produkte die Mehrkosten für die CO<sub>2</sub>-basierte Produktion sehr gering ausfallen, während diese für Produkte mit einer anderen Kostenstruktur wesentlichen höher liegen. Die höhere Wertschöpfung gelingt dabei aufgrund des

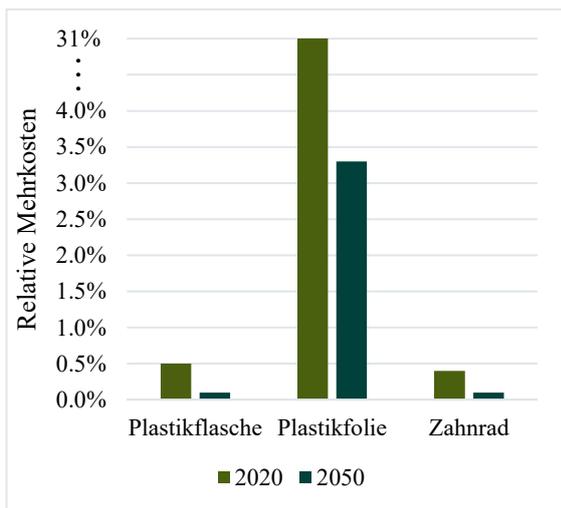


Abbildung 4: Relative Mehrkosten bei CO<sub>2</sub>-basierter Produktion für drei Fallbeispiele und zwei Szenarien.

<sup>2</sup> Die Berechnungen beruhen auf einem Erdölpreis aus dem Jahr 2020 von 60 €/Barrel und einer jährlichen Preissteigerung von 1 % bis zum Jahr 2050. Für den Fall, dass sich der jüngste Preisschock

verpackten Produktes (Plastikflasche) oder aber der höheren Qualität des Kunststoffes (Zahnrad).

## 4.2 Kostenaufteilung

Der Aufbau einer CO<sub>2</sub>-basierten Wertschöpfungskette verursacht signifikanten Investitionsbedarf in neue Produktionsanlagen. Diese werden hauptsächlich durch die benötigten Elektrolysekapazitäten (71 %) verursacht. Im Vergleich dazu fallen die Investitionskosten für die Methanolsynthese (15 %), CO<sub>2</sub>-Abscheideanlage (8 %) und die Methanol-to-Olefins Anlage (6 %) gering aus (Abbildung 5). Gleichzeitig wären die zusätzlich anfallenden, operativen Ausgaben für einen Kunststoffhersteller mit 128 Millionen € pro Jahr sehr gering im Vergleich zu den möglichen

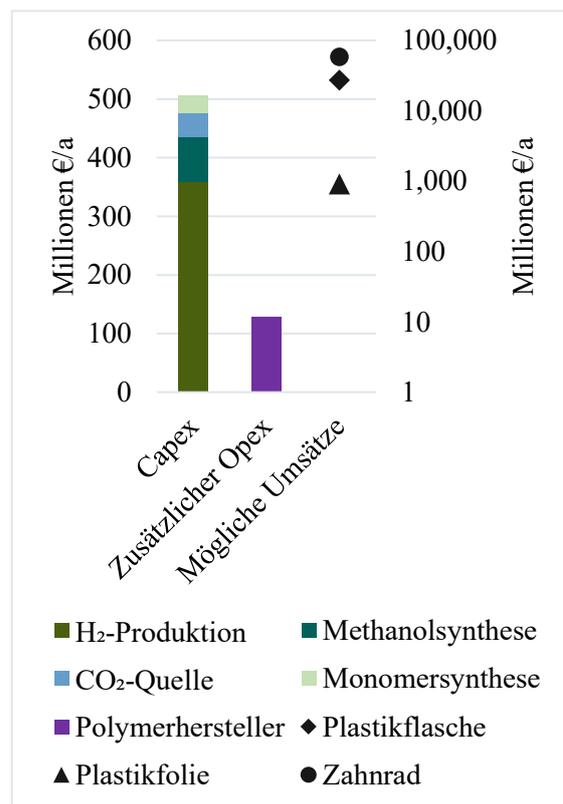


Abbildung 5: Benötigte Investitionen, zusätzliche operative Kosten (beides linke y-Achse) und mögliche Markterlöse (rechte y-Achse) für die Verarbeitung von 140 kt CO<sub>2</sub> pro Jahr zu 100 kt Methanol, bzw. 37 kt Ethylen.

für Erdöl fortsetzt, könnte dies die Wettbewerbsfähigkeit der CO<sub>2</sub>-basierten Prozesse deutlich steigern.

## 4 | Ergebnisse

Umsätzen des Produktvermarkters mit den jeweiligen Produkten von mehreren Milliarden € pro Jahr. Damit liegt die alleinige Investitionslast bei den Herstellern der Basischemikalien, während bei den Kunststoffherstellern und Produktvermarktern im Falle von hochwertigen Produkten den zusätzlichen operativen Kosten ein Umsatz in Milliardenhöhe gegenübersteht. Zusammen mit den relativen Mehrkosten auf Produktbasis kann geschlussfolgert werden, dass ein kostendeckender Betrieb einer CO<sub>2</sub>-basierten Wertschöpfungskette für Kunststoffprodukte möglich wäre, bei erforderlichen Preissteigerungen von weniger als 1%. Im Falle von sinkenden Investitionskosten für Elektrolyseure würden diese zukünftig nochmal geringer ausfallen.

### 4.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen

Den höheren Produktionskosten CO<sub>2</sub>-basierter Basischemikalien steht eine Senkung der kunststoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen entlang der Wertschöpfungsketten gegenüber. Bereits im Status quo könnten diese um 50 bis 60% gesenkt werden (Abbildung 7). Die mögliche Reduktion für PE-Produkte fällt dabei höher aus, aufgrund des höheren thermischen Energiebedarfs der POM-Herstellung, welcher wiederum energiebedingte Emissionen im Polymerisationsprozess verursacht. Die Ergebnisse für das Szenario im Jahr 2050 zeigen, dass durch eine Entwicklung des Strom- und Wärmemixes hin zur Klimaneutralität diese zukünftig auch für den Lebenszyklus von

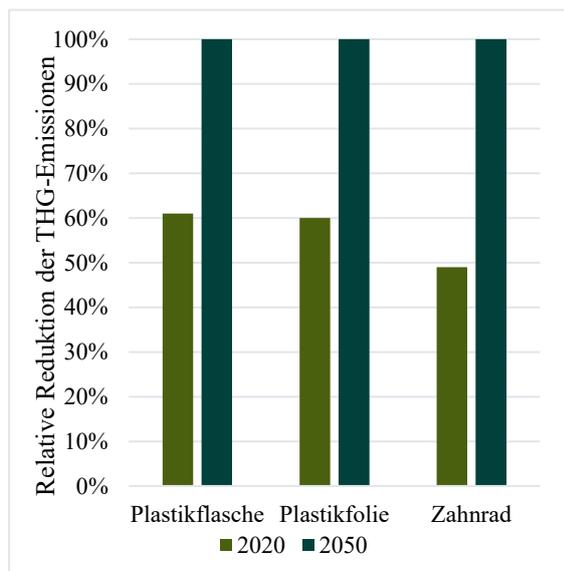


Abbildung 7: Relative Reduktion des Klimafußabdruckes bei CO<sub>2</sub>-basierter Produktion im Vergleich zur fossilbasierten Produktion für verschiedene Produkte.

Kunststoffen erreicht werden könnte, trotz der Emissionen am Ende des Lebenszyklus.

Ein Vergleich der Emissionsstrukturen zwischen der CO<sub>2</sub>-basierten und fossilbasierten Wertschöpfungskette für die Herstellung einer Plastikflasche zeigt die folgenden Punkte auf (Abbildung 6). Zum einen werden zu Beginn der Wertschöpfungskette im Falle der CO<sub>2</sub>-basierten Variante negative Emissionen verursacht sowie bei der Herstellung des Rohstoffes Emissionen eingespart. Hierbei ist zu beachten, dass es sich zwar um negative Emissionen handelt, diese aber am Ende des Lebenszyklus wieder emittiert werden und es sich aufgrund der meist geringen Lebensdauer von Kunststoffen nicht um eine dauerhafte Speicherung handelt. Die Senkung des Klimafußabdruckes wird dadurch erzielt, dass in der Produktionsphase auf fossile Rohstoffe verzichtet wird. Zum anderen sind die absoluten Emissionswerte für die weiteren Schritte der Wertschöpfungsstufen und das Abfallmanagement identisch. Die Reduktion der lebenszyklusweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen wird somit

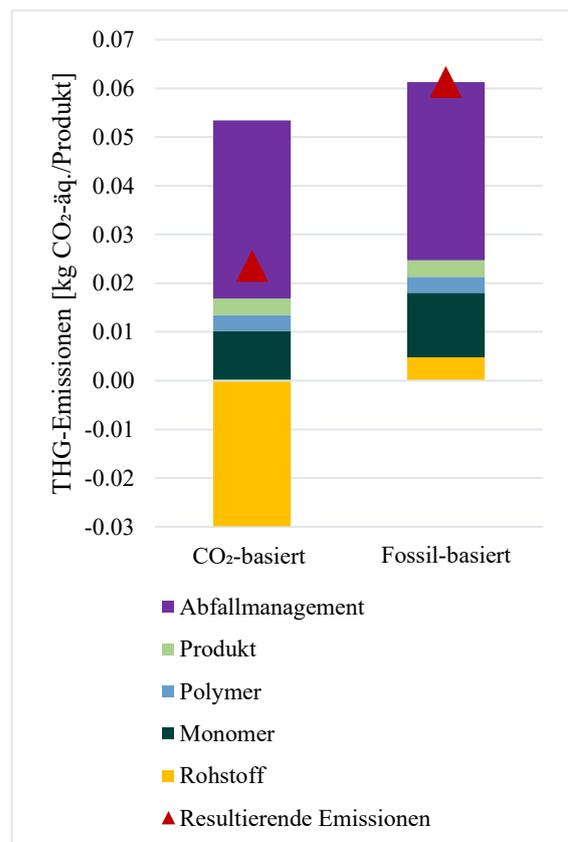


Abbildung 6: Unterschiede in der Emissionsstruktur zwischen einer CO<sub>2</sub>- und einer fossilbasierten Wertschöpfungskette. Exemplarisch gezeigt anhand einer Plastikflasche aus Polyethylen.

#### 4 | Ergebnisse

allein durch eine entsprechende Änderung der Produktion von Basischemikalien verursacht. Somit profitieren alle weiteren Glieder der Wertschöpfungskette von einer entsprechenden Änderung bei der Herstellung der Rohstoffe und Basischemikalien. Gleichzeitig haben sowohl Kunststoffhersteller als auch Produktvermarkter sehr wenig Einfluss auf die resultierenden Emissionen der Wertschöpfungskette, da ihre Produktionsschritte nur für einen kleinen Teil der Gesamtemissionen verantwortlich sind.

Zusammen mit den ökonomischen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass Kosten (Investitionen) und Nutzen (Umsatz und Emissionsreduktion) ungleich zwischen den einzelnen Gliedern der Wertschöpfungskette verteilt sind. Gleichzeitig könnte eine CO<sub>2</sub>-basierte Wertschöpfungskette kostendeckend operieren und dabei die lebenszyklusweiten Emissionen um mehr als die Hälfte reduzieren, ohne dass signifikante Preissteigerungen verursacht werden würden.

# 5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Kurzstudie wurde anhand von drei Fallbeispielen dargestellt, wie CO<sub>2</sub>-basierte Wertschöpfungsketten für Kunststoffprodukte aussehen könnten und wie die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle zu einem verstärkten Recycling von Kohlenstoff und letztendlich zu einem geschlossenen Kohlenstoffkreislauf führen könnte. Neben dem Beitrag zum Klimaschutz und zur Kreislaufwirtschaft könnte durch die Nutzung von CO<sub>2</sub> ebenfalls die Versorgungssicherheit für Kohlenstoff gesteigert werden. In Deutschland sind aktuell und voraussichtlich auch zukünftig ausreichend unvermeidbare CO<sub>2</sub>-Punktquellen vorhanden, deren Emissionen auf diese Weise als Rohstoff in anderen Sektoren verwendet werden könnte. So ermöglicht beispielsweise die Nutzung der stoffbedingten Emissionen eines einzelnen Zementwerkes die Produktion von mehreren zehntausend Tonnen an Kunststoffen. Durch den geplanten Aufbau eines CO<sub>2</sub>-Netzwerkes können weitere CO<sub>2</sub>-Quellen erschlossen und Skaleneffekte realisiert werden.

Je nach Kostenstruktur von Kunststoffprodukten kann eine Umstellung auf eine CO<sub>2</sub>-basierte Produktion geschehen, ohne dass es dadurch zu einer signifikanten Erhöhung der Gesamtkosten kommen würde. Für Produkte mit einem niedrigen Materialkostenanteil bei gleichzeitig hohem Kunststoffanteil wäre eine kostentragende Produktion möglich, bei Mehrkosten von weniger einem Prozent. Gleichzeitig können bereits im Status quo die kunststoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen entlang der Wertschöpfungskette um mehr als die Hälfte gesenkt werden. Zukünftig könnte zudem ein klimaneutraler Lebenszyklus für die betrachteten Kunststoffe erreicht werden.

Insbesondere für Branchen mit einem hohen Anspruch an die Qualität und Reinheit der eingesetzten Kunststoffe bei gleichzeitig niedrigem Materialkostenanteil (z.B. Medizintechnik oder Verpackungen für Nahrungsmittel und Kosmetik) könnte CO<sub>2</sub> eine vielversprechende Quelle für Sekundärkohlenstoff darstellen, deren Nutzung gleichzeitig den Klimafußabdruck der gesamten Wertschöpfungskette reduziert.

Die Kosten- und Emissionsstruktur einer CO<sub>2</sub>-basierten Wertschöpfungskette zeigen allerdings, dass Kosten und Nutzen aktuell sehr ungleich verteilt. So käme eine Umstellung der Produktion von Basischemikalien durch die eingesparten Emissionen der gesamten Wertschöpfungskette zugute. Gleichzeitig haben die Kunststoffhersteller und Produktvermarkter wenig eigene Möglichkeiten, diese zu senken. Allerdings erfordert eine solche Umstellungen hohe Investitionen in neue Produktionsanlagen, welche von den Produzenten der Basischemikalien getragen werden müssten. Dadurch und aufgrund eines höheren Energiebedarfs würde sich zwar die Produktion der Basischemikalien signifikant verteuern, bei einer Umlage auf die daraus produzierten Produkte würde diese für den Produktvermarkter zu keinen nennenswerten Mehrkosten führen. Gleichzeitig könnte dieser aufgrund der signifikant niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Wertschöpfungskette einen Wettbewerbsvorteil generieren.

Folglich sind strategische Entscheidungen auf Unternehmensebene zu treffen, um Kosten und Nutzen in Einklang zu bringen. Die Schaffung eines Marktes für Produkte aus Sekundärkohlenstoff oder aber eine Kooperation zwischen den beteiligten Gliedern der Wertschöpfungskette könnten Investitionsanreize setzen und so ermöglichen, klima- und ressourcenschonende Produkte kostentragend zu vermarkten.

# 6 Dashboard

Ergänzend zu dieser Fallstudie wurde ein Dashboard erstellt, welches erlaubt, die Umweltwirkung und Kosten von CO<sub>2</sub>-basierten Wertschöpfungsketten mit denen der entsprechenden konventionellen Wertschöpfungsketten zu vergleichen. Entscheidende Parameter können dabei selbst gewählt werden. Konkret können die relativen Veränderungen der Produktionskosten und der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei einer Umstellung von konventioneller auf CO<sub>2</sub>-basierte Produktion abgerufen werden.

Ergänzend zu den im Rahmen dieser Studie beschriebenen Fallbeispielen sind Daten für weitere Polymertypen verfügbar. Im Dashboard enthalten sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC) und Polyoxymethylen (POM). Es können eigene Werte für die Stromkosten, die Art der CO<sub>2</sub>-Quelle (Punktquelle oder atmosphärische Abscheidung) und eine Jahreszahl als Referenz für entscheidende Hintergrundparameter, wie den verwendeten Strommix, ausgewählt werden. Die Ergebnisse für verschiedene Szenarios können dabei direkt miteinander verglichen werden. Kosten und Nutzen spezifischer Beispiele können von Nutzer selbst abgeschätzt werden und Sensitivitäten erkannt werden. Im Folgenden wird die Funktionsweise des Dashboards kurz erläutert.

## 6.1 Zugang

Das Dashboard können Sie als Excel Datei über die Projektwebseite der Fördermaßnahme CO<sub>2</sub>-WIN, [www.co2-utilization.net](http://www.co2-utilization.net), herunterladen.

## 6.2 Aufbau und Anwendung

Die Ergebnisse des Dashboards werden in einer 4x3-Matrix dargestellt. Dabei steht jede Zeile für einen Ergebnisparameter (*Relative Änderung der Produktkosten, Relative Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten*) und jede Spalte für je einen Kunststofftyp. Auf der rechten Seite befinden sich mehrere Auswahlfelder mit deren Hilfe die gewünschten Szenarioparameter

eingestellt werden können (Mehrfachauswahl durch Halten von Strg möglich). Durch die möglichen Kombinationsmöglichkeiten lassen sich 30 verschiedene Szenarien vergleichen. Für eine gute Übersicht empfehlen wir jedoch maximal zehn Szenarien gleichzeitig anzuzeigen. Je nach verwendetem Bildschirmtyp muss gegebenenfalls die Zoomstufe angepasst werden oder der Bildausschnitt für eine gute Lesbarkeit eingeschränkt werden.

## 6.3 Ergebnisse und Interpretation

In den Grafiken der ersten Zeile ist auf der Y-Achse die Veränderung der Produktkosten logarithmisch dargestellt. Ein Wert von 100 % entspricht dabei einer Verdoppelung der Produktkosten. Auf der X-Achse ist der Anteil der Polymerkosten an den Gesamtkosten des Produkts bei konventioneller Herstellung dargestellt. Hier bedeutet ein Wert von 100 %, dass die Produktionskosten vollständig durch die Polymerkosten ausgemacht werden. Je geringer der Anteil der Polymerkosten ist, desto geringer fällt die Veränderung der Kosten für das Endprodukt bei einer Umstellung auf CO<sub>2</sub>-basierte Produktion aus. In der zweiten Zeile ist die relative Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt, die aus einer Umstellung resultieren würde. Der Strompreis ist hierfür nicht relevant, weshalb sich nur sechs verschiedene Szenarien ergeben. In der Betrachtung sind die Emissionen der Abfallverbrennung inkludiert, weshalb die maximal erreichbare Emissionsreduktion bei 100 % liegt. Diese wird im Jahr 2050 unter Annahme eines klimaneutralen Energiesystems für alle Varianten erreicht. Für alle betrachteten Szenarien ergibt sich bei der Umstellung auf eine CO<sub>2</sub>-basierte Produktion eine CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion bei gleichzeitiger Erhöhung der Produktionskosten. In der dritten Zeile sind die resultierenden Mehrkosten pro Tonne vermiedener CO<sub>2</sub>-Emission in den verschiedenen Szenarien dargestellt

# 7 Literaturverzeichnis

- BMWK (2021). *Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren*. Available online: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/treibhausgasemissionen-deutschland-nach-sektoren.html>, Access Date: 10/13/2022.
- Bringezu, Stefan; Kaiser, Simon and Turnau, Sebastian (2020). *Zukünftige Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoffbasis der deutschen Chemie- und Kunststoffindustrie*. Universität Kassel und Center For Environmental Systems Research (CESR). DOI: 10.17170/KOBRA-202002211019.
- Conversio (2018). *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017*. Conversio Market & Strategy GmbH, Mainaschaff.
- CRI (2020). *Shunli Project*. Carbon Recycling International. Available online: <https://www.carbonrecycling.is/projects#projects-shunli>, Access Date: 4/2/2021.
- DENA (2018). *Integrierte Energiewende - dena-Leitstudie*. Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin.
- Destatis (2022). *Quarterly Production Survey in the Manufacturing Sector (Orig. Title: Vierteljährliche Produktionserhebung im verarbeitenden Gewerbe)*. Federal Statistics Office (Destatis), Wiesbaden, Germany. Available online: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>.
- DIN EN ISO 14051, 2011. *Environmental Management - Material Flow Cost Accounting*. Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- dm (2021). *Aus CO<sub>2</sub> wird Verpackung - dm-Marke Denkmit bietet erste Produkte mit Verpackung aus recyceltem CO<sub>2</sub> an*. Available online: <https://newsroom.dm.de/pressreleases/aus-co2-wird-verpackung-dm-marke-denkmit-bietet-erste-produkte-mit-verpackung-aus-recyceltem-co2-an-3146910>, Access Date: 10/13/2022.
- Fraunhofer ISE (2021). *Stromgestehungskosten erneuerbare Energien - Juni 2021*. Kost, Christoph; Shammugam, Shivenes; Fluri, Verena; Peper, Dominik; Memar, Aschkan Davoodi und Schlegl, Tobias. Fraunhofer ISE, Freiburg.
- Geissdoerfer, Martin; Savaget, Paulo; Bocken, Nancy M.P. and Hultink, Erik Jan (2017). *The Circular Economy – A new sustainability paradigm?* Journal of Cleaner Production, 143, 757–768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
- Hank, Christoph; Gelpke, Svenja; Schnabl, Andrea; White, Robin J.; Full, Johannes; Wiebe, Nikolai; Smolinka, Tom; Schaadt, Achim; Henning, Hans-Martin and Hebling, Christopher (2018). *Economics & carbon dioxide avoidance cost of methanol production based on renewable hydrogen and recycled carbon dioxide – power-to-methanol*. Sustainable Energy & Fuels, 30 (1), 1019. DOI: 10.1039/C8SE00032H.
- Hoppe, Wieland; Bringezu, Stefan and Wachter, Nadine (2018). *Economic assessment of CO<sub>2</sub>-based methane, methanol and polyoxymethylene production*. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 27, 170–178. DOI: 10.1016/j.jcou.2018.06.019.
- Hoppe, Wieland; Thonemann, Nils and Bringezu, Stefan (2017). *Life Cycle Assessment of Carbon Dioxide-Based Production of Methane and Methanol and Derived Polymers*. Journal of Industrial Ecology, 7 (3), 181. DOI: 10.1111/jiec.12583.
- IEA (2020). *CCUS in clean energy transitions*. International Energy Agency, Paris, France.

- IEA (2022). *Levelised cost of CO<sub>2</sub> capture by sector and initial CO<sub>2</sub> concentration, 2019*. International Energy Agency, Paris. Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-co2-capture-by-sector-and-initial-co2-concentration-2019>, Access Date: 12/20/2022.
- Kaiser, Simon and Bringezu, Stefan (2020). *Use of carbon dioxide as raw material to close the carbon cycle for the German chemical and polymer industries*. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122775. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122775.
- Kaiser, Simon; Gold, Stefan and Bringezu, Stefan (2022). *Environmental and economic assessment of CO<sub>2</sub>-based value chains for a circular carbon use in consumer products*. In Review. *Resources, Conservation and Recycling*, 184, 106422. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106422.
- Kaiser, Simon; Pronnicki, Katharina and Bringezu, Stefan (2021). *Environmental and economic assessment of global and German production locations for CO<sub>2</sub>-based methanol and naphtha*. *Green Chem*, 23 (19), 7659–7673. DOI: 10.1039/D1GC01546J.
- Kätelhön, Arne; Meys, Raoul; Deutz, Sarah; Suh, Sangwon and Bardow, André (2019). *Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. DOI: 10.1073/pnas.1821029116.
- Keim, Wilhelm (2006). *Polymers - Synthesis, Processes, Equipment (Orig. Title: Kunststoffe - Synthese, Herstellungsverfahren, Apparaturen)*. 1. Edition. Wiley-VCH, Weinheim, Germany. ISBN: 9783527315826.
- MIGROS (2021). *VerPETet statt verpestet - Die Migros macht aus CO<sub>2</sub>-Abgasen umweltfreundliche PET-Flaschen (The Migros makes environmentally friendly PET-Bottles out of CO<sub>2</sub>-emissions)*. MIGROS. Available online: <https://www.migros.ch/de/unternehmen/medien/mitteilungen/show/news/medienmitteilungen/2021/co2-recycling.html>, Access Date: 11/10/2021.
- TotalEnergies (2020). *LanzaTech, Total and L'Oréal announce a worldwide premiere: the production of the first cosmetic plastic bottle made from industrial carbon emissions*. Available online: <https://totalenergies.com/media/news/communiqués-presse/lanzatech-total-and-loreal-announce-worldwide-premiere-the-production>, Access Date: 10/11/2021.
- UBA (2022). *Primärenergiegewinnung und -importe*. Available online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe>, Access Date: 10/13/2022.
- VCI (2019). *Rohstoffbasis der chemischen Industrie*. Benzing, Tilman. Verband der Chemischen Industrie e. V., Frankfurt am Main, Germany.
- Wilting, Harry and Hanemaaijer, Aldert (2014). *Share of raw material costs in total production costs*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, The Netherlands.