



HINTERGRUND // NOVEMBER 2021

# Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization

Für Mensch & Umwelt

Umwelt   
Bundesamt

# Impressum

## Herausgeber:

Umweltbundesamt  
Fachgebiet V 1.2 und V 3.2  
Postfach 14 06  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
buergerservice@uba.de  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

 /umweltbundesamt

## Autoren:

Katja Purr, Hans-Jürgen Garvens  
unter Mitarbeit von  
Maja Bernicke, Jens Brieschke, Judith Kaliske,  
Hermann Kessler, Daniela Malsch, Sebastian Plickert,  
Christopher Proske und Bernhard Rothe

## Redaktion:

Fachgebiet V 1.2  
„Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie“  
Katja Purr

Fachgebiet V 3.2  
„Chemische Industrie und industrielle Feuerungsanlagen“  
Hans-Jürgen Garvens

## Satz und Layout:

le-tex publishing services GmbH

## Publikationen als pdf:

[www.umweltbundesamt.de/publikationen](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen)

## Bildquellen:

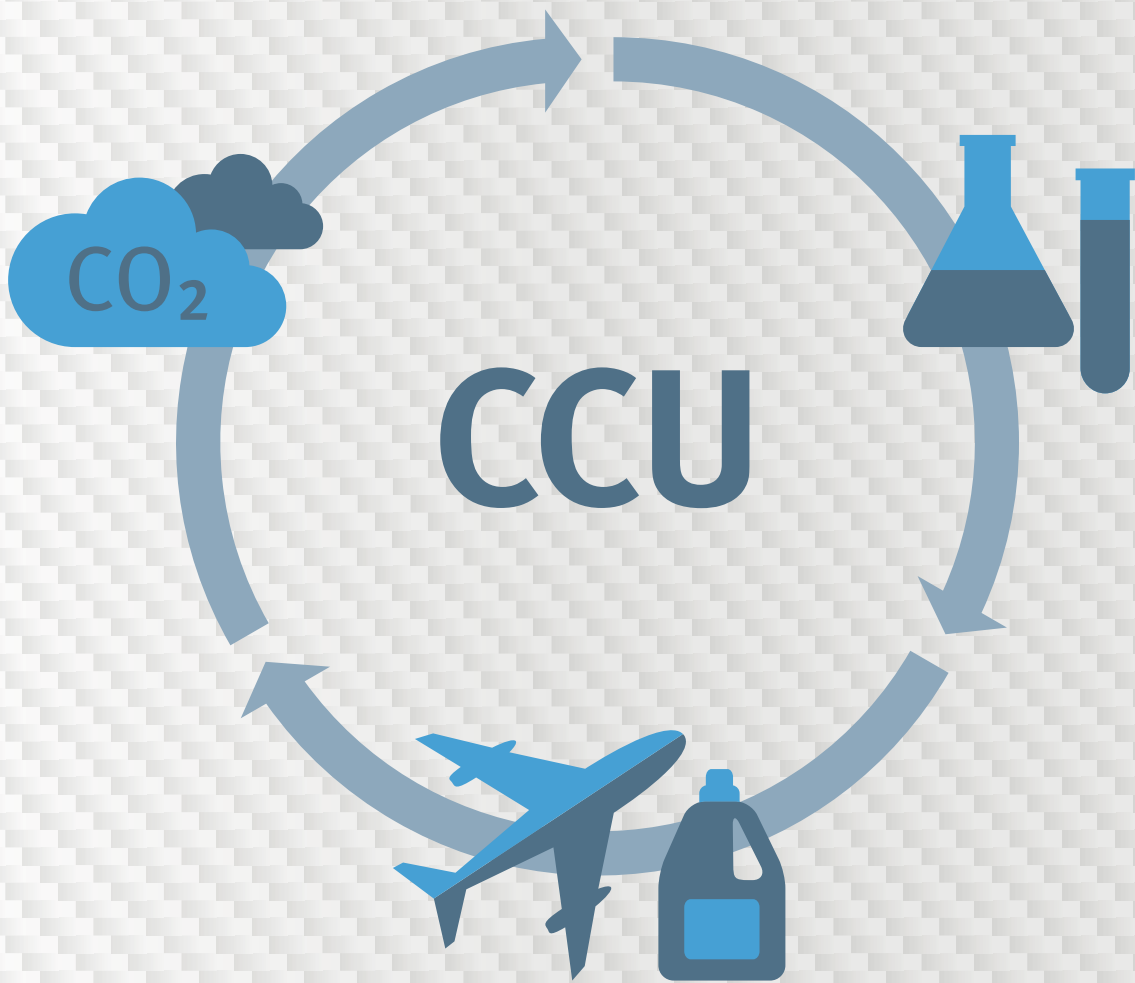
Titel: Adobe Stock/hansenn  
S. 4 (Hintergrund): Shutterstock/thitiwat\_t1980  
S. 9: Shutterstock/Nataliia K

Stand: September 2021

ISSN 2363-829X

**HINTERGRUND // NOVEMBER 2021**

**Diskussionsbeitrag zur Bewertung  
von Carbon Capture and Utilization**



# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Einleitung</b> .....	<b>10</b>
<b>3. Was ist CCU?</b> .....	<b>11</b>
<b>4. Elemente der CCU – Bewertung</b> .....	<b>12</b>
<b>5. Klimaschutzwirkung von CCU</b> .....	<b>14</b>
5.1 Klimaschutzwirkung der Kohlenstoffquelle.....	15
5.2 Klimaschutzwirkung bei der Substitution fossiler Energieträger oder Rohstoffe.....	18
5.3 Klimaschutzwirkung der energetischen Aufwendungen einer CCU-Maßnahme im Transformationspfad.....	19
5.4 Ausgewählte Beispiele.....	21
5.5 Lösungsansätze für unvermeidbare rohstoffbedingte Treibhausgasemissionen.....	22
<b>6. Erschließen der Rohstoffquelle Kohlenstoff mittels CCU</b> .....	<b>24</b>
6.1 Bedarf von Kohlenstoff als Rohstoff.....	24
6.2 Verfügbarkeit von Kohlenstoff als Rohstoffquelle.....	25
6.3 Die Rolle von CCU in einem nationalen nachhaltigen Energiesystem.....	27
6.4 Ausgewählte Beispiele.....	28
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>29</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>29</b>
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>30</b>

## Zusammenfassung

In den Diskussionen zur Ausgestaltung der Treibhausgasneutralität werden immer wieder CCU-Maßnahmen (Carbon Capture and Utilization, deutsch: Kohlenstoff-Abscheidung und Verwendung) als schnelle Lösung für eine Treibhausgasneutralität der Industrie angeführt. CCU-Maßnahmen werden als vielversprechend erachtet, da sich durch die Substitution fossiler Produkte ein geringerer Ausstoß von Emissionen zu ergeben scheint. Jedoch muss die Klimawirkung des gesamten CCU-Prozesses betrachtet werden. Dieser benötigt viel Energie, welche bis zu einem vollständigen erneuerbaren Energiesystem auch Treibhausgase verursacht.

CCU bedeutet, emittierten Kohlenstoff, v. a. Kohlendioxid beispielsweise aus Industrieanwendungen, zu nutzen statt nur in die Atmosphäre zu entlassen. Eine Möglichkeit ist, diesen in Kombination mit Power to Gas/Liquid-Anlagen zu nutzen, um Brenn- und Kraftstoffe zu erzeugen, eine andere, Grundstoffe für die chemische Industrie herzustellen.

Wird Kohlenstoff mehrfach genutzt, so verlagert sich die Emission bis nach der letzten Nutzung. Diese Kreislaufführung führt nur zu einer zeitlichen und örtlichen Verschiebung, nicht aber zur Minderung der ursprünglichen Emissionen. Eine CCU-Maßnahme ist also keine Klimaschutzmaßnahme, die fossile, treibhausrelevante Emissionen mindern kann. Es ist immer die Kohlenstoffquelle ausschlaggebend, wie und ob CCU sich auf unser Klima auswirkt.

Hinzu kommen die Emissionen für die Energieaufwendungen des gesamten CCU-Prozesses. Aufgrund der Wirkungsgrade der CCU-Prozesse sind heute näherungsweise doppelt so viel Energieeinheiten nötig, um ein fossiles Referenzprodukt durch CCU-Produkte zu ersetzen. Solange in Deutschland elektrische Energie nicht ausschließlich aus erneuerbarem Strom genutzt wird, entstehen bei den Energieaufwendungen für CCU also zusätzliche Treibhausgasemissionen. Es ist demnach zurzeit nur sinnvoll, die Technologieentwicklung voran zu bringen und erst dann, wenn die erneuerbaren Energiemengen ausreichend zur Verfügung stehen, CCU zu integrieren.

Mit diesem Papier möchten wir einen Diskussionsbeitrag für wissenschaftliche und politische Debatten zu Carbon Capture and Utilization leisten und einen Überblick zur Wirkung aus verschiedenen Blickwinkeln geben. Wesentliche Prämissen dabei sind eine schnelle Treibhausgasmindering und eine nachhaltige Treibhausgasneutralität. Im Ergebnis liegt eine Bewertung nach Aspekten des Klimaschutzes sowie der künftigen Rohstoffversorgung vor.

### 1. KERNBOTSCHAFT

**Für einen effektiven Klimaschutz müssen primär fossile Treibhausgasemissionen gemindert werden.**

Deutschland strebt bis 2045 und Europa bis spätestens 2050 Treibhausgasneutralität an. Oberste Prämisse im Sinne des Vorsorgeprinzips ist es, die Entstehung von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasemissionen zu vermeiden. Dazu sind viele Veränderungen in Wirtschaft und Gesellschaft notwendig, sowohl bei der Nachfrageseite als auch bei der Produktion. Insbesondere im Bereich der Energieversorgung aber auch bei der industriellen Produktion braucht es technologische Innovationen, sowohl für die Weiterentwicklung vieler bekannter als auch für neu zu entwickelnde Techniken.

Durch Umstellung auf erneuerbare Energien kann es gelingen, die energiebedingten Treibhausgasemissionen vollständig zu vermeiden. Um Energie und natürliche Ressourcen effizient einzusetzen, muss überall, wo es technisch möglich ist, erneuerbarer Strom direkt genutzt werden.

Industrieprozesse müssen sowohl vollständig auf erneuerbare Energieträger, als auch auf treibhausgasarme Rohstoffe umgestellt und weiterentwickelt werden. Dabei ist überall mit oberster Priorität die Entstehung von Kohlenstoffdioxid ganz zu vermeiden.

## **2. KERNBOTSCHAFT**

### **CCU mit fossilem Kohlenstoff stellt keinen Ersatz zur Minderung von fossilen Treibhausgasemissionen dar.**

Wird fossiler Kohlenstoff mittels CCU abgeschieden und anderweitig genutzt, gelangt dieses CO<sub>2</sub> unabhängig von der Anzahl der nachfolgenden Nutzungen immer am Ende der Nutzungskette in die Atmosphäre. Dies gilt beispielsweise für Kohlenstoffemissionen aus industriellen Produktionsprozessen, wie der Zement-, Kalk- und Glasherstellung, die nach heutigem Kenntnisstand technisch nicht vermeidbar sind. Auch hier gilt es, Innovationen kontinuierlich mit dem Ziel zu fördern, die aus heutiger Sicht nicht vermeidbaren Treibhausgasemissionen durch fortwährende Entwicklungen und Erkenntnisfortschritte am Ende möglichst doch zu vermeiden oder wenigstens zu vermindern.

Wird solcher Kohlenstoff mit CCU-Maßnahmen zur Herstellung von Brenn- und Kraftstoffen genutzt, wird der Ausstoß in die Atmosphäre nur zeitlich und örtlich verlagert. Das fossile Kohlendioxid wird nicht mehr durch die Industrie emittiert, sondern an anderer Stelle. Für die entstehende Klimawirkung macht das jedoch keinen Unterschied. Veranschaulicht ist dies in Abbildung 5. Für einen effektiven Klimaschutz sind primär die Vermeidung von fossilen Treibhausgasemissionen und Substitution fossiler Energieträger und Produkte zu verfolgen.

## **3. KERNBOTSCHAFT**

### **Unvermeidbare Treibhausgasemissionen müssen kompensiert werden, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. CCU-Maßnahmen können keinen Beitrag zur Kompensation leisten.**

Neben den genannten aus heutiger Kenntnis unvermeidbaren Prozessemissionen der Industrie ist vor allem im Bereich der Landwirtschaft davon auszugehen, dass Treibhausgasemissionen trotz technologischer Entwicklungspotenziale auch langfristig nicht vollständig vermeidbar sind. Unvermeidbare Treibhausgasemissionen können nur durch die Entnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre und eine langanhaltende und sichere Bindung dieses Kohlenstoffs ausgeglichen werden.

CCU-Maßnahmen ersetzen nicht diese erforderliche Kompensation, da der Kohlenstoff nur mehrfach genutzt und nicht dauerhaft gebunden wird. Es bedarf einer zusätzlichen, dauerhaften Kohlenstoffentnahme aus der Atmosphäre (CDR – Carbon Dioxide Removal). Diese kann beispielsweise durch Erhalt und Erschließung von natürlichen Kohlenstoffsenken wie Wäldern und Mooren erfolgen. Damit ist in Deutschland die vollständige Kompensation der unvermeidbaren Treibhausgasemissionen aus Industrie, Landwirtschaft und Abfall/Abwasser-Bereich nachhaltig möglich. Dies zeigt das UBA in seiner RESCUE-Studie (2019).

#### **4. KERNBOTSCHAFT**

**CCU mit atmosphärischem Kohlenstoff hat das Potenzial, dauerhaft nicht zu weiteren anthropogenen Treibhausgasemissionen zu führen.**

Wird Kohlenstoff aus der Atmosphäre entnommen und anschließend wieder emittiert, führt dies unabhängig von der Mehrfachnutzung zu einem geschlossenen Kreislauf, bei dem keine Mehremissionen durch den Menschen verursacht werden. Voraussetzung ist allerdings, dass entlang der gesamten Prozesskette der CCU-Maßnahmen keine weiteren Treibhausgasemissionen entstehen und ausschließlich erneuerbare Energien für die energetischen Aufwendungen verwendet werden. Brenn-, Kraft- und Chemierohstoffe mit CCU aus atmosphärischem Kohlenstoff führen im Gegensatz zu CCU mit fossilem Kohlenstoff dann zu keinem treibhausgasrelevanten Ausstoß in den Anwendungsbereichen Verkehr, Wärme und Industrie. Veranschaulicht ist dies in Abbildung 4.

#### **5. KERNBOTSCHAFT**

**Kohlendioxid als Rohstoffquelle für Kohlenstoffverbindungen wird dauerhaft benötigt. CCU, vornehmlich mit atmosphärischem Kohlenstoff, wird daher langfristig gesehen ein unverzichtbarer Bestandteil für zukünftiges Wirtschaften sein.**

Langfristig werden auch in einem effizienten und treibhausgasneutralen Wirtschaftssystem Kohlenwasserstoffe benötigt, beispielsweise für den Luft- und Seeverkehr und für die chemische Industrie. Eine mögliche hocheffiziente Rohstoffquelle ist das Recycling kohlenstoffhaltiger Produkte. Dadurch kann voraussichtlich jedoch nur einen Teil des Bedarfs gedeckt werden, so dass langfristig und dauerhaft CCU-Maßnahmen zur Gewinnung von Kohlenstoff als Rohstoffquelle erforderlich sind. Daher muss mittels CCU der weitere Bedarf gedeckt werden – und zwar in erheblichen Mengen aus der Atmosphäre ergänzend zu den aus derzeitiger Sicht langfristig nicht vermeidbaren Quellen. Techniken zur Kohlenstoffgewinnung aus der Atmosphäre sind daher bereits heute zu fördern, damit die spätere Verfügbarkeit und zukünftig erforderliche großtechnische Anwendung gewährleistet ist.

#### **6. KERNBOTSCHAFT**

**CCU führt im heutigen Stromsystem aufgrund der noch großen Anteile fossiler Kraftwerke zu Mehremissionen. Gleichwohl muss die Verfügbarkeit der Technik für ein zukünftiges defossiles Wirtschaftssystem gewährleistet werden.**

CCU benötigt sehr viel Energie. Solange diese Energie wie bisher noch zu einem größeren Teil aus fossilen Rohstoffen wie Kohle oder Gas stammt, wird die Weiternutzung der Emissionen mittels CCU hochgradig ineffizient und klimaschädlich. Fossile Brennstoffe würden dann über einen großen Umweg wieder zu Brennstoffen. Dies hat keine energetischen Vorteile und führt unweigerlich zu einer erheblichen Mehremission von Treibhausgasen. Daher sollte CCU erst ab einem sehr hohen Anteil erneuerbarer Energien im Stromsystem angewendet werden (Größenordnung von über 80 %). Alles andere würde die kurz- und mittelfristigen Klimaschutzziele gefährden. Ein schneller Aufbau eines vollständig erneuerbaren Stromsystems ist daher zentrale Voraussetzung für die Integration von CCU-Maßnahmen. Die spätere Verfügbarkeit der CCU-Techniken und zukünftiger Techniktransfer ist durch Forschung und Entwicklung zu gewährleisten und Voraussetzung für die Zirkularität der Kohlenstoffwirtschaft in einem defossilen Wirtschaftssystem.

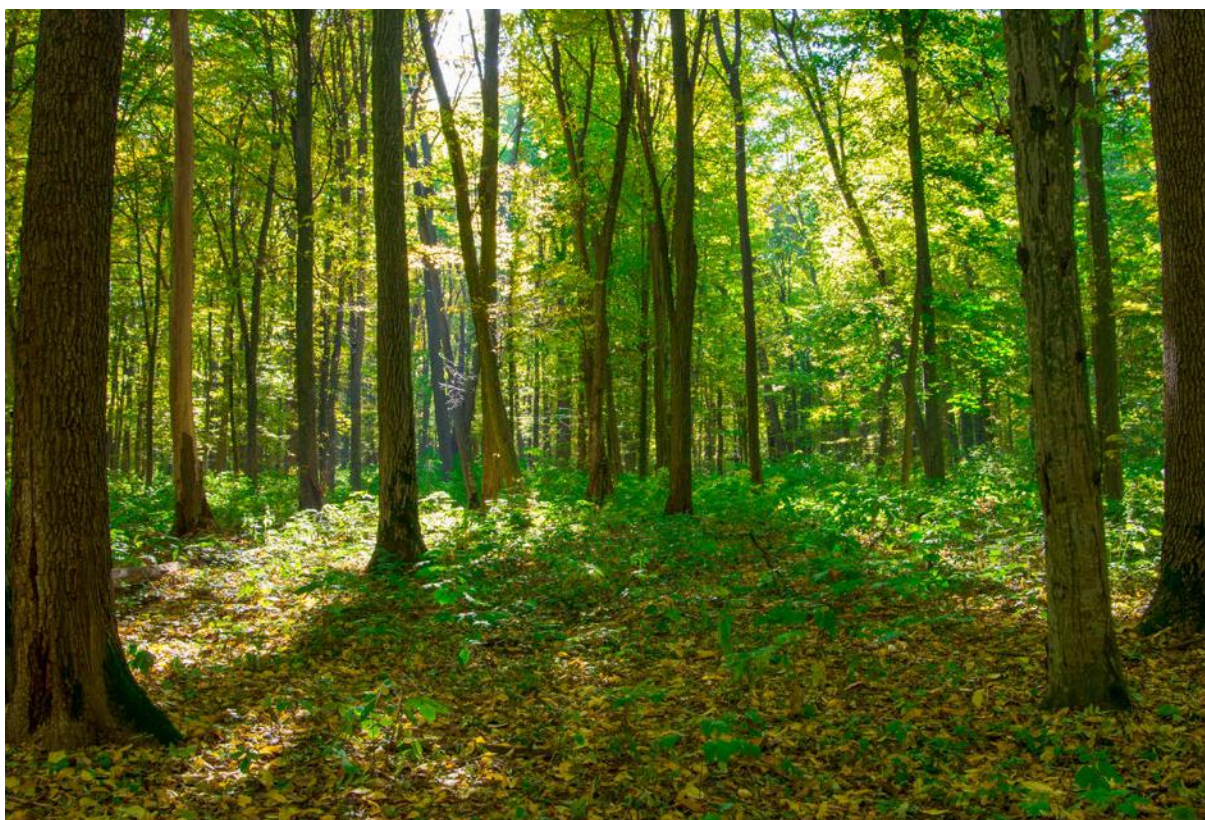
**FAZIT:**

CCU in Verbindung mit fossilen Treibhausgasemissionen kann keinen nachhaltigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Dies gilt auch für unvermeidbare Treibhausgasemissionen aus der Industrie. Unabhängig davon, wie oft der fossile Kohlenstoff wiederverwendet wird, führt dies – am Ende einer Mehrfachnutzung – immer zu einer zusätzlichen Treibhausgasemission in die Atmosphäre und trägt damit zum Klimawandel bei.

Eine vollständige Dekarbonisierung des Wirtschaftssystems ist nach heutigem Kenntnisstand nicht möglich. Kohlenstoff wird für ausgewählte Brenn- und Kraftstoffe sowie Rohstoffe der chemischen Industrie benötigt. Langfristig ist CCU daher ein unverzichtbarer Bestandteil eines zukünftigen Wirtschaftssystems. Dabei sind nur CCU-Maßnahmen, deren Energiebedarf ausschließlich mit erneuerbaren Energien gedeckt wird und die ausschließlich atmosphärischen Kohlenstoff nutzen als treibhausgasneutral zu bewerten.

Die Verfügbarkeit und technische Weiterentwicklung von CCU-Techniken und die dafür notwendigen erneuerbaren Energiemengen müssen für die Zirkularität der Kohlenstoffwirtschaft in einem defossilen Wirtschaftssystem sichergestellt werden. Zugleich muss gewährleistet werden, dass für ein treibhausgasneutrales Wirtschaften keine hinderlichen Abhängigkeiten entstehen. Kurz- und mittelfristig sollten Forschungs- und Demonstrationsprojekte nur in ausgewählten Industriebranchen sowie CCU-Techniken mit atmosphärischem Kohlendioxid unterstützt und gefördert werden. Die unter den derzeitigen Rahmenbedingungen – vor allem in der nächsten Dekade – dabei verursachten Mehremissionen in der Energiewirtschaft sind durch einen raschen Ausbau der erneuerbaren Energien zu verhindern.

Unabhängig vom dauerhaften Kohlenstoffbedarf gilt es, Innovationen und Entwicklungen mit dem Ziel zu fördern, die nach heutigem Kenntnisstand nicht vermeidbaren Treibhausgasemissionen dennoch weiter zu verringern.



## 2. Einleitung

Im Jahr 2015 verständigten sich die Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention im Abkommen von Paris (ÜvP) auf ein gemeinsames Vorgehen im Kampf gegen den Klimawandel. Ziel ist es, die Erderwärmung deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten sowie Anstrengungen zu unternehmen, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu begrenzen. Mit der Ratifizierung des ÜvP und dem Bekenntnis auf dem Klimagipfel der Vereinten Nationen im Jahr 2019, Treibhausgasneutralität bis 2050 als langfristiges Ziel zu verfolgen, ist Deutschland diese strengeren internationalen Verpflichtungen eingegangen. Mit dem Klimaschutzplan 2050 aus dem Jahr 2016 [BMU 2016] wurden bis 2030 sektorale Beiträge zur Treibhausgasreduzierung definiert, die mit jahres- und sektorenscharfen Treibhausgasreduzierungszielen im Bundes-Klimaschutzgesetz im Jahr 2019 rechtlich verankert wurden [BMU 2019a]. Neben dem Ziel der Treibhausgasreduzierung bis 2030 um 55 % gegenüber 1990 wurde darin auch das übergreifende Umwelthandlungsziel „Treibhausgasneutralität“ für Deutschland bis 2050 verankert. Eine Ambitionssteigerung, die gleichfalls vor dem Hintergrund des ÜvP dringend erforderlich wäre, wurde für den Zeithorizont bis 2030 indes nicht vorgenommen [siehe UBA 2019b]. Dies erfolgte erst mit der Novellierung des Bundes-Klimaschutzgesetz im Mai 2021, wobei Treibhausgasneutralität bereits für das Jahr 2045 sowie bis zum Jahr 2030 eine Minderung um 65 % und bis 2040 um 88 % gegenüber 1990 verankert wurde. Um die langfristige Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland zu realisieren, sind in allen Bereichen unseres Alltags und in der Wirtschaft große Veränderungen erforderlich. Prämissen, um dies erfolgreich zu gestalten, sind Vermeidung und Substitution von treibhausgasintensiven Prozessen und Produkten sowie eine vollständig auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung [UBA 2019c]. Auf diese Weise kann langfristig sowohl eine Minderung der

prozess- und energiebedingten Treibhausgasemissionen als auch eine Minderung des Brenn-, Kraft- und Rohstoffbedarfs erreicht werden.

Im Zuge der politischen und wissenschaftlichen Diskussion zur Ausgestaltung der Treibhausgasneutralität wird immer wieder auf nationaler und europäischer Ebene der Beitrag von CCU-Maßnahmen (Carbon Capture and Utilization) debattiert. Mit CCU ist die Verwendung von abgedichtetem Kohlenstoff (meist in Form von Kohlendioxid, CO<sub>2</sub>) als Rohstoff zur Bereitstellung von Produkten und Energieträgern gemeint. Mit dem Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 werden im Sektor Industrie bereits CCU-Maßnahmen konkret adressiert [BMU 2019b]. Dabei sind selbst grundsätzliche Fragen, ob und wie CCU-Maßnahmen einen Beitrag in einem treibhausgasneutralen Wirtschaftssystem und auf dem Weg leisten können sowie wie dies systemdienlich gestaltet werden kann, bisher nicht ausreichend beleuchtet und werden je nach Interessenslage von den verschiedenen Beteiligten unterschiedlich dargestellt.

Ziel dieses Papiers ist es, die Debatte zur Beurteilung von CCU-Maßnahmen aus Sicht des Umweltbundesamtes zu systematisieren, um so die Wirkung von CCU in einem treibhausgasneutralen<sup>1</sup> Deutschland und auf dem Weg dorthin grundlegend zu bewerten. Hierzu werden Leitlinien und Kriterien zur Bewertung von CCU-Maßnahmen dargestellt. Diese ermöglichen eine konzeptionelle Einordnung, ob CCU-Maßnahmen aus klimapolitischen oder anderen Gründen weiterverfolgt werden sollten oder nicht. Sie ermöglichen jedoch keine Bewertung konkreter Umsetzungsbeispiele, finanzieller Förderentscheidungen von Forschungs- und Demonstrationsprojekten sowie Bewertungen vor dem Hintergrund der Überwachungs- und Berichterstattungsregeln im EU-Emissionshandel.

<sup>1</sup> Der Begriff „treibhausgasneutral“ wird hier synonym auch für „weitestgehend treibhausgasneutral“, also eine angestrebte Minderung um 95 Prozent, verwendet. Für die Beurteilung von CCU in diesem Papier ist diese Unterscheidung nicht relevant.

## 3. Was ist CCU?

Als „Carbon Capture and Utilization“ werden die Abscheidung, der Transport und die anschließende Nutzung von Kohlenstoff, meist in Form von CO<sub>2</sub> oder CO, bezeichnet, bei denen der Kohlenstoff mindestens einem weiteren Nutzungszyklus zugeführt wird. Je nach Herkunft und Nutzung des Kohlenstoffs erfordert dies die Kombination verschiedener Prozesse und Verfahrensschritte, die jeweils mit Energie- oder Ressourcenverbräuchen sowie Umweltwirkungen verbunden sind.

**Carbon:** Der Kohlenstoff kann in verschiedenen Formen und unterschiedlichen Ursprungs vorliegen, letzteres ist vereinfacht in Abbildung 1 zusammengefasst. In der Regel wird unter CCU die Nutzung von gasförmigem CO<sub>2</sub> verstanden.<sup>2</sup> Dieses kann fossilen Ursprungs sein (aus fossilen Energieträgern oder Rohstoffen, z. B. aus Kalkstein) oder aus der Atmosphäre stammen (aus Biomasse oder Luft).

**Capture:** Capture beschreibt die gesamte Prozesskette des Sammelns, Transportierens und Aufbereitens von Kohlenstoff für die anschließende Nutzung. Dies umfasst beispielsweise die Abscheidung, Separierung und den Transport von CO<sub>2</sub> aus einem Gasgemisch oder der Atmosphäre sowie die Einbindung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> in Biomasse.

**Utilization:** Kohlenstoff kann direkt oder indirekt zur Bereitstellung kohlenstoffhaltiger Produkte genutzt werden. Eine direkte Nutzung von CO<sub>2</sub> ist beispielsweise der Einsatz von CO<sub>2</sub> in Feuerlöschanlagen. Die indirekte rohstoffliche Nutzung umfasst die Synthese von Grundchemikalien oder (Zwischen-)Produkten der chemischen Industrie und von Endenergieträgern, die im Verkehr, in der Industrie sowie der Wärmeversorgung genutzt werden können. Dies wird als Power to Gas/Liquid/Solid bezeichnet – siehe Abbildung 1 und Exkurs 1.

<sup>2</sup> Im Folgenden werden zur sprachlichen Vereinfachung „Kohlenstoff“ oder „CO<sub>2</sub>“ als „Kohlenstoffquelle“ bezeichnet – andere Kohlenstoffverbindungen, z. B. CO, sind dann implizit mit gemeint.

Abbildung 1

### Schematischer Überblick



Quelle: Umweltbundesamt

### Exkurs 1: Kurzbeschreibung Power to Gas/Liquid/Solid

Unter Power to Gas (PtG) in Kombination mit CCU wird die Bereitstellung von Methan, unter Power to Liquid (PtL) die Bereitstellung flüssiger Kohlenwasserstoffe und unter Power to Solid (PtS) die Bereitstellung fester Kohlenwasserstoffe, beispielsweise Kunststoffe jeglicher Art, mithilfe von elektrischer Energie verstanden. Oft wird verallgemeinernd auch von Power to Chemicals gesprochen, wenn organische chemische Verbindungen – unabhängig vom Aggregatzustand – bereitgestellt werden.

Allen gemeinsam ist die Wasserelektrolyse als erster technisch erforderlicher Schritt. Hierbei wird mit elektrischer Energie Wasser (H<sub>2</sub>O) in Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) gespalten. Der Wasserstoff kann anschließend in einer katalytischen oder in einer biologischen Synthese mit Kohlendioxid unter weiterem Energieeinsatz zu Methan oder anderen Stoffen

reagieren. Bei PtL wird zunächst ein Wasserstoff/Kohlenmonoxid- oder Wasserstoff/Kohlendioxid-Gemisch erzeugt und in einer Synthese zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Der erforderliche Energiebedarf dafür nimmt tendenziell mit zunehmender Länge der Prozesskette vom Wasserstoff hin zu den flüssigen oder festen Kohlenwasserstoffen zu.

Auch Kohlenstoff aus Abfall- und Reststoffbiomasse in beispielsweise Verbrennungs-, Vergasungs-, Pyrolyse- oder Vergärungsanlagen kann in Kombination mit PtG/PtL/PtS-Anlagen unter weiterem Energieeinsatz genutzt werden.

So lassen sich Energieträger oder Rohstoffe bereitstellen, bei deren anschließender Nutzung fossile Energieträger und Rohstoffe in allen Anwendungsbereichen (Verkehr, Wärme, Strom, chemische Industrie) substituiert werden können (siehe dazu Kapitel 5.2).

Unter CCU wird im Sinne dieses Papiers **nicht** die direkte Speicherung von CO<sub>2</sub> als „Carbon Capture and Storage“ (CCS)<sup>3</sup> oder der Einsatz von CO<sub>2</sub> bei der Förderung von Erdöl („Enhanced Oil Recovery“ – EOR) verstanden. Auch die Veränderung natürlicher Kohlenstoffsinken, wie Landnutzung,

Landnutzungsänderung oder Aufforstung sowie die Produktion und Nutzung von holzwirtschaftlichen Produkten, bei denen gleichfalls Kohlenstoff aus der Atmosphäre gebunden und gespeichert wird, sind nicht Gegenstand dieses Papiers. Auch das chemische Recycling<sup>4</sup> wird hier nicht als CCU bezeichnet.

## 4. Elemente der CCU – Bewertung

Für einen ersten Überblick werden nachfolgend, zunächst vereinfacht, die bei der Bewertung einer CCU-Maßnahme zu beachtenden Aspekte benannt, um sie anschließend in Kapitel 5 und Kapitel 5.5 näher zu thematisieren.

**Bewertung der Vermeidbarkeit:** Die einzelnen Prozessstufen einer CCU-Maßnahme sind mit einem hohen Einsatz von Energie verbunden. Dies beginnt mit der Bereitstellung, etwa um Kohlendioxid aus einem Gasgemisch (z. B. Rauchgas oder der Atmosphäre) zu extrahieren, und trifft auch für die

Herstellung von sogenannten PtG/PtL/PtS-Produkten zu. Mit dem Ziel einer nachhaltigen Entwicklung und den Herausforderungen, ein treibhausgasneutrales Energiesystem zu gestalten, sollte Energie möglichst effizient in technischen Anwendungen eingesetzt werden. Dementsprechend ergibt sich als oberste Priorität, die Entstehung von CO<sub>2</sub> zu vermeiden. Die Bewertung einer möglichen CCU-Maßnahme muss daher immer damit beginnen, ob das CO<sub>2</sub> überhaupt

<sup>3</sup> Oder Kombinationen von Techniken mit anschließender Speicherung (CCUS).

<sup>4</sup> Als chemisches Recycling oder auch rohstoffliches Recycling wird die Umwandlung von Kunststoffpolymeren in ihre Monomere oder chemischen Grundbausteine mittels thermochemischer oder chemischer Prozesse verstanden. Hierfür kommen hauptsächlich Vergasung, Pyrolyse, Verölung oder Solvolyse als technische Prozesse in Betracht. Zum jetzigen Zeitpunkt ist dies jedoch nicht Stand der Technik des Kunststoffrecyclings [UBA 2020c].

entstehen muss. Nur wenn die mit einem Produktionsprozess verbundene CO<sub>2</sub>-Entstehung als nicht vermeidbar anzusehen ist oder das CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnommen wird, sollte eine CCU-Maßnahme überhaupt in Betracht gezogen und anhand der nachfolgenden Kriterien bewertet werden.

**Bewertung der Klimaschutzwirkung:** Hierbei wird betrachtet, ob und in welchem Umfang durch die CCU-Maßnahme Treibhausgasemissionen gegenüber dem jeweils aktuellen Stand eingespart werden können. Die Bewertung der Klimaschutzwirkung umfasst dabei alle Treibhausgasemissionen, die direkt und indirekt mit allen Teilschritten der CCU-Maßnahme verbunden sind, wie es in Kapitel 5 dargestellt wird. Bei der Bewertung der Klimaschutzwirkung gilt es auch zu schätzen, in welcher Zeitspanne eine Einsparung von Treibhausgasemissionen durch eine CCU-Maßnahme möglich ist.

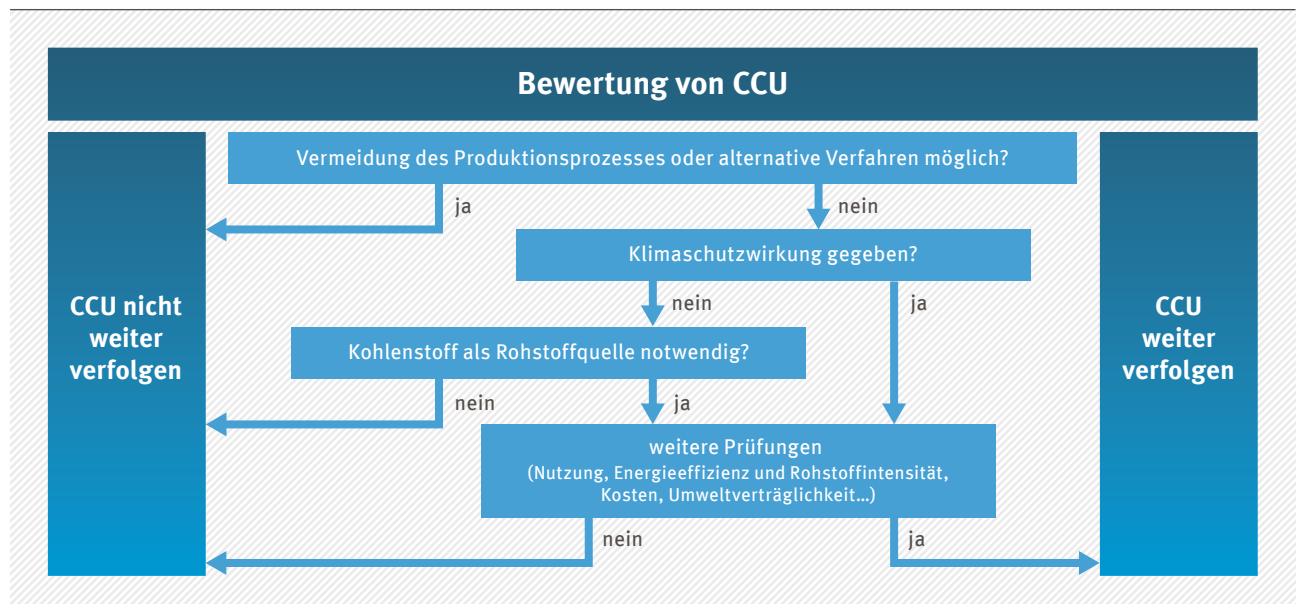
**Bewertung als Rohstoffquelle:** Selbst in einer zukünftig treibhausgasneutralen Gesellschaft wird Kohlenstoff für die Bereitstellung von Energieträgern und einer Vielzahl von Produkten benötigt. Auch hier ist zunächst die Frage der Vermeidbarkeit zu stellen und zu prüfen, ob ein kohlenstoffhaltiges Produkt überhaupt produziert werden muss oder kohlenstofffreie Alternativen genutzt werden können. Wenn der Bedarf an Kohlenstoff nicht über direkte, energieeffiziente Recycling-Maßnahmen oder aus biogenen Reststoffen gedeckt werden kann, müssen in einer treibhausgasneutralen Gesellschaft andere Kohlenstoffquellen herangezogen werden.

**Weitere Prüfungen:** Neben den vorgenannten drei wesentlichen Kriterien sind weitere Umweltwirkungen der jeweiligen CCU-Maßnahmen zu berücksichtigen, damit keine anderen schwerwiegenden, nachteiligen Auswirkungen auf die Umwelt entstehen. Daneben sind auch Fragen, etwa zum wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage zu prüfen.

Zusammenfassend zeigt Abbildung 2 den möglichen Ablauf der Bewertung von CCU-Maßnahmen.

Abbildung 2

### Schematische Darstellung zur Vorgehensweise bei der Bewertung von CCU



Quelle: Umweltbundesamt

## 5. Klimaschutzwirkung von CCU

Eine Klimaschutzmaßnahme ermöglicht eine Minderung von Treibhausgasemissionen, um so der menschenverursachten globalen Erwärmung entgegenzuwirken und die negativen Folgen auf die Ökosysteme, Flora und Fauna sowie die menschliche Gesundheit zu verhindern oder abzumildern.

Die in der Debatte zur Entwicklung und Nutzung von CCU-Technologien beteiligten Akteure aus den Bereichen Wissenschaft, Wirtschaft/Industrie und Politik unterscheiden sich zum Teil stark in ihrer Motivation und Herangehensweise. Dementsprechend kommen diese derzeit zu unterschiedlichen Ergebnissen, welchen Nutzen CCU-Maßnahmen heute und künftig haben können. Oft fehlt die für

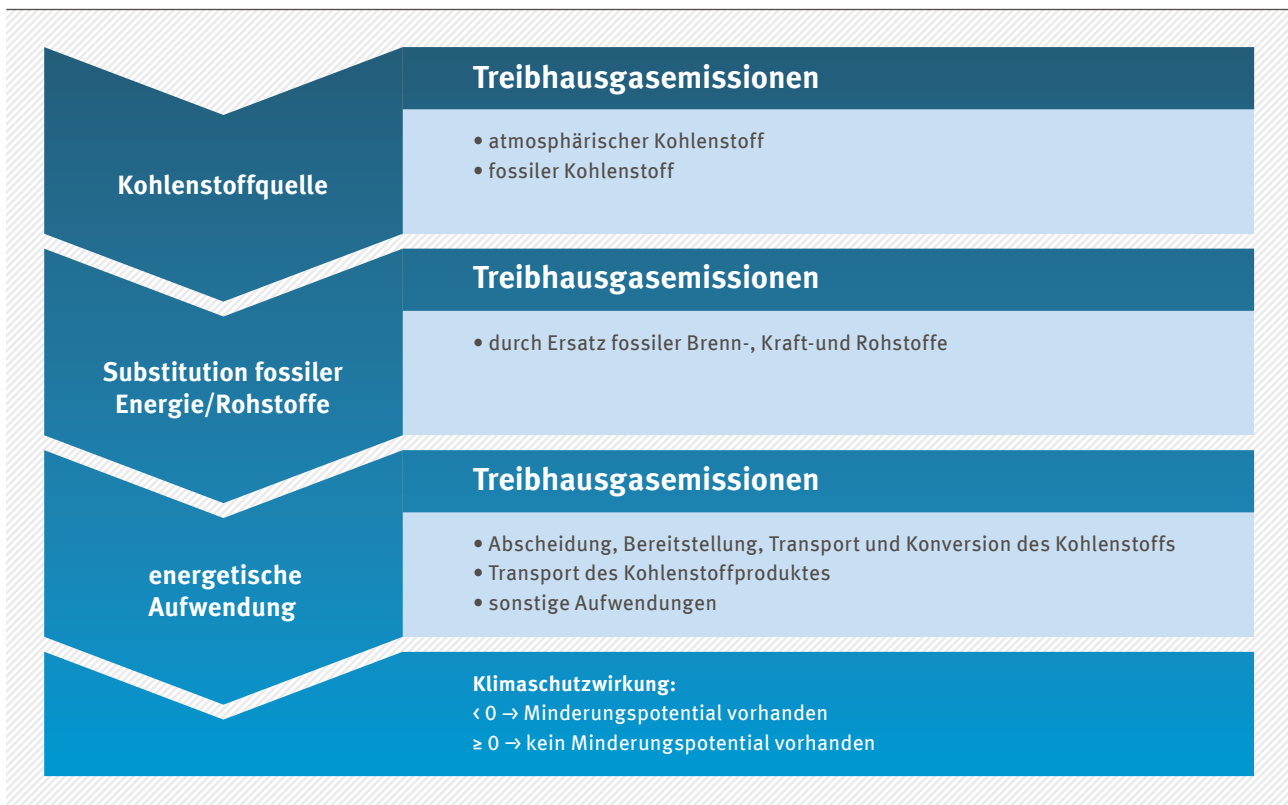
eine Bewertung notwendige transparente Darstellung der Betrachtungsansätze, d. h. der Zielstellung, des Zeithorizonts<sup>5</sup> und der Systemgrenzen<sup>6</sup>.

In diesem Kapitel sollen Grundüberlegungen zur Klimaschutzwirkung von CCU-Maßnahmen aus Sicht des Umweltbundesamtes dargestellt werden. Grundsätzlich wird diese von drei wesentlichen Einflussfaktoren bestimmt

- 5 Entsprechend dem jeweiligen Entwicklungsstand, dem avisierten Anwendungszeitpunkt und den vorhandenen wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen ergeben sich unterschiedliche Bezugszeiträume, die für das Ergebnis der Bewertung ausschlaggebend sind. So kann eine Bewertung auf dem gegenwärtigen Ist-Zustand fußen oder einen prognostizierten Zustand zu einem späteren Zeitraum zur Grundlage haben. Auch die betrachtete Zeitdauer kann sich unterscheiden und sollte explizit in der Bewertung dargestellt sein.
- 6 Analog zum Vorgehen bei der Erstellung von Ökobilanzen sind die Grenzen des betrachteten Systems klarzustellen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung, um nachvollziehen zu können, welche Aspekte bei einer qualitativen und quantitativen Bewertung berücksichtigt wurden und welche nicht. Eine Technik, die in engen Grenzen betrachtet positiv bewertet wird, kann in einem größeren Systemzusammenhang negativ wirken und umgekehrt.

Abbildung 3

### Schematische Darstellung zur Bewertung der Klimaschutzwirkung



Hinweis: Es werden die Treibhausgasemissionen für das CCU-Produkt mit positivem Vorzeichen und die für das konventionelle (zu substituierende) Produkt mit negativem Vorzeichen berücksichtigt.

Quelle: Umweltbundesamt

- ▶ von der verwendeten Kohlenstoffquelle,
- ▶ von der Wirkung des CCU-Produktes durch Substitution fossiler Energieträger oder Rohstoffe und
- ▶ von den Treibhausgasemissionen für energetische Aufwendungen zur Bereitstellung und Nutzung des Kohlenstoffs in der Prozesskette.

Während der erste Aspekt grundsätzlich unabhängig vom Zeithorizont betrachtet werden kann, haben die beiden letzten Aspekte insbesondere im Transformationspfad hin zu einem nachhaltigen und vollständig

auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem abhängig vom Zeitpunkt unterschiedliche Wirkungen. Zusammenfassend ist in Abbildung 3 schematisch eine Vorgehensweise zur Berechnung der Klimaschutzwirkung dargestellt.

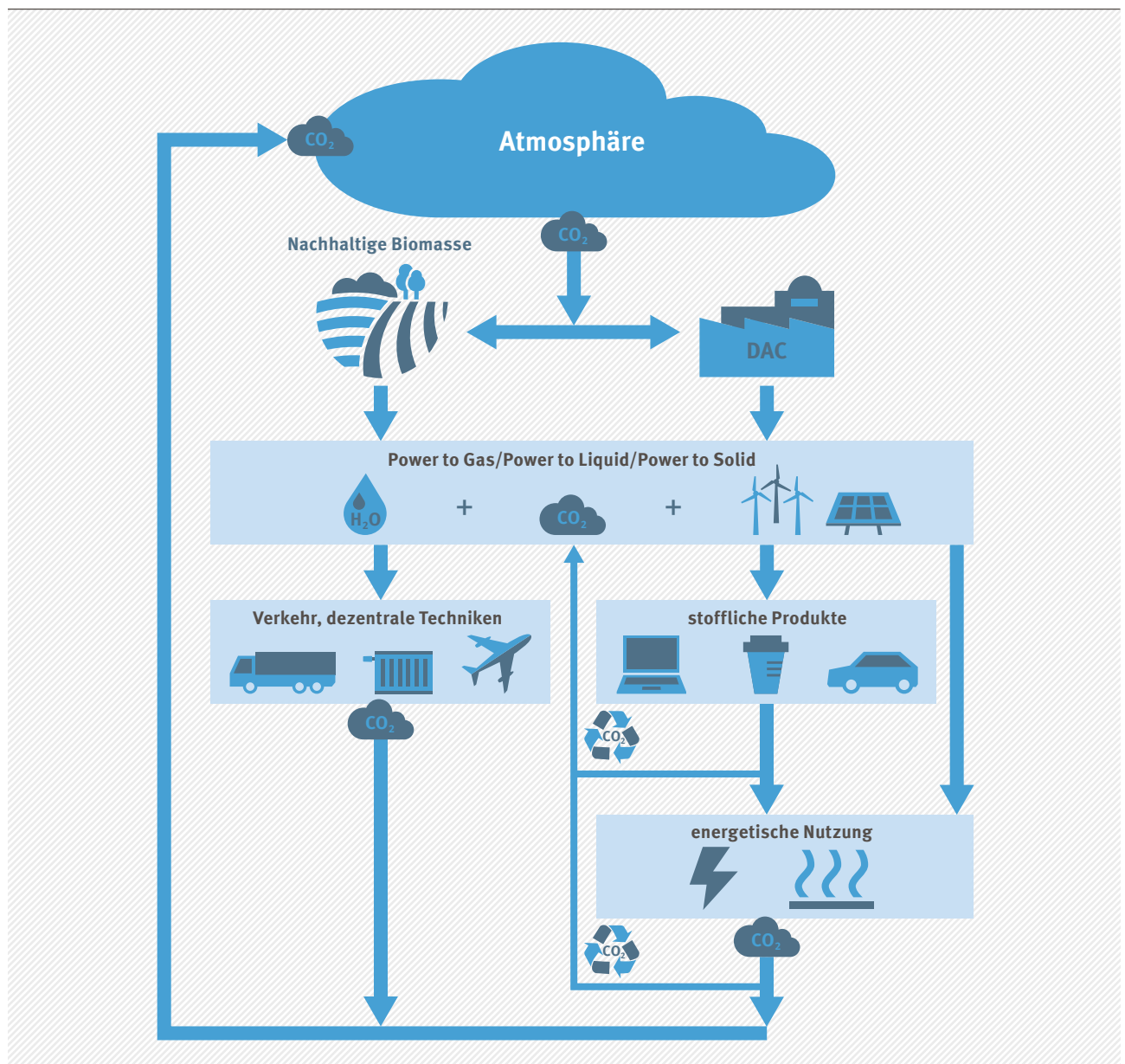
## 5.1 Klimaschutzwirkung der Kohlenstoffquelle

### 5.1.1 Atmosphärische Kohlenstoffquelle

Wie in Abbildung 1 bereits gezeigt, stehen unterschiedliche Kohlenstoffquellen für eine CCU-Maßnahme zur Verfügung. Kohlenstoff aus biogener

Abbildung 4

### Schematische Darstellung zur Nutzung atmosphärischer Kohlenstoffquellen für CCU



Quelle: Umweltbundesamt

Quelle stammt in der Regel aus atmosphärischem Kohlenstoff und hat damit in den meisten Fällen<sup>7</sup> die identische Wirkung wie das direkte Sammeln von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre (Direct Air Capture, DAC), so dass diese im Folgenden zusammen betrachtet werden. Durch Photosynthese oder technisch mittels DAC wird Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen. Mit der Bereitstellung des Kohlenstoffs für CCU-Maßnahmen gehen immer Energieaufwendungen einher, beispielsweise für das Sammeln, die Aufbereitung und den Transport. Für die anschließende Herstellung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern oder Rohstoffen ist der Einsatz weiterer Energie und Stoffe notwendig (siehe auch Exkurs 1).

Potentiell kann der Kohlenstoff immer wieder verwendet werden, siehe dazu Kapitel 5.1.3. Unabhängig davon, wie oft der Kohlenstoff in Produkten oder Stoffen gebunden und genutzt wird, wird mit Kohlenstoff aus atmosphärischer Quelle am Ende der Nutzung exakt die Menge Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre abgegeben, die ihr ursprünglich entzogen wurde. Bei CCU-Maßnahmen in Verbindung mit atmosphärischem Kohlenstoff können somit erst durch die Substitution fossiler Energieträger oder Rohstoffe Treibhausgasemissionen gegenüber der heutigen Situation (ohne CCU) reduziert werden (siehe Kapitel 5.2). **Die Entnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre und die anschließende Wiederfreisetzung in die Atmosphäre führt zu einem geschlossenen Kreislauf, bei dem keine Mehremissionen durch den Menschen verursacht werden. Voraussetzung hierfür ist, dass während der CCU-Maßnahme keine weiteren Treibhausgasemissionen entstehen.** Dies kann beispielsweise durch die ausschließliche Nutzung erneuerbarer Energien (z. B. Strom, Wärme) sowie nachhaltig hergestellter Hilfsstoffe erreicht werden, siehe dazu Kapitel 5.3. Der beschriebene Pfad und dessen Wirkung ist in der Abbildung 4 grafisch zusammengefasst.

### 5.1.2 Fossile Kohlenstoffquelle

Die Nutzung von fossilem Kohlenstoff in CCU-Maßnahmen und deren Klimaschutzwirkung ist in Abbildung 5 dargestellt. Auch bei der Betrachtung dieser Kohlenstoffquelle wird hier davon ausgegangen, dass während der gesamten CCU-Maßnahme keine weiteren Treibhausgasemissionen entstehen, indem beispielsweise ausschließlich erneuerbare Energien für die jeweilige CCU-Maßnahme verwendet werden (siehe dazu Kapitel 5.3). Die Klimawirkung durch die Nutzung der Kohlenstoffquelle beeinflusst dies jedoch nicht.

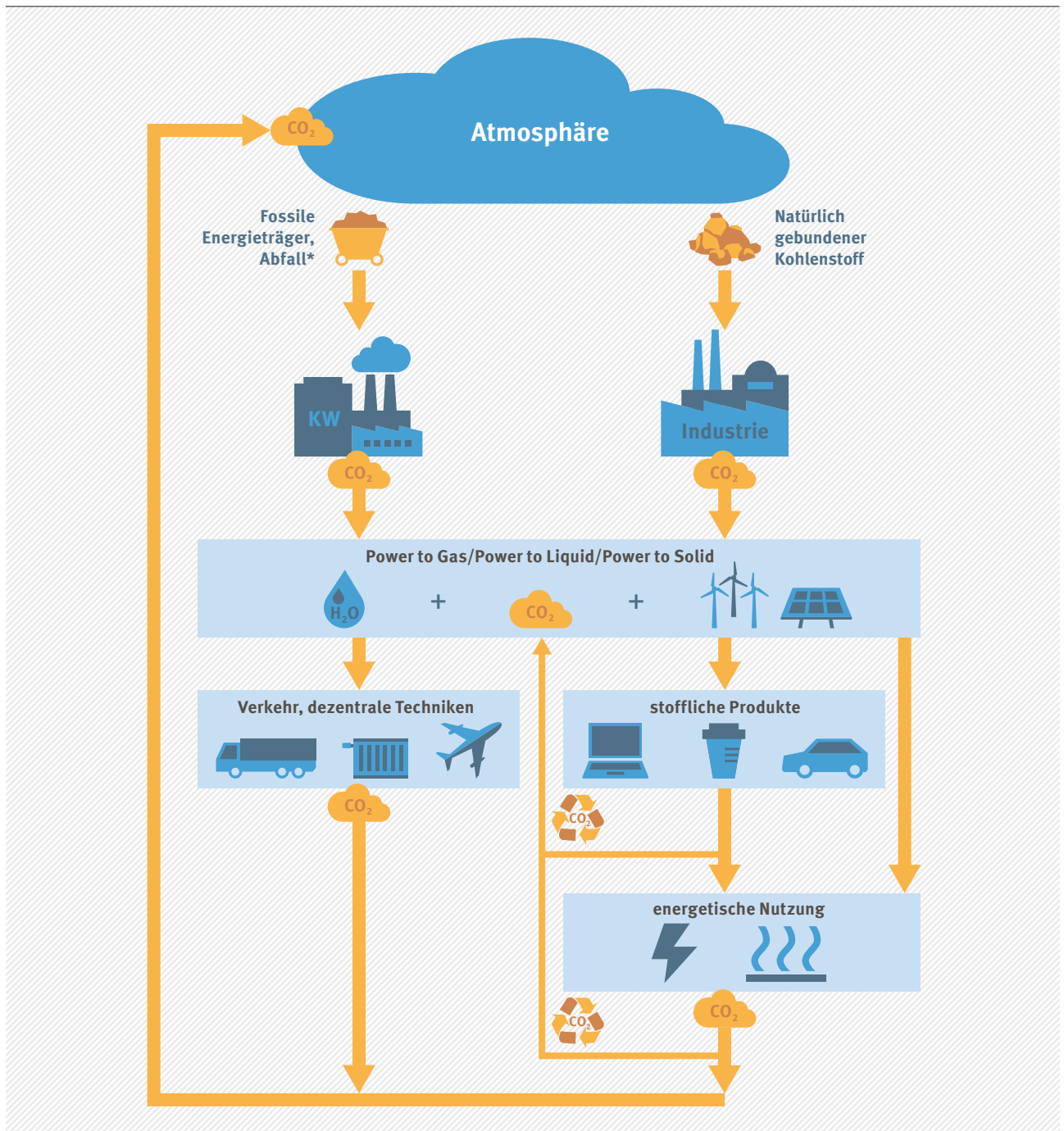
Der fossile Kohlenstoff kann z. B. aus einer vorhergehenden energetischen Nutzung oder aus industriellen Prozessen stammen (linker Pfad in Abbildung 5). In manchen Produktionsprozessen wie in der Zement-, Kalk- und Glasherstellung wird auch natürlich gebundener Kohlenstoff freigesetzt, z. B. aus Carbonatgestein (rechter Pfad in Abbildung 5). **Unabhängig von der Anzahl der Wiederverwendungen des fossilen Kohlenstoffs, führt dies auch am Ende einer Mehrfachnutzung mittels CCU-Maßnahmen immer zu einer Treibhausgasemission in die Atmosphäre und damit zu einer Erhöhung des menschenverursachten Klimaeffekts.** Durch die Nutzung fossilen Kohlenstoffs in einer CCU-Maßnahme kann daher keine positive Klimaschutzwirkung erreicht werden.

Es gilt, die von Menschen verursachten kohlenstoffhaltigen Emissionen zu vermeiden und damit für den ersten Prozessschritt treibhausgasneutrale Alternativen zu entwickeln und nutzen. Für die Substitution fossilen Kohlenstoffs sind bereits alternative Optionen auf Basis erneuerbarer Energien in allen energetischen Anwendungen und weitestgehend allen stofflichen Nutzungen der chemischen Industrie in der Diskussion. Die Herstellung von Eisen und Stahl aus Eisenerz kann mit direktem Einsatz von grünem Wasserstoff als Reduktionsmittel nahezu treibhausgasneutral erfolgen (vgl. Kapitel 5.4.1). Dagegen ist die Substitution vieler Prozesse mit rohmaterialbedingten Treibhausgasemissionen erst in einem frühen Stadium der Entwicklung oder noch ungelöst, wie in der Zement-, Kalk- oder Glasindustrie. Sind die Produkte aus diesen Prozessen für die Gesellschaft notwendig und keine treibhausgasneutralen Alternativen für die Produkte oder die Produktionsprozesse verfügbar, geht dies unweigerlich mit dem Freisetzen von Treibhausgasemissionen einher.

<sup>7</sup> Für die Untersuchung der Kohlenstoffquelle ist die Annahme hinreichend, dass das CO<sub>2</sub>, welches aus der Atmosphäre entnommen wird, am Ende dorthin wieder emittiert wird und damit in der Bilanz neutral ist. Die Speicherung in Biomasse wird entsprechend der Definition in Kapitel 3 nicht betrachtet.

Abbildung 5

## Schematische Darstellung zur Nutzung fossiler Kohlenstoffquellen für CCU



Hinweis: \*Wenn die chemische Industrie zunehmend erneuerbare strombasierte Kohlenstoffprodukte herstellt, fällt der Energieträger Abfall (derzeit mit einem durchschnittlichen biogenen Anteil von 50 % bei Restabfällen) auf lange Sicht nicht mehr in die Kategorie „fossiler Kohlenstoff“.

Quelle: Umweltbundesamt

### 5.1.3 Mehrfachnutzung des Kohlenstoffs

Grundsätzlich sind Stoffkreisläufe mit mehrstufiger Nutzung anzustreben, d. h. in diesem Fall ein Kohlenstoffkreislauf. Die Mehrfachnutzung kann einen Beitrag zur systemischen Effizienz leisten, da insbesondere die Nutzung von atmosphärischem Kohlenstoff mit höheren energetischen Aufwendungen verbunden ist, als die Abscheidung aus konzentrierten Abgasen.

Bei einer dezentralen energetischen Nutzung oder bei Anwendungen, z. B. im Verkehrssektor, ist eine Rückgewinnung des emittierten Kohlenstoffs jedoch kaum möglich. Hier kann eine Mehrfachnutzung nur über die Rückgewinnung aus der Atmosphäre und den dadurch zusätzlich erforderlichen Aufwand realisiert werden [UBA 2014]. In stationären Anwendungen (industrielle Punktquellen und zentrale

Strom- und Wärmeversorgung) ist die Abscheidung und Nutzung des oxidierten Kohlenstoffs technisch umsetzbar (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5). Es ist jedoch zu beachten, dass der Kohlenstoff an dem Standort der PtG/PtL/PtS-Anlage vorliegen oder unter Aufwendungen dorthin transportiert werden muss.<sup>8</sup>

Ein Nutzungszyklus von Kohlenwasserstoffen unterliegt immer dem Prinzip der Irreversibilität. Bei der Synthese eines Kohlenwasserstoffs mit dem Ausgangsprodukt oxidierten Kohlenstoffs (CO, CO<sub>2</sub>) muss zunächst die bei der vorigen chemischen Reaktion (z. B. Verbrennung) freigesetzte Bindungsenergie wieder aufgewendet werden. Hinzu kommen der Ersatz der Effizienzverluste der vorausgegangenen Verbrennung und die zusätzlichen Energieaufwendungen für die anschließende chemische Synthese. In technischen Anlagen ist zum Ausgleich von Wirkungsgradverlusten immer ein zusätzlicher Energieaufwand erforderlich. Die Nutzung von synthetischen Kohlenwasserstoffen als Brennstoff führt demnach immer zu Energieverlusten im Vergleich beispielsweise zu direkter, netzgebundener erneuerbarer elektrischer Energie.

**Eine Mehrfachnutzung von Kohlenstoff ändert nichts an der Klimawirkung der ursprünglichen Kohlenstoffquelle**, da der Kohlenstoff letztlich immer als Kohlendioxid in die Atmosphäre emittiert wird und dort seine Treibhausgaswirkung entfaltet. Fossil gebundener Kohlenstoff, der in industriellen Produktionsprozessen freigesetzt wird und technisch nicht vermeidbar ist, führt also unabhängig von der Anzahl der nachfolgenden Nutzungen mit CCU immer zu einer Erhöhung der menschenverursachten CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre.

## 5.2 Klimaschutzwirkung bei der Substitution fossiler Energieträger oder Rohstoffe

Nach der Kohlenstoffquelle ist der zweite Aspekt bei der Beurteilung der Klimaschutzwirkung von CCU-Maßnahmen die Substitutionswirkung eines CCU-Produkts beim Ersatz fossiler Brenn-, Kraft- oder Rohstoffe. Auch bei dieser Betrachtung wird hier vereinfachend eine vollständige Nutzung von erneuerbaren Energien für alle energetischen Aufwendungen unterstellt.

Die verschiedenen PtG/PtL/PtS-Techniken haben unterschiedliche Substitutionspotenziale, da die zu ersetzenden fossilen Energieträger bei ihrer Nutzung und je nach Anwendungstechnik unterschiedlich hohe Treibhausgasemissionen verursachen. Grundsätzlich ist immer zu bedenken, dass PtG/PtL/PtS oft nicht die einzige erneuerbare Alternative für die jeweilige Anwendung darstellt. In Abbildung 6 wird näherungsweise und mit vereinfachenden Annahmen ein Überblick zur Substitutionswirkung gegeben. Dabei wird erkennbar, dass beispielsweise für die Bereitstellung von Raumwärme über Power to Heat in Verbindung mit Wärmepumpen deutlich mehr Erdgas substituiert werden kann, als wenn mittels Power to Gas erneuerbares Gas bereitgestellt und dieses in konventionellen Techniken verwendet wird [UBA 2016a]. Gleichfalls ist zu bedenken, dass auch nicht-strombasierte erneuerbare Energien zur Wärmeversorgung verwendet werden können. Prinzipiell ist die Integration der Substitutionstechniken so zu gestalten, dass ein möglichst effektiver Beitrag zur Erreichung der mittelfristigen Klimaschutz- und Energieeffizienzziele gewährleistet wird [UBA 2016a]. **Dementsprechend ist es sinnvoll, effiziente Techniken zu bevorzugen und Techniken mit hohem Substitutionspotenzial im Lauf des Transformationsprozesses hin zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem frühzeitiger zu integrieren als Techniken mit geringerem Substitutionspotenzial** [UBA 2016a]. Wie in Abbildung 6 dargestellt, weisen die PtG/PtL-Techniken, die unmittelbar mit CCU verbunden sind (siehe die letzten drei Zeilen), verhältnismäßig geringe Substitutionspotenziale auf. Gleichwohl ist es erforderlich, Industrieprozesse treibhausgasarm oder -neutral umzugestalten. Zum Beispiel ist im Fall der Stahlindustrie eine Umstellung auf eine weitgehend treibhausgasneutrale Produktion möglich, mit der trotz des geringen Substitutionspotenzials von PtG-Wasserstoff sofort begonnen werden

<sup>8</sup> In langfristigen Szenarien wird in energiewirtschaftlichen Optimierungen im Wesentlichen ein Import von PtG/PtL/PtS-Produkten skizziert. Dementsprechend müsste eine große Distanz überwunden werden und zusätzliche energetischen Aufwendungen für das Recycling und den Transport von Kohlenstoff hin zum Standort der PtG/PtL/PtS-Anlagen erbracht werden (siehe dazu [BDI 2018]; [DENA 2018]; [Öko-Institut 2015] oder [UBA 2014]).

Abbildung 6

## Substitutionswirkung von ausgewählten PtX-Techniken

Nutzung regenerativer Strom				Substitution fossiler Bereitstellung			
regenerative Bereitstellung			fossile Einsparung			Substitutionsverhältnis Energie	Vermiedene THG-Emissionen in CO <sub>2</sub> Äq
Input	Technik	bereitgestellte Energie/Nutzen	Technik	Input			
1 kWh reg. Strom	PtH Wärmepumpe	3,3 kWh Wärme	3,3 kWh Wärme	Brennwertkessel (105 %)	3,14 kWh Erdgas	3,14	~ 640
1 kWh reg. Strom	E-Auto (80 %)	4,6 km	4,6 km	Verbrennungsmotor (28 %)	2,6 kWh fl. Kraftstoff	2,6	~ 690
1 kWh reg. Strom	PtH direktelektrisch	0,95 kWh Wärme	0,95 kWh Wärme	Brennwertkessel (105 %)	0,91 kWh Erdgas	0,91	~ 185
1 kWh reg. Strom	PtG-H <sub>2</sub> stofflich	0,74 kWh Wasserstoff	0,74 kWh Wasserstoff	Dampfreforming (85,2 %)	0,87 kWh Erdgas	0,87	~ 180
1 kWh reg. Strom	PtG-CH <sub>4</sub>	0,58 kWh Methan	0,58 kWh Methan		0,58 kWh Erdgas	0,58	~ 120
1 kWh reg. Strom	PtL	0,5 kWh fl. Kraftstoff	0,5 kWh fl. Kraftstoff		0,5 kWh fl. Kraftstoff	0,5	~ 135

Hinweis: Alle Angaben beziehen sich auf die Nutzung von 1 kWh regenerativen Strom. Prozentangaben in Klammern entspricht dem jeweils unterstellten Wirkungsgrad.

Quelle: UBA 2019b

sollte, weil die Investitionszyklen lang sind und ein weitreichender Umbau der Produktionsanlagen erforderlich ist.

### 5.3 Klimaschutzwirkung der energetischen Aufwendungen einer CCU-Maßnahme im Transformationspfad

Die Darstellungen in Kapitel 5.1 und 5.2 gehen vereinfachend von der ausschließlichen Nutzung erneuerbarer Energien in der CCU-Maßnahme aus. Im Transformationspfad hin zu einer vollständig auf erneuerbaren Quellen basierenden Energieversorgung ist dies, sofern es sich um netzgekoppelte Anlagen<sup>9</sup> handelt, jedoch nicht gegeben. Bei netzgekoppelten CCU-Maßnahmen sind die tatsächlich verursachten Treibhausgasemissionen für die energetischen Aufwendungen im hohen Maß vom Zeitpunkt der Stromnutzung abhängig. Es spielt daher eine Rolle, ob zum Zeitpunkt der Stromnutzung erneuerbarer Strom zur Verfügung steht oder zusätzliche fossile Energieträger eingesetzt werden müssen,

um den zusätzlichen Energiebedarf einer CCU-Maßnahme zu decken. Die wissenschaftliche Ermittlung der realen Treibhausgaseminderungseffekte von zusätzlichen Stromverbrauchern ist komplex und nur im Zusammenspiel sämtlicher Stromerzeuger und -verbraucher sowie deren Flexibilisierung zu ermitteln [UBA 2016a]. Des Weiteren wird die Klimaschutzwirkung der CCU-Maßnahme durch die energetische Effizienz jeder einzelnen Prozessstufe (Abtrennung, Transport, Produktherstellungstechnik etc.) im Pfad maßgeblich beeinflusst.

Die derzeitigen regionalen „Stromüberschüsse“<sup>10</sup> reichen nicht für den wirtschaftlichen Betrieb von CCU-Maßnahmen aus und werden wohl auch nicht im nächsten Jahrzehnt in Deutschland ausreichen. Denn **unter den aktuellen Rahmenbedingungen des Stromversorgungssystems würde ein rascher Ausbau netzgekoppelter CCU-Maßnahmen in Deutschland zu einer höheren Auslastung der**

<sup>9</sup> Nach [UBA 2016a] und 37. BImSchV.

<sup>10</sup> Gemeint sind Zeiten hoher erneuerbarer Stromproduktion, die nicht ins Stromsystem integriert werden können und vor allem zu netzbedingten Abregelungen der erneuerbaren Energien führen.

**konventionellen, fossilen Stromerzeugung führen [UBA 2016a]. Dies würde faktisch einer verlustreichen Energiewandlung fossiler Energieträger zu Gas (Coal/Gas to Gas), zu flüssigen Kraftstoffen (Coal/Gas to Liquid) oder festen Produkten (Coal/Gas to Solid) gleichkommen.** Unter den Bedingungen des Einsatzes fossiler Energieträger zur Herstellung elektrischer Energie beispielsweise für PtG-Anlagen würde so, unabhängig von der Kohlenstoffquelle, ein Produkt erzeugt, das durch die fossile Stromerzeugung zu einer mehrfach höheren CO<sub>2</sub>-Emissionsbelastung als die direkte Nutzung von fossilem Erdgas führen würde.

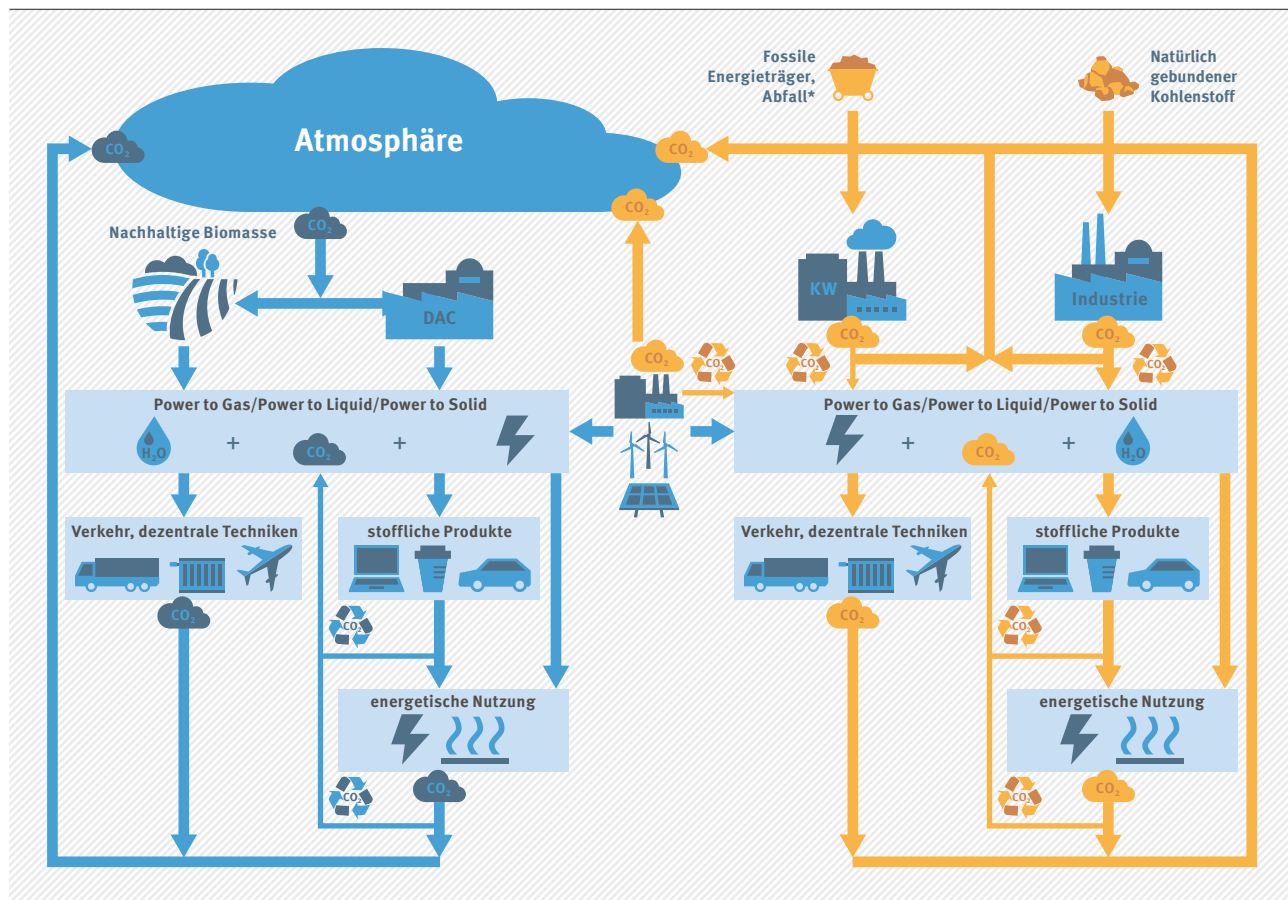
Daraus folgt, dass die Nutzung fossil erzeugter elektrischer Energie für CCU-Maßnahmen die Erreichung der Klimaschutzziele stark gefährdet und daher vermieden werden muss [UBA 2016a]. Erst ab einer entsprechend geringen CO<sub>2</sub>-Belastung im tatsächlichen Strombezug kann eine positive Klimaschutzwirkung erreicht werden. Beispielsweise ist vorbehaltlich

der Wirtschaftlichkeit erst ab einem CO<sub>2</sub>-Gehalt des Bezugsstroms von ca. 120 g CO<sub>2</sub><sub>Äq</sub>/kWh ein großtechnischer Einsatz von PtG-Anlagen zur Erzeugung von Methan in Bezug auf die Klimaschutzwirkung sinnvoll [UBA 2016b]. Der vorläufige Wert für 2018 beträgt hingegen 468 g CO<sub>2</sub><sub>Äq</sub>/kWh [UBA, 2020a]. Der konkrete CO<sub>2</sub>-Gehalt des Bezugsstroms bzw. die Substitutionswirkung variiert entsprechend dem CCU-Pfad. Er ist abhängig von dem zu substituierenden fossilen Energieträger, der konkreten Anwendung sowie der energetischen Effizienz der einzelnen Techniken in der CCU-Maßnahme (Abscheidung, bereitgestellte Produkte oder Energieträger, Transport etc.). Aus den in Abbildung 6 ausgewiesenen vermiedenen THG-Emissionen lässt sich ableiten, ab welcher Treibhausgasbelastung des verwendeten Stroms eine Integration der CCU-Techniken sinnvoll ist.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass unter bestimmten Bedingungen eine CCU-Maßnahme für kurze Zeit im Transformationspfad hin zu einem treibhausgas-

Abbildung 7

**Schematische Darstellung der Klimaschutzwirkung bei CCU**



Hinweis: \* Wenn die chemische Industrie zunehmend erneuerbare strombasierte Kohlenstoffprodukte herstellt, fällt der Energieträger Abfall (derzeit mit einem durchschnittlichen biogenen Anteil von 50% bei Restabfällen) auf lange Sicht nicht mehr in die Kategorie „fossiler Kohlenstoff“.

Quelle: UBA 2019b

neutralen System eine Klimaschutzwirkung haben kann, diese in einem vollständig erneuerbaren Energiesystem aber nicht mehr gegeben ist. Vor dem Hintergrund der langen Investitionszyklen und Manifestieren von Prozesstechniken um Jahrzehnte im Voraus, ist die Anschlussfähigkeit von CCU-Maßnahmen an ein treibhausgasneutrales Wirtschaften sicherzustellen. Daher ist bereits im Transformationspfad auf das primäre Ziel der CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei CCU-Maßnahmen zu fokussieren.

In der Abbildung 7 sind die genannten Zusammenhänge aufbauend auf Abbildung 4 und Abbildung 5 schematisch dargestellt.

## 5.4 Ausgewählte Beispiele

### 5.4.1 Energiewirtschaft

Die anthropogenen Treibhausgasemissionen der gesamten Energieversorgung, inklusive der Bereitstellung von Brenn-, Kraft- und Rohstoffen, können vollständig durch die Umstellung auf erneuerbare Energien vermieden werden [siehe u. a. UBA 2014, UBA 2016a, UBA 2016b, UBA 2019a, UBA 2019b]. Dabei sind gleichzeitig über alle Anwendungsgebiete hinweg Effizienzpotenziale zu heben, um die Integration der erneuerbaren Energien effektiv zu ermöglichen. Überall, wo dies technisch möglich ist, sollten erneuerbare Energien direkt genutzt werden (siehe dazu [UBA2014, UBA2016b, UBA2019a]). In der Strom-, Raumwärme- und in weiten Teilen der Prozesswärme- und Prozesskälteversorgung kann dies technisch ermöglicht werden, womit die Emission von CO<sub>2</sub> prinzipiell vermieden werden kann. Auch die Versorgungssicherheit der Stromversorgung kann durch kohlenstofffreie Energiespeicher, beispielsweise Wasserstoff, gewährleistet werden. Dementsprechend werden langfristig kohlenstoffhaltige Energieträger in der Energiewirtschaft in deutlich geringerem Maße zum Einsatz kommen als heute.

**Im Sinne des ersten Prüfkriteriums, der Vermeidung, stellen fossil betriebene energiewirtschaftlichen Anlagen daher keinen zweckdienlichen Ausgangspunkt für CCU-Maßnahmen dar.**

### 5.4.2 Stahlindustrie

Sowohl in Deutschland als auch weltweit werden etwa sechs Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen von der Stahlindustrie verursacht. Hauptverursacher ist der Hochofenprozess, der das mit Abstand verbreitetste Verfahren zur Eisen- und

Stahlerzeugung auf Basis primärer Rohstoffe (Eisenerz) darstellt und bei dem aus verfahrenstechnischen Gründen auf den Einsatz von Steinkohlenkoks praktisch nicht verzichtet werden kann. Der eingesetzte Kohlenstoff verlässt den Hochofen zum einen in Form des „Hochhofengases“ (auch „Gichtgas“ genannt), zum anderen in gelöster Form im Roheisen, woraus es im Sauerstoffkonverter mit Hilfe des eingeblasenen Sauerstoffs in das so genannte „Konvertergas“ überführt wird. Sowohl das Hochhofengas als auch das Konvertergas werden aufgrund des enthaltenen Kohlenmonoxids im Stahlwerk selbst, in dafür vorgesehenen Kraftwerken oder in anderen Anlagen energetisch genutzt. Letztlich wird der eingesetzte fossile Kohlenstoff also – wenn auch an unterschiedlichen Orten – praktisch vollständig in Form von CO<sub>2</sub> emittiert.

Einzelne Unternehmen der Stahlbranche bewerben Vorhaben, CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stahlindustrie senken zu wollen, indem das CO bzw. CO<sub>2</sub> aus den entstehenden Prozessgasen abgeschieden und mittels CCU einer erneuten Nutzung zugeführt wird. Dieser energieintensive Prozess würde jedoch nicht die mit der Stahlerzeugung verbundenen Emissionen mindern, weil aus dem in den Prozessgasen enthaltenen (fossilen) Kohlenstoff kein neuer Koks erzeugt werden kann und so keine tatsächliche Kreislaufschließung erfolgen würde, siehe Kapitel 5.1.2. In den Hochöfen würde also trotz CCU genauso viel fossiler Koks eingesetzt werden wie vorher. Die damit verbundenen, fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen wären lediglich über die Nutzung der CCU-Produkte an andere Stellen verlagert, jedoch im Gesamtsystem nicht vermieden.

Es gibt für die Eisen- und Stahlerzeugung auf Basis primärer Rohstoffe andere Verfahren, mit denen die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Hochofenroute praktisch vollständig vermieden werden können. Nach aktuellem Kenntnisstand am weitesten entwickelt und bereits in der industriellen Anwendung sind gasbasierte Direktreduktionsverfahren, die bisher Erdgas nutzen und perspektivisch mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien betrieben werden können. **Vor dem Hintergrund der Freisetzung von fossilem CO<sub>2</sub> in der Hochofenroute und dieser praktizierten Alternativen ist die Anwendung von CCU in der Stahlindustrie nicht als geeignete Klimaschutzmaßnahme anzusehen.**

### 5.4.3 Zementindustrie

Bei der Herstellung von derzeit etwa 24 Millionen Tonnen Zementklinker und ca. 34 Millionen Tonnen Zement in Deutschland [VDZ 2020] werden aus den Roh- und Brennstoffen etwa 20 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> direkt freigesetzt [UBA 2020d]. Diese stellen einen Anteil von rund 2,5 Prozent der in Deutschland verursachten Gesamtemissionen dar.

Etwa zwei Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Brennprozess sind auf die Kalzinierung, d. h. die thermische Abspaltung von CO<sub>2</sub> aus dem Kalkstein, zurückzuführen [UBA 2020e]. Eine Minderung dieser CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Produktion kann durch emissionsarme Rohstoffe und die Vermeidung prozessbedingter Emissionen mittels alternativer Baumaterialien ermöglicht werden. Diese sind derzeit jedoch noch in der Entwicklung und Erforschung. Eine vollständige Vermeidung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie wäre nur durch einen vollständigen Verzicht auf Zement und Beton durch Substitution mit anderen Baustoffen erreichbar, was nach derzeitigem Ermessen unrealistisch scheint.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas eines Zementdrehrohrofens kann durch entsprechende Maßnahmen, z. B. dem Einsatz der Oxyfueltechnik von heute 14–30 Prozent [VDZ 2013] auf über 90 Prozent im Abgasstrom erhöht werden [VDZ 2013]. Dementsprechend stünde ein Abgas mit hoher CO<sub>2</sub>-Konzentration zur Verfügung, so dass eine vergleichsweise energieeffiziente CO<sub>2</sub>-Abscheidung des enthaltenen Kohlenstoffs durchführbar wäre. Entsprechend den Ausführungen in den Kapiteln 5.2 und 5.3 kann es unter bestimmten Randbedingungen in einer zeitlich begrenzten Übergangsphase durch die Nutzung des abgeschiedenen Kohlenstoffs zu weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen als beim konventionellen fossilen Prozess kommen. **Eine Klimaschutzwirkung von CCU unter Nutzung von rohmaterialbedingtem CO<sub>2</sub> aus der Zementindustrie in einem vollständig erneuerbaren Energiesystem ist hingegen nicht gegeben** (siehe Kapitel 5.1.2). Vor dem Hintergrund der langen Investitionszyklen und dem Manifestieren von Prozesstechniken um Jahrzehnte im Voraus, ist die Anschlussfähigkeit von CCU-Maßnahmen an ein treibhausgasneutrales Wirtschaften sicherzustellen. Daher ist bereits im Transformationspfad das primäre Ziel der CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei CCU-Maßnahmen zu fokussieren.

**Die Abscheidung und Aufbereitung von unvermeidbarem konzentriertem CO<sub>2</sub> aus Abgasen der Zementindustrie ist daher nicht aus Klimaschutzgründen zu verfolgen, sondern vielmehr mit Blick auf die Nutzung als Rohstoffquelle, siehe Kapitel 5.5.**

### 5.5 Lösungsansätze für unvermeidbare rohstoffbedingte Treibhausgasemissionen

Als Ergebnis der vorangestellten Beurteilung von CCU als potenzielle Klimaschutzmaßnahme wurde deutlich, dass die Nutzung von fossilem Kohlenstoff – unabhängig von CCU-Maßnahmen – letztlich immer zu anthropogen verursachten Mehremissionen führt. Dementsprechend können für einzelne industrielle Anwendungen, beispielsweise die Zement-, Kalk- und Glasindustrie, keine perspektivischen Lösungen zur Treibhausgasneutralität innerhalb der industriellen Produktion aufgezeigt werden. Für diese rohstoffbedingten oder prozessbedingten Treibhausgasemissionen gilt es, dauerhaft durch Forschung und Weiterentwicklung

- ▶ Materialien oder Produkte zu vermeiden, deren Herstellung mit unvermeidbaren Treibhausgasemissionen verbunden ist, oder sie durch weniger treibhausgasintensive Materialien und Produkte zu substituieren sowie
- ▶ die rohstoffbedingten oder prozessbedingten Emissionen durch grundlegende Verfahrensumstellungen zu vermeiden.

Ziel muss es sein, Lösungen zur Treibhausgasneutralität innerhalb der verursachenden Produktionen zu finden oder die Treibhausgasemissionen auf ein Minimum zu reduzieren.

Wie im Bereich der Landwirtschaft ist nach derzeitigem Kenntnisstand davon auszugehen, dass Treibhausgasemissionen auch trotz vorhandener technologischer Entwicklungspotenziale langfristig nicht vollständig vermeidbar sind. **Diese Treibhausgasemissionen können nur durch die dauerhafte Entnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre an anderer Stelle ausgeglichen werden („Senken“). Die Kompensation der unvermeidbaren Treibhausgasemissionen aus industrieller und landwirtschaftlicher Produktion muss in der Regel außerhalb des eigentlichen verursachenden Wirkungsbereichs erfolgen.**

Dies bedeutet allerdings nicht automatisch den Einsatz von Carbon Capture and Storage -Techniken (CCS) zur Speicherung dieser CO<sub>2</sub>-Emissionen. CCS ist mit Umweltrisiken verbunden [UBA 2015a], kann nach derzeitigem Kenntnisstand keine sichere und vollständige CO<sub>2</sub>-Einlagerung gewährleisten, hat eine geringe Akzeptanz in der Bevölkerung und stellt daher keine dauerhaft tragfähige Minderungsmöglichkeit für Treibhausgasemissionen in Deutschland dar.

Die zusätzliche, dauerhafte Kohlenstoffentnahme (CDR – Carbon Dioxide Removal) kann auch durch Sicherung und Erschließung natürlicher Kohlenstoffsenken erfolgen. Auch diese Ansätze sind physikalisch in ihrer nationalen, europäischen oder globalen Kapazität begrenzt und bergen ein Risiko, nicht nachhaltig zu sein. Trotz der Notwendigkeit zur Treibhausgasreduzierung über CDR-Maßnahmen sollten die damit verbundenen Zielkonflikte und Risiken so gering wie möglich gehalten werden [UBA 2019c]. Die Vermeidung von Treibhausgasemissionen hat demgegenüber Vorrang. Durch Stärkung und Sicherung der natürlichen Senken können gleichzeitig Synergien zu anderen Umweltherausforderungen, beispielsweise der Biodiversität, adressiert werden.

**In der RESCUE-Studie [UBA 2019a, b, c] wird aufgezeigt, dass die unvermeidbaren Treibhausgasemissionen der industriellen Prozesse, der Landwirtschaft sowie aus dem Bereich Abfall und Abwasser durch die natürlichen Senken und nachhaltige Holzwirtschaft vollständig kompensiert werden können und kein CCS für die Erreichung der Treibhausgasneutralität erforderlich ist.** In den dort dargestellten ambitioniertesten Green-Szenarien (GreenSupreme, GreenLife und GreenMe) sind im Jahr 2050 bilanziell Netto-Null-Emissionen sicher erreichbar.

Die Verknüpfung der CDR-Maßnahmen, die eine langanhaltende sichere Bindung oder Einspeicherung von Kohlenstoff oder Kohlendioxid versprechen, mit den verursachenden Treibhausgasemittenten kann beispielsweise über neue Marktmechanismen (nationale, europäische oder globale Kohlenstoffmärkte,

Finanzierungsprojekte) des Übereinkommens von Paris organisiert werden. Konkrete Überlegungen dazu sowie zu den Erfordernissen an eine langanhaltende sichere Bindung oder Einspeicherung von Kohlenstoff oder Kohlendioxid sind bisher in den wissenschaftlichen und politischen Debatten begrenzt. Sie sind jedoch mittelfristig dringend erforderlich, um auch diesen Bereichen entsprechende Perspektiven aufzuzeigen.

Unabhängig davon, ist auch in industriellen Anwendungen mit unvermeidbaren Emissionen, wie in allen anderen industriellen Produktionsbereichen, ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz zu leisten durch

- ▶ die Steigerung der Energieeffizienz mittels energieeffizienter Techniken, Optimierung von Verfahren und Prozessen und eine konsequente Abwärmenutzung sowie
- ▶ die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energieträger und, wo technisch möglich, auf die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom.

### Exkurs 2: Zementindustrie – CO<sub>2</sub> in ein Produkt einbinden

Die unvermeidlichen, rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie dürfen perspektivisch nicht zum Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre führen. Stattdessen muss Kohlenstoff in gleichem Umfang dauerhaft gebunden werden. Die Kompensation der unvermeidbaren CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Zementindustrie kann dabei auch außerhalb des eigentlichen verursachenden Wirkungsbereichs erfolgen. Aktuell wird auch die Rekarbonatisierung von Beton diskutiert [Sacchi et al. 2020]. Diese Option ist derzeit noch unzureichend erprobt und das tatsächliche Potenzial noch unklar. Die Erforschung und Entwicklung nachhaltiger und vorzugsweise natürlicher Senken ist eine der aktuell dringendsten Forschungsfragen, um unvermeidbare Treibhausgasemissionen zu kompensieren.

## 6. Erschließen der Rohstoffquelle Kohlenstoff mittels CCU

Kohlenstoffhaltige Energieträger und Produkte sind aus dem Leben praktisch nicht weg zu denken. Auch wenn Vermeidungspotenziale auf dem Weg in eine nachhaltige Gesellschaft gehoben werden und insbesondere in der Energiewirtschaft weitgehend darauf verzichtet werden kann, wird auch zukünftig ein Rohstoffbedarf an Kohlenstoff für die Bereitstellung von Energieträgern und Produkten fortbestehen. Im Gegensatz zur heutigen Situation müssen zukünftige Entwicklungen darauf ausgerichtet sein, diesen Kohlenstoff nicht nach einer Nutzung in die Atmosphäre zu emittieren, sondern – soweit möglich – mit möglichst geringem Energieverlust im System weiter zu nutzen.

### 6.1 Bedarf von Kohlenstoff als Rohstoff

Große Anteile der Rohstoffversorgung der chemischen Industrie in Deutschland basieren heute auf fossilen Kohlenstoffquellen (wie Erdöl, Erdgas und Kohle), die zu organischen Grundchemikalien und Folgeprodukten verarbeitet werden. Um diese zu ersetzen, müssen auch diese stofflich genutzten Kohlenstoffströme treibhausgasneutral werden, da es sonst am Lebensende des Produkts zu anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen kommt, die den Treibhauseffekt verstärken (siehe Kapitel 5.1.2 und Abbildung 5). Da der Kohlenstoff auch weiterhin in der chemischen Industrie notwendiger Rohstoff ist, kann nicht im Wortsinn von „Dekarbonisierung“ gesprochen werden, was in fast allen anderen Wirtschaftszweigen der zutreffende Ausdruck ist. Der Wechsel der Kohlenstoffquelle kann alternativ durch den Begriff „Defossilisierung“ ausgedrückt werden.

Der Bedarf an kohlenstoffhaltigen Produkten wird im Folgenden über den Masseanteil Kohlenstoff charakterisiert. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit verschiedener Edukte und vereinfacht im nachfolgenden Kapitel die Zuordnung, soweit Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle genutzt werden muss<sup>11</sup>.

Der derzeitige jährliche Einsatz fossiler Rohstoffe in der chemischen Industrie in Deutschland liegt je nach Veröffentlichung bei etwas über 20 Millionen Tonnen Kohlenstoff. Nur ein sehr geringer Teil davon wird bereits heute direkt aus CO<sub>2</sub> gedeckt (z. B. Harnstoff, einige Polyole). Vielmehr stammt der Kohlenstoff derzeit aus fossilen Rohstoffen. Wesentlicher Gesichtspunkt der Bereitstellung von Kohlenstoff für die chemische Industrie ist der damit verbundene Energiebedarf. Die heutigen fossilen Einsatzstoffe enthalten hohe Mengen gespeicherter Energie, die in den Prozessen genutzt wird. Rohstoffe wie Kohlendioxid enthalten wenig innere Energie. Diese muss in den defossilisierten Herstellungspfaden der Produkte erst aufgewendet werden. Neben dem Energieeinsatz spielen Umweltwirkungen, die neben der globalen Erwärmung auftreten können (z. B. Eutrophierung, Versauerung oder die Freisetzung toxischer Stoffe [UBA 2020b]) bei der Bewertung der Herstellungspfade eine wesentliche Rolle. Schon aus wirtschaftlichen Gründen wird der energieeffizienteste Weg, solche Rohstoffe bereit zu stellen, immer dann gewählt werden, wenn nicht andere Umweltwirkungen dagegensprechen. **Die Bereitstellung von Kohlenstoff aus CCU gehört nicht zu den energieeffizienten Kohlenstoff-Bereitstellungspfaden.**

Neben der chemischen Industrie werden langfristig auch kohlenstoffhaltige Brenn- und Kraftstoffe für verschiedene Anwendungen benötigt, u. a. für den Luft- und Seeverkehr. Unter der Prämisse der Vermeidung wird überall dort, wo dies technisch möglich ist, erneuerbarer Strom direkt genutzt, so dass sich der Brenn- und Kraftstoffbedarf gegenüber heute deutlich reduziert.<sup>12</sup> Szenarien verschiedener Veröffentlichungen geben eine Orientierung, ob und wie weit der verbleibende Bedarf an Brenn- und Kraftstoff in Deutschland hergestellt wird und welcher Bedarf an CO<sub>2</sub> für diese Produktion hier bereitgestellt werden muss. In der RESCUE-Studie [UBA 2019b] wird je nach Szenario von einem Bedarf an Kohlenstoff für die gesamte Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung zwischen 8 Millionen bis 40 Millionen Tonnen Kohlenstoff (umgerechnet aus 30 Millionen und

<sup>11</sup> Eine Tonne Kohlenstoff entspricht 3,664 Tonnen Kohlendioxid. Diese Umrechnung wird in diesem Papier als Grundlage der Berechnungen benutzt, auch wenn diese stöchiometrischen Verhältnisse in realen Anlagen aufgrund von technischen Wirkungsgraden nicht immer erreicht werden können.

<sup>12</sup> In der RESCUE-Studie vermindert sich der Brenn- und Kraftstoffbedarf im Jahr 2050 gegenüber 2015 in GreenSupreme um rund 65 Prozent und in GreenLate um rund 30 Prozent.

### Exkurs 3: Vergleich verschiedener Rohstoffrouten

Bei Betrachtung der Energieeffizienz bei der Rohstoffbereitstellung ist beispielsweise das werkstoffliche Recycling, z. B. von Verpackungsabfall, effizienter als das chemische Recycling. Grundlage des Vergleichs muss ein identischer Nutzen sein. Wenn ein Produkt aus werkstofflichem Recycling aber mehr Rohstoff benötigt, als ein nutzengleiches Produkt aus dem chemischen Recycling, wird deutlich, dass die Bewertung allein der Energieeffizienz nicht hinreichend ist.

Neben dem effizienten Einsatz der Energie muss die Rohstoffintensität (Menge eingesetzten Rohstoffs pro Produkt) berücksichtigt werden. Nur solche Verfahren sind zu berücksichtigen, die eine möglichst hohe Energieeffizienz und gleichzeitig eine niedrige Rohstoffintensität nachweisen können.

148 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>) pro Jahr ausgegangen. Eine konkrete Prognose, was wo produziert werden wird, ist jedoch vor dem Hintergrund der vielen Einflussfaktoren und globalen Entwicklungen nur schwierig absehbar. In Abbildung 8 werden die Pfade, die weiterhin Rohstoffbedarf haben werden, auf der rechten Seite gezeigt.

**Der Gesamtbedarf an Kohlenstoff wird auch unter Berücksichtigung starker Einsparungspotenziale sehr wahrscheinlich nicht unter 20 Millionen Tonnen Kohlenstoff sinken und könnte im ungünstigsten Fall auch Größenordnungen um 40 Millionen Tonnen Kohlenstoff erreichen.**

## 6.2 Verfügbarkeit von Kohlenstoff als Rohstoffquelle

Sind Produkte nicht vermeidbar, wird auch langfristig Kohlenstoff für deren Bereitstellung gebraucht. Die energieeffizientesten Maßnahmen für die Bereitstellung von Kohlenstoff sind im Allgemeinen die, die am wenigsten (chemische) Stoffumwandlungen benötigen. Abbildung 8 stellt auf der linken Seite die Bereitstellungspfade dar.

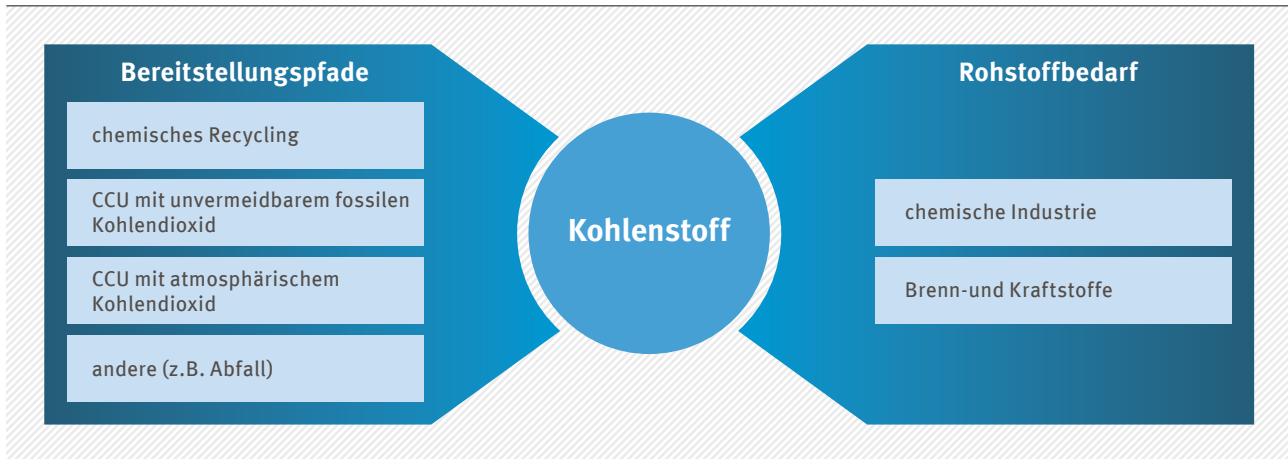
**Recycling von im Kunststoffabfall enthaltenen Kohlenstoff:** Neben anderen kohlenstoffhaltigen Abfallstoffen kann das chemische Recycling von Kunststoffabfällen voraussichtlich als eine energie- und materialeffiziente Kohlenstoffquelle genutzt werden, wobei die derzeitigen technischen Entwicklungen noch nicht absehen lassen, wie viel des theoretischen Potenzials wirklich nutzbar wird. Aus der gemeinsamen Roadmap von FutureCamp und DECHEMA [FutureCamp 2019] lässt sich eine Menge von etwas über 2 Millionen Tonnen reinen Kohlenstoffs berechnen, die die Autoren als Potenzial aus Kunststoffabfällen ansehen. Hieraus kann dementsprechend nur ein geringer Anteil des langfristigen Bedarfs gedeckt werden.

Auch andere Ansätze (z. B. nachhaltige Restbiomasse, andere Abfälle) sind denkbar, deren nachhaltiger Beitrag zur Bereitstellung von Kohlenstoff nicht klar abgeschätzt werden kann und hier nicht näher thematisiert wird.

**CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle:** Kohlendioxid wird aus heutiger Sicht auch künftig eine notwendige Quelle von Kohlenstoff darstellen, wenn alle anderen energieeffizienteren Pfade zur Bereitstellung von Kohlenstoff ausgeschöpft sind. Aus der in Kapitel 6.1 dargestellten Bedarfsmenge und den zuvor dargestellten geringen bisher absehbaren Mengen direkter Recyclingpotenziale wird deutlich, dass es voraussichtlich eine große Lücke geben wird. **Diese Lücke zwischen Kohlenstoffbedarf und möglicher Deckung durch andere Kohlenstoffbereitstellungspfade wird trotz des hohen Energiebedarfs durch CCU-Maßnahmen zu decken sein.**

Abbildung 8

**Übersicht Kohlenstoffbedarf und Bereitstellungspfade**



Quelle: Umweltbundesamt

Dabei kann CO<sub>2</sub> aus Quellen, in denen es in hoher Konzentration auftritt (z. B. in Anlagen mit Oxyfuel-Verfahren) mit weniger Energieaufwand nutzbar gemacht werden als niedrig konzentriertes CO<sub>2</sub> (z. B. aus der Atmosphäre). Allerdings ist am Standort einer CO<sub>2</sub>-emittierenden Anlage nicht notwendigerweise die erforderliche Menge erneuerbarer Energie verfügbar.

Wie bereits in Kapitel 5 dargestellt, verbleiben in einigen industriellen Prozessen unvermeidbare Treibhausgasemissionen. Hieraus könnten etwas mehr als 5 Millionen Tonnen Kohlenstoff aus Kalk-, Zement- und Glasindustrie für CCU-Maßnahmen pro Jahr zur Verfügung gestellt werden<sup>13</sup> (20 Millionen Tonnen Kohlendioxid).

Unabhängig davon, ob biogene Kohlenstoffe direkt für rohstoffliche Anwendungen zur Verfügung stehen, ist eine effiziente Nutzung von biogenen Reststoffen anzustreben, so dass beispielsweise zur Verwertung von Gülle oder Bioabfall auch zukünftig Biogasanlagen oder Klärgasanlagen als Punktquelle von CO<sub>2</sub> erschlossen werden können. Bei der Biogasproduktion entstehen wesentliche Mengen CO<sub>2</sub>, die abgetrennt werden können, um das so erzeugte Biomethan effizient nutzbar zu machen. Dieses abgetrennte CO<sub>2</sub> kann je nach genutztem Verfahren eine hohe Reinheit haben und ist somit eine potenziell

günstige Ausgangsbasis für CCU-Maßnahmen. Auch der Energieträger Abfall, z. B. gemischte Siedlungsabfälle und Gewerbeabfälle, enthält große biogene Kohlenstoffanteile, die nach Verbrennung als CO<sub>2</sub> als Punktquelle erschlossen und für CCU-Maßnahmen genutzt werden können.

**Diese und gegebenenfalls weitere nicht vermeidbare industrielle Punktquellen werden nicht ausreichen, um den Rohstoffbedarf vollständig zu decken. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Rohstoffe auch direkt aus atmosphärischem Kohlendioxid bereit zu stellen.**

Der Energiebedarf, um aus 100 Millionen Tonnen Kohlendioxid höherwertige Produkte (z. B. eine Mischung aus Methan, Propan und Methanol) herzustellen, liegt bei etwa 1.000 Terawattstunden (TWh) allein für die chemischen Reaktionen. Der Aufwand für die Erfassung oder Abscheidung des CO<sub>2</sub> und den Transport zur Verwendung käme noch hinzu. Dies entspräche etwa dem doppelten des derzeitigen jährlichen Verbrauchs elektrischer Energie in Deutschland (2018: 513 TWh [UBA 2020a]). **Die Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub> als Rohstoff ist kein Kohlenstoff- sondern ein Energieproblem.**

<sup>13</sup> Die verschiedenen Szenarien in RESCUE [UBA 2019b] weisen zwischen 8,1 Millionen und 18,7 Millionen Tonnen verbleibende CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Zement-, Kalk- und Glasherstellung aus.

### 6.3 Die Rolle von CCU in einem nationalen nachhaltigen Energiesystem

Im Zuge der Energiewende und der Integration von neuen Energie- und Stromverbrauchern, wie Elektromobilität, Power to Heat und anderen, ist ein weiterer, erheblicher Ausbau an erneuerbaren Energien in Deutschland erforderlich. Die zukünftige Stromversorgung wird trotz Energieeffizienzmaßnahmen deutlich über dem heutigen Niveau liegen.<sup>14</sup> Dabei werden insbesondere die kostengünstigen und ertragreichen Standorte für erneuerbare Energien erschlossen. Unter der Annahme hoher Effizienzpotenziale wird in der RESCUE-Studie von mehr als einer Verdopplung der Windenergie an Land, etwa einer Verdreifachung der Photovoltaikleistung und grob einer Verfünfachung der Wind off-shore Kapazitäten in Deutschland ausgegangen [UBA 2019b]. Die Stromerzeugung in Deutschland liegt je nach Szenario der RESCUE-Studie in der Größenordnung von 750 bis über 900 TWh im Jahr 2050 (2018: 513 TWh [UBA 2020a]). Andere langfristige Studien<sup>15</sup> kommen zu vergleichbaren Ergebnissen. Als Ergebnis energiewirtschaftlicher Optimierungen wird langfristig ein Import von PtG/PtL/PtS-Produkten postuliert. Hintergrund ist, dass die nationalen Standorte für erneuerbare Energien aufgrund geringer Volllaststunden nicht konkurrenzfähig sind im Vergleich zu einer Vielzahl von internationalen Standorten zur erneuerbaren Stromerzeugung. **Damit wird deutlich, dass nicht die Frage der Kohlenstoffverfügbarkeit sondern die der Kosten für die Energieaufwendungen ausschlaggebend für den Standort des Einsatzes von CCU-Maßnahmen wird.**

Die vorangestellten Ausführungen in Kapitel 5 und 6 verwiesen mehrfach auf die energetischen Bedarfe der CCU-Maßnahmen und die damit verbundene Notwendigkeit, auf kohlenstoffhaltige Energieträger und Produkte so weit wie möglich zu verzichten. Die Unterschiede, die sich anderenfalls ergeben können, werden in der RESCUE-Studie des UBA [UBA 2019b] deutlich. Im Szenario GreenSupreme, in dem dort, wo technisch möglich auch Strom direkt zum

Einsatz kommt, wird eine erneuerbare Nettostromerzeugung<sup>16</sup> von rund 850 TWh benötigt. Im Szenario GreenLate, in dem Kohlenwasserstoffe vermehrt zum Einsatz kommen, obwohl auch erneuerbarer Strom direkt genutzt werden könnte, werden rund 2.700 TWh erneuerbarer Strom pro Jahr benötigt.

Neben der Frage zur erforderlichen Energiemenge und den Wegen der Bereitstellung von Kohlenstoff (Import von CCU-PtG/-PtL/-PtS-Produkten, CO<sub>2</sub>-Transport innerhalb Deutschlands von industriellen Punktquellen, etc.) sind weitere energiewirtschaftliche Aspekte bei der Integration von CCU-Maßnahmen zu berücksichtigen. In einem Energiesystem, das zunehmend auf fluktuierend verfügbaren erneuerbaren Energien basiert, ist die Flexibilisierung der Stromnachfrage eine effiziente und wirtschaftliche Maßnahme. Dies dient dazu, in Übergangszeiten die nötige Mindestenergie aus konventionellen Kraftwerken zu reduzieren, den Bedarf an erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen zu begrenzen und gleichzeitig eine hohe Systemsicherheit zu bewahren. Vor diesem Hintergrund sind auch Anforderungen an die Integration neuer Energieverbraucher zu stellen.<sup>17</sup>

In der RESCUE-Studie des UBA [UBA 2019b] ergibt sich in einem sehr ambitionierten Szenario (GreenSupreme) ein energiewirtschaftliches Produktionspotential von bis zu 100 TWh PtG/PtL/PtS-Produkten pro Jahr in Deutschland.<sup>18</sup> Damit einhergehend könnte durch zweckmäßige Standortverknüpfungen eine Nutzung von rund 20 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> aus industriellen Punktquellen erfolgen.<sup>19</sup> Sollten Energieeffizienzmaßnahmen und der Fuel-Switch zu strombasierten Techniken über alle Anwendungsbereiche hinweg nicht konsequent umgesetzt werden, kann in Anlehnung an GreenLate<sup>20</sup> davon ausgegangen werden, dass in Deutschland kein energiewirtschaftliches Potential für CCU-Maßnahmen besteht. Eine Wirtschaftlichkeit von CCU-Maßnahmen mit PtG/PtL/PtS-Anlagen in Deutschland als Teil der Energieversorgung scheint damit langfristig nur begrenzt gegeben.

14 Siehe beispielsweise [BDI 2018, DENA 2018, Öko-Institut 2015] oder [UBA2014; 2019].

15 Beispielsweise [BDI 2018, DENA 2018, Öko-Institut 2015] oder [UBA2014; 2019].

16 Nettostromerzeugung beinhaltet die Bereitstellung sämtlicher Strombedarfe für die Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung sowie Netzverluste beim Transport des Stroms. Sie beinhaltet Strom, der sowohl direkt als Endenergie als auch als Sekundärenergieträger in PtG/PtL/PtS-Anlagen genutzt wird.

17 Und werden bereits beispielsweise im KWKG, insbesondere bei der innovativen KWK, adressiert.

18 Unter der Verwendung von rund 150 TWh erneuerbaren Strom.

19 In GreenSupreme verbleiben aus Zement-, Kalk- und Glasherstellung rund 8 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>.

20 Unter der weiteren Annahme, dass sich Wasserstoff als Brennstoff durchsetzt.

## 6.4 Ausgewählte Beispiele

### 6.4.1 Chemische Industrie

Eine Eigenschaft der chemischen Industrie ist die hohe Diversität der Produkte und Produktionsverfahren sowie der Betriebe. Ein umfassender Überblick über die Möglichkeiten der Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff ist daher an dieser Stelle nicht möglich, beispielhaft sollen aber einige Möglichkeiten dargestellt werden, bei denen eine CO<sub>2</sub>-Nutzung erfolgen kann.

**Herstellung von Alkenen/Olefinen:** Alkene (auch Olefine genannt) sind ungesättigte Kohlenwasserstoffe mit einer Kohlenstoffdoppelbindung. Die beiden meistgenutzten Vertreter sind Ethen (Ethylen) und Propen (Propylen), die die wichtigsten Grundchemikalien der organischen Chemie darstellen. Aus ihnen werden z. B. Kunststoffe, Alkohole und Waschmittelbestandteile hergestellt. Die heutzutage übliche Herstellung erfolgt durch Spalten fossiler langkettiger Kohlenwasserstoffe (insbesondere Naphtha) in Steamcrackern. Um diese wichtigen Grundbausteine der organischen Chemie zu defossilisieren, sind einige Ansätze denkbar.

Zum einen kann die bestehende Struktur der organischen Grundchemikalienproduktion weitgehend beibehalten und diese über PtL-Produkte versorgt werden. Zusätzliche energiebedingte Emissionen müssen dabei durch weitgehende Elektrifizierung z. B. der Cracker vermieden werden. Die PtL-Rohstoffe wären dann z. B. mittels Fischer-Tropsch-Synthese hergestellte Kohlenwasserstoffgemische.

Alternativ könnte die Herstellung von Alkenen z. B. aus Methanol erfolgen. Dieses kann als Plattformchemikalie aus treibhausgasneutral erzeugtem Wasserstoff und CO<sub>2</sub> synthetisiert werden. Aus Methanol können eine Vielzahl weiterer Produkte hergestellt werden, z. B. Formaldehyd, langkettige Kraftstoffe und Kraftstoffzusätze.

Weiterhin befinden sich andere Herstellungswege in der Forschung, die z. B. eine direkte, elektrochemische Synthese von Produkten (z. B. Alkenen und Methanol) ermöglichen.

**Unabhängig von den dargestellten Verfahren, die zukünftig in einem erneuerbaren System möglich sind, wird deutlich, dass der Kohlenstoffbedarf für Olefine über CCU-Maßnahmen gedeckt werden kann.**

**Herstellung von Harnstoff:** Ein Beispiel einer direkten CO<sub>2</sub> Nutzung ist die bereits heute großtechnisch angewandte Produktion von Harnstoff, der u. a. als Ausgangsstoff für Düngemittel verwendet wird. Hierzu wird Ammoniak (NH<sub>3</sub>) aus der Haber-Bosch-Synthese mit CO<sub>2</sub> über das Zwischenprodukt Ammoniumcarbamat zu Harnstoff (und Wasser) umgesetzt. Dabei wird heute durch Dampfreforming von fossilem Erdgas Wasserstoff für die Ammoniaksynthese und hoch reines CO<sub>2</sub> erzeugt. Durch die Umstellung auf die Wasserstoffelektrolyse in Verbindung mit erneuerbarem Strom wird so die Entstehung von CO<sub>2</sub> vermieden. **Das erforderliche CO<sub>2</sub> für die Harnstoffsynthese kann künftig aus CCU-Maßnahmen bereitgestellt werden.** Um die heutigen Mengen an Harnstoff herzustellen, werden 0,38 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr in Deutschland benötigt.

### 6.4.2 Zementindustrie

In der Zementindustrie verbleiben mit den derzeitigen Techniken unvermeidbare rohmaterialbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, wenn Zement hergestellt wird (vgl. Kapitel 5.4.3). Die vorangegangenen Darstellungen und konkreten Beispiele in Kapitel 5.5 zeigen, dass auch langfristig ein Kohlenstoffbedarf besteht und gedeckt werden muss. **Abgas aus der Zementindustrie kann daher eine Option zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs darstellen.** Aufgrund der hohen Konzentrationen von CO<sub>2</sub> in den Abgasen (in Verbindung mit Oxyfuel bis über 90 Prozent) stellt dies eine vergleichsweise effiziente und mit einem geringen Energiebedarf für die Kohlenstoffbereitstellung verbundene Option dar. Nach Szenarienberechnungen des UBA entstehen im Jahr 2050 noch zwischen 5 Millionen und 14,5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> aus der deutschen Zementindustrie [UBA2019b].

Auch andere Produktionsprozesse, wie die Kalk- und Glasindustrie, können mit ihren unvermeidbaren rohmaterialbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen gegebenenfalls einen Beitrag zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs leisten.

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Schematischer Überblick .....	11
<b>Abbildung 2:</b> Schematische Darstellung zur Vorgehensweise bei der Bewertung von CCU .....	13
<b>Abbildung 3:</b> Schematische Darstellung zur Bewertung der Klimaschutzwirkung .....	14
<b>Abbildung 4:</b> Schematische Darstellung zur Nutzung atmosphärischer Kohlenstoffquellen für CCU .....	15
<b>Abbildung 5:</b> Schematische Darstellung zur Nutzung fossiler Kohlenstoffquellen für CCU .....	17
<b>Abbildung 6:</b> Substitutionswirkung von ausgewählten PtX-Techniken .....	19
<b>Abbildung 7:</b> Schematische Darstellung der Klimaschutzwirkung bei CCU .....	20
<b>Abbildung 8:</b> Übersicht Kohlenstoffbedarf und Bereitstellungspfade .....	26

## Abkürzungsverzeichnis

<b>CCS</b>	Carbon Capture and Storage
<b>CCU</b>	Carbon Capture and Utilization
<b>DAC</b>	Direct Air Capture
<b>CDR</b>	Carbon Dioxide Removal
<b>EOR</b>	Enhanced Oil Recovery
<b>PtC</b>	Power to Chemical
<b>PtG</b>	Power to Gas
<b>PtL</b>	Power to Liquid
<b>PtS</b>	Power to Solid
<b>PtX</b>	Power to X
<b>ÜvP</b>	Übereinkommen von Paris

## Quellenverzeichnis

- BDI 2018:** Klimapfade für Deutschland. The Boston Consulting Group, Prognos, München, Basel, Januar 2018  
<https://e.issuu.com/embed.html#2902526/57478058>
- BMU 2016:** Klimaschutzplan 2050, Berlin November 2016 [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf)
- BMU 2019a:** Gesetzes zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften, Berlin Dezember 2019 [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBl&start=//\\*\[@attr\\_id=%27bgbl119s0010.pdf%27\]#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl119s2513.pdf%27%5D\\_\\_1598862388504](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*[@attr_id=%27bgbl119s0010.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl119s2513.pdf%27%5D__1598862388504)
- BMU 2019b:** Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, Berlin Oktober 2019 <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff./2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>
- DENA 2018:** dena-Leitstudie Integrierte Energiewende, Berlin, Juli 2018 [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_lang.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf)
- FutureCamp 2019:** FutureCamp Climate GmbH und DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.: Roadmap Chemie 2050. München, Frankfurt, Oktober 2019 <https://dechema.de/chemie2050.html>
- Öko-Institut 2015:** Klimaschutzszenario 2050, Berlin, November 2015. <https://www.oeko.de/oekodoc/2441/2015-598-de.pdf>
- Sacchi et al. 2020:** Sacchi, R., Bauer, C.: Should we neglect cement carbonation in life cycle inventory databases?. *Int J Life Cycle Assess* **25**, 1532–1544 (2020), <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01776-y>
- UBA 2014:** Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 – Studie, Dessau, April 2014 [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07\\_2014\\_climate\\_change\\_dt.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf)
- UBA 2015a:** Landesgesetz zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz erarbeiten. Stellungnahme vom 28. Februar 2013 zum Antrag der Fraktionen DIE LINKE sowie BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN im Landtag von Sachsen-Anhalt. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/stellungnahme\\_des\\_umweltbundesamtes\\_landesgesetz\\_zum\\_kohlendioxid-speicherungsgesetz\\_erarbeiten.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/stellungnahme_des_umweltbundesamtes_landesgesetz_zum_kohlendioxid-speicherungsgesetz_erarbeiten.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)
- UBA 2016a:** Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess, Dessau, März 2016 [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position\\_power\\_to\\_gas-power\\_to\\_liquid\\_web.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf)
- UBA 2016b:** Klimaschutzplan der Bundesregierung – Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamtes, Dessau, April 2016 [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klimaschutzplan\\_2050\\_der\\_bundesregierung\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klimaschutzplan_2050_der_bundesregierung_0.pdf)
- UBA 2019a:** Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten, Dessau, Januar 2019 [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215\\_uba\\_fachbrosch\\_rtd\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf)
- UBA 2019b:** Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, Dessau, November 2019, <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>
- UBA 2019c:** Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2050, Politikpapier zur RESCUE-Studie, Dessau, November 2019, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue\\_hgp\\_klimaschutz\\_final\\_komp\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_hgp_klimaschutz_final_komp_0.pdf)
- UBA 2020a:** Stromverbrauch in Daten zur Energie, Dessau März 2020: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>
- UBA 2020b:** Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien, Dessau, Mai 2020, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/systemvergleich-speicherbarer-energetraeger-aus>, Abruf 04.08.2020
- UBA 2020c:** Chemisches Recycling, Hintergrundpapier, Dessau, Juli 2020. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chemisches-recycling>
- UBA 2020d:** Treibhausgasemissionen 2019 Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2019), Berlin, Mai 2020, [https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2019.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- UBA 2020e:** Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie, UBA-Texte 48/2020, Dessau, März 2020, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-06\\_texte\\_48-2020\\_material\\_energieeffizienz\\_zementindustrie.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-06_texte_48-2020_material_energieeffizienz_zementindustrie.pdf)
- VDZ 2013:** Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 79/2013, Düsseldorf, 2013, [https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Schriftenreihe/Schriftenreihe\\_79\\_2013\\_gesamt.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Schriftenreihe/Schriftenreihe_79_2013_gesamt.pdf)
- VDZ 2020:** Umweltdaten der deutschen Zementindustrie, Düsseldorf, 2020, [https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/VDZ\\_Umweltdaten\\_2019.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_2019.pdf)





► **Unsere Broschüren als Download**  
Kurzlink: [bit.ly/2dowYYI](https://bit.ly/2dowYYI)

 [www.facebook.com/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)  
 [www.twitter.com/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)  
 [www.youtube.com/user/umweltbundesamt](https://www.youtube.com/user/umweltbundesamt)  
 [www.instagram.com/umweltbundesamt/](https://www.instagram.com/umweltbundesamt/)