



## **Carbon Capture and Utilization (CCU): Klimapolitische Einordnung und innovationspolitische Bewertung**

Raffaele Piria, Henriette Naims, Dr. Ana Maria Lorente Lafuente

Alle Rechte vorbehalten. Die durch adelphi und IASS erstellten Inhalte des Werkes und das Werk selbst unterliegen dem deutschen Urheberrecht. Beiträge Dritter sind als solche gekennzeichnet. Die Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und jede Art der Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtes bedürfen der schriftlichen Zustimmung der Autoren. Die Vervielfältigung von Teilen des Werkes ist nur zulässig, wenn die Quelle genannt wird.

### **Zitiervorschlag**

Piria R., H. Naims, A. M. Lorente Lafuente (2016): Carbon Capture and Utilization (CCU): Klimapolitische Einordnung und innovationspolitische Bewertung. Berlin / Potsdam: adelphi, IASS.

### **Impressum**

Herausgeber: adelphi  
Alt-Moabit 91  
10559 Berlin

Autoren: Raffaele Piria, Henriette Naims, Dr. Ana Maria Lorente Lafuente

Bildnachweis: Titel: Kobets Dmitry / shutterstock.com

Stand: 31. Mai 2016

Ein Teil der diesem Bericht zu Grunde liegenden Forschungsvorhaben wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

## adelphi

adelphi ist eine unabhängige Denkfabrik und führende Beratungseinrichtung für Klima, Umwelt und Entwicklung. Unser Auftrag ist die Stärkung von Global Governance durch Forschung, Beratung und Dialog. Wir bieten Regierungen, internationalen Organisationen, Unternehmen und zivilgesellschaftlichen Akteuren maßgeschneiderte Lösungen für nachhaltige Entwicklung und unterstützen sie dabei, globalen Herausforderungen wirkungsvoll zu begegnen.

Unsere mehr als 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter leisten hochqualifizierte, interdisziplinäre Forschungsarbeit und bieten strategische Politikanalysen und -beratung sowie Beratungen für Unternehmen an. Wir ermöglichen politischen Dialog und führen weltweit Trainingsmaßnahmen für öffentliche Einrichtungen und Unternehmen durch, um sie beim Erwerb von Kompetenzen zur Bewältigung des transformativen Wandels zu unterstützen. Seit 2001 haben wir weltweit mehr als 800 Projekte in den folgenden thematischen Bereichen implementiert: Klima, Energie, Ressourcen, Green Economy, Sustainable Business, Green Finance, Frieden und Sicherheit, Internationale Zusammenarbeit und Urbane Transformation.

Partnerschaften sind ein zentraler Schlüssel unserer Arbeit. Durch Kooperationen mit Spezialisten und Partnerorganisationen stärken wir Global Governance und fördern transformativen Wandel, nachhaltiges Ressourcenmanagement und Resilienz.

## Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS)

Das von den Forschungsministerien des Bundes und des Landes Brandenburg geförderte Institut hat das Ziel, Entwicklungspfade für die globale Transformation zu einer nachhaltigen Gesellschaft aufzuzeigen. Das IASS folgt einem transdisziplinären, dialogorientierten Ansatz zur gemeinsamen Entwicklung des Problemverständnisses und von Lösungsoptionen in Kooperation zwischen den Wissenschaften, Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Ein starkes nationales und internationales Partnernetzwerk unterstützt die Arbeit des Instituts. Zentrale Forschungsthemen sind u.a. die Energiewende, aufkommende Technologien, Klimawandel, Luftqualität, systemische Risiken, Governance und Partizipation sowie Kulturen der Transformation.

# Inhalt

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Einleitung und Fragestellung</b>	<b>1</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>1 Einführung zum Technologiefeld CCU</b>	<b>4</b>
<b>2 Klimapolitische Einordnung von CCU</b>	<b>7</b>
2.1 Einführende Bemerkungen	7
2.1.1 Notwendigkeit einer dynamischen Betrachtung	7
2.1.2 Einfluss der klimapolitischen Annahmen	8
2.2 CO <sub>2</sub> -Abscheidung und CO <sub>2</sub> -Quellen	10
2.2.1 Gemeinsamkeit zwischen CCU und CCS	10
2.2.2 Status Quo und Ausblick zur CO <sub>2</sub> -Abscheidung	11
2.2.3 Ökologische Aspekte der CO <sub>2</sub> -Abscheidung	12
2.2.4 CO <sub>2</sub> -Abscheidung: Eine dynamische Betrachtung	14
2.3 CO <sub>2</sub> -Nutzung	15
2.3.1 Unterschied zwischen CCU und CCS	15
2.3.2 Status Quo und Ausblick zur CO <sub>2</sub> -Nutzung	16
2.3.3 Ökologische Aspekte der CO <sub>2</sub> -Nutzung	17
2.3.4 CO <sub>2</sub> -Nutzung: Eine dynamische Betrachtung	18
2.4 Fazit: die Rolle von CCU in einer Nachhaltigkeitsstrategie	22
2.4.1 CO <sub>2</sub> -Quellen und CO <sub>2</sub> -Abscheidung	22
2.4.2 CO <sub>2</sub> -Nutzung	23
<b>3 Innovationspolitische Schlussfolgerungen</b>	<b>26</b>
<b>Referenzen</b>	<b>28</b>

## Abkürzungsverzeichnis

BtG / BtL	Biomass to Gas / Biomass to Liquid
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
EE	Erneuerbare Energien
EOR	Enhanced Oil Recovery
IF/NER450	Innovation Fund im ETS-4
HBV	Haber-Bosch-Verfahren
LCA	Life Cycle Assessment
PtC	Power to Chemicals
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquid
PtX	Power to X
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
UBA	Umweltbundesamt
V4+2	Visegrád Group (Polen, Slowakei, Ungarn, Tschechische Republik plus Rumänien und Bulgarien)

## Einleitung und Fragestellung

In einer gemeinsamen Stellungnahme zur Novellierung der ETS-Richtlinie haben sich im Oktober 2015 sechs osteuropäische EU-Mitgliedstaaten (V4+2: BLG, CZE, HUN, PLN, RUM, SVK) für eine Förderung von Carbon Capture and Utilization (CCU) im Rahmen des Innovation Funds (IF/NER450), und darüber hinaus, eingesetzt:

*“We support the extension of the scope [of IF/NER450] by way of including the low-carbon innovation in industry. We thus welcome that for example Carbon Capture and Utilization (CCU) technologies, which can help secure global level playing field for the European energy intensive industry, can become eligible [for IF/NER450] as well. We are ready to discuss further means for support of CCU”.*  
(V4+2 2015).

Auch in den laufenden Beratungen über das IF/NER450 im Europäischen Parlament wird unter anderem über die Rolle von CCU diskutiert. Dieser Prozess wirft grundsätzliche Fragen über die klimapolitische Einordnung von CCU und über die Rolle von CCU im Rahmen einer ökologisch orientierten Innovationspolitik auf. Der vorliegende Bericht trägt zu dieser Debatte bei, indem es für ein umweltpolitisch gebildetes Publikum ohne Vorkenntnisse über die CCU-Verfahren folgende Kernfragen aufarbeitet:

- Wie ist CCU klima- und umweltpolitisch grundsätzlich einzuordnen?
- Welche CO<sub>2</sub>-Mengen aus welchen Quellen werden derzeit in der Industrie verwendet? Ist ein Zusatzbedarf an CO<sub>2</sub> in Deutschland, Europa oder weltweit absehbar? Für welche konkreten Prozesse oder Anwendungen wäre CO<sub>2</sub> als Rohstoff nützlich?
- Welche allgemeinen Schlussfolgerungen lassen sich über die Bewertung von CCU aus Sicht einer ökologisch orientierten Innovationspolitik ziehen?

Das vorliegende Diskussionspapier wurde von Raffaele Piria (adelphi) im Rahmen des Vorhabens „Analyse und Weiterentwicklung der europäischen Klima- und Energiepolitik aus der Perspektive von Energieeffizienz, Energieinfrastruktur und Finanzierungsmechanismen“ im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt. Durch die Einbeziehung der IASS-Wissenschaftlerinnen Henriette Naims und Dr. Ana Maria Lorente Lafuente wurde die Expertise aus dem Forschungsprojekt „CO<sub>2</sub> als Wertstoff – Potenziale und Herausforderungen für die Gesellschaft“ in das Papier miteingebracht. In diesem Projekt werden seit 2013 gesellschaftliche Aspekte von CCU-Technologien mit einem inter- und transdisziplinären Ansatz erforscht und für eine Beratung von Politik und Zivilgesellschaft aufbereitet.

Die Autoren danken herzlich Ing. Reinhard Herbener und Dr. Katja Purr vom Umweltbundesamt für ihre sehr wertvollen Kommentare. Unser Dank gilt auch Paola Adriázola und Dr. Mara Bürchner von adelphi für ihren Beitrag zu einem ersten Entwurf dieses Diskussionspapiers. Die Verantwortung für den Inhalt sowie alle eventuelle Fehler oder Unterlassungen liegt ausschließlich bei den Autoren.

## Zusammenfassung

Die klima- und innovationspolitische Einordnung von CCU erfordert eine langfristige Perspektive. Als Referenzszenario wurde hier die langfristige Nachhaltigkeitsvision des UBA gewählt. Als qualitativen Vergleichsmaßstab entwirft diese Studie Eckpunkte einer weniger optimistischen Vision (Tabellen 1 und 3).

CCU ist ein integraler Bestandteil der langfristigen Nachhaltigkeitsvision des UBA. CCU-basierte PtG/PtL-Energieträger sind eine langfristig notwendige Voraussetzung für die Absicherung der Gesamtenergieversorgung, für die Kohlenstoffversorgung einiger Bereiche der chemischen Industrie und für den Luft- und Seeschiffsverkehr sowie wahrscheinlich auch teilweise für den LKW-Fernverkehr. Weitere CCU-Anwendungsoptionen sind in der Nahrungsmittel-, Baustoff-, Kunststoff-, und Pharmaindustrie zu finden<sup>1</sup>.

In den meisten Anwendungen wird das CO<sub>2</sub> am Ende des Lebenszyklus des Produkts, z.B. bei der Verbrennung, wieder freigesetzt. Die Bindung von CO<sub>2</sub> im Produkt ist somit nicht dauerhaft. Nur in bestimmten Fällen, wie der Herstellung von zementähnlichen Baumaterialien, kann die Speicherung des CO<sub>2</sub> als permanent bewertet werden. Der größte Teil der derzeitigen und mittelfristig absehbaren CO<sub>2</sub>-Nutzung weist jedoch eine sehr kurze CO<sub>2</sub>-Bindungszeit von Monaten oder maximal wenigen Jahren auf (Aresta 2013, CLCF 2011, Purr 2016). Auch bei Verwirklichung der in längerfristigen Nachhaltigkeitsszenarien (UBA 2014) unterstellten breiten Anwendung von CCU-basierten Energieträgern bliebe die Bindungszeit sehr kurz, denn ein Großteil des CO<sub>2</sub> würde zur Erstellung von synthetischen Kraftstoffen verwendet, die eine kurze Bindungszeit aufweisen.

CCU kann dennoch wichtige Klimaschutzpotenziale bergen. Diese stammen oft aus energetischen Effizienzsteigerungen bzw. einer Substitution fossiler Rohstoffe, die sonst für die Herstellung der gleichen Produkte extrahiert und verbrannt werden würden.

Eine breite Anwendung von CCU kann sich jedoch erst in Jahrzehnten entwickeln. Zudem ist der breite Einsatz CCU-basierter Energieträger ökologisch nicht sinnvoll, solange die Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung hoch sind, weil sowohl die Gewinnung als auch die Umwandlung von CO<sub>2</sub> sehr energieaufwendig sind. Im Vordergrund steht in den nächsten 20 Jahren die Technologieentwicklung, sowohl für die wettbewerbsfähige Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus nachhaltigen Quellen, als auch für die effiziente CO<sub>2</sub>-Nutzung, damit große Mengen fossiler Rohstoffe ersetzt werden können und die Dekarbonisierung der Industrie voranschreitet.

Deshalb ist die Förderung relevanter CCU-Technologien innovationspolitisch, zum Beispiel im Rahmen von Förderprogrammen wie dem IF/NER450, sinnvoll und wünschenswert. Es muss allerdings so weit wie möglich vermieden werden, dass die CCU-Förderung unerwünschte Nebenwirkungen oder Lock-In-Effekte zugunsten fossiler Energieerzeugung oder Produktionsverfahren mit sich bringt. Es muss zudem vermieden werden, dass die

<sup>1</sup> Eine Übersicht über Forschungsaktivitäten in der EU gibt die Website der Smart Specialisation Plattform: <http://s3platform.jrc.ec.europa.eu/carbon-capture-and-utilization>

CCU-Förderung die Fördermittel und die privaten Innovationsinvestitionen für andere wichtige Technologien in den Bereichen Industrieprozesse und erneuerbare Energien ungebührlich einschränkt.

Zu den CCU-bezogenen No-Regret-Optionen, die im Rahmen eines Technologiedemonstrationsprogramms gefördert werden sollten, gehören diejenigen, die künftig einen messbaren Umweltnutzen erzielen können, d.h. die eine positive Ökobilanz im Vergleich zu den existierenden Alternativen vorweisen (siehe Abschnitt 2.3.3). Vorzuziehen sind insbesondere:

- Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus klimaneutralen und daher konzeptionell nachhaltigen Quellen (nachhaltig nachwachsende Biomasse, erneuerbar erzeugtes PtX, Atmosphäre) sowie aus prozessbedingten unvermeidbaren Industrieemissionen;
- Erneuerbar erzeugte Power to X (PtG/PtL/PtC);
- Eine Nutzung von CO<sub>2</sub> in Produkten mit sehr langer CO<sub>2</sub>-Bindungszeit (z.B. neuartige Baumaterialien).

# 1 Einführung zum Technologiefeld CCU

Carbon Capture and Utilization (CCU) Verfahren zielen darauf ab, emittiertes Kohlenstoffdioxid wieder einzufangen und dann für eine wirtschaftliche Anwendung nützlich zu machen. Bereits seit Mitte des 19. Jahrhunderts existieren spezielle Verfahren, in denen CO<sub>2</sub> industriell genutzt wird (Aresta, Dibenedetto & Angelini 2013). Diese Anwendungen sind jedoch rein technisch und wirtschaftlich begründet. Seit vielen Jahrzehnten sucht die chemische Forschung nun nach neuen interessanten Katalyseverfahren, die eine effiziente Nutzung von CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle für weitere Produkte und Anwendungen ermöglichen, also keine zusätzliche Energie benötigen sondern zu Einsparungen führen. Dahinter steht die Idee, natürliche Prozesse wie die Photosynthese, in denen CO<sub>2</sub> in einen Kreislauf eingebunden ist, zu imitieren.

Um emittiertes CO<sub>2</sub> zu nutzen, muss dieses zunächst durch sog. Abscheidungstechnologien (*capture technologies*) eingefangen werden. Als unmittelbar verfügbare CO<sub>2</sub>-Quellen kommen dabei industrielle Anlagen und Kraftwerke in Frage, die CO<sub>2</sub> in höherer Konzentration emittieren. Darüber hinaus ist es möglich CO<sub>2</sub> auch biologisch (z.B. durch Algen) oder mittels sog. künstlicher Bäume aus der Atmosphäre einzufangen. Die Technologien zur Abscheidung befinden sich heute zum Teil schon in einer industriellen Anwendung. Parallel werden neue Verfahren entwickelt, die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden (de Coninck & Benson 2014). Allerdings gibt es momentan keine ökonomischen Anreize für einen breiten Einsatz von CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien. Darüber hinaus führt die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nicht zwingendermaßen zu einem ökologischen Vorteil.

Die wirtschaftlichen Anwendungen von CO<sub>2</sub> können in drei Kategorien unterteilt werden: physikalische Nutzung, stoffliche Nutzung und Nutzung als Energieträger. In der sog. *physikalischen Nutzung* wird CO<sub>2</sub> als Flüssigkeit oder Gas direkt genutzt, z.B. in karbonisierten Getränken oder Lebensmittelverpackungen. Neben diesen herkömmlichen Anwendungen werden derzeit neue direkte Einsatzgebiete von CO<sub>2</sub> erprobt, z.B. als Kühlmittel in Kfz-Klimaanlagen durch die Automobilbranche<sup>2</sup> oder auch CO<sub>2</sub> als Reinigungsmittel in Trocken-Waschmaschinen<sup>3</sup>. Durch den Einsatz von CO<sub>2</sub> in diesen neuen Anwendungen kann potenziell auf teilweise sehr treibhausgasintensive Stoffe und Chemikalien mit größeren Klima- und Umweltauswirkungen verzichtet werden.

In der *stofflichen Nutzung* wird CO<sub>2</sub> als chemischer Baustein für kohlenstoffbasierte Chemikalien oder Materialien verwendet. Mögliche Produkte sind verschiedene Basischemikalien und Kunststoffe. Erste Kunststoffprodukte werden derzeit von den Firmen Covestro in Deutschland, Novomer in den USA und Evonik in Großbritannien demonstriert, viele weitere mögliche Grundchemikalien und Materialien befinden sich noch in einem früheren Entwicklungsstadium oder müssen ihre Wirtschaftlichkeit noch verbessern. Auch

<sup>2</sup> Eine Debatte über den breiten Einsatz von CO<sub>2</sub> in Kfz-Klimaanlagen findet gerade auf Ebene der Europäischen Union statt, vgl. Kilimann (2015).

<sup>3</sup> Vgl. Madsen, Normile-Elzinga & Kinsman (2014).

hier kann CO<sub>2</sub> potenziell traditionelle und insbesondere fossile Kohlenstoffquellen ersetzen, wenn ein effizienter Syntheseprozess gefunden werden kann und der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für die gesamte Prozesskette eine Verbesserung aufzeigt. Im Bereich der stofflichen Nutzung sind bedeutende technologische Innovationen denkbar, die durch Substitution von treibhausgasintensiven Verfahren ein potenziell relevantes Klimaschutzpotenzial haben.

Aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten betrachten auch die Mineralisierung von CO<sub>2</sub> als Option für seine dauerhafte Bindung und Lagerung (Matter et al. 2016). Neben dieser CCS-Funktion bestehen auch mögliche Anwendungen, die zur Kategorie CCU gehören, da sie eine wirtschaftliche Nutzung beinhalten, wie zum Beispiel die Technologien der Start-Ups Carbon8 in Großbritannien und Reconval in Belgien. Auch hier wird an zahlreichen Forschungsinstituten nach weiteren sinnvollen Anwendungen gesucht. So können potenziell z.B. größere Mengen Emissionen aus industriellen Prozessen über Industrieabfälle (Flugasche und Abwasser) vermieden werden, indem das mineralisierte CO<sub>2</sub> sinnvoll in der Bauindustrie genutzt wird (Pan, Lorente Lafuente & Chiang 2016).

Für die Nutzung als *Energieträger* wird CO<sub>2</sub> kombiniert mit Wasserstoff zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen verwendet (siehe Abb. 2). Hierfür sind große Mengen Wasserstoff notwendig, welcher in energieintensiven Prozessen (aus fossiler Energie oder regenerativ durch die sehr stromintensive Elektrolyse) gewonnen wird. Deswegen werden diese Verfahren oft auch mit den Kürzeln PtG (Power-to-Gas, zum Beispiel wenn das Produkt synthetisches Methan ist), PtL (Power-to-Liquid, wenn die Endprodukte flüssige Kraftstoffe sind), PtC (Power-to-Chemicals, wenn die Energie in Chemikalien gespeichert wird) oder generisch PtX (Power-to-X) benannt. Wegen ihrer Stromintensität könnten diese Verfahren nur dann als klimaschonend erachtet werden, wenn die Dekarbonisierung des Stromsektors deutlich weiter fortgeschritten ist. Erste PtX-Demonstrationsanlagen gibt es heute in Europa zum Beispiel bereits von den Firmen Carbon Recycling International in Island (Power-to-Methanol), Audi (Power-to-Gas) und Sunfire (Power-to-Diesel) in Deutschland. Weltweit arbeitet eine Vielzahl an Forschungskonsortien an der Weiterentwicklung dieser Bandbreite an Technologien.<sup>4</sup>

Abbildung 1 gibt eine qualitative Übersicht über die möglichen Wege der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung.

<sup>4</sup> In Deutschland wird die technische Forschung in diesem Bereich zukünftig durch das BMBF-Kopernikus-Projekt zu PtX vorangetrieben.

**Abbildung 1: Mögliche Wege der CO<sub>2</sub>- Abscheidung und Nutzung**



Quelle: Olfe-Kräutlein et al. (2014)

## 2 Klimapolitische Einordnung von CCU

---

### 2.1 Einführende Bemerkungen

---

Die klimapolitische und gesamte ökologische Einordnung von CCU erfordert die Berücksichtigung mehrerer Effekte:

- Die unmittelbaren Auswirkungen der CO<sub>2</sub>-Abscheidungsprozesse und der CO<sub>2</sub>-Verwendungsprozesse;
- Die Substitutionseffekte durch die Verwendung von CCU-basierten Produkten;
- Die Dauer der CO<sub>2</sub>-Bindung in den CCU-basierten Produkten;
- Die möglichen transformationshemmenden Lock-In-Effekte: CO<sub>2</sub>-emittierende Aktivitäten könnten durch die von den Nutzungsverfahren bedingte CO<sub>2</sub>-Nachfrage wirtschaftlich und politisch verfestigt werden.

Zudem ist im Rahmen einer langfristig orientierten Innovationspolitik eine statische Betrachtung unter den heutigen Bedingungen nicht hinreichend. Vielmehr müssen die verschiedenen Effekte dynamisch im Hinblick auf die mögliche Entwicklung des klimapolitischen Kontexts betrachtet werden.

In den nächsten zwei Abschnitten wird das analytische Konzept für die dynamische Betrachtung beschrieben. Die folgenden Kapiteln widmen sich den zwei Elementen des Technologiefelds CCU: der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und den -Quellen (vgl. Kapitel 2.2.) sowie der CO<sub>2</sub>-Nutzung (vgl. Kapitel 2.3.). In diesen werden jeweils die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen CCU und CCS diskutiert, der Status Quo und Ausblick beschrieben, und die ökologischen Aspekte auch unter einer dynamischen Betrachtung analysiert. Darauf aufbauend werden im Kapitel 2.4 Schlussfolgerungen zur Rolle von CCU in einer Nachhaltigkeitsstrategie gezogen, auf deren Grundlage im Kapitel 3 Empfehlungen zur innovationspolitischen Handhabung von CCU entworfen werden.

#### 2.1.1 Notwendigkeit einer dynamischen Betrachtung

Eine klima- und umweltpolitische Einordnung von CCU kann als erste Annäherung statisch erfolgen, d.h. in Bezug auf die derzeitigen Bedingungen. In diesem Fall sind viele Parameter bekannt, z.B. die CO<sub>2</sub>-Intensität des Strommixes, oder können zumindest gut eingeschätzt werden, wie z.B. die Dauerhaftigkeit der Bindung des CO<sub>2</sub> in bestimmten Produkten. Aber eine statische Betrachtung ist kein hinreichender Blickwinkel für die Bewertung eines Technologiefelds wie CCU, dessen möglicher klimapolitischer Wert sich vor allem langfristig verwirklichen könnte.

Für eine sinnvolle innovationspolitische Bewertung ist deswegen eine dynamische Betrachtung notwendig. Vor allem die systemischen Effekte in Hinblick auf eine langfristige (bis 2050 und darüber hinaus) Nachhaltigkeitsstrategie müssen folglich berücksichtigt

werden. Damit wird die umweltpolitische Einordnung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung wesentlich komplexer und streitbarer. Die wesentlichen grundlegenden Fragen zur langfristigen Perspektive lauten:

- Aus welchen Quellen, und mit welchen Technologien und Auswirkungen, könnte künftig das CO<sub>2</sub> gewonnen werden?
- In welchen Produkten, mit welchen Verfahren und Substitutionseffekten könnte das CO<sub>2</sub> genutzt werden? Wie langfristig bliebe das CO<sub>2</sub> gebunden?
- Mit welchen Wirtschaftskreisläufen und Umweltfolgen würde dies geschehen?

Die Beantwortung dieser Fragen setzt den Vergleich mit alternativen Perspektiven ohne oder mit weniger CCU voraus. Die Bewertung bedarf zahlreicher Annahmen über langfristige Zukunftspfade in heterogenen Bereichen wie der Stromerzeugung und der Verkehrsinfrastruktur, der Materialforschung und der technologischen Entwicklung unterschiedlicher Industriebranchen sowie nicht zuletzt dem Erfolgsniveau der Klima- und Umweltpolitik. Angesichts dieser Komplexität kann hier insgesamt nur eine skizzenhafte Einordnung erfolgen, die sich im Wesentlichen auf die Nachhaltigkeitsstrategie des deutschen Umweltbundesamts (UBA 2014, UBA 2015, ggf. UBA 2016, Herbener 2016, Purr 2016) stützt.

### **2.1.2 Einfluss der klimapolitischen Annahmen**

Den größten Einfluss auf die Einordnung und Bewertung haben die Annahmen über die Weiterentwicklung des Klimaschutzes und der Klimapolitik. Dies zeichnet sich in der qualitativen Gegenüberstellung zweier gegensätzlicher Zukunftsvisionen ab. Als Referenz für die „optimistische Zukunftsvision“ greift dieses Diskussionspapier auf die Analysen und Szenarien des Umweltbundesamtes in den einschlägigen Veröffentlichungen „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2014) und „Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung“ (UBA 2015) zurück.

Diese Referenzen wurden vor allem aus drei Gründen gewählt. Erstens beschreiben sie umfassend und detailliert, wie eine hochentwickelte Industriegesellschaft wie Deutschland ohne wesentliche Wohlstandsverluste treibhausgasneutral gestaltet werden könnte. Dabei werden auch weitere, nicht klimabezogene Nachhaltigkeitsprinzipien berücksichtigt. Zweitens ist es in dieser vom BMUB beauftragten Studie naheliegend, auf die durch die nachgeordnete Behörde UBA detailliert ausgearbeitete Nachhaltigkeitsvision zurückzugreifen. Drittens ist die UBA-Vision für 2050 sehr ambitioniert und rigoros und daher gut geeignet in einem Vergleich als optimistischer Pol betrachtet zu werden.

Die genannten UBA-Studien illustrieren, dass ein klimaneutrales Deutschland technisch machbar ist und wie es aussehen könnte. Sie enthalten jedoch keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit dieser Entwicklung. Als qualitativer Vergleichsmaßstab entwirft die vorliegende Studie (siehe Tabellen 1 und 3) eine weniger optimistische Zukunftsvision. Eine

vergleichende Analyse weiterer langfristiger Nachhaltigkeitsvisionen aus der Literatur ging über den Rahmen der vorliegenden Studie hinaus.<sup>5</sup> Die „pessimistische Vision“ wird hier rein qualitativ als Gegenpol skizziert, der gleichzeitig auch als eine Etappe in einem deutlich langsameren Transformationsprozess, oder als Darstellung des Transformationsstands in anderen Ländern und Kontinenten interpretiert werden kann.

Wie weiter unten dargestellt, könnte der klimapolitische Wert von CCU in diesen zwei Szenarien sehr unterschiedlich sein. Neben anderen Faktoren hängt die klimapolitische Bewertung von CCU wesentlich davon ab, ob man von mehr oder weniger optimistischen Annahmen über die Entwicklung des Klimaschutzes in den nächsten Jahrzehnten ausgeht. Diese Annahmen wirken sich nicht nur auf die grundsätzliche Bewertung der Vor- und Nachteile von CCU aus, sondern auch auf die Priorisierung der geeigneten CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien bzw. der zu entwickelnden Industrieverfahren, die in innovationspolitischen Programmen wie IF/NER450 gefördert werden könnten.

**Tabelle 1: Klimapolitische Annahmen bestimmen Schlüsselparameter**

	Optimistische Zukunftsvision 2050	Pessimistische Zukunftsvision 2050 (oder Transformationsetappe)
Stromversorgung	Keine fossile Erzeugung; geringe Mengen PtG-Methan als Back-Up.	Beträchtliche EE-Anteile, aber weiterhin auch starke Kohleverstromung.
CO <sub>2</sub> -Emissionsintensität der Industrieprozesse	Energiebedingte vollständig reduziert; prozessbedingte erheblich reduziert.	Wenig reduziert
Straßenverkehr	Erheblich reduziert, weitgehend elektrifiziert.	Weiter gewachsen, geringfügig elektrifiziert.
Flug- und Schiffverkehr	Erfolg der Weltklimapolitik: weitgehend auf sehr CO <sub>2</sub> -arme Treibstoffe umgestellt (PtG/PtL).	Weiterhin Versagen der Weltklimapolitik: kaum wirksame Regulierung dieser Sektoren.

Quelle: Eigene Darstellung, angelehnt an (UBA 2014).

<sup>5</sup> In den ambitionierten Klimaszenarien des IPCC werden im Gegensatz zur UBA-Vision andere technologische Veränderungen angenommen. So setzen die IPCC Szenarien neben einer signifikanten Steigerung der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien auch auf Atomenergie, die fossile Energieerzeugung sowie Biomasse kombiniert mit CCS. CCU spielt in diesen keine explizite Rolle, vgl. IPCC (2013).

---

## 2.3 CO<sub>2</sub>-Abscheidung und CO<sub>2</sub>-Quellen

---

### 2.3.1 Gemeinsamkeit zwischen CCU und CCS

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung ist die technologische Gemeinsamkeit der Konzepte CCU und CCS. Daher müssen bei der klimapolitischen Einordnung von CCU auch Erkenntnisse aus der CCS-Debatte berücksichtigt werden. Diese werden hier durch Stellungnahmen des Umweltbundesamtes (UBA) und des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) zusammengefasst:

„Die Speicherung von CO<sub>2</sub> im Untergrund stellt keine nachhaltige Klimaschutzmaßnahme dar. Allerdings ist die weitere Erforschung und Erprobung der CCS-Technologie dennoch sinnvoll, falls sich nachhaltige Klimaschutzmaßnahmen nicht als hinreichend erweisen. Sinnvoll könnte unter dieser Voraussetzung vor allem der Einsatz der CCS-Technologie in Bezug auf die nicht vermeidbaren Emissionen aus der Industrie sowie in Verbindung mit Biomasse sein.“ (UBA 2013)

Ein Hauptgrund der kritischen Haltung des UBAs gegenüber CCS sind Bedenken hinsichtlich der unterirdischen CO<sub>2</sub>-Speicherung: Auswirkungen auf Grundwasser und Boden, Austrittsrisiken, Nutzungskonkurrenzen bei den beschränkt verfügbaren Lagerstätten. Diese Bedenken sind für CCU nicht relevant, denn bei CCU wird CO<sub>2</sub> nicht unterirdisch gespeichert.<sup>6</sup>

Ein weiteres zentrales Argument gegen CCS, das sich auf die Abscheidung bezieht und daher hingegen potenziell auch auf CCU übertragen werden kann, sind die potenziellen Lock-In-Effekte (SRU 2011, SRU 2015). Unabhängig davon, ob das CO<sub>2</sub> eine industrielle Nachfrage deckt oder gespeichert wird, könnte die politisch oder wirtschaftlich erzeugte Nachfrage nach CO<sub>2</sub> einen fortgeführten Betrieb von Kohlekraftwerken oder anderen emissionslastigen Industrieanlagen unterstützen. Genau diese Lock-In-Effekte sind als politischer Treiber der eingangs zitierten Stellungnahme der V4+2 Länder deutlich erkennbar: „... (CCU) technologies, which can help secure global level playing field for the European energy intensive industry (...)“ (V4+2 2015). Die Lock-In-Effekte sind im Hinblick auf die Kohleverstromung besonders problematisch. Denn in diesem Bereich ist ein Ende der Kohlenutzung nicht nur theoretisch denkbar, sondern auch binnen weniger Jahrzehnte konkret umsetzbar, wenn die erneuerbaren Energien konsequent ausgebaut werden.

Wie weiter unten ausführlicher dargestellt, sieht jedoch das UBA (UBA 2014, UBA 2015) langfristig eine bedeutende Rolle für CCU als notwendige Grundlage für die nachhaltige Produktion großer Menge Kohlenwasserstoffe (PtG/PtL) für die Energieversorgung (Kraftstoffe, Wärme, Strom), aber auch für eine nachhaltige Versorgung der Industrie mit regenerativen Rohstoffen.

<sup>6</sup> Für einen detaillierten Vergleich der klimapolitischen Bedeutung von CCU und CCS siehe Bruhn et al. (2016) und House et al. (2009).

Unter Voraussetzung eines langfristig vollständig klimaneutralen Stromsektors ist folglich eine breite Anwendung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus möglichst regenerativen Quellen ein integraler Bestandteil der langfristigen Nachhaltigkeitsvision vom UBA.

### 2.3.2 Status Quo und Ausblick zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Es existiert heute bereits eine Vielzahl an Technologien, die im Stande sind, konzentriertes CO<sub>2</sub> aus industriellen Abgasen aufzufangen, z.B. durch Adsorption, Absorption, kryogene Trennung oder Membrane.<sup>7</sup> Die Wahl der an einer bestimmten CO<sub>2</sub>-emittierenden Quelle einzusetzenden Abscheidungstechnologie hängt von einer Reihe von Faktoren ab, eine entscheidende Rolle spielt dabei jedoch immer die Konzentration von CO<sub>2</sub> im jeweiligen Abgas (de Coninck & Benson 2014). Diese wirkt sich direkt auf den erforderlichen Aufwand aus, das CO<sub>2</sub> einzufangen: Die Abscheidung aus einer Quelle mit einer hohen CO<sub>2</sub>-Konzentration ist deshalb grundsätzlich erstmal mit niedrigeren Kosten und geringeren Umweltauswirkungen verbunden als die Abscheidung aus einer Quelle mit geringer CO<sub>2</sub>-Konzentration. Falls das CO<sub>2</sub> im Abgas durch schädliche Substanzen oder Chemikalien verunreinigt ist, ist darüber hinaus eine Reinigung erforderlich (Aresta & Dibenedetto 2010).

Die Abscheidung ist somit bei solchen Prozessen, die hochreines CO<sub>2</sub> emittieren (d.h. etwas unter oder ganze 100% des Abgases bestehen aus CO<sub>2</sub>), mit einem relativ geringen Aufwand und daher nur geringen zusätzlichen Kosten verbunden. Dies ist der Fall z.B. bei der Ammoniak- und Wasserstoffsynthese, der Aufbereitung von Erdgas aber auch in Fermentierungsprozessen. Diese Prozesse stellen also etablierte Einsatzgebiete von CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien dar (Wilcox 2012). Das häufigste Beispiel der CO<sub>2</sub>-Abscheidung ist die Ammoniaksynthese mit dem derzeit gängigen, fossil-basierten Haber-Bosch-Verfahren (HBV), in welchem große Mengen hochreines CO<sub>2</sub> als Nebenprodukt entstehen. Oft wird dieses CO<sub>2</sub> in einem chemisch und industriell symbiotischen Prozess zur Produktion von Harnstoff benutzt. Allein diese Kombination steht für ungefähr ein Drittel der derzeitigen weltweiten CO<sub>2</sub>-Nutzung (Aresta, Dibenedetto & Angelini 2013, VCI & Dechema 2009). Diese hochkonzentrierten CO<sub>2</sub>-Quellen repräsentieren jedoch insgesamt nur rund 2% aller großen CO<sub>2</sub>-Punktquellen weltweit, sind aber zumindest kurz- bis mittelfristig aus Kostengründen relevanten CO<sub>2</sub>-Lieferanten (Naims 2016).

Ein weiteres mögliches Anwendungsgebiet für Abscheidungstechnologien stellen fossile Kraftwerke und große Industrieanlagen dar. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in deren Abgasen variiert deutlich und liegt z.B. bei rund 12-15% in Kohlekraftwerken, 14-33% in der Zementindustrie, 15% in der Eisen- und Stahlproduktion und 20% in der Abfallverbrennung (Wilcox 2012). Eine Abscheidung von CO<sub>2</sub> ist somit aufwendiger und mit deutlich variierenden Effizienzeinbußen verbunden, bei fossilen Kraftwerken liegen diese bei ca. 10-30% der hergestellten Energie<sup>8</sup> (de Coninck & Benson 2014). Grundsätzlich ist der Abscheidungsaufwand pro Tonne außerdem an kleineren Anlagen größer, da bei großen

<sup>7</sup> Für einen detaillierten Überblick über den Stand der Technik siehe z.B. Wilcox (2012); de Coninck & Benson (2014).

<sup>8</sup> Diese Einschätzung bezieht sich ausschließlich auf die CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Im Fall von CCS ist ein zusätzlicher Energieverbrauch durch Verdichtung, Transport und Injizieren des CO<sub>2</sub> in die unterirdische Lagerstätte notwendig. Eine zukunftsorientierte Studie, die vor einigen Jahren unter Berücksichtigung der thermodynamischen Grenzen und des zu erwartenden technologischen Fortschritts die Literatur verglich und bewertete, schätzte die „energy penalty“ von CCS auf 29% bis 33% ein (House et al. 2009).

Anlagen einfacher Skaleneffekte erreicht werden können. Da in vielen Verfahren CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr als eine Ursache haben, erhöht sich zum Teil auch der Aufwand, wenn hohe Abscheidungsraten von rund 95% der Emissionen erreicht werden sollen. Fossile Kraftwerke stellen derzeit rund 76% der abscheidbaren Emissionen aus den größten CO<sub>2</sub>-Punktquellen dar und größere industrielle Anlagen rund 22% (Naims 2016).

Um noch bessere und insb. effizientere Abscheidungstechnologien zu entwickeln ist weitere Forschung notwendig. Auch an einer effizienten Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Luft wird weiterhin gearbeitet. Trotz der im Vergleich geringen Konzentration von 0,04% CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre und dem damit verbundenen hohen erforderlichen Abscheidungsaufwand im Vergleich zu Punktquellen stellt die Luft vor allem langfristig eine interessante Quelle dar, die zu sog. „negativen Emissionen“ führen könnte.

Zudem existiert ein Markt für Anlagen, die Ölprodukte sowie Erdgas ausschließlich mit dem Zweck verbrennen, CO<sub>2</sub> zu produzieren<sup>9</sup>. Diese Angebote wenden sich an Firmen, die den Eigenbedarf an CO<sub>2</sub> lieber selbstständig decken möchten, als sich auf die Lieferung von CO<sub>2</sub> zu verlassen, das als Abfallprodukt in Raffinerien oder Chemieindustrien entsteht. Zu den häufig verwendeten Verkaufsargumenten für solche Anlagen gehören die Vermeidung von Versorgungsengpässen, die CO<sub>2</sub>-Transportkosten sowie die direkte Kontrolle über die Qualität des CO<sub>2</sub>. Es wird geschätzt, dass die absichtliche CO<sub>2</sub>-Herstellung einen sehr geringen Anteil der weltweiten CO<sub>2</sub>-Nachfrage deckt.<sup>10</sup> Derartige Anlagen scheinen eher in Spezialfällen wirtschaftlich zu sein, in denen in geographischer Reichweite keine kostengünstigere CO<sub>2</sub>-Versorgung, z.B. aus einer Ammoniakanlage möglich scheint.

### 2.3.3 Ökologische Aspekte der CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Für die Einschätzung der direkten Umweltfolgen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung spielt eine wichtige Rolle, ob dabei ohnehin emittiertes CO<sub>2</sub> verwendet wird, oder CO<sub>2</sub>, das nur für diesen Zweck aus natürlichen Quellen extrahiert bzw. in einer Verbrennung fossiler Rohstoffe hergestellt wurde. In diesen Fällen wird also kein „Abgas“ aus einem bestehenden Prozess verwendet bzw. „recycelt“, sondern Kohlenstoff aus der Erde extrahiert und der Atmosphäre als eine Nettoemission hinzugefügt.

Schon in einer statischen Betrachtung der unmittelbaren ökologischen Folgen eines CO<sub>2</sub>-Abscheidungsprozesses ohne Berücksichtigung der vorhergehenden und nachgelagerten Schritte zeigt sich je nach Quelle, Verfahren und Kontext eine Breite an Auswirkungen, die von vernachlässigbar bis sehr erheblich schwanken. So hat eine aktuelle Life Cycle Assessment (LCA) basierte, ökologische Bewertung verschiedener CO<sub>2</sub>-Quellen und -Abscheidungstechnologien ergeben, dass in der aktuellen Industrielandschaft spezielle Verfahren (z.B. die Wasserstoff- und Ammoniaksynthese) eine Abscheidung von CO<sub>2</sub> mit dem vergleichsweise geringsten zusätzlichen Fußabdruck ermöglichen (von der Assen et al.

<sup>9</sup> Beispielsweise seien hier die Angebote der Firmen Asco Carbon Dioxide Ltd und COMTECSWISS in der Schweiz, Tecno Project Industriale in Italien, S S GAS Lab Asia in Indien genannt.

<sup>10</sup> Die absichtliche CO<sub>2</sub>-Herstellung kommt vor allem für die direkte Nutzung, aber nicht für EOR in Frage. Aus Tabelle 2 ist es ersichtlich, dass diese Sektoren mit zirka 17 Mt CO<sub>2</sub> jährlich nur knapp 8% der derzeitigen weltweiten CO<sub>2</sub>-Nutzung ausmachen. Nur ein Teil davon wird absichtlich erstellt. Aufgrund des der im Preis schwankenden, aber dennoch eher teuren Kosten von fossiler Energie, ist CO<sub>2</sub>, das als Abfallprodukt zur Verfügung steht, oft konkurrenzfähig.

2016)<sup>11</sup>. Auch aus ökonomischer Betrachtung ist eine Abscheidung aus Anlagen mit hochkonzentrierten CO<sub>2</sub>-Emissionen (z.B. Biogas, Fermentierung, Ammoniaksynthese) sinnvoller (Naims 2016).

Weil die Ammoniaksynthese heute ohnehin mit dem Haber-Bosch-Verfahren erfolgt, werden manchmal die gesamten Umweltauswirkungen des HBV der Ammoniakproduktion zugewiesen. Somit wird die Gewinnung des Rohstoffs CO<sub>2</sub> für den Nutzer als prinzipiell "ökologisch kostenlos" gezählt, egal wie kurz das CO<sub>2</sub> in dem Produkt Harnstoff<sup>12</sup> oder einem anderen Endprodukt gebunden bleibt. Denn ohne eine Abscheidung und Verwertung gelänge das CO<sub>2</sub> sonst sofort in die Atmosphäre. Jedoch ist diese Ansicht nur vertretbar solange das HBV als alternativloser Prozess gesehen wird. In einer langfristigen dynamischen Betrachtung könnte das Ammoniak jedoch mit alternativen Verfahren CO<sub>2</sub>-neutral produziert werden. Es ist zudem darauf hinzuweisen, dass die weit verbreitete Kombination der Ammoniakproduktion als CO<sub>2</sub>-Liefererant mit der Harnstoffproduktion als CO<sub>2</sub>-Nutzer insgesamt mehr CO<sub>2</sub> emittiert als sie verbraucht, weil zumeist nur ein Teil des beim HBV entstehenden CO<sub>2</sub> verwendet wird (Otto 2015).

Ein wichtiges Beispiel für CO<sub>2</sub>-Abscheidung mit erheblichen unmittelbaren Umweltkosten sind manche derzeit in CCS-Kohlekraftwerken verwendete Waschverfahren. Während die effizientesten Abscheidungstechnologien meistens bereits beim Kraftwerksbau miteingeplant werden müssen (wie z.B. Pre-Combustion Capture oder Oxyfuel-Verfahren), eignet sich die CO<sub>2</sub>-Wäsche (als Post-Combustion Capture) auch für eine Nachrüstung eines Kraftwerks. Bei CO<sub>2</sub>-Abscheidequoten um die 90% steigt der Energie- und daher auch der Kohleverbrauch bei diesen jedoch um bis ein Drittel (de Coninck & Benson 2014). Dementsprechend steigen auch die erheblichen sonstigen, d.h. nicht CO<sub>2</sub>-bezogenen, Umweltauswirkungen der Kohleverstromung.<sup>13</sup>

Eine Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Luft wird derzeit technisch demonstriert<sup>14</sup>, ist aber aus heutiger Sicht sowohl ökologisch als auch ökonomisch aufwendig und unvorteilhaft.

Die ökologische Betrachtung von Abscheidungstechnologien fokussiert sich bisher auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen und auf den Energiebedarf. Es können aber auch weitere spezifische Umweltauswirkungen auftreten. Durch das etablierte Abscheidungsverfahren der Aminwäsche können zum Beispiel geringe Mengen an Luftschadstoffen freigesetzt werden (z.B. Nitramine, Nitrosamine, Aerosole und Ozon), deren Ausmaß und potenzielle Gesundheitsauswirkungen aber noch nicht abschließend erforscht sind. (Dautzenberg & Bruhn 2013). Begleitend zur fortgeführten technischen Forschung, die bereits auch derartige

<sup>11</sup> So errechnet die Studie von von der Assen et al. (2016) bei der Wasserstoff- und Ammoniaksynthese mögliche Reduktionen von 0,94 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne CO<sub>2</sub>-basierten Produkts, während die Abscheidung aus der Luft nur zur Reduktion von 0,54 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne CO<sub>2</sub>-basierten Produkts führen kann. Diese Analysen beinhalten nur den Schritt der Abscheidung ohne die weitere Nutzung des CO<sub>2</sub>.

<sup>12</sup> Die Anwendungsgebiete von Harnstoff sind zahlreich, u.a. wird dieser als Stickstoffdünger, in Kosmetika und für die Reduktion von Stickoxiden im Abgas von Kraftwerken oder Kraftfahrzeugen genutzt. Insb. der Einsatz von Harnstoff als Düngemittel ist mit erheblichen Umweltauswirkungen, wie der Veränderung des natürlichen Stickstoffkreislaufs, verbunden. Die Produktion von Harnstoff auf CO<sub>2</sub>-Basis ist auch nicht ökologisch motiviert sondern entspricht dem technischen Standard.

<sup>13</sup> Neuere Technologien, wie das IGCC-Verfahren (Integrated Gasification Combined Cycle) oder das Oxyfuel-Verfahren (Verbrennung mit reinem Sauerstoff) könnten den für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung erforderlichen zusätzlichen Energieaufwand erheblich reduzieren. Zudem soll damit die CO<sub>2</sub>-Abscheidungsquote weiter erhöht werden. Wenn solche Zielwerte kostengünstig (insbesondere in Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Preis im Emissionshandelssystem) kommerzialisiert werden könnten, hätten CCU und CCS deutlich bessere Chancen, sich durchzusetzen.

<sup>14</sup> Siehe z.B. die Firmen Climeworks in der Schweiz und Carbon Engineering in Kanada.

Effekte versucht zu eliminieren, empfiehlt sich also auch eine weitergehende atmosphärische Modellierung solcher Umweltauswirkungen anhand spezifischer möglicher Standorte.

### 2.3.4 CO<sub>2</sub>-Abscheidung: Eine dynamische Betrachtung

In einer langfristigen Betrachtung muss die Frage der Nachhaltigkeit und insbesondere der Klimaneutralität des gesamten CO<sub>2</sub>-Zyklus gestellt werden. CCU-Verfahren, die CO<sub>2</sub> aus fossilen Quellen verwenden, sind grundsätzlich nicht klimaneutral und somit nicht nachhaltig, es sei denn das CO<sub>2</sub> wird permanent gebunden. Eine permanente Bindung ist jedoch nur bei einem geringen Anteil der möglichen CCU-Anwendungsgebiete möglich.

In seiner strategischen Vision für ein nachhaltiges Deutschland bis 2050 (UBA 2014) lässt das UBA folgende CO<sub>2</sub>-Quellen zu, die in der langfristigen Vision als klimaneutral und daher konzeptionell „nachhaltig“ definiert werden können:

- Die Verbrennung nachhaltig nachwachsender Biomasse (z.B. Biogasanlagen);
- Erneuerbar erzeugte PtX-Kraftstoffe, die in stationären Anlagen verbrannt werden;<sup>15</sup>
- Die Atmosphäre.

Darüber hinaus lässt das UBA in seiner Nachhaltigkeitsvision 2050 die Verwendung von CO<sub>2</sub> aus prozessbedingten Industrieemissionen, vor allem in der Kalk- und Zementindustrie, zu. Dieses CO<sub>2</sub> sei „zwar nicht als treibhausgasneutral zu bewerten, die prozessbedingten Emissionen lassen sich allerdings auch nicht zur Gänze vermeiden, so dass gemäß den Annahmen im Kapitel zur Industrie im Jahr 2050 (in Deutschland) knapp 14 Mt CO<sub>2</sub> aus Industrieprozessen zur Verfügung stehen.“ (UBA 2014, S. 62). Diese 14 Mt CO<sub>2</sub> entsprechen ungefähr 70% der gesamten neuankommenden CO<sub>2</sub>-Menge, die in der UBA-Vision in Deutschland zur Rückgewinnung zur Verfügung stehen könnten.

In einer dynamischen Betrachtung hinsichtlich der dargestellten optimistischen und pessimistischen Zukunftsvisionen des UBA zeigt sich also, dass die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus fossilen Quellen zur Speicherung oder Nutzung prinzipiell nicht nachhaltig ist, sondern sogar mittel- bis langfristig Pfadabhängigkeiten und Lock-In-Effekte schaffen und insbesondere einen notwendigen Ausstieg aus der Kohleverstromung erschweren kann. Darüber hinaus würde damit auch die notwendige Reduzierung der inflexiblen Erzeugungskapazitäten<sup>16</sup> im Stromsystem behindert werden. Derart unerwünschte Lock-In-Effekte können vermieden werden, wenn die öffentliche Förderung der Forschung und Entwicklung von Abscheidungsverfahren sich auf die oben genannten klimaneutralen bzw. konzeptionell nachhaltigen oder unvermeidbaren CO<sub>2</sub>-Quellen fokussiert.

Für die Erreichung der in Paris definierten ambitionierten Klimaschutzziele muss von einem größeren strukturellen Wandel in der Energieerzeugung und Industrie ausgegangen werden

<sup>15</sup> Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung in mobilen, kleinen Anlagen (z.B. in Fahrzeugen) erscheint auch langfristig nicht vorstellbar. CO<sub>2</sub> aus regenerativ erzeugtem PtG-Methan könnte vor allem in größeren Anlagen, also z.B. in Spitzenlastkraftwerken oder Industrieanlagen, abgeschieden werden.

<sup>16</sup> Bis zu einem gewissen Grad ist eine flexible Fahrweise von Kohlekraftwerken mit CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen grundsätzlich denkbar, aber nicht wahrscheinlich. Sie wäre mit einer Reduktion des Emissionsminderungseffekts und/oder mit erheblichen zusätzlichen Kapitalkosten verbunden (Nimtz & Krautz 2013, Domenichini et al. 2013). Dies würde CCS wirtschaftlich noch unattraktiver machen, als es in absehbarer Zeit ohnehin ist. Um solch hohe Kapitalkosten bei tendenziell abnehmenden Volllaststunden zu rechtfertigen, müssten unrealistisch hohe Strom- und CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise angenommen werden.

und die Bedeutung der klimaneutralen CO<sub>2</sub>-Quellen könnte somit mittel- bis langfristig steigen. Bei der Bewertung der Frage, welche Quellen für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung langfristig relevant sein werden, spielen daher die grundsätzlichen klimapolitischen Annahmen eine besonders wichtige Rolle.

Bei einer optimistischen Vision (siehe Tabellen 1 und 3) ist bis 2050 die Kohleverbrennung für Stromerzeugung vollständig abgeschafft, und in Industrieprozessen sind die prozessbedingten Emissionen nahezu vollständig durch Umstellung der Verfahrenstechnik reduziert. CO<sub>2</sub> kann dann nur noch aus klimaneutralen und aus den unvermeidbaren Quellen abgeschieden werden. Für die Ammoniaksynthese werden in langfristigen Nachhaltigkeitsvisionen (UBA 2014) alternative Verfahren angenommen, in denen kein CO<sub>2</sub> entsteht. Aufgrund ihres massiven Stromverbrauchs kommen solche Verfahren heute aus wirtschaftlichen Gründen noch nicht in Frage. Bei hohen EE-Anteilen und häufiger Verfügbarkeit großer Stromüberschüsse aus Wind- und Solarenergie wären sie aber denkbar und aus Klimaschutzsicht wünschenswert. Im Vergleich ist die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem herkömmlichen HBV, die in einer statischen Betrachtung, wie oben erörtert, ökologisch unbedenklich erscheint, deutlich unvorteilhafter, da die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der herkömmlichen Ammoniaksynthese durch einen strukturellen Wandel insgesamt reduziert werden könnten. Harnstoff könnte dann auf Basis CO<sub>2</sub>-neutralen Ammoniaks und CO<sub>2</sub> aus regenerativen oder unvermeidbaren Quellen mit besserer Klimabilanz produziert werden.

In einer pessimistischen Vision werden dagegen sehr große Menge Kohle auch im Verlauf der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts verbrannt. Für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung stehen in diesem Fall grundsätzlich zahlreiche fossile Kraftwerke und Industrieanlagen zur Verfügung. Die limitierte Nachfrage nach CO<sub>2</sub> führt in der pessimistischeren Vision dazu, dass CO<sub>2</sub> für eine industrielle Nutzung tendenziell aus solchen Anlagen abgeschieden wird, die hochreines und daher kostengünstig abzuschheidendes CO<sub>2</sub> emittieren (Naims 2016). In dieser Vision besteht ein Spannungsfeld zwischen den zu bestimmenden ökologischen Vorteilen der CO<sub>2</sub>-Nutzung und den soweit wie möglich zu vermeidenden Lock-In-Effekten der CO<sub>2</sub>-Abscheidung.

---

## 2.4 CO<sub>2</sub>-Nutzung

---

### 2.4.1 Unterschied zwischen CCU und CCS

Während die CO<sub>2</sub>-Abscheidung die technologische Gemeinsamkeit zwischen CCU und CCS darstellt, unterscheiden sich die beiden Konzepte deutlich in dem zweiten Element, also bei dem, was nach der Abscheidung mit dem CO<sub>2</sub> geschieht.<sup>17</sup>

CCS ist ein Konzept, das ausschließlich klimapolitisch motiviert ist. Bei CCS müssen die Umweltauswirkungen von Abscheidung, Transport, Injizieren und langfristiger Speicherung des CO<sub>2</sub> mit dem Umweltvorteil durch die CO<sub>2</sub>-Speicherung abgewogen werden. Die

<sup>17</sup> Für eine detaillierte Analyse der Unterschiede und der Gemeinsamkeiten von CCU und CCS siehe Bruhn et al. (2016).

wirtschaftlichen Kosten von CCS können nur durch klimapolitische Maßnahmen ausgeglichen werden.

Bei CCU dagegen müssen die Umweltauswirkungen von Abscheidung, Wiederverwertung und ggf. Transport mit den möglichen Umweltvorteilen abgewogen werden, die sich durch Effizienzsteigerungen, Substitutionseffekte oder durch die langfristige bzw. permanente Bindung des CO<sub>2</sub> in den CCU-basierten Produkten ergeben können. Aus wirtschaftlicher Sicht kann sich CCU teilweise schon unter aktuellen Bedingungen lohnen, auch ohne klimapolitische Anreize. Zahlreiche weitere CCU-Technologien, insb. PtX-Verfahren konkurrieren derzeit jedoch mit günstiger fossiler Energie und würden von stärkeren Klimaschutzanreizen profitieren. Die Weiterentwicklung von CCU wird also auch von klimapolitischen Maßnahmen bestimmt.

#### **2.4.2 Status Quo und Ausblick zur CO<sub>2</sub>-Nutzung**

Die aktuelle weltweite CO<sub>2</sub>-Nachfrage wird auf ca. 220 Millionen Tonnen pro Jahr (Mt/J) geschätzt. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die aktuell kommerzialisierten und mittelfristig einsetzbaren CCU-Anwendungsgebiete anhand der geschätzten weltweiten Produktionsmengen der jeweiligen Anwendungen und Produkte kombiniert mit den dafür jeweils eingesetzten Mengen CO<sub>2</sub> weltweit. Die mittelfristigen Nutzungs- und Produktionsmengen beziehen sich dabei auf eine mögliche Entwicklung in den nächsten 10 Jahren. Die Gesamtmengen an genutztem CO<sub>2</sub> entsprechen ca. 0,6% der weltweiten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Mittel- bis langfristig kann erwartet werden, dass die industriellen Einsatzgebiete in ihrer Vielfalt und Menge wachsen. Selbst in sehr langfristigen, ambitionierten Entwicklungsszenarien für CCU wird das Mengenpotenzial der Nutzung auf nicht mehr als rund 2 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr geschätzt (Ausfelder & Bazzanella 2008). Diese Menge entspricht rund 5% der derzeitigen anthropogenen Emissionen. Es handelt sich dabei allerdings um die Nutzungsmenge und nicht um eine Emissionsreduktion. Das Reduktionspotenzial hängt wesentlich von den Substitutionseffekten ab. Deshalb ist es technologie- und produktspezifisch und kann kleiner aber auch größer sein als die Nutzungsmenge. Genau einschätzen lässt das Reduktionspotenzial sich nur durch detailliertere ökologische Bewertungen mittels LCAs einzelner Produkte, die bisher noch nicht in aggregierter Form ausgewertet vorliegen.

**Tabelle 2: Einschätzung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Nachfrage**

Anwendungsbereich/ Produkt	Aktuelle Mengen		Mittelfristige Mengen		
	In Kilotonnen (kt) p.a.	CO <sub>2</sub> Input	Produkt Output	CO <sub>2</sub> Input	Produkt Output
<b>Direkte Nutzung</b>		<b>42.400</b>		<b>42.400</b>	
Karbonisierung von Getränken		2.900	2.900	2.900	2.900
Lebensmittelverpackungen		8.200	8.200	8.200	8.200
Industriegas		6.300	6.300	6.300	6.300
Tertiäre Öl- und Gasförderung (EOR/EGR)		25.000	7-23% der Ölreserve, <5% der Gasreserve	25.000	7-23% der Ölreserve, <5% der Gasreserve
<b>Materialien</b>		<b>167.515</b>		<b>212.400</b>	
Harnstoff		114.000	155.000	132.000	180.000
Anorganische Carbonate		50.000	200.000	70.000	250.000
Formaldehyd		3.500	21.000	5.000	25.000
PC (Polycarbonate)		10	4.000	1.000	5.000
Carbonate		5	200	500	2.000
Acrylate		0	2.500	1.500	3.000
Carbamate		0	5.300	1.000	6.000
Ameisensäure		0	600	900	1.000
PUR (Polyurethane)		0	8.000	500	10.000
<b>Kraftstoffe</b>		<b>12.510</b>		<b>20.000</b>	
Methanol		8.000	50.000	10.000	60.000
DME (Dimethylether)		3.000	11.400	>5.000	>20.000
TBME (tert-Butylmethylether)		1.500	30.000	3.000	40.000
Algen-basierter Biodiesel		10	5	2.000	1.000
<b>Gesamt</b>		<b>222.425</b>		<b>274.800</b>	

Quelle: Naims (2016), adaptiert von Aresta, Dibenedetto & Angelini (2013).

### 2.4.3 Ökologische Aspekte der CO<sub>2</sub>-Nutzung

In den meisten Anwendungen wird das CO<sub>2</sub> am Ende des Lebenszyklus des Produkts, z.B. bei der Verbrennung, wieder freigesetzt. Die Bindung von CO<sub>2</sub> im Produkt ist somit nicht dauerhaft. Nur in bestimmten Fällen, wie der Herstellung von zementähnlichen

Baumaterialien, kann die Speicherung des CO<sub>2</sub> als permanent<sup>18</sup> bewertet werden. Der größte Teil der derzeitigen und mittelfristig absehbaren CO<sub>2</sub>-Nutzung weist jedoch eine sehr kurze CO<sub>2</sub>-Bindungszeit von Monaten oder maximal wenigen Jahren auf (Aresta 2013, CLCF 2011, Purr 2016). Auch bei Verwirklichung der in längerfristigen Nachhaltigkeitsszenarien (UBA 2014) unterstellten breiten Anwendung von CCU-basierten Energieträgern bliebe die Bindungszeit sehr kurz, denn ein Großteil des CO<sub>2</sub> würde zur Erstellung von synthetischen Kraftstoffen verwendet, die eine kurze Bindungszeit aufweisen.

Die wichtigeren Klimaschutzpotenziale durch CCU stammen aus energetischen Effizienzsteigerungen bzw. einer Substitution fossiler Rohstoffe, die sonst für die Herstellung der gleichen Produkte extrahiert und verbrannt würden. Somit kann eine variable, technologiespezifische Menge CO<sub>2</sub> im Vergleich zu einem herkömmlichen Produktionsprozess eingespart werden. Die mögliche Einsparung ist durch ein LCA zu bestimmen (Aresta, & Galatola 1999, Aresta et al. 2002, von der Assen et al. 2013).

Eine direkte Klimaschutzwirkung von CCU würde entstehen, wenn der CO<sub>2</sub>-Kreislauf konzeptionell geschlossen werden könnte, z.B. durch die Abscheidung aus Verbrennungsanlagen und der Wiederverwendung dieses CO<sub>2</sub>. Allerdings könnte auch im besten Fall nur eine kleine Menge CO<sub>2</sub> sich in einem derartigen Kreislauf befinden. Um eine größere Menge CO<sub>2</sub> im Kreislauf zu führen, könnten synthetische Kraftstoffen miteinbezogen werden. Dafür müsste das emittierte CO<sub>2</sub> aus der Luft abgeschieden werden z.B. über den Einsatz von Abscheidungstechnologien aus der Luft bzw. sog. „künstlicher Bäume“. Jede Recyclingschleife ist allerdings immer mit Effizienzverlusten verbunden.

#### **2.4.4 CO<sub>2</sub>-Nutzung: Eine dynamische Betrachtung**

Viele Brenn-, Kraft- und Rohstoffe können durch die Synthese von Wasserstoff und CO<sub>2</sub> hergestellt werden. Daher könnte eine deutliche Steigerung der CO<sub>2</sub>-Nachfrage eintreten, wenn PtX künftig eine größere Rolle im Energiesystem einnehmen sollen, wie die Zukunftsvisionen des UBAs beschreibt.

„Um Luft- und Seeverkehr möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist daher der Einsatz von mittels regenerativem Strom hergestellten Kraftstoffen wie PtL (Luffahrt) bzw. PtL oder PtG-Methan (Seefahrt) für das Erreichen einer Treibhausgasneutralität im Verkehr unumgänglich“ (UBA 2015).

Zudem wird es einen Bedarf nach PtG/PtL im Straßenverkehr geben,<sup>19</sup> dessen Ausmaß abhängig vom Elektrifizierungspotenzial des Individualverkehrs und des LKW-Verkehrs ist. Deswegen wird in diesen Bereichen ein dynamischer Bedarf an PtG/PtL erwartet (UBA 2015), der bei einem langsamen Fortschritt der Elektrifizierung des Straßenverkehrs in 2050 noch ein bedeutendes Ausmaß haben könnte, und sich bis weit in die zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts hineinziehen könnte.

<sup>18</sup> Als permanent werden im Allgemeinen Zeitspannen der Speicherung von mindestens tausend Jahren bezeichnet, vgl. Metz, et al. (2005)

<sup>19</sup> Selbst bei hohem Elektrifizierungsgrad werden viele Fahrzeuge voraussichtlich als Hybrid, Plug-In-Antriebe etc. betrieben werden, so dass ein zusätzlicher Kraftstoff notwendig ist.



Wasserstoff erhöht sich dieser Wert wegen des energetischen Vorteils auf circa 180g CO<sub>2</sub>/kWh (Purr 2016).<sup>20</sup>

Aber der Umstieg auf Wasserstoff als Hauptkraftstoff im Verkehrsbereich setzt die Einführung einer vollständig neuen und sehr teuren Infrastruktur (Fahrzeugflotte, Umsetzung bzw. Transport von H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>-Tankstellen etc.) voraus. PtG-Methan dagegen ist mit der schon existierenden Gasinfrastruktur vollständig kompatibel. Deswegen steht das UBA den Durchsetzungschancen des Wasserstoffs skeptisch gegenüber. Folglich geht das UBA davon aus, dass die CO<sub>2</sub>-Abscheidung der verlässlichere und wahrscheinlichere Weg ist, um die langfristig benötigten großen Mengen PtG/PtL zu produzieren.

Derzeit wird darüber hinaus die CO<sub>2</sub>-freie Herstellung von Wasserstoff aus Methan untersucht,<sup>21</sup> die aus ökologischer Sicht vielversprechend ist. Diese könnte das Transportproblem von Wasserstoff lösen, da dieser direkt an der Tankstelle produziert werden könnte, die Infrastruktur für Erdgas ist nämlich schon vorhanden. Sollten sich solche Technologien zur Wasserstoffherstellung durchsetzen, dann könnte der Bedarf von CO<sub>2</sub>-basierten PtX-Kraftstoffen im Straßenverkehr (insbesondere dem LKW-Fernverkehr) erheblich niedriger ausfallen. Für Flugverkehr und Schiffverkehr bleibt Wasserstoff wegen der Energiedichte jedoch eine unwahrscheinliche technologische Lösung. Bei erfolgreicher Anwendung solch neuer Wasserstofftechnologien wäre CCU also langfristig etwas weniger relevant, aber nicht viel weniger, denn der PKW-Verkehr ist in der UBA-Vision ohnehin größtenteils elektrifiziert.

Im Prinzip könnte der Bedarf nach kohlenstoffhaltigen Brenn-, Kraft- und Rohstoffen auch mit Biomasse gedeckt werden. Aber das Potenzial an nachhaltig wachsenden Rohstoffen zur Energienutzung ist mengenmäßig bei weitem zu gering (UBA 2014, UBA 2015). Deshalb geht das UBA davon aus, dass PtG/PtL langfristig in großem Umfang benötigt wird.

Abbildung 3 veranschaulicht aus Sicht des UBA das Zusammenspiel der drei grundsätzlichen Optionen einer nachhaltigen Energieversorgung: Strom, Kohlenwasserstoffe (d.h. PtG/PtL oder Biokraftstoffe) und Wasserstoff. Die gesamte Fläche des Dreiecks ist rein hypothetisch: Seine Ecken stellen Welten dar, in denen die gesamte Energieversorgung jeweils ausschließlich mit Strom, Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffen gewährleistet wird. Diese Extreme sind jedoch entweder technisch nicht umsetzbar oder nicht sinnvoll, wie z.B. die Elektrifizierung des Flugverkehrs, oder Smartphones mit Verbrennungsmotoren. Der grün markierte Lösungsraum illustriert dagegen die technisch denkbaren Kombinationen der drei Energieträger.

Für die Einordnung von CCU-Technologien ist insbesondere eine Feststellung sehr wichtig: Kohlenwasserstoffe sind am wenigsten verzichtbar. Der Lösungsraum setzt ca. 25% bis 85% nachhaltig (d.h. auf Basis von PtX oder Biomasse) produzierte Kohlenwasserstoffe am Gesamtenergieverbrauch voraus. Dies verdeutlicht, warum CCU-Technologien einen integralen Bestandteil der langfristigen Nachhaltigkeitsvision des UBA darstellen.

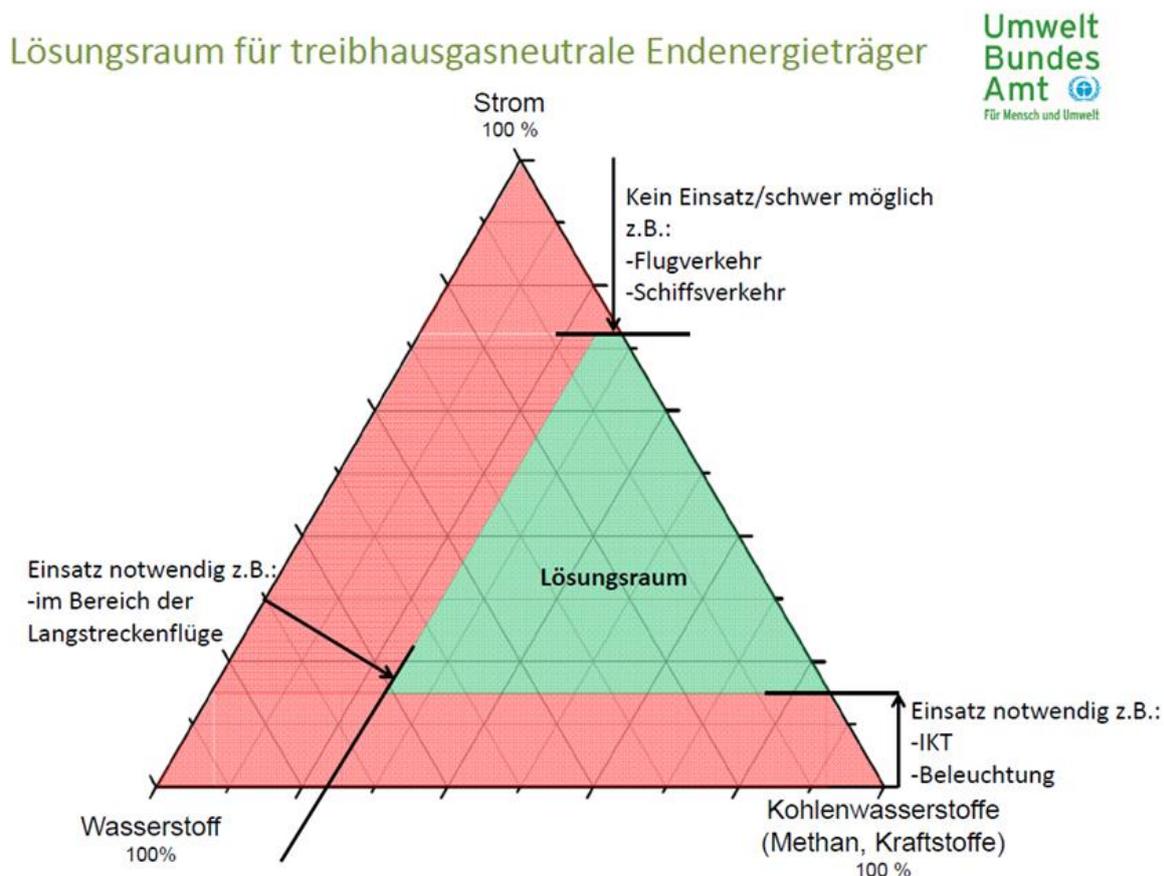
<sup>20</sup> Deshalb ist in allen Anwendungsbereichen derzeit und in den nächsten zwei Jahrzehnten eine Elektrifizierung vorteilhafter. Beispielsweise im Verkehr ist die Elektromobilität grundsätzlich effizienter, und PtG/PtL sollte langfristig nur in solchen Bereichen eingesetzt werden, wo weder Elektromobilität noch Wasserstoff praktikabel sind (z.B. Flugverkehr, Schiffsverkehr, LKW-Fernverkehr). Auch für eine nachhaltige chemische Industrie spielen PtG/PtL/PtC eine zentrale Rolle (Purr 2016).

<sup>21</sup> <http://www.iass-potsdam.de/en/research/transformation-energy-systems/energy-systems-transition/methane-decarbonisation>

Industrielle Anlagen sind in der optimistischen Vision weitestgehend auf treibhausgasemissionsfreie Prozesse umgestellt. Potenzielle neue Anwendungsgebiete für CCU liegen hier insbesondere in der Produktion von Grundchemikalien für Produkte wie Kunststoffe, deren Herstellung auf biologischer Basis ökologisch nicht vorteilhafter ist. Auch CO<sub>2</sub>-basierte Prozesse zur Herstellung von Baumaterialien, die das CO<sub>2</sub> potenziell länger binden, stellen ein neues Anwendungsgebiet dar. Dagegen fällt eine Anwendung von CO<sub>2</sub> in Form von Enhanced Oil Recovery in dieser Vision weg.

In optimistischen Nachhaltigkeitsvisionen werden also folglich große Mengen flüssiger oder gasförmiger Brenn-, Kraft- und Rohstoffe benötigt, insbesondere für eine nachhaltigere Chemie- und Bauindustrie sowie für den Schiffs- und Luftverkehr. Wahrscheinlich werden flüssige oder gasförmige Kraftstoffe zudem auch zur Deckung eines Anteils des Endenergieverbrauchs im Straßenverkehr, vor allem im LKW-Fernverkehr, im Stromsektor und anteilig zur Prozesswärmeversorgung der Industrie benötigt. Dieser Anteil könnte in einer optimistischen Zukunftsvision 2050 schon recht klein sein, bliebe aber bei vorsichtigeren Annahmen auch in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts erheblich. Insgesamt leistete CCU einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der ambitionierten Emissionsreduktionsziele dieser Vision.

**Abbildung 3: Optionen für eine nachhaltige Energieversorgung**



Quelle: adaptierte Darstellung von Umweltbundesamt (2014) und Purr (2015).

In der pessimistischen Zukunftsvision dagegen werden CCU-Technologien nicht in der Breite, aber eventuell schon in zunehmendem Maße eingesetzt. Für die Stromerzeugung könnten in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts noch erhebliche Mengen Kohle und Erdgas verbrannt werden. Der Luft- und Schiffsverkehr wird weiterhin durch fossile Kraftstoffe versorgt. Auch im Straßenverkehr ist eine breite Etablierung von PtX unrealistisch. PtX-Kraftstoffe können nur mit fossilen Kraftstoffen konkurrieren, wenn der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis oder ein anderes Instrument diese signifikant verteuert. Bezüglich der sonstigen Industrieprozesse kann in der pessimistischen Vision mit einem leichten Wachstum des heutigen Niveaus an CCU-Aktivitäten gerechnet werden. Insgesamt leisten CCU-Technologien in dieser Vision einen tendenziell eher geringen Beitrag zur Senkung der Emissionen.

---

## 2.5 Fazit: die Rolle von CCU in einer Nachhaltigkeitsstrategie

---

Eine langfristige Nachhaltigkeitsstrategie braucht sowohl eine klare Vision für einen oder mehrere anvisierte Zielzustände, als auch Konzepte für die Übergangsperiode.

Unter vorsichtigen Annahmen könnte der Transformationsprozess auch deutlich länger als bis 2050 andauern. Im klimapolitisch ungünstigen Fall wird der Zielzustand der Nachhaltigkeitsvision in diesem Jahrhundert nicht oder erst sehr spät erreicht, so dass sich der Transformationsprozess unbestimmt lange ausdehnt.

Im vorigen Kapitel wurde gezeigt, dass auch langfristig sehr große Mengen Kohlenwasserstoffe auf Basis von PtX oder Biomasse für eine vollständige regenerative Versorgung der Industriegesellschaft erforderlich bleiben. Notwendige Voraussetzung für ihre nachhaltige Bereitstellung ist die Verfügbarkeit großer Mengen von:

1. Preislich wettbewerbsfähigem Strom, um die Elektrolyse in großem Umfang mit 100% EE-Strom (einschließlich PtG-Verstromung) zu versorgen.
2. CO<sub>2</sub>, um die PtX-Synthese zu decken.

Der erste Punkt bestätigt die Dringlichkeit des Ausbaus der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung, auch deutlich über 100% des aktuellen Strombedarfs (Varone & Ferrari 2015), um auch die anderen Anwendungsbereiche (inkl. einer nachhaltigen chemischen Industrie) zu versorgen. Hinsichtlich des zweiten Punkts muss geklärt werden, unter welchen Bedingungen das für PtX langfristig benötigte CO<sub>2</sub> möglichst nachhaltig bereitgestellt werden kann (van der Giesen et al. 2014, Sternberg & Bardow 2015).

### 2.5.1 CO<sub>2</sub>-Quellen und CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Für den Zielzustand einer langfristigen Nachhaltigkeitsstrategie kann die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus fossil befeuerten Industrieprozessen nicht mehr erwogen werden. Im Laufe des Transformationsprozesses werden aber weiterhin graduell abnehmende Mengen fossiler Energieträger verwendet. In manchen Industriesektoren werden fossilfreie Verfahren erst in der letzten Phase des Transformationsprozesses umgesetzt werden können. Tabelle 3 fasst

die Bedeutung von CCU-Technologien sektorenspezifisch im Hinblick auf die beiden in Tabelle 1 entwickelten Zukunftsvisionen zusammen.

Folglich werden in einer Nachhaltigkeitsvision mit hohem Ambitionsniveau nur noch wenige potenzielle Quellen erwartet, aus denen CO<sub>2</sub> abgeschieden werden kann:

- Prozessbedingte Industrieemissionen, vor allem in der Kalk- und Zementindustrie;
- Stationäre Nutzung von nachhaltig nachwachsender Biomasse (Industrie oder Spitzenlastkraftwerke);
- Stationäre Nutzung von regenerativ erzeugtem PtG-Methan;
- Atmosphäre

In der weniger optimistischen Zukunftsvision werden in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts oder noch länger große Menge Kohle für Stromerzeugung und in Industrieprozessen verbrannt. In diesem Fall sind Quellen für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung weiterhin reichlich vorhanden.

Die Vor- und Nachteile der CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus fossil befeuerten Kraftwerken und Industrieanlagen müssen abgewogen werden: Einerseits können dadurch unerwünschte Lock-In-Effekte hervorgerufen werden. Andererseits können damit die CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnik und die langfristig notwendige PtG/PtL-Technik weiterentwickelt werden oder im Falle von CCS können CO<sub>2</sub>-Emission vermieden werden.

In der jüngsten Veröffentlichung des UBA zur Rolle von PtG/PtL in den laufenden Transformationsprozess wird das Spannungsfeld bei der Suche der für die notwendige „Bereitstellung von strombasiertem regenerativen Methan/Methanol“ (UBA 2016, S.15) notwendigen CO<sub>2</sub>-Quellen wie folgt dargestellt:

*„Die Kombination mit fossilen Kraftwerken ist eine aus technischer Sicht sinnvolle technische Option und im Transformationsprozess unter Umständen eine zur Entwicklung der PtG/PtL-Technik effektive Kombination. Die technisch sinnvolle Nutzung von CO<sub>2</sub> aus fossilen Quellen darf jedoch keine Pfadabhängigkeit suggerieren, eine höhere Auslastung fossiler Stromerzeugung begründen und damit das Erreichen der Klimaschutzziele gefährden.“ (UBA 2016, S. 15).*

## 2.5.2 CO<sub>2</sub>-Nutzung

CCU basierte PtG/PtL-Energieträger sind eine notwendige Voraussetzung für die Nachhaltigkeit der Gesamtenergieversorgung mit Brenn-, Kraft- und Rohstoffen. Dies gilt insbesondere für die chemische Industrie und den internationalen Luft- und Seeverkehr. Tabelle 3 stellt zusammenfassend auch die Rolle der CO<sub>2</sub>-Nutzung für die verschiedenen Sektoren in den beiden Zukunftsvisionen dar. Ohne wirksame globale Regelungen für diese Branchen ist allerdings fragwürdig, ob der CCU-Bedarf in diesen Bereichen in der erforderlichen Breite überhaupt entstehen wird. Im Transformationsprozess steht daher die Entwicklung und die Demonstration der notwendigen Technologien zunächst im Vordergrund, ein breiter Einsatz ist für die nächsten 20 Jahre unrealistisch.

Im Straßenverkehr ist die direkte Elektrifizierung energetisch effizienter als der Umweg über Elektrolyse und PtG/PtL-Synthese. Selbst in einer optimistischen Zukunftsvision könnten

aber wichtige Segmente nicht oder nicht vollständig elektrifiziert werden (UBA 2015). Diese sollten mit CCU-basiertem PtG/PtL bedient werden.

Der breite Einsatz CCU-basierter Energieträger ist ökologisch nicht sinnvoll, solange die Treibhausgasemissionen aus der Stromerzeugung hoch sind.<sup>22</sup> Auch aus diesem Grund, ist der breite Einsatz CCU-basierter PtG/PtL-Energieträger kein Ziel in den nächsten Phasen des Transformationsprozesses. Stattdessen steht in diesen Phasen die Technologieentwicklung im Vordergrund, damit die verschiedenen Technologien langfristig verfügbar werden.

Folgende Übersicht baut auf die in Tabelle 1 dargestellten klimapolitischen Zukunftsvisionen auf. Der Einfachheit halber werden hier der Transformationsprozess und die „pessimistische Zukunftsvision“ als identisch betrachtet, d.h. die pessimistische Vision kann als Etappe in einem langsameren Transformationsprozess verstanden werden.

Tabelle 3 zeigt, dass die Rolle von CCU im Transformationsprozess sehr von der idealen Nachhaltigkeitsvision im Zielzustand abweicht.

<sup>22</sup> Wegen der hohen Energieverluste durch Elektrolyse und PtG/PtL-Synthese ist eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung für PtG/PtL für das Klima nur dann ein Klimavorteil, wenn der Strommix weniger als 120 gCO<sub>2</sub>/kWh Strom freisetzt (Herberner 2016). Deshalb ist grundsätzlich in allen Anwendungsbereichen eine Elektrifizierung vorteilhafter. Beispielsweise im Verkehr ist die Elektromobilität grundsätzlich effizienter, und PtG/PtL sollten langfristig nur in den Bereichen (z.B. Flugverkehr, Schiffsverkehr, LKW-Fernverkehr) verwendet werden, wo Elektromobilität nicht praktikabel ist. Für eine nachhaltige chemische Industrie spielt PtG/PtL eine zentrale Rolle (Purr 2016)

**Tabelle 3: Rolle von CCU je nach Zukunftsvision bzw. im Transformationsprozess**

	Optimistische Zukunftsvision 2050	Pessimistische Zukunftsvision 2050 (oder Transformationsetappe)
<b>Fazit CCU</b>		
<b>Fazit CCU</b>	Wichtiger Beitrag von CCU zu ambitioniertem Klimaschutz.	Klimabilanz von Fall zu Fall zu klären, insgesamt tendenziell ein geringer Beitrag zum Klimaschutz.
<b>CO<sub>2</sub>-Quellen</b>		
<b>Stromversorgung</b>	Keine fossile Erzeugung mehr. Geringe Mengen PtG-Methan verstromt. Das dabei emittierte CO <sub>2</sub> ist erneuerbar erzeugt und kann abgeschieden und verwendet werden, wenn der Standort und die CO <sub>2</sub> -Bereitstellungskosten günstig sind.	Weiterhin hohe fossile Erzeugung mit hohen CO <sub>2</sub> -Emissionen. CCU-PtX ökologisch wenig sinnvoll weil der Stromsektor zu CO <sub>2</sub> -intensiv ist. Wenn keine bessere Lösung vorhanden ist, könnte effizientes CCS klimapolitisch sinnvoll sein.
<b>Industrieprozesse als CO<sub>2</sub>-Quellen</b>	Sehr eingeschränkt. Das dabei entstehende CO <sub>2</sub> wird nahezu vollständig abgeschieden und verwertet.	Weiterhin bedeutend. CO <sub>2</sub> -Abscheidung ist wünschenswert im Ausmaß der Nachfrage. Ist keine bessere Lösung vorhanden, könnte effizientes CCS klimapolitisch sinnvoll sein.
<b>Atmosphäre</b>	Nach technologischem Durchbruch ist die Atmosphäre als CO <sub>2</sub> -Quelle denkbar.	Bei hohen fossilen CO <sub>2</sub> -Emissionen ist die CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus der Atmosphäre nicht sinnvoll.
<b>Fazit CO<sub>2</sub>-Quellen</b>	Fossile Quellen sind bis auf unvermeidbare prozessbedingte Emissionen ausgeschlossen. Als regenerative Quellen kommen in Betracht: Biomasse, mit PtG erzeugtes Methan, Luft.	CO <sub>2</sub> aus fossilen Verbrennungsprozessen sind reichlich vorhanden. Spannungsfeld zwischen ökologischen Vorteilen der Zweitnutzung des CO <sub>2</sub> und Nachteilen möglicher Lock-In-Effekte.
<b>CO<sub>2</sub>-Bedarf</b>		
<b>Luft- und Schiffsverkehr</b>	Weitgehend auf PtG/PtL umgestellt. Für deren Synthese entsteht ein großer CO <sub>2</sub> -Bedarf.	Weitgehend oder vollständig fossil, daher kein oder geringer CO <sub>2</sub> -Bedarf.
<b>Straßenverkehr</b>	Fast vollständig elektrisch, bis auf den LKW-Fernverkehr. Der Restbedarf an Treibstoffen könnte komplett mit CCU-basiertem PtG/PtL (oder mit Wasserstoff) gedeckt werden. Mittlerer CO <sub>2</sub> -Bedarf.	Großer Bedarf nach Treibstoffen könnte mit CCU-basiertem PtG/PtL gedeckt werden. Das wäre aber 1. ökologisch nur wenig sinnvoll, weil der Stromsektor zu CO <sub>2</sub> -intensiv ist und 2. wirtschaftlich unrealistisch, weil CCU-PtG/PtL hohe CO <sub>2</sub> -Zertifikatspreise erfordert. Geringer CO <sub>2</sub> -Bedarf.
<b>Industrieprozesse als CO<sub>2</sub>-Nutzer</b>	Potenzielle Wachstumsfaktoren: Kunststoffe, die heute mit fossilen Kohlenwasserstoffen produziert werden und deren Produktion auf Basis von Biomasse ökologisch nicht vorteilhafter ist; Baumaterialien, die CO <sub>2</sub> langfristig binden. Potenzielle Reduktionsfaktoren: CO <sub>2</sub> -freie Harnstoffproduktion; Enhanced Oil Recovery nicht mehr nötig.	Ähnlich wie heute, leichtes Wachstum durch erhöhte Nachfrage der heutigen CO <sub>2</sub> -Anwendungen. Die Klimaentlastung ist von Fall zu Fall zu klären, und insgesamt tendenziell eher gering.
<b>Fazit CO<sub>2</sub>-Bedarf</b>	Signifikanter CO <sub>2</sub> -Bedarf	Geringer CO <sub>2</sub> -Bedarf.

Quelle: Eigene Darstellung.

### 3 Innovationspolitische Schlussfolgerungen

In der nächsten Phase des Transformationsprozesses ist es sinnvoll, PtG/PtL/PtC-Verfahren technologisch weiter zu entwickeln und zu demonstrieren, damit regenerativ erzeugte PtX-Anwendungen zu einem späteren Zeitpunkt in großem Umfang eingesetzt werden können. Prioritäten sollten dabei auf die Reduktion der Kosten vom CO<sub>2</sub>-Abscheidungsprozess (UBA 2015), insbesondere aus klimaneutralen oder unvermeidbaren Quellen, sowie auf die Entwicklung aller Schritte für den breiten Einsatz von erneuerbar erzeugtem PtG/PtL/PtC gesetzt werden.

Aus dieser Analyse ergeben sich folgende No-Regret-Optionen in Bezug auf die Auswahl der CCU-bezogenen Technologien, die im Rahmen von Forschung, Entwicklung und Demonstrationsprogrammen unterstützt werden sollten:

- Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus klimaneutralen Quellen (nachhaltigem PtG, nachhaltiger Biomassenutzung, Atmosphäre);
- Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus prozessbedingten Industrieemissionen, insbesondere in der Kalk- und Zementindustrie;
- CCU-basierte Produkte und Verfahren die nachweislich zu einer ökologischen Verbesserung und insbesondere einer CO<sub>2</sub>-Einsparung im Vergleich zu herkömmlichen Prozessen führen können. Der Nachweis sollte durch produkt- bzw. verfahrensspezifische LCA erfolgen.
- Unter den gleichen Bedingungen (LCA) sind Produkte mit sehr langer CO<sub>2</sub>-Bindungszeit (z.B. neuartige Baumaterialien) besonders interessant.
- Sämtliche PtX-Anwendungen für Energieträger und die chemische Industrie;
- Technologien, Verfahren, Infrastruktur und Pilotprojekte, die die langfristige Umstellung des Luftverkehrs, des Seeschiffsverkehrs und des LKW-Fernverkehrs auf erneuerbar erzeugte PtG/PtL unterstützen.

Weitere Optionen können für den Klimaschutz wertvoll sein, können jedoch auch unerwünschte Lock-In-Effekte hervorbringen. Dazu gehören insbesondere CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien und Pilotprojekte, die insbesondere für Kohlekraftwerke entwickelt werden.

Hingegen erscheinen folgende CCU-bezogene Forschungs- und Entwicklungsfelder aus einer ökologischen Perspektive nicht sinnvoll:

- Enhanced Oil Recovery;
- CO<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur, die nur in Verbindung mit Kohlekraftwerken und/oder Enhanced Oil Recovery sinnvoll ist.

Die klimapolitische Einordnung der vorgestellten CCU-Technologien auf Basis der durchgeführten Analysen führt also zu dem Schluss, dass eine innovationspolitische

Förderung der oben genannten No-Regret-Optionen in jedem Falle empfehlenswert ist, selbst wenn die breite Anwendung mancher dieser Optionen heute ökologisch noch nicht sinnvoll wäre. Wichtige technologische Bestandteile dieser langfristig notwendigen No-Regret-Optionen befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium und ihre weitere Entwicklung kann noch Jahrzehnte in Anspruch nehmen.

Andere CCU-Technologien sollten dagegen auf unerwünschte Lock-In-Effekte geprüft werden und ökologisch nicht vorteilhafte Routen möglichst gänzlich aus einer Förderung exkludiert werden. Denn in jeder umweltpolitisch orientierten Fördermaßnahme muss so weit wie möglich vermieden werden, dass die CCU-Förderung unerwünschte Nebenwirkungen oder Lock-In-Effekte zugunsten fossiler Energieerzeugung oder Produktionsverfahren mit sich bringt. Es muss zudem vermieden werden, dass die CCU-Förderung die Fördermittel und die privaten Innovationsinvestitionen für andere wichtige Technologien in den Bereichen Industrieprozesse und erneuerbare Energien ungebührlich einschränkt.

## Referenzen

Aresta et al. (2002): M. Aresta, A. Caroppo, A. Dibenedetto, M. Narracci: Life cycle assessment (LCA) applied to the synthesis of methanol. Comparison of the use of syngas with the use of CO<sub>2</sub> and dihydrogen produced from renewables. In: Environmental Challenges and Greenhouse Gas Control for Fossil Fuel Utilization in the 21st Century, New York: Springer, 331-347.

Aresta, Dibenedetto & Angelini (2013): M. Aresta, A. Dibenedetto & A. Angelini: The changing paradigm in CO<sub>2</sub> utilization, *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 3, 65-73.

Aresta & Dibenedetto (2010): M. Aresta & A. Dibenedetto: Industrial utilization of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). In: Maroto-Valer, M. M., ed. *Developments and innovation in carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture and storage technology: Volume 2: Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) storage and utilisation*, Great Abington: Woodhead Publishing, 377-410.

Aresta & Galatola (1999): M. Aresta, M. Galatola: Life cycle analysis applied to the assessment of the environmental impact of alternative synthetic processes. The dimethylcarbonate case: part 1. *Journal of Cleaner Production*, 7(3), 181-193.

Ausfelder & Bazzanella (2008): F. Ausfelder, A. Bazzanella: Diskussionspapier Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>: [http://www.dechema.de/dechema\\_media/diskussionco2.pdf](http://www.dechema.de/dechema_media/diskussionco2.pdf)

Bruhn et al. (2016): T. Bruhn, H. Naims, B. Olfe-Kräutlein: Separating the debate on CO<sub>2</sub> utilisation from carbon capture and storage', *Environmental Science & Policy*, 60, 38-43.

CLCF (2011): The Centre for Low Carbon Futures, Carbon Capture and Utilisation in the green economy: Using CO<sub>2</sub> to manufacture fuel, chemicals and materials. [http://www.policyinnovations.org/ideas/policy\\_library/data/01612/\\_res/id=sa\\_File1/CCU.pdf](http://www.policyinnovations.org/ideas/policy_library/data/01612/_res/id=sa_File1/CCU.pdf)

Dautzenberg & Bruhn (2013): G. Dautzenberg, T. Bruhn: Environmental impacts of carbon capture technologies: An overview of the state of development, potential side effects and current challenges for science and society., *IASS Working Paper*, Potsdam: IASS.

de Coninck & Benson (2014): H. de Coninck, S.M. Benson: Carbon Dioxide Capture and Storage: Issues and Prospects, *Annu. Rev. Env. Resour.*, 39(1), 243-270.

Domenichini et al. (2013): R. Domenichini, L. Mancuso, N. Ferrari, J. Davison: Operating Flexibility of Power Plants with Carbon Capture and Storage (CCS), *Energy Procedia*, 37, 2727-2737.

EP/EUCO/EC (2013): Legal Services of the European Parliament, Council of the European Union and European Commission: Joint Practical Guide for persons involved in the drafting of European Union legislation. <http://eur-lex.europa.eu/content/techleg/KB0213228ENN.pdf>

Herbener (2016): Gespräche / Emailaustausch mit Reinhard Herbener, UBA, Fachgebiet I2.3, Dez. 2015 - Juni 2016.

House et al. (2009): K.Z. House, C.F. Harvey, M.J. Aziz, D.P. Schrag: The energy penalty of post-combustion CO<sub>2</sub> capture & storage and its implications for retrofitting the U.S. installed base, *Energy & Environmental Science*, 2, 193-205.

IPCC (2013): Intergovernmental Panel on Climate Change: Summary for Policymakers, in Climate Change 2013: The Physical Science Basis.

- Kilimann (2015): S. Kilimann: Klimaanlage auf der Anklagebank, *ZEIT Online*, <http://www.zeit.de/mobilitaet/2015-12/auto-klimaanlage-co2-klimaschutz-sicherheit>
- Kuckshinrichs et al. (2010): W. Kuckshinrichs, P. Markewitz, J. Linssen, P. Zapp, M. Peters, B. Köhler, T.E. Müller & W. Leitner: Weltweite Innovationen bei der Entwicklung von CCS-Technologien und Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von CO<sub>2</sub>, *Energie & Umwelt*, 60.
- Madsen et al. (2014): S. Madsen, E. Normile-Elzinga, R. Kinsman: CO<sub>2</sub>-based cleaning of commercial textiles: The world's first CO<sub>2</sub> solution for cleanroom textiles. Littleton: CO<sub>2</sub> Nexus Inc, <http://www.energy.ca.gov/2014publications/CEC-500-2014-083/CEC-500-2014-083.pdf>
- Matter et al. (2016): J.M. Matter, M. Stute, S.O. Snæbjörnsdóttir, E.H. Oelkers, S.R. Gislason, E.S. Aradóttir, B. Sigfusson, I. Gunnarsson, H. Sigurdardóttir, E. Gunnlaugsson, G. Axelsson, H.A. Alfredsson, D., Wolff-Boenisch, K. Mesfin, D.F.d.I.R. Taya, J. Hall, K. Dideriksen, W.S. Broecker: Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions, *Science*, 352(6291), 1312-1314.
- Metz et al. (2005): B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press.
- Naims (2016): H. Naims: Economics of carbon dioxide capture and utilization - A supply and demand perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-16.
- Nimtz & Krautz (2013): M. Nimtz, H.-J. Krautz: Flexible Operation of CCS Power Plants to Match Variable Renewable Energies, *Energy Procedia*, 40, 294-303.
- Olfe-Kräutlein et al. (2014): B. Olfe-Kräutlein, H. Naims, T. Bruhn, A.M. Lorente Lafuente, M. Tobias: CO<sub>2</sub> als Wertstoff?, *IASS Fact Sheet*, 2/2014, [http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/fact\\_sheet\\_en\\_2\\_2014.pdf](http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/fact_sheet_en_2_2014.pdf)
- Otto (2015): A. Otto, T. Grube, S. Schiebahn, D. Stolten: Closing the loop: captured CO<sub>2</sub> as a feedstock in the chemical industry. *Energy & Environmental Science*, 8(11), 3283-3297.
- Pan, Lorente Lafuente & Chiang (2016): S.-Y. Pan, A.M. Lorente Lafuente, P.-C. Chiang: Engineering, environmental and economic performance evaluation of high-gravity carbonation process for carbon capture and utilization, *Applied Energy*, 170, 269-277.
- Peters et al. (2011): M. Peters, B. Köhler, W. Kuckshinrichs, W. Leitner, P. Markewitz & T.E. Müller: Chemical Technologies for Exploiting and Recycling Carbon Dioxide into the Value Chain, *ChemSusChem*, 4(9), 1216-1240.
- Purr (2015): Katja Purr (UBA): Möglichkeiten einer treibhausgasneutralen Gesamtenergieversorgung, Präsentation beim Kongress "100% Erneuerbare-Energie-Regionen", November 2015: [http://www.100-ee-kongress.de/fileadmin/redaktion/100-ee-kongress/5\\_Kongress/Praesentationen/F12\\_purr.pdf](http://www.100-ee-kongress.de/fileadmin/redaktion/100-ee-kongress/5_Kongress/Praesentationen/F12_purr.pdf)
- Purr (2016): Gespräch / Emailaustausch mit Katja Purr, UBA, Fachgebiet I 2.2 „Energiestrategien und -szenarien“, Dez. 2015 - Jan. 2016.
- SRU (2011): Sachverständigenrat für Umweltfragen: Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung Sondergutachten, Januar 2011. [https://www.dbu.de/OPAC/ab/2011\\_07\\_SG\\_Wege\\_zur\\_100\\_Prozent\\_erneuerbaren\\_Stromversorgung.pdf](https://www.dbu.de/OPAC/ab/2011_07_SG_Wege_zur_100_Prozent_erneuerbaren_Stromversorgung.pdf)
- SRU (2015): Sachverständigenrat für Umweltfragen: 10 Thesen zur Zukunft der Kohle bis 2040, Kommentar zur Umweltpolitik Nr. 14, Juni 2015.

[http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/05\\_Kommentare/2012\\_2016/2015\\_06\\_KzU\\_14.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/05_Kommentare/2012_2016/2015_06_KzU_14.pdf?__blob=publicationFile)

Sternberg & Bardow (2015): S. Sternberg, A. Bardow: Power-to-What? Environmental assessment of energy storage systems. *Energy & Environmental Science*, 8(2), 389-400.

UBA (2013): Umweltbundesamt: 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.

[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)

UBA (2014): Umweltbundesamt: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 – Studie. [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 (2015): Umweltbundesamt: Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/postfossile-energieversorgungsoptionen-fuer-einen>

UBA (2016): Umweltbundesamt: Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess, Position, März 2016.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/integration\\_von\\_power\\_to\\_gaspower\\_to\\_liquid\\_in\\_den\\_laufenden\\_transformationsprozess\\_web\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/integration_von_power_to_gaspower_to_liquid_in_den_laufenden_transformationsprozess_web_0.pdf)

V4+2 (2015): V4+2 (Bulgaria, Czech Republic, Hungary, Poland, Romania and Slovakia), Council of the European Union, Interinstitutional File 2015/0148 (OCD):

<http://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-13455-2015-INIT/en/pdf>

van der Giesen et al. (2014): C. van der Giesen, R. Kleijn, G.J. Kramer: Energy and climate impacts of producing synthetic hydrocarbon fuels from CO<sub>2</sub>, *Environmental Science & Technology*, 48(12), 7111-7121

Varone & Ferrari (2015): A. Varone, M. Ferrari: Power to liquid and power to gas: an option for the German Energiewende. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 207-218.

VCI & Dechema (2009): Verband der Chemischen Industrie, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnik: Positionspapier: Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>.

<https://www.vci.de/langfassungen-pdf/vci-dechema-positionspapier-zur-verwertung-und-speicherung-von-co2.pdf>

von der Assen et al. (2016): N. von der Assen, L.J. Müller, A. Steingrube, P. Voll, A. Bardow: Selecting CO<sub>2</sub> sources for CO<sub>2</sub> utilization by environmental-merit-order curves. *Environmental Science & Technology*. 50(3), 1093-1101.

Wilcox (2012): J. Wilcox: *Carbon capture*, New York: Spring