
IASS STUDY

Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS)

Potsdam, November 2016

CO₂ als Wertstoff

Herausforderungen und Potenziale
für die Gesellschaft

Barbara Olfe-Kräutlein, Henriette Naims, Thomas Bruhn,
Ana Maria Lorente Lafuente

Danksagungen

Die Autoren bedanken sich für die sehr wertvollen Anregungen und Kommentare zum vorliegenden Bericht bei den Reviewern Dr. Stefanie Roth, Dr. Christoph Gürtler, Dr. Kai Lämmerhold, Prof. Dr. André Bardow, Dr. Stefan Schäfer, Dr. Grischa Baier und Silke Niehoff.

Prof. Dr. Klaus Töpfer und Prof. Dr. Mario Tobias danken wir für die Initiierung und Begleitung der Forschungsarbeit zu CCU am IASS. Außerdem danken wir Prof. Dr. Mark Lawrence und Dr. Stefan Schäfer für ihre Betreuung und engagierte koordinative Unterstützung.

Weiterer Dank gilt den Projektpartnern im Projekt CO₂ntext für die stets anregende und sehr konstruktive Zusammenarbeit, insbesondere Prof. Dr. André Bardow und Dr. Niklas von der Assen vom Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) der RWTH Aachen, Prof. Dr. Walter Leitner und Dr. Markus Hölscher vom Institut für Technische und Makromolekulare Chemie (ITMC) der RWTH Aachen und Dr. Christoph Gürtler, Dr. Martina Peters, Dr. Annika Stute und Dr. Karsten Malsch von der Covestro GmbH.

Wir danken außerdem allen Teilnehmern unserer Diskussionsveranstaltungen für ihre Bereitschaft zum kritischen Dialog und für spannende Gespräche.

Anmerkungen zur Autorenschaft

Der Bericht führt die Projektergebnisse der beteiligten Autoren zusammen und wurde von Barbara Olfe-Kräutlein, Henriette Naims und Thomas Bruhn verfasst. Sie danken Ana Maria Lorente Lafuente (IASS Fellow bis April 2016) für ihre hilfreichen Beiträge, insbesondere zu Kapitel 7, Szenarienentwicklung zur Kennzeichnung von CO₂-basierten Produkten.

Ana Maria Lorente Lafuente ist alleinige Autorin des Kapitels 4, Life Cycle Assessment von CCU. Die Autoren schlagen daher hierfür folgende Zitierweise vor: Lorente Lafuente, A. M.: Life Cycle Assessment von CCU. In: Olfe-Kräutlein, B., Naims, H., Bruhn, T., Lorente Lafuente A.M. (2016). CO₂ als Wertstoff. Herausforderungen und Potenziale für die Gesellschaft, Potsdam: IASS. DOI 10.2312/iass.2016.025.

Alle Rechte vorbehalten. Die Inhalte des Werkes und das Werk selbst unterliegen dem deutschen Urheberrecht. Die Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und jede Art der Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtes bedürfen der schriftlichen Zustimmung der jeweiligen Autoren. Die Vervielfältigung von Teilen des Werkes ist nur zulässig, wenn die Quelle genannt wird.

Inhalt

- 1. Zu dieser Studie** 3
 - 1.1.** Zum Projekt 3
 - 1.2.** Zum vorliegenden Dokument 4

- 2. Eine kurze Einführung in die Kohlenstoffdioxidnutzung** 7
 - 2.1.** CCU-Prozesse 7
 - 2.2.** CO₂-Quellen 7
 - 2.3.** Möglichkeiten und Grenzen 8
 - 2.4.** Anwendungsbeispiele für CCU-Technologien 9

- 3. Umweltauswirkungen von CO₂-Abscheidung** 15
 - 3.1.** Hintergrund 15
 - 3.2.** Umweltauswirkungen der Aminwäsche 16
 - 3.3.** Fazit 18

- 4. Life Cycle Assessment von CCU** 23
 - 4.1.** Hintergrund 23
 - 4.2.** Der Lebenszyklus eines CCU-Produkts 24
 - 4.3.** Die Notwendigkeit von Life Cycle Assessment (LCA) für die Bewertung von CCU 25
 - 4.4.** Welche Umweltaspekte von CCU-Technologien können mit LCA bewertet werden? 26
 - 4.5.** Erfassung von CCU-Prozessmodulen für die Erstellung einer Ökobilanz 26
 - 4.6.** Eine LCA-Methodik für die Bewertung von CCU 28
 - 4.7.** Die Notwendigkeit einer Konsensmethode für die Akzeptanz der Ergebnisse 28
 - 4.8.** Aktuelle Beiträge zur Entwicklung einer LCA-Methodik für CCU 29
 - 4.9.** Ist eine ökologische Gesamtbewertung von CCU-Technologien möglich? 30
 - 4.10.** Fallstudien für CCU-Ökobilanzen 31
 - 4.11.** Fazit 32

5. Ökonomische Aspekte von CCU-Technologien 35

- 5.1. Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen von CCU 35
- 5.2. Marktanalyse: CO₂ als Wirtschaftsgut 39
- 5.3. Eine Betrachtung möglicher volkswirtschaftlicher Potenziale von CCU 47
- 5.4. Empfehlungen für Entscheidungsträger 49

6. Wahrnehmung und Kommunikationsperspektiven von CCU-Technologien 51

- 6.1. Initiierung, Begleitung und Beobachtung von Dialogveranstaltungen mit unterschiedlichen Stakeholdern von CCU-Technologien 52
- 6.2. Bereitstellung von Informationsmaterial und Aufbau einer Informationsplattform zu CCU-Technologien für Laien 57
- 6.3. Wie werden Technologien zur CO₂-Nutzung von Stakeholdern wahrgenommen und bewertet? 59

7. Szenarientwicklung zur Kennzeichnung von CO₂-basierten Produkten 69

- 7.1. Möglichkeiten der umweltbezogenen Kennzeichnung von CO₂-basierten Produkten 69
- 7.2. Anmerkungen zu Aussagekraft und Eigenschaften von Umweltkennzeichnungen und -deklarationen 71
- 7.3. Umweltbezogene Botschaften von CCU-Produkten und -Prozessen 72
- 7.4. Szenarien für die Kennzeichnung von unter Anwendung von CCU-Technologien erzeugten Zwischen- und Endprodukten 75
- 7.5. Kennzeichnungsoptionen 79
- 7.6. Fazit 80

8. Abgrenzung der CO₂-Nutzung von CCS 83

- 8.1. Carbon Capture and Storage (CCS) 83
- 8.2. Gemeinsamkeiten und Unterschiede von CCU und CCS 83
- 8.3. Probleme aufgrund der Vermischung von CCU und CCS 84
- 8.4. Politische Relevanz der Unterscheidung zwischen CCU und CCS 85
- 8.5. Fazit 86

9.	CCU im Kontext der Energiewende	89
9.1.	CO₂-Quellen und mögliche Konflikte mit der Energiewende	89
9.2.	Energiespeicherung mit CCU zur Ergänzung der Energiewende	92
10.	Folgerungen und Empfehlungen für Entscheidungsträger und Multiplikatoren in Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft	93
10.1.	Umweltpolitische Potenziale/Einordnung von CCU	93
10.2.	Risiken durch Abscheidungstechnologien von CO₂ aus Rauchgasen	94
10.3.	LCA	94
10.4.	Ökonomie	95
10.5.	Kommunikation	96
10.6.	Möglichkeiten der Kennzeichnung von CO₂-basierten Produkten	96
11.	Zusammenfassung	99
12.	Glossar	102
13.	Referenzen	106

Abbildungsverzeichnis und Tabellenverzeichnis

- Abbildung 1:** Forschung zu CCU-Technologien am IASS 5
- Abbildung 2:** Kreisgrafik CCU-Technologien 6
- Abbildung 3:** Lebenszyklus eines potenziellen CCU-Produkts 24
- Abbildung 4:** Systemfließbild für ein CCU-Produkt 27
- Abbildung 5:** CO₂-Angebot und -Nachfrage ohne fossile Energieerzeugung 43
- Abbildung 6:** Die Webseite www.co2inside.de 58
- Abbildung 7:** Beispiele unterschiedlicher Typen von Umweltkennzeichen 71
- Abbildung 8:** Mögliche Botschaften eines unter Anwendung von CCU-Technologien hergestellten Produkts 73
- Abbildung 10:** Logo des Unternehmens Carbon Recycling International 78
- Abbildung 11:** CO₂-Variante des „Universal-Recycling-Symbols“ 78
-
- Tabelle 1:** Große internationale CCU-Förderprogramme 36
- Tabelle 2:** Potenzielle CO₂-Quellen 41
- Tabelle 3:** Einschätzung der weltweiten CO₂-Nachfrage 42
- Tabelle 4:** Neue Produkte auf CO₂-Basis aus der ganzen Welt 44
- Tabelle 5:** Übersicht über Hindernisse und Chancen in einer zukünftigen Kommunikation zu CCU-Technologien, gesehen aus der Perspektive von Kommunikationsexperten aus der chemischen Industrie 65
- Tabelle 6:** Übersicht über Hindernisse und Chancen in einer zukünftigen Kommunikation zu CCU-Technologien, gesehen aus der Perspektive von Teilnehmern einer Dialogveranstaltung am IASS 65
- Tabelle 7:** Übersicht möglicher Zertifizierungsszenarien für CCU-Produkte und -Prozesse 74
- Tabelle 8:** Pro und kontra CCU-Label 80

Abkürzungsverzeichnis

B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
BECCS	Bio Energy with Carbon Capture and Storage
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
CAT	Katalysezentrum
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation/Carbon Capture and Use
CCUS	Carbon Capture Utilization and Storage
CDU	Carbon Dioxide Utilisation
Climate KIC	Climate Knowledge and Innovation Communities
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CR	Carbon Recycling
CRI	Carbon Recycling International, isländisches Unternehmen
DIN	Deutsche Industrienorm
DOE	Department of Energy
EGR	Enhanced Gas Recovery
EU ETS	EU Emission Trading System
EOR	Enhanced Oil Recovery
IASS	Institute for Advanced Sustainability Studies
ICCDU	International Conference on Carbon Dioxide Utilization
IF	Europäischer Innovationsfonds
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
ITMC	Institut für Technische und Makromolekulare Chemie
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LTT	Lehrstuhl für Technische Thermodynamik
NGO	Nichtregierungsorganisation
PCR	Product Category Rules
PtG	Power to Gas
PtL	Power to Liquids
PtX	Power to X
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SCOT	Smart CO ₂ Transformation Project
SDG	Sustainable Development Goals
UBA	Umweltbundesamt
UWG	Gesetz gegen den unlauteren Wettbewerb
LCSA	Life Cycle Sustainability Analysis
PCR	Product Category Rules



GRAPHIC RECORDING:
GABRIELE-HEINZEL.COM
- 2014 -

Diese Illustration ist ein gezeichnetes Protokoll („Graphic Recording“) der Diskussionsveranstaltung „Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Die Zeichnung beinhaltet verschiedene Argumentationslinien und Fragen, die die Diskussionen prägten. Siehe hierzu auch Kapitel 6.

1. Zu dieser Studie

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist ein Grundbaustein allen Lebens auf der Erde. Mittlerweile ist CO₂ jedoch durch den starken Anstieg vor allem industrieller Emissionen als klimaschädlicher Abfall und Treibhausgas zu einer Bedrohung für Menschheit und Natur geworden. Bereits seit fast 50 Jahren verfolgt die chemische Forschung die Idee, das Molekül CO₂ als Rohstoff nutzbar zu machen (Aresta & Dibenedetto 2010). Im Kontext der Ölkrisen in den 1970er-Jahren und bedingt durch die Erfordernisse des aktuellen Klimaschutzes stieg weltweit das Interesse an der Erforschung und Entwicklung von Technologien, die CO₂ als Kohlenstoffquelle nutzen könnten. Etliche Regionen in Europa, aber auch in Nordamerika und Asien haben Förderprogramme ins Leben gerufen, die solche Technologieentwicklungen unterstützen (BMBF 2013, Climate-KIC 2014, US DOE o.D.-b).

Das Ziel dieser Bemühungen ist es, das klimaschädliche Gas als Rohstoff in ganz unterschiedliche industrielle Produktionsprozesse einzubinden. Hiermit könnten mithilfe von CO₂ nicht nur nützliche Grundstoffe und Produkte hergestellt werden. Vielmehr imitieren diese Technologien auch einen natürlichen Kohlenstoffkreislauf (Peters et al. 2011). Gleichzeitig haben sie das Potenzial, den Verbrauch anderer fossiler Ressourcen zu verringern und somit möglicherweise nicht nur zur Erweiterung der Rohstoffbasis, sondern auch zur Schonung natürlicher Ressourcen und zur Emissionsverminderung beizutragen (von der Assen, Jung & Bardow 2013). Technologische Durchbrüche und Fortschritte sind derzeit sowohl in den Abscheidungstechnologien als auch in der Katalyse und Umwandlung von CO₂ zu beobachten (Aresta 2010, Klankermayer & Leitner 2015, Mikkelsen, Jorgensen & Krebs 2010, Peters et al. 2011, Smit, Park & Gadikota 2014, Styring et al. 2011, Wilcox 2012). Erste

neuartige CO₂-basierte Produkte erreichen aktuell die Märkte.

1.1. Zum Projekt

Die chemisch-technische Weiterentwicklung von Technologien zur Kohlenstoffdioxidnutzung ist in Deutschland nicht zuletzt dank der umfangreichen Förderprogramme des BMBF (BMBF 2013) und des gegebenen Interesses eines rohstoffarmen Industrielandes an einer zusätzlichen Kohlenstoffquelle breit gefächert aufgestellt. Die wissenschaftliche Identifikation, Analyse und Bewertung von gesellschaftlichen Potenzialen und Herausforderungen, die mit diesen Technologien verbunden sind, befinden sich hingegen noch in einem Stadium ungleich geringerer Beachtung (Jones & Jones 2016, Jones et al. 2014). Im Jahr 2012 setzte daher das Institute for Advanced Sustainability Studies e.V. (IASS) ein Projekt zum Thema „CO₂ als Wertstoff – Potenziale und Herausforderungen für die Gesellschaft“ auf, das auch den Rahmen für das Kooperationsprojekt „CO₂ntext“ mit den Projektpartnern RWTH Aachen (Institut für Technische und Makromolekulare Chemie – ITMC und Lehrstuhl für Technische Thermodynamik – LTT) und Bayer Material Science, seit 2015 als Covestro firmierend, schuf. Das Ziel dieses übergreifenden Projekts bestand darin, nicht entwicklungstechnologische Aspekte der sogenannten „Carbon Capture and Utilization“ (CCU)-Technologien, zum Beispiel die Auswirkungen auf einen CO₂-Markt oder deren Rezeption in den Medien oder bei Stakeholdern, interdisziplinär aus den Perspektiven der Natur-, Ingenieurs-, Wirtschafts- und Kommunikationswissenschaften zu betrachten. Inhalt des IASS-Projekts und der Kooperation war es, bereits in den größtenteils noch frühen Entwicklungsstadien der Technologien mögliche Herausforderungen und Potenziale für

Umwelt und Gesellschaft zu identifizieren und zu bewerten, die mit einer breiten Umsetzung der Technologien verbunden sein könnten. Auf diese Weise sollten insbesondere Parameter entwickelt werden, die die weitere Entwicklung des Technologiefelds bestmöglich an die gesellschaftlichen Anforderungen der Nachhaltigkeit anpassen (Naims et al. 2015). Im Rahmen der Kooperation CO₂ntext wurden daher wissenschaftliche Grundlagen für solche Empfehlungen erarbeitet, eine Informationsplattform aufgesetzt und mehrere Stakeholder-Dialoge durchgeführt.

Die Forschungsarbeit am IASS erfolgte inter- und transdisziplinär, das heißt über verschiedene Disziplinen hinweg und im steten Dialog und Austausch mit Vertretern aus den Bereichen Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft. Sie umfasste außerdem einen intensiven Diskurs mit Kollegen aus anderen am IASS durchgeführten Projekten und wurde inhaltlich ergänzt durch die Bearbeitung weiterer individueller, disziplinärer Forschungsfragen der involvierten Wissenschaftler.

Die Partner am ITMC, dem CAT Katalysezentrum und dem LTT sowie bei Covestro brachten in das Projekt CO₂ntext vor allem ihre langjährige Erfahrung und technische Expertise im Bereich CCU ein. Mit ihrem chemisch-technischen sowie prozess-, umweltbilanz- und industriespezifischen Know-how standen sie der interdisziplinären Forschung am IASS beratend zur Seite. Sie halfen den Mitarbeitern in den einzelnen Teilprojekten dabei, ein grundlegendes Verständnis für die technischen Pfade und mög-

lichen Produkte aufzubauen und gemeinsam im Dialog offene gesellschaftsrelevante Forschungsfragen zu identifizieren. Da die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment – LCA) ein wichtiges Werkzeug zur Ermittlung und Bewertung ökologischer Auswirkungen von CCU-Technologien darstellt und folglich eine entscheidende Grundlage für die künftige Entwicklung und industrielle Umsetzung dieser Technologien bildet, wurde in diesem Bereich sehr eng mit dem LTT der RWTH Aachen kooperiert, der über umfangreiche Erfahrungen auf diesem Gebiet verfügt und bereits zu Projektbeginn erste LCAs möglicher CO₂-Routen durchgeführt hatte.

1.2. Zum vorliegenden Dokument

Der vorliegende Abschlussbericht des Projekts „CO₂ als Wertstoff“ präsentiert nach einer kurzen Einführung in CCU-Technologien vorrangig eine Zusammenfassung der Projektergebnisse der Teilprojekte Ökologie, Ökonomie und Kommunikation, die am IASS durchgeführt wurden, sowie wichtige Schnittstellenthemen. Dabei wurde die Forschung zum Thema LCA vom IASS-Fellow Ana Maria Lorente Lafuente am LTT der RWTH Aachen durchgeführt und dort von Prof. André Bardow betreut. Der Bericht gibt zudem einen Überblick über die im Rahmen des Projekts durchgeführten Veranstaltungen und andere dialogorientierte Maßnahmen. Aus der Projektarbeit abgeleitete Implikationen und Empfehlungen für politische Entscheidungsträger folgen in den Abschnitten 8, 9 und 10.

- Life Cycle Analysis (LCA) von CCU (Kooperation mit dem LTT der RWTH Aachen)
- Umweltauswirkungen von CO₂-Abscheidungstechnologien

- Ökonomischer Überblick über CCU-Technologien
- Szenarioanalyse von CO₂-Angebot und -Nachfrage
- Analyse von ökonomischen Effekten von CCU (laufend, Promotionsprojekt Freie Universität Berlin)

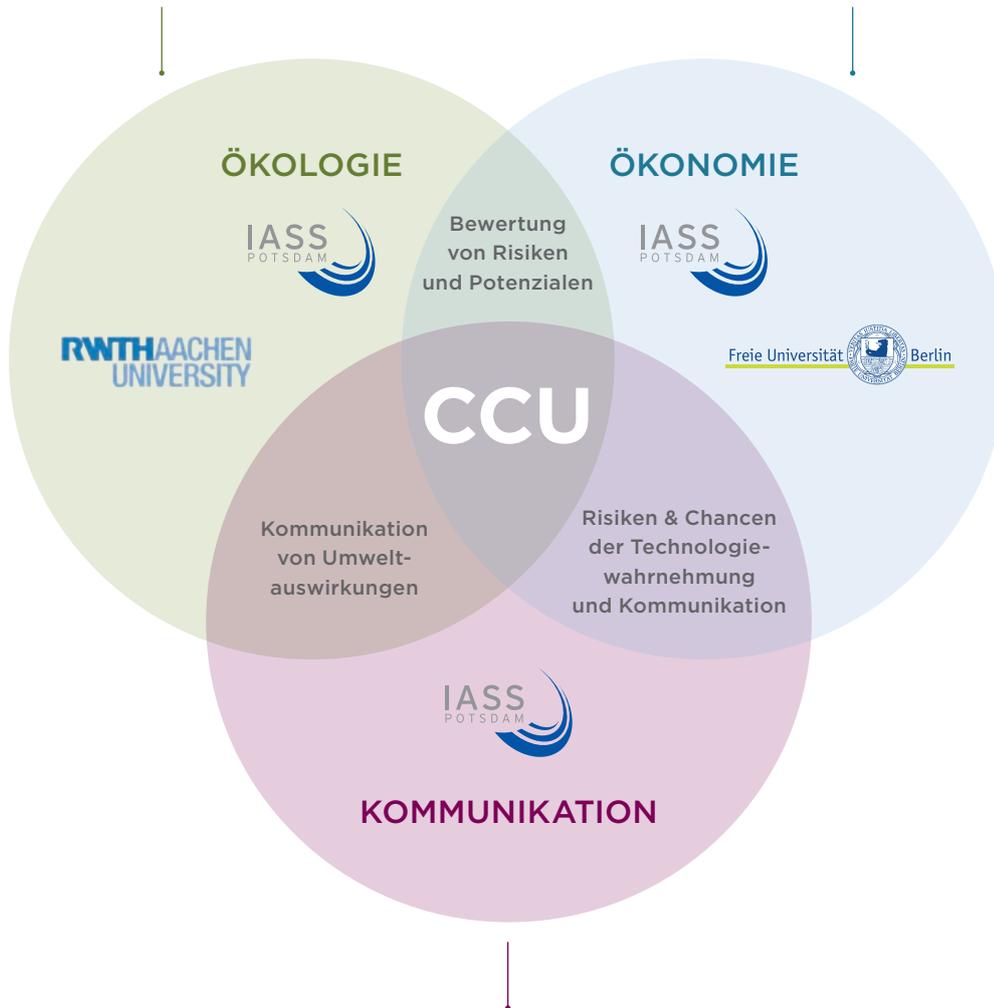


Abbildung 1: Forschung zu CCU-Technologien am IASS

Quelle: IASS

- Medienanalyse und Experteninterviews zur Wahrnehmung von CCU
- Bewertungsneutrale Informationsmaterialien zu gesellschaftlichen Aspekten von CCU
- Stakeholder-Dialoge zu CCU
- Regionale Aspekte in der Wahrnehmung von CCU (mit University of Sheffield)

Legende:

- Kohlenstoffdioxid
- Kohlenstoffverbindungen
- Umwandlung
- Abgabe an die Atmosphäre
- Nahe Zukunft: Bezeichnet hier Technologien, die bereits im Labormaßstab existieren.
- Ferne Zukunft: Bezeichnet hier Technologien, die technisch machbar sind, deren Weiterentwicklung derzeit jedoch, zum Beispiel aus Effizienzgründen, nicht in naher Zukunft wahrscheinlich ist.

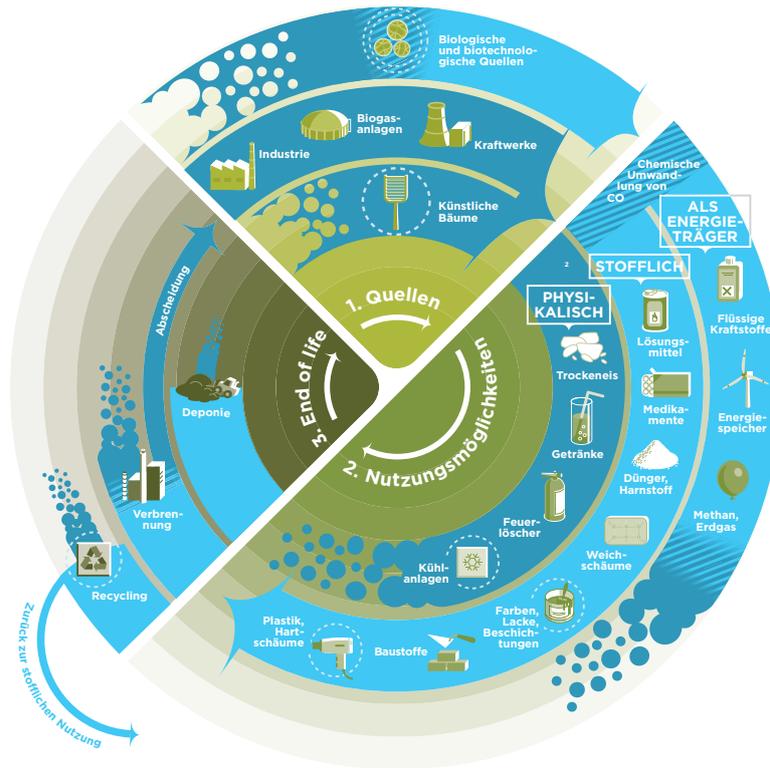


Abbildung 2: Kreisgrafik CCU-Technologien

Quelle: IASS, Infografik: Mario Mensch

CARBON CAPTURE AND UTILIZATION (CCU) AUF EINEN BLICK

Diese Kreisgrafik wurde im Zuge der Projektarbeit am IASS entwickelt. Sie dient der Übersichtsdarstellung von verschiedenen Elementen in unterschiedlichen CCU-Prozessen und kann insbesondere als Unterstützung im Dialog mit Laien verwendet werden.

Die Grafik ist unterteilt in die zeitlich aufeinanderfolgenden Abschnitte CO₂-Quellen, Nutzungsmöglichkeiten und „End of life“. Im Bereich Nutzungsmöglichkeiten sind die drei zentralen Nutzungspfade physikalische Nutzung (keine Konversion), stoffliche Nutzung und Nutzung als Energieträger (nach chemischer Umwandlung) mit jeweils beispielhaften Endprodukten dargestellt.

Alle in die Grafik integrierten möglichen Stationen sind mit einer zeitlichen Dimension ausgestattet – kein Kreis bedeutet am Markt, ein Kreis technisch möglich, aber noch nicht kommerziell umsetzbar, zwei Kreise in der Entwicklung.

Die blauen Pfeile stehen für das CO₂ – dunkel direkt als CO₂, hell als umgewandelte Kohlenstoffverbindung und in Punkten als Emission.

Die Kreisgrafik veranschaulicht außerdem, an welchen Stellen auf dem Weg zu einem CO₂-Kreislauf noch Lücken geschlossen werden müssen. Dies sind vor allem die „End of life“-Phase mit den Optionen Verbrennung, Deponie oder Recycling und die (erneute) Emission nach der physikalischen Nutzung oder der Nutzung als Energieträger.

Die Grafik ist auf der Webseite www.co2inside.de einsehbar und wird vom IASS auf Wunsch mit Verweis auf die Urheberschaft zur Nutzung zur Verfügung gestellt.

2. Eine kurze Einführung in die Kohlenstoffdioxidnutzung

2.1. CCU-Prozesse

Die Nutzung von Kohlenstoffdioxid in unterschiedlichen Produktionsprozessen wird „Carbon Capture and Utilization“ (CCU) oder auch „Carbon Dioxide Utilisation“ (CDU) (Jones et al. 2014) bzw. „Carbon Recycling“ (CR) (Bringezu 2014) genannt. Hiermit werden Technologien und Prozesse bezeichnet, die Kohlenstoffdioxid direkt oder nach chemischer Umwandlung als Teil einer Kohlenstoffverbindung in Materialien oder Energieträgern verwenden und so nutzbar machen. Vorrangig im US-amerikanischen Raum wird CCU auch unter dem Oberbegriff „Carbon Capture Utilization and Storage“ (CCUS) gefasst (NSF 2013). Ein CCU-Prozess umfasst die Abscheidung und Verdichtung von Kohlenstoffdioxid, falls erforderlich dessen Transport und die separate, funktionale Nutzung des CO₂ (von der Assen, Jung & Bar-dow 2013).

Trotz Gemeinsamkeiten in der möglichen Abscheidung von CO₂ aus industriellen Emissionen unterscheidet sich CCU grundlegend von der sogenannten „Carbon Capture and Storage“ (CCS)-Technologie. Während diese als „End-of-pipe“-Technologie eine dauerhafte unterirdische Speicherung von CO₂ anstrebt, bietet CCU die Möglichkeit, CO₂-Emissionen als alternative Kohlenstoffquelle ökonomisch sinnvoll zu verwenden, perspektivisch industrielle Kohlenstoffkreisläufe zumindest teilweise zu schließen (siehe hierzu auch Kapitel 8).

Da CO₂ sehr reaktionsträge ist, sind in der Regel Hilfsmittel nötig, um es an chemischen Reaktionen zum Aufbau energetisch höherwertiger Materialien zu beteiligen. Ein solches Hilfsmittel ist beispielsweise der Einsatz zusätzlicher Energie, entweder direkt oder in Form energiereicher Reaktionspartner,

der sich in der Gesamtbilanz letztlich negativ auf mögliche Einsparpotenziale auswirken würde. Alternativ oder ergänzend können chemische Katalysatoren eingesetzt werden, um einen insgesamt energetisch effizienteren Prozess zu entwickeln. Die dafür erforderliche Katalysatorforschung ist ein Schlüsselfaktor für die Entwicklung von CCU-Technologien (Klankermayer & Leitner 2015, Peters et al. 2011).

2.2. CO₂-Quellen

Das für CCU-Technologien benötigte CO₂ kann aus unterschiedlichen Quellen gewonnen werden, die jeweils mit unterschiedlichen Umweltauswirkungen und Kosten verbunden sind (siehe hierzu ausführlich Kapitel 3, 4 und 5). In einigen chemischen Prozessen, beispielsweise bei Gärungsprozessen oder bei der Ammoniakproduktion, entsteht sehr reines CO₂ als Nebenprodukt. Mithilfe von kommerziell etablierten Rückgewinnungstechnologien lässt sich dieses CO₂ isolieren und in höchster Reinheit für die Nutzung bereitstellen. Aber auch CO₂ aus Rauchgasen, sei es aus Kraftwerken oder anderen industriellen Punktquellen, kann mithilfe von Technologien zur CO₂-Abscheidung herausgefiltert und für eine weitere Nutzung (oder Speicherung) bereitgestellt werden.

Die CO₂-Konzentration der jeweiligen Quelle bestimmt im Wesentlichen, welche Technologien zur Abscheidung von CO₂ eingesetzt werden können. In der Regel gilt dabei, dass der technische Aufwand für die Abscheidung umso geringer ist, je höher die CO₂-Konzentration in dem Gasgemisch ist, aus dem die Abscheidung erfolgen soll. Die potenziellen industriellen CO₂-Quellen sind zahlreich und reichen von kleinen Industrieschornsteinen bis hin zu großen Kohlekraftwerken. Mit bereits existierenden Verfahren könnten sie heute schon große Mengen CO₂ in

unterschiedlichen Reinheitsgraden bereitstellen. Aufgrund der anfallenden Abscheidungskosten und der bislang geringen Nachfrage nach CO₂ kommen diese Technologien jedoch noch nicht verbreitet zum Einsatz, obwohl sie prinzipiell verfügbar wären.

Eine weitere CO₂-Quelle ist die Atmosphäre. Ein kommerziell noch nicht umsetzbarer Ansatz sieht vor, durch chemisch-technische Verfahren bereits emittiertes CO₂ wieder aus der Atmosphäre herauszufiltern (sog. Direct Air Capture). Diese Technologien sind energetisch allerdings noch aufwendig und daher kostspielig, werden aber bereits von einigen Firmen wie der Climeworks AG¹ in der Schweiz und der Firma Carbon Engineering² in Kanada im Pilotmaßstab getestet. Für eine breitere Umsetzung ist langfristig allerdings ein technologischer Sprung erforderlich, zum Beispiel in Form neuer Materialien, die als Absorber eingesetzt werden können (Krämer, Roth & Wunder 2015), um solche Technologien wirtschaftlich betreiben zu können. Sie werden aber immer nachteilig gegenüber höher konzentrierten CO₂-Punktquellen sein. Darüber hinaus sollten erneuerbare Energien verwendet werden³, damit die Abscheidung aus der Luft eine positive Klimabilanz aufweist.

Sowohl für die CO₂-Abscheidung aus der Luft als auch für die CO₂-Abscheidung aus industriellen Quellen gilt, dass die dafür herangezogenen Technologien in Abhängigkeit von den eingesetzten Materialien auch unerwünschte Umweltauswirkungen zur Folge haben können, die in manchen Fällen noch nicht hinreichend verstanden sind (siehe hierzu ausführlich Kapitel 3 und 4).

2.3. Möglichkeiten und Grenzen

Mit CCU-Technologien kann nur eine **überschaubare Menge von CO₂** industriell genutzt werden. Optimistische Schätzungen gehen davon aus, dass ungefähr 250 Mio. t (ca. 0,6 % der anthropogenen CO₂-Emissionen im Jahr 2014) für Chemikalien und 2 Mrd. t (ca. 5,5 % der anthropogenen CO₂-Emissionen im Jahr 2014) für Kraftstoffe genutzt werden könnten (Ausfelder & Bazzanella 2008). Verglichen mit anthropogenen Emissionen von ca. 37 Gt CO₂ im Jahr 2014 (Le Quéré et al. 2014) ist der möglicherweise zu verwertende Anteil mit rund 6 % relativ gering.

Für die insgesamt tatsächlich realisierbare Einsparung von CO₂-Emissionen existieren derzeit noch keine verlässlichen Schätzwerte, da die beschriebenen nutzbaren Emissionen nicht den tatsächlich eingesparten Emissionen entsprechen: Abhängig vor allem von der im Prozess **aufzuwendenden Energie** und den hiermit verbundenen Emissionen können die Emissionseinsparungen je nach Technologie stark variieren und kleiner oder auch größer als die genutzte Menge an CO₂-Emissionen sein. Sogar eine Zunahme an Emissionen ist möglich (siehe hierzu auch Kapitel 4).

Beachtet werden muss bei einer umfassenden Bewertung auch die **Speicherdauer** des CO₂ in den Materialien. Bei CCU-Anwendungen wird das verwendete CO₂ in den Produkten nur über deren Lebensdauer gebunden. Die erwartete Varianz der Speicherdauer reicht hier von Tagen oder Wochen (Kraftstoffe) über Jahre (Kunststoffe) bis hin zu Jahrhunderten für

¹ <http://www.climeworks.com/>, <http://www.zol.ch/bezirk-hinwil/hinwil/In-Hinwil-entsteht-erste-Anlage-zur-CO2Filterung-aus-der-Luft/story/14037273>.

² <http://carbonengineering.com/>, <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Pilotanlage-zur-CO2-Abscheidung-aus-der-Luft-in-Kanada-2847918.html>.

³ Auch die Verwendung von Erdgas kann unter Umständen vorteilhaft sein.

zementähnliche Baustoffe oder Dämmmaterialien (Styring et al. 2011, von der Assen, Jung & Bardow 2013). Bei direkter Nutzung, zum Beispiel zur Kühlung oder für karbonisierte Getränke, wird das CO₂ bei der Verwendung unmittelbar wieder emittiert.⁴ Folglich wird das CO₂ in den meisten Fällen lediglich mit sehr kurz- bis mittelfristiger Verzögerung in die Atmosphäre freigesetzt, wobei es natürlich zumindest theoretisch nach Verbrennungsprozessen (z. B. bei der Müllverbrennung) abermals aus den Produktgasen zurückgewonnen werden könnte.

Wie viel Erdöl oder andere **fossile Rohstoffe** insgesamt mit CCU-Technologien durch die Nutzung von CO₂ als Kohlenstoffquelle eingespart werden können, lässt sich aus heutiger Perspektive ebenfalls noch nicht beziffern. Auch hier müssen alle Anwendungen einzeln betrachtet und für jeden industriellen Pfad individuelle Einsparpotenziale berechnet werden. Ebenso spielen bei der Gesamtbewertung Prozessoptimierungen durch die Implementierung von CCU-Technologien eine Rolle, die wiederum zu indirekten Emissionseinsparungen führen können, in frühen Technologiestadien jedoch nur schwer absehbar sind.

Nicht zuletzt beeinflussen **standortpolitische Faktoren** eine institutionelle Förderung der Entwicklung von CCU-Technologien. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein hoch industrialisiertes Land mit einer starken Chemieindustrie wie beispielsweise Deutschland ein nicht nur ökonomisches und ökologisches, sondern auch politisches Interesse an der Erschließung alternativer Kohlenstoffquellen hat, die perspektivisch die Abhängigkeit von entsprechenden Importen reduzieren könnten.

Detaillierte Bewertungen zu den hier genannten Aspekten von CCU-Technologien sind in den thematischen Kapiteln dieser Studie zu finden. Darüber hinaus enthält das abschließende Kapitel dieses Berichts eine Zusammenfassung der Empfehlungen für Entscheidungsträger und Multiplikatoren aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft.

2.4. Anwendungsbeispiele für CCU-Technologien

2.4.1. Physikalische Nutzung von CO₂

Die sogenannte physikalische Nutzung von Kohlenstoffdioxid, das heißt seine Verwendung ohne eine chemische Umwandlung in fester oder flüssiger Form, ist heute bereits in verschiedenen Produkten gebräuchlich. Hierzu gehört der Einsatz

- als Kohlensäure in Getränken,
- als Trockeneis zur Kühlung von Lebensmitteln,
- in Feuerlöschern,
- als Düngemittel in Gewächshäusern,
- in Verpackungen bzw. zur Verbesserung der Haltbarkeit von Lebensmitteln.

Als Industriegas findet CO₂ darüber hinaus in speziellen Prozessen in begrenzter Menge Anwendung. Auch Klimaanlagen in Autos könnten in naher Zukunft verbreitet CO₂ als Kühlmittel nutzen (Daimler 2016, UBA 2016). Eine nennenswerte direkte industrielle Anwendung findet CO₂ auch in etlichen Ländern in Enhanced Oil/Gas Recovery (EOR/EGR) (siehe hierzu auch Kapitel 5). Hierbei wird Kohlenstoffdioxid zur tertiären Förderung in die entsprechenden geologischen Reservoirs gedrückt, um somit mehr Rohöl oder Erdgas aus der jeweiligen Quelle fördern zu können (US DOE o.D.-a).

2.4.2. Stoffliche Nutzung nach chemischer Umwandlung

Darüber hinaus kann CO₂ in einer chemischen Umwandlung zur Produktion sowohl energetisch höherwertiger als auch niederwertiger Kohlenstoffverbindungen als Rohstoff dienen. Diese sogenannte stoffliche Nutzung als Baustein für Materialien, Chemikalien und Minerale ist bereits seit Langem üblich in

- pharmazeutischen Produkten (z. B. Kopfschmerztabletten),
- Lösungsmitteln,
- Düngemitteln (z. B. Harnstoff).

⁴ Die hier beispielhaft genannten Prozesse sind bereits in der Verwendung etabliert und werden in die Betrachtung von neuen CCU-Technologien oft nicht mit eingeschlossen.

Außerdem ist die Nutzung von CO₂ heute technisch möglich bei der Herstellung von

- Kunststoffen und Schäumen,
- Farben und Beschichtungen,
- zementähnlichen Baustoffen (sog. Mineralen).

Bei diesen innovativen Verfahren handelt es sich in der Regel um Prozesse, die sich derzeit noch in der Entwicklung befinden oder erst kürzlich im Zuge der Forschung zu CCU-Technologien durch Durchbrüche in der Katalysatorforschung möglich wurden. Dass hier in den vergangenen Jahren entscheidende Durchbrüche erzielt werden konnten, ist nicht zuletzt privatwirtschaftlichen und öffentlichen Investitionen zu verdanken, die in verschiedenen Industriestaaten in CCU-Forschungsprogramme getätigt wurden.

Eine Übersicht über diese Förderprogramme sowie innovative Produkte auf CO₂-Basis, die heute bereits weltweit erhältlich sind, findet sich in Kapitel 5.

2.4.3. Nutzung in Energieträgern oder als Energiespeicher nach chemischer Umwandlung

Grundsätzlich ist es auch möglich, Kohlenstoffdioxid als Rohstoff zu nutzen, um Energieträger herzustellen. Aus CO₂ können beispielsweise in unterschiedlichen Prozessen folgende Energieträger produziert werden:

- flüssige Kraftstoffe wie Methanol (z. B. CRI in Island), Diesel (z. B. Sunfire in Dresden),
- synthetisches Erdgas (z. B. Audi in Werlte).

Solche Energieträger können der direkten Nutzung im Mobilitätsbereich dienen oder aber auch in Zukunft als Energiespeicher sinnvoll sein, um Spitzen in der Erzeugung erneuerbarer Energien zu nutzen.⁵ Eine umfassende Übersicht über die technologischen Möglichkeiten von CCU geben unter anderem folgende Publikationen:

- Verwertung und Speicherung von CO₂ (Ausfelder & Bazzanella 2008)
- Carbon dioxide as chemical feedstock (Aresta 2010)
- Carbon Capture and Utilization in the green economy (Styring et al. 2011)

⁵ Nähere Informationen zu diesen Konzepten können zum Beispiel der folgenden Literatur entnommen werden: Varone & Ferrari (2015), Sternberg & Bardow (2015).

CCU - ein Beispiel für technische Lösungen im Anthropozän?

Der Begriff „Anthropozän“ stammt aus der Erdsystemwissenschaft und wurde ursprünglich von Wissenschaftlern des International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) rund um Will Steffen, Eugene F. Stoermer und Paul Crutzen geprägt (Crutzen 2002, Steffen, Crutzen & McNeill 2007). Der Begriff fußt auf der Beobachtung gravierender Veränderungen in den Indikatoren, mit denen das Erdsystem in seiner Gesamtheit beschrieben wird (Steffen et al. 2015, Steffen, Grinevald et al. 2011). All diese Veränderungen, so die Schlussfolgerung des IGBP, lassen sich dabei auf das direkte oder indirekte Wirken menschlicher Eingriffe ins Erdsystem zurückführen. Auf dieser Basis gründet die Erkenntnis, dass sich die Erde nunmehr in einer neuen geologischen Epoche befindet, nämlich einem Zeitalter, in dem die Menschheit in ihrer kollektiven Gesamtheit die bestimmende Kraft im Erdsystem darstellt. Die Erde befindet sich also nicht länger im Holozän, sondern im Zeitalter des Menschen – dem Anthropozän (von griechisch anthropos = der Mensch). Seit seiner ersten Nennung wurde der Begriff „Anthropozän“ im vergangenen Jahrzehnt in Kreisen weit über die Erdsystemwissenschaft hinaus diskutiert und vor Kurzem offiziell von der International Commission on Stratigraphy als neues Erdzeitalter bestätigt (Carrington 2016, Subcommission on Quaternary Stratigraphy 2016).

Ausgehend von den Beobachtungen des IGBP über die gravierenden anthropogenen Veränderungen im Erdsystem entstand wenig später das Konzept der sogenannten planetarischen Grenzen (planetary boundaries) (Rockstrom et al. 2009). In diesem Konzept kommt die Überlegung zum Ausdruck, dass sich innerhalb der erdsystemischen Indikatoren gewisse Leitplanken identifizieren lassen, innerhalb derer aus erdsystemischer Sicht ein sicherer Handlungsrahmen (safe operating space) für die Menschheit gegeben ist.⁶ Diese Leitplanken sind dabei nicht isoliert voneinander zu betrachten, sondern bilden ein untereinander vernetztes Gefüge von Aspekten, die sich gegenseitig bedingen. Dieses Konzept, das vor allem die ökologischen Belastungsgrenzen des Planeten Erde widerspiegelt, wurde wiederum bald ergänzt um die sozialen Leitplanken einer globalen Menschheit (Raworth 2012).

⁶ Diese umfassen unter anderem eine intakte Ozonschicht, das globale Klima, das Maß an Biodiversität, chemische Verschmutzung oder einen intakten Phosphorkreislauf.

Die Diskussionen um das Anthropozän und später die planetarischen Grenzen haben den Blick auf die neue Rolle und damit verbundene Verantwortung der Menschheit für den Gesamtzustand des Planeten Erde gravierend geprägt (Steffen, Persson et al. 2011). Insbesondere haben sie einen in dieser Konkret-heit neuen globalen Bezugsrahmen geschaffen, innerhalb dessen sich Bestrebungen für Nachhaltigkeit verorten lassen (Töpfer 2013). Dieses neue Verständnis für die global wirksame Rolle der Menschheit und insbesondere die Vernetztheit der verschiedenen Herausforderungen drückt sich auch in den 2015 verabschiedeten Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen aus, die ökologische, soziale und wirtschaftliche Ziele in einen gemeinsamen Kontext bringen (UN Sustainable Development Knowledge Platform 2016).

Angesichts dieser Herausforderungen sind auch technologische Vorschläge zur Erreichung von Nachhaltigkeit mit dem Anspruch konfrontiert, in einem komplexeren Zusammenhang gedacht und entwickelt zu werden. Es gilt mehr denn je, Technologieentwicklung in einem multidimensionalen Zielkorridor zu begreifen und ganzheitliche Lösungsvorschläge zu entwickeln, die ökologische, soziale und wirtschaftliche Herausforderungen idealerweise gleichermaßen angehen. Vor diesem Hintergrund steht auch die Entwicklung von CCU-Technologien vor der Herausforderung, einen ganzheitlichen Beitrag in Richtung Nachhaltigkeit zu leisten und nicht nur isolierte Teilaspekte zu betrachten. Konkret bedeutet das im Fall von CCU, dass es beispielsweise gilt, sowohl zur Minderung der globalen Erwärmung als auch zur Entwicklung einer nachhaltigen Rohstoffbasis beizutragen. Dabei gilt es außerdem, Strategien zu entwickeln, die einen globalen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe (Dekarbonisierung) unterstützen können, ohne dabei beispielsweise zulasten der Biodiversität zu gehen.⁷

Allgemein befinden sich CCU-Technologien noch in einem frühen Entwicklungsstadium und haben daher das Potenzial, in ihrer weiteren Entwicklung zu zeigen, wie es möglich ist, in einem Rahmen globaler, miteinander vernetzter Herausforderungen einen technologischen Beitrag zu leisten, der mehrere dieser Ziele sinnvoll verbindet. Auf diese Weise könnten Konzepte zur CO₂-Nutzung ein Beispiel dafür schaffen, wie nachhaltige Technologieentwicklung möglich ist, die der neuen globalen und systemischen Verantwortung des Menschen im Anthropozän gerecht wird.

⁷ Dies wird beispielsweise im Kontext von Biokraftstoffen und biobasierten Materialien kontrovers diskutiert und kritisiert.



„Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Hier: Einführung in CO₂-Verwertung von Prof. Dr. André Bardow, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, RWTH Aachen. © IASS/Christian Kruppa



„Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Moderation: Christoph Drösser, ZEIT. © IASS/Christian Kruppa



3. Umweltauswirkungen von CO₂-Abscheidung

3.1. Hintergrund

Für eine ganzheitliche Bewertung der Umweltauswirkungen von CCU-Technologien ist es wichtig, zusätzlich zu den Umweltauswirkungen der eigentlichen *Nutzungstechnologien* („Utilization“) auch zu beachten, aus welchen Quellen das zu nutzende CO₂ gewonnen wird („Capture“). Als Quellen kommt grundsätzlich eine Vielzahl von Möglichkeiten in Betracht, von natürlichen CO₂-Quellen wie beispielsweise in Gesteinen über große industrielle Punktquellen wie die Abgasströme von Kohlekraftwerken oder Zementwerken bis hin zur Umgebungsluft (von der Assen et al. 2016). Die jeweilige Konzentration von CO₂ variiert dabei sehr stark (von 0,04% in der Atmosphäre bis hin zu über 90% im Abgasstrom einer Ammoniaksynthese oder der Fermentierung von Biomasse; siehe hierzu auch Kapitel 5.2.1).

Da es für CCU-Technologien oft erforderlich ist, dass CO₂ in hoher Reinheit (> 99,9%) vorliegt (Markewitz et al. 2012), gilt für die allermeisten denkbaren Quellen, dass das CO₂ vor einer möglichen Nutzung mithilfe geeigneter Technologien abgeschieden und separiert werden muss. Diese CO₂-Abscheidung ist mit einem gewissen Aufwand verbunden, der in Abhängigkeit von der gewählten Quelle und der eingesetzten Technologie variiert und sich vor allem nach der Konzentration des CO₂ und der Menge von

Verunreinigungen in der jeweiligen Quelle richtet (siehe hierzu auch Kapitel 5.2.1).

Für die Abscheidung von CO₂ aus Kraftwerksabgasen, wie sie vor allem im Kontext der sogenannten CCS-Technologie diskutiert und entwickelt wird, oder auch für die Abscheidung von CO₂ aus der Umgebungsluft kommen aufgrund der geringen CO₂-Konzentration oft nur aufwendige Verfahren in Betracht, die jeweils mit unterschiedlichen Nebenwirkungen einhergehen können (Dautzenberg & Bruhn 2013). Die Klasse der Technologien, für die derzeit die umfangreichsten Erfahrungswerte vorliegen und die aktuell als Benchmark für die großskalige Abscheidung von CO₂, zum Beispiel in Gaskraftwerken, Öltraffinerien oder auch bei der Aluminiumproduktion, gilt (Ahn et al. 2013), sind nasschemische Wäscheverfahren mithilfe stark alkalischer Lösungen, vor allem die sogenannte „Aminwäsche“⁸, die seit den 1930er-Jahren bekannt ist und erfolgreich eingesetzt wird (Rochelle 2009). Vor allem ist es grundsätzlich möglich (anders als beispielsweise beim sogenannten Oxyfuel-Verfahren), chemische Wäscheverfahren wie die Aminwäsche nachträglich an bereits bestehenden Industrieanlagen nachzurüsten („Retrofit“). Aufgrund der besonderen Bedeutung dieser Technologie werden die Umweltauswirkungen der Aminwäsche im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

⁸ Bei nasschemischen Wäscheverfahren wird ein Abgasstrom durch eine sogenannte Absorberlösung geleitet. Das im Abgasstrom enthaltene CO₂ wird dabei von den Molekülen der Absorberlösung absorbiert und vom restlichen Abgasstrom getrennt. Im Fall der Aminwäsche basiert dieses Absorbergemisch auf einer Lösung aus Aminen. Als Amine werden Moleküle bezeichnet, die auf dreifach gebundenem Stickstoff basieren (organische Abkömmlinge des Ammoniaks). Durch Erhitzen der Absorberlösung in einem nachgeordneten Prozessschritt kann das absorbierte CO₂ wieder von der Aminlösung getrennt und in hochkonzentrierter Form abgeleitet werden. Die Aminlösung wird nach dem Erhitzen wieder zum ersten Prozessschritt zurückgeführt und steht für erneute CO₂-Absorption zur Verfügung. Eine anschauliche Darstellung chemischer Absorptionsverfahren ist zum Beispiel unter <http://www.tcmda.com/en/Technology/> zu finden. Für weitere Details zur Aminwäsche sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen: Rochelle (2009).

3.2. Umweltauswirkungen der Aminwäsche

Grundsätzlich führt eine CO₂-Abscheidung aufgrund des erhöhten Energieaufwands zu einer Reduktion der Effizienz eines Kraftwerks. Diese beträgt bei der Aminwäsche ca. 11 % (US DOE & NETL 2010). Nicht zuletzt aufgrund dieses erhöhten Energiebedarfs ist zu erwarten, dass die Abscheidung von CO₂ indirekt auch zu einer erhöhten Luftverschmutzung beitragen kann (Horssen 2011). Darüber hinaus entstehen bei der Aminwäsche gerade im Hinblick auf die Luftqualität noch einige weitere spezifische Umweltnebenwirkungen, die in den vergangenen Jahren zunehmend in den Fokus des Interesses der Wissenschaft und weiterer Akteure aus Industrie und Politik gerückt sind (Mertens et al. 2012).

Diese spezifischen Nebenwirkungen entstehen unter anderem dadurch, dass bei der Aminwäsche ein Teil der eingesetzten Aminlösung (ca. 160 g Amine pro abgeschiedener Tonne CO₂) (Knudsen, Karl & Randall 2009) in die Umgebungsluft der Abscheidungsanlage freigesetzt wird (Karl et al. 2014, Nielsen et al. 2010). Die freigesetzten Amine werden dabei sowohl in der Gasphase als auch in Form von Aerosol⁹ emittiert (Khakharia et al. 2013, Mertens et al. 2014). Die Menge freigesetzter Amine nimmt vor allem dann signifikant zu, wenn sich im zu reinigenden Abgas Ruß oder Schwefelsäureaerosole befinden (Khakharia et al. 2013).

Während diese Amine (üblicherweise Monoethanolamin – MEA oder Dimethylamin – DMA) an sich als nicht gefährlich angesehen werden, können sie durch verschiedene Reaktionsprozesse in der Atmosphäre zu schädlichen Nebenwirkungen führen. Diese umfassen

- ① die Bildung krebserregender Nitramine und Nitrosamine,
- ② die Bildung von sekundären Aerosolen,
- ③ die Bildung von bodennahem Ozon,
- ④ Risiken durch chemische Abfälle der verwendeten Aminlösung.

Die Sorge um die **Bildung von krebserregenden Nitraminen und Nitrosaminen**¹⁰ hat in den vergangenen Jahren sowohl in der Wissenschaft als auch bei staatlichen und anderen mit CCS beschäftigten Akteuren eine wachsende Aufmerksamkeit erregt und eine intensive Beschäftigung mit diesem Thema ausgelöst (Gentry et al. 2013, Knudsen, Karl & Randall 2009, Mertens et al. 2012, Nielsen et al. 2010, Rohr & Knipping 2011, Shao & Stangeland 2009, Veltman, Singh & Hertwich 2010). Dabei ist die Karzinogenität von Nitrosaminen gut erforscht, während die genauen Gesundheitsauswirkungen von Nitraminen noch nicht mit hinreichender Genauigkeit bekannt sind. Die norwegische Regierung ordnete daher für die Testanlage in Mongstad an, dass die Gesamtmenge der in die Luft freigesetzten Nitrosamine und Nitramine nicht über 0,3 ng/m³, die der in die Wasserversorgung freigesetzten Nitrosamine und Nitramine nicht über 4 ng/l liegen darf (Norwegian Climate and Pollution Agency 2010).

Während Veltman et al. 2010 schätzten, dass die Belastung von Trinkwasser mit giftigen Stoffen durch Aminwäsche in der Umgebung einer CO₂-Abscheidungsanlage auf das etwa Zehnfache der üblichen Konzentration ansteigen könnte (Veltman, Singh & Hertwich 2010), läge die zu erwartende Konzentration von Nitraminen und Nitrosaminen in der Luft (0,6–10 pg/m³), im Boden und im Trinkwasser (0,04–0,25 ng/l) im Umkreis einer aminbasierten CO₂-Abscheidungsanlage jüngsten Berechnungen zufolge unterhalb der Grenzwerte, die von der norwegischen Umweltbehörde als gesundheitsbedenklich angesehen werden (Karl et al. 2014).

⁹ Aerosole sind feste oder flüssige Schwebeteilchen in einem Gas. Sie können natürlichen Ursprungs sein wie zum Beispiel Pollen oder mineralischer Staub oder auch Verbrennungsrückstände wie Ruß. Als sekundäres Aerosol werden Partikel bezeichnet, die sich erst in der Atmosphäre durch Reaktionen an Kondensationskeimen gebildet haben.

¹⁰ Bei Nitraminen handelt es sich um eine bestimmte Unterkategorie der Amine, sogenannte nitrierte Amine, die eine NO₂-Gruppe enthalten. Ebenso verhält es sich bei den Nitrosaminen, die eine sogenannte Nitroso-Gruppe enthalten (NO).

Zugleich zeigen die Berechnungen jedoch, dass sich Interferenzeffekte bilden würden, die zu höheren Konzentrationen führen würden, sofern weitere CO₂-Abscheidungsanlagen vergleichbarer Größenordnung in einer Entfernung von weniger als 100–200 km betrieben würden. Zu beachten ist dabei, dass die Berechnungen spezifisch für die CO₂-Abscheidungsanlage im norwegischen Mongstad durchgeführt wurden, wo die Umgebungsluft nur eine geringe Verschmutzung aufweist. Die Resultate zur Bildung verschiedener Amindegradationsprodukte hängen jedoch sehr von den meteorologischen Bedingungen am Standort der CO₂-Abscheidungsanlage ab. Insbesondere für stark industrialisierte Regionen mit einer hohen Dichte von möglichen CO₂-Quellen wie beispielsweise das Ruhrgebiet (enCO₂re 2016) oder die Ostküste Chinas (Boren 2016) wäre im Fall einer großflächigen Einführung von aminbasierter CO₂-Abscheidung daher mit deutlich höheren Konzentrationen von Nitraminen und Nitrosaminen zu rechnen, als sie für die Umgebung der Anlage in Mongstad berechnet wurden. Diese genauer zu quantifizieren wäre Gegenstand detaillierter atmosphärenchemischer Modellsimulationen, ähnlich denen, die für die Region um Mongstad entwickelt und verwendet wurden.

Karl et al. weisen zudem darauf hin, dass die aktuellen Gesundheitsrichtlinien für die erlaubte Konzentration von Nitrosaminen mit 0,1 ppt (z. B. in Norwegen) niedriger liegen, als mit den derzeit verfügbaren Messmethoden nachweisbar wäre (Karl et al. 2014). Im Vorfeld eines eventuellen Anlagenbaus wären daher detaillierte Berechnungen für die spezifischen Gegebenheiten der entsprechenden Anlage notwendig, um sicherzustellen, dass diese Grenzwerte im direkten Umfeld der zu bauenden CO₂-Abscheidungsanlage nicht überschritten werden. Methoden und Mechanismen für solche Simulationen wurden von Karl et al. im Zuge ihrer aktuellen Arbeiten entwickelt und stehen der Öffentlichkeit zur Verfügung (Karl et al. 2014).

Insgesamt werden die chemischen Reaktionen von Aminen in der Atmosphäre und im CO₂-Absorber derzeit noch intensiv untersucht (Fine, Goldman & Rochelle 2014). Infolge der Sorge um die Auswirkungen von Aminemissionen werden daher seit kurzer Zeit Bemühungen unternommen, Verfahren zu entwickeln, die Amine aus dem Abgas einer CO₂-Abscheidungsanlage herausfiltern oder zerstören könnten, beispielsweise mithilfe von UV-Licht und Wasser (Dai & Mitch 2015, Shah, Dai & Mitch 2013).

Aktuelle Forschungsergebnisse belegen, dass im Fall von erhöhten Aminemissionen aufgrund von CO₂-Abscheidungsanlagen mit einer erhöhten **Bildung von sekundären Aerosolen** zu rechnen ist (Borduas, Abbatt & Murphy 2013, Tang et al. 2013). Aerosole sind flüssige oder feste Schwebstoffe und Partikel, die zur Luftverschmutzung gezählt werden. Sie können sich schädlich auf die menschliche Gesundheit auswirken und als Kondensationskeime die Wolkenbildung und das Klima beeinflussen (Finlayson-Pitts & Pitts 1997). Insbesondere in Regionen mit einer ohnehin schon durch Aerosole bedingten erhöhten Luftverschmutzung könnte sich dieser Aspekt als besonders problematisch erweisen. Jüngste Berechnungen beziffern die möglichen Gesundheitskosten infolge der Partikelbildung durch die Freisetzung von Ammoniak aus der Absorberlösung von Aminwäschanlagen auf 31–68 US-Dollar pro abgeschiedener Tonne CO₂, sofern nicht zusätzliche Ammoniakfilter an den Anlagen installiert werden (Heo, McCoy & Adams 2015).

Die für diesen Zweck zu verwendenden Amine gehören zur Klasse der sogenannten flüchtigen (volatilen) organischen Verbindungen (VOCs), die leicht verdampfen und unter Beteiligung von Stickoxiden (NO_x) unter anderem für die **Bildung von bodennahem Ozon**¹¹ verantwortlich sind (Atkinson 2000). Insbesondere in Regionen mit erhöhter NO_x-Belastung wie zum Beispiel dem Ruhrgebiet oder anderen Regionen mit einer hohen Dichte an Kraftwerken

¹¹ Bodennahes Ozon wird auch als fotochemischer Smog bezeichnet und wird als Luftschadstoff angesehen, da es auf Pflanzen und Menschen als Reizgas wirkt.

und Industrieanlagen ist daher als Folge von aminbasierter CO₂-Abscheidung mit einer erhöhten Bildung von bodennahem Ozon zu rechnen, das als sogenannter fotochemischer Smog bereits heute in vielen Städten und Regionen ein Problem für die Luftqualität darstellt und mit Risiken für die menschliche Gesundheit (insbesondere für die Atemwege) und unter anderem auch das Pflanzenwachstum einhergeht (Finlayson-Pitts & Pitts 1997, McKee 1993).

Neben diesen Nebenwirkungen durch die atmosphärische Degradation von Aminen ist die verwendete Aminlösung zudem nur bedingt recycelbar und müsste letztlich als **chemischer Abfall** entsorgt werden, was wiederum mit schädlichen Auswirkungen für Umwelt und Gesundheit verbunden sein kann. Aktuelle Schätzungen zufolge würden pro 1 Mio. abgeschiedene t CO₂ etwa 3.500–4.000 t Aminabfälle anfallen, die sich im Zuge von Technologieverbesserungen möglicherweise auf bis zu 1 kg Abfall pro 1 t abgeschiedenes CO₂ reduzieren ließen (Dautzenberg & Bruhn 2013). Die Konsequenzen der Entsorgung dieser Aminabfälle im Hinblick auf die Bildung von CO₂, H₂O (Wasserdampf) und möglicherweise auch dem stark klimawirksamen Treibhausgas N₂O (Lachgas) sind jedoch bisher ungeklärt und erfordern eine zeitnahe Quantifizierung. Auch vor dem Hintergrund dieser möglichen unerwünschten Nebenwirkungen werden derzeit vermehrt Konzepte für eine effizientere Rückführung und Mehrfachnutzung der verwendeten Aminlösungen entwickelt (Reynolds et al. 2012). Des Weiteren werden Alternativen zur Aminwäsche intensiv erforscht, zum Beispiel in Form von Adsorption oder Membranen.

3.3. Fazit

Der Aufwand für die Abscheidung von CO₂ und damit auch die möglichen Umweltauswirkungen hängen eng mit der Konzentration der jeweiligen CO₂-Quellen zusammen. Das Beispiel der Aminwäsche zeigt, dass die möglichen Umweltauswirkungen komplexer sein können als lediglich die Folgen für das Klima im Hinblick auf die Auswirkungen von CO₂-Emissionen, beispielsweise durch einen erhöhten oder reduzierten Energiebedarf. Vielmehr bedarf es im Rahmen einer LCA (siehe hierzu auch Kapitel 4) einer genauen quantitativen Analyse der möglichen Bildung von gesundheitsgefährdenden Luftschadstoffen. Für manche dieser Schadstoffe (etwa Nitramine) liegen jedoch noch keine Studien vor, die eine hinreichend genaue Bewertung ihrer Gesundheitsgefährdung erlauben.

Abschließend bleibt festzustellen, dass die Aminwäsche unter Gesichtspunkten der Gesundheits- und Umweltverträglichkeit nach aktuellem Wissensstand nicht als unbedenklich eingestuft werden kann. Dies bezieht sich jedoch – und das ist von zentraler Bedeutung – vor allem auf den großskaligen Einsatz, wie er für Carbon Capture and Storage vorgesehen ist. Die Aminwäsche wird vor allem als notwendig erachtet, um an großen Emittenten große Mengen CO₂ abzuscheiden. Bei kleinen Anlagen mit geringeren Abscheidungsmengen sind die zu erwartenden Umweltauswirkungen dagegen entsprechend geringer. Diese Umweltauswirkungen für verschiedene Skalen eines möglichen Einsatzes von Aminwäsche zu quantifizieren bleibt eine wesentliche Aufgabe für die gegenwärtige Forschung zu diesem Thema.

Wie in den Kapiteln 5 und 8 gezeigt wird, sind die Gesamtmengen CO₂, die für CCU-Anwendungen abgeschieden werden müssen, deutlich geringer als die Mengen, die für CCS im Gespräch sind. Wie in den entsprechenden Ausführungen deutlich werden wird, ist es insbesondere möglich, den kurz- bis mittelfristigen Bedarf an CO₂ für CCU-Anwendungen auch aus höher konzentrierten CO₂-Quellen zu decken, für die der Einsatz von Aminwäsche nicht erforderlich ist. Der Bedarf an CO₂ für CCU kann also mithilfe von Abscheidungstechnologien gedeckt werden, die nicht die hier erläuterten Risiken der Aminwäsche aufweisen.

- Bei großskaligem Einsatz, beispielweise der Abscheidung der gesamten CO₂-Emissionen großer fossiler Kraftwerke, wie er für CCS vorgesehen ist, kann die Aminwäsche gegenwärtig nicht als unbedenklich eingestuft werden.
- Für die Abscheidung vergleichsweise kleinerer Mengen CO₂, wie sie derzeit und in absehbarer Zukunft für CCU-Anwendungen erforderlich sind, liegen derzeit keine Bedenken über signifikante Umwelt- und Gesundheitsrisiken vor.
- Insbesondere durch die Nutzung höher konzentrierter CO₂-Quellen für die Versorgung mit CO₂ kann ein Einsatz nasschemischer Absorptionsverfahren vermieden werden.
- Zukünftige Entwicklungen im Bereich aminbasierter Verfahren zur CO₂-Abscheidung sollten dafür Sorge tragen, dass eine Freisetzung von Anteilen oder Degradationsprodukten der verwendeten Amine in die Umwelt und insbesondere in die Atmosphäre vermieden wird. Dies könnte beispielsweise durch Immobilisierung der verwendeten Amine oder die Integration geeigneter Filteranlagen geschehen.

EIN VERGLEICH MIT DER NATÜRLICHEN NUTZUNG VON CO₂ IN WÄLDERN

Um mögliche Beiträge zur Eindämmung des Klimawandels besser einordnen zu können, ist es interessant, CCU mit der natürlichen Nutzung von CO₂ als Rohstoff in Wäldern zu vergleichen. In der Literatur finden sich verschiedene Schätzungen für einen möglichen langfristigen CO₂-Verbrauch durch CCU-Technologien. Für Chemikalien und Materialien wird zumeist ein möglicher Verbrauch von rund 200 Mio. t CO₂ p. a. geschätzt, während die Produktion von Kraftstoffen auf lange Sicht rund 2 Mrd. t CO₂ verbrauchen könnte (siehe Kapitel 2 und 5). Für langfristige und großskalige CO₂-Reduktionen durch CCU-Technologien existiert derzeit noch keine verlässliche Schätzung.

Im Vergleich dazu beseitigt das Wachstum von terrestrischen Ökosystemen jährlich ungefähr 3 Mrd. t Kohlenstoff aus der Atmosphäre, was rund 11 Mrd. t CO₂ entspricht (Canadell & Raupach 2008). Eine Bestimmung des Beitrags von Wäldern und forstwirtschaftlichen Maßnahmen zur Mitigation des Klimawandels ist komplex, derzeit wird er im Bereich von 30 % der globalen CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Kraftstoffe sowie der Nettoentwaldung angesiedelt (Canadell & Raupach 2008). Wie bei CCU ist es auch bei forstwirtschaftlichen Maßnahmen schwierig, die Dauerhaftigkeit der Speicherung und das Ausmaß der möglichen gespeicherten Kohlenstoffmengen in Wäldern zu bestimmen, da die Bestände stark schwanken (Canadell & Raupach 2008).

Während Aktivitäten im Bereich Aufforstung oft mit Konflikten in der Landnutzung und soziokulturellen Aspekten verbunden sind, wird eine Reduktion der Maßnahmen zur Abholzung als kosteneffektiverer und gleichzeitig bedeutender Eingriff zur Reduzierung der Treibhausgase bewertet (Canadell & Raupach 2008). Für eine Bestimmung der Effizienz und des Potenzials dieser Maßnahmen müssen allerdings auch andere komplexe biophysische Effekte berücksichtigt werden, beispielsweise der mögliche Düngungseffekt von atmosphärischem CO₂ für das Wachstum der Bäume oder die potenzielle Reflexion von Sonnenlicht durch die Wälder. Das übergreifende Potenzial zur Speicherung von Kohlenstoff in Wäldern hängt somit davon ab, wie sich der Klimaschutz mit anderen Aspekten und Risiken vereinbaren lässt (Canadell & Raupach 2008).

Auch wenn für CCU-Technologien noch verlässliche Schätzwerte für eine großskalige Emissionsreduktion fehlen, die auch mögliche Substitutions- und Effizienzeffekte beinhalten, scheinen die Mengenpotenziale durch die Erhaltung der Wälder und mögliche Aufforstungsmaßnahmen mit rund 11 Mrd. t CO₂ deutlich größer zu sein als die potenziellen Nutzungsmengen für CCU-Anwendungen. Genau wie für mögliche zukünftige Entwicklungen von CCU-Technologien sind allerdings auch für solche natürlichen CO₂-Nutzungswege eine detaillierte Betrachtung von potenziellen ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Effekten und ein systemischer Ansatz notwendig, um eine möglichst nachhaltige Kombination der zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen zu identifizieren.



„Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Hier: Kurzer Überblick über aktuelle Forschungsprojekte von Dr. Alexis Bazzanella, Leiter Forschungs- und Projektkoordination, DECHEMA. © IASS/Christian Kruppa



CO₂ Recycling – Option für Politik und Gesellschaft? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 9. November 2015 am IASS in Potsdam. Hier: Dr. Hans-Jörn Weddige, ThyssenKrupp AG. © IASS/René Arnold



4. Life Cycle Assessment von CCU

Ana Maria Lorente Lafuente

Das Arbeitspaket LCA im Projekt CO₂ntext wurde, wie eingangs beschrieben (siehe Kapitel 1.1), am LTT der RWTH Aachen durchgeführt. Die in diesem Arbeitspaket erarbeiteten Ergebnisse sind bereits Gegenstand verschiedener Veröffentlichungen (Pan, Lorente Lafuente & Chiang 2016, von der Assen, Lorente Lafuente et al. 2015).

Der folgende Textabschnitt erörtert daher in erster Linie die Notwendigkeit und grundsätzliche Herangehensweise der LCA-Methodik sowie deren Möglichkeiten und Beschränkungen bei der Bewertung der Umweltauswirkungen von CCU-Technologien. Für weitere detaillierte Ergebnisse der Projektarbeit zu LCA für CCU-Technologien sind separate wissenschaftliche Fachveröffentlichungen in Planung (Lorente Lafuente & Bardow, in Vorbereitung)¹².

4.1. Hintergrund

Obwohl der Schutz der Umwelt nicht der einzige Treiber für wirtschaftliche Akteure im CCU-Bereich ist, sind es häufig Umweltfragen, die in der öffentlichen Debatte über CCU-Technologien aufgeworfen werden. Interessanterweise dienen diese umweltbezogenen Argumente sowohl dazu, CCU-Technologien zu unterstützen, als auch dazu, Kritik an ihnen zu üben. Ein Teil der Kritik an CCU ist in den Gemeinsamkeiten mit CCS-Technologien in den ersten Prozessschritten des CO₂-Abfangs begründet (siehe hierzu auch Kapitel 6.3.3 und 8). CCS wird häufig wegen der möglichen „Auswirkungen auf die

Umwelt und Gesundheit“, wegen der „Gefahr von Undichtigkeiten, während die Anlage in Betrieb ist“, oder weil „der Transport von CO₂ möglicherweise nicht sicher ist“ (European Commission & TNS 2011) in einigen Ländern als unsicher wahrgenommen (Bruhn, Naims & Olfe-Kräutlein 2016, Wallquist, Vischers & Siegrist 2010).

Wie bereits beschrieben, haben CCU-Technologien das Potenzial, schädliche anthropogene Auswirkungen auf die Umwelt auf verschiedene Weise zu mildern: durch die Entwicklung von effizienteren Produktionsprozessen, durch die (zumindest vorübergehende) Speicherung von CO₂-Emissionen, durch den Ersatz fossiler Rohstoffe oder die Speicherung von Energie (siehe hierzu auch Kapitel 2). Allerdings sind positive Auswirkungen auf die Umwelt nicht garantiert, sondern hängen vom konkreten Prozess ab, vor allem, weil für die CO₂-Abscheidung ebenso wie in der Regel auch für die CO₂-Aktivierung in der chemischen Reaktion Energie notwendig ist.

In der aktuellen Phase der Technologieentwicklung, in der chemische Reaktionen teilweise noch im Labormaßstab sowie in einigen Pilotanlagen untersucht werden, sollten die erhofften Umweltpotenziale durch eine gründliche und transparente Analyse bestätigt werden. Eine solche Analyse erfordert eine differenzierte Betrachtung möglicher umweltbezogener Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg.

¹² Die Publikation wird auf der Webseite des LTT der RWTH bereitgestellt werden (<https://www.ltt.rwth-aachen.de/cms/LTT/Forschung/-ivnp/Publikationen/>).

4.2. Der Lebenszyklus eines CCU-Produkts

Die größte Herausforderung in der Entwicklung von CCU-Technologien liegt in der chemischen Umwandlung des reaktionsträgen CO₂-Moleküls. Zur Aktivierung von CO₂ ist in der Regel Energie erforderlich, bei deren Produktion wiederum CO₂-Emissionen anfallen. Diese neuen CO₂-Emissionen können je nach Anwendung sogar größer sein als die möglichen Einsparungseffekte. Um eine Aussage über die Gesamtbilanz einer CCU-Technologie treffen zu können, muss der gesamte Lebenszyklus eines CCU-Produkts betrachtet werden.

Abbildung 3 zeigt in einer vereinfachten Darstellung die Lebenszyklusphasen eines CCU-Produkts: Das CO₂ wird an einer Quelle erfasst, um dann mit anderen Ausgangsstoffen in einem chemischen Verfahren zu einer anderen chemischen Verbindung zu reagie-

ren. Das Ergebnis dieses Prozesses in Form eines CCU-Zwischenprodukts (siehe hierzu auch Textbox auf Seite 25) kann in einer neuen Reaktion in weitere Chemikalien (als weiteres CCU-Zwischenprodukt) umgewandelt, auf den Markt gebracht oder an den Hersteller eines CCU-Endprodukts geliefert werden. Dieses CCU-Endprodukt erfüllt während seiner Lebensdauer eine Funktion und wird in den meisten Fällen am Ende seiner Verwendung entsorgt. Aus der Sicht eines Chemieunternehmens, das ein CCU-Zwischenprodukt herstellt, sind in den meisten Fällen¹³ die CO₂-Abscheidung und der CO₂-Transport vorgelegte Prozesse, die stattfinden müssen, um den Rohstoff CO₂ zur Verfügung zu haben. Aus diesem Grund können Umweltauswirkungen von Abscheidung und Transport zusammen analysiert werden, um die umweltfreundlichste CO₂-Versorgung zu identifizieren und auszuwählen.

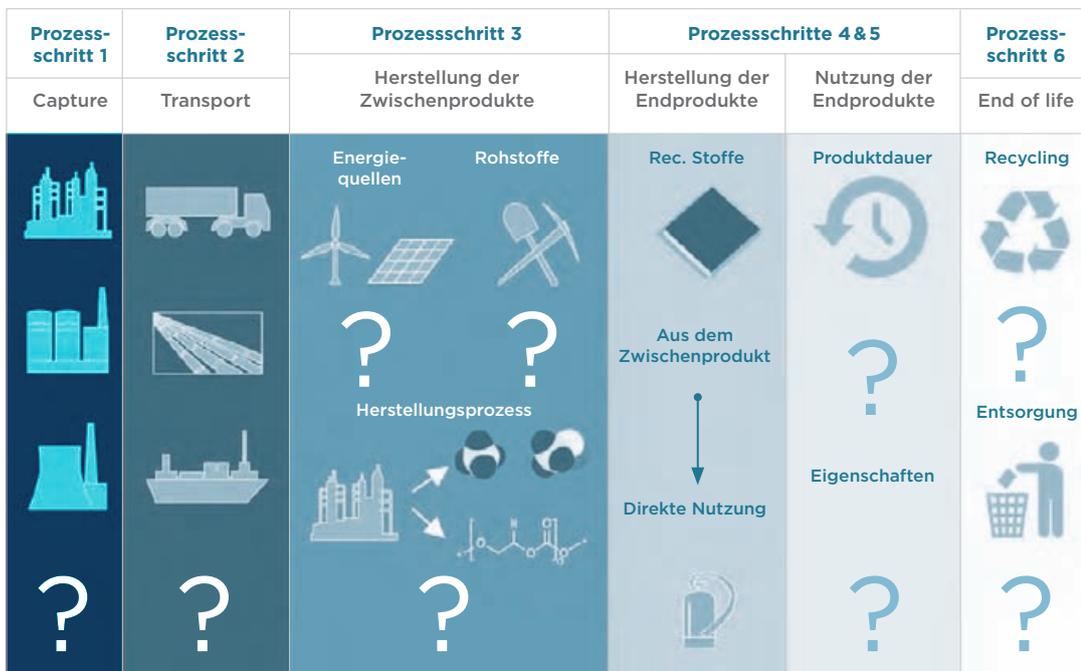


Abbildung 3: Lebenszyklus eines potenziellen CCU-Produkts

Quelle: Lorente Lafuente & Bardow

¹³ Einen Ausnahmefall stellen gekoppelte chemische Prozesse dar, die in unterschiedlichen Anlagen derselben Firma stattfinden.

CCU-PRODUKTE: EINE VIELZAHL VON ZWISCHEN- UND ENDPRODUKTEN

CCU-Technologien sind in den möglichen Anwendungsbereichen außerordentlich vielseitig und können viele verschiedene Branchen bedienen. CCU-Produkte können Zwischen- oder Endprodukte sein und somit sowohl im Geschäftskunden- als auch im Endkundenbereich relevant werden (siehe hierzu auch Kapitel 7).

Wird CO₂ direkt und ohne weitere Transformation verwendet, kann es verschiedene Aggregatzustände einnehmen: gasförmig, zum Beispiel in Form von Schweißgas, flüssig, zum Beispiel in Feuerlöschern, oder fest, zum Beispiel in Form von Trockeneis. In diesem Fall ist CO₂ sowohl Zwischen- als auch Endprodukt.

Mögliche CO₂-basierte Rohstoffe oder Zwischenprodukte sind zum Beispiel Chemikalien wie Ameisensäure, Formaldehyd, Methan oder Methanol oder spezifische Polymerbausteine wie Polyole.

Potenzielle Endprodukte werden folglich auf der Basis derartiger CO₂-basierter Rohstoffe oder Zwischenprodukte produziert und könnten zum Beispiel Sitzpolster oder Matratzen, harte Kunststoffe für Plastikgehäuse von Alltagsgegenständen oder Baustoffe für Häuser und Straßen sein.

Einige CO₂-basierte Stoffe, die sich, wie Methanol oder Methan, zur Energiespeicherung nutzen lassen, können sowohl als Zwischen- als auch als Endprodukte betrachtet werden.

4.3. Die Notwendigkeit von Life Cycle Assessment (LCA) für die Bewertung von CCU

Obwohl die CO₂-Nutzung intuitiv häufig als sinnvoll erscheint, ist eine quantitative und wissenschaftlich fundierte Analyse erforderlich, um mögliche Auswirkungen auf die Umwelt möglichst ganzheitlich zu bewerten. Die hier eingeführte Betrachtung der gesamten Prozesskette ist das Hauptmerkmal der sogenannten „Ökobilanz“ bzw. Life Cycle Assessment (LCA) (European Commission 2003). Nach den existierenden ISO-Standards ISO 14040 und ISO 14044 (ISO 2006b, c) muss eine Ökobilanz in vier Schritten durchgeführt werden: (1) Festlegung des

Ziels und des Untersuchungsrahmens, (2) Sachbilanz, (3) Wirkungsabschätzung und (4) Auswertung. Eine nach diesem Schema gegliederte ganzheitliche Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg stellt sicher, dass dessen Umweltauswirkungen nicht nur entlang des Lebenszyklus in einen anderen Lebensabschnitt verschoben werden. Ebenso zeigen die Ergebnisse, ob mögliche Umweltprobleme auf eine andere Kategorie von Auswirkungen verlagert wurden (z. B. Reduktion von CO₂-Emissionen, aber erhöhte Gesundheitsgefährdung). Folglich kann auf der Grundlage einer Ökobilanz verlässlich bewertet werden, ob und auf welche Weise ein neuer Prozess bzw. eine neue Technologie tatsächlich vorteilhaft für die Umwelt sein kann.

4.4. Welche Umweltaspekte von CCU-Technologien können mit LCA bewertet werden?

Für die Umweltbewertung wurden zunächst vor allem auf CO₂ ausgerichtete Ad-hoc¹⁴-Indikatoren vorgeschlagen (Anastas 1998, von der Assen, Jung & Bardow 2013), zum Beispiel die die Menge des pro Produkt eingesetzten CO₂ oder die Speicherdauer. Diese Ad-hoc-Indikatoren sollten dazu dienen, schon in der Entwicklungsphase mögliche Vorteile der CCU-Technologie zu quantifizieren, erwiesen sich aber als nicht ausreichend, weil sie ähnlich wie frühe LCAs¹⁵ nur Teilinformationen geben, die falsch interpretiert bzw. dazu führen können, dass unzutreffende Schlussfolgerungen gezogen werden (von der Assen, Jung & Bardow 2013, von der Assen, Lorente Lafuente et al. 2015, von der Assen et al. 2014). Zum Beispiel kann eine Maximierung des Anteils an verwendetem CO₂ die Prozessemissionen insgesamt erhöhen, wenn hierfür überproportional viel Energie erforderlich ist (von der Assen, Sternberg et al. 2015). In einem solchen Fall muss das Optimum der CO₂-Nutzung ermittelt werden, um den größten Nutzen für die Umwelt zu erzielen (von der Assen, Sternberg et al. 2015). Im Gegensatz dazu können sehr niedrige CO₂-Fixierungsmengen und CO₂-Speicherdauern irrelevant sein, wenn die Prozesseffizienz verbessert wird. So können zum Beispiel einige CO₂-basierte Kraftstoffe in einer Art und Weise hergestellt werden, die umweltfreundlicher sein könnte als herkömmliche Herstellungsverfahren, sodass die Nettoemissionen trotz der sehr kurzen Speicherdauer insgesamt niedriger ausfallen (von der Assen, Lorente Lafuente et al. 2015).

Im Gegensatz zur Bewertung anhand von Ad-hoc-Kriterien wird das Ergebnis einer vollständigen Ökobilanz hinsichtlich der Klimaauswirkungen in einer einzigen Zahl dargestellt, nämlich der Gesamtmenge

an CO₂-Äquivalenten¹⁶, die während des gesamten CCU-Prozesses emittiert werden. Diese Zahl ermöglicht es, das Potenzial eines Prozesses als Klimaschutzmaßnahme ohne weitere Berechnungen und Interpretationen zu bewerten (Forster et al. 2007).

Weitere Umweltauswirkungen wie Versauerung, Ozonabbau, Wasserverschmutzung, Toxizität, gefährliche Abfälle, der Verbrauch fossiler Ressourcen usw., die insbesondere im Rahmen der Herstellung von Chemikalien relevant sein können, können in einer Ökobilanz ebenfalls in Betracht gezogen werden (WBCSD 2014), zum Beispiel, um zu bewerten, wie sich der Ersatz toxikologisch problematischer Reaktanten durch CO₂ und H₂ auf die Umwelt auswirkt (Klankermayer & Leitner 2015).

Die Mehrheit der für Ökobilanzen von CCU-Produkten erforderlichen Daten ist in bereits existierenden LCA-Datenbanken enthalten, zum Beispiel in Ecoinvent (www.ecoinvent.org). Allerdings müssen diese Datenbanken weiterhin kontinuierlich aktualisiert und ergänzt werden. Insbesondere fehlen noch einige Charakterisierungsfaktoren für die Berechnung der Umweltauswirkungen. So ist es derzeit zum Beispiel aufgrund fehlender Daten und Faktoren noch nicht möglich, die tatsächliche Gesundheitsgefahr von Nitraminen und Nitrosaminen abzuschätzen, die bei der CO₂-Abscheidung im Aminwäscheverfahren gebildet werden (Brekke et al. 2012) (siehe hierzu auch Kapitel 3.1).

4.5. Erfassung von CCU-Prozessmodulen für die Erstellung einer Ökobilanz

Die ISO-Ökobilanzstandards empfehlen, das zu untersuchende Produktsystem – hier einen kompletten CCU-Prozess – in einem Systemfließbild zu beschreiben, in dem die Prozessmodule und ihre Wechselbeziehungen abgebildet werden. Dies erleich-

¹⁴ Die in Green Chemistry verwendeten Metriken zur Nachhaltigkeitsbewertung sind vor allem qualitativ.

¹⁵ Die ersten LCA-Studien, die für die Verpackungsindustrie durchgeführt wurden, können nur als Teilökobilanzen betrachtet werden, da sie nur eine Energieanalyse zum Vergleich von Optionen waren. Dies war das Hauptbedenken in diesem Sektor. Später wurden in den Bewertungen zusätzlich weitere Umweltaspekte wie die Verwendung von Ressourcen, Emissionen und Abfälle berücksichtigt.

¹⁶ Kohlenstoffdioxidäquivalenz bezeichnet eine Maßzahl des Beitrags zur globalen Erwärmung einer bestimmten Menge eines Treibhausgases über einen festgelegten Zeitraum (meist 100 Jahre) im Vergleich zu derjenigen von CO₂. Ergänzende Informationen zur Bewertung des Klimawandels sind zum Beispiel zu finden in Metz et al. (2005), S. 203.

tert wesentlich die Identifizierung der Inputs und Outputs (Ein- und Ausgänge), die als Elementar-¹⁷ und Wirtschaftsströme¹⁸ einzustufen sind. Abbildung 4 zeigt schematisch die wichtigsten Module eines CCU-Prozesses mit relevanten möglichen Umweltbelastungen. Diese werden in drei Kategorien unterteilt: in vorgelagerte, Haupt- und nachgelagerte Prozesse (oft auch als „Upstream“- , „Core“- und „Downstream“-Prozesse bezeichnet), je nachdem, ob sie vor, während oder nach der chemischen Reaktion stattfinden.

Das Systemfließbild zeigt außerdem mögliche Systemgrenzen bei der Erstellung der Ökobilanz.

Nicht alle der hier abgebildeten Prozessmodule sind für sämtliche CCU-Anwendungen relevant. Die schematische Darstellung zeigt jedoch einerseits die grundlegende Herangehensweise bei der Erstellung einer Ökobilanz, andererseits gibt sie ein Schema vor, nach dem CCU-Prozesse in Ökobilanzen erfasst werden können.

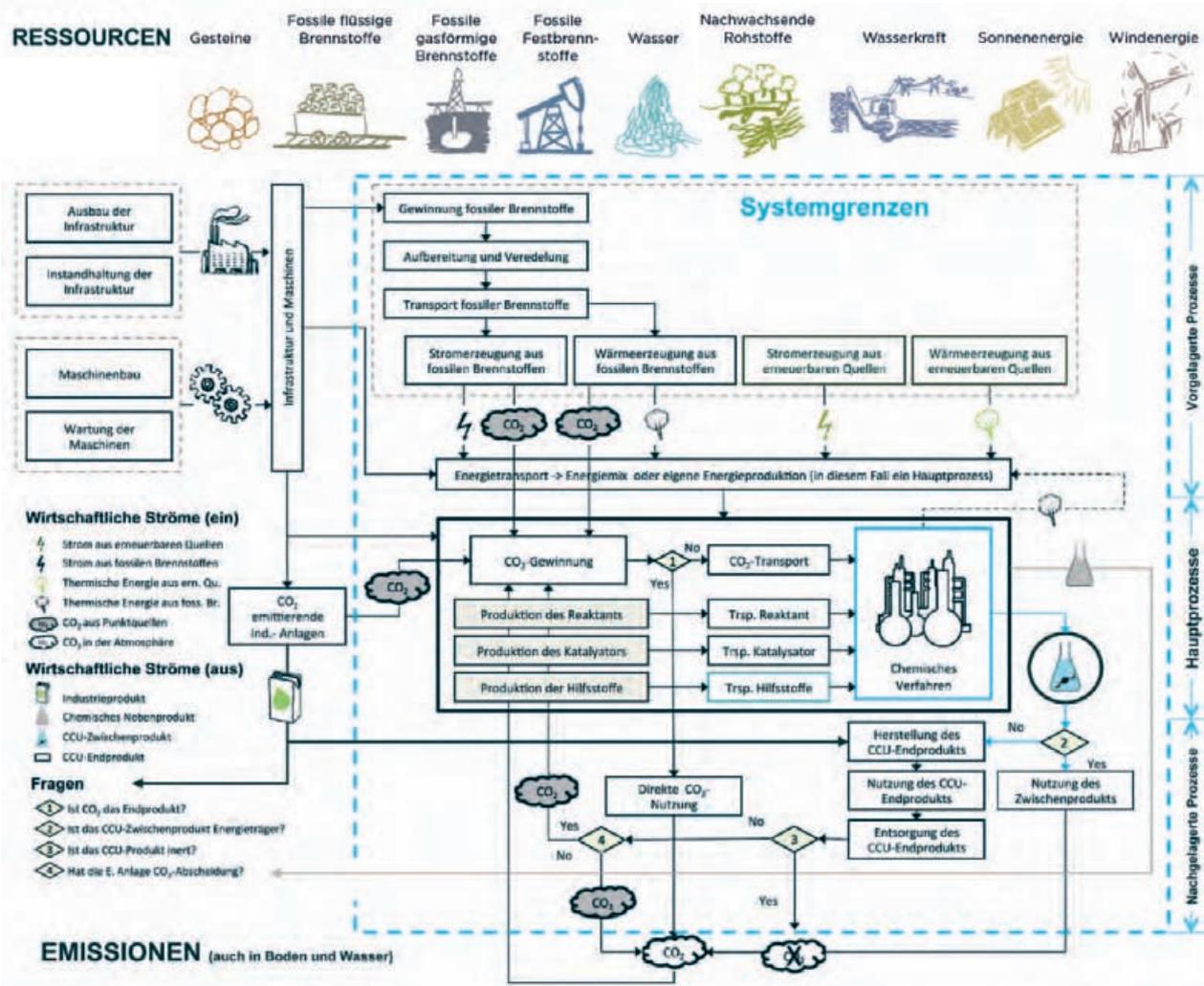


Abbildung 4: Systemfließbild für ein CCU-Produkt

Quelle: Lorente Lafuente & Bardow

¹⁷ Ein Elementarstrom ist der Stoff oder die Energie, welche dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde oder welcher das untersuchte System verlässt und ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird. Siehe auch DIN (2009).

¹⁸ Wirtschaftsströme treten zwischen Prozessen innerhalb der Technosphäre auf und unterliegen vorherigen und nachfolgenden menschlichen Transformationen. Siehe auch Guinee, Heijungs & van der Voet (2009).

4.6. Eine LCA-Methodik für die Bewertung von CCU

Die LCA ist eine rund 40 Jahre alte Methode, die kontinuierlich weiterentwickelt und in ihrer Aussagekraft verbessert wurde (Guinee et al. 2010). Die Bewertung der Umweltauswirkungen von CCU-Technologien mittels LCA kann daher als Beispiel dienen, um die Relevanz der Methodik aufzuzeigen, indem überprüfbare und umfassende Bewertungsmaßstäbe für Umweltauswirkungen von komplexen Produktionsprozessen entwickelt werden. Wie in den vorherigen Abschnitten bereits angesprochen wurde, ist im Hinblick auf CCU-Technologien zu klären, welche genauen Umweltauswirkungen diese aufweisen und ob durch sie zum Beispiel eine Reduktion von CO₂-Emissionen erreicht werden kann.

4.7. Die Notwendigkeit einer Konsensmethode für die Akzeptanz der Ergebnisse

Bereits im Jahr 1999 wurde die Verwendung der LCA-Methodik als Bewertungstool für die Umweltauswirkungen einer CO₂-basierten Chemikalie vorgeschlagen (Aresta & Galatola 1999). Ob und wie LCA-Methoden auf CCU-Prozesse angewendet werden können, ist folglich seit einiger Zeit Gegenstand verschiedener Diskurse. Einige LCA-Ergebnisse wurden bei verschiedenen Konferenzen vorgestellt und diskutiert oder in wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht (z.B. Aresta and Galatola 1999, Aresta, et al. 2002, Brentner, Eckelman & Zimmermann 2011, Borkowski, Zaimis & Khanna 2012, Campbell, Beer & Batten 2011).

Nicht in allen Fällen stellen die Publikationen genügend Informationen darüber bereit, wie die sehr allgemeinen Anforderungen und Richtlinien der in den ISO-Normen beschriebenen „LCA-Grundsätze und -Rahmenbedingungen“ (DIN 2009, ISO 2006c) im Detail angewendet wurden, um die Komplexität und Besonderheit der CCU-Technologien zu bewältigen. Wichtige Informationen wie die Festlegung der Systemgrenzen, die Auswahl der funktionellen Einheit oder die für die Zuordnung der Inputs und Outputs angewendeten Allokationsverfahren fehlen häufig (von der Assen, Jung & Bardow 2013, von der Assen, Lorente Lafuente et al. 2015, von der Assen et al.

2014). Die Abwesenheit gemeinsamer Definitionen und Terminologien für die aufkommende CCU-Technologie erschwerten die einheitliche Anwendung der Methodologie. So ist zum Beispiel für eine gut fundierte und einwandfreie Umweltbewertung von CCU anhand einer LCA erst eine genaue Definition erforderlich (von der Assen, Jung & Bardow 2013).

Sowohl auf europäischer als auch auf bundesdeutscher Ebene spiegelt sich die Anerkennung der Notwendigkeit von LCAs für CCU-Technologien wider: So verlangt zum Beispiel das BMBF in Deutschland im Rahmen des Förderprogramms CO₂Plus – Stoffliche Nutzung von CO₂ zur Verbreiterung der Rohstoffbasis „eine belastbare, wertschöpfungskettenübergreifende Bilanzierung des Lebenszyklus (Ökobilanz LCA) der neu zu entwickelnden Prozesse bzw. Produkte zum Abschluss der Projekte, z.B. nach ISO 14040 ff.“ (BMBF 2015).

Erwähnenswert ist auch, dass die jüngsten Entwicklungen im LCA-Bereich den traditionell reinen Umweltfokus um andere Dimensionen wie ökonomische oder soziale Aspekte der Nachhaltigkeit erweitern. Die sogenannte Life Cycle Sustainability Analysis (LCSA) ist somit ein Integrationsrahmen für verschiedene Modelle (Guinee et al. 2010). In diese Richtung könnte sich zukünftig auch die Bewertung der CCU-Methodik entwickeln, um in umfassenderen Lebenszyklusanalysen den innovativen Charakter der Technologien und die vielen existierenden Zusammenhänge insbesondere im Hinblick auf die wichtigen Nachhaltigkeitsziele bezüglich der Ressourceneffizienz und des Klimaschutzes zu prüfen und zu quantifizieren.

All diese Initiativen setzen die Festlegung gemeinsamer Bewertungskriterien voraus, die schließlich die Basis für die Entwicklung produktspezifischer Anforderungen (Product Category Rules – PCR) an eine Deklaration für CCU-Produkte (ISO 2006a, 2000) sein können. Eine solche PCR-Umweltdeklaration für CCU sollte Hinweise darauf geben, wie Ökobilanzen von CCU-Produkten durchzuführen sind, sowie festlegen, welche Informationen in den für die Öffentlichkeit bestimmten LCA-Berichten anzugeben sind. Eine solche Vereinheitlichung könnte eine transparente und vergleichbare Bewertung von CCU-Produkten ermöglichen und auf diese Weise auch die

Akzeptanz der LCA-Methodik und ihrer Ergebnisse unterstützen. Insbesondere könnte hierdurch die Kommunikation der CCU-Umweltaspekte nicht nur zwischen industriellen Akteuren in diesem Bereich, sondern auch mit NGOs, Verbrauchern und anderen Bezugsgruppen erleichtert und unterstützt werden (siehe hierzu auch Kapitel 7).

4.8. Aktuelle Beiträge zur Entwicklung einer LCA-Methodik für CCU

Grundlegende methodische Aspekte der LCA-Anwendung zur Bewertung von CCU-Technologien wurden bereits diskutiert, insbesondere vom LTT der RWTH Aachen, an dem diese Arbeit durchgeführt wurde (Jung, von der Assen & Bardow 2013, von der Assen, Jung & Bardow 2013, von der Assen, Lorente Lafuente et al. 2015, von der Assen et al. 2014). Diese Veröffentlichungen beschreiben einerseits die Anwendung der LCA-Methodik, um mögliche Schwierigkeiten bei der Umweltbewertung von CCU-Technologien zu umgehen. Andererseits beleuchten sie aber auch beispielhaft die wichtigsten Umweltaspekte von CCU-Technologien.

Im Folgenden werden, um den aktuellen Forschungsstand zu LCA für CCU-Technologien zu skizzieren, einige exemplarische Publikationen kurz beschrieben.

Eine LCA-Methode für CCU

In ihrem Artikel „Life-cycle assessment of carbon dioxide capture and utilization: avoiding the pitfalls“ (von der Assen, Jung & Bardow 2013) zeigen die Autoren, dass einfache Ad-hoc-Kriterien, die bis zu diesem Zeitpunkt von Wissenschaftlern verwendet wurden, um die Umweltauswirkungen von CCU zu beurteilen, nicht ausreichend belastbar sind (siehe hierzu Kapitel 4.4). Aus diesem Grund schlagen die Autoren in Einklang mit anderen CCU-Experten (Aresta et al. 2002, Aresta & Galatola 1999, Peters et al. 2011) stattdessen die Verwendung von LCA-Methoden vor. Der Artikel beschreibt die typischen Anwendungsfehler der LCA-Methodik für die Bewertung von CCU-Produkten anhand von illustrierenden Beispielen. Als wesentlichen Schritt identifizieren die Autoren die Bewertung des verwendeten CO₂ als Rohstoff mit eigenen Produktemissionen.

Eines der wichtigsten Probleme bei der Anwendung von LCAs zur Bewertung multifunktionaler Prozesse ist darüber hinaus die Auswahl der Allokationskriterien (Jung, von der Assen & Bardow 2013). Die Veröffentlichung unterstreicht die Auswirkungen, die eine solche Auswahl hat, wenn produktspezifische LCA-Ergebnisse für CCU-Prozesse benötigt werden, und gibt einige Empfehlungen. In „Life-Cycle Assessment Principles for the Integrated Product and Process Design of Polymers from CO₂“ (von der Assen, Lampe et al. 2015) wird diese methodologische Schwierigkeit in einem konkreten CCU-Beispiel dargestellt.

Schließlich schlagen die Autoren eine Methode zur Berücksichtigung der CO₂-Speicherdauer in einer zeitaufgelösten Metrik zur Messung des Beitrags zur globalen Erwärmung (time-resolved global warming metric) vor. Die vorgeschlagene Metrik ermöglicht die Quantifizierung des Klimaeffekts der Emissionsverzögerung bzw. -speicherung, der zwischen den unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von CO₂ in CCU erheblich variiert.

N. von der Assen, J. Jung, A. Bardow (2013). „Life-cycle assessment of carbon dioxide capture and utilization: avoiding the pitfalls.“ *Energy & Environmental Science* 6(9): 2721–2734.

Eine ökologische Bewertung verschiedener CO₂-Quellen

In der Veröffentlichung „Selecting CO₂ Sources for CO₂ utilization by Environmental-Merit-Order Curves“ (von der Assen et al. 2016) werden die Auswirkungen unterschiedlicher CO₂-Quellen auf die gesamten Umweltauswirkungen von CCU-Prozessen (siehe hierzu auch Kapitel 2.2) ausführlich dargestellt. Anhand von sogenannten Merit-Order-Kurven wird ein Ranking der ökologisch geeignetsten Kohlenstoffdioxidquellen im Hinblick auf die Kategorien Klimaschutz und Erhaltung fossiler Ressourcen vorgestellt. Darüber hinaus zeigt die Publikation mehrere Karten von Europa mit sogenannten „CO₂-Oasen“ und „CO₂-Wüsten“ und stellt dar, wie die CO₂-Versorgung in Abhängigkeit vom künftigen CO₂-Bedarf unter Berücksichtigung der Transportwege, der Entwicklung der kohlenstoffbasierten Industrie sowie der Strommärkte aussehen würde.

N. von der Assen, L. Müller, A. Steingrube, P. Voll, A. Bardow (2016). „Selecting CO₂ Sources for CO₂ utilization by Environmental-Merit-Order Curves.“ *Environmental Science & Technology* 50(3): 1093–1101.

Ein LCA-Leitfaden für die CCU-Praxis

In der hauptsächlich an Chemiker adressierten Publikation „Life cycle assessment of CO₂ capture and utilization: a tutorial review“ (von der Assen et al. 2014) wird eine spezifische Vorgehensweise für die Durchführung einer LCA zur Einschätzung von CCU-Produkten beschrieben. Neun besonders wichtige Aspekte für eine Ökobilanz von CCU-basierten Chemikalien werden identifiziert und anhand von Beispielen erläutert. Der Artikel betont, wie wichtig die richtige Planung der LCA-Arbeit ist. Besonders kritisch ist die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie der Systemgrenzen zu Beginn der Analyse. Empfehlungen für die Datenerfassung und die Berechnung der Umweltauswirkungen werden gegeben und um einige Hinweise auf die Auswertung und die Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse ergänzt.

N. von der Assen, P. Voll, M. Peters, A. Bardow (2014). „Life cycle assessment of CO₂ capture and utilization: a tutorial review.“ *Chemical Society Reviews* 43(23): 7982–7994.

LCA-Standards für CCU

Das Buchkapitel „Environmental Assessment of CO₂ Capture and Utilisation“ (von der Assen, Lorente Lafuente et al. 2015) erweitert den Inhalt der zuvor aufgeführten Veröffentlichung um den speziellen Fokus auf die Einhaltung der Vorschriften der LCA-ISO-Standards bei der Erstellung der Ökobilanz eines CCU-Produkts. Dies ist zwingend erforderlich, wenn LCA-Anwender ihre Ergebnisse der Öffentlichkeit kommunizieren wollen. Die Theorie und viele allgemeine Beispiele werden wiederum in dieser Veröffentlichung beschrieben.

N. von der Assen, A. M. Lorente Lafuente, M. Peters, A. Bardow (2015): „Environmental Assessment of CO₂ Capture and Utilisation.“ In: K. Armstrong, P.

Styring, E. A. Quadrelli (eds.): *Carbon Dioxide Utilization*. Amsterdam. Elsevier: 45–56.

LCA als Designwerkzeug für CCU-Prozesse

Weitere Überlegungen und Beispiele zur Notwendigkeit und Eignung von LCA als CCU-Designwerkzeug werden in der Dissertation von N. von der Assen „From Life-Cycle Assessment towards Life-Cycle Design of Carbon Dioxide Capture and Utilization“ ausführlich dargestellt.

N. von der Assen (2016): „From Life-Cycle Assessment towards Life-Cycle Design of Carbon Dioxide Capture and Utilization.“ <http://publications.rwth-aachen.de/record/570980>.

4.9. Ist eine ökologische Gesamtbewertung von CCU-Technologien möglich?

Wie zuvor erläutert, ist nach derzeitigem Wissensstand eine LCA die einzige Methode, mit der sich die Umweltauswirkungen eines Produkts, das unter Anwendung von CCU-Technologien entstanden ist, verlässlich bewerten lässt. Die in den beschriebenen Publikationen erläuterten methodologischen Empfehlungen gelten dabei stets für die Bewertung eines spezifischen CCU-Produkts.

Die Ergebnisse einer LCA können eine hohe Glaubwürdigkeit erreichen, wenn eine gute, das heißt transparent erstellte und nachvollziehbare Datenqualität gegeben ist, die alle Schritte des Verfahrens umfasst, darunter die CO₂-Quelle, die Parameter des chemischen Verfahrens, die Situation der Produktionsanlage sowie den Energiemix. Um allerdings eine allgemeinere Aussage über das ökologische Potenzial von CCU als Technologiefeld treffen zu können, müsste zunächst eine Vielzahl von möglichen CCU-Zwischenprodukten bewertet werden. Die derzeit umfangreichste verfügbare Studie, in der CO₂-basierte Chemikalien gelistet werden (Otto et al. 2015), enthält 123 Beispiele von Reaktionen, davon 23 Massenchemikalien und 100 Feinchemikalien. Der Umfang dieser stets wachsenden Liste von Anwendungsbeispielen zeigt, wie schwierig die Aufgabe

einer das ganze Technologiefeld umfassenden Bewertung zu bewältigen ist. Die Aufgabe, alle diese CCU-basierten Zwischenchemikalien zu bewerten, ist kurzfristig kaum zu erfüllen, vor allem, weil die CO₂-basierten chemischen Prozesse in der Regel neu sind und deswegen erst modelliert und in der Praxis erprobt werden müssen.

Dies erschwert folglich die Beantwortung der übergeordneten Frage nach den mit CCU erreichbaren Umweltzielen. Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Produkten erfordert die Annäherung an diese Frage eine wesentliche Verkürzung der sehr aufwendigen LCA-Arbeiten, die sich auf die wesentlichen Prozesselemente in der CCU-Verfahrenscheme konzentriert. Solche Screenings oder vereinfachte Ökobilanzen sind sinnvoll, um eine erste Vorstellung davon zu bekommen, welche die vielversprechendsten Optionen sind, wenn die wichtigsten Umweltfaktoren einer Technologie oder eines Produkts bekannt sind. Diese vereinfachten Methoden wurden deshalb auch von Umweltbehörden wie zum Beispiel der Europäischen Umweltagentur (Jensen et al. 1998) empfohlen, um Entscheidungsprozesse zu beschleunigen.

Auch wenn nach der Validierung der vereinfachten Bewertung eine komplette LCA angeschlossen werden sollte, um die Informationslücken zu füllen sowie die Qualität und Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern, kann eine vereinfachte (Screening-)Methode zu den Umweltauswirkungen von CCU-Verfahren bereits zwei wichtige Ziele erreichen:

- die Festlegung, welche der derzeit im Labor analysierten Optionen aus Umweltsicht ausgewählt und weiterverfolgt werden sollte für den Schritt in die Pilotphase und Industrialisierung;
- die kumulative Berechnung des ökologischen Potenzials von CCU-Anwendungen als Technologiefeld.

Eine Untersuchung hierzu wurde im Rahmen dieses Projekts durchgeführt und befindet sich im Veröffentlichungsprozess. Teile der Arbeit wurden bereits im Rahmen der ICCDU-Konferenz 2016 (www.iccdu2016.org.uk) vorgestellt.

Die Umweltinformation, die durch die Screening-Methode generiert werden kann, ermöglicht die Ermittlung eines globalen Umweltlastungspotenzials durch eine zukünftige Einführung der untersuchten CO₂-basierten Produkte auf dem Markt. Dafür müssen aber die nachgelagerten Prozesse („Vom Fabrikator bis zur Bahre“/„Gate to Grave“) ebenfalls mitberücksichtigt werden.

Hierin liegt eine methodische Einschränkung, denn diese Prozesse werden in den CCU-Ökobilanzen bisher in der Regel vernachlässigt, weil sich CCU-Zwischenprodukte oft chemisch nicht von herkömmlich produzierten Produkten unterscheiden und daher die Einführung von CO₂-basierten Produkten keine Änderung in den Produkteigenschaften verursacht. Außerdem spielt in der umweltbezogenen Bewertung auch die Dauer der CO₂-Speicherung eine entscheidende Rolle. Nicht zuletzt deswegen sollten auch Markteffekte analysiert werden, um die ökologischen Konsequenzen einer potenziell großskaligen Einführung von CCU-Technologien realistisch abbilden und bewerten zu können. Führt die Einführung eines CO₂-basierten Produkts zu einem gesteigerten Bedarf, resultieren hieraus auch zusätzliche Umweltauswirkungen. Zur Abbildung all dieser Aspekte ist ein sogenannter Folgeansatz (Consequential Approach) in der Anwendung der LCA erforderlich (Kätelhön et al. 2015).

4.10. Fallstudien für CCU-Ökobilanzen

CCU-Technologien könnten potenziell einen positiven Umweltbeitrag leisten. Wie beschrieben, bietet die Anwendung der LCA-Methodik hierfür die Möglichkeit einer fundierten und verlässlichen Bewertung. Dementsprechend gibt es bereits heute einige Veröffentlichungen, die die Umweltauswirkungen von CCU-Anwendungen anhand einer LCA bewerten. Diese zeigen, dass unter bestimmten Bedingungen die Anwendung von CO₂ in der Chemieindustrie vorteilhaft sein kann, zum Beispiel für die Herstellung von Polyolen (von der Assen & Bardow 2014, von der Assen, Sternberg et al. 2015). Sehr vielversprechend ist auch die CO₂-Sequestrierung in Mineralen, vor allem, wenn sich das resultierende Produkt als Ersatz für Zement verwenden lässt (Pan, Lorente Lafuente et al. 2016). In Bezug auf eine mögliche Nutzung im Kontext der Energiespeicherung existieren

Umweltbewertungen von CO₂-basiertem Methan, Methanol und Synthesegas (Sternberg & Bardow 2015, Sternberg & Bardow 2016), die mithilfe der LCA-Methodik ermittelt wurden. Gleichfalls werden die Umweltauswirkungen von synthetischen Kohlenwasserstoffbrennstoffen aus CO₂ in Sternberg und Bardow (2016) beschrieben.¹⁹

4.11. Fazit

Es kann pauschal nicht als sicher angesehen werden, dass CCU-Technologien per se zur Reduktion von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre beitragen. Vielmehr müssen mögliche Umwelteffekte von potenziellen Nutzungsoptionen von CO₂ von Fall zu Fall einzeln betrachtet werden. Hierfür ist die den ganzen Lebenszyklus eines Produkts betrachtende LCA-Methodik geeignet, weil das jeweilige Produkt in allen Phasen des Lebenszyklus einen Effekt auf die Umwelt haben kann.

Die LCA-Methodik ist ein sehr leistungsfähiges, aber auch sehr komplexes Werkzeug. Der ganzheitliche Ansatz erfordert die Analyse umfassender Prozessketten sowie der Interaktion von Input- und Outputströmen. Aus diesem Grund bedarf die Erstellung einer LCA der Zusammenarbeit von LCA-Experten mit Experten in dem zu untersuchenden Fachgebiet.

Bei der Bewertung von CCU-Anwendungen spielen sowohl die vorgelagerten Prozesse wie die Abscheidung des Kohlenstoffdioxids und die Herstellung der anderen Reaktanten als auch die chemischen Kernprozesse Schlüsselrollen bei der Ermittlung der Umweltauswirkungen. Deswegen ist zumindest eine Betrachtung „von der Wiege bis zum Fabrikator“ („Cradle to Gate“) erforderlich, wenn CO₂-basierte Prozesse als eine umweltfreundlichere Alternative zu herkömmlichen Prozessen bewertet werden sollen.

Die nachgelagerten Prozesse, die nicht mehr in der direkten Verantwortung der Anwender der CCU-Technologien liegen, können in der Regel zu Vergleichszwecken vernachlässigt werden, müssen aber in zwei Fällen unbedingt in Betracht gezogen werden:

- wenn das neue CCU-Zwischenprodukt nicht dieselbe chemische Zusammensetzung hat wie das herkömmliche Produkt, das substituiert wird und dadurch eine Änderung in den Produkteigenschaften, der Nutzungsdauer oder der Entsorgung verursachen könnte;
- wenn angestrebt wird, nicht relative, sondern absolute Aussagen über ein CCU-Produkt oder über die CCU-Technologien als Forschungsfeld zu treffen.

In diesen Fällen muss der gesamte Fußabdruck des Produkts berechnet werden und eine Analyse „von der Wiege bis zur Bahre“ („Cradle to Grave“) wird notwendig.

Im Allgemeinen ist die Erstellung einer LCA sehr zeitaufwendig, insbesondere aufgrund der benötigten extrem großen Datenmengen. Die Komplexität erhöht sich erheblich, wenn nicht nur spezielle, produktbezogene Empfehlungen gegeben werden sollen, sondern auch allgemeine Aussagen zu einer Technologie im Ganzen wie der CCU-Technologie, die zur Herstellung einer Vielzahl von Produkten mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungsbereichen wie Mineralien, Polymere, Chemikalien für die Energiespeicherung oder Brennstoffe verwendet werden kann. Weiterhin erschwert das frühe Entwicklungsstadium vieler CCU-Technologien eine detaillierte Bewertung.

Mehrere CCU-Routen wurden bereits anhand von LCAs analysiert. Viele von ihnen sehen aus Umweltsicht äußerst vielversprechend aus. In einigen Fällen ist das Potenzial aber nur gegeben, wenn Annahmen hinsichtlich der genauen Wertschöpfungskette gemacht werden, zum Beispiel bezüglich des Energiemix oder der CO₂-Quelle. Häufig hängen die Vorteile allerdings von der Verfügbarkeit von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien ab und davon, dass die Gewinnung des Rohstoffs CO₂ mit der Vermeidung von CO₂-Emissionen verbunden ist. Die gesamten möglichen Umweltbeiträge von CCU als Technologiefeld sind aber noch nicht bekannt. Hierzu sind auf

¹⁹ Die Diskussion verschiedener Beispiele ist in einer weiteren Veröffentlichung geplant (Lorente Lafuente & Bardow, in Vorbereitung); siehe hierzu auch Fußnote 11.

Basis der vorhandenen Bewertungen weitere Ergänzungen der LCA-Arbeiten erforderlich.

Die in den zwei wichtigsten ISO-LCA-Standards (siehe auch Abschnitt 4.3) vorgegebenen Richtlinien sind eher allgemein gehalten. Folglich unterliegt ihre Verwendung in der Praxis häufig einem Interpretationsspielraum. Um die Vergleichbarkeit der LCA-Ergebnisse mit Blick auf eine zuverlässige interne und externe Kommunikation zu gewährleisten (siehe hierzu auch Kapitel 7), müssen LCA-Praktiker Analysen jedoch unter den gleichen Bedingungen durchführen.

Aufgrund mangelnder Standards für CCU-Technologien ist es zu diesem Zeitpunkt der Technologieentwicklung empfehlenswert, dass die spezifischen Regeln zur Durchführung von CCU-bezogenen Ökobilanzen durch ein Expertenteam festgelegt werden. In der Folge wäre eine Übereinkunft der Community in Forschung und Industrie, die sich mit CCU-Technologien beschäftigt, notwendig. Diese sollte festlegen, wie die Ergebnisse ermittelt und präsentiert werden müssen. Wenn diese herausfordernde Harmonisierungsaufgabe jetzt angegangen würde, sollten die Anforderungen der ISO 14025 (ISO 2006a) die Basis dafür sein.

Sowohl die CO₂-Quelle als auch die Energiequelle sind von großer Bedeutung für die umweltbezogene Bewertung von CCU-Technologien. Aus diesem Grund können externe Faktoren wie der Anteil an erneuerbaren Energien im Strommix und die zukünftige Entwicklung der Kohleverstromung einen großen Einfluss auf die Weiterentwicklung und Implementierung von CCU-Technologien haben. Selbst wenn jedoch zukünftige CO₂-Nutzungstechnologien tatsächlich alle benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen beziehen würden, wäre eine Bewertung mithilfe von LCA-Methoden noch immer erforderlich. Diese dienen nämlich sowohl der fortdauernden Analyse und dem Auffinden von Verbesserungsoptionen als auch der Bewertung vieler weiterer Umweltaspekte, vor allem aber der Effizienz eines Prozesses, die letztendlich eine entscheidende Handhabe darstellt, um das menschliche und technische Handeln in Zukunft nachhaltiger zu gestalten.



5. Ökonomische Aspekte von CCU-Technologien

Ziel des Teilprojekts „Ökonomische Potenziale von CCU-Technologien“ war die Identifikation wirtschaftlicher Aspekte, die für die weitere Entwicklung von CCU relevant sind. Außerdem sollten ökonomische Potenziale betrachtet werden, die mit der Entwicklung des Technologiefelds der CO₂-Nutzung verbunden sein könnten. Diese Aspekte und Potenziale bilden einen Baustein der übergreifenden, interdisziplinären Betrachtung der gesellschaftlichen Perspektiven von CCU.

Im ersten Abschnitt werden die politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen von CCU beschrieben. Anschließend folgt eine Marktanalyse inklusive der Betrachtung aktueller und möglicher zukünftiger Szenarien von CO₂-Nachfrage und -Angebot. Im Anschluss werden die volkswirtschaftlichen Potenziale beleuchtet und Empfehlungen für Entscheidungsträger abgeleitet.

5.1. Politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen von CCU

Um die Wirtschaftlichkeit von CCU-Konzepten oder auch die Folgen eines möglichen breiten Einsatzes der Technologien zu verstehen, müssen zunächst die politischen Rahmenbedingungen für CCU betrachtet werden. Diese umfassen insbesondere die staatliche Förderung der Technologieentwicklung und die umweltpolitischen Rahmenbedingungen, die sich beide auch auf die Wirtschaftlichkeit der Technologien auswirken.

5.1.1. Staatliche Förderung von CCU-Technologien

In vielen Industrieländern wurden in den letzten Jahren öffentliche Förderprogramme ins Leben gerufen, die die technische Entwicklung von Technologien zur CO₂-Nutzung im Rahmen der nationalen Klima- und Ressourcenschutzbestrebungen finanziell unterstützen. In den Ländern, die auch CCS als Klimaschutzmaßnahme einplanen, existiert dabei zumeist ein gemeinsamer Fördertopf für beide Technologiefelder. Tabelle 1 gibt einen Überblick über einige große nationale CCU-Förderprogramme. Aus der Zielsetzung der jeweiligen Programme wird deutlich, dass vor allem in industrialisierten „Hightech“-Nationen in CCU ein strategischer Mehrwert aus technologischer, ökologischer, politischer und/oder ökonomischer Sicht erkannt wird. Darüber hinaus existieren etliche – aktuell ca. 23 – weitere Fördertöpfe, zum Beispiel der Europäischen Union. Eine umfassende Übersicht über diese Fördermittel in Europa bietet die folgende Datenbank: <http://database.scotproject.org/>.

Land	Name & Startjahr	Zielsetzung	Region	Summe	Webseite
China	National Key Research & Development Plan (2016)	Förderung von F&E in den Bereichen: niedrige CO ₂ -Emissionen im Energiebereich mit CCS, effiziente Umwandlung und Nutzung von CO ₂ . Demonstration von CO ₂ -Abscheidung mit Oxyfuel	China	155 Mio. CNY (- 20 Mio. EUR)	http://english.cas.cn/newsroom/china_research/201602/t20160217_159669.shtml
Deutschland	Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz (2010)	Förderung von Technologien zur stofflichen Nutzung von CO ₂ , chemischen Energiespeichern und energieeffizienten Verfahren	Deutschland	100 Mio. EUR	http://chemieundco2.de
Deutschland	Carbon2Chem (2016)	Erforschung der Nutzung von Hüttengasen der Stahlindustrie als Rohstoff für die chemische Produktion	Deutschland	62 Mio. EUR	https://www.fona.de/de/carbon2chem-21137.html
Deutschland	CO ₂ plus (2016)	Förderung der stofflichen Nutzung in CO ₂ -basierten Polymeren und Basischemikalien, der elektrochemischen und fotokatalytischen CO ₂ -Umwandlung sowie der effizienten Abtrennung	Deutschland	15 Mio. EUR	https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung.php?B=1055
Deutschland	Kopernikus-Projekt Power-to-X (2016)	Aufbau einer nationalen Forschungsplattform zur flexiblen Nutzung erneuerbarer Ressourcen mit Power-to-X-Technologien in den Leitmärkten Transport, Verkehr und Chemie	Deutschland	100 Mio. EUR	https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/power-to-x
Deutschland	r+impuls (2016)	Förderung von innovativen Technologien zur Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionssystemen vom Labormaßstab zur industriellen Anwendung	Deutschland	30 Mio. EUR	http://www.r-plus-impuls.de/r2-de/index.php
Frankreich	ADEME/Club-CO ₂ (verschiedene Förderprogramme) (2002)	Förderung von Projekten zur CO ₂ -Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung im Forschungs- und Demonstrationsmaßstab	Frankreich	unbekannt	http://www.captage-stockage-valorisation-co2.fr

Tabelle 1: Große internationale CCU Förderprogramme

Quelle: IASS

Land	Name & Startjahr	Zielsetzung	Region	Summe	Webseite
Großbritannien	Cross-Government CCS R&D Programme/ CO ₂ utilization projects (2011)	Technologien zur alternativen Nutzung von CO ₂ inkl. Mineralisierung und kommerzieller Produkte	Großbritannien	10 Mio. GBP (- 12 Mio. EUR)	https://www.gov.uk/government/publications/cross-government-carbon-capture-and-storage-r-d-programme-2011-2015-list-of-projects
Kanada, Alberta	CCEMC Grand Challenge (2010)	Förderung von Innovationen, die CO ₂ in neue Produkte umwandeln	Technologien aus der ganzen Welt mit potenzieller Anwendung in Alberta	35 Mio. CAD (- 24 Mio. EUR)	http://ccec.ca/grand-challenge/
Korea	Korea Carbon Capture and Sequestration R&D Center (2011)	Zentrales Forschungszentrum zur Entwicklung von Technologien zur CO ₂ -Abscheidung, -Speicherung und -Umwandlung (mit derzeit 11 Projekten in der chemischen und 6 in der biologischen Umwandlung von CO ₂)	Korea	151 Mio. USD (- 135 Mio. EUR) ²⁰	http://dh120.myelhub.com/ENG/html/main.html
Niederlande	Advanced Research Center Chemical Building Blocks Consortium (ARC CBBC) (2015)	Förderung von nachhaltigen Produktionsmethoden und der CO ₂ -Nutzung in einem gemeinsamen Forschungszentrum verschiedener Organisationen	Niederlande	11 Mio. EUR p. a.	http://www.nwo.nl/en/news-and-events/news/2015/national-research-centre-for-chemical-building-blocks.html
Niederlande	VoltaChem (2014)	Förderung der Technologieentwicklung für die indirekte und direkte Nutzung erneuerbarer Energie in der chemischen Industrie	Niederlande	2 Mio. EUR	http://www.voltachem.com
Taiwan	National Energy Program (2014)/Carbon Reduction and Clean Coal Focus Center	Entwicklung von Technologien zur CO ₂ -Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung im Hinblick auf eine Reduzierung der Emissionen in der kohlebasierten Energieversorgung	Taiwan	unbekannt	http://www.nepii.tw/language/en/focus-centers/carbon-reduction-and-clean-coal-focus-center/
USA	Recovery Act/ Innovative concepts for beneficial reuse of CO ₂ (2010)	Förderung innovativer Technologien der CO ₂ -Nutzung	USA	100 Mio. USD (- 90 Mio. EUR)	http://energy.gov/fe/innovative-concepts-beneficial-reuse-carbon-dioxide-0

²⁰ Für Details zu diesem Programm siehe Carbon Capture Journal (2013)

Die Förderprogramme erleichtern die Erprobung der Wirtschaftlichkeit von CCU-Technologien schon in frühen Stadien und mindern das Risiko der forschenden Organisationen. Bei der Förderung ist auch das Zusammenspiel über verschiedene Technologiefelder hinweg zu beachten. So wird in vielen Regionen die Förderung von CCU und CCS kombiniert (China,

USA, Großbritannien, Frankreich). Dies betrifft unter anderem Regionen, die langfristig auf fossile Energieträger wie Öl, Kohle und Gas setzen. In anderen Regionen gibt es eine eigenständige Förderung von CCU ohne einen Bezug zu CCS, die dafür aber in Kombination mit einer Förderung und Entwicklung erneuerbarer Energien gedacht wird.

EINE INNOVATIONSPOLITISCHE BEWERTUNG VON CCU

Der europäische Innovation Fund (IF) wird derzeit überarbeitet. Für die Gestaltung solcher langfristigen und dem Klimaschutz verpflichteten Innovationsprogramme stellt sich somit die Frage, ob und inwieweit das Technologiefeld CCU berücksichtigt werden sollte.

In einer gemeinsamen Studie mit Raffaele Piria von Adelphi im Auftrag des BMUB wurde eine klimapolitische Einordnung von CCU vorgenommen. Anschließend wurden innovationspolitische Schlussfolgerungen für die Gestaltung von klimaschutzorientierten Innovationsprogrammen gezogen, wobei sogenannte „No-Regret“-Optionen formuliert und spezifische Hinweise zur Förderung weiterer technologischer Optionen gegeben werden.

R. Piria, H. Naims, A. M. Lorente Lafuente (2016): „Carbon Capture and Utilization (CCU) – Klimapolitische Einordnung und innovationspolitische Bewertung.“ Berlin: Adelphi.

Link: <https://www.adelphi.de/de/publikation/carbon-capture-and-utilization-ccu-klimapolitische-einordnung-und-innovationspolitische>

5.1.2. Umweltpolitische Gegebenheiten als wirtschaftliche Rahmenbedingungen für CCU

Etablierte Verfahren der CO₂-Nutzung, zum Beispiel in der Lebensmittelindustrie oder der Harnstoffproduktion, bringen keine positive Ökobilanz mit sich (siehe hierzu auch Kapitel 4). Lediglich die neuen CCU-Verfahren, die vorrangig mit Blick auf einen ökologischen Mehrwert entwickelt werden, könnten somit durch umweltpolitische Instrumente in ihrer weiteren Entwicklung unterstützt werden. Wie bereits erwähnt, können verschiedene umweltpolitische Aspekte durch CCU-Technologien berührt werden. Potenzielle Beiträge sind somit in den Bereichen Rohstoffsicherheit, Klimaschutz und Energiewende anzusiedeln (Bruhn, Naims & Olfe-Krätlein 2016). Auch wenn ein möglicher Beitrag von CCU zum Kli-

maschutz nicht überbewertet werden sollte (Olfe-Krätlein et al. 2014), können dennoch konkrete klimapolitische Instrumente wie zum Beispiel ein entsprechend hoher CO₂-Zertifikatspreis für die weitere Entwicklung von CCU eine Rolle spielen (siehe hierzu auch Kapitel 8). Insbesondere im Nachgang der COP-21 in Paris ist zu erwarten, dass für die Umsetzung der ambitionierten Ziele in Zukunft eine Vielzahl von Emissionsreduktionsmaßnahmen eine verstärkte Rolle spielen wird. Die Ratifizierung und Umsetzung der Vereinbarung in konkreten Maßnahmen in Deutschland und Europa werden voraussichtlich noch bis 2017 dauern. Damit die konkreten Einzelmaßnahmen auch ein sinnvolles Gesamtbild ergeben, empfiehlt es sich, die Abscheidung und Nutzung von CO₂ nicht als isolierte Maßnahme zu betrachten, sondern vielmehr als eine Option bzw. einen Beitrag in einem Portfolio multipler technischer Lösungen.

Potenziell relevante umweltpolitische Maßnahmen und Prozesse, die die weitere Entwicklung, Etablierung und Wirtschaftlichkeit von CCU-Technologien beeinflussen, sind neben dem europäischen Emissionshandel (EU-ETS) auch die Fuel Quality Directive, die Renewable Energy Directive und weitere Maßnahmen der Energiewende (siehe hierzu auch Kapitel 9). Derzeit existieren nur schwache wirtschaftliche Anreize für Industrieunternehmen, ihre CO₂-Emissionen zu verringern. Insbesondere der dauerhaft niedrige Preis für CO₂-Zertifikate im EU-ETS (derzeit knapp 5 EUR/t CO₂) (EEX 2015) ist kein wirksames Mittel, um Investitionsanreize für die Industrie zu schaffen. Höchstens die Aussicht auf in Zukunft steigende Zertifikatspreise veranlasst einige Unternehmen, sich schon heute in bestimmten Klimaschutztechnologien zu engagieren.

Die grundlegende hinter dem ETS stehende Idee lautet, durch das mengenbasierte Kontrollsystem eine bestimmte Emissionsminderung zu garantieren und gleichzeitig technologische und wirtschaftliche Flexibilität zu ermöglichen. Das System lässt also offen, wie die Reduktion erreicht wird; der jeweils wirtschaftlichste Weg sollte sich folglich durchsetzen. Innerhalb dieses Systems könnte CCU also einen möglichen Weg darstellen, um Emissionsreduktionen zu erreichen, indem die durch das ETS zu erwartenden (und zukünftig möglicherweise hohen) Kosten für CO₂-Emissionen durch Investitionen in CCU-Technologien gesenkt werden könnten.

Die zukünftige Anerkennung von CCU im EU-ETS als Maßnahme zur Emissionsreduktion wird derzeit in der Forschungs-Community diskutiert (SCOT project 2016). In jenen Fällen, in denen CCU als dauerhafte Speicherung von CO₂²¹ qualifiziert wird und de facto der Definition von CCS entspricht, sollte eine Anerkennung als Emissionsreduktion über existierende Prozesse möglich sein. In allen Fällen, in denen CO₂ nur kurz- bis mittelfristig gebunden wird, sollte eine Emissionsminderung im ETS ausschließlich für die tatsächlich durch die neue CCU-Anlage reduzierten Emissionen, ermittelt zum Beispiel auf Basis einer LCA, möglich sein (Naims et al. 2015). Wie eine derartige Gutschrift im Detail für die verschiedenen Anlagen zu handhaben, nachzuweisen und zu verbuchen ist, ist dabei noch festzulegen.

Die aktuell niedrigen Preise für fossile Rohstoffe und Energie stellen derzeit ein Hindernis für die Wettbewerbsfähigkeit und auch für die Weiterentwicklung von CCU-Technologien dar. Bei einigen aus ökologischer Sicht sinnvollen Technologien wird es ohne eine regulative Unterstützung nicht möglich sein, weiterhin mit billigen fossilen Rohstoffen zu konkurrieren. Eine Verteuerung der fossilen Rohstoffe und/oder eine breite Verfügbarkeit von erneuerbar erzeugter Energie zu möglichst niedrigen Kosten könnten dagegen die Realisierung dieser Technologien unterstützen. Einige Technologien hingegen funktionieren durch erreichte Effizienzsteigerungen auch bei dem aktuell gegebenen Preisniveau von fossilen Rohstoffen.

5.2. Marktanalyse: CO₂ als Wirtschaftsgut

Obwohl CO₂ global gesehen vorwiegend ein unerwünschtes Abgas ist, ist es in kleinen, speziellen Segmenten schon heute ein Wirtschaftsgut, das lokal gehandelt wird. Eine Betrachtung von möglichen CO₂-Quellen als Angebotsseite und CO₂-Anwendungen als Nachfrageseite ist somit sinnvoll, um mögliche künftige Kombinationsmöglichkeiten und relative Größenverhältnisse von CCU zu verstehen (Naims 2016). Weiterhin werden im Folgenden CCU-Produkte vorgestellt, die bereits existieren oder in Kürze Marktreife erlangt haben werden.

5.2.1. CO₂-Quellen als Angebotsseite

Dass CO₂ in industriellen Anwendungen genutzt werden kann, funktioniert in den meisten Fällen nur unter der Voraussetzung, dass es in möglichst hoher Konzentration und Reinheit vorhanden ist. In einigen Fällen können allerdings auch unreines CO₂ oder Gasgemische eingesetzt werden. Für eine Abscheidung und Aufbereitung von CO₂ aus natürlichen und industriellen Quellen steht bereits heute eine Vielfalt von Technologien zur Verfügung. Der Aufwand für das Einfangen von CO₂ hängt somit von der jeweils gewählten Quelle und Technologie ab und ist mit unterschiedlichen Kosten verbunden (siehe Tabelle 2). In einem Vergleich der industriellen CO₂-Emissionen stellen Prozesse, in denen bereits **hochreines CO₂** als Abgas emittiert wird, die wirtschaftlichste Quelle dar. Dies sind insbesondere die Ammoniaksynthese,

²¹ Mit permanenter Speicherung ist hier die vom IPCC-Bericht vorgeschlagene Dauer von mehr als 1.000 Jahren gemeint; siehe Metz et al. (2005).

die Wasserstoffproduktion und die Erdgasgewinnung. In diesen Prozessen entsteht hochkonzentriertes CO₂ als Nebenprodukt, das für weniger als rund 35 EUR/t CO₂ abgeschieden werden kann (siehe Tabelle 2). An manchen dieser Anlagen ist daher bereits heute eine Technologie zur CO₂-Abscheidung installiert, um die bestehende Nachfrage zu befriedigen. Ein Anteil dieser CO₂-Emissionen findet somit schon heute eine industrielle Verwendung. Auch in Biogasanlagen wird vergleichsweise hochkonzentriertes CO₂ emittiert. Diese Quellen verursachen insgesamt jährlich rund 300 Mio. t CO₂-Emissionen.

Die CO₂-Punktquellen mit dem global größten Emissionsbeitrag sind dagegen fossile **Kraftwerke**, die insgesamt rund 10 Mrd. t CO₂ verursachen. Die Installation einer CO₂-Abscheidung ist an diesen Quellen derzeit technisch zwar möglich, jedoch mit einer durchschnittlichen Effizienzeinbuße von rund 10–30 % der erzeugten Energie des Kraftwerks verbunden (de Coninck & Benson 2014). Eine CO₂-Abscheidung an Kraftwerken ist daher momentan nicht wirtschaftlich und existiert deshalb bisher nur vereinzelt in Demonstrationsanlagen. In modernen Anlagen können insbesondere aufgrund von Skaleneffekten bereits vergleichsweise niedrige Abscheidungskosten von rund 35 EUR/t CO₂ erreicht werden (siehe Tabelle 2).

Darüber hinaus verursachen andere bedeutende Industrien wie zum Beispiel die Stahl- und Zementherzeugung eine große Menge an CO₂-Emissionen (rund 3 Mrd. t), die mithilfe verschiedener Technologien abgeschieden werden können. Je nach Qualität und Menge der einzufangenden Emissionen sind verschiedene Effizienzeinbußen und Abscheidungskosten möglich.

Außerdem kommen sogenannte „natürliche Quellen“ als CO₂-Lieferant infrage. Dies sind zunächst die natürlichen **CO₂-Vorkommen in Gesteinen**²² und anderen dauerhaften Speichern. Die Kosten für eine Extrahierung dieser Gase sind aufgrund der hohen Konzentration mit rund 15–20 EUR/t CO₂ oft vergleichsweise niedrig (Aresta & Dibenedetto 2010). Sie findet daher bereits heute aus wirtschaftlichen Gründen in unbekanntem Maßstab statt.

Darüber hinaus ist derzeit auch eine Abscheidung von **CO₂ aus der Luft** technisch bereits möglich, aufgrund der vergleichsweise niedrigen CO₂-Konzentration von rund 400 ppm bzw. 0,04 % jedoch mit einem hohen Energieaufwand verbunden und deshalb noch keine wirtschaftliche Option. In zukünftigen Szenarien, die von einem großen Maß an günstiger erneuerbarer Energie ausgehen, könnte die Abscheidung von CO₂ aus der Luft jedoch eine interessante technologische Option darstellen.

5.2.2. Szenarien der CO₂-Nutzung als Nachfrageseite

Bereits heute existiert eine Nachfrage nach CO₂. In speziellen Anwendungen wie zum Beispiel karbonisierten Getränken oder Lebensmittelverpackungen, aber auch vielen anderen Einsatzgebieten kann CO₂ direkt in flüssiger oder gasförmiger Form eingesetzt werden. Hierfür werden derzeit schätzungsweise rund 20 Mio. t CO₂ verwendet. Rechnet man die rund 25 Mio. t CO₂ hinzu, die in der tertiären Öl- und Gasförderung (EOR/EGR)²³ eingesetzt werden, summiert sich diese direkte, sogenannte „physikalische“ Nutzung von CO₂ auf etwas mehr als 40 Mio. t weltweit (siehe Tabelle 3). Neue direkte Anwendungs-

²² Diese finden sich zum Beispiel im Porenraum von Sedimentgestein. Im Pisgah-Bergsattel im US-amerikanischen Bundesstaat Mississippi beispielsweise lagern seit rund 65 Mio. Jahren ca. 250 Mio. t CO₂; siehe auch: IEA Greenhouse Gas R&D Programme (2005). Aber auch Mineralwasserhersteller fördern das Wasser und die „natürliche Kohlensäure“ teilweise gemeinsam aus unterirdischen Quellen. Beispielhaft wird das anschaulich auf der folgenden Internetseite der Firma Gerolsteiner beschrieben: <https://www.gerolsteiner.de/de/wasserwissen/quelle-ursprung/>.

²³ Als tertiäre Öl- und Gasförderung (englisch: Enhanced Oil or Gas Recovery - EOR/EGR) werden Verfahren bezeichnet, in denen durch die Injektion von CO₂ in Öl- und Gasfelder nach der primären und sekundären Förderung diesen noch weitere Mengen der fossilen Brennstoffe entlockt werden können. Das CO₂ verbleibt anschließend in kleinerem oder größerem Ausmaß in der geleerten Reserve; siehe IEA (2015).

CO ₂ emittierende Quelle	globale Emissionen (Mt CO ₂ /Jahr)	CO ₂ -Gehalt (Vol-%)	geschätzte Abscheidungsrate (%)	abscheidbare Emissionen (Mt CO ₂ /Jahr)	Benchmark Abscheidungskosten (€ ₂₀₁₄ /t CO ₂)	Emittenten-gruppe
Kohlekraftwerke	9.031	12-15	85	7.676	34	fossile Energieerzeugung
Gaskraftwerke	2.288	3-10	85	1.944	63	fossile Energieerzeugung
Zementproduktion	2.000	14-33	85	1.700	68	große industrielle Emittenten
Eisen- & Stahlproduktion	1.000	15	50	500	40	große industrielle Emittenten
Raffinerien	850	3-13	40	340	99	große industrielle Emittenten
Erdölkraftwerke	765	3-8	nicht verfügbar	nicht verfügbar	nicht verfügbar	fossile Energieerzeugung
Ethylenproduktion	260	12	90	234	63	große industrielle Emittenten
Ammoniakproduktion	150	100	85	128	33	hochreine industrielle Emittenten
Bioenergie	73	3-8	90	66	26	hochreine Emittenten/Energieerzeugung
Wasserstoffproduktion	54	70-90	85	46	30	hochreine industrielle Emittenten
Erdgasgewinnung	50	5-70	85	43	30	hochreine industrielle Emittenten
Abfallverbrennung	60	20	nicht verfügbar	nicht verfügbar	nicht verfügbar	große industrielle Emittenten
Fermentierung von Biomasse	18	100	100	18	10	hochreine industrielle Emittenten
Aluminiumproduktion	8	<1	85	7	75	große industrielle Emittenten

Tabelle 2: Potenzielle CO₂-Quellen

Quelle: Naims (2016), adaptiert von Wilcox (2012), US EIA (2014), Metz, Davidson et al. (2005) u. a.

gebiete für CO₂ werden derzeit in verschiedenen Bereichen entwickelt: Beispielsweise kann CO₂ als Kühlmittel für Pkw-Klimaanlagen oder auch in der Trockenreinigung eine interessante Alternative darstellen, indem es die Verwendung anderer schädlicher Substanzen oder wertvoller Rohstoffe ersetzt (Madsen, Normile-Elzinga & Kinsman 2014, Malvino 2011).

Darüber hinaus kann CO₂ als chemischer Baustein für die Produktion anderer Materialien, Chemikalien und Kraftstoffe genutzt werden.

Derzeit werden in der chemischen Industrie rund 180 Mio. t CO₂ verwendet (siehe Tabelle 3). Mit rund 114 Mio. t geht der größte Teil davon in die Produktion von Harnstoff. Das CO₂ entstammt dabei zumeist der Ammoniaksynthese, da eine industrielle Kopplung dieser Prozesse üblich ist.

Anwendungsbereich/Produkt in Kilotonnen (kt) p. a.	aktuelle Mengen		mittelfristige Mengen (~ 10 Jahre)	
	CO ₂ -Input	Produkt-Output	CO ₂ -Input	Produkt-Output
Direkte Nutzung	42.400		42.400	
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
Materialien & Chemikalien	167.515		212.400	
Harnstoff	114.000	155.000	132.000	180.000
anorganische Karbonate	50.000	200.000	70.000	250.000
Formaldehyd	3.500	21.000	5.000	25.000
PC (Polykarbonate)	10	4.000	1.000	5.000
Karbonate	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
Kraftstoffe	12.510		20.000	
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
algenbasierter Biodiesel	10	5	2.000	1.000
Gesamt	222.425		274.800	

Tabelle 3:
Einschätzung der weltweiten CO₂-Nachfrage

Quelle: Naims, (2016), adaptiert von Aresta, Dibenedetto et al. (2013)

Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht sind vor allem die neu aufkommenden CCU-Anwendungen interessant, die versuchen, CO₂ als Kohlenstoffquelle für die Produktion anderer nützlicher Substanzen zu verwenden und hierbei herkömmliche Verfahren und insbesondere fossile Rohstoffe zu ersetzen. Diese neuen CCU-Anwendungsgebiete werden derzeit noch im Labor-, Pilot- oder sogar bereits im Demonstrationsmaßstab mit ersten Produkten, die auf dem Markt erhältlich sind, erprobt. Langfristig könnten sie jedoch jährlich zu einer Nachfrage von rund 250 Mio. t CO₂ für die Herstellung von kohlenstoffbasierten Materialien führen (Ausfelder & Bazzanella 2008). Für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen könnten sogar rund 2 Mrd. t CO₂ jährlich

genutzt werden (Ausfelder & Bazzanella 2008), wenn diese sich wirtschaftlich durchsetzen könnten. Aus ökologischer Sicht sinnvolle Einsatzgebiete von derartigen Kraftstoffen sind zum Beispiel der Schiffs-, Flug- und Lkw-Verkehr (Piria, Naims & Lorente Lafuente 2016, UBA 2013).

Ohne einen breiten technologischen Wandel in der Energieerzeugung und Industrie stehen auch langfristig noch große Mengen an CO₂ emittierenden Punktquellen zur Verfügung, an denen vergleichsweise günstiges CO₂ abgeschieden werden kann. Auch ambitionierte Emissionsreduktionsszenarien zum Beispiel des UBA („Treibhausgasneutrales Deutschland“) (UBA 2013) oder des IPCC (RCP 2.6)

(Edenhofer et al. 2014) rechnen jedoch mit „unvermeidbaren“ CO₂-Emissionen, die erhalten bleiben, wenn eine Region ihr Entwicklungs- und Industrialisierungsniveau zumindest halten möchte. In Anbetracht der vergleichsweise geringen Nutzungsmengen zwischen aktuell 200 Mio. und potenziell rund 2 Mrd. t CO₂ lässt sich folglich aus einer gesamtwirtschaftlichen Perspektive schließen, dass auch auf lange Sicht zunächst die verbleibenden hochreinen Emissionsquellen CO₂ für CCU-Anwendungen liefern werden, gefolgt von solchen industriellen Quellen, die CO₂ zu möglichst niedrigen Abscheidungskosten zur Verfügung stellen können.

Gerade für eine langfristige, großskalige Entwicklung von CCU ist außerdem die Verfügbarkeit einer großen Menge an erneuerbarer Energie sehr förderlich (siehe hierzu auch Kapitel 9). In einem Szenario, das fossile Energieerzeugung ausschließt, zeigt sich, dass eine langfristige Nachfrage durch CCU auch durch abgetrenntes CO₂ aus den größten industriellen Punktquellen der verschiedenen Industrien komplett abgedeckt werden könnte (siehe Abbildung 5).²⁴ Sollten auch für diese Industrien signifikante Emissionsminderungen erreicht worden sein, stellt die Abscheidung aus der Luft eine Alternative zur Deckung der potenziellen CO₂-Nachfrage dar.

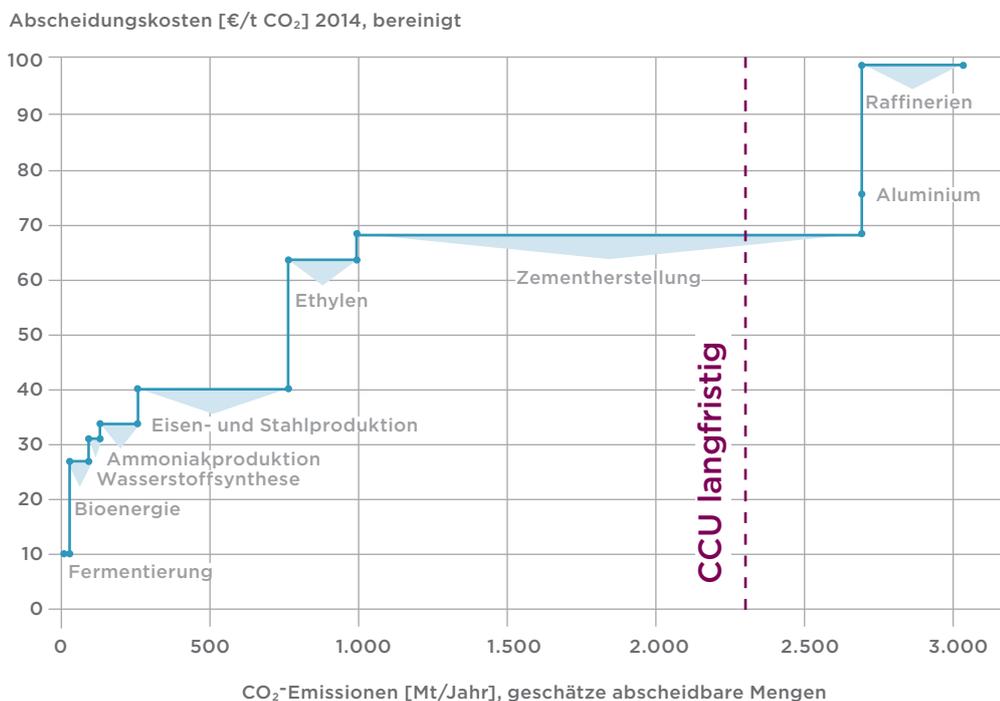


Abbildung 5: CO₂-Angebot und -Nachfrage ohne fossile Energieerzeugung

Quelle: Naims (2016)

Im Einzelfall spielt neben anderen Faktoren auch die lokale Verfügbarkeit von CO₂ eine entscheidende Rolle. So ist beispielsweise davon auszugehen, dass eine Standortentscheidung für den Aufbau einer neuen CCU-Anlage stets voraussetzen wird, dass in möglichst unmittelbarer Nähe zur zu errichtenden Anlage CO₂ in ausreichender Qualität und zu möglichst niedrigen Kosten zur Verfügung steht. Erste Betrachtungen der Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie und CO₂-Emissionen zeigen dabei, dass zahlreiche Standorte in Deutschland beide Aspekte auf-

weisen (Mennicken 2015). Für solche CCU-Technologien, die erneuerbaren Strom oder auf Basis erneuerbarer Energie produzierten Wasserstoff nutzen, um in PtX-Verfahren Kraftstoffe oder andere Energieträger zu produzieren, ist allerdings nicht das CO₂ der entscheidende Kostenfaktor, sondern der Preis von erneuerbarer Energie und erneuerbar erzeugtem Wasserstoff. Inwieweit die Verfügbarkeit und die Kosten von CO₂ somit den Produktionsprozess beeinflussen, ist technologiespezifisch zu unterscheiden.

²⁴ Für weitere Szenarien und detaillierte Darstellungen siehe Naims (2016).

Produkt	Firma	Region/Land	Einsatzbereiche	Webseite
Direkte Nutzung				
CO ₂ -Waschmaschine	Tersus Solutions	USA	Trockenreinigung von Textilien mit CO ₂ statt Wasser	http://www.tersussolutions.com/lco2solution/
CO ₂ als Kältemittel	Daimler	Europa	Pkw-Klimaanlagen mit CO ₂ als Kältemittel	https://www.daimler.com/dokumente/investoren/nachrichten/kapitalmarkt-meldungen/daimler-ir-release-de-20151020.pdf
Materialien & Chemikalien				
Kunststoff	Covestro	Deutschland	CO ₂ -basierte Polyole für die Herstellung von Schaum, z. B. für Matratzen	http://presse.covestro.de/news.nsf/id/aazc76-premiere-fuer-neuen-rohstoff
Kunststoff	Econic	Großbritannien	CO ₂ -basierte Polyole für die Herstellung von Schaum, z. B. für Matratzen	http://www.econic-technologies.com/catalyst-technology/carbon-dioxide-as-a-feedstock/
Kunststoff	Novomer	USA	CO ₂ -basierte Polyole und Polymere für die Herstellung verschiedener Kunststoffe, z.B. Elastomere und Schäume	http://www.novomer.com/co2-business-overview-0
Minerale	Carbon8	Großbritannien	Behandlung von industriellen Abfällen und CO ₂ -Abgasen durch Verarbeitung zu Mineralen, die als Betonaggregat oder Baustoff verwendet werden können	http://www.c8s.co.uk/technology.php
Minerale	Recoval	Belgien	Behandlung und Verarbeitung von Abfällen aus der Stahlindustrie mit CO ₂ -Abgasen zu Mineralen (Granulate für den Straßenbau und andere Baustoffe)	http://www.recoval.be/
Kraftstoffe				
E-Gas	Audi/Etogas	Deutschland	Kraftstoffe für die CO ₂ -neutrale Mobilität für bestimmte Audi-Modelle	https://www.audi-media-center.com/de/audi-e-gas-audi-g-tron-240
E-Diesel	Sunfire/Audi	Deutschland	Produktion von synthetischem Kraftstoff (Diesel)	http://www.sunfire.de/de/produkt-technologie/power-core
Methanol	Carbon Recycling International	Island	Produktion von synthetischem Kraftstoff (Methanol)	http://carbonrecycling.is/products-1/

Tabelle 4: Neue Produkte auf CO₂-Basis aus der ganzen Welt

Quelle: Eigene Darstellung

5.2.3. Segmentierung neuer CCU-Produkte

Die Suche nach neuen Einsatzmöglichkeiten von CO₂, die über die marktüblichen Nischenanwendungen hinausgehen, entwickelte sich im Kontext der Ölkrisen der 1970er-Jahre und der Bekämpfung des Klimawandels. Diese neuen Technologien zeichnen sich dadurch aus, dass sie andere, herkömmliche Technologien und Rohstoffe ersetzen sowie auf eine Effizienzsteigerung abzielen und dabei im Vergleich eine Verbesserung in der Umweltbilanz erreichen. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über einige neue Produkte auf CO₂-Basis, die international angeboten werden. Viele andere Technologien befinden sich noch in einem früheren Entwicklungsstadium und bedürfen weiterer Investitionen im Labor-, Pilot- oder Demonstrationsmaßstab.

Im Bereich der direkten CO₂-Nutzung werden heute vor allem CO₂-Klimaanlagen für Pkws diskutiert, die in Bussen bereits erfolgreich getestet wurden. Für einen breiten Einsatz im Pkw-Markt werden derzeit die technischen und regulatorischen Details erarbeitet (Kilimann 2015). Außerdem wurde eine CO₂-basierte kommerzielle Trockenwaschmaschine vorgestellt, die neben dem Verzicht auf Wasser noch weitere ökologische Vorteile bietet (Madsen, Normile-Elzinga & Kinsman 2014).

Bei Materialien und Chemikalien wurden bisher insbesondere im Bereich der Herstellung von Kunststoffen unter Verwendung von CO₂ verschiedene Durchbrüche erzielt. So bieten derzeit weltweit drei Firmen Technologien zur CO₂-basierten Synthese von Polymeren für Hart- oder Weichplastik an. In Deutschland wurde im Juni 2016 eine erste Demonstrationsanlage der Firma Covestro in Dormagen eröffnet, die künftig CO₂-basierte Polyole für verschiedene Endprodukte wie zum Beispiel Matratzen produzieren wird. Auch im Bereich der Mineralisierung, das heißt der Produktion von Baustoffen, gibt es erste Technologien, die kommerziell vertrieben werden. Viele andere Chemikalien, Materialien oder Baustoffe werden von Forschungsteams auf der ganzen Welt derzeit noch entwickelt.

Darüber hinaus bieten einige Unternehmen bereits erste Energieträger auf Basis von CO₂ und Wasserstoff an. Während die Firma Carbon Recycling International mit Energie aus erneuerbaren Quellen zur Produktion von Kraftstoffen auf CO₂-Basis in industriellem Maßstab die lokalen Vorzüge der Geothermie in Island nutzt, produzieren in Deutschland zwei kleinere Anlagen der Firmen Audi und Sunfire synthetische Kraftstoffe auf Basis von erneuerbarer Energie aus Wind- und Solarkraft. Aufgrund der niedrigen Preise fossiler Energie sind diese neuen Technologien derzeit allerdings nicht wettbewerbsfähig gegenüber konventionellen Kraftstoffen.

DIE NACHHALTIGEN ENTWICKLUNGSZIELE DER VEREINTEN NATIONEN UND CCU: MÖGLICHE ANKNÜPFUNGSPUNKTE

Die nachhaltigen Entwicklungsziele der Vereinten Nationen (Sustainable Development Goals „SDGs“) zielen darauf ab, die globale Transformation hin zu mehr Nachhaltigkeit einzuleiten, wobei ein vorrangiges Ziel die Bekämpfung der Armut bleibt. Die Ambitionen decken dabei eine Bandbreite von 17 Zielen ab, die jeweils in Unterziele heruntergebrochen wurden. Die Ziele sind universal gültig, ihre Umsetzung bis 2030 bleibt jedoch freiwillig.

Im Hinblick auf eine zukünftige Entwicklung von CCU sind folglich zahlreiche dieser Haupt- und Unterziele anwendbar. So können die SDGs als universeller Rahmen gesehen werden, in dem eine Technologieentwicklung stattfinden sollte.

Quelle: UN Sustainable Development Knowledge Platform (2016)

So scheinen insbesondere die folgenden Haupt- und Unterziele mit den in diesem Bericht diskutierten ökologischen und ökonomischen Potenzialen von CCU vereinbar zu sein:

8. Promote sustained, inclusive and sustainable economic growth, full and productive employment and decent work for all

- 8.2 Achieve higher levels of economic productivity through diversification, technological upgrading and innovation, including through a focus on high-value added and labour-intensive sectors
- 8.4 Improve progressively, through 2030, global resource efficiency in consumption and production and endeavour to decouple economic growth from environmental degradation, in accordance with the 10-year framework of programmes on sustainable consumption and production, with developed countries taking the lead

9. Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation

- 9.4 By 2030, upgrade infrastructure and retrofit industries to make them sustainable, with increased resource-use efficiency and greater adoption of clean and environmentally sound technologies and industrial processes, with all countries taking action in accordance with their respective capabilities
- 9.5 Enhance scientific research, upgrade the technological capabilities of industrial sectors in all countries, in particular developing countries, including, by 2030, encouraging innovation and substantially increasing the number of research and development workers per 1 million people and public and private research and development spending

11. Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable

- 11.2 By 2030, provide access to safe, affordable, accessible and sustainable transport systems for all, improving road safety, notably by expanding public transport, with special attention to the needs of those in vulnerable situations, women, children, persons with disabilities and older persons

12. Ensure sustainable consumption and production patterns

- 12.2 By 2030, achieve the sustainable management and efficient use of natural resources
- 12.4 By 2020, achieve the environmentally sound management of chemicals and all wastes throughout their life cycle, in accordance with agreed international frameworks, and significantly reduce their release to air, water and soil in order to minimize their adverse impacts on human health and the environment
- 12.5 By 2030, substantially reduce waste generation through prevention, reduction, recycling and reuse
- 12.c Rationalize inefficient fossil-fuel subsidies that encourage wasteful consumption by removing market distortions, in accordance with national circumstances, including by restructuring taxation and phasing out those harmful subsidies, where they exist, to reflect their environmental impacts, taking fully into account the specific needs and conditions of developing countries and minimizing the possible adverse impacts on their development in a manner that protects the poor and the affected communities

13. Take urgent action to combat climate change and its impacts

- 13.2 Integrate climate change measures into national policies, strategies and planning

Eine detaillierte Analyse der Vereinbarkeit von CCU-Technologien mit den SDGs ist derzeit Gegenstand weiterer Arbeiten am IASS.

5.3. Eine Betrachtung möglicher volkswirtschaftlicher Potenziale von CCU

Aus volkswirtschaftlicher Sicht lassen sich auf Basis der bisher diskutierten Erkenntnisse derzeit nur qualitative Vermutungen anstellen, wie sich eine breite Implementierung von CCU-Technologien auswirken könnte. Es existiert derzeit noch keine verlässliche Datenlage zu der Vielzahl von Technologien – von denen sich viele zudem noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden –, aus der sich belastbare quantitative Erkenntnisse ableiten ließen. Für alle folgenden Betrachtungen wird daher von einem langfristigen, großskaligen Entwicklungsszenario von CCU-Technologien mit einer breiten Herstellung von chemischen Materialien, Baustoffen und Kraftstoffen auf CO₂-Basis ausgegangen, was als optimistische Sichtweise gewertet werden kann. Zur Komplexitätsreduzierung werden andere mögliche, weniger optimistische Szenarien, die Bestandteil detaillierter Veröffentlichungen sind (z.B. Naims 2016, Piria, Naims & Lorente Lafuente 2016) im Folgenden nicht diskutiert. Die volkswirtschaftlichen Potenziale von CCU entsprechen dabei immer wieder den Hoffnungen, die häufig mit Umwelttechnologien in Verbindung gebracht werden. Beispielsweise wird auch in den von der UN in 2016 verabschiedeten Sustainable Development Goals (SDGs) davon ausgegangen, dass durch technologischen Fortschritt und Innovationen eine nachhaltigere Wirtschaftsweise und Entwicklung erreicht werden können, wobei die Ressourceneffizienz eine wichtige Rolle spielt (UN Sustainable Development Knowledge Platform 2016).

Im Folgenden werden zentrale volkswirtschaftliche Bereiche wie die Produktion im Inland, die Außenwirtschaft, Investitionen und Finanzierung sowie Beschäftigung und Haushalte separat in Bezug auf eine mögliche langfristige Umsetzung von CCU-Technologien diskutiert.

5.3.1. Mögliche Auswirkungen auf die Produktion im Inland

Großskaliges CCU wird potenziell die industrielle Produktion in relevanten Regionen wie Deutschland, Europa und Nordamerika beeinflussen. Durch neue Verfahren und Anlagen könnte so langfristig der **fossile Rohstoffeinsatz** vor allem in der chemischen Industrie reduziert werden. Darüber hinaus bestünde

in zahlreichen CCU-Anlagen eine neue und potenziell große Nachfrage nach erneuerbarer Energie. Des Weiteren erfordert die breite Umsetzung von CCU oft eine Zusammenarbeit über die herkömmlichen Branchengrenzen hinweg, bedingt durch die nötige Kooperation zwischen Emittenten, zum Beispiel Kraft- oder Stahlwerken, und potenziellen Nutzern, zum Beispiel chemischen Anlagen. Insofern scheinen **Synergieeffekte** in der Produktion und ein Beitrag zu einem größeren strukturellen Wandel der Industrie möglich. Dementsprechend lässt die Umsetzung von CCU auf **Modernisierungseffekte** für eine zum Teil in die Jahre gekommene europäische Industrie („industrial renaissance“) hoffen (Wilson et al. 2015).

Darüber hinaus wird vermutet, dass CCU ökonomisches **Wachstum** generieren könnte (Wilson et al. 2015). Ob sich CCU langfristig positiv auf den produzierten Output bzw. das BIP-Wachstum auswirken wird, ist aus heutiger Sicht nicht abschließend geklärt und wird davon abhängen, ob die CCU-basierten Produkte bestehende Produkte ersetzen oder zusätzliche Produktionskapazitäten geschaffen werden. So würden sich zusätzliche Kapazitäten zwar positiv auf das BIP auswirken, aus ökologischer Sicht wären sie allerdings mit nachteiligen sogenannten **„Rebound“-Effekten** verbunden, denn insgesamt würden mehr Rohstoffe verbraucht und mehr Produkte und Abfall produziert werden. Derartige Effekte werden häufig in Zusammenhang mit Effizienzsteigerungen beobachtet und beschrieben, sowohl auf Produzenten- als auch auf Konsumentenseite (Santarius 2012, UBA 2014).

5.3.2. Mögliche Auswirkungen auf die Außenwirtschaft

Aktuelle Statistiken des europäischen Chemieverbands CEFIC legen dar, dass trotz des deutlichen Handelsbilanzüberschusses der europäischen chemischen Industrie von über 43,5 Mrd. EUR in 2014 die Importe tendenziell wachsen, während die Exporte auf einem konstanten Niveau bleiben (CEFIC 2016). Durch CCU wird nun mit CO₂ eine neue, lokal verfügbare Rohstoffquelle erschlossen, entweder aus Industrieabgasen oder der Luft. Als außenwirtschaftliche Auswirkung könnte folglich durch den potenziell reduzierten Rohstoffverbrauch langfristig die **Abhängigkeit vom Import fossiler Rohstoffe** reduziert werden.

Die neuartigen CCU-Verfahren, die wertvolles technisches Know-how und etliche Patente mit sich bringen, könnten auch einen **Technologievorsprung** im internationalen Vergleich bedeuten. Dies könnte sich positiv auf die Exportstatistik auswirken, wenn die CCU-Technologien und -Produkte aus Deutschland und Europa auch international nachgefragt und angeboten werden.

5.3.3. Mögliche Auswirkungen auf Investitionen und Finanzierung

Als potenzielles volkswirtschaftliches Risiko kann wohl die **Fehlleitung von öffentlichen und privaten Investitionen** angesehen werden. So könnten signifikante sektorale Verluste entstehen, wenn CCU-Prozesse an herkömmliche Industrieanlagen und insbesondere fossile Kraftwerke als CO₂-Quelle gekoppelt werden, die dann jedoch aus umweltpolitischen Gründen kurz- bis mittelfristig nicht weiterbetrieben werden dürfen. Insofern sollten derartige strategische Fehler und „Lock-in“-Effekte unbedingt vermieden werden und stattdessen eine möglichst große **Investitionssicherheit** angestrebt werden.

Außerdem könnten **Verluste** entstehen, wenn signifikante Forschungsgelder für die Entwicklung auch langfristig technisch oder ökonomisch **nicht durchsetzbarer** oder ökologisch **unerwünschter Technologien** eingesetzt werden. Deshalb sollte schon in einem möglichst frühen Stadium sowohl auf eine anvisierte technische Machbarkeit und eine Wirtschaftlichkeit unter aktuellen bzw. möglichen zukünftigen Rahmenbedingungen als auch auf eine positive Umweltbilanz geachtet werden, ohne dadurch die wichtige Grundlagenforschung zu verhindern.

Als positiver Effekt im Bereich Investitionen und Finanzierung sind darüber hinaus mit CCU verbundene **Unternehmensgründungen** denkbar. In einer globalen Erhebung konnten bereits mehr als 50 CCU-bezogene Start-ups registriert werden, von denen jeweils etwa 40 % Technologien zur Kraftstoffproduktion und Mineralisierung vermarkten, während etwa 20 % chemische Produkte anbieten (Zimmermann & Kant 2016). Als volkswirtschaftliche Vorteile

von Unternehmensgründungen werden potenziell neue Innovationen und Arbeitsplätze sowie eine Förderung des Wettbewerbs und des Strukturwandels gesehen (BMW 2016).

5.3.4. Mögliche Auswirkungen auf die Beschäftigung und die Haushalte

Innovationen führen häufig zu der Hoffnung, dass **neue Arbeitsplätze** geschaffen werden; auch für CCU wird diese Erwartung immer wieder geäußert (Wilson et al. 2015). Die potenziellen Auswirkungen von CCU auf die Anzahl und Art von Arbeitsplätzen sind momentan allerdings noch nicht absehbar, denn auch hier spielt es eine Rolle, in welcher Art und Weise sich die Technologien industriell durchsetzen oder nicht. In Anbetracht der in Tabelle 4 dargestellten Leuchtturmprodukte lässt sich allerdings vermuten, dass eine Schaffung von neuen Stellen in den Bereichen Forschung, Entwicklung und Anlagenbetrieb auch in Zukunft wahrscheinlich ist, wenn diese nicht mit einer **Reduzierung und Verlagerung von Personal** aus anderen Bereichen einhergehen.

Das **Einkommen der privaten Haushalte** könnte durch CCU direkt beeinflusst werden, falls es bei gleichbleibendem Konsumniveau einen **Preisunterschied** zwischen den CCU-basierten und den herkömmlichen Produkten geben sollte. Momentan erscheint es jedoch nicht wahrscheinlich, dass diese Produkte dem Konsumenten zu einem günstigeren Preis angeboten würden. Ein höherer Preis erscheint dagegen möglich, insbesondere für solche Technologien, die verbesserte Umwelteigenschaften aufweisen und gleichzeitig in der Produktion momentan noch teurer sind als herkömmliche, auf fossilen Rohstoffen basierende Produkte. Eine Kaufentscheidung für derartige Produkte könnte folglich das Einkommen der Haushalte schmälern, ihre Umweltbilanz dabei aber verbessern.

Rebound-Effekte in Bezug auf CCU-Produkte beim Konsumenten sind darüber hinaus zwar vor allem indirekt möglich, in den relevanten Segmenten der chemischen Produkte und Kunststoffe, der Baustoffe und Mobilität²⁵ momentan jedoch nicht absehbar, da für den Konsumenten keine Geld- oder Zeitersparnis

²⁵ Im Mobilitätsbereich werden Rebound-Effekte vor allem durch Zeitersparnis verursacht, diese wird durch CCU jedoch nicht beeinflusst; siehe Santarius (2012).

zu vermuten ist. In jedem Fall wären diese Effekte nur schwer messbar.

5.4. Empfehlungen für Entscheidungsträger

Über die Wirtschaftlichkeit von CCU-Technologien lassen sich keine generellen Aussagen treffen, denn diese ist technologiespezifisch zu bestimmen und hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Ein großskaliger Einsatz von CCU-Technologien könnte aus volkswirtschaftlicher Sicht langfristig vorteilhaft sein, sofern die richtigen Rahmenbedingungen geschaffen und technologische Durchbrüche erzielt werden können. Daher wird empfohlen, in der Förderung der weiteren Entwicklung und Implementierung von CCU die folgenden Punkte zu beachten:

- Eine weitere Förderung von Forschung und Entwicklung zu CCU-Technologien ist aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll und kann die Durchsetzung verschiedener interessanter Innovationen beschleunigen.
- CCU sollte als eine Option bzw. ein Beitrag in einem größeren Portfolio multipler technischer Lösungen im Sinne der Nachhaltigkeitsziele gedacht und implementiert werden.

- Bei der CO₂-Abscheidung stehen zahlreiche Quellen zur Verfügung. In einer weiteren Förderung und Entwicklung sollten unerwünschte Lock-in-Effekte vermieden werden.

- Einige CCU-basierte Produkte, insbesondere Kraftstoffe, sind derzeit im Vergleich zu günstiger Energie aus fossilen Quellen noch nicht wettbewerbsfähig. Ist ein ökologischer Nutzen absehbar, sollten Anreize geschaffen werden, die die Implementierung dieser Technologien in bestimmten sinnvollen Einsatzbereichen wie zum Beispiel dem Schiffs- oder Flugverkehr unterstützen.

- CCU kann im Vergleich zu und in Kombination mit anderen Umwelttechnologien verschiedene positive volkswirtschaftliche Effekte nach sich ziehen, zum Beispiel Synergieeffekte in der Produktion und eine reduzierte Abhängigkeit vom Import fossiler Rohstoffe. Dieser potenzielle gesamtgesellschaftliche Nutzen sollte in Entscheidungsprozessen wie der weiteren Förderung der Technologien mitgedacht und -bewertet werden.



6. Wahrnehmung und Kommunikationsperspektiven von CCU-Technologien

Fortschritte in der technischen Forschung sind der entscheidende Faktor für die weitere Entwicklung und industrielle Umsetzung von CCU-Technologien. Die Notwendigkeit der Untersuchung von Kommunikationsaspekten ist in einem teils noch frühen Stadium der technischen Reife jedoch weniger evident. Dass es für eine erfolgreiche Einführung von technischen Neuerungen von Vorteil sein kann, frühzeitig Fragen medialer Rezeption und gesellschaftlicher Akzeptanz zu beachten (Wüstenhagen, Wolsink & Bürer 2007), zeigen beispielhaft die Akzeptanzproblematiken von technologischen Innovationen wie Nanotechnologien, Gentechnik oder auch Carbon Capture and Storage²⁶ (CCS) in Deutschland und anderen europäischen Ländern (Brunsting et al. 2011, Cremer et al. 2008, de Coninck & Benson 2014, Selma et al. 2014). So sind beispielsweise CCS-Technologien nicht nur wegen der hohen Kosten und technischen Unklarheiten, sondern vor allem auch wegen der Ablehnung durch die Öffentlichkeit zum jetzigen Zeitpunkt weitgehend von der aktuellen Agenda von Politik und Industrie in Deutschland verschwunden, obwohl ihnen laut der Szenarien des IPCC (IPCC 2014) eine zentrale Bedeutung für die Einhaltung der Zweigradgrenze zukommt (Delgado, Lein Kjolberg & Wickson 2011, Apt & Fischhoff 2006, Cremer et al. 2008).

Vor diesem Hintergrund betrachtete das IASS-Projekt neben den Themenfeldern Ökologie und Ökonomie auch Aspekte der Kommunikation und befasste sich in diesem dritten Teilprojekt mit mehreren Fragen bzw. Aufgaben:

1. Wie können Informationen zu CCU bewertungsneutral vermittelt werden?
2. Wie können Dialoge zu CCU-Technologien initiiert und geführt werden, die eine sachbezogene Diskussion des Für und Wider ermöglichen?
3. Wie werden Technologien zur CO₂-Nutzung wahrgenommen und von Stakeholdern bewertet?
4. Welche strategischen Überlegungen zur Kommunikation zu CCU-Technologien sind aus möglichen Bewertungsmustern ableitbar?

Die Abschnitte 6.1 und 6.2 beschreiben die im Rahmen des Projekts entwickelten und umgesetzten Kommunikationsformate. In Abschnitt 6.3 werden die Ergebnisse der Forschungsarbeit zu den Fragen 3 und 4 dargestellt.

²⁶ Die Nennung dieser Beispiele stellt keinerlei Bewertung oder Kontextualisierung der genannten Technologien dar.

6.1. Initiierung, Begleitung und Beobachtung von Dialogveranstaltungen mit unterschiedlichen Stakeholdern von CCU-Technologien

Die Arbeit mit unterschiedlichen Stakeholdern stellt einen wesentlichen Bestandteil der IASS-Projektarbeit dar. Diese setzte sich aus mehreren Elementen zusammen:

- Expertenworkshop zur Akzeptanz von Produkten mit verbesserten Umwelteigenschaften
- Round-Table-Veranstaltungen mit Teilnehmern aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft
- Vorstellung des Themas CCU bei öffentlichen Veranstaltungen
- Beantwortung von Medien- und anderen Anfragen

Die im Projektverlauf durchgeführten Veranstaltungen werden im Folgenden beschrieben.

6.1.1. Workshop: Akzeptanz von Produkten mit verbesserten Umwelteigenschaften

Bei der Markteinführung technischer Innovationen stellt die gesellschaftliche Akzeptanz von Technologien und Produkten einen entscheidenden Erfolgsfaktor dar. Die Komplexität der Einschätzung entsprechender Probleme führt jedoch häufig zu deren mangelnder Berücksichtigung im Innovationsprozess. Oft werden in der Öffentlichkeit daher gerade die kommunikativen Misserfolge von Innovationen wahrgenommen. Ein Beispiel hierfür ist der Kraftstoff E10 (Hauke 2014).

Vor diesem Hintergrund fand im Rahmen des CO₂ntext-Projekts im Februar 2014 ein Expertenworkshop zum Thema „Akzeptanz von Produkten mit verbesserten Umwelteigenschaften“ statt. Das IASS lud Vertreter ausgewählter Unternehmen nach Potsdam ein, um mehr über ihre Erkenntnisse bei der Einführung neuer Produkte und Technologien mit verbesserten Umwelteigenschaften zu erfahren. Unter den Anwesenden waren Vertreter von mittelständischen und großen deutschen Unternehmen.

Ziel war es insbesondere, eine Diskussion darüber anzustoßen, was aus den Erfahrungen der Teilnehmer zu lernen ist und wie folglich an dieser Stelle eine gesellschaftliche Akzeptanz von ökologisch sinnvollen Innovationen gefördert werden kann.

Als Ergebnis der Veranstaltung nahm das IASS-Projektteam eine Zusammenstellung der im Zuge der Diskussion geäußerten Kernaussagen vor, die keine Konsensäußerungen aller Teilnehmer waren, sondern durchaus kontrovers diskutiert wurden. Aus der individuellen Perspektive der Teilnehmer heraus zeigen die im Folgenden aufgeführten Positionen Problemdimensionen auf, die sich ganz konkret bei der Entwicklung und Umsetzung sowie der Markteinführung von Produkten mit verbesserten Umwelteigenschaften in der Praxis ergeben können (Frage 1). Auf der Basis dieser individuellen Erfahrungen entwickelten sich im Gespräch jedoch objektivierbare Hinweise und Folgerungen dazu, welche Bedingungen in Zukunft innerhalb von Unternehmen und in Interaktion mit Politik und Gesellschaft die erfolgreiche Einführung von entsprechenden Produkten vereinfachen oder unterstützen könnten (Frage 2). Alle Aussagen beziehen sich auf Produkte, die im Vergleich zu herkömmlich hergestellten Produkten eindeutig Umweltvorteile aufzeigen.

I. Was hemmt heute die erfolgreiche Markteinführung von Produkten mit verbesserten Umwelteigenschaften?

- **Existierende Kennzeichnungen für verbesserte Umwelteigenschaften in Produkten können derzeit nur eingeschränkt anwendbar sein.**

Im Geschäftskundenbereich (B2B) seien ökologische Produktinformationen unerlässlich, wenn ein neues Produkt als „nachhaltig“ positioniert werden soll. Hierfür seien Ökobilanzen sowie bestehende Zertifikate und Labels nützliche Tools. Diese Tools würden allerdings nicht immer als hilfreich angesehen, wenn es um die Akzeptanz von entsprechenden Produkten beim Endverbraucher (B2C) gehe. So könne zum Beispiel ein Produkt, das aus recycelten Stoffen hergestellt und dementsprechend gekennzeichnet ist, möglicherweise als minderwertig wahrgenommen werden.

Ökologisch vorteilhafte Produkteigenschaften würden von den Teilnehmern nur selten als Kauf entscheidend bewertet. Daher könne aufgrund solcher Eigenschaften in der Regel auch kein höherer Preis verlangt werden, der den durch die technologische Änderung und Zertifizierung der relevanten Eigenschaften entstandenen Mehraufwand aufwiegen würde. Insbesondere die hohen Kosten und der zu erwartende Nutzen einer LCA hielten sich bei Endprodukten mit geringen Margen oder für kleinere und mittelständische Unternehmen nicht die Waage, könnten sich in diesem Bereich deswegen nicht durchsetzen und seien folglich nur eingeschränkt anwendbar.

■ **Umweltbezogene Produkteigenschaften stehen bei der Kaufentscheidung möglicherweise in Konkurrenz zu anderen Eigenschaften.**

„Marke sticht Messung“: Die Erfahrungen der Teilnehmer hätten gezeigt, dass der Konsument Produkten einer starken „grünen“ Marke im B2C-Bereich auch ohne Siegel oder Daten aus einer LCA großes Vertrauen entgegenbringen könne. Im Umkehrschluss seien bei konventionell positionierten Produktmarken ökologische Messungen wichtig, aber kein Garant für Glaubwürdigkeit aufseiten des Konsumenten. LCAs oder andere Methoden zur Bewertung von Umwelteigenschaften könnten möglicherweise sogar eine zusätzliche Angriffsfläche bieten, solange produkt- und markenübergreifend keine übereinstimmende Terminologie verwendet werde.

„Emotionalität sticht Preis, Preis sticht Nachhaltigkeit“: Werden weitere Aspekte wie die mit einer Marke verbundenen Emotionen in die Waagschale geworfen – nach Aussage der Teilnehmer der einzige Aspekt, der einen niedrigen Preis als Kaufargument schlagen könne –, so stünden umweltbezogene Eigenschaften auch hier ganz am Ende der von den Teilnehmern vermuteten Schlagkraft.

Insgesamt wurden umweltbezogene Produkteigenschaften als wenig relevant für den Verkaufsprozess eingestuft.

■ **Interne Zielkonflikte können ökologische Innovationsprozesse verhindern.**

Bei der Entwicklung umweltfreundlicherer Produkte müssten nach den Erfahrungen der Teilnehmer stets Prioritäten auf einzelne umweltrelevante Eigenschaften gesetzt werden, da mit einem realistischen Aufwand zumeist nicht in jeder Beziehung die höchsten ökologischen Anforderungen erfüllt werden könnten. Auch in der Erstellung von LCAs würden durch Prämissen in der Bewertung Prioritäten gesetzt, zum Beispiel Ressourceneffizienz gegen Carbon Footprint. Zudem könnten sich Zielkonflikte aus anderen Bereichen negativ auf die Entwicklung und Markteinführung von Produkten mit verbesserten Umwelteigenschaften auswirken, zum Beispiel Maximierung der Marge gegen Bestandteile aus Recyclingprozessen, gewünschte Positionierung über andere Eigenschaften gegen Positionierung über Ökoeigenschaften.

■ **Perfektionismus kann die Einführung von ökologisch verbesserten Produkten hemmen.**

Öko-Labels und andere umweltbezogene Zertifikate werden teilweise als Ausdruck eines Perfektionismus wahrgenommen, mit dem vor allem nachhaltige Innovationen bereits in der Entwicklungsphase konfrontiert würden. Solche Ansprüche an Veränderungen könnten sich hemmend auf deren Umsetzung und auch auf die spätere Verbreitung auswirken: Einerseits sei ein ökologisch perfektes Produkt als Zielvorstellung bereits intern ein Hemmnis für die Entwicklung von Produkten, die lediglich einen oder auch mehrere umweltbezogene Aspekte verbessern, in anderen jedoch an gewohnten Standards festhalten. Andererseits sei die Gewichtung unterschiedlicher Produkteigenschaften in einer LCA dem Endkunden nur schwer zu vermitteln. Nur in Teilaspekten verbesserte Produkte könnten letztlich schnell als „Etikettenschwindel“ oder Ausdruck von „Greenwashing“ verstanden werden.

■ **Marktforschung kann ökologische Innovation hemmen.**

Klassische Marktforschung am Endkunden sei für Technologieinnovationen häufig nicht tauglich und könne sogar hemmend wirken. Besonders revolutionäre und erfolgreiche Innovationen seien in ihrem Erfolg nicht prognostizierbar und hätten sich folglich in Marktanalysen vorab nicht darstellen lassen. Vielmehr weckten sie oft erst nach der Einführung ein zuvor nicht bestehendes Bedürfnis beim Verbraucher. Trotzdem seien Marktforschungsergebnisse in Unternehmen nach wie vor eine notwendige argumentative Schützenhilfe für die Einführung von neuen Produkten. Könne ein Bedürfnis beim Kunden nicht durch die erhobenen Daten dargestellt werden, so könnte eine Innovation schon im frühen Stadium stecken bleiben. Dies sei insbesondere bei umweltbezogenen Verbesserungen der Fall.

■ **Herkömmliche Vertriebsstrukturen können ökologische Innovation behindern.**

Im Vorfeld des Markteintritts würden nicht die Endkunden, sondern andere Multiplikatoren über die Akzeptanz von Innovationen mit verbesserten Umwelteigenschaften entscheiden. Von internen oder externen Entscheidungsstellen wie Vertrieb oder Handel werde häufig „der Kunde“ als Innovationsbremse vorgeschoben. Innovationen hier durchzusetzen könne aufwendig sein und zum Beispiel intensive Trainings im Vertrieb erfordern. Die starke Macht der etablierten Handelsstrukturen und deren Fokussierung auf Umsatzgrößen könnten sich ebenfalls als Hindernisse für umweltbezogene Innovationen erweisen.

Ökologische Innovationen passten zudem häufig nicht in bestehende Marketing- und Vertriebskonzepte. Kundentypologien, die auf Marktforschung und Vertriebserfahrungen beruhen, ließen häufig keinen Spielraum, um differenzierter auf potenzielle Kunden zuzugehen.

II. Wie können Innovationen mit verbesserten Umwelteigenschaften in der Entwicklung und beim Markteintritt gefördert werden?

■ **Standardisierte Rahmenbedingungen und zusätzliche Kaufanreize schaffen**

Im Sinne eines nachhaltigen Wirtschaftens plädierten die Teilnehmer für die Schaffung von ökologischen Mindeststandards und für den Ausbau von Anreizen gemäß einem Belohnungsprinzip auch über bestehende Standards hinaus. Dies wurde vor allem insofern als vernünftig erachtet, als durch die Verbesserung von Umwelteigenschaften von Produktgruppen auch ein Gesamtnutzen für die Gesellschaft entstehen könne. Durch die Kombination von verpflichtend anzuwendenden Mindeststandards mit zusätzlichen Anreizen könnten sich Produkte mit verbesserten Umwelteigenschaften im Wettbewerb mit konventionell produzierten Produkten besser durchsetzen und in der Zukunft eine größere Rolle im Produzenten- und Kundenverhalten spielen.

■ **Wissen für nachhaltige Innovationen teilen**

Als förderlich wurde die Haltung eingeschätzt, die Anwendung von umweltbezogenen Technologien nicht nur als Wettbewerbsvorteil für ein einzelnes Unternehmen bzw. ein einzelnes Produkt auf dem Markt zu sehen. Vielmehr solle zumindest in Einzelfällen über die Schaffung von „Open Innovation Networks“ für gemeinsame Innovationen in der Industrie diskutiert werden. Würden Innovationen bezüglich verbesserter Umwelteigenschaften gemeinschaftlich am Markt eingeführt, müsste sich ein einzelner Hersteller nicht „aus der Deckung“ begeben. Die Erfahrung habe gezeigt, dass man sich mit der Einführung einer ökologisch orientierten Produktveränderung unter Umständen sogar angreifbar mache. Gehe man gemeinsam voran auf dem Weg zu nachhaltigeren Produkten und damit insgesamt zu einem nachhaltigeren Wirtschaften, verringere sich das unternehmerische Risiko und die Glaubwürdigkeit auf dem Markt steige ebenso wie der Gewinn für die Gesellschaft: Der allgemeine Nutzen solcher Technologien, ihre nachhaltige Wirkung vorausgesetzt, wäre durch gemeinsames Agieren größer.

■ Umweltbezogene Konsumbedürfnisse anregen

Im Hinblick auf die ganzheitliche Zielsetzung von Technologien mit verbesserten Umweltauswirkungen müssten gegebenenfalls heute noch unbekanntes Bedürfnisse auf dem Markt, sei es bei Zwischenprodukten oder im Endkundenbereich, geweckt werden. Kommunikation spiele hierbei eine zentrale Rolle, ebenso wie die bereits angeführte Schaffung externer Rahmenbedingungen. Auch nachhaltigere Entscheidungen von Endverbrauchern könnten stärker durch staatliche Anreize stimuliert und gelenkt werden.

■ Rahmenbedingungen planbar machen

Der Zeitpunkt für die Einführung von umweltbezogenen Innovationen sei ein entscheidender Faktor für deren Erfolg. So könnten fehlende Rahmenbedingungen (zum Beispiel Anpassungen von Recyclingverordnungen) oder auch nur ein im entscheidenden Moment fehlendes öffentliches Bewusstsein letztendlich unüberwindbare Hemmnisse für die Etablierung von Produkten mit verbesserten Umwelteigenschaften darstellen. Zudem sei sowohl für den erfolgreichen Weg auf die Märkte als auch für die emotional geprägte Kaufentscheidung des Endverbrauchers die Akzeptanz einer Innovation bei Meinungsführern und Entscheidungsträgern als Rahmenbedingung relevant.

Für eine bessere Planbarkeit von rechtlich-marktlichen sowie kommunikativ-gesellschaftlichen Rahmenbedingungen bei den Innovationsträgern seien die Informiertheit über Wahrnehmungsaspekte und eine enge Zusammenarbeit mit der Legislative wesentlich.

■ Gemeinsame Kommunikation kann Innovationen fördern.

Um Produkte mit verbesserten Umweltaspekten erfolgreich als solche zu kommunizieren, wäre nach Einschätzung der Teilnehmer ein einheitliches Verständnis von Begriffen wie „umweltfreundlich“, „nachhaltig“ oder „grün“ von großem Nutzen. Auch wenn es verschiedene mehr oder weniger bedeutungsgleich genutzte Definitionen

gäbe, würde doch die unterschiedliche oder inflationäre Verwendung dieser Begriffe in der Kommunikation ein großes Risiko und eine mögliche Angriffsfläche darstellen. Neben einer transparenten Terminologie sollten Standards für eine klare, nicht irreführende gemeinschaftliche Kommunikation geschaffen und eingehalten werden.

Die Erfolg versprechende Kommunikation über Produkte mit verbesserten Umwelteigenschaften könne nach Ansicht der Teilnehmer auch mutig sein. Sich lediglich auf Kohlenstoffdioxid zu beschränken sei perspektivisch nicht ausreichend und könnte wie eine „Fixierung auf den CO₂-Ausstoß“ wahrgenommen werden. Daher sollten auch andere Aspekte wie zum Beispiel die Ressourceneffizienz oder produktionsbedingte Umweltbelastungen in den Vordergrund gerückt werden. Diese würden im Allgemeinen bereits mitbilanziert, aber derzeit weniger wahrgenommen. Auch die Rohstoffherkunft spiele zunehmend eine Rolle.

■ In Zielvorstellungen denken

Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung von nachhaltigen Innovationen sei ein ganzheitliches, systemübergreifendes Denken. Durch einen meist langwierigen Entwicklungs- und Umsetzungsprozess müssten mittel- oder sogar langfristige Zielvorstellungen im Auge behalten werden. Dieser Aspekt werde in Unternehmen häufig vermisst. Für nachhaltige Innovationen sei letztlich eine Nutzungsdefinition über den unmittelbaren Gewinn hinaus erforderlich, selbst wenn viele ökologische Verbesserungen Effizienzsteigerungen darstellten und damit auch Kosteneinsparungen mit sich brächten.

Ob Technologieinnovationen Realität werden können, so ein gemeinsames Fazit der Veranstaltung, hänge zu großen Teilen von einzelnen Persönlichkeiten ab, die den Mut hätten, diese zunächst innerhalb von Institutionen auch bei Gegenwind durchzusetzen sowie interne und externe Stakeholder auf diesem Weg mitzunehmen. Solche Persönlichkeiten zu erkennen und zu unterstützen sei Aufgabe der Unternehmen, aber auch der Gesellschaft im Allgemeinen.

6.1.2. Round Table 1: „Lässt sich CO₂ recyceln?“

Im Juni 2014 folgte als nächste Veranstaltung der erste „Round Table CCU“ am IASS unter der leitenen Fragestellung „Lässt sich CO₂ recyceln?“. Ziel des Workshops war zunächst die umfassende Information der Teilnehmer über die grundlegende Idee und Herangehensweise von CCU-Technologien sowie über das Förderprogramm der Bundesregierung, aktuelle Projektentwicklungen und offene Fragen von gesellschaftlicher Relevanz. Auf der Basis des so gewonnenen Wissensstands folgten zwei Themenrunden im Diskurs zwischen einem kleinen Podium und den weiteren Teilnehmern zu Aspekten der Kreislaufwirtschaft sowie der ökologischen Potenziale, die aus der Anwendung von CCU-Technologien resultieren können.

Als besonders divers und fruchtbar erwies sich die Kombination von Gästen aus der involvierten, mit CCU-Technologien befassten Community – Forschungseinrichtungen, BMBF und andere – mit Gästen ohne direkten CCU-Bezug, jedoch mit relevanten gesellschaftlichen Blickwinkeln, zum Beispiel vom Umweltbundesamt, der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, dem Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (B.U.N.D.) oder der Zeitschrift Öko-Test.

Da die Veranstaltung vorrangig einen informativen Charakter hatte und ein offener Dialog initiiert werden sollte, entstand aus dem ersten Round Table kein Thesen- oder Positionspapier. Als greifbarer Output stehen die visuellen Protokolle²⁷ zur Verfügung, die wichtige Linien der Diskussion aufgreifen und zueinander in Bezug setzen. Im Vorfeld des Round Table wurde ein Workshop-Booklet erstellt²⁸, das eine erste Version des Fact Sheet CCU enthielt (Olfe-Kräutlein et al. 2014) und Arbeiten am IASS zum Thema CCU vorstellte.

In der Folge der Veranstaltung erschienen in der Zeitschrift Öko-Test (Lasch 2014) sowie in der Zeit (Schramm 2014) umfassende Artikel zu CO₂-Recycling. Obwohl die Veranstaltung nicht durch Pressearbeit begleitet wurde, fand das Thema CCU, inspiriert durch den Round Table, Eingang in zwei bedeutende Medien.

6.1.3. Round Table 2: „CO₂-Recycling – Option für Politik und Gesellschaft?“

Im November 2015 setzte das IASS das Format „Round Table“ fort, diesmal unter der Fragestellung „CO₂-Recycling – Option für Politik und Gesellschaft?“²⁹. Der Fokus des zweiten Round Table lag weniger auf der Information der Teilnehmenden, vielmehr beschränkte sich die thematische Einführung auf einen Kurzvortrag. Stattdessen räumte die Veranstaltung mehr Zeit für die Diskussion von relevanten Schnittstellenthemen wie die Rolle von CCU-Technologien bei der Energiewende sowie von Fragen der Kommunikation von CCU sowie zu Kreislaufwirtschaft und CCU ein.

Um den Dialogcharakter in den Vordergrund zu stellen und die Gäste optimal für inhaltliche Beiträge zu aktivieren, verzichtete die Veranstaltung auf ein Panel. Stattdessen wurden zu jedem Thema drei bis fünf Gäste, explizit auch solche ohne spezielles Fachwissen im CCU-Bereich, aber mit anderer relevanter Expertise, um ein kurzes Impulsstatement gebeten, das der Moderator in den Diskussionsverlauf integrierte.

Im Vorfeld des Round Table erarbeitete das Projektteam einen Entwurf für zwölf Thesen zur gesellschaftlichen und politischen Bedeutung von CCU-Technologien. Diesen Entwurf erhielten alle Teilnehmer der Veranstaltung sowie alle Projektpartner vorab mit der Bitte um Kommentierung. Auf Basis dieser Kommentare und des während der Ver-

²⁷ Die visuellen Protokolle finden sich hier als Illustrationen der Anfangsseiten der Kapitel 1, 7, 10 und 11.

²⁸ http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/ccu_lv_workshop_booklet_140603_digital_0.pdf. Abgerufen am 25.10.2016.

²⁹ <http://www.iass-potsdam.de/en/node/2335>. Abgerufen am 25.10.2016.

anstaltung erhaltenen Inputs entstand die Endversion der Thesen, die im Dezember 2015 veröffentlicht wurde (Naims et al. 2015).

Des Weiteren wurden während der Veranstaltung Kurzstatements der aktiven Teilnehmer aufgezeichnet und auf der IASS-Webseite im Dossier zu CCU-Technologien³⁰ veröffentlicht.

6.1.4. Weitere öffentlichkeitswirksame Arbeit

Das Projektteam beteiligte sich im gesamten Projektverlauf an öffentlichen Veranstaltungen, zum Beispiel an der „Woche der Nachhaltigkeit“ (Juni 2013) oder an der Reihe „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (Februar 2015), die beide in Potsdam stattfanden. Zudem wurden diverse eingehende Presseanfragen fachlich beantwortet oder an entsprechende Experten weitergeleitet.

6.1.5. Dialogorientierte Stakeholder-Arbeit zu CCU: Input und Output zugleich

Insgesamt konnten mit den beschriebenen dialogorientierten Maßnahmen verschiedene Stakeholder-Gruppen angesprochen werden: sowohl akademische und industriennahe Fachleute als auch politische und gesellschaftliche Interessenvertreter sowie direkt und indirekt über Medienberichte eine allgemeine Öffentlichkeit. Das Projektteam am IASS gewann vertiefte Einblicke in sehr unterschiedliche Perspektiven auf CCU-Technologien in Form von Ansichten, Argumenten und Meinungen, die ohne die intensive Stakeholder-Arbeit nicht sichtbar geworden wären, da sie in den Medien und Fachdiskussionen aktuell noch keine Resonanz finden. Als Bilanz der intensiven Stakeholder-Arbeit ist also nicht nur ein Zugewinn an Information für bestimmte Zielgruppen zu verbuchen, sondern darüber hinaus auch ein ganz konkreter Input und Wissenszuwachs für die transdisziplinäre Arbeit am IASS.

6.2. Bereitstellung von Informationsmaterial und Aufbau einer Informationsplattform zu CCU-Technologien für Laien

Ein Ziel des Teilprojekts Kommunikation waren die Konzeption und hauptsächlich internetbasierte Bereitstellung von bewertungsneutralen, werbefreien Informationsmaterialien zu den Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von Kohlenstoffdioxid. Hierfür wurde im IASS-Format „Fact Sheet“ (Olfe-Kräutlein et al. 2015) ein sechsseitiges Informationsblatt zu CCU-Technologien veröffentlicht sowie eine Webplattform konzipiert und aufgesetzt.³¹ Für die Webplattform entwickelte das Projektteam als Webadresse, Claim und Logo gleichermaßen das Wording „co₂inside“ vor dem Hintergrund, einen für alle Anwendungsbereiche passenden und einprägsamen Oberbegriff zu schaffen.

6.2.1. Inhalte der Webplattform

Die Webplattform co₂inside lenkt den Besucher zu relevanten Informationen über Kohlenstoffdioxidnutzungsmöglichkeiten, indem sie die Perspektive des Suchenden einnimmt und, neben einer kurzen Überblicksdarstellung („Rohstoff CO₂“), drei zentrale Fragen stellt. Als erste Antwort stellen kurze Texte grundlegende Informations- und Argumentationsketten allgemein verständlich und bewertungsneutral dar. Dem Plattformgedanken folgend, verweist co₂inside für weitergehende Informationen auf andere, primär externe Informationsquellen. Die erwähnten drei zentralen Fragen werden im Folgenden vorgestellt:

„Funktioniert das?“ Um diese Frage zu beantworten, ist zunächst unter dem Bullet „Technologie“ das grundsätzliche Funktionsschema der CO₂-Verwertung, untergliedert in physikalische und stoffliche Nutzung, beschrieben. Es folgt eine Übersichtsgrafik (siehe Abbildung 2, Kapitel 2.4) über verschiedene Nutzungswege für CO₂, die den gesamten Zyklus von

³⁰ <http://www.iass-potsdam.de/de/content/co2-vom-abfall-zum-rohstoff>. Abgerufen am 25.10.2016.

³¹ <http://www.co2inside.de>. Abgerufen am 25.10.2016.

der CO₂-Gewinnung bis hin zu Optionen am Lebensende exemplarisch darstellt und in dieser Form optisch auf bestehende Lücken auf dem Weg zu einem Kreislauf hinweist. Der Menüpunkt „CO₂-Quellen“ greift die Frage nach der Herkunft des zu nutzenden CO₂ auf. Hier sind infrage kommende Quellen für eine Nutzung von CO₂ beschrieben: CO₂ als Nebenprodukt aus chemischen Prozessen, CO₂, das aus Rauchgasen gefiltert wird, sowie aus der Atmosphäre gewonnenes, zuvor bereits emittiertes CO₂.

„Ist das nützlich?“ Diese Frage wird aus ökologischer und ökonomischer Perspektive betrachtet. Die Bullets „Ökologie“ und „Lebenszyklus“ beschreiben derzeit absehbare mögliche Umweltauswirkungen der Anwendung von CCU-Technologien und erläutern das Life Cycle Assessment (LCA) als Methode der Wahl, um mögliche umweltbezogene Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg zu bewerten. Unter „Ökonomie“ werden schließlich mögliche Vor- und Nachteile der Anwendung von CCU-Technologien erläutert.

„Perspektive CO₂?“ Der Menüpunkt „Perspektive CO₂“ verweist per Link auf die weltweit größten Forschungsprogramme zur CO₂-Nutzung („Forschen“) sowie unter „Kreislaufdenken“ auf die mögliche Rolle dieser Technologien im Kontext einer sich entwickelnden Kreislaufwirtschaft und der dafür erforderlichen Denk- und Lebensweise.

Außerdem stellte die Webplattform in einem **Downloadbereich** Veröffentlichungen zu CCU-Technologien, zunächst nur IASS-Publikationen, zur Verfügung.

6.2.2. Gestaltung der Webplattform und Logoentwicklung

Wie häufig bei technisch-naturwissenschaftlichen Forschungsthemen ist auch bei der CO₂-Nutzung die Bildsituation ungünstig. Chemische Prozesse sind zwar in Bildern darstellbar, jedoch sind diese teilweise schwer verständlich oder ohne konkreten Bezug zu CCU-Technologien. Ein Beispiel für eine wenig plausible Illustration kann das Gas CO₂ sein, das durchsichtig ist, jedoch oft in Form von rußigen Abgasen aus Industrieschornsteinen dargestellt wird.

Zudem wären nutzbares Bildmaterial bzw. Motive vorrangig von industriellen Akteuren erhältlich und stünden möglicherweise dem Grundsatz einer werbefreien Informationsplattform entgegen. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine abstrakte Gestaltung gewählt. Vor dunklem Hintergrund erscheint ein farbiges Kleeblatt, dessen Form auch die Navigationsstruktur der vier Themenbereiche aufnimmt (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6:
Startseite der Webplattform www.co2inside.de

Quelle: www.co2inside.de

Das für die Webseite entwickelte Logo *co₂inside* (siehe Abbildung 6, oben links) ermöglicht einen optischen Wiedererkennungswert für CCU-Technologien und -Produkte. Das chemische Zeichen im Kreis transportiert einerseits die Eigenschaft des CO₂ als Inhaltsstoff, andererseits stellt es auch einen optischen Bezug zum Thema Kreislauf/Kreislaufwirtschaft her.

6.2.3. Perspektive

Die Webplattform *co₂inside* stellt in ihrer aktuellen Form ein Basisangebot dar, das Laien einen niedrigschwelligen Zugang zum Thema CO₂-Nutzung ermöglicht. Dieses Angebot ist in verschiedener Hinsicht ausbaufähig.³² Einerseits können und müssen die enthaltenen Informationen aktualisiert und ergänzt werden, andererseits kann auch der Plattformgedanke mit interaktiven Elementen wie einem Forum oder einem Blog weiterverfolgt und ausgebaut werden. Die Neutralität der Informationen ist das Alleinstellungsmerkmal des Angebots und macht die Plattform somit zu einem Bezugspunkt für alle gesellschaftlichen Organisationen, die ein Interesse an einer sachlichen Information zu CCU-Technologien und deren Bewertung haben.

6.3. Wie werden Technologien zur CO₂-Nutzung von Stakeholdern wahrgenommen und bewertet?

6.3.1. Kommunikatives Potenzial von CCU-Technologien aus Sicht von Kommunikationsfachleuten im Bereich der chemischen Industrie

Im Rahmen einer Stakeholder-Analyse wurden im Jahr 2013 mehrere Interviews mit Kommunikations-

fachleuten aus der chemischen Industrie geführt. Als „Stakeholder“ werden Individuen und Gruppen definiert, die materielle oder immaterielle Ansprüche gegenüber einer Organisation haben und in einer reziproken, vielfältigen Einflussbeziehung mit dieser stehen (Freeman 2004). Diese Einflussbeziehung kann, muss aber nicht ökonomische Aspekte beinhalten. Kommunikationsexperten in Unternehmen der chemischen Industrie, die CCU-Technologien entwickeln, und in Verbänden der Chemieindustrie verfügen innerhalb ihrer Organisation über eine komplexe Beziehungsstruktur zum Thema CCU-Technologien. Durch ihre Funktion kann davon ausgegangen werden, dass sie maßgeblichen Einfluss auf die Positionierung und Entwicklung von CCU-Technologien als Kommunikationsthema haben und daher einflussreiche Stakeholder sind, selbst in Entwicklungsphasen vor dem Markteintritt.

Um den zum Zeitpunkt des Interviews oder zukünftig für die Kommunikation zu CCU-Technologien verantwortlichen Ansprechpartner innerhalb der unterschiedlich großen Organisationen zu identifizieren, wurde über die Pressestelle bzw. den Leiter Kommunikation jeweils der „Kommunikationsexperte mit Verantwortung für das Thema Carbon Capture and Utilisation“ angefragt. Mit dem Ziel, einerseits das kommunikative Potenzial von CCU-Technologien aus Sicht der Verantwortlichen in der Industrie einschätzen zu können, andererseits aber auch in einem teils noch frühen Entwicklungsstadium Hinweise auf bisher unerkannte Probleme und Herausforderungen aus Kommunikationsperspektive zu identifizieren, wurden im August 2013 fünf Interviews³³ geführt. Drei davon fanden direkt in Unternehmen der chemischen Industrie statt. Zwei Gespräche wurden in einem entsprechenden Fachverband geführt, dort jeweils separat mit dem The-

³²Eine inhaltliche Erweiterung und optische Überarbeitung der Webseite www.co2inside.de sind für die Laufzeit des Projekts CO₂Net+ geplant. Das IASS arbeitet gemeinsam mit der DECHEMA und dem Wuppertal Institut im wissenschaftlichen Begleitvorhaben für das neue Förderprogramm des BMBF; vgl. <http://www.chemieundco2.de/>. Abgerufen am 25.10.2016.

³³Die Interviews dauerten zwischen 30 und 90 Minuten und wurden digital aufgezeichnet. Da allen Gesprächspartnern Anonymität zugesagt wurde, werden alle Zitate anonym aufgeführt. Die Kennzeichnung mit Buchstaben ermöglicht eine Zuordnung zu den unterschiedlichen Gesprächspartnern.

menverantwortlichen CCU und der Pressesprecherin. Die Gespräche hatten größtenteils einen explorativen Charakter, folgten aber den drei Grundfragen:

- Wie würden Sie aktuell die öffentliche Reflexion und Einschätzung von CCU-Technologien und -Produkten beschreiben?
- Können Sie Hindernisse für eine vielversprechende/erfolgreiche Kommunikation benennen? Können Sie Stärken identifizieren?
- Welche Zukunftsperspektiven und -potenziale sehen Sie?

Weiterhin wurden die Integration von Kommunikationsaspekten in Forschungs- und Entwicklungsprozesse, Nachhaltigkeit als Kommunikationskriterium und Glaubwürdigkeit in der Kommunikation in der chemischen Industrie diskutiert.

Explorative Interviews mit einer kleinen Anzahl von Gesprächspartnern liefern keine statistisch belastbaren Belege oder Beweise für einen zukünftigen Kommunikationsverlauf. Dennoch geben sie aus der Perspektive der Kommunikation wichtige Hinweise auf prognostizierbare, möglicherweise problematische Kommunikationsaspekte sowie auf nutzbare, vermutlich positiv zu bewertende Kommunikationsaspekte von CCU-Technologien. Wesentlich ist dabei, diese Hinweise stets als **Aussagen zur Kommunikation** zu betrachten. Sie beurteilen zum Beispiel nicht, ob die Anwendung von CCU-Technologien als „sicher“ zu betrachten ist. Diese Beurteilung muss anwendungsindividuell auf Industrieseite getroffen und von den relevanten Institutionen überprüft werden. Die in den Interviews erhaltenen Hinweise treffen jedoch eine Aussage darüber, dass von Kommunikationsexperten zum Beispiel der Aspekt der Sicherheit als ein vermutlich positiv besetztes Kommunikationsthema eingeordnet wird und somit in dieser Form in zukünftigen Kommunikationsstrategien von Unternehmen, Verbänden oder in der Politik entsprechende Verwendung finden könnte. Eher negativ bewertete Themenaspekte können so frühzeitig identifiziert und in ebendiesen Strategien adressiert werden.

6.3.1.1. Identifikation kommunikationsbezogener Stärken von CCU-Technologien

„Wir befinden uns in der Hurrhaphase.“^(a) Gefragt nach ihrer Einschätzung des allgemeinen Tenors der Medienberichterstattung, sahen die Befragten ein insgesamt positives Bild und eine als förderlich zu bewertende Konsensfähigkeit zum Thema CO₂-Vermeidung, „Die Zeit ist reif, die Leute wissen, dass man CO₂ nicht für immer einfach so weiter rauspusten kann.“^(b) Neben dem passenden Zeitpunkt wurde dem Thema CCU-Technologien eine grundsätzliche Kommunikationseignung zugeschrieben: „Dass Kohlendioxid nutzbar ist, ist natürlich ein schönes Thema.“^(b) und „Das Thema ist einfach sexy.“^(c) Auch ein wachsendes Interesse wurde bemerkt: „In der Kommunikation spielt das Thema eine Rolle, in der wissenschaftlichen Community, aber auch darüber hinaus. Die Kollegen in der Pressestelle bekommen regelmäßig Anfragen.“^(c) Die Befragten waren auch in der Lage, spezifische positive kommunikationsbezogene Eigenschaften zu benennen. So schrieben sie der Technologie eine Ungefährlichkeit zu, aufgrund derer sie nicht mit Kommunikationsproblemen rechnen: „Es steckt keine Gefahr dahinter.“^(c) oder „Wenn es um eine Spezialchemikalie geht, mit der der Verbraucher nie in Kontakt kommt, dann wird das kommunikativ nicht aufgegriffen.“^(a) Nachhaltigkeit als Treiber für CCU-Technologien wurde ebenfalls als kommunikativer Vorteil gesehen: „Selbst umweltgetriebenen NGOs ist daran gelegen, dass man etwas findet, was man mit CO₂ machen kann. ... Dafür kann man Akzeptanz schaffen.“^(a) und „Der Trend geht hin zu grünen, nachhaltigen Produkten. Das ist für das gute Gewissen. Der Verbraucher zahlt möglicherweise ein bisschen mehr oder das Gleiche und freut sich dann, wenn er ein ‚grünes Produkt‘ erworben hat. Grüne Produkte liegen im Trend, grüne Kunststoffe hoffentlich auch!“^(b)

6.3.1.2. Identifikation kommunikationsbezogener Schwächen von CCU-Technologien

Als Schwäche bezüglich der Kommunikation bewerteten die Befragten vor allem die Nähe zu „Carbon Capture and Storage“-Technologien (CCS), zum einen in technischer, zum anderen auch in semantischer Hinsicht: „Negative Stimmen können sich breit-

machen, dass man die CCS-Technik unterstützt, indem man die Abscheidung in Kraftwerken fördert“(b) und „Der Begriff CCU gefällt mir nicht, wegen der Verheiratung mit CCS. Ich würde unter allen Umständen versuchen, ihn von der CCS-Diskussion abzukoppeln. ... Es besteht die Gefahr, dass alles in einen Topf geworfen wird.“(a)

Auch ökologische Aspekte scheinen kommunikationsbezogen als riskant eingeschätzt zu werden. Während die Befragten hier einerseits ein positives Potenzial erkannten, sahen sie andererseits die Gefahr, in den Verdacht des „Greenwashings“ zu geraten, also in die Gefahr, als Akteur der Industrie bezeichnet zu werden, der seine Produkte umweltfreundlicher oder ökologisch nützlicher oder sinnvoller darstellt, als sie es eigentlich sind: „[In der Wahl des Markennamens] gibt es natürlich auch Stolperfallen. Nehmen wir mal an, dass das Wort ‚green‘ darin vorkommt. Ich könnte mir vorstellen, dass sich die diversen NGOs darauf stürzen und fragen: ‚Was bitte schön soll denn daran grün sein?‘ Dann ist man automatisch in einer nicht ganz einfachen Diskussion.“(b) Anwendungsspezifische, ökologisch relevante Aspekte, zum Beispiel der Rohstoff- und Energieverbrauch und produktspezifische Recyclingoptionen, wurden ebenfalls als potenzielle Kontroversen in einem öffentlichen Diskurs gesehen: „Wir brauchen viel Energie, um CO₂ zu verarbeiten. Diese Rechnung muss man aufmachen. Die Leute machen das im Moment nicht, aber sie werden es machen. Dann spielen erneuerbare Energien eine Rolle.“(c) und „Hier ist noch die Frage des Recyclings. Wir können nur sagen, dass wir das CO₂ für eine bestimmte Dauer parken. Da kommen die ganz schnell drauf, dass das wieder freigesetzt wird bei der Verbrennung.“(b)

Neue Technologien, die möglicherweise Risiken für die Gemeinschaft mit sich bringen, aber gleichzeitig kaum einer öffentlichen Kontrolle unterliegen und keinen sichtbaren Nutzen für Anwender bieten, sind häufiger Gegenstand von Akzeptanzproblemen als andere (Renn 2005). Einen solchen Interessenkonflikt zwischen Industrie und Öffentlichkeit antizipierten auch die befragten Kommunikationsexperten: „Da ist das ‚Bürger gegen alles‘-Phänomen. Wie kriegt man eine Transparenz hin, wie stellt man Vertrauen her? Gerade bei Phänomenen wie Stuttgart 21 oder dem Berliner Flughafen kann man ganz schnell sehen,

was passiert, wenn man die Leute nicht mitnimmt, und was für Probleme entstehen können.“(d) Grundsätzlich wurde die chemische Industrie als potenziell problematischer Kommunikator eingeschätzt: „Wenn wir Anlagen bauen, besteht immer die Gefahr, dass sich jemand dagegen wendet.“(b) oder „Da kommt dann jemand und sagt: ‚Das ist gefährlich, das steht unter hohem Druck, da kann was entweichen.‘ ... Chemieprodukte bieten einfach eine hohe Handhabe für Anfeindungen.“(b) Oder etwas genereller: „Jedes Unternehmen hat bestimmte Gegner, die versuchen, Aspekte zu finden, mit denen sie einem schaden können.“(b) Die technische Komplexität des Themas könnte ebenfalls ein Kommunikationshindernis darstellen: „Das größte Problem, was CCU-Technologie oder CCS angeht, ist, dass nicht verstanden wird, worum es wirklich geht. Wo liegen die Chancen, wo liegen die Herausforderungen und Probleme? Das ist nicht jeder Zielgruppe klar.“(d) Ein Verständnisproblem, das zu Ablehnung führen könnte: „Die Technologie wird angezweifelt werden.“(a)

Generell wurde Skepsis gegenüber der Wichtigkeit des Themas geäußert: „Das Thema ist nicht relevant genug. Man kann das mit Erdöl heute vergleichen: Keiner beschäftigt sich damit – woher kommt mein Schal oder mein Joghurtbecher heute? Dass alles erdölbasiert ist, wissen vielleicht 10%. So sehe ich das auch mit CO₂.“(c) Insgesamt schätzten die Befragten die Relevanz des Themas eher niedrig ein: „CCU emotionalisiert nicht. Es ist zu technisch getrieben. Eine technische Hürde ist zu überwinden, damit sich die Leute damit beschäftigen. Mit einmal Kommunizieren ist es nicht getan. Man muss verschiedene Kommunikationskanäle immer wieder spielen, um das Thema zu transportieren. ... Es wird immer ein Nischenthema bleiben.“(d) oder „Man kann nicht sagen, ich kann hier CO₂ einsparen, mache dann mal eine LCA dazu, aber wenn es gar keinen Nutzen für den Kunden gibt, dann muss ich mich fragen: Warum mache ich das überhaupt?“(d) Ein Befragter verwies in diesem Zusammenhang auf die Diskrepanz zwischen Selbstsicht und Fremdsicht: „Das Unternehmen denkt, es ist der Nabel der Welt. Kommunikatoren im Unternehmen und der Rest der Welt sprechen oft eine andere Sprache.“(b) Daraus folgte: „Die Nutzung von CO₂ bleibt eine Nischenanwendung. Mittelfristig werden wir nicht unsere großen Kunststoffe damit herstellen.“(c)

Schließlich identifizierten die Befragten unterschiedliche Herangehensweisen und Zeitlinien in Forschungs- und Entwicklungsprozessen und in den Medien als mögliches Problem für Kommunikationsaktivitäten: „Es wird ausgeblendet, dass es Zeit braucht, diese Dinge zu entwickeln. Es kann sein, dass die Leute das Interesse verlieren.“^(c) oder „Intern haben wir darüber kommuniziert. Extern macht es keinen Sinn, damit rauszugehen. ... Wir reden über Plattfortmenttechnologien, mit denen wir in fünf bis zehn Jahren am Markt sind.“^(d) In diesem Zusammenhang wurden auch nochmals grundsätzliche Zweifel an der Eignung von CCU-Technologien als Medienthema geäußert: „Wenn ich ein Thema betrachte, frage ich: Interessiert es, bewegt es oder nützt es? Wenn wir da das CCU-Thema nehmen, ist es von der Relevanz her schon mal sehr schwierig zu kommunizieren, und extern können wir das ganz leicht beantworten.“^(d) Ratsam schien also eine moderate Annäherung an die Kommunikation zu CCU: „Momentan sehe ich es als Kommunikationschance, wenn man nicht zu viele Erwartungen weckt.“^(b)

6.3.1.3. Zwischenfazit: Eigenperspektiven der Chemiebranche

Auch wenn die individuellen Hintergründe die Perspektiven der Befragten deutlich prägen, lassen sich an den in diesem Projektteil geführten Expertengesprächen durchaus **gemeinsame Stärken und Schwächen von Kommunikationsaspekten von CCU-Technologien** erkennen. Als positive Themenrahmen für die Kommunikation zu CCU-Technologien identifizieren und bewerten die Befragten die Charakterisierung „technischer Fortschritt“ und eine besondere „Anziehungskraft“ und belegen dies mit Attributen wie „Zeitgeist“, „einfach schönes Thema“, „einzigartig“, „sexy“. Ein weiterer positiver Themenrahmen ist „Sicherheit“, da die Experten den CCU-Technologien keine wesentlichen technischen Risiken zuschreiben. Ökologische Aspekte stellen hingegen einen ambivalenteren Themenrahmen dar. Mit positiven Attributen wie „weniger CO₂-Emissionen“ und anderen nachhaltigkeitsrelevanten Aspekten wird hier eine Kommunikationschance gesehen,

die allerdings klar von der Befürchtung begleitet wird, dass den Akteuren der Chemieindustrie eine solche Kommunikation als „Greenwashing“ ausgelegt werden könnte. Ein deutlich negativer Themenrahmen ist die semantische und technologische Nähe zu CCS-Technologien, die es nach Ansicht der Experten in der Kommunikation möglichst zu vermeiden gilt (siehe hierzu auch Kapitel 8).

Inwiefern diese Hinweise aus der Branche mit den Perspektiven eines breiteren Stakeholder-Kreises übereinstimmen, stellt der folgende Abschnitt 6.3.2 dar. Abschnitt 6.3.3 diskutiert die möglichen Implikationen dieser Hinweise für eine zukünftige Kommunikation zu CCU-Technologien.

6.3.2. Bewertung kritischer Aspekte von CCU-Technologien durch unterschiedliche Stakeholder im Rahmen einer Diskursveranstaltung

Im Zuge der Dialogarbeit im Projekt CO₂ntext lud das IASS im November 2015 zu einem Round Table mit dem Titel „CO₂-Recycling – Option für Politik und Gesellschaft?“ ein (zu weiteren Informationen zu dieser und weiteren Veranstaltungen siehe Kapitel 6.1). Drei Diskussionsrunden mit Kurzimpulsen von IASS-Mitarbeitern sowie Experten aus Politik, Verbänden und NGOs widmeten sich den Themenfeldern CCU und Energiewende, Kommunikation und Kreislaufwirtschaft. Die Diskussionsrunden dienten einerseits ganz konkret dem Austausch mit den Stakeholdern, andererseits aber auch der Beobachtung der Argumentationslinien unterschiedlicher Stakeholder durch die Gastgeber. Die im Folgenden wiedergegebenen, vom Projektteam dokumentierten Argumentationslinien (siehe hierzu auch die Dokumentation auf der IASS-Homepage unter <http://www.iass-potsdam.de/en/node/2335>) entstammen der Themenrunde Kommunikation mit dem Titel „Chance oder Hindernis? Kommunikation für CO₂-Recycling“³⁴ und beleuchten Kommunikationsaspekte von CCU-Technologien aus der Perspektive unterschiedlicher Stakeholder aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft.

³⁴ Kurzimpulse von: Dr. Barbara Olfe-Kräutlein (IASS), Dr. Christoph Steinbach (Chemische Nanotechnologie, DEHEMA e. V.), Timo Bovi (Senior Consultant, Johanssen + Kretschmer Strategische Kommunikation GmbH), Tilman Benzing (Energie, Klimaschutz und Rohstoffe, Rohstoffpolitik, Verband der Chemischen Industrie e. V.).

Auch wenn in den letzten Jahren in unterschiedlichen Medien bereits einige Artikel über CO₂-Nutzung erschienen sind und sich derzeit Berichte über die damit verbundenen Anwendungsmöglichkeiten mehreren, spielt das Technologiefeld im öffentlichen Diskurs eine nur wenig sichtbare Rolle. Die existierenden Medienberichte können jedoch ein wichtiger Einflussfaktor im Verlauf von organisationsinternen sowie öffentlichen Diskursen sein.

Dementsprechend wurde die Rolle von Journalisten teils kontrovers diskutiert. Die Annahme, dass Journalisten Maximalszenarien ohne die notwendige Vorsicht kommunizierten und so falsche Erwartungen weckten, stand der These gegenüber, dass Pressestellen von Instituten und Unternehmen in ihrer Arbeitsweise das vermutete Selektionsverhalten der Medien antizipierten und ihre eigene Kommunikation teils in ähnlicher Weise überspitzten.

Eine weitere Gefahr in der Kommunikation zu CCU-Technologien liege darin, dass wiederholt **für die Risikobewertung ungeeignete Studien** herangezogen oder die aufgeführten Risiken von Laien unverhältnismäßig eingeschätzt und bewertet würden.

Die Teilnehmer betrachteten auch die Wahl von Begrifflichkeiten als entscheidend für die Einordnung und das Verständnis von CCU-Technologien. Vor allem in der **semantischen Nähe zu CCS** wurde eine kommunikative Hürde für CCU gesehen. So wurde argumentiert, dass der Begriff CCU mit kommunikativen Risiken behaftet sei, da CCS in Deutschland bereits zu negativ belegt wäre. Die Verwendung eines neutraleren Begriffs wie „CO₂-Recycling“ anstelle von CCU wurde dagegen als vorteilhafter eingeschätzt. Weiterhin wurde angemerkt, dass auch die Rolle der Energie in der Kommunikation eine wichtige Rolle spielen könne. Der Begriff „stoffliche Nutzung“ von CO₂ könne hier nützlich sein, um ihn von der „energetischen Nutzung“ fossiler Energieträger zu unterscheiden. Weiterhin wurden in die Begriffsdiskussion eingebracht: „effizienter“ oder „nachhaltiger Umgang mit Ressourcen“ sowie „effizientes Kohlenstoffrecycling“.

Insgesamt wurde der kommunikative Kontext von CCU als „sehr groß“ und vielschichtig wahrgenommen. Hier seien Akteure in der Kommunikation in Wissenschaft und Wirtschaft, aber auch die Bericht erstattenden Medien hinsichtlich der **Kontextualisierung** gefordert: So sollten Klimaschutzargumente nicht in den Vordergrund gestellt werden, wenn Klimaschutz nicht das eigentliche Thema sei. Als ein Beispiel wurde ein Bericht über CCU im Handelsblatt unter der Headline „Kampf ums Klima“ (Fröndhoff 2015) benannt. In der Diskussionsrunde herrschte Einigkeit darüber, dass der Klimaschutz weder die ursprüngliche Motivation noch das primäre Potenzial der Entwicklung von CCU-Technologien und somit als Teilaspekt von CCU stets vorsichtig zu kommunizieren sei. Die thematische Verknüpfung stelle jedoch insbesondere wegen der engen Verbindung zwischen dem Abgas CO₂ und dem Klimawandel eine Herausforderung dar und erschwere es, in der dazugehörigen Kommunikation einen Bezug zum Klimawandel zu vermeiden.

Muss man überhaupt zu CCU kommunizieren?

Debattiert wurde, ob zu CCU-Technologien erst kommuniziert werden sollte, wenn Produkte durch die Anwendung dieser Technologien besser oder billiger werden. In der Folge entwickelte sich die Frage, inwieweit überhaupt zu Rohstoffen aktiv kommuniziert werden kann und soll, die nicht im Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit stehen. Als weitere Herausforderung wurde betrachtet, die größten Potenziale von CCU, beispielsweise in Form der Verbreiterung der Rohstoffbasis, zu vermitteln, wenn diese nicht als gesellschaftliches Problem wahrgenommen werden. Schließlich wurde angemerkt, dass eine nicht stattfindende Kommunikation auch keine Lösung sei: **Man könne nicht nicht kommunizieren**. Da aktive Kommunikation immer interessengeleitet sei, spiele eine entscheidende Rolle, wer spreche und mit wem.

Diskutiert und als wesentlich befunden wurde ebenfalls die Frage, ob Kommunikationsprobleme allgemein möglicherweise das größte Risiko bei der Einführung von CCU-Technologien darstellen, im Speziellen in Form der Gefahr, dass diese als „**Greenwashing**“ von **Chemiekonzernen** eingeordnet werden, also als ein bewusster oder unbewusster Versuch, eine ökologisch effektfreie Technologie als „grüne“ Technologie darzustellen.

6.3.2.1. Zwischenfazit: Perspektiven verschiedener Stakeholder auf CCU

Ebenso wie die individuell geführten Interviews mit Vertretern der Chemieindustrie stellen einzelne Aussagen von Stakeholdern keine belastbaren Belege für anzunehmende Kommunikationsverläufe dar. Sie bilden vielmehr ab, welche Argumentationslinien in Diskussionen und Dialogen zu CCU auftauchen können, und sind so, vor allem im Vergleich und Zusammenspiel mit den in den Einzelgesprächen erfassten Hinweisen (siehe hierzu Kapitel 6.3.1.3), Indikatoren für Kommunikationsaspekte, die zukünftige Kommunikationsstrategien aufnehmen und adressieren sollten.

Insgesamt erwies sich die Diskussionskonstellation mit technischen Experten aus dem Bereich CO₂-Recycling und Teilnehmern anderer relevanter Fachbereiche, zum Beispiel von der Zeitschrift Ökotest, der Deutschen Umwelthilfe oder dem Umweltbundesamt, als spannungsreich. Erwähnt seien an dieser Stelle lebhaftige Begegnungen zwischen Repräsentanten einer NGO und CCU-Experten aus Wirtschaft und Politik. Rückblickend bewerteten die Teilnehmer die Diskussionen in den Konstellationen als besonders lehrreich, die im jeweiligen Arbeitsalltag selten oder nie auftreten. Der Dialog mit diesen sehr unterschiedlichen Stakeholdern verdeutlichte Folgendes:

- Es lassen sich nur wenige einheitliche Positionen zum Thema CCU-Technologien erkennen, und wenn, dann nur unter technischen Experten aus der Community.
- Abgesehen davon dominieren die von ihrem jeweiligen Hintergrund geprägten Perspektiven der unterschiedlichen Stakeholder und lenken in die jeweils eingenommene Richtung.
- CCU-Experten aus der technischen Community sehen wenig Anknüpfungspunkte für eine kontroverse Debatte in der Öffentlichkeit.
- Dem stehen die zu beobachtenden Einwände³⁵ von Stakeholdern aus anderen Bereichen entgegen.

Offenbar überzeugen hier die während der Veranstaltung benannten Vorteile³⁶ der Technologien nicht ausreichend, um Einwände im Vorfeld quasi automatisch zu entkräften.

Die aus dem Diskurs mit Vertretern ganz unterschiedlicher Interessengruppen gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichten im Ergebnis auch die Eignung eines solchen Veranstaltungsformats, um individuelle, in Teilen aber wahrscheinlich durchaus verallgemeinerbare Positionen und Meinungen zu erkennen und in weitere wissenschaftliche Analysen und in die Entwicklung entsprechender Kommunikationsstrategien aufzunehmen.

CCU-TECHNOLOGIEN IN DEN MEDIEN

Eine Medienanalyse erfasste und analysierte Medienberichte zum Thema CCU in den Jahren 2012/2013 und 2015. Ziel dabei war es, Aufschluss über Akteure, erwähnte Projekte und Produkte, verwendete Begrifflichkeiten, direkt genannte positive und negative Aspekte oder entsprechende Konnotationen sowie über Bewertungen, aufgezeigte Risiken und Einschätzungen insgesamt zu gewinnen. Die Medienanalyse ist Gegenstand einer Publikation, die sich derzeit im Veröffentlichungsprozess befindet.

³⁵Für weitere Details siehe <http://www.iass-potsdam.de/en/node/2335>. Abgerufen am 25.10.2016.

³⁶Für weitere Details siehe <http://www.iass-potsdam.de/en/node/2335>. Abgerufen am 25.10.2016.

Kommunikationschancen aus Stakeholdersicht	Kommunikationshindernisse aus Stakeholdersicht
<ul style="list-style-type: none"> ■ Diskurs ist vielschichtig, neue Begrifflichkeiten für CCU-Prozesse könnten noch eingeführt werden 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Begrifflichkeiten sind ein semantisches Risiko wegen der Nähe zu CCS
<ul style="list-style-type: none"> ■ Kontextualisierung von Einzelaspekten kann Deutungshoheit schaffen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Größtes Risiko bei der Produkteinführung > Wahrnehmung als Greenwashing
<ul style="list-style-type: none"> ■ Nicht kommunizieren geht nicht > Chancen nutzen! 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Konsumenten haben bislang keine Berührung zum Produkt
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ungeeignete Studien werden herangezogen, um Gefahrenpotenzial zu beurteilen
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kontextualisierung von Begriffen kann Risiken bergen
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Rohstoffmangel wird nicht als gesellschaftliches Problem wahrgenommen
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Journalisten nutzen überzogene Szenarien, die ihnen die Pressestellen in vorseilendem Gehorsam anbieten

Tabellen 5 und 6: Übersicht über Hindernisse und Chancen in einer zukünftigen Kommunikation zu CCU-Technologien, betrachtet aus der Perspektive von Kommunikationsexperten aus der chemischen Industrie (5) und Teilnehmern einer Dialogveranstaltung am IASS (6)

Quelle: IASS

Kommunikationschancen aus Branchensicht	Kommunikationshindernisse aus Branchensicht
<ul style="list-style-type: none"> ■ Notwendigkeit der Emissionsreduktion ist „common sense“ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ CCU-Technologien sind technologisch und semantisch zu nah an CCS-Technologien
<ul style="list-style-type: none"> ■ Die Technologie ist zu weit entfernt vom Konsumenten, um Gegenstand von Ablehnung zu werden 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nutzer der Technologien könnten des Greenwashings beschuldigt werden
<ul style="list-style-type: none"> ■ CCU-Technologien sind nicht gefährlich 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Das Thema wird evtl. von der Öffentlichkeit nicht als relevant wahrgenommen
<ul style="list-style-type: none"> ■ CCU wird als „attraktives“ Medienthema eingeordnet 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Thema steht im Spannungsfeld zwischen Industrie und Öffentlichkeit
<ul style="list-style-type: none"> ■ Die Idee, CO₂ zu recyceln, trifft „Zeitgeist“ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Das Thema ist zu komplex
<ul style="list-style-type: none"> ■ Das Thema ist speziell 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Das Thema ist zu speziell
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Logiken von Forschung und Entwicklung (F&E) und Medien harmonisieren nicht
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Produkte werden keinen funktionellen Mehrwert für den Konsumenten bringen

6.3.3. Fazit: Empfehlungen für die weitere Kommunikation zu CCU-Technologien

Während die befragten Kommunikationsexperten der chemischen Industrie sich dem Thema Kommunikationsaspekte von CCU-Technologien eher strategisch annäherten und die Vor- und Nachteile aus Kommunikationsperspektive sachlich abwogen, stand beim Round Table der teils recht heftige Austausch von Argumenten allgemeinerer Natur im Vordergrund. Zudem erleichterte die strukturierte Gesprächsführung mit den Experten die Ausarbeitung eines Themenrahmens sowie gemeinsamer bzw. konträrer Positionen, während die Beiträge der Diskussionsrunden verstärkt die individuellen Blickwinkel und Positionen der Teilnehmer wiedergaben und naturgemäß nur wenig strukturiert erfolgten.

Im Vergleich der Ergebnisse beider Erfassungen von Einschätzungen und Meinungen zum Thema CCU-Technologien und -Kommunikation ließen sich neben diesen grundsätzlichen Unterschieden aber auch Gemeinsamkeiten erkennen.

Sowohl die Befragten aus der Chemieindustrie als auch die Teilnehmer der Diskursveranstaltungen, die einen breiteren fachlichen und organisationsbezogenen Hintergrund mitbrachten, identifizierten als Hindernisse für eine erfolgreiche Kommunikation die semantische Nähe zu CCS-Technologien und das Risiko, dass CCU-Technologien dem Verdacht des „Greenwashings“ ausgesetzt werden könnten. Des Weiteren stuften beide Gruppen **fehlende Berührungspunkte zum Konsumenten** bzw. mangelnde Relevanz bezogen auf das Kommunikationspotenzial als Schwäche ein. Die Experten aus der chemischen Industrie schienen dabei auf entsprechende negative Erfahrungen zurückzublicken: „Mangelnde Berührungspunkte“ werteten sie auch als positive Eigenschaft des Themas CCU-Technologien, da bei einem geringeren Ausmaß an gefühlter Betroffenheit weniger öffentliche Ablehnung zu befürchten sei.

Die **Rolle der Medien** wurde von beiden Gruppen als problematisch eingeschätzt, hervorzuheben sind diesbezüglich die Argumente „unterschiedliche Logik“, „zu komplex“ und „überzogene Szenarien“. Den genannten Aspekten liegt die Befürchtung einer

unpassenden medialen Rezeption der spezifischen Eigenschaften von CCU-Technologien zugrunde.

Während die Befragten aus der Chemieindustrie der CCU-Technologie vielversprechende kommunikationsbezogene Eigenschaften zuschrieben, darunter Gefahrenfreiheit, Besonderheit oder die Übereinstimmung mit dem Common Sense oder dem „Zeitgeist“, bezogen sich die als positiv einzuordnenden Kommentare in der Diskussionsrunde des Round Table eher auf kommunikationstaktische Eigenschaften. Hier gelte es, so die Meinungen der Stakeholder, die Chancen der noch fehlenden Kontextualisierung zu nutzen, den Diskurs zu lenken und zu prägen.

Was folgt aus den Bewertungen der Befragten und der Diskursteilnehmer für die Planung zukünftiger Kommunikationsaktivitäten? Folgende **kritische Aspekte**, die eine differenzierte Kommunikationsstrategie adressieren muss, wurden genannt:

- eine klare begriffliche und kontextuelle Abgrenzung von CCS-Technologien;
- die Notwendigkeit der technologieindividuellen Bewertung und Kommunikation von konkreten ökologischen Effekten;
- die realistische Darstellung der Möglichkeiten, aber vor allem auch der Grenzen der Klima- und Umweltauswirkungen durch die Anwendung von CCU-Technologien.

Hierbei geht es vorrangig um Prävention in Bezug auf Missverständlichkeit über die möglichen umweltbezogenen Eigenschaften („Greenwashing“) durch transparente Bewertung und ebensolche Kommunikation.

Ein weiterer zu adressierender Aspekt ist die Besetzung von noch undefinierten **Themenkontexten und Begrifflichkeiten**. Derzeit existiert im CCU-Bereich noch keine organisationsübergreifend genutzte Terminologie. Deren Bedeutung ist nicht zu unterschätzen, da mit einer Begriffsbezeichnung automatisch erste assoziative Brücken gebaut werden. So kann es vorkommen, dass ein Laie als Rezipient die Begriffe „CCU“ und „CO₂-Recycling“ als

etwas ganz Unterschiedliches begreift, obwohl der Kommunikator mit beiden dieselbe Technologiefamilie beschreiben will: Während CCU ohne weitere Erklärung zunächst nicht aussagekräftig ist und eine begriffliche Nähe zu CCS erzeugt, stellt „CO₂-Recycling“ zum Beispiel umgehend einen großen Bezugsrahmen zu Wiederverwertungsprozessen her und ist auf einer sehr einfachen Ebene selbsterklärend. Gegen eine Verwendung des Begriffs spricht jedoch seine in mehrfacher Hinsicht mangelnde Präzision (siehe hierzu auch Kapitel 7).

Das Festlegen eines möglichst analog genutzten Oberbegriffs kann nicht durch einzelne Akteure erfolgen und sollte ebenso wie die Kontextualisierung Teil einer gemeinsamen, zum Beispiel im Rahmen eines Fachverbands zu erarbeitenden Kommunikationsstrategie sein. Zu welchen Aspekten von CCU-Technologien Bezüge hervorgehoben und besonders betont werden, wird die Einordnung durch den Rezipienten beeinflussen: Geht es primär um den Klimawandel? Geht es um die Erschließung neuer Rohstoffquellen? Brauchen wir diese als Ersatz für fossile Kohlenstoffquellen, handeln wir also ökologisch motiviert, oder ist die Motivation vielleicht auch eine politische, die Deutschland bzw. die deutsche Chemieindustrie unabhängiger von Ölimporten machen will? Auch wenn sich die Anwendungsmöglichkeiten von CCU-Technologien stark voneinander unterscheiden: Eine gemeinsame Strategie von Akteuren im CCU-Bereich könnte hierzu Position beziehen und einen Kontext schaffen.

Die **Verantwortung** für die Entwicklung von Grundlagen einer gemeinsamen Kommunikationsstrategie könnte bei den Akteuren liegen, die als einendes Interesse die weitere Entwicklung und Implementierung von CCU-Technologien haben. Dieses gemeinsame Interesse kann als kleinster gemeinsamer Nenner formuliert werden, trotz der Tatsache, dass die individuellen Interessen im Detail sehr unterschiedlich sind – nicht nur aufgrund der Branchen und Anwendungsbereiche, sondern auch aufgrund der Unterschiedlichkeit der gesellschaftlichen Rollen und Aufgaben der involvierten NGOs, Unternehmen, Wissenschaft, Verbände und Politik. Das **Ziel** einer gemeinschaftlichen Kommunikationsstrategie, welche die genannten Punkte berücksich-

tigt, wäre es, sowohl bei unterschiedlichen Stakeholdern als auch bei einer möglichst breiten Öffentlichkeit eine unvoreingenommene Bereitschaft zur Auseinandersetzung mit CCU-Technologien zu fördern. Sie kann, un gelenkt von individuellen und kommerziellen Interessen, von Akteuren in Politik, Wissenschaft und Gesellschaft sowie aus Industrie und Verbänden gemeinsam initiiert, geplant und koordiniert und unter Umständen bzw. in Teilen sogar auch gemeinsam umgesetzt werden, zum Beispiel in Form eines zu gründenden Interessenverbands oder, etwas weniger institutionell, in einer gemeinsamen Gruppe für Kommunikation, möglicherweise innerhalb bestehender Verbandsstrukturen. Dies setzt zu jedem Zeitpunkt Transparenz in allen Angaben zu den jeweiligen CCU-Anwendungen und unbedingte Tatsachenbasiertheit voraus.

Empfehlenswert ist ein Minimum an gemeinsamer Kommunikationsstrategie, zumindest jedoch die Entwicklung von Richtlinien zu relevanten Begrifflichkeiten und Themenrahmen, um national und auch international die Voraussetzung für eine unvoreingenommene Diskussion der weiteren Förderung und der Anwendung von CCU-Technologien herzustellen und das gesellschaftliche Bewusstsein für Themen wie Kreislaufwirtschaft oder Recycling und neue technologische Wege in eine nachhaltigere Wirtschaft und Gesellschaft zu fördern.



Diese Illustration ist ein gezeichnetes Protokoll („Graphic Recording“) der Diskussionsveranstaltung „Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) - Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Die Zeichnung beinhaltet verschiedene Argumentationslinien und Fragen, die die Diskussionen prägten. Siehe hierzu auch Kapitel 6.
 © IASS/Gabriele Heinzel Graphic Recording

7. Szenarienentwicklung zur Kennzeichnung von CO₂-basierten Produkten

Vor dem Hintergrund einer bevorstehenden Markteinführung von **CO₂-basierten Produkten**³⁷ stellt sich die Frage, ob und wie deren spezifische Eigenschaften einem möglichen Käufer, sei es ein Geschäftskunde oder ein Endverbraucher, mitgeteilt werden können. Geht es um die Kennzeichnung einer Produkteigenschaft, die nicht nur von einem einzelnen Anbieter auf dem Markt kommuniziert werden soll, eignen sich hierfür vor allem herstellerunabhängige Labels, wie zum Beispiel der Blaue Engel. Für die Kennzeichnung von CCU-Produkten ist zunächst grundsätzlich eine Vielzahl von bestehenden Labels, Zertifizierungen und Kennzeichen in Erwägung zu ziehen. Zunächst gilt es daher zu betrachten, welche Möglichkeiten umweltbezogener Kennzeichen für CO₂-basierte Produkte generell infrage kommen und diese in einen Bezug zu setzen zu den möglichen Eigenschaften und Botschaften von Produkten, die unter Anwendung von CCU-Processen entstanden sind.

7.1. Möglichkeiten der umweltbezogenen Kennzeichnung von CO₂-basierten Produkten

7.1.1. Kennzeichnung mit Bezug zur produzierenden Organisation

Eine Möglichkeit sind Zertifizierungen mit Bezug zum Management der Aspekte, in denen eine Organisation Umweltverantwortung trägt. Gegenstand der Betrachtung sind in diesem Fall Fertigungs- und Produktentwicklungsprozesse. In diese Kategorie fallen beispielsweise freiwillige Zertifizierungen des Umweltmanagementsystems EMS³⁸ (wie ISO 14001 (ISO 2015) – öffentliche Umwelterklärung³⁹) oder die unter dem Begriff „Ecodesign“ in der ISO 14006:2011-10 (ISO 2006b) zusammengefassten Leitlinien zur Berücksichtigung umweltverträglicher Produktgestaltung. Die entsprechenden Richtlinien sind im Fachbericht ISO/TR 14062 zusammengefasst (ISO 2002).

³⁷ CO₂-Produkte können Zwischenprodukte oder Endprodukte sein; siehe hierzu auch Kapitel 4.

³⁸ EMS: Environmental Management System (Umweltmanagementsystem).

³⁹ <http://www.emas.de/teilnahme/umwelterklaerungen/>. [aufgerufen am 3.11.2016].

7.1.2. Kennzeichnung mit Bezug zu den spezifischen Eigenschaften eines Produkts, Prozesses oder einer Dienstleistung

Die zweite Möglichkeit sind Zertifizierungen mit Bezug auf den Herstellungsprozess eines Produkts oder auf die Herstellung bestimmter Produkteigenschaften. In diesem Fall sind die gefertigten Zwischen- oder Endprodukte selbst Gegenstand der Betrachtung. Dieser Zertifizierungsform zuzurechnen sind die in ISO 14020 (ISO 2000) beschriebenen Umweltkennzeichnungen und -deklarationen. Diese lassen sich in drei verschiedene Typen unterteilen.

Umweltkennzeichnungen nach **Typ I** (DIN EN ISO 14024) (ISO 1999) charakterisieren Produkte einer bestimmten Produktkategorie, die über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg betrachtet geringere Umweltauswirkungen verursachen als vergleichbare Produkte. Diese Umweltauswirkungen werden nach von Dritten festgelegten Kriterien innerhalb eines freiwilligen Programms wie zum Beispiel dem „Blauen Engel“ gemessen.

Eine Variante dieses Typs sind Produktkennzeichnungen, die nur einzelne Umweltaspekte, zum Beispiel den Energie- oder Wasserverbrauch, berücksichtigen. Sie sind daher in ihrer Aussagekraft nicht so umfassend wie die Umweltkennzeichnungen des Typs I, können jedoch mit ihren durch externe Instanzen festgelegten Parametern und Werten eine ebenso transparente und nachvollziehbare Aussage über Einzelaspekte treffen. Einige Beispiele sind in Abbildung 7 unter dem Begriff „**wie Typ I**“ („Type-I like“) (UNOPS 2009) zu finden.

Als umweltbezogene Anbietererklärungen nach **Typ II** (DIN EN ISO 14021) (ISO 2016) werden Deklarationen bezeichnet, in denen eigenverantwortliche Aussagen der Hersteller über die relevanten Umweltaspekte⁴⁰ von Produkten beworben und nicht durch Dritte verifiziert werden. Eine Überprüfung der getroffenen Umweltaussagen muss zumindest auf Nachfrage hin möglich sein. Die Wahl der Kriterien erfolgt in diesem Fall durch das betroffene Unternehmen bzw. relevante Verbände.

Umweltdeklarationen nach **Typ III** (DIN EN ISO 14025) (ISO 2006a) geben die Ergebnisse einer Lebenszyklusanalyse an (siehe hierzu auch Kapitel 4). Die zu berichtenden Umweltparameter und das Format des Berichts werden von einem qualifizierten Dritten unter Einbeziehung aller Beteiligten, beispielsweise relevanter Unternehmen und Verbände sowie Umwelt- und Verbraucherschutzorganisationen oder öffentlicher Einrichtungen, in sogenannten Product Category Rules (PCR) festgelegt. Die Umweltdaten und -auswirkungen für die Deklaration werden von den Unternehmen entsprechend kompiliert. Diese sind zwar durch Dritte überprüft, werden jedoch nicht bewertet und beurteilt. Eine vergleichende, wertende Einordnung der Ergebnisse bleibt also dem Nutzer überlassen. Um ihm dies zu erleichtern, werden in der ISO-Norm Regeln für die Darstellung der Ergebnisse vorgegeben, die auch Laien den Vergleich unterschiedlicher Produkte und Parameter ermöglichen soll (ISO 2006b).

Zudem existiert eine Vielzahl von anderen Labels und Kennzeichnungen, die den genannten ISO-Vorschriften nicht entsprechen und deswegen keiner dieser Kategorien zugeordnet werden können.

⁴⁰ Was unterscheidet einen Umweltaspekt von einer Umweltauswirkung? Ein Umweltaspekt bezeichnet einen Aspekt der Tätigkeiten, Produkte oder Dienstleistungen einer Organisation, der Auswirkungen auf die Umwelt verursachen kann. Eine solche Umweltauswirkung ist jede positive oder negative Veränderung der Umwelt, die ganz oder teilweise aufgrund der Tätigkeiten, Produkte oder Dienstleistungen der Organisation eintritt; vgl. http://www.emas.de/fileadmin/user_upload/06_service/PDF-Dateien/indirekte_umweltaspekte_umweltmanagement.pdf.

Typen produktbezogener Umweltkennzeichnungen



Abbildung 7: Beispiele unterschiedlicher Typen von Umweltkennzeichen

Quelle: Lorente Lafuente

7.2. Anmerkungen zu Aussagekraft und Eigenschaften von Umweltkennzeichnungen und -deklarationen

Grundsätzlich sollten bei der Entwicklung von Umweltkennzeichnungen und -deklarationen alle relevanten Aspekte über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg mit einbezogen werden. Das Ausmaß, in dem dies tatsächlich geschieht, variiert jedoch in Abhängigkeit von der Art der Umweltkennzeichnung oder -deklaration, der Art der Aussage und der Produktkategorie (ISO 2000). Für die Berechnung von Umweltauswirkungen für eine Kennzeichnung der Typen I und III muss die Methodik angewendet werden, die in den ISO-14040- (ISO 2006b) und ISO-14044-Standards (ISO 2006c) beschrieben ist („Ökobilanz“, siehe hierzu auch Kapitel 4). Für Selbstdeklarationen (Typ II) ist dies nicht zwangsläufig erforderlich (ISO 2016). Allerdings können auch Umweltdeklarationen nach Typ II gleicher-

maßen zu einem transparenten, validen Ergebnis führen, solange nachprüf- und nachvollziehbare Bewertungsparameter angewendet und offengelegt werden.

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, erfüllen die einzelnen Arten von Umweltkennzeichen unterschiedliche Bedürfnisse und unterscheiden sich erheblich in ihrer Anwendbarkeit und ihrem Nutzen für den Verbraucher. Hinsichtlich einer möglichen Kennzeichnung von CCU-Produkten sind vor allem Plausibilität, Kontrollierbarkeit und Glaubwürdigkeit relevante Eigenschaften einer Kennzeichnung, denn umweltbezogene Kennzeichnungen sind sowohl im Geschäftskunden- (B2B) als auch im Endkundenbereich (B2C) ein Instrument der Informationspolitik, denn Umwelt-, Gesundheits- oder Klimafreundlichkeit sind Vertrauenseigenschaften, die im Gegensatz zu anderen Produkteigenschaften vom Abnehmer von Zwischen- oder Endprodukten weder vor noch

nach dem Kauf direkt überprüft werden können. Umso wichtiger ist die Qualität einer solchen Kennzeichnung. Sie sollte auf wissenschaftlich fundierten Parametern und auf durch qualifizierte Dritte verifizierbaren Messungen beruhen. Auch sollten alle relevanten Informationen transparent erarbeitet und, wenn nicht von vorneherein bereitgestellt, zumindest auf Nachfrage erhältlich sein.

Einer repräsentativen EU-weiten Befragung zu ihren Einstellungen zu Umwelteigenschaften von Produkten im Auftrag der EU-Kommission zufolge haben EU-Bürger eher Vertrauen in Umweltkennzeichnungen, die durch Dritte vergeben wurden (66% Zustimmung), als in die Selbstaussagen der Hersteller, die ihre Produkte als umweltfreundlich vermarkten (52% in Europa, nur 31% in Deutschland) (European Commission & TNS 2013). Weiterhin steigt gemäß einer Studie des Umweltbundesamts UBA (Grunenberg & Kuckartz 2013) die Glaubwürdigkeit von Umweltkennzeichnungen an, wenn:

- die Kennzeichnungen von mehreren Partnern gemeinsam entworfen und vergeben werden (z.B. „Blauer Engel“)⁴,
- die Arbeit der beteiligten Partner vollumfänglich überprüfbar ist, auf nationaler oder internationaler Ebene,
- der Zugang zu solchen überprüfbaren Informationen garantiert ist,

- Interessenkonflikte (z.B. zwischen den potenziellen Empfängern des Labels und den Prüfern) vermieden werden (Delmas, Nairn-Birch & Balzarova 2013).

Für die potenziellen Anwender von Umweltkennzeichnungen sind zudem die damit verbundenen Kosten und Umsätze von großer Relevanz. Ob bestimmte Umweltkennzeichnungen im Einzelnen nur zusätzliche Kosten verursachen oder auch direkt den Absatz steigern können, ist kaum nachweisbar und nur über entsprechende Hinweise in Untersuchungen zur Akzeptanz abzuleiten. So fragt zum Beispiel die bereits erwähnte Studie der Europäischen Kommission nach Vertrauen in umweltfreundliche Produkte sowie nach der Wichtigkeit, die EU-Bürger diesen zumessen. Hieraus kann aber nur auf eine wohlwollende Haltung gegenüber diesen Produkten geschlossen werden; eine konkrete Aussage über deren Einfluss auf konkrete Kaufentscheidungen lässt sich daraus nicht ableiten (European Commission & TNS 2013).

7.3. Umweltbezogene Botschaften von CCU-Produkten und -Prozessen

Ein mögliches Label für CCU-Prozesse oder für unter Anwendung von CCU-Prozessen angefertigte Produkte könnte sich auf unterschiedliche Eigenschaften beziehen. Denkbar wären, abgeleitet von den erläuterten grundlegenden Potenzialen von CCU-Produkten und -Prozessen, von Wahrneh-

⁴In diesem Fall sind dies vier Organisationen:

1. Die Jury Umweltzeichen ist das unabhängige Beschlussgremium des „Blauen Engels“ mit Vertretern aus Umwelt- und Verbraucherverbänden, Gewerkschaften, Industrie, Handel, Handwerk, Kommunen, Wissenschaft, Medien, Kirchen, Jugend und Bundesländern.
2. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit ist Zeicheninhaber und informiert regelmäßig über die Entscheidungen der Jury Umweltzeichen.
3. Das Umweltbundesamt fungiert mit dem Fachgebiet „Ökodesign, Umweltkennzeichnung, umweltfreundliche Beschaffung“ als Geschäftsstelle der Jury Umweltzeichen und entwickelt die fachlichen Kriterien der Vergabegrundlagen des „Blauen Engels“.
4. Die RAL gGmbH ist die Zeichenvergabestelle. Sie organisiert im Prozess der Kriterienentwicklung die unabhängigen Expertenanhörungen, das heißt die Einbindung der interessierten Kreise.

Vgl. <https://www.blauer-engel.de/de/der-blaue-engel/wer-steckt-dahinter>, 11. Abgerufen am 11. August 2016.

mungs- und Kommunikationsperspektiven und von den spezifischen Eigenschaften der CCU-Technologien selbst vier thematische Botschaften (siehe Abbildung 8), auf deren Basis eine mögliche Zertifizierung oder Produktkennzeichnung aufgebaut werden könnten. Dies sind:

- verringerter CO₂-Fußabdruck (siehe Kapitel 2 und 4)
- verringerter Verbrauch fossiler Rohstoffe (siehe Kapitel 2 und 4)

- Produkt ist relevant für Kreislaufwirtschaft und/oder Recycling⁴² (siehe Kapitel 2 und 6).
- Produkt enthält CO₂ als Rohstoff (siehe Kapitel 2 und 4)

In der Kombination dieser Eigenschaften und der im Vorfeld erläuterten existierenden Möglichkeiten der Zertifizierung entsteht eine Reihe von Kennzeichnungsszenarien (siehe auch Tabelle 7), die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

Mögliche Botschaften zu CCU-basierten Produkten

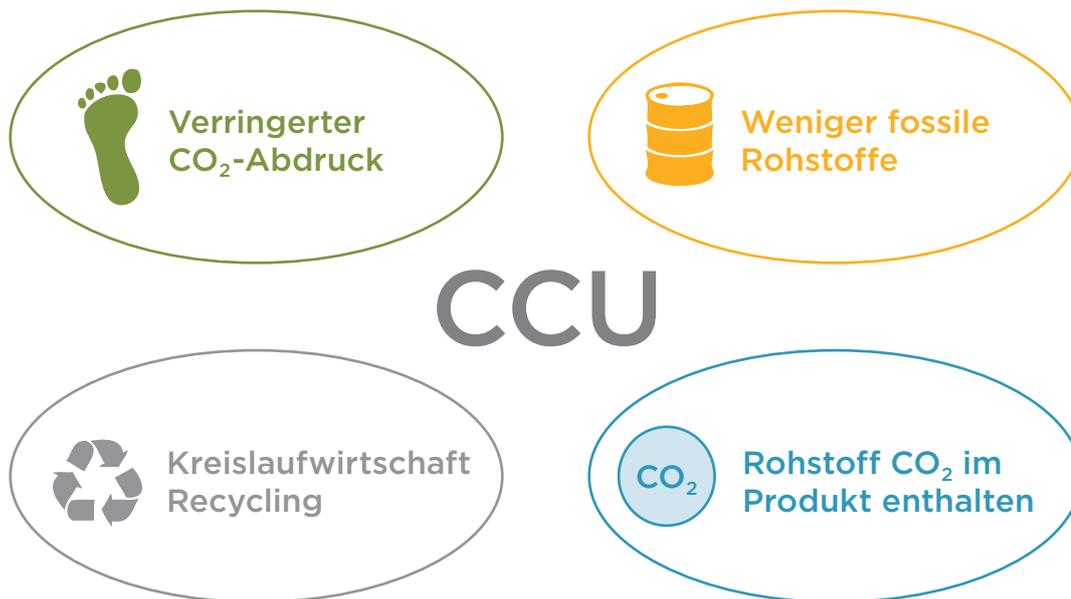


Abbildung 8: Mögliche Botschaften eines unter Anwendung von CCU-Technologien hergestellten Produkts

Quelle: IASS

⁴²Die Kreislaufwirtschaft bezeichnet ein Konzept, das zum Ziel hat, alle Rohstoffe, die in Waren verwendet werden, vollständig, also möglichst abfallfrei, einer weiteren Nutzung zuzuführen. Recyclingprozesse sind Teil dieses Konzepts, werden aber durch andere Formen der Weiternutzung wie z.B. Kaskadennutzung ergänzt. In diesem Text werden beide Begriffe genutzt; Kreislaufwirtschaft steht hier für die konzeptionelle Zielvorstellung, während Recycling ein konkreter Prozess auf dem Weg zu dieser ist. Die europäischen Richtlinien zum Umgang mit Abfällen sind seit 2012 im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) festgelegt. Vgl. hierzu auch: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft#strap1>, <https://www.bmwi.de/DE/Themen/Industrie/Rohstoffe-und-Ressourcen/entsorgungs-und-kreislaufwirtschaft.html>. Abgerufen am 3.11.2016.

Botschaft	Labeltyp	Zertifizierte Öko-label Typ I (ISO 14024)	Zertifizierte Ökolabel „wie Typ I“	Selbstdeklarationen Typ II (ISO 14021)	Umweltdeklarationen nach Typ III (ISO 14025)
	Produkttyp				
	Zwischenprodukt (B2B-Kommunikation)	Nicht möglich, Zertifikate Typ I bilden stets mehr als eine Umwelteigenschaft ab	Möglich, vermutlich geringer Nutzen, da Geschäftskunden nicht Zielgruppe	Möglich, als Deklarationsoption für Anwenderallianz empfehlenswert	Möglich und empfehlenswert als Teil der Umweltdeklaration
	Endprodukt (B2C-Kommunikation)	Nicht möglich, Zertifikate Typ I bilden stets mehr als eine Umwelteigenschaft ab	Möglich und empfehlenswert	Möglich, als Deklarationsoption für Anwenderallianz empfehlenswert	Möglich, vermutlich geringer Nutzen, da Endverbraucher nicht Zielgruppe
	Zwischenprodukt (B2B-Kommunikation)	Nicht möglich, Zertifikate Typ I bilden stets mehr als eine Umwelteigenschaft ab	Möglich, vermutlich geringer Nutzen, da Geschäftskunden nicht Zielgruppe	Möglich, als Deklarationsoption für Anwenderallianz empfehlenswert	Möglich und empfehlenswert als Teil der Umweltdeklaration
	Endprodukt (B2C-Kommunikation)	Nicht möglich, Zertifikate Typ I bilden stets mehr als eine Umwelteigenschaft ab	Möglich und empfehlenswert	Möglich, als Deklarationsoption für Anwenderallianz empfehlenswert	Möglich, vermutlich geringer Nutzen, da Endverbraucher nicht Zielgruppe
	Zwischenprodukt (B2B-Kommunikation)	Nicht möglich, Zertifikate Typ I bilden stets mehr als eine Umwelteigenschaft ab	Nicht möglich, Botschaft umfasst Produkteigenschaft, keine Umweltauswirkungen	Möglich, als Deklarationsoption für Anwenderallianz empfehlenswert	Nicht möglich, keine Auskunft über Umweltauswirkungen des Produkts
	Endprodukt (B2C-Kommunikation)	Nicht möglich, Zertifikate Typ I bilden stets mehr als eine Umwelteigenschaft ab	Nicht möglich, Botschaft umfasst Produkteigenschaft, keine Umweltauswirkungen	Möglich, als Deklarationsoption für Anwenderallianz empfehlenswert	Nicht möglich, keine Auskunft über Umweltauswirkungen des Produkts
	Zwischenprodukt (B2B-Kommunikation)	Nicht möglich, Zertifikate Typ I bilden stets mehr als eine Umwelteigenschaft ab	Nicht möglich, Botschaft umfasst Produkteigenschaft, keine Umweltauswirkungen	Möglich, als Deklarationsoption für Anwenderallianz empfehlenswert	Nicht möglich, keine Auskunft über Umweltauswirkungen des Produkts
	Endprodukt (B2C-Kommunikation)	Nicht möglich, Zertifikate Typ I bilden stets mehr als eine Umwelteigenschaft ab	Nicht möglich, Botschaft umfasst Produkteigenschaft, keine Umweltauswirkungen	Möglich, als Deklarationsoption für Anwenderallianz empfehlenswert	Nicht möglich, keine Auskunft über Umweltauswirkungen des Produkts

Tabelle 7: Übersicht möglicher Zertifizierungsszenarien für CCU-Produkte und -Prozesse

Quelle: IASS

7.4. Szenarien für die Kennzeichnung für unter Anwendung von CCU-Technologien erzeugte Zwischen- und Endprodukte

Die in Abbildung 8 dargestellten Botschaften von CCU-Produkten und -Prozessen können auf verschiedene Art und Weise in das in Abschnitt 7.1. erörterte System von möglichen Zertifizierungen einfließen. Zu betrachten sind mehrere Szenarien, die in Tabelle 7 im Überblick dargestellt werden. Zu beachten sind zudem die Unterschiede der zu bezeichnenden Gegenstände – Zwischenprodukte, Endprodukte, Produkttypen – sowie die Ausrichtung auf Endverbraucher (B2C) oder Geschäftskunden (B2B).

7.4.1. CCU-Botschaft 1: verringerter CO₂-Fußabdruck

Die mögliche Botschaft „verringertes CO₂-Fußabdruck“ ist in zahlreichen bereits existierenden Zertifizierungsoptionen vermittelbar. Ein verringerter CO₂-Fußabdruck gilt als relevante Umweltauswirkung im Hinblick auf den Klimawandel und wird als Umweltkategorie bereits heute üblicherweise in Life-Cycle-Impact-Assessment-Methoden (siehe hierzu Kapitel 4) berücksichtigt. Daher können für CCU-Produkte unterschiedliche Kennzeichnungen angestrebt werden.

Keine Option ist für diese Botschaft nach derzeitigem Entwicklungsstand eine Kennzeichnung aus dem Bereich Typ I, da ein verringerter CO₂-Fußabdruck nur eine einzige Umweltauswirkung darstellt, ein Umweltzeichen des Typs I jedoch immer mehrere Faktoren für ein bestimmtes Produkt oder einen Produkttyp beinhaltet.

Möglich wären zur Kennzeichnung eines verringerten CO₂-Fußabdrucks ein Zertifikat „wie Typ I“, das nur eine einzige Umweltauswirkung beschreibt, sowohl für die Geschäfts- als auch für die Endkundenkommunikation, ein Typ-II-Zertifikat (ISO 14021) zur Selbstdeklaration oder eine Umweltdeklaration nach Typ III (ISO 14025).

7.4.2. CCU-Botschaft 2: weniger fossile Rohstoffe

Auch die verringerte Nutzung von fossilen Ressourcen ist als wesentliche Botschaft der Potenziale von CCU-Technologien in den bestehenden Zertifizierungsmodellen schon – zumindest teilweise – enthalten. Ein reduzierter Rohstoffverbrauch gilt üblicherweise als Umweltauswirkung auf die Verknappung der fossilen Brennstoffe und wird als Umweltkategorie ebenfalls schon in den am häufigsten verwendeten Life-Cycle-Impact-Assessment-Methoden (siehe hierzu Kapitel 4) berücksichtigt. Somit können für CCU-basierte Produkte also unterschiedliche Kennzeichnungen angestrebt werden.

Ebenso wie für den CO₂-Fußabdruck ist für den Ressourcenverbrauch eine alleinige Kennzeichnung aus dem Bereich „Typ I“ derzeit nicht möglich, da auch hier nur eine einzige Umweltauswirkung benannt ist. Möglich wäre jedoch auch hier eine Kennzeichnung in Form des zertifizierten Kennzeichens „wie Typ I“, sowohl für die Geschäfts- als auch für die Endkundenkommunikation, eines Typ-II-Zertifikats zur Selbstdeklaration (ISO 14021) oder im Rahmen einer Umweltdeklaration nach Typ III (ISO 14025).

7.4.3. CCU-Botschaft 3: Kreislaufwirtschaft/Recycling

Die Botschaft „Recycling/Kreisläufe schließen“ fügt sich thematisch zwar in bestehende Zertifizierungssysteme ein, bringt in der CCU-bezogenen Umsetzung im Detail jedoch erhebliche definitorische Schwierigkeiten mit sich, die eine Kennzeichnung zu überwinden hätte, wie auf Seite 76 erläutert wird.

ABFALL, RECYCLING, WIEDERVERWENDUNG, VERWERTUNG: BEGRIFFLICHE HÜRDEN IN ZUSAMMENHANG MIT DEM KREISLAUFWIRTSCHAFTSGESETZ (KRWG)

Eine grundlegende Voraussetzung dafür, einen Prozess als „Recycling“⁴³ und „recyceltes“ CO₂ ausgehend davon als Roh- oder Inhaltsstoff bezeichnen zu können, wäre nach den geltenden gesetzlichen Regelungen zunächst die Einstufung von CO₂ als Abfall. Momentan ist CO₂ zwar ein anerkanntes Treibhausgas, gilt jedoch definitorisch nicht als Abfall: Gemäß **KrWG** (siehe § 2 Geltungsbereich) sind nur gasförmige Stoffe, die in Behältern gefasst sind, als Abfälle zu behandeln. Nach diesem Prinzip wären CO₂-Emissionen aus der Industrie nicht immer als „gasförmiger Abfall“ einzustufen, da die CO₂-Verdichtung und -Einlagerung in Behältern für CCU keine grundsätzliche Voraussetzung darstellen.

Problematisch wäre in diesem definitorischen Zusammenhang außerdem, dass die Option der Nutzung von CO₂ aus der Atmosphäre (siehe hierzu auch Kapitel 4 und 5) in einem solchen Zertifizierungsmodell nicht berücksichtigt werden könnte, da das in der Atmosphäre enthaltene Kohlenstoffdioxid durch biologische oder chemisch-technische Verfahren rückgewonnen und wiederverwertet wird. Somit handelt es sich bei auf diesem Weg gewonnenen CO₂ definitionsgemäß nicht um „Abfall“, also um Reste, die bei der Zubereitung, Herstellung oder Nutzung von etwas entstehen und somit ein mögliches Grundmaterial eines deklarierten Recyclingprozesses sind.

Bestenfalls könnte der Prozess als **Wiederverwendung**⁴⁴ bezeichnet werden. Doch auch diese Bezeichnung träfe nicht präzise zu, da sich der Begriff „Wiederverwendung“ im KrWG auf Bestandteile bezieht, die keine Abfälle sind und noch ein zweites Mal für ihren ursprünglichen Zweck eingesetzt werden. Dies trifft zumindest auf von industriellen Anlagen emittiertes CO₂ nicht zu.

Nach den Definitionen der Abfallhierarchie wäre stattdessen **„Verwertung“** der besser passende Begriff: „Verwertung“ im Sinne des KrWG § 3, Art. 23 (Bundesgesetzblatt 2012) ist „jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die

⁴³ Im Gegensatz zum Begriff „Wiederverwendung“ ist „Recycling“ im Sinne des KrWG „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind“; Bundesgesetzblatt (2012).

⁴⁴ „Wiederverwendung“ im Sinne des KrWG „ist jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren“; KrWG Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz). Bundesgesetzblatt (2012).

Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen.“

Auch wenn für CCU-Prozesse in der Abfallbehandlungshierarchie lediglich der Begriff „Verwertung“ Anwendung finden kann, müssen in der Praxis dennoch Kennzeichnungen aus dem Bereich Recycling betrachtet werden, da für eine Kategorie „Verwertung“ keine gesonderte Kennzeichnung im Endkundenbereich existiert.

Im Bereich Recycling gibt es einen großen Bestand an Kennzeichnungen, die in der Regel auf dem Universal Recycling Symbol basieren. Diese Symbole wurden entwickelt, um das Recyclingverfahren bei der Abfallentsorgung zu vereinfachen, und kommunizieren eine Vielzahl von Informationen, die von der Materialklassifizierung, die die Entsorgung des Produkts erleichtern soll, bis zu den Inhalten von Recyclingmaterial reichen.⁴⁵

Obgleich einige Prozesse, die emittiertes CO₂ nutzen, konzeptuell als Recyclingprozess betrachtet werden könnten und somit in jedem Fall einen Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft darstellen, ist mit den verfügbaren Varianten des Universal Recycling Symbol die Kommunikation als CO₂-basiertes Produkt vermutlich am schwierigsten umsetzbar. Zum einen kann, wenn der Prozentwert des CO₂-Inhalts angegeben werden muss, der Rezyklatanteil im Endprodukt zu niedrig sein, um dieses für eine entsprechende Zertifizierung zu qualifizieren. Zum anderen beziehen sich Recyclingzeichen hauptsächlich auf die Rezyklierbarkeit des Produkts selbst oder auf bestimmte Inhaltsstoffe, die rezyklierbar oder im Hinblick auf die Produktentsorgung von Bedeutung sind, nicht aber auf rezyklierte Stoffe in der chemi-

schen Zusammensetzung der enthaltenen Materialien. Darüber hinaus ist ein solches Zeichen für die Verwendung von CO₂ in der Produktion von Energieträgern nicht einsetzbar, da es ausschließlich Prozesse der stofflichen Nutzung beschreibt.

Die Zertifizierungsszenarien in Tabelle 7 verdeutlichen die begrenzten Optionen, diesen Aspekt von CCU-Produkten in eine Zertifizierung einfließen zu lassen, denn weder eine Kennzeichnung nach Typ I noch nach „wie Typ I“ ist nach derzeitigem Entwicklungsstand möglich. Lediglich eine Selbstdeklaration nach Typ II kann angestrebt werden.

Des Weiteren hebt die mögliche Botschaft von Recycling und Kreislaufwirtschaft nur die Tatsache hervor, dass das CO₂ wiederverwendet oder verwertet wurde, beschreibt aber nicht, wie sich das Verbleiben des CO₂ in einer weiteren Nutzung auf die Umwelt auswirkt (z. B. durch die Bindungsdauer oder erhöhte Effizienz; siehe hierzu auch Kapitel 2,3 und 4), weil diese Effekte für jede CCU-Anwendung unterschiedlich sind. Daher ist eine Integration des Recyclingaspekts in Kennzeichnungen vom Typ III ebenfalls nicht realisierbar.

⁴⁵ Zum Beispiel: <https://www.scsglobalservices.com/recycled-content-certification>, http://www.recycle-steel.org/-/media/Files/SRI/Media%20Center/LEED_Oct2012.pdf, <http://www.savoia.com/news.php?s=news&n=50&lang=en>.
Aufgerufen am 3.11.2016.

Ein Symbol für CO₂-Recycling?

Das isländische Unternehmen Carbon Recycling International nutzt bereits ein Kohlenstoff-Recycling-Logo, das direkt Bezug auf das Universal Recycling Symbol nimmt:



Abbildung 9: Logo des Unternehmens Carbon Recycling International

Quelle: Webseite der Carbon Recycling International, <http://carbon-recycling.is/>, Juni 2016

Auch eine Variante des Universal Recycling Symbol mit CO₂ ist im Internet auffindbar, jedoch ohne identifizierbare Urheberschaft.



Abbildung 10: CO₂-Variante des „Universal Recycling Symbol“

Quelle: Das Symbol tritt ohne erklärte Urheberschaft und ohne weitere Kommentierung auf zwei Webseiten auf: <http://stoppingclimate-change.com/sitemap.htm> und <http://www.wabisabinews.com/#!Recycling-CO2-%E2%80%93-with-Diamonds/cjds/56feaa7b0cf21ff2b5fcd528/>, beides Juni 2016

7.4.4. CCU-Botschaft 4: Rohstoff CO₂ im Produkt enthalten

Für die Botschaft „Rohstoff CO₂ im Produkt enthalten“ würde sich eine Kennzeichnung von CCU-Produkten mit einem eigenen, noch zu entwickelnden Kennzeichen nach Typ II (Selbstdeklaration) eignen. Ein solches Kennzeichen wäre auf eine große Bandbreite von Produkten aus CCU-Prozessen anwendbar, vorausgesetzt, dass sich betroffene Unternehmen und Verbände auf gemeinsame Vergabekriterien und ein Kennzeichen einigen. Welche Wertigkeit einem solchen Kennzeichen zukommt, hängt wiederum von der Berücksichtigung der Kriterien Transparenz und Nachvollziehbarkeit in dessen Entwicklung ab.

Ein Vor-, aber auch ein Nachteil liegt in der großen Varianz der möglicherweise zu kennzeichnenden Produkte, da eine Vergleichbarkeit von Messparametern angesichts dessen nur schwer herzustellen sein dürfte.

Da das enthaltene CO₂ im Endprodukt, also nach Abschluss des Produktionsprozesses, keine Auswirkungen auf die Umwelt hat, ist die Eigenschaft nicht direkt als umweltbezogen zu betrachten. Eine Kennzeichnung über Kennzeichen der Kategorien Typ I und Typ III wäre daher nicht möglich.

Ein Risiko einer solchen selbst entwickelten Kennzeichnung besteht in einer möglichen Missverständlichkeit hinsichtlich der Tatsache, dass in einem Produkt verwertetes CO₂ nicht zwingend verbesserte Umwelteigenschaften des Gesamtprodukts zur Folge hat. Dies könnte zum Beispiel vermieden werden, wenn nur Produkte mit einer positiven Ökobilanz gekennzeichnet bzw. zertifiziert würden, was wiederum eine sehr strikte Kontrolle durch die Zertifikatgeber verlangen würde.

7.5. Kennzeichnungsoptionen

7.5.1. Optionen zur Kennzeichnung von CO₂-basierten Produkten für Geschäftskunden (B2B)

Für die Kommunikation mit Geschäftskunden (B2B) ist für CCU-Zwischenprodukte eine Umweltdeklaration des Typs III zu empfehlen. Kennzeichen dieses Typs umfassen umfangreiche umweltrelevante Informationen und bewerten in keine spezielle Richtung, da sie von einer Gewichtung der spezifischen Eigenschaften absehen. So bleibt eine zuverlässige, transparente und gleichzeitig flexible Anwendung von individuellen Kennzeichnungen für eventuelle Folgeprodukte möglich und erlaubt es dem Abnehmer, selbst zu entscheiden, welche Umweltaspekte für die jeweilige Produktkommunikation am bedeutendsten sind.

7.5.2. Optionen zur Kennzeichnung von CO₂-basierten Produkten für Endverbraucher

Die Betrachtung der Szenarien macht deutlich, dass prinzipiell durchaus Möglichkeiten bestehen, CO₂-basierte Produkte über bestehende Systeme zu kennzeichnen. Im Sinne einer hohen Glaubwürdigkeit und Bekanntheit aufseiten der Konsumenten sowie standardisierter Verfahrensweisen im Kennzeichnungsprozess wäre eine Integration in bestehende Kennzeichnungen, idealerweise in Typ-I-Zertifizierungen, für Endverbraucher erstrebenswert. Einer Umsetzung derartiger Kennzeichnungen stehen jedoch unterschiedliche Hindernisse entgegen.

Eine Kennzeichnung von CCU-basierten Endprodukten müsste produktspezifisch erfolgen und wäre folglich nur schwer auf verschiedene Produkttypen zu übertragen und daher nicht verallgemeinerbar für die gesamte Bandbreite der CCU-Optionen.

Aus diesem Grund ist die notwendige Herstellung einer Übertragbarkeit von quantifizierbaren Umweltauswirkungen bei diesen sehr heterogenen Produkten nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich, sodass eine Zertifizierung und Kennzeichnung für CCU-Produkte nach Typ I wie im Fall des „Blauen Engels“ für Recyclingpapier nicht realisierbar sind.

Denkbar wäre hingegen die Integration der Nutzung eines effizienten CCU-Prozesses bei der Herstellung eines Produkts als *ein* Bewertungskriterium innerhalb der Bilanzierung für Typ-I-Zertifikate, sofern dies transparent und nach den in Abschnitt 4 erläuterten Standards geschieht.

In allen Fällen würde eine Zertifizierung von CCU-Produkten allerdings eine Anpassung oder Erweiterung der bestehenden Bewertungskategorien erfordern – ein Umstand, der eine Realisierung frühestens mittelfristig möglich macht. Eine solche Bewertung könnte dann in Produktkategorien, für die bereits eine Typ-I-Kennzeichnung existiert, integriert werden.

Ein weiterer Hinderungsgrund für die Entstehung einer Typ-I-Zertifizierung für CCU-Produkte sind die im Vergleich relativ hohen damit einhergehenden Kosten und die starke Fremdkontrolle des Zertifizierungsprozesses.

Anders stellt sich die Situation jedoch bezüglich einer möglichen Zertifizierung nach Typ II oder Typ III dar. Hier liegt die Verantwortung für die Entwicklung beim Unternehmen bzw. bei den relevanten Verbänden, insbesondere hinsichtlich der Auswahl des einzelnen hervorzuhebenden Umweltaspekts (Typ II) und der Erarbeitung und Einigung auf gemeinsame Product Category Rules (PCR) (Typ III).

Eine Typ-II-Kennzeichnung ist folglich unmittelbar realisierbar, jedoch nur im Hinblick auf die Botschaften 1 und 2 aus Umweltsicht aussagekräftig und direkt überprüfbar. Eine Typ-III-Kennzeichnung setzt, wie zuvor erläutert, die erfolgreiche Entwicklung der PCR für CCU-Prozesse und -Produkte voraus, was auf der Basis der bereits fortgeschrittenen wissenschaftlichen Entwicklung und guten Literaturlage zu LCA bei CCU-Prozessen und -Produkten ebenfalls kurzfristig umsetzbar erscheint (siehe hierzu auch Kapitel 3.2).

Insgesamt stellen Zertifizierungen im Bereich der Typen II und III im frühen Entwicklungsstadium vieler CCU-Technologien bis zum Erreichen einer breiteren Marktreife wohl die einzige direkte und gleichzeitig für Unternehmen relativ autarke Umsetzungsmöglichkeit für eine Produktkennzeichnung dar.

Zertifizierungen des Typs II stellen eine weniger komplexe Bewertung dar als die bekannten Kennzeichen des Typs I, während Zertifizierungen des Typs III keine Bewertung, sondern nur Werte angeben. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass eine für den CCU-Sektor entwickelte, transparente und verständliche Selbstdeklaration, die natürlich alle zwingenden Eigenschaften von Typ-III-Deklarationen wie die Bearbeitung von den nach ISO 14025 notwendigen PCR beinhalten sollte, bis zu einem bestimmten Punkt ebenfalls als zweckmäßig (für die Botschaften 1 und 2) und als notwendig (für die Botschaften 3 und 4) einzustufen ist.

Voraussetzungen für eine Zertifizierung von nicht nur einzelnen CCU-Produkten mit einem Kennzeichen des Typs II sind die frühzeitige Bildung einer Allianz von Anwendern von CCU-Technologien oder, bei Zwischenprodukten, deren Abnehmern, wenn möglich bereits in der Entwicklungsphase, sowie die strikte Beachtung der Grundsätze der ISO 14020 und die Übereinstimmung mit dem UWG, um Glaubwürdigkeit und Überprüfbarkeit zu gewährleisten.

Eine weitere denkbare Option zur Kennzeichnung von CCU-Produkten gegenüber dem Endverbraucher ist ein Label, das außerhalb des bestehenden Zertifizierungssystems und der relevanten ISO-Normen steht. Ein solches von Produzenten von möglichen CCU-Produkten in der Industrie zu nutzendes Label hätte den Vorteil, dass unkompliziert und schnell eine einfache Botschaft für Endverbraucher bereitgestellt werden könnte. Die Entwicklung einer solchen Kennzeichnung wäre als eine Vorstufe in den Entwicklungsprozess anderer Zertifizierungsoptionen integrierbar. Allerdings sind solche Kennzeichen keine Option für Umweltaspekte oder Umweltauswirkungen und stehen, wenn die Angaben nur schwammig oder nicht extern überprüfbar sind, in dem Verdacht, ein Produkt möglicherweise umweltfreundlicher erscheinen lassen zu wollen, als es tatsächlich ist.

7.6. Fazit

Grundsätzlich kann eine mögliche Kennzeichnung von CCU-Produkten verschiedene Vor- und Nachteile mit sich bringen:

PRO	KONTRA
<ul style="list-style-type: none"> Steigerung der Bekanntheit von CCU-Prozessen, sowohl im B2B- als auch im B2C-Bereich 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr eingeschränkte Anwendbarkeit besteht für Endprodukte innerhalb der existierenden Zertifizierungslandschaft und daher als Typ I bzw. integriert in Typ I nur mittel- bis langfristig realisierbar Bei Endprodukten stellt sich aufgrund der vorhandenen Vielzahl von Siegeln die Frage der Sichtbarkeit Hoher Aufwand und Kosten der Zertifizierung (besonders für Typ I und III) Mögliche direkte Auswirkungen von Labels auf den Absatz sind generell, und damit auch bei CCU-Produkten im Endkundenbereich, schwer planbar
<ul style="list-style-type: none"> Steigerung des Kaufanreizes für CCU-basierte Produkte im B2B- und B2C-Bereich 	
<ul style="list-style-type: none"> Relativ kurzfristige Einführung für die B2B-Kommunikation möglich (Typ III) 	
<ul style="list-style-type: none"> Relativ kurzfristige Einführung als Typ II für Endprodukte möglich 	
<ul style="list-style-type: none"> Gesellschaftliches Bekanntmachen einer Technologie, die zum Beispiel Alternativen zum Verbrauch fossiler Ressourcen aufzeigt 	

Tabelle 8: Pro und kontra CCU-Label

Quelle: IASS

Auch wenn es aktuell noch Unklarheiten in den Perspektiven zur Kennzeichnung und etliche zu überwindende Hindernisse in der Ausgestaltung und Erreichung einer Zertifizierung für CCU-Produkte gibt, so ist es für Akteure in der Industrie und Verbandslandschaft dennoch empfehlenswert, in Zusammenarbeit mit Experten aus den Bereichen Umweltschutz und Zertifizierung bereits jetzt die Entwicklung von Kennzeichnungs- und Zertifizierungsoptionen in Erwägung zu ziehen und gegebenenfalls vorzubereiten.

Unumgänglich für eine Weiterentwicklung der Möglichkeiten der transparenten Kennzeichnung von CCU-Produkten sind die Erarbeitung von gemeinsamen Interessen auf dem Weg zu einer Zertifizierung und die individuelle Prüfung der genannten Optionen durch Industrie, Verbände und relevante Berei-

che der Wissenschaft. Bei der gegebenenfalls notwendigen Erarbeitung von PCR für den CCU-Bereich muss der aktuelle Stand der wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema LCA berücksichtigt werden, um sinnvolle Kompromisse zur Lösung der kritischen Aspekte in der Methodik, zum Beispiel in Form der Auswahl von Allokationskriterien, zu finden (siehe hierzu auch Kapitel 4). Bei Zertifizierungsoptionen im Endverbraucherbereich ist eine leichte Verständlichkeit zu gewährleisten. Zudem sollte eine internationale Anwendbarkeit möglicher Optionen überprüft und berücksichtigt werden.

Offen bleiben zudem die zu erwartende Akzeptanz in der Industrie aufseiten des produzierenden und verarbeitenden Gewerbes sowie die Bereitschaft der Konsumenten, Produkte mit einer derartigen Kennzeichnung wertzuschätzen und zu erwerben.



„Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Hier: Philipp Sommer, Deutsche Umwelthilfe, Florian Teipel, econsense, Carsten Dreher, FU Berlin. © IASS/Christian Kruppa



8. Abgrenzung der CO₂-Nutzung von CCS

CCU wird häufig verwechselt oder gemeinsam betrachtet mit CCS (Carbon Capture and Storage), nicht zuletzt auch aufgrund der sehr ähnlichen Namensgebung und Abkürzung (McConnell 2012, Oettinger 2011, Smit, Park & Gadikota 2014). Trotz einiger technologischer Überschneidungen weisen die beiden Konzepte jedoch erhebliche Unterschiede auf, sodass eine Vermischung von CCU und CCS aus vielerlei Gründen problematisch ist. Diese Vermischung kann für die weitere Entwicklung von CCU sogar hinderlich sein. Im Folgenden sollen die Unterschiede der beiden Konzepte aufgezeigt und Empfehlungen abgeleitet werden, in welcher Weise diese Unterschiede auch eine spezifische Behandlung durch die Politik erfordern.

8.1. Carbon Capture and Storage (CCS)

Das Konzept von CCS wird seit einigen Jahren intensiv als zentrales Mittel diskutiert, um anthropogene CO₂-Emissionen von großen Punktquellen wie zum Beispiel Kohlekraftwerken zu reduzieren (Haszeldine, S. & Scott 2011, Scott et al. 2013, Scott et al. 2015). Gemäß den IPCC-Mitigationsszenarien für die Erreichung der internationalen Klimaziele (RCP 2.6) soll CCS an fossilen Kraftwerken und an mit Biomasse betriebenen Kraftwerken (BECCS) bis zum Jahr 2100 insgesamt ca. 25% der gesamten Emissionsreduktionen beitragen (IPCC 2014). Vor diesem Hintergrund erfährt CCS seit geraumer Zeit wesentliche Aufmerksamkeit vonseiten der Politik und anderen Akteuren wie der Internationalen Energieagentur (International Energy Agency – IEA). Obwohl CCS eine akzeptierte Mitigationsmaßnahme im EU-Emissionshandel und im Clean Development Mechanism ist, konnte nicht zuletzt aufgrund der hohen Kosten für die Abscheidung und Speicherung und des bisher niedrigen CO₂-Preises noch kein wirtschaftlich trag-

bares Konzept für CCS entwickelt werden (Haszeldine 2009).

In einigen Ländern, darunter auch Deutschland, steht die Öffentlichkeit dem Konzept von CCS zudem sehr kritisch gegenüber (Brunsting et al. 2011, de Coninck & Benson 2014, Selma et al. 2014). So wird CCS oft als Versuch angesehen, die Dekarbonisierung der fossilen Industrie zu verzögern. Insbesondere wird das Versprechen von „clean coal“ oft als Argument gegen einen Ausstieg aus der Kohleverstromung gebraucht (Stephens 2014). Während die Entwicklung und Implementierung von CCS also nur langsam vorankommen und immer wieder Rückschläge erfahren (BBC 2015, Bloomberg 2013, TheLocal 2014), bleibt das Konzept jedoch in vielen Ländern und in der EU auf der politischen Agenda (European Commission 2016, GCCSI 2013, IPCC 2014, US DOE & NETL 2016).

8.2. Gemeinsamkeiten und Unterschiede von CCU und CCS

Das zentrale Anliegen von CCS ist eine nach menschlichen Maßstäben „dauerhafte“ Entfernung von CO₂ (> 1.000 Jahre) (Metz et al. 2005). Der in diesem Kontext wichtigste funktionale Unterschied zwischen CCU und CCS besteht folglich darin, dass die meisten CCU-Technologien keine langfristige Speicherung von CO₂ erlauben. Nach einer gewissen Zeitspanne wird das genutzte CO₂ vielmehr wieder emittiert. Je nach Lebenszeit des jeweiligen CCU-Produkts kann das CO₂ dabei Tage oder Wochen (z.B. bei synthetischen Kraftstoffen) bis hin zu Jahren (z.B. in Polymeren) oder Jahrzehnten bzw. Jahrhunderten (z.B. in Zement) gespeichert werden (Styring et al. 2011, von der Assen, Jung & Bardow 2013) (siehe hierzu auch Kapitel 2).

Auch hinsichtlich der Gesamtmengen an CO₂ unterscheiden sich CCU und CCS wesentlich. Selbst äußerst optimistische Schätzungen gehen davon aus, dass nur vergleichsweise geringe Mengen CO₂ für CCU genutzt werden könnten – etwa 180 Mt (~ 0,5% der anthropogenen Emissionen) für die Herstellung von Chemikalien und 2 Gt (~ 5,5%) für die Herstellung von Kraftstoffen (Ausfelder & Bazzanella 2008). Insbesondere im Vergleich zu den CCS-Zielen, zum Beispiel der IEA für das Jahr 2050 in Höhe von 7 Gt jährlich zu speicherndem CO₂, erscheinen diese Potenziale von CCU eher gering (IEA 2013). Das weitaus größere Nutzungspotenzial entfällt zudem auf Technologien mit einer sehr kurzen Bindungsdauer (CO₂-basierte Kraftstoffe). Darüber hinaus muss beachtet werden, dass die Schätzungen für nutzbare CO₂-Emissionen nicht gleichzusetzen sind mit reduzierten CO₂-Emissionen, da alle Umwandlungstechnologien wiederum Energie benötigen. Für jede einzelne CO₂-Nutzungstechnologie muss daher das Reduktionspotenzial individuell bestimmt werden, das sowohl niedriger als auch höher ausfallen kann als die Menge CO₂, die genutzt werden kann.

CCU-Technologien sind also als Beitrag zum Klimaschutz nicht von hoher strategischer Relevanz. Sie können damit insbesondere nicht als Argument angeführt werden, um die Laufzeit fossiler Kraftwerke zu verlängern, da sie den hierfür nötigen Klimaeffekt, der die schädigende Wirkung des Kraftwerks aufheben oder mindern würde, vermutlich nicht oder nur unter bestimmten Voraussetzungen mit sich bringen.

Für eine differenziertere Analyse der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Konzepte sei an dieser Stelle auf die entsprechende Veröffentlichung der Autoren in der Zeitschrift *Environmental Science & Policy* verwiesen (Bruhn, Naims & Olfe-Kräutlein 2016).

8.3. Probleme aufgrund der Vermischung von CCU und CCS

Aktuell kann beobachtet werden, dass CCU und CCS in unterschiedlichsten politischen Kontexten miteinander vermischt werden (AIChE 2016, ISIGE 2016, University of Sheffield 2016) oder CCU als Unterkategorie von CCS angesehen wird, beispielsweise vom U.S. Department of Energy (DOE) (US DOE & NETL 2016) oder auch in umfangreicheren wissenschaftlichen Berichten (McNutt et al. 2015, Metz et al. 2005).

Zunehmend wird CCU auch im Kontext des Klimaschutzes diskutiert und in diesem Zusammenhang gemeinsam oder im Vergleich mit CCS behandelt (McNutt et al. 2015, Metz et al. 2005, Raab 2014). So setzt beispielsweise Polen Hoffnungen darauf, dass CCU dabei helfen wird, die eigenen Klimaschutzziele zu erreichen, ohne die Nutzung der Kohle allzu schnell reduzieren zu müssen (Adamczewski 2015, Getzner, Spash & Stagl 2005).

Eine der Folgen dieser Vermischung besteht darin, dass zahlreiche Akteure CCU vor allem unter Gesichtspunkten eines möglichen Beitrags zu (inter-)nationalen Klimaschutzzielen betrachten und entsprechend bewerten (Hendriks et al. 2013, Markewitz et al. 2012, Oei et al. 2014). Häufig wird CCU als *Alternative* zu CCS bezeichnet, die dem Ziel folgt, CO₂ zu nutzen und den Kohlenstoffkreislauf zu schließen, anstatt es zu speichern (Armstrong & Styring 2015, Kilisek 2015). Als eine Folge einer solchen Argumentation äußern sich einige Akteure gerade in Deutschland skeptisch oder ablehnend gegenüber CCU aufgrund seines begrenzten Klimaschutzpotenzials (Lasch 2014). Dabei wird leicht übersehen, dass wesentliche positive Effekte von CCU-Technologien nicht direkt mit dem Klimaschutz in Verbindung stehen (Bennett, Schroeder & McCoy 2014, von der Assen, Jung & Bardow 2013). Eine weitere Vermischung von CCU und CCS würde daher den Eindruck verstärken, dass CCU vor allem unter Klimaschutzgesichtspunkten betrachtet werden sollte, und würde damit bewirken, dass die anderen Potenziale von CCU übersehen werden.

Problematisch ist zudem, dass CCU oft als Mittel bezeichnet wird, um die Umsetzung von CCS zu fördern (Ericson et al. 2015, Mikkelsen, Jorgensen & Krebs 2010, Styring et al. 2011, Zero Emissions Plattform 2013). Vielfach wird außerdem darauf verwiesen, dass CCU dazu beitragen kann, in frühen Phasen von CCS dessen Wirtschaftlichkeit zu verbessern (Santos 2015, Zero Emissions Plattform 2013). Eine solche Argumentation zu CCU kann die Wahrnehmung fördern, dass CCU und CCS gemeinsame strategische Ziele verfolgen und vergleichbare Potenziale besitzen. Wie wir in unserem Stakeholder-Dialog (siehe hierzu auch Kapitel 6.1) beobachten konnten, neigen daher insbesondere Akteure, die CCS gegenüber kritisch eingestellt sind, dazu, diese Haltung unmittelbar auf CCU zu übertragen (IASS 2016, Naims et al. 2015). Vor allem die gezielte Vermischung als CCUS, wie sie beispielsweise von Akteuren der fossilen Energiewirtschaft betrieben wird und zum Beispiel in den USA weitverbreitet ist, erweckt hier den Eindruck, dass es sich bei CCU lediglich um eine weitere Strategie handelt, die dazu dient, die Nutzungsdauer fossiler Energieerzeugung zu verlängern und eine Dekarbonisierung der Industrie zu verhindern (Ericson et al. 2015, ICO₂N 2015, Zero Emissions Plattform 2013). Als Folge solcher Eindrücke wurde CCU beispielsweise auch als „Feigenblatt für CCS“ bezeichnet (Lasch 2014).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Dynamiken, die aus einer Vermischung von CCU und CCS resultieren, nicht förderlich sind für die Ausbildung einer unvoreingenommenen Bewertung von CCU (siehe hierzu auch Kapitel 6.3). Sie könnten vielmehr der notwendigen öffentlichen und politischen Unterstützung für CCU entgegenwirken und sich damit negativ auf die weitere Entwicklung und Implementierung von CCU auswirken.

8.4. Politische Relevanz der Unterscheidung zwischen CCU und CCS

Die hier beschriebenen Unterschiede zwischen CCS und CCU sowie die Probleme, die mit ihrer Vermischung einhergehen, legen nahe, dass die beiden Konzepte in der gegenwärtigen politischen Debatte hinreichend unterschiedlich behandelt werden sollten. Um die Entwicklung einer wohl informierten öffentlichen Meinung und passender politischer Instrumente zu unterstützen, muss den Spezifikationen der beiden Konzepte Rechnung getragen werden, insbesondere in folgenden Bereichen der Umweltpolitik:

Klimaschutz: Anders als CCS sollte CCU nicht vorrangig im Kontext des Klimaschutzes behandelt werden. CCU auf eine Klimaschutzmaßnahme zu reduzieren bedeutet, wichtige Aspekte der ursprünglichen Motivation und mögliche Potenziale des Konzepts zu übersehen. Auch die Potenziale von CCU, zu negativen Emissionen beizutragen, sollten daher nicht überbetont werden. Auf jeden Fall muss der zeitlich beschränkten und für einzelne CCU-Anwendungen unterschiedlich langen Speicherdauer von CO₂ Rechnung getragen werden. Auch die möglichen indirekten Effekte auf das Klima durch die Substitution anderer Rohstoffe und mögliche Energieeffizienzgewinne sollten im Einzelfall beachtet werden. Eine Vermischung von CCS und CCU in der Abkürzung CCUS verhindert diese Klarheit und fördert damit die oben beschriebenen Missverständnisse. Um mögliche Enttäuschungen zu vermeiden, sollte die Forschung zu CCU insbesondere nicht als Unterstützung für CCS behandelt werden, wie es derzeit von verschiedenen Institutionen weltweit praktiziert wird (McConnell 2012, Oettinger 2011).

Energiewende: CCS wurde als Strategie vorgeschlagen, um bei insgesamt steigenden Kosten die klimaschädlichen Nebenwirkungen fossiler Energieerzeugung zu reduzieren (IEA 2013). Das Konzept stellt damit keinen Beitrag zu einer Transformation der Energiesysteme weg von einer fossilen Infrastruktur dar. CCU-Technologien hingegen können dazu beitragen, fossile Rohstoffe zu ersetzen, und damit eine Transformation der Energiesysteme hin zu erneuerbaren Quellen unterstützen, insbesondere auch in Sektoren außerhalb der Energiewirtschaft wie zum Beispiel im produzierenden Gewerbe und im Transportsektor (Klankermayer & Leitner 2015).

Rohstoffsicherheit: Während CCS existierende Rohstoffstrategien unterstützt, bieten CCU-Technologien die Möglichkeit für verbessertes Rohstoffmanagement und Recycling, wie sie von der Vision einer Kreislaufwirtschaft angestrebt werden (Bringezu 2014, World Economic Forum 2014). CCU-Technologien sollten daher in politische Strategien zur Rohstoffsicherheit und Ressourceneffizienz integriert werden.

8.5. Fazit

Eine wichtige Folge der Vermischung von CCU und CCS besteht darin, dass CCU vor allem hinsichtlich seiner Klimaschutzpotenziale bewertet wird. Diese Betrachtungsweise wird verschiedenen wichtigen Potenzialen von CCU nicht gerecht und kann teilweise sogar dazu führen, dass CCU nicht die öffentliche und politische Unterstützung erhält, die es für die weitere Entwicklung benötigt. Dies trifft insbesondere auf Deutschland zu, da hier die Öffentlichkeit CCS gegenüber sehr ablehnend eingestellt ist. Eine Vermischung von CCS und CCU in öffentlichen Diskursen sollte daher vermieden werden.

Vielmehr sollte CCU zunehmend in die Themenbereiche Rohstoffsicherheit und Energiewende eingebettet werden. Möglicherweise empfiehlt es sich vor diesem Hintergrund auch, eher von CO₂-Recycling oder CO₂-Nutzung zu sprechen anstatt von CCU, um die semantische Nähe zu CCS zu vermeiden. Wie solche Bezeichnungen zum Beispiel mit den relevanten gesetzlich-definitiven Rahmenbedingungen wie dem KrWG für den Bereich Recycling korrespondieren, muss sorgfältig geklärt werden (siehe hierzu auch Kapitel 7).

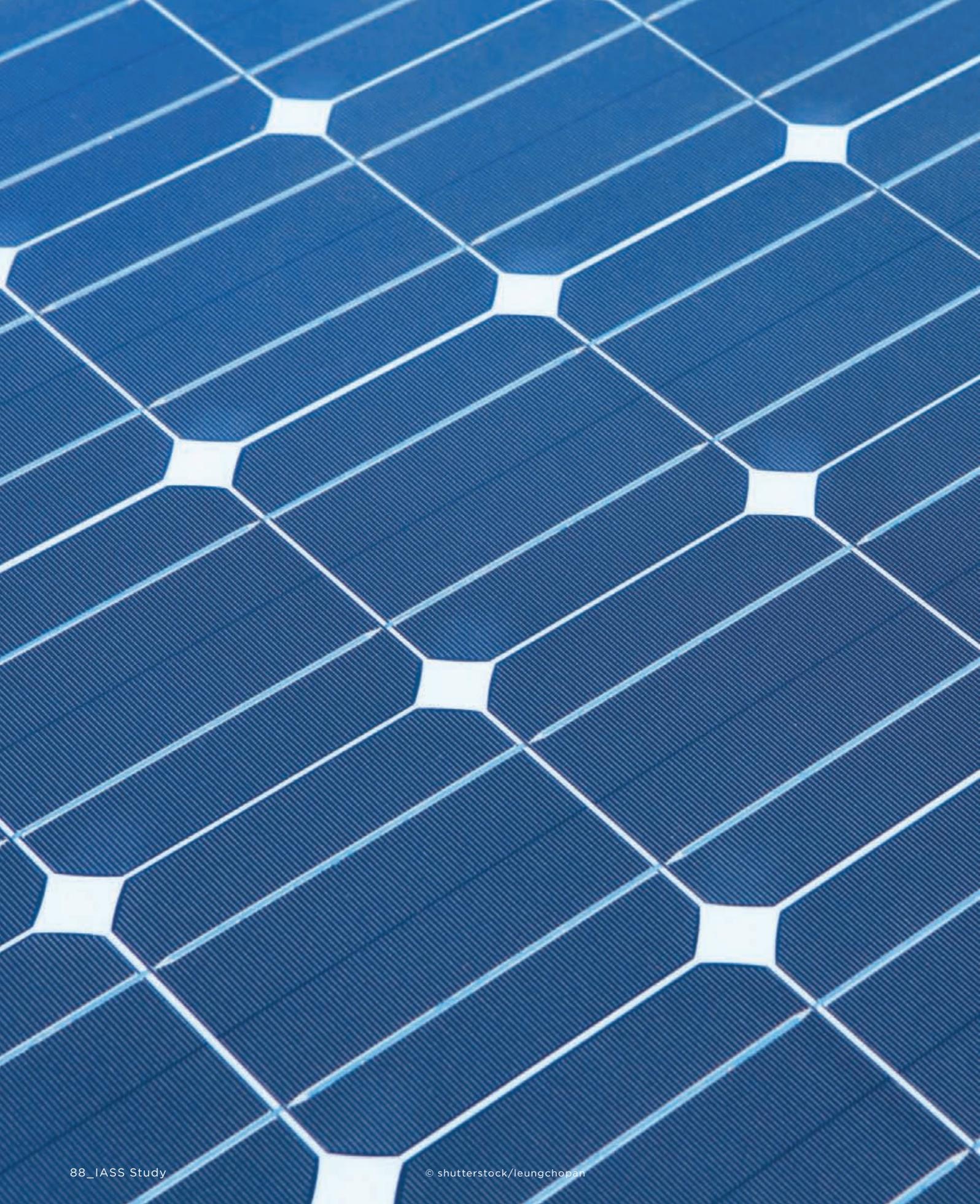
Um eine transparente und angemessene Diskussion über die möglichen Klimaschutzeffekte von CCU zu ermöglichen, muss auf jeden Fall berücksichtigt werden, dass bei CCU-Anwendungen CO₂ nur temporär gespeichert wird und Emissionen somit nur verzögert werden, Effizienzsteigerungen im Zuge der CCU-Entwicklung und -Implementierung im Einzelfall dagegen aber zu wichtigen Emissionsreduktionen führen können. Instrumente zu entwickeln, beispielsweise auf der Basis technologiespezifischer LCAs, die eine solche Bewertung und einen Vergleich mit anderen Klimaschutzmaßnahmen ermöglichen, stellt eine zentrale Herausforderung für die Zukunft dar.



„Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Hier: Alberto Varone, IASS, Wolfgang Schmid, Audi, und Sebastian Becker, sunfire (v. l. n. r.). © IASS/Christian Kruppa



„CO₂ Recycling – Option für Politik und Gesellschaft? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 9. November 2015 am IASS in Potsdam. Moderation: Jens Schröder, GEO. © IASS/René Arnold



9. CCU im Kontext der Energiewende

Möglichkeiten, Perspektiven und auch Grenzen verschiedener Aspekte von CCU wurden in den themenspezifischen Abschnitten dieses Berichts intensiv erörtert. Um die gesellschaftliche Relevanz von CCU jedoch umfänglich zu erfassen, müssen auch mögliche Zusammenhänge mit anderen gesellschaftlichen Prozessen beachtet werden. Insbesondere Fragen der **Energiewende** sind für die Bewertung von CCU-Technologien relevant.

Als Teil der Projektarbeit am IASS wurden daher auch mögliche Schnittstellen von CCU zu wichtigen Fragestellungen der Energiewende aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet. Dies geschah sowohl durch interne Workshops am IASS als auch durch einen Diskurs im Rahmen der veranstalteten Round Tables (siehe hierzu auch Kapitel 6.1). Zusammenfassend konnten insbesondere zwei wesentliche Fragestellungen identifiziert werden, die für eine Erwägung von CCU im Kontext der Transformation der Energiesysteme hin zu erneuerbarer Energie eine wichtige Rolle spielen können:

1. Woher soll das zu nutzende CO₂ kommen und stehen diese möglichen Quellen im Konflikt mit den Zielen der Energiewende?
2. Inwiefern können CCU-Technologien zur Energiespeicherung die Energiewende sinnvoll ergänzen?

Beide Fragen werden im Folgenden zusammenfassend betrachtet.

9.1. CO₂-Quellen und mögliche Konflikte mit der Energiewende

Ein zentrales Ziel der Energiewende ist es, einen wesentlichen Teil der CO₂-Emissionen, nämlich die aus der fossilen Energieerzeugung, zu vermeiden. Insbesondere wird in diesem Kontext diskutiert, die fossile Energieerzeugung in Deutschland mittel- bis langfristig zu beenden.

Eine immer wieder geäußerte Sorge ist daher, dass durch eine umfassende Implementierung von CCU-Technologien langfristig eine erhöhte Nachfrage, also ein tatsächlicher „Bedarf“ an CO₂ aus Emissionen geschaffen werden könnte. Somit entstünden **Pfadabhängigkeiten**, die eine Abschaltung fossiler Kraftwerke erschweren oder sogar verhindern könnten.

Dies könnte beispielsweise der Fall sein, wenn neue Anlagen gebaut werden, die CO₂ aus Kohlekraftwerken zur Weiterverwendung abscheiden, und eine mögliche Abschaltung dieser Kohlekraftwerke die Bedingungen für CCU-Anwendungen erschweren würde.

Eine nähere Betrachtung der möglichen Angebots- und Nachfrageseite von CO₂ (siehe hierzu auch Kapitel 5) zeigt jedoch, dass auf absehbare Zeit die CO₂-Emissionen aus hochkonzentrierten industriellen **CO₂-Quellen** ausreichen, um eine CCU-bedingte Nachfrage nach CO₂ abzudecken.

Auch langfristig könnte eine große CO₂-Nachfrage durch Emissionen aus verschiedenen Sektoren wie zum Beispiel der Zement- und Stahlindustrie gedeckt werden, ohne eine Abhängigkeit von der Energieerzeugung entstehen zu lassen (Naims 2016). Eine weitere Förderung und auch die umfassende Implementierung von CCU-Technologien sind also nicht auf Emissionen aus der fossilen Stromerzeugung angewiesen.

Darüber hinaus ist eine Abscheidung von CO₂ an Anlagen zur Erhaltung der Grundlast eines auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystems (z.B. mit Biogasanlagen oder PtG-/PtL-Anlagen) nicht nur denkbar, sondern im Einzelfall schon erprobt (siehe Anlage von Audi in Werlte, die CO₂ aus einer Biogasanlage nutzt) (Eckl-Dorna 2013, Strohbach 2013).

Langfristig besteht darüber hinaus auch die Möglichkeit, **CO₂ aus der Luft** abzuscheiden. Damit diese noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindlichen Technologien zum Klimaschutz beitragen können, muss die erforderliche Energie zum Einfangen und Komprimieren des CO₂ wiederum aus erneuerbaren Quellen kommen (Brandani 2012).

- Bei geeigneter Implementierung von CCU-Technologien können Pfadabhängigkeiten zur fossilen Energieerzeugung vermieden werden.

9.2. Energiespeicherung mit CCU zur Ergänzung der Energiewende

Da CO₂ einen sehr niedrigen Energiegehalt hat, erfordert die Umwandlung des Moleküls in höherwertige Produkte grundsätzlich Energie. Damit die Umwandlung eine positive Umweltbilanz aufzeigt, ist bei etlichen Technologien die Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie erforderlich. Insbesondere für die Produktion diverser Energieträger auf Basis von CO₂ und Wasserstoff muss Letzterer immer mithilfe von

erneuerbarer Energie hergestellt werden, damit der Anspruch einer positiven Ökobilanz erfüllt werden kann. Ansonsten wäre eine direkte Nutzung der fossilen Energie sinnvoller.

Derartige Verfahren werden **Power-to-X** (PtX) genannt, wobei das X einen Platzhalter für G wie Gas, L wie Liquids oder C wie Chemicals darstellen kann. Auf Basis erneuerbarer Energie und CO₂ lässt sich also eine breite Vielfalt von kohlenstoffbasierten Produkten und Kraftstoffen herstellen, die in Zukunft eine größere Rolle spielen könnten. Sinnvolle Konzepte von CCU auf Basis von erneuerbarer Energie werden in zahlreichen Artikeln beschrieben, für chemische Produkte (Klankermayer & Leitner 2015), den Mobilitätssektor (Varone & Ferrari 2015), spezifisch den Flugverkehr (Falter, Batteiger & Sizmann 2016) und aus ökologischer Sicht miteinander verglichen (Sternberg & Bardow 2015). PtX-Technologien stellen somit eine Option dar, wie das schwankende Angebot an erneuerbarer Energie sinnvoll eingesetzt werden kann. Sie stehen derzeit aber noch in Konkurrenz zu anderen Optionen der Energiespeicherung und flexiblen Nutzung sowie dem Export von Strom aus erneuerbaren Quellen.

Aus wirtschaftlicher Sicht sind derartige Technologien heute jedoch aufgrund der relativ niedrigen Preise fossiler Rohstoffe meist noch nicht wettbewerbsfähig.⁴⁶ Derzeit sind die Anteile an erneuerbarer Energie im Stromnetz außerdem noch so niedrig (in Deutschland liegen sie bei rund 30%), dass weitere Kapazitäten aus Effizienzgründen vorrangig zunächst im Strommarkt einzusetzen sind. In einer Zukunft mit deutlich höheren Preisen für fossile Energie und/oder einem breiten Angebot an kostengünstiger erneuerbarer Energie ist eine Wirtschaftlichkeit von PtX jedoch möglich. So setzt auch die ambitionierte Klimaschutzvision des UBA für ein treibhausgasneutrales Deutschland auf einen signifikanten Anteil von PtX-Technologien (UBA 2013).

⁴⁶Die Firma CRI in Island kann auf Basis verfügbarer Geothermie wettbewerbsfähig produzieren.

In Deutschland hat die Firma Audi ein Tankkartensystem eingeführt, welches die Mehrkosten der klimaneutralen Kraftstoffe direkt an die Verbraucher weitergibt.

Für die weitere Entwicklung und Implementierung dieser CCU-Technologien, die mit erneuerbarer Energie kombiniert werden müssen, ist also im Einzelfall eine standortspezifische Planung erforderlich, die sicherstellt, dass sowohl erneuerbare Energie als auch CO₂ lokal vorhanden sind, wobei Letzteres nicht mit den oben beschriebenen Pfadabhängigkeiten verbunden sein darf. Erste Analysen zeigen jedoch, dass diese Voraussetzungen in Deutschland an zahlreichen Standorten gegeben sind (Mennicken 2015).

■ Die breite und kostengünstige Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie würde die weitere Entwicklung und Implementierung von CCU-Technologien unterstützen. Umgekehrt können CCU-Technologien durch Energiespeicherung dazu beitragen, die Ziele der Energiewende zu erreichen. Dabei müssen die technologischen Optionen in einem Portfolio gedacht werden, das politisch, ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist.



Diese Illustration ist ein gezeichnetes Protokoll („Graphic Recording“) der Diskussionsveranstaltung „Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Die Zeichnung beinhaltet verschiedene Argumentationslinien und Fragen, die die Diskussionen prägten. Siehe hierzu auch Kapitel 6.

10. Folgerungen und Empfehlungen für Entscheidungsträger und Multiplikatoren in Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft

Aus der in den einzelnen Abschnitten dieses Berichts vorgestellten interdisziplinären Arbeit lassen sich Folgerungen und Empfehlungen zur weiteren Behandlung und Entwicklung von CCU-Technologien ableiten, die im Folgenden zusammengefasst werden.

10.1. Umweltpolitische Potenziale/ Einordnung von CCU

CCU-Technologien können einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft und zur Sicherung der Rohstoffbasis leisten. Bereits heute sind zahlreiche Anwendungen technisch umsetzbar, viele andere befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Diese versuchen, CO₂, das aufgrund menschlicher Aktivitäten emittiert wird, wieder als Rohstoff in Produktionsprozesse einzubinden. Ein Beitrag zum Klimaschutz ist hierdurch möglich, darf aber nicht überschätzt werden (Bruhn, Naims & Olfe-Kräutlein 2016).

Im Kontext der Energiewende stellen CCU-Technologien perspektivisch durch ihre Anwendungsmöglichkeiten in der Energiespeicherung eine technische Ergänzung dar. Pfadabhängigkeiten zum Erhalt der fossilen Energieerzeugungsinfrastruktur können ver-

mieden werden, wenn Emissionen genutzt werden, die außerhalb des Energiesektors anfallen (siehe hierzu Kapitel 9). In dieser Ausrichtung unterscheiden sich CCU und CCS deutlich voneinander (siehe hierzu Kapitel 8).

Damit CCU-Technologien für eine Kreislaufwirtschaft und für eine Erschließung alternativer Kohlenstoffquellen ihr volles Potenzial entfalten können, ist für die technologische Entwicklung, aber auch für die Gestaltung der relevanten gesetzlichen Rahmenbedingungen weiterhin die Unterstützung durch politische Entscheidungsträger vonnöten.

Folgerungen und Empfehlungen für den umweltpolitischen Diskurs:

- Trotz technischer Gemeinsamkeiten in der Abscheidungsstufe sollten CCU- und CCS-Konzepte in der Forschungsförderung getrennt voneinander betrachtet und bewertet werden.
- CCU-Konzepte können die Energiewende ergänzen und sollten komplementär geplant werden.

- Zur Erreichung wichtiger Klimaschutzziele können CCU-Technologien in Summe potenziell nur wenig beitragen; dennoch können sie im Zusammenspiel mit der Energiewende und anderen Effizienz- und Mitigationstechnologien einen Beitrag leisten.
- CCU sollte in klimapolitischen Maßnahmen wie dem Emissionshandel weiterhin nicht bzw. nur im nachgewiesenen Fall einer dauerhaften Speicherung (z.B. in Baumaterialien) als direkte Emissionsminderung einkalkuliert werden. Eine indirekte Anrechnung sollte über die bestehende Emissionsberichterstattung möglich sein und ist im Detail für den konkreten Fall einzelner Anlagen und Produktionsketten noch zu klären.

10.2. Risiken durch Abscheidungs-technologien von CO₂ aus Rauchgasen

Bei einem großskaligen Einsatz von CCU-Technologien, beispielweise der Abscheidung der gesamten CO₂-Emissionen großer fossiler Kraftwerke, wie er in einigen CCS-Konzepten vorgesehen ist, kann die Abscheidung von CO₂ aus Rauchgasen durch Aminwäsche gegenwärtig nicht als unbedenklich eingestuft werden.

Jedoch sind, wie in den Kapiteln 2 und 3 beschrieben, die Gesamtmengen CO₂, die für CCU-Konzepte abgeschieden werden müssen, deutlich geringer als die Mengen, die CCS potenziell „entsorgen“ soll. Es ist voraussichtlich möglich, den kurz- bis mittelfristigen Bedarf an CO₂ für CCU-Anwendungen auch aus höher konzentrierten CO₂-Quellen zu decken, für die der Einsatz von Aminwäsche nicht erforderlich ist. Der Bedarf an CO₂ für CCU kann also potenziell mithilfe von Abscheidungstechnologien gedeckt werden, die nicht die hier erläuterten Risiken der Aminwäsche aufweisen. Für die Abscheidung vergleichsweise kleinerer Mengen CO₂, wie sie momentan und auf absehbare Zeit für CCU-Anwendungen erforderlich sind, liegen derzeit keine Bedenken über signifikante Umwelt- und Gesundheitsrisiken vor (siehe hierzu Kapitel 3.1).

Wo immer möglich, sollten höher konzentrierte CO₂-Quellen für die Versorgung genutzt werden, die keinen Einsatz nasschemischer Absorptionsverfahren erfordern.

Diese Umweltauswirkungen für verschiedene Skalen eines möglichen Einsatzes von Aminwäsche zu quantifizieren bleibt eine **wesentliche Aufgabe für die gegenwärtige Forschung** zu diesem Thema.

Folgerungen und Empfehlungen zu Abscheidungstechnologien:

- Die weitere Förderung der Grundlagenforschung zur effizienten CO₂-Abscheidung und deren Weiterentwicklung ist notwendig.
- Mögliche Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekte zur fossilen Energieinfrastruktur sollten in der Forschungsförderung beachtet werden.
- Zukünftige Entwicklungen im Bereich aminbasierter Verfahren zur CO₂-Abscheidung sollten dafür Sorge tragen, dass eine Freisetzung von Anteilen oder Degradationsprodukten der verwendeten Amine in die Umwelt und insbesondere in die Atmosphäre vermieden wird.

10.3. LCA

Es kann nicht pauschal als sicher angesehen werden, dass CCU-Technologien per se zur Reduktion von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre beitragen. Vielmehr müssen mögliche Umwelteffekte von potenziellen Nutzungsoptionen von CO₂ von Fall zu Fall einzeln betrachtet werden. Hierfür ist die den ganzen Lebenszyklus eines Produkts betrachtende LCA-Methodik geeignet, weil das jeweilige Produkt in allen Phasen des Lebenszyklus einen Effekt auf die Umwelt haben kann.

Die LCA-Methodik ist bereits heute sehr ausgereift. Eine Anwendung auf CCU-Technologien mit vergleichbaren, validen Ergebnissen erfordert jedoch weitere Forschung und Anstrengungen in der industriellen Praxis.

Folgerungen und Empfehlungen für die Weiterentwicklung der LCA für CCU-Technologien (siehe auch Kapitel 4):

- Zusätzlich zum CCU-Kernprozess und vorgelagerten Prozessen müssen auch die **nachgelagerten Prozesse** in eine LCA mit einbezogen werden,
 - wenn das neue CCU-Zwischenprodukt nicht dieselbe chemische Zusammensetzung aufweist wie das herkömmliche Produkt, das substituiert wird, und dadurch eine Änderung in den Produkteigenschaften, der Nutzungsdauer oder der Entsorgung verursachen könnte, oder
 - wenn angestrebt wird, nicht relative, sondern **absolute Aussagen über ein CCU-Produkt oder über die CCU-Technologien als Forschungsfeld** zu treffen. In diesen Fällen muss der gesamte Fußabdruck des Produkts berechnet werden und eine Analyse „von der Wiege bis zur Bahre“ („Cradle to Grave“) wird notwendig.
- Um die Vergleichbarkeit der LCA-Ergebnisse zu gewährleisten, sollten LCA-Praktiker Analysen unter den **gleichen Bedingungen** durchführen.
- **Spezifische Regeln** zur Durchführung der CCU-bezogenen Ökobilanzen unter gleichen Bedingungen sollten durch ein Expertenteam festgelegt werden.
- In der Folge wäre mit Blick auf eine zuverlässige Kommunikation (siehe hierzu Kapitel 4 und 7) eine Übereinkunft der zu CCU-Technologien arbeitenden Community in Forschung und Industrie notwendig, die die **Ermittlung und Präsentation der Bewertungsergebnisse** festlegt. Die Anforderungen der ISO 14025 sollten die Basis hierfür sein.
- Selbst wenn zukünftige CO₂-Nutzungstechnologien alle benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen beziehen würden, sollten mögliche Umweltauswirkungen dennoch mithilfe von LCAs bewertet werden, um **Verbesserungsoptionen vor allem hinsichtlich der Prozesseffizienz** verorten zu können.

10.4. Ökonomie

Über die Wirtschaftlichkeit von CCU-Technologien lässt sich keine generelle Aussage treffen, denn diese ist technologiespezifisch zu bestimmen und hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Ein großskaliger Einsatz von CCU-Technologien könnte sich aus volkswirtschaftlicher Sicht langfristig als vorteilhaft erweisen, wenn die richtigen Rahmenbedingungen geschaffen und technologische Durchbrüche erzielt werden können. Daher wird empfohlen, in der Förderung der weiteren Entwicklung und Implementierung von CCU die folgenden Punkte zu beachten.

Folgerungen und Empfehlungen zu wirtschaftlichen Aspekten von CCU-Technologien:

- Eine weitere Förderung von Forschung und Entwicklung zu **CCU-Technologien ist aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll** und kann die Durchsetzung verschiedener interessanter Innovationen beschleunigen.
- Einige CCU-basierte Produkte, insbesondere Kraftstoffe, sind derzeit im Vergleich zu günstiger Energie aus fossilen Quellen **noch nicht wettbewerbsfähig**. Sobald ein ökologischer Nutzen absehbar ist, sollten Anreize geschaffen werden, die die Implementierung dieser Technologien in bestimmten sinnvollen Einsatzbereichen unterstützen.
- CCU kann im Vergleich zu und in Kombination mit anderen Umwelttechnologien verschiedene **positive volkswirtschaftliche Effekte** mit sich bringen, zum Beispiel Synergieeffekte in der Produktion und eine reduzierte Abhängigkeit vom Import fossiler Rohstoffe. Dieser potenzielle gesamtgesellschaftliche Nutzen sollte in Entscheidungsprozessen wie der weiteren Förderung der Technologien mitgedacht und mit bewertet werden.

10.5. Kommunikation

Der Erfolg technischer Innovationen wird neben den Aspekten Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit auch durch die Akzeptanz aufseiten von Öffentlichkeit und Verbrauchern beeinflusst. Wie erläutert, könnte eine großskalige Implementierung von CCU-Technologien in der Zukunft vor allem im Kontext der problematischen Wahrnehmung von CCS-Technologien unter Akzeptanzproblemen leiden. Eine von möglichst vielen CCU-Akteuren gemeinsam entwickelte und getragene differenzierte Kommunikationsstrategie kann kritische Aspekte adressieren und eine sachliche, unvoreingenommene gesellschaftliche Diskussion und Bewertung von CCU-Technologien fördern.

Folgerungen und Empfehlungen für kommunikationsbezogene Aspekte von CCU-Technologien:

- CCU sollte in der Kommunikation sowohl mit direkten Stakeholdern als auch mit einer breiteren Öffentlichkeit begrifflich und kontextuell **klar von CCS-Technologien** abgegrenzt werden.
- Konkrete ökologische Effekte **müssen technologieindividuell bewertet und kommuniziert werden**.
- Die Möglichkeiten, vor allem aber auch die Grenzen der Klima- und Umweltauswirkungen durch die Anwendung von CCU-Technologien in unterschiedlichen denkbaren Szenarien müssen **realistisch dargestellt** werden.
- Zudem obliegt es den CCU-Akteuren in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik, noch undefinierte **Themenkontexte und Begrifflichkeiten** in einem öffentlichen Diskurs zu besetzen, denn derzeit existiert noch keine organisationsübergreifend genutzte Terminologie im CCU-Bereich.

- Empfehlenswert wäre daher als Kommunikationsgrundlage **eine gemeinsame Strategie** der Akteure, zumindest jedoch die **Entwicklung von Richtlinien** zu relevanten Begrifflichkeiten und Themenrahmen, um sowohl national als auch international die Voraussetzung für eine unvoreingenommene Diskussion der weiteren Förderung und der Anwendung von CCU-Technologien herzustellen und das gesellschaftliche Bewusstsein für Themen wie Kreislaufwirtschaft oder Recycling und neue technologische Wege in eine nachhaltigere Wirtschaft und Gesellschaft zu fördern.

10.6. Möglichkeiten der Kennzeichnung von CO₂-basierten Produkten

Auch wenn aktuell noch Unklarheiten in den Perspektiven zur Kennzeichnung und etliche zu überwindende Hindernisse in der Ausgestaltung und Erreichung einer Zertifizierung für CCU-Produkte herrschen, lassen sich dennoch einige Empfehlungen für Akteure vor allem aus der Industrie ableiten.

Folgerungen und Empfehlungen für den Weg zu einer Zertifizierung für CCU-Produkte:

- Akteure in der Industrie und Verbandslandschaft sollten in Zusammenarbeit mit Experten aus den Bereichen Umweltschutz und Zertifizierung bereits jetzt die **Entwicklung von Kennzeichnungs- und Zertifizierungsoptionen** in Erwägung ziehen und gegebenenfalls vorbereiten.
- Wesentlich für eine Weiterentwicklung der Möglichkeiten der transparenten Kennzeichnung von CCU-Produkten sind die **Identifikation und Erarbeitung von gemeinsamen Interessen** als Basis weiterer Schritte auf dem Weg zu einer Zertifizierung sowie die individuelle Prüfung der hier genannten Optionen durch Industrie, Verbände und relevante Bereiche der Wissenschaft.

■ Bei der gegebenenfalls notwendigen Erarbeitung von **Product Category Rules** für CCU im **B2B-Bereich** muss der aktuelle Stand der wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema LCA berücksichtigt werden, um sinnvolle Kompromisse zur Lösung der kritischen Aspekte in der Methodik, zum Beispiel der Auswahl von Allokationskriterien, zu finden (siehe hierzu auch Kapitel 4).

■ Bei Zertifizierungsoptionen im Endverbraucherbereich ist eine **leichte Verständlichkeit** zu gewährleisten. Zudem sollte sowohl im Endverbraucher- als auch im Geschäftskundenbereich, eine **internationale Anwendbarkeit** möglicher Optionen überprüft und berücksichtigt werden.



„Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Hier: Prof. Klaus Töpfer, IASS, mit Dr. Christoph Gürtler, Dr. Karsten Malsch und Dr. Ulrich Liman, covestro AG (v.l.n.r.) und einer Schaumstoffprobe, die mit CO₂ hergestellt wurde. © IASS/Christian Kruppa

CHEMISCHE PROZESSE & STOFFLICHE NUTZUNG VON CO₂



Diese Illustration ist ein gezeichnetes Protokoll („Graphic Recording“) der Diskussionsveranstaltung „Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Die Zeichnung beinhaltet verschiedene Argumentationslinien und Fragen, die die Diskussionen prägten. Siehe hierzu auch Kapitel 6.
© IASS/Gabriele Heinzl Graphic Recording

11. Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht präsentiert nach einer kurzen Einführung in CCU-Technologien eine Zusammenfassung der Ergebnisse des Projekts „CO₂ als Wertstoff“ am Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS Potsdam) und des Kooperationsprojekts CO₂next. Diese sind gegliedert entlang der Kompetenzbereiche Ökologie, Ökonomie und Kommunikation. Der Abschnitt Kommunikation gibt zudem einen Überblick über die im Rahmen des Projekts durchgeführten Veranstaltungen und andere dialogorientierte Maßnahmen. Auf der Basis der vorgestellten Arbeiten werden im Bericht auch interdisziplinäre umweltpolitische Schnittstellenthemen diskutiert, darunter Szenarien zur Kennzeichnung von CCU, eine Abgrenzung zu CCS-Technologien sowie mögliche Wechselbeziehungen zwischen CCU und der Energiewende. Abschließend werden Empfehlungen für Entscheidungsträger zur weiteren Behandlung und Entwicklung von CCU-Technologien formuliert.

CCU-Technologien können einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft und zur Sicherung der Rohstoffbasis leisten. Ein **Beitrag zum Klimaschutz** ist dabei möglich, darf aber nicht überschätzt werden. Im Kontext der **Energiewende** stellen CCU-Technologien durch ihre Anwendungsmöglichkeiten in der Energiespeicherung eine technische Option dar, die die Energiewende unterstützen kann. Mögliche Pfadabhängigkeiten zum Erhalt der fossilen Energieerzeugungsinfrastruktur können vermieden werden, wenn für diese CCU-Anwendungen Emissionen genutzt werden, die außerhalb des Energiesektors anfallen. Bei einem großskaligen Einsatz von CCU-Technologien kann die **Abscheidung von CO₂** aus Rauchgasen durch Aminwäsche gegenwärtig nicht als unbedenklich eingestuft werden. Wo immer möglich, sollten daher höher konzentrierte CO₂-Quellen für

die Versorgung genutzt werden, die keinen Einsatz nasschemischer Absorptionsverfahren erfordern.

Um die Umweltauswirkungen einzelner CCU-Prozesse und -Produkte einschätzen zu können, sind Prozesse einzubeziehen, die dem CCU-Kernprozess vor- und nachgelagert sind. Die Anwendung der LCA-Methodik (Life Cycle Assessment/Ökobilanz) ist hierzu empfehlenswert. Sowohl generelle Empfehlungen für die Durchführung von LCAs für CCU als auch erste konkrete Ökobilanzen für einzelne CCU-Technologien liegen bereits vor. Um zu vergleichbaren, validen Ergebnissen zu gelangen, ist die Entwicklung **spezifischer Regeln** für die Durchführung der CCU-bezogenen Ökobilanzen unter gleichen Bedingungen durch eine Gemeinschaft von CCU-Akteuren weiterhin nötig.

Eine breite Implementierung von CCU-Technologien kann möglicherweise langfristig verschiedene **positive volkswirtschaftliche Effekte** wie zum Beispiel Synergieeffekte in der Produktion und eine reduzierte Abhängigkeit vom Import fossiler Rohstoffe mit sich bringen. Dieser potenzielle gesamtgesellschaftliche Nutzen sollte in Entscheidungsprozessen wie der weiteren Förderung der Technologien mitgedacht und mit bewertet werden. Während einige CCU-basierte Produkte bereits heute aufgrund von erreichten Effizienzsteigerungen in der Produktion wirtschaftlich tragbar sein können, sind andere Produkte, insbesondere Kraftstoffe, unter heutigen Bedingungen **noch nicht wettbewerbsfähig**. Sobald ein ökologischer Nutzen durch den Einsatz dieser Kraftstoffe absehbar ist, sollten folglich Anreize geschaffen werden, die die Durchsetzung dieser Technologien in bestimmten sinnvollen Einsatzbereichen wie zum Beispiel dem Schiffs- oder Flugverkehr unterstützen.

Der Erfolg technischer Innovationen wird neben den Faktoren Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit auch durch die Akzeptanz aufseiten von Öffentlichkeit und Verbrauchern beeinflusst. Daher sollte CCU in der Kommunikation sowohl mit direkten Stakeholdern als auch mit einer breiteren Öffentlichkeit begrifflich und kontextuell **klar von CCS-Technologien** abgegrenzt werden. Die Möglichkeiten, aber vor allem auch die Grenzen der Klima- und Umweltauswirkungen durch die Anwendung von CCU-Technologien in unterschiedlichen denkbaren Szenarien müssen **realistisch dargestellt** werden. Auch die Verwendung einer möglichst einheitlichen Terminologie für CO₂-Nutzungstechnologien ist empfehlenswert.

Um CCU-basierte Produkte als solche kenntlich zu machen, ist es für Akteure in der Industrie und Verbandslandschaft empfehlenswert, in Zusammenarbeit mit Experten aus den Bereichen Umweltschutz und Zertifizierung bereits jetzt die **Entwicklung von Kennzeichnungs- und Zertifizierungsoptionen** in Erwägung zu ziehen und gegebenenfalls vorzubereiten. Bestehende Zertifizierungssysteme bieten hierfür erste Anknüpfungspunkte. Vor allem bei Zertifizierungsoptionen **im Endverbraucherbereich** ist eine leichte Verständlichkeit zu gewährleisten. Zudem sollte eine **internationale Anwendbarkeit** möglicher Optionen überprüft und berücksichtigt werden.

Damit sich die Nachhaltigkeitspotenziale von CCU – ein Beitrag zu **Kreislaufwirtschaft, Rohstoff-sicherheit** und **Klimaschutz** – in der weiteren Technologieentwicklung und -umsetzung möglichst weit entfalten können, ist eine gezielte Unterstützung durch politische Entscheidungsträger erforderlich. Vor allem sollten Optionen zur CO₂-Abscheidung und -Nutzung als Bestandteil und im Zusammenspiel in einem breiteren technologischen Portfolio betrachtet werden. Für die Gestaltung der weiteren Entwicklung von CCU-Technologien sollten Entscheidungsträger in Politik, Industrie und Wissenschaft daher folgende Aspekte beachten:

- Insgesamt ist eine **Forschungsförderung** weiterhin sinnvoll, um die Durchsetzung verschiedener interessanter Innovationen zu beschleunigen. Hierbei ist ein möglicher ökologischer und ökonomischer Nutzen der zu fördernden Projekte zu berücksichtigen.
- **Pfadabhängigkeiten zum Erhalt fossiler Infrastrukturen** sollten in der Entwicklung und Umsetzung von CCU-Technologien vermieden werden. Die Entwicklung von CCU-Technologien sollte ergänzend zur Energiewende erfolgen.
- In klimapolitischen Maßnahmen wie dem **Emissionshandel** sollte CCU nicht bzw. nur im nachgewiesenen Fall einer dauerhaften Speicherung (z.B. in Baumaterialien) als direkte Emissionsminderung angerechnet werden. Eine indirekte Anrechnung sollte über die bestehende Emissionsberichterstattung möglich sein und ist im Detail für den konkreten Fall einzelner Anlagen und Produktionsketten noch zu klären.

Die Studie stellt damit eine umfassende interdisziplinäre Einordnung und Bewertung der Potenziale von CCU-Technologien zusammen, die den Blick der technischen und wissenschaftlichen Akteure weiten und gleichzeitig interessierten Leser außerhalb der Bereiche Forschung und Entwicklung einen breiten Einblick in gesellschaftlich relevante Aspekte von CCU geben soll. Sie beschreibt einen Weg, wie CCU-Technologien weiterhin möglichst nachhaltig erforscht und implementiert werden können und welche Risiken und Hindernisse dabei beachtet werden müssen. ■



„CO₂ Recycling – Option für Politik und Gesellschaft? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 9. November 2015 am IASS in Potsdam. Teepause im Institutsgarten.
© IASS/René Arnold



„Lässt sich CO₂ recyceln? Ein Dialog zu Carbon Capture and Utilization (CCU) – Technologien“ am 5. Juni 2014 am IASS in Potsdam. Hier: Ralf Schmöll, Evonik, und Stefan Bringezu, Wuppertal Institut.
© IASS/Christian Kruppa

6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998
14 Si Silicon 28.085	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45
32 Ge Germanium 72.63	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904
50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.904
82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)
115 Uup Ununpentium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Uus Ununseptium (294)	118 Uu Ununoctium (294)

12. Glossar

Abscheidung

Als Abscheidung wird im Kontext der CCU-Technologien der Prozess verstanden, bei dem CO₂ aus industriellen Abgasen gefiltert wird. Ziel ist es dabei, dass am Ende des Abscheidungsprozesses CO₂ in ausreichend hoher Reinheit vorliegt, um entweder genutzt oder geologisch verpresst werden zu können.

Aerosole

Als Aerosol bezeichnet man feste oder flüssige Schwebeteilchen in einem Gas. Diese können natürlichen Ursprungs sein wie Pollen oder mineralischer Staub oder auch Verbrennungsrückstände wie Ruß. Als sekundäres Aerosol bezeichnet man dabei Partikel, die sich erst in der Atmosphäre durch Reaktionen an Kondensationskeimen gebildet haben.

Amine

Als Amine werden Moleküle bezeichnet, die auf dreifach gebundenem Stickstoff basieren. Sie sind damit sogenannte organische Abkömmlinge des Ammoniaks. Bestimmte Amine wie zum Beispiel Monoethanolamin (MEA) bilden den Grundbestandteil stark alkalischer Lösungen, die gut zur Abscheidung von CO₂ aus Rauschgasen eingesetzt werden können.

Aminwäsche

Die Aminwäsche ist ein nasschemisches Wäscheverfahren, bei dem mithilfe stark alkalischer Lösungen CO₂ aus Rauchgasen abgetrennt werden kann. Dieses Verfahren ist seit den 1930er-Jahren bekannt und wird erfolgreich eingesetzt. Es ist grundsätzlich möglich, bereits bestehende Industrieanlagen nachträglich mit Anlagen zur Aminwäsche und für andere chemische Wäscheverfahren auszurüsten („Retrofit“). Für den Fall einer großskaligen Anwendung des Verfahrens steht eine Bewertung möglicher Umweltauswirkungen noch aus.

Anthropozän

Der Begriff „Anthropozän“ (von griechisch anthropos = der Mensch) stammt aus der Erdsystemwissenschaft und wurde ursprünglich von Wissenschaftlern des International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) rund um Will Steffen, Eugene F. Stoermer und Paul Crutzen geprägt. Der Begriff fußt auf der Beobachtung gravierender Veränderungen in den Indikatoren, mit denen das Erdsystem in seiner Gesamtheit beschrieben wird. All diese Veränderungen, so die Schlussfolgerung des IGBP, lassen sich dabei auf das direkte oder indirekte Wirken menschlicher Eingriffe ins Erdsystem zurückführen. Die Erde befindet sich also nicht länger im Holozän, sondern im Zeitalter des Menschen, dem Anthropozän.

CCS – geologische Speicherung von CO₂

„Carbon Capture and Storage“ bezeichnet die Abscheidung und anschließende geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid aus industriellen Abgasen mit dem Ziel, das CO₂ dauerhaft aus der Atmosphäre zu entfernen. Eine Speicherung gilt zum Beispiel als möglich in Salzwasser führenden unterirdischen Schichten und ehemaligen Lagerstätten von Erdöl und Erdgas.

CCU – „Carbon Capture and Utilisation“ oder „Carbon Capture and Use“

Die Abscheidung und Nutzung von Kohlenstoffdioxid in unterschiedlichen Produktionsprozessen wird „Carbon Capture and Utilisation“ oder auch „Carbon Dioxide Utilisation“ (CDU) bzw. „Carbon Recycling“ (CR) genannt. Hiermit werden Technologien und Prozesse bezeichnet, die abgeschiedenes Kohlenstoffdioxid direkt oder nach chemischer Umwandlung als Teil einer Kohlenstoffverbindung in Materialien oder Energieträgern verwenden. Ein CCU-Prozess umfasst folglich die Abscheidung und Verdichtung von Kohlenstoffdioxid, falls erforderlich dessen Transport und die separate, funktionale Nutzung des CO₂ (von der Assen, Jung & Bardow 2013).

CCUS – „Carbon Capture, Utilisation and Storage“

In einigen Ländern, zum Beispiel China und den USA, werden CCU und CCS auch unter dem gemeinsamen Oberbegriff „Carbon Capture, Utilisation and Storage“ (CCUS) zusammengefasst. Häufig werden somit in der Forschungsförderung und Wissenschaftskommunikation beide Technologiekonzepte gemeinsam behandelt, wodurch die notwendige Differenzierung verloren geht.

Direct Air Capture/ Air Capture

Auch die Atmosphäre kann als Quelle von CO₂ genutzt werden. Ein noch nicht kommerziell umsetzbarer Ansatz sieht vor, durch chemisch-technische Verfahren CO₂ aus der Atmosphäre herauszufiltern. Diese Technologien sind allerdings bisher energetisch aufwendig und daher kostspielig, werden aber bereits von einigen Firmen im Pilotmaßstab getestet. Für eine breitere Umsetzung ist langfristig allerdings ein technologischer Sprung erforderlich.

Direkte Nutzung/ physikalische Nutzung von CO₂

Als direkte oder physikalische Nutzung von CO₂ wird die Verwendung von Kohlenstoffdioxid in industriellen Prozessen (ohne eine chemische Umwandlung) bezeichnet. Diese Art von Nutzung kann in fester oder flüssiger Form erfolgen und ist bereits heute in verschiedenen Produktionsprozessen gebräuchlich, zum Beispiel als Kohlensäure in Getränken, als Trockeneis zur Kühlung von Lebensmitteln, in Feuerlöschern oder als Düngemittel in Gewächshäusern.

End of life

„End of life“ bezeichnet die letzte Phase im Lebenszyklus eines Produkts. Dazu gehören Prozesse wie die Verbrennung des Produkts, seine Entsorgung auf einer Mülldeponie oder auch seine Zuführung zu einem Recyclingprozess.

**EOR/EGR –
tertiäre Öl- und
Gasförderung**

Als tertiäre Öl- und Gasförderung (englisch Enhanced Oil or Gas Recovery – EOR/EGR) werden solche Verfahren bezeichnet, in denen durch Injektion von CO₂ in Öl- und Gasfelder nach der primären und sekundären Förderung noch weitere Mengen der fossilen Brennstoffe gewonnen werden können. Das CO₂ verbleibt anschließend in kleinerem oder größerem Ausmaß und für eine ungewisse Dauer in der geleerten Reserve.

Greenwashing

„Greenwashing“ bezeichnet das willentlich übertriebene oder fälschliche umweltfreundliche Darstellen von Produkten, Prozessen oder Unternehmen in Maßnahmen zum Beispiel des Marketings, der Öffentlichkeitsarbeit oder der Unternehmenskommunikation.

**Katalyse/
Katalysator**

Der Begriff „Katalyse“ bezeichnet die Einflussnahme auf den Verlauf einer chemischen Reaktion mithilfe eines Katalysators mit dem Ziel, eine Reaktion zu initiieren, sie zu beschleunigen bzw. die notwendige Energiezufuhr zu reduzieren oder aber auch einen bestimmten Reaktionsverlauf herbeizuführen. Für CCU-Prozesse waren und sind Durchbrüche in der Katalysatorforschung essenziell, da durch sie Prozesse erst möglich bzw. energetisch sinnvoll werden, die das an sich reaktionsträge CO₂ weiterverarbeiten.

**Kreislaufwirtschaft/
Kreislaufwirtschaftsgesetz/
Recycling**

Die „Kreislaufwirtschaft“ bezeichnet ein Konzept, das zum Ziel hat, alle Rohstoffe, die in Waren verwendet werden, vollständig einer weiteren Nutzung zuzuführen. Recyclingprozesse sind Teil dieses Konzepts, werden aber durch andere Formen der Weiternutzung, zum Beispiel eine Kaskadennutzung, ergänzt. In dieser Studie werden beide Begriffe verwendet; „Kreislaufwirtschaft“ steht hier für die konzeptionelle Zielvorstellung, während „Recycling“ ein konkreter Prozess auf dem Weg dorthin ist. Die europäischen Richtlinien zum Umgang mit Abfällen und Recycling sind seit 2012 im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) festgelegt.

**Life Cycle Assessment/
Ökobilanz/
Lebenszyklusanalyse**

Eine „Lebenszyklusanalyse“ (englisch Life Cycle Assessment – LCA) oder „Ökobilanz“ ist eine systematische Analyse möglicher Umweltauswirkungen des Produktionsprozesses eines Zwischen- oder Endprodukts. Idealerweise sollte diese Analyse den kompletten Lebensweg eines Produkts („Von der Wiege bis zur Bahre“, „Cradle to Grave“) oder bis zur Fertigstellung eines (Zwischen-)Produkts („Von der Wiege zum Fabrikator“, „Cradle to Gate“) umfassen. Für CCU-Produkte bedeutet dies vor allem die Einbeziehung der dem eigentlichen CCU-Kernprozess vor- und nachgelagerten Prozesse, um eine ganzheitliche Bewertung der möglichen Umweltauswirkungen zu ermöglichen.

Minerale/ Mineralisierung

Als „Mineralisierung“ wird ein Prozess der stofflichen Nutzung von CO₂ bezeichnet, durch den zum Beispiel industrielle Abfälle wie Asche und Sand mit CO₂ aus Abgasen zu sogenannten Mineralen verarbeitet werden können. Solche Minerale können zum Beispiel als zement- oder betonähnliche Baustoffe unter anderem für den Straßenbau genutzt werden.

Power-to-X - PtX/PtG/PtL

„Power-to-X“ bezeichnet als Oberbegriff Prozesse, die Energie aus erneuerbaren Quellen, zum Beispiel in Form von Wasserstoff oder Strom gemeinsam mit CO₂ in unterschiedliche Energieträger umwandeln (zum Beispiel „Power-to-Gas“ – PtG oder „Power-to-Liquids“ – PtL). Diese Technologien spielen in der Energiewende als Option zur Flexibilisierung und Speicherung von Spitzen in der Produktion von erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle, stellen aber auch eine großskalige Anwendungsmöglichkeit von CCU-Technologien dar. Aufgrund der niedrigen Preise fossiler Energie sind diese neuen Technologien derzeit allerdings nicht wettbewerbsfähig gegenüber konventionellen Kraftstoffen.

Stakeholder

Als „Stakeholder“ werden Individuen und Gruppen definiert, die materielle oder immaterielle Ansprüche gegenüber einer Organisation haben und zu dieser in einer reziproken, vielfältigen Einflussbeziehung stehen. Diese Einflussbeziehung kann vielfältige Aspekte beinhalten, beispielsweise ökonomische, soziale oder auch kulturelle.

Stoffliche Nutzung von CO₂

CO₂ kann als Rohstoff zur Produktion sowohl energetisch höherwertiger als auch niederwertiger Kohlenstoffverbindungen dienen, indem es chemisch umgewandelt wird. Diese sogenannte stoffliche Nutzung von CO₂ als Baustein für Materialien, Chemikalien und Minerale ist bereits seit Langem üblich in speziellen pharmazeutischen Produkten (z.B. Kopfschmerztabletten), Lösungsmitteln oder auf größerer Skala für Düngemittel (Harnstoff). Darüber hinaus ist die stoffliche Nutzung von CO₂ heute bereits technisch möglich bei der Herstellung von Kunststoffen und Schäumen, Farben und Beschichtungen und zementähnlichen Baustoffen (sog. Mineralen). Bei diesen neuen Verfahren handelt es sich in der Regel um innovative Prozesse, die herkömmliche Produktionsprozesse ersetzen sollen, sich aber derzeit noch in einem sehr früheren Entwicklungsstadium befinden oder erst kürzlich durch Durchbrüche in der Katalysatorforschung möglich wurden und deshalb zunächst in einem industriellen Maßstab demonstriert werden müssen.

13. Referenzen

Adamczewski, T. (2015). *Poland's approach to the Paris COP*, Heinrich-Böll-Stiftung, <<https://www.boell.de/en/2015/11/24/background-polands-approach-paris-cop>> [aufgerufen am 25.10.2016].

Ahn, H., Luberti, M., Liu, Z. & Brandani, S. (2013). 'Process Simulation of Aqueous MEA Plants for Post-combustion Capture from Coal-fired Power Plants', *Energy Procedia*, 37, 1523–1531.

AICHE (2016). *Carbon Capture Utilization and Storage*, <<http://www.aiche.org/ccusnetwork>> [aufgerufen am 16.02.2016].

Anastas, P. T., Warner, J.C. (1998). 'Principles of Green Chemistry', *Green Chemistry: Theory and Practice*, 29–56, <<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>> [aufgerufen am 25.10.2016].

Aresta, M., Hg. (2010). *Carbon dioxide as chemical feedstock*, Weinheim: Wiley.

Aresta, M., Caroppo, A., Dibenedetto, A. & Narracci, M. (2002). 'Life Cycle Assessment (LCA) applied to the synthesis of methanol. Comparison of the use of syngas with the use of CO₂ and dihydrogen produced from renewables', in Maroto-Valer, M. M., Song, C. & Soong, Y., Hg., *Environmental Challenges and Greenhouse Gas Control for Fossil Fuel Utilization in the 21st Century*, Boston: Springer, 331–347.

Aresta, M. & Dibenedetto, A. (2010). 'Industrial utilization of carbon dioxide (CO₂)', in Maroto-Valer, M. M., Hg., *Developments and innovation in carbon dioxide (CO₂) capture and storage technology: Volume 2: Carbon dioxide (CO₂) storage and utilisation*, Great Abington: Woodhead Publishing, 377–410.

Aresta, M., Dibenedetto, A. & Angelini, A. (2013). 'The changing paradigm in CO₂ utilization', *Journal of CO₂ Utilization*, 3, 65–73.

Aresta, M. & Galatola, M. (1999). '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.

Armstrong, K. & Styring, P. (2015). 'Assessing the potential of utilisation and storage strategies for post-combustion CO₂ emissions reduction', *Frontiers in Energy Research*, 3.

Atkinson, R. (2000). 'Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x', *Atmospheric Environment*, 34(12), 2063–2101.

Ausfelder, F. & Bazzanella, A. (2008). *Diskussionspapier Verwertung und Speicherung von CO₂*, <http://www.dechema.de/dechema_media/diskussionco2.pdf> [aufgerufen am 14.08.2014].

BBC (2015). *UK government carbon capture £1bn grant dropped*, <<http://www.bbc.com/news/uk-scotland-scotland-business-34357804>> [aufgerufen am 28.01.2016].

Bennett, S. J., Schroeder, D. J. & McCoy, S. T. (2014). 'Towards a Framework for Discussing and Assessing CO₂ Utilisation in a Climate Context', *Energy Procedia*, 63, 7976–7992.

Bloomberg (2013). *Norway Drops 'Moon Landing' as Mongstad Carbon Capture Scrapped*, <<http://www.bloomberg.com/news/articles/2013-09-20/norway-drops-moon-landing-as-mongstad-carbon-capture-scrapped>> [aufgerufen am 04.02.2016].

BMBF (2013). *Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂: Informationsbroschüre zur Fördermaßnahme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung*, Bonn: BMBF.

BMBF (2015). *Bekanntmachung Richtlinie zur Förderung von CO₂-Plus – Stoffliche Nutzung von CO₂ zur Verbreiterung der Rohstoffbasis*, <https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_6478/banz_at_25.06.2015_b4.pdf> [aufgerufen am 25.10.2016].

BMWi (2016). *Existenzgründung*, Berlin: BMWi, <<http://www.bmwi.de/DE/Themen/Mittelstand/Gruendungen-und-Unternehmensnachfolge/existenzgruendung.html>> [aufgerufen am 11.08.2016].

Borduas, N., Abbatt, J. P. D. & Murphy, J. G. (2013). 'Gas Phase Oxidation of Monoethanolamine (MEA) with OH Radical and Ozone: Kinetics, Products, and Particles', *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6377–6383.

Boren, Z. D. (2016). *China's coal bubble — 210 new coal-fired power plants were approved in 2015*, Greenpeace Energy Desk, 02.03.2016, <<http://energydesk.greenpeace.org/2016/03/02/china-coal-bubble-210-power-plants/>> [aufgerufen am 27.10.2016].

Borkowski, M. G., Zaimes, G. G. & Khanna, V. (2012). 'Integrating LCA and thermodynamic analysis for sustainability assessment of algal biofuels: comparison of renewable diesel vs. biodiesel', 2012 *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*, IEEE, 1–6.

Brandani, S. (2012). 'Carbon dioxide capture from air: a simple analysis', *Energy & Environment*, 23(2–3), 319–328.

Brekke, A., Askham, C., Modahl, I. S., Vold, B. I. & Johnsen, F. (2012). 'Environmental assessment of amine-based carbon capture: Scenario modelling with life cycle assessment (LCA)', <<http://ostfoldforskning.no/media/1165/1712.pdf>> [aufgerufen am 26.10.2016].

Brentner, L. B., Eckelman, M. J. & Zimmerman, J. B. (2011). 'Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel', *Environmental Science & Technology*, 45(16), 7060–7067.

Bringezu, S. (2014). 'Carbon Recycling for Renewable Materials and Energy Supply: Recent Trends, Long-Term Options, and Challenges for Research and Development', *Journal of Industrial Ecology*, 18(3), 327–340.

Bruhn, T., Naims, H. & Olfe-Kräutlein, B. (2016). 'Separating the debate on CO₂ utilisation from carbon capture and storage', *Environmental Science & Policy*, 60, 38–43.

Brunsting, S., Upham, P., Dütschke, E., Waldhober, M. D. B., Oltra, C., Desbarats, J., Riesch, H. & Reiner, D. (2011). 'Communicating CCS: Applying communications theory to public perceptions of carbon capture and storage', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(6), 1651–1662.

Bundesgesetzblatt (2012). *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG)*, Köln: Bundesanzeiger.

Campbell, P. K., Beer, T. & Batten, D. (2011). 'Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds', *Bioresource technology*, 102(1), 50–56.

Canadell, J. G. & Raupach, M. R. (2008). 'Managing Forests for Climate Change Mitigation', *Science*, 320(5882), 1456–1457.

Carbon Capture Journal (2013). *Korea CCS center open 20 million \$ innovation challenge*, <<http://www.carboncapturejournal.com/news/korea-ccs-center-opens-20-million-innovation-challenge/3283.aspx?Category=all>> [aufgerufen am 21.09.2016].

Carrington, D. (2016). *The Anthropocene epoch: scientists declare dawn of human-influenced age*, The Guardian, 29.08.2016, <<https://www.theguardian.com/environment/2016/aug/29/declare-anthropocene-epoch-experts-urge-geological-congress-human-impact-earth>> [aufgerufen am 26.10.2016].

CEFIC (2016). *Extra-EU chemicals trade balance*, Brussels: CEFIC, <<http://fr.zone-secure.net/13451/186036?startPage=13#page=14>> [aufgerufen am 21.09.2016].

Climate-KIC (2014). *Climate-KIC to unveil multimillion Euro investment in four climate change innovation programmes at European Business Summit*, London: Climate-KIC, <<http://www.climate-kic.org/press-releases/climate-kic-to-unveil-multimillion-euro-investment-in-four-climate-change-innovation-programmes-at-european-business-summit/>> [aufgerufen am 25.10.2016].

Cremer, C., Esken, A., Fishedick, M., Gruber, E., Idrissova, F., Kuckshinrichs, W., Linßen, J., Pietzner, K., Radgen, P. & Roser, A. (2008). *Sozioökonomische Begleitforschung zur gesellschaftlichen Akzeptanz von Carbon Capture and Storage (CCS) auf nationaler und internationaler Ebene: Endbericht*, Wuppertal: Wuppertal Institut für Umwelt, Energie GmbH.

Crutzen, P. J. (2002). 'Geology of mankind', *Nature*, 415(6867), 23–23.

Dai, N. & Mitch, W. A. (2015). 'Controlling Nitrosamines, Nitramines, and Amines in Amine-Based CO₂ Capture Systems with Continuous Ultraviolet and Ozone Treatment of Washwater', *Environmental Science & Technology*, 49(14), 8878–8886.

Daimler (2016). *Ausgezeichnete Klimaanlage: „Innovation der Vernunft“ Award für die CO₂ Klimaanlage von Mercedes-Benz*, Daimler AG, <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko.xhtml?oid=9920162&cls=L3NlYXJjaHJlc3VsdC9zZWYyZ2hyZXNiBHQueGhobWw_c2VhcmNoU3RyaW5nPUtsaW1hYW5sY-WdlKoNPMiZzZWYyZ2hJZDoxJnNlYXJjaFR5cGU9ZGV0YWlsZWQmYm9yZGVyc210cnVJnJlc3VsdE-luZm9UeXBISWQ9NDA2MjYmdmllclR5cGU9bGlzdCZzb3JoRGVmaW5pdGlvbjlQVUJMSVNIRURfQVQt-MiZoahVtYlNjYWxlSW5kZXg9MCZyb3dDb3VudHNJbmRleDo1&rs=3> [aufgerufen am 25.10.2016].

Dautzenberg, G. & Bruhn, T. (2013). *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, <http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/working_paper_environmental_impacts_of_carbon_capture_technologies_2.pdf> [aufgerufen am 25.10.2016].

de Coninck, H. & Benson, S. M. (2014). 'Carbon Dioxide Capture and Storage: Issues and Prospects', *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1), 243–270.

Delmas, M. A., Nairn-Birch, N. & Balzarova, M. (2013). 'Choosing the right eco-label for your product', *MIT Sloan Management Review*, 54(4), 10.

DIN (2009). *DIN EN ISO 14040: 2009–11: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040: 2006)*, Berlin: Beuth.

Eckl-Dorna, W. (2013). 'Warum Audi auf Öko-Gas setzt', *manager magazin online*, 28.07.2013, <<http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/kuenstliches-erdgas-audis-neue-strategie-fuer-die-autozukunft-a-908172.html>> [aufgerufen am 12.08.2014].

Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., C., M. J., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C. & Zwickel, T., Hg. (2014). *Climate change 2014: Mitigation of climate change*, New York: Cambridge University Press.

EEX (2015). *Market data: EEX Primary Auction Phase 3*, Leipzig: European Energy Exchange (EEX) AG, <<http://www.eex.com/en/market-data#/market-data>> [aufgerufen am 25.10.2016].

enCO₂re (2016). *Want to know the CO₂ emissions streams in Europe and what purity they have? EnCO₂re CO₂ visualisation tool*, <http://enipedia.tudelft.nl/EPRTTR/CO2_source_visualization.html> [aufgerufen am 26.10.2016].

Ericson, A., Bozzuto, C., Krutka, H., Tomski, P., Angielski, S. & Phillips, J. (2015). *Fossil Forward: Revitalizing CCS – Bringing Scale and Speed to CCS Deployment*, <http://www.nationalcoalcouncil.org/newsletter/Bridging_the_CCS_Chasm.pdf> [aufgerufen am 18.02.2015].

European Commission (2003). *Integrated Product Policy-Building on Environmental Life-Cycle Thinking – Communication from the Commission to the Council and the European Parliament*, Document 52003DC0302, <<http://ec.europa.eu/environment/ipp/ippcommunication.htm>> [aufgerufen am 25.10.2016].

European Commission (2016). *Carbon Capture and Geological Storage*, European Commission, <http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs/index_en.htm> [aufgerufen am 28.02.2016].

European Commission & TNS (2011). 'Public Awareness and Acceptance of CO₂ capture and storage', *Special Eurobarometer*, 364, <http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_364_en.pdf> [aufgerufen am 26.10.2016].

European Commission & TNS (2013). 'Attitudes of Europeans towards building the single market for green products', *Flash Eurobarometer*, 367, <http://ec.europa.eu/public_opinion/flash/fl_367_en.pdf> [aufgerufen am 16.10.2016].

Falter, C., Batteiger, V. & Sizmann, A. (2016). 'Climate Impact and Economic Feasibility of Solar Thermochemical Jet Fuel Production', *Environmental Science & Technology*, 50(1), 470–477.

Fine, N. A., Goldman, M. J. & Rochelle, G. T. (2014). 'Nitrosamine Formation in Amine Scrubbing at Desorber Temperatures', *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8777–8783.

Finlayson-Pitts, B.J. & Pitts, J. N. (1997). 'Tropospheric air pollution: ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particles', *Science*, 276(5315), 1045–1051.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C. & Myhre, G. (2007). 'Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing', in Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L., Hg., *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press.

Freeman, R. E. (2004). 'The stakeholder approach revisited', *Zeitschrift für Wirtschafts- und Unternehmensethik*, 5(3), 228.

Fröndhoff, B. (2015). 'Die Welt hat kein Rohstoffproblem', *Handelsblatt*, Printausgabe, 21.10.2015.

GCCSI (2013). *CCUS development roadmap study for Guangdong Province, China*, Global CCS Institute, <<https://hub.globalccsinstitute.com/publications/ccus-development-roadmap-study-guangdong-province-china/13-china-ccus-technology-development-roadmap>> [aufgerufen am 26.10.2016].

Gentry, P. R., House-Knight, T., Harris, A., Greene, T. & Campleman, S. (2013). 'Potential occupational risk of amines in carbon capture for power generation', *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 87(6), 591–606.

Getzner, M., Spash, C. L. & Stagl, S., Hg. (2005). *Alternatives for Environmental Valuation*, Abingdon: Routledge.

Grunenberg, H. & Kuckartz, U. (2013). *Umweltbewusstsein im Wandel: Ergebnisse der UBA-Studie Umweltbewusstsein in Deutschland 2002*, Springer.

Guinee, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T. & Rydberg, T. (2010). 'Life cycle assessment: past, present, and future', *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90–96.

Guinee, J. B., Heijungs, R. & van der Voet, E. (2009). 'A greenhouse gas indicator for bioenergy: some theoretical issues with practical implications', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(4), 328–339.

Haszeldine, R. S. (2009). 'Carbon capture and storage: how green can black be?', *Science*, 325(5948), 1647–1652.

Haszeldine, S. & Scott, V. (2011). 'Carbon capture: Why we need it', *New Scientist*, 210(2806), ii–iii.

Hauke, N. (2014). 'Die grüne Revolution an der Tankstelle? Die Relevanz politischer Narrative am Beispiel der Einführung des Biokraftstoffes E10', in Gadinger, F., Jarzebski, S. & Yildiz, T., Hg., *Politische Narrative*, Wiesbaden: Springer, 173–197.

Hendriks, C., Noothout, P., Zakkour, P. & Cook, G. (2013). 'Implications of the Reuse of Captured CO₂ for European Climate Action Policies', <[http://www.scotproject.org/sites/default/files/Carbon%20Count,%20Ecofys%20\(2013\)%20Implications%20of%20the%20reuse%20of%20captured%20CO2%20-%20report.pdf](http://www.scotproject.org/sites/default/files/Carbon%20Count,%20Ecofys%20(2013)%20Implications%20of%20the%20reuse%20of%20captured%20CO2%20-%20report.pdf)> [aufgerufen am 14.08.2014].

Heo, J., McCoy, S. T. & Adams, P.J. (2015). 'Implications of Ammonia Emissions from Post-Combustion Carbon Capture for Airborne Particulate Matter', *Environmental Science & Technology*, 49(8), 5142–5150.

Horssen, A. V. (2011). *Air pollution impacts from carbon capture and storage (CCS)*, European Environment Agency.

IASS (2016). *CO₂ als Wertstoff (CCU) – Potenziale & Herausforderungen für die Gesellschaft*, IASS Potsdam, <<http://www.iass-potsdam.de/de/forschung/technologischer-wandel/ccu>> [aufgerufen am 28.02.2016].

ICO₂N (2015). *Carbon Capture and Utilization*, <<http://www.pembina.org/reports/ccu-fact-sheet-2015.pdf>> [aufgerufen am 25.10.2016].

IEA (2013). *Technology Roadmap: Carbon Capture and Storage – 2013 edition*, Paris: OECD/ IEA, <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technologyroadmapcarboncaptureandstorage.pdf>> [aufgerufen am 25.10.2016].

IEA (2015). *Storing CO₂ through Enhanced Oil Recovery: Combining EOR with CO₂ storage (EOR+) for profit*, Paris: OECD/IEA, <https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/CO2EOR_3Nov2015.pdf> [aufgerufen am 1.11.2016].

IEA Greenhouse Gas R & D Programme (2005). *A review of natural CO₂ occurrences and releases and their relevance to C₂ storage*, (2005/8), <http://www.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2005-8.pdf> [aufgerufen am September 2005].

IPCC (2014). *Climate Change 2014 – Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

ISIGE (2016). *CO₂ Capture, Storage and Utilization in China*, Institut Supérieur d'Ingénierie et de Gestion de l'Environnement, <<http://www.isige.mines-paristech.fr/international-environmental-management-master/news/opportunities-for-co2-capture-storage-and-utilization-in-china>> [aufgerufen am 26.10.2016].

ISO (1999). *Environmental labels and declarations – Type I environmental labelling – Principles and procedures*. ISO 14024:1999, Genf: International Organisation for Standardisation.

ISO (2000). *Environmental labels and declarations – General principles*. ISO 14020:2000, Genf: International Organisation for Standardisation.

ISO (2002). *Environmental management – Integrating environmental aspects into product design and development*. ISO/TR 14062:2002, Genf: International Organization for Standardization.

ISO (2006a). *Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures*. ISO 14025:2006, Genf: International Organisation for Standardisation.

ISO (2006b). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. ISO 14040:2006, 2 ed., Genf: International Organisation for Standardisation.

ISO (2006c). *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. ISO 14044:2006, Genf: International Organisation for Standardisation.

ISO (2015). *Environmental management systems – Requirements with guidance for use.* ISO 14001:2015, Genf: International Organisation for Standardisation.

ISO (2016). *Environmental labels and declarations – Self-declared environmental claims – Type II environmental labelling.* ISO 14021:2016, Genf: International Organisation for Standardisation.

Jensen, A. A., Hoffman, L., Møller, B. T., Schmidt, A., Christiansen, K., Elkington, J. & van Dijk, F. (1998). 'Life cycle assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources', *Environmental Issues Series*, 6(6), <<file:///C:/Users/hma/Downloads/Issue-20report-20No-206.pdf>> [aufgerufen am 26.10.2016].

Jones, C. R. & Jones, A. R. (2016). 'Two Blind Mice: It Is Time for Greater Collaboration between Engineers and Social Scientists around the RDD & D of Industrial Technologies', *C – Journal of Carbon Research*, 2(2), 16.

Jones, C. R., Radford, R. L., Armstrong, K. & Styring, P. (2014). 'What a waste! Assessing public perceptions of Carbon Dioxide Utilisation technology', *Journal of CO₂ Utilization*, 7, 51–54.

Jung, J., von der Assen, N. & Bardow, A. (2013). 'Comparative LCA of multi-product processes with non-common products: a systematic approach applied to chlorine electrolysis technologies', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(4), 828–839.

Karl, M., Castell, N., Simpson, D., Solberg, S., Starrfelt, J., Svendby, T., Walker, S. E. & Wright, R. F. (2014). 'Uncertainties in assessing the environmental impact of amine emissions from a CO₂ capture plant', *Atmos. Chem. Phys.*, 14(16), 8533–8557.

Kätelhön, A., von der Assen, N., Suh, S., Jung, J. & Bardow, A. (2015). 'Industry-Cost-Curve Approach for Modeling the Environmental Impact of Introducing New Technologies in Life Cycle Assessment', *Environmental Science & Technology*, 49(13), 7543–7551.

Khakharia, P., Brachert, L., Mertens, J., Huizinga, A., Schallert, B., Schaber, K., Vlugt, T. & Goetheer, E. (2013). 'Investigation of aerosol based emission of MEA due to sulphuric acid aerosol and soot in a Post Combustion CO₂ Capture process', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, 138–144.

Kilimann, S. (2015). 'Klimaanlage auf der Anklagebank', *ZEIT Online*, <<http://www.zeit.de/mobilitaet/2015-12/auto-klimaanlage-co2-klimaschutz-sicherheit>> [aufgerufen am 25.10.2016].

Kilisek, R. (2015). 'Why We Need to Get from Carbon Capture & Storage (CCS) to Carbon Capture & Utilization (CCU)', *Breaking Energy*, 03.06.2015, <<http://breakingenergy.com/2015/06/03/why-we-need-to-get-from-carbon-capture-storage-ccs-to-carbon-capture-utilization-ccu/>> [aufgerufen am 26.10.2016].

Klankermayer, J. & Leitner, W. (2015). 'Love at second sight for CO₂ and H₂ in organic synthesis', *Science*, 350(6261), 629–630.

Knudsen, S., Karl, M. & Randall, S. (2009). *Summary Report: Amine Emissions to Air during Carbon Capture, Phase I: CO₂ and Amines Screening Study for Effects to the Environment*, <<http://co2.nilu.no/LinkClick.aspx?fileticket=m5iQCoa/Pqg=>> [aufgerufen am 26.10.2016].

Krämer, D., Roth, S. & Wunder, C. (2015). *Vom Abfall zum Rohstoff: Kann CO₂ in Zukunft Erdöl ersetzen?*, <https://www.bmbf.de/pub/Vom_Abfall_zum_Rohstoff.pdf> [aufgerufen am 26.10.2016].

Lasch, H. (2014). 'Chance oder Scheindebatte? Kohlendioxid als Rohstoff', *Ökotest*, Printausgabe, 23.10.2014.

Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R., Peters, G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S., Sitch, S., Tans, P. & Arneeth, A. (2014). 'Global carbon budget 2014', *Earth System Science Data Discussions*, 7(2), 521–610.

Madsen, S., Normile-Elzinga, E. & Kinsman, R. (2014). *CO₂ based cleaning of commercial textiles: The world's first CO₂ solution for cleanroom textiles*, Littleton: CO₂ Nexus Inc, <<http://www.energy.ca.gov/2014publications/CEC-500-2014-083/CEC-500-2014-083.pdf>> [aufgerufen am 25.10.2016].

Malvicino, C. (2011). *Final Report Summary - B-COOL (Low Cost and High Efficiency CO₂ Mobile Air Conditioning system for lower segment cars)*, European Commission, <http://cordis.europa.eu/result/rcn/46813_en.html> [aufgerufen am 28.08.2015].

Markewitz, P., Kuckshinrichs, W., Leitner, W., Linssen, J., Zapp, P., Bongartz, R., Schreiber, A. & Muller, T. E. (2012). 'Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂', *Energy & Environmental Science*, 5(6), 7281–7305.

McConnell, C. (2012). *Adding "Utilization" to Carbon Capture and Storage*, Washington: U.S. Department of Energy, <<http://energy.gov/articles/adding-utilization-carbon-capture-and-storage>> [aufgerufen am 26.11.2014].

McKee, D., Hg. (1993). *Tropospheric ozone: human health and agricultural impacts*, Boca Raton: Lewis Publishers.

McNutt, M. K., Abdalati, W., Caldeira, K., Doney, S. C., Falkowski, P. G., Fetter, S., Fleming, J. R., Hamburg, S. P., Morgan, M. G., Penner, J. E., Pierrehumbert, R. T., Rasch, P. J., Russell, L. M., Snow, J. T., Titley, D. W. & Wilcox, J. (2015). *Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration*, Washington, DC: The National Academies Press, <<http://www.nap.edu/catalog/18805/climate-intervention-carbon-dioxide-removal-and-reliable-sequestration>> [aufgerufen am 26.10.2016].

Mennicken, L. (2015). 'The German R&D programme for CO₂ utilisation – an update', *5th Carbon Dioxide Utilisation Summit*, Dresden, 22.10.2015.

Mertens, J., Brachert, L., Desagher, D., Thielens, M., Khakharia, P., Goetheer, E. & Schaber, K. (2014). 'ELPI+ measurements of aerosol growth in an amine absorption column', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 23, 44–50.

Mertens, J., Knudsen, J., Thielens, M.-L. & Andersen, J. (2012). 'On-line monitoring and controlling emissions in amine post combustion carbon capture: A field test', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 6, 2–11.

Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H., Loos, M. & Meyer, L. (2005). *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*, New York: Cambridge University Press, <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf> [am 11.02.2015].

Mikkelsen, M., Jorgensen, M. & Krebs, F.C. (2010). 'The teraton challenge. A review of fixation and transformation of carbon dioxide', *Energy & Environmental Science*, 3(1), 43–81.

Naims, H. (2016). 'Economics of carbon dioxide capture and utilization – a supply and demand perspective', *Environmental Science and Pollution Research*, 1–16.

Naims, H., Olfe-Kräutlein, B., Lorente Lafuente, A. M. & Bruhn, T. (2015). *CO₂-Recycling – Option für Politik und Gesellschaft?*, IASS Potsdam, <http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/online_working_paper_1501214_hn.pdf> [aufgerufen am 26.10.2016].

Nielsen, C., D'Anna, B., Dye, C., George, C., Graus, M., Hansel, A., Karl, M., King, S., Musabila, M. & Müller, M. (2010). *Atmospheric Degradation of Amines (ADA). Summary Report: Gas phase photo-oxidation of 2-aminoethanol (MEA)*, Kjeller: Norwegian Institute for Air Research, <file:///C:/Users/hma/Downloads/o8-2010-CJN_MKA_ADA-report1.pdf> [aufgerufen am 26.10.2016].

Norwegian Climate and Pollution Agency (2010). *Permit for activities pursuant to the Pollution Control Act for CO₂ Technology Centre Mongstad DA*, <http://www.tcmda.com/Global/Dokumenter/Klif_TCM_Discharge%20permit.pdf> [aufgerufen am 26.10.2016].

NSF (2013). *RCNCCUS – Research Coordination Network Carbon Capture Utilization and Storage*, New York: NSF Science Engineering and Education for Sustainability, Columbia University, Lenfest Center for Sustainable Energy, <<http://www.aiche.org/ccusnetwork>> [aufgerufen am 25.10.2016].

Oei, P., Kemfert, C., Reiz, F. & von Hirschhausen, C. (2014). *Braunkohleausstieg – Gestaltungsoptionen im Rahmen der Energiewende, Politikberatung kompakt*, Berlin: DIW.

Oettinger, G. (2011). 'CCS and CCU – A future for clean coal?', Speech at EUCERS EVENTS, <http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/oettinger/headlines/speeches/2011/12/doc/20111212.pdf> [aufgerufen am 01.02.2016].

Olfe-Kräutlein, B., Naims, H., Bruhn, T., Lorente Lafuente, A. M. & Tobias, M. (2014). *CO₂ als Wertstoff?*, IASS Fact Sheet, 2/2014, <http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/rz_fact_sheet_140708_digital_o.pdf> [aufgerufen am 05.08.2016].

Otto, A., Grube, T., Schiebahn, S. & Stolten, D. (2015). 'Closing the loop: captured CO₂ as a feedstock in the chemical industry', *Energy & Environmental Science*, 8(11), 3283–3297.

Pan, S.-Y., Lorente Lafuente, A. M. & Chiang, P.-C. (2016). 'Engineering, environmental and economic performance evaluation of high-gravity carbonation process for carbon capture and utilization', *Applied Energy*, 170, 269–277.

Peters, M., Köhler, B., Kuckshinrichs, W., Leitner, W., Markewitz, P. & Müller, T. E. (2011). 'Chemical Technologies for Exploiting and Recycling Carbon Dioxide into the Value Chain', *ChemSusChem*, 4(9), 1216–1240.

Piria, R., Naims, H. & Lorente Lafuente, A. M. (2016). *Carbon Capture and Utilisation (CCU): Klimapolitische Einordnung und innovationspolitische Bewertung*, <<https://www.adelphi.de/de/publikation/carbon-capture-and-utilization-ccu-klimapolitische-einordnung-und-innovationspolitische>> [aufgerufen am 30.10.2016].

Raab, U. (2014). *Technical Expert Meeting on Carbon Capture, Use and Storage: Summary*, Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), <http://unfccc.int/files/bodies/awg/application/pdf/adp2-6_summary_report_ccus_for_posting.pdf> [aufgerufen am 13.04.2016].

Raworth, K. (2012). 'A safe and just space for humanity: can we live within the doughnut', Oxfam Policy and Practice: *Climate Change and Resilience*, 8(1), 1–26.

Renn, O. (2005). 'Technikakzeptanz: Lehren und Rückschlüsse der Akzeptanzforschung für die Bewältigung des technischen Wandels', *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*, 14(3), 29–38.

Reynolds, A. J., Verheyen, T. V., Adeloju, S. B., Meuleman, E. & Feron, P. (2012). 'Towards Commercial Scale Postcombustion Capture of CO₂ with Monoethanolamine Solvent: Key Considerations for Solvent Management and Environmental Impacts', *Environmental Science & Technology*, 46(7), 3643–3654.

Rochelle, G.T. (2009). 'Amine scrubbing for CO₂ capture', *Science*, 325(5948), 1652–1654.

Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sorlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. & Foley, J. A. (2009). 'A safe operating space for humanity', *Nature*, 461(7263), 472–475.

Rohr, A. & Knipping, E. (2011). *Health and Environmental Impacts of Amines for Post-Combustion Carbon Capture*, Workshop Summary, Palo Alto: Electric Power Research Institute (EPRI).

Santarius, T. (2012). *Der Rebound-Effekt: Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz*, Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.

Santos, S. (2015). 'CCS and CCU – Their role in the mitigation of greenhouse gas emissions from energy intensive industry', *Methanol Technology and Policy Congress*, Frankfurt, 01.12.2015, IEA Greenhouse Gas R&D Programme.

Schramm, S. (2014). 'Unser umtriebige Element', *ZEIT*, Printausgabe, 25.9.2014.

SCOT project (2016). *EU ETS to incentivise CO₂ utilisation?*, SCOT Project Briefing Paper, <<http://www.scotproject.org/images/Briefing%20paper%20EU%20ETS%20final.pdf>> [aufgerufen am 26.10.2016].

Scott, V., Gilfillan, S., Markusson, N., Chalmers, H. & Haszeldine, R. S. (2013). 'Last chance for carbon capture and storage', *Nature Climate Change*, 3(2), 105–111.

Scott, V., Haszeldine, R. S., Tett, S. F. & Oschlies, A. (2015). 'Fossil fuels in a trillion tonne world', *Nature Climate Change*, 5(5), 419–423.

Selma, L., Seigo, O., Dohle, S. & Siegrist, M. (2014). 'Public perception of carbon capture and storage (CCS): A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 848–863.

Shah, A. D., Dai, N. & Mitch, W.A. (2013). 'Application of Ultraviolet, Ozone, and Advanced Oxidation Treatments to Washwaters To Destroy Nitrosamines, Nitramines, Amines, and Aldehydes Formed during Amine-Based Carbon Capture', *Environmental Science & Technology*, 47(6), 2799–2808.

Shao, R. & Stangeland, A. (2009). *Amines used in CO₂ capture – Health and environmental impacts*, Oslo: Bellona Foundation, <http://bellona.org/assets/sites/3/2015/06/fil_Bellona_report_September_2009_-_Amines_used_in_CO2_capture-11.pdf> [aufgerufen am 26.10.2016].

Smit, B., Park, A.-H. A. & Gadikota, G. (2014). 'The Grand Challenges in Carbon Capture, Utilization, and Storage', *Frontiers in Energy Research*, 2, 55.

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. & Ludwig, C. (2015). 'The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration', *The Anthropocene Review*, 2(1), 81–98.

Steffen, W., Crutzen, P. J. & McNeill, J. R. (2007). 'The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature?', *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 36(8), 614–621.

Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P. & McNeill, J. (2011). 'The Anthropocene: conceptual and historical perspectives', *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938), 842–867.

Steffen, W., Persson, Å., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., Crumley, C., Crutzen, P., Folke, C. & Gordon, L. (2011). 'The Anthropocene: From global change to planetary stewardship', *Ambio*, 40(7), 739–761.

Stephens, J. C. (2014). 'Time to stop investing in carbon capture and storage and reduce government subsidies of fossil-fuels', *WIREs Climate Change*, 5(2), 169–173.

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

Strohbach, O. (2013). *World premiere: Audi opened power-to-gas facility*, Audi, <http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/en/themes/2013/06/Audi_opens_power_to_gas_facility.html> [aufgerufen am 24.08.2015].

Styring, P., Jansen, D., de Coninck, H., Reith, H. & Armstrong, K. (2011). *Carbon Capture and Utilization in the green economy*, <<http://co2chem.co.uk/wp-content/uploads/2012/06/CCU%20in%20the%20green%20economy%20report.pdf>> [aufgerufen am August 14, 2014].

Subcommission on Quaternary Stratigraphy (2016). *Working group on the 'Anthropocene'*, <<http://quaternary.stratigraphy.org/workinggroups/anthropocene/>> [aufgerufen am 26.10.2016].

Tang, X., Price, D., Praske, E., Lee, S. A., Shattuck, M. A., Purvis-Roberts, K., Silva, P. J., Asa-Awuku, A. & Cocker III, D. R. (2013). 'NO₃ radical, OH radical and O₃-initiated secondary aerosol formation from aliphatic amines', *Atmospheric environment*, 72, 105–112.

TheLocal (2014). 'Vattenfall abandons research on CO₂ storage', *The Local*, 07.05.2014, <<http://www.thelocal.se/20140507/vattenfall-abandons-research-on-co2-storage>> [aufgerufen am 25.10.2016].

Töpfer, K. (2013). 'Nachhaltigkeit im Anthropozän', *Nova Acta Leopoldina NF*, 117(398), 31–40.

UBA (2013). *Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 – Hintergrundpapier*, Dessau: Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf> [aufgerufen am 25.10.2016].

UBA (2014). *Rebound-Effekte*, Dessau: Umweltbundesamt, <<https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/oekonomische-rechtliche-aspekte-der/rebound-effekte>> [aufgerufen am 25.10.2016].

UBA (2016). *Autoklimaanlagen mit klimaschonendem Kältemittel CO₂*, Dessau: Umweltbundesamt, <<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/autoklimaanlagen-klimaschonendem-kaeltemittel-co2>> [aufgerufen am 25.10.2016].

UN Sustainable Development Knowledge Platform (2016). *Sustainable Development Goals*, New York: UN, <<https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>> [aufgerufen am 11.08.2016].

University of Sheffield (2016). *Carbon Capture, Utilisation and Storage & Conventional Power*, Sheffield: University of Sheffield, <<http://energy2050.ac.uk/research-facilities/energy-generation/carbon-capture-utilisation-and-storage/>> [aufgerufen am 26.10.2016].

UNOPS (2009). *A Guide to Environmental Labels – for Procurement Practitioners of the United Nations System*, Kopenhagen: United Nations Office for Project Services, <http://www.greeningtheblue.org/sites/default/files/Env%20Labels%20Guide_final_o.pdf> [aufgerufen am 26.10.2016].

US DOE (o. D.-a). *Enhanced Oil Recovery*, Washington: U.S. Department of Energy, <<http://energy.gov/fe/science-innovation/oil-gas-research/enhanced-oil-recovery>> [aufgerufen am 25.10.2016].

US DOE (o. D.-b). *Innovative concepts for beneficial reuse of carbon dioxide*, Washington: U.S. Department of Energy, <<http://energy.gov/fe/innovative-concepts-beneficial-reuse-carbon-dioxide-o>> [aufgerufen am 20.01.2015].

US DOE & NETL (2010). *Carbon Dioxide Capture and Storage R&D Roadmap*, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, <<https://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Carbon%20Seq/Reference%20Shelf/CCSRoadmap.pdf>> [aufgerufen am 26.10.2016].

US DOE & NETL (2016). *CO₂ Utilization Focus Area*, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, <<http://www.netl.doe.gov/research/coal/carbon-storage/research-and-development/co2-utilization>> [aufgerufen am 28.02.2016].

US EIA (2014). *Assumptions to the Annual Energy Outlook 2014*, Washington: U.S. Department of Energy, Energy Information Agency, <[http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/0554\(2014\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/0554(2014).pdf)> [aufgerufen am 1.11.2016].

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

Veltman, K., Singh, B. & Hertwich, E.G. (2010). 'Human and Environmental Impact Assessment of Postcombustion CO₂ Capture Focusing on Emissions from Amine-Based Scrubbing Solvents to Air', *Environmental Science & Technology*, 44(4), 1496–1502.

von der Assen, N., Jung, J. & Bardow, A. (2013). 'Life-cycle assessment of carbon dioxide capture and utilization: avoiding the pitfalls', *Energ. Environ. Sci.*, 6(9), 2721–2734.

von der Assen, N., Lampe, M., Müller, L. & Bardow, A. (2015). 'Life-Cycle Assessment Principles for the Integrated Product and Process Design of Polymers from CO₂', in Krist, V., Gerneay, J. K. H. & Rafiqul, G., Hg., *Computer Aided Chemical Engineering*, Amsterdam: Elsevier, 1235–1240.

von der Assen, N., Lorente Lafuente, A. M., Peters, M. & Bardow, A. (2015). 'Chapter 4 – Environmental Assessment of CO₂ Capture and Utilisation', in Armstrong, K., Styring, P. & Quadrelli, E. A., Hg., *Carbon Dioxide Utilisation*, Amsterdam: Elsevier, 45–56.

von der Assen, N., Müller, L. J., Steingrube, A., Voll, P. & Bardow, A. (2016). 'Selecting CO₂ Sources for CO₂ Utilization by Environmental-Merit-Order Curves', *Environmental Science & Technology*, 50(3), 1093–1101.

von der Assen, N., Sternberg, A., Kätelhön, A. & Bardow, A. (2015). *Environmental potential of carbon dioxide utilization in the polyurethane supply chain*, Faraday Discussions.

von der Assen, N., Voll, P., Peters, M. & Bardow, A. (2014). 'Life cycle assessment of CO₂ capture and utilization: A tutorial review', *Chemical Society Reviews*, 43(23), 7982–7994.

Wallquist, L., Visschers, V. H. & Siegrist, M. (2010). 'Impact of knowledge and misconceptions on benefit and risk perception of CCS', *Environmental Science & Technology*, 44(17), 6557–6562.

WBCSD (2014). *Life Cycle Metrics for Chemical Products: A guideline by the chemical sector to access and report on the environmental footprint of products, based on life cycle assessment*, <<http://www.wbcd.org/Pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=16329>> [aufgerufen am 05.10.2015].

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

Wilson, G., Travalay, Y., Brun, T., Knippels, H., Armstrong, K., Styring, P., Krämer, D., Saussez, G. & Bolscher, H. (2015). *A Vision for Smart CO₂ Transformation in Europe: Using CO₂ as a resource*, SCOT project, <<http://www.scotproject.org/images/SCOT%20Vision.pdf>> [aufgerufen am 26.10.2015].

World Economic Forum (2014). *Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains*, Geneva: World Economic Forum, <http://www3.weforum.org/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2014.pdf> [aufgerufen am 28.11.2014].

Zero Emissions Plattform (2013). *CO₂ Capture and Use (CCU) – The potential to reduce CO₂ emissions and accelerate CCS deployment in Europe*, <[file:///C:/Users/hma/Downloads/ZEP%20paper%20on%20CCU%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/hma/Downloads/ZEP%20paper%20on%20CCU%20(2).pdf)> [aufgerufen am 28.02.2016].

Zimmermann, A. & Kant, M. (2016). *The Business Side of Innovative CO₂ Utilisation*, Berlin: EIT Climate KIC/TU Berlin, <<http://enco2re.climate-kic.org/wp-content/uploads/2016/01/The-business-side-of-innovative-CO2-utilisation.pdf>> [aufgerufen am 11.08.2016].



Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS) e. V.

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.

IASS Study November 2016

Institute for Advanced Sustainability Studies Potsdam (IASS) e. V.

Berliner Straße 130

14467 Potsdam

Tel: +49 (0) 331-28822-340

Fax: +49 (0) 331-28822-310

E-Mail: media@iass-potsdam.de

www.iass-potsdam.de

Autorenkontakt:

barbara.olfe-kraeutlein@iass-potsdam.de

henriette.naims@iass-potsdam.de

ViSdP:

Prof. Dr. Mark G. Lawrence,

Geschäftsführender wissenschaftlicher Direktor

DOI: 10.2312/iass.2016.025

