

IASS WORKING PAPER

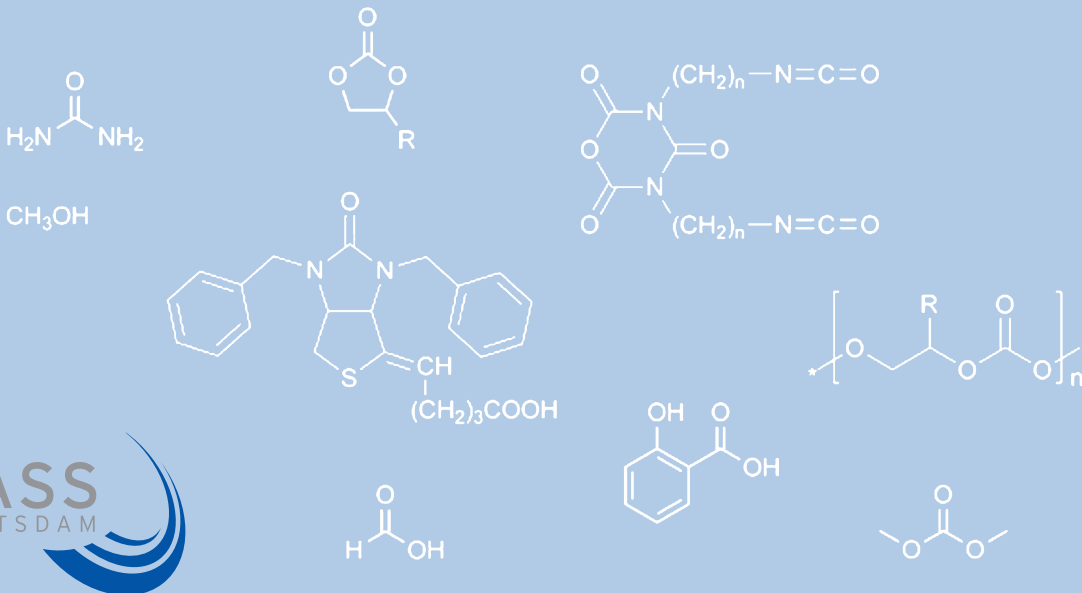
Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS)

Potsdam, Dezember 2015

CO₂-Recycling – Option für Politik und Gesellschaft?

Zwölf Thesen zur gesellschaftlichen und politischen Bedeutung von Carbon Capture and Utilisation (CCU)-Technologien

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



Inhalt

Einleitung 3

I. Umwelt- und Energiepolitik 4

1. CO₂-Recycling kann einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft und Sicherung der Rohstoffbasis leisten. 4
2. Ein Beitrag zum Klimaschutz ist möglich, darf aber nicht überschätzt werden. 4
3. Auch wenn CO₂ aus der Verbrennung nachwachsender Rohstoffe in CCU-Prozessen als Kohlenstoffquelle genutzt wird, ist eine Reduktion des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre nur in begrenztem Umfang möglich. 4
4. CO₂-Recycling kann die Energiewende ergänzen und schafft keine Pfadabhängigkeiten zum Erhalt der fossilen Energieinfrastruktur, wenn Emissionen genutzt werden, die außerhalb des Energiesektors anfallen. Hierin unterscheidet sich CCU entscheidend von CCS. 5
5. Bestimmte CCU-Anwendungen können als Energiespeicher dienen. Ihre Wirtschaftlichkeit ist aber noch nicht gegeben. 5
6. Der Rohstoff CO₂ kann eine verhältnismäßig günstige Kohlenstoffquelle sein. 6

II. Politische Gestaltungsoptionen 7

7. CCU sollte in klimapolitischen Maßnahmen wie dem Emissionshandel weiterhin nicht als direkte Emissionsminderung angerechnet werden. Eine indirekte Anrechnung ist über die bestehende Emissionsberichterstattung möglich. 7
8. CO₂-basierte Produkte als „erneuerbar“ („renewable based product“) zu bezeichnen kann im politischen Kontext irreführend sein. 7
9. Die Nutzung von CO₂ aus natürlichen Vorkommen ist aus ökologischer Sicht weniger sinnvoll als von CO₂ aus anderen Quellen. 8
10. Für die Bewertung von CCU-Technologien ist eine zeitnahe Einführung von Standards empfehlenswert. 8

III. Gesellschaftliche Akzeptanz 9

11. Eine übertrieben optimistische Kommunikation insbesondere der ökologischen Zukunftspotenziale von CCU birgt die Gefahr der Instrumentalisierung für „Greenwashing“. 9
12. CCU stellt kein valides Argument dar, um die Einführung und Etablierung von CCS-Technologien zu fördern. 9

Referenzen 10

Einleitung

Schon seit fast 50 Jahren verfolgt die chemische Forschung die Idee, das Molekül und Treibhausgas CO₂ als Rohstoff zu nutzen [1]. Seit den Ölkrisen der 1970er Jahre und insbesondere in den letzten Jahren, seitdem der Klimawandel in den öffentlichen Fokus gerückt ist, werden Technologien entwickelt, die CO₂ als Kohlenstoffquelle nutzen. Ziel dieser Bemühungen ist es, das klimaschädliche Abgas als Rohstoff in industrielle Produktionsprozesse einzubinden und somit einen natürlichen Kohlenstoffkreislauf zu imitieren [2]. Etliche Regionen haben Förderprogramme ins Leben gerufen, die die Technologieentwicklung unterstützen [3–5]. So konnten in den letzten Jahren zahlreiche technologische Durchbrüche erreicht werden, und erste Produkte erreichen die Märkte.

Seit 2013 forscht ein interdisziplinäres Team am IASS aus Perspektiven der Natur-, Ingenieurs-, Wirtschafts- und Kommunikationswissenschaften zu gesellschaftlichen Aspekten sogenannter Carbon Capture and Utilisation (CCU)-Technologien. Im Rahmen dieses Projekts sollen bereits in dem größtenteils noch frühen Entwicklungsstadium der Technologien mögliche Risiken und Chancen identifiziert und bewertet werden, die mit einer breiten Umsetzung der Technologien verbunden sein können. Die Forschungsarbeit erfolgt transdisziplinär, d.h. im Dialog und Austausch mit Vertretern aus den Bereichen Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft. Sie beinhaltet außerdem einen intensiven Diskurs mit Kollegen aus anderen Fachbereichen am

IASS und die Bearbeitung individueller, disziplinärer Forschungsfragen. Auf Basis dieser mehrschichtigen Herangehensweise wurden die im Folgenden beschriebenen Thesen zu gesellschaftlichen und politischen Aspekten der CO₂-Nutzung entwickelt.

Die vorgestellten Thesen fassen gesellschaftlich besonders relevante Aspekte der CO₂-Nutzung zusammen. Dabei werden insbesondere einige der gängigen Argumentationsmuster aufgenommen und kritisch hinterfragt. Im Fokus stehen zunächst Risiken und Potenziale der CO₂-Nutzung aus umwelt- und energiepolitischer Sicht. Darüber hinaus werden Thesen und Empfehlungen zu politischen Gestaltungsoptionen vorgestellt, die aktuell vor allem in der Forschungs-Community diskutiert werden. Weitere Thesen behandeln erste kritische Aspekte im Hinblick auf eine gesellschaftliche Akzeptanz oder mögliche Ablehnung von CCU-Technologien.

Die Thesen stellen kein abschließendes, wissenschaftliches Ergebnis dar. Sie sind vielmehr Zwischenergebnisse einer ersten Erforschung der gesellschaftlichen und politischen Dimensionen von CCU und Empfehlungen des Autorenteam für den Dialog über das Wissenschaftsfeld. Vor Veröffentlichung wurde allen Teilnehmer des Round Tables „CO₂-Recycling“, der am 9. November 2015 am IASS stattfand, die Gelegenheit gegeben, ihr Feedback zu den Thesen einzubringen. Die Thesen greifen damit Diskurse und Gedanken aus dem Round Table auf, stellen jedoch keinen Konsens der Teilnehmer der Veranstaltung dar.

I. Umwelt- und Energiepolitik

1. CO₂-Recycling kann einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft und Sicherung der Rohstoffbasis leisten.

Im natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Erde ist CO₂ kein Abfall. CCU-Technologien folgen dem Vorbild natürlicher Prozesse, indem sie versuchen, CO₂, das aufgrund menschlicher Aktivitäten emittiert wird, wieder als Rohstoff einzubinden [6]. Bereits heute sind zahlreiche Anwendungen technisch umsetzbar [2]. Perspektivisch könnte ein Kreislauf entstehen und die industrielle Rohstoffbasis um eine Kohlenstoffquelle ergänzt werden. Gerade in Ländern mit begrenzten Vorkommen fossiler und nachwachsender Rohstoffe kann dieser lokal verfügbare Rohstoff für die Industrie interessant sein.

2. Ein Beitrag zum Klimaschutz ist möglich, darf aber nicht überschätzt werden.

Der zu erwartende Beitrag von CCU-Technologien zum Klimaschutz ist im Vergleich zu den insgesamt global notwendigen Emissionsreduktionen eher gering: Selbst in langfristigen Szenarien mit sehr optimistischen Annahmen wird geschätzt, dass höchstens 6% der anthropogenen Emissionen für die Produktion von Materialien und Kraftstoffen genutzt werden könnten [7, 8]. Da weiterhin Prozesse der CO₂-Nutzung aber auch Energie benötigen, deren Erzeugung wiederum mit neuen CO₂-Emissionen verbunden sein kann, kann die ökologische CO₂-Bilanz technologiespezifisch je nach Prozess positiv oder negativ ausfallen [9]. Auch ist in den meisten CCU-Anwendungen die Dauer der CO₂-Speicherung begrenzt. Das CO₂ wird am Ende des Produktlebens wieder emittiert. Es ist somit wichtig zu unterscheiden zwischen der Menge an CO₂, die genutzt wird, und der Menge an CO₂-Emissionen, die durch die Nutzung insgesamt vermieden werden kann. In

einigen CCU-Anwendungen ist es möglich, durch effizientere Prozesse im Vergleich zu herkömmlichen Technologien mehr CO₂ einzusparen als genutzt wird [10].

3. Auch wenn CO₂ aus der Verbrennung nachwachsender Rohstoffe in CCU-Prozessen als Kohlenstoffquelle genutzt wird, ist eine Reduktion des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre nur in begrenztem Umfang möglich.

Nachwachsende Rohstoffe stellen eine alternative Kohlenstoff- und Energiequelle dar. Sie haben das Potenzial, bei ihrer Verbrennung als CO₂-neutral bewertet zu werden, wenn ihre jeweilige Verarbeitung und Nutzung keine Emissionen verursacht. Dies ist möglich, weil sie in der Wachstumsphase den Kohlenstoff absorbieren, der bei einer späteren Verbrennung emittiert wird.

Die Nutzung von CO₂ aus der Verbrennung nachwachsender Rohstoffe in CCU-basierten Produkten kann somit zu einer CO₂-Reduktion in der Atmosphäre führen, weil das CO₂ aus der Atmosphäre anstatt aus der Verbrennung fossilen Kohlenstoffs kommt. Das CO₂ ist dann nicht dauerhaft entfernt, befindet sich aber in einem neuen Nutzungskreislauf und der CO₂-Gehalt der Atmosphäre wird um die Gesamtmenge an CO₂ reduziert, die sich in dieser Nutzungsschleife befindet.

Eine steigende Nachfrage nach Biomasse erfordert aber eine zunehmende Landnutzung und könnte somit in Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion geraten. Darüber hinaus kann eine steigende Produktion von Biomasse zu Entwaldung, einem Verlust an Biodiversität und der Vertreibung bäuerlicher Kleinbetriebe führen [11].

4. CO₂-Recycling kann die Energiewende ergänzen und schafft keine Pfadabhängigkeiten zum Erhalt der fossilen Energieinfrastruktur, wenn Emissionen genutzt werden, die außerhalb des Energiesektors anfallen. Hierin unterscheidet sich CCU entscheidend von CCS.

Mögliche CO₂-Quellen sind industrielle Anlagen oder auch die Atmosphäre. Der größte Teil (ca. 76%) der weltweiten Emissionen aus großen Punktquellen stammt aus dem fossilen Energiesektor (Kohle- und Gaskraftwerke). Darüber hinaus kommen größere industrielle Anlagen z.B. der Zement-, Eisen- und Stahlindustrie als CO₂-Quellen infrage, die momentan für 22% der globalen CO₂-Emissionen aus großen Punktquellen verantwortlich sind. Nur ein geringer Teil der industriellen Emittenten (ca. 2%) liefern hochkonzentriertes CO₂. Auch nach einer Abschaltung aller Kohle- und Gaskraftwerke sind die sonstigen CO₂-Emissionen z.B. aus der Zement-, Eisen- und Stahlindustrie oder Raffinerien insgesamt so groß, dass diese auch in optimistischen, langfristigen Szenarien zur Entwicklung von CCU den Bedarf an CO₂ decken können [12]. Der Einsatz von CCU zur Wiederverwertung von Industrieemissionen außerhalb des Energiesektors schafft somit keine Pfadabhängigkeiten zum Erhalt der fossilen Energieinfrastruktur. Die bereits vieldiskutierten CCS-Technologien (Carbon Capture and Storage) zielen primär darauf ab, in großem Maßstab die CO₂-Bilanz der bestehenden fossilen Infrastruktur zu verbessern, insbesondere von Kraftwerken. CCS wird daher oft als Brückentechnologie für die Energiewende angesehen. Die damit einhergehenden Investitionskosten für die Nachrüstung fossiler Kraftwerke schaffen allerdings Anreize, diese länger zu betreiben und können somit zu Pfadabhängigkeiten führen, die dem Ziel der Dekarbonisierung des Energiesektors entgegen wirken können.

CCU dagegen kann Prozesse der Energiewende ergänzen, sofern jene Emissionen genutzt werden, die außerhalb des fossilen Energiesektors anfallen. Außerdem muss in der CO₂-Bilanz der CCU-Prozesse eine Emissionseinsparung nachgewiesen werden, was z.B. durch eine Substitution fossiler Rohstoffe, Effizienzsteigerungen oder den Einsatz erneuerbarer Energien möglich wird.

5. Bestimmte CCU-Anwendungen können als Energiespeicher dienen. Ihre Wirtschaftlichkeit ist aber noch nicht gegeben.

Die Energiewende führt zu einer wachsenden Infrastruktur aus erneuerbaren Energien, die mit einem fluktuierenden Energieaufkommen verbunden ist und somit auch ein System der Flexibilisierung erfordert, z.B. durch Energiespeicherung. In diesem Zusammenhang werden CCU-Technologien als Option zur Energiespeicherung unter dem Begriff „Power-to-X“ (z.B. -Gas, -Liquid, -Chemicals) vorgeschlagen. Im Falle von Spitzen im Energieaufkommen kann die überschüssige Energie gemeinsam mit regional verfügbaren CO₂-Emissionen für die Herstellung von synthetischen flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen verwendet werden [13–15]. Die so erfolgende Speicherung der Energie mit Hilfe von CCU-Technologien steht aber im Wettbewerb zu anderen Technologien wie z.B. der direkten Nutzung von mit erneuerbarer Energie hergestelltem Wasserstoff als Energieträger und insbesondere auch dem Export der Überschussenergie als Strom. Insgesamt sind die Zeiträume der Verfügbarkeit von Überschussstrom oft noch zu kurz und die generierten Mengen an erneuerbarer Energie grundsätzlich noch nicht ausreichend, da zunächst der Strommarkt bedient werden muss. Eine breitere Umsetzung der CCU-Speicher wird somit erst möglich werden, wenn die Wirtschaftlichkeit der Technologien verbessert werden kann.

6. Der Rohstoff CO₂ kann eine verhältnismäßig günstige Kohlenstoffquelle sein.

Die Kosten von reinem CO₂ setzen sich aus den Abscheidungs- und gegebenenfalls anfallenden Transportkosten zusammen. Transportkosten können minimiert werden, indem Nutzungsanlagen dort gebaut werden, wo relativ günstiges CO₂ zur Verfügung steht. Die Abscheidungskosten hängen von der jeweiligen Quelle und eingesetzten Technologie ab und können beispielsweise von nur ca. 10€ pro Tonne in der Fermentierung bis zu rund 100€ pro Tonne in Raffinerieprozessen variieren [16, 17].

Wenn CCU-Technologien die Effizienzsteigerung eines Prozesses oder die Substitution eines Rohstoffes ermöglichen, dann sind insgesamt Kostensenkungen zu erwarten. Dies ist möglich, da ein anderer Rohstoff, der z.B. aus hochenergetischen, fossilen Kohlenstoffträgern hergestellt wurde, ersetzt werden kann. Eine Substitution ist allerdings weder vollständig, noch im gleichen Verhältnis (1:1) oder bei allen Technologien möglich. Fallende Marktpreise für fossile Rohstoffe reduzieren jedoch Anreize, CCU-Technologien in dieser Hinsicht weiter zu entwickeln.

II. Politische Gestaltungsoptionen

7. CCU sollte in klimapolitischen Maßnahmen wie dem Emissionshandel weiterhin nicht als direkte Emissionsminderung angerechnet werden. Eine indirekte Anrechnung ist über die bestehende Emissionsberichterstattung möglich.

Während CCS in bestehenden CO₂-Managementsystemen wie dem Emissionshandel als Emissionsreduktionsmaßnahme angerechnet werden kann [18], werden CCU-Prozesse nicht direkt verrechnet. Dies rührt daher, dass die genutzten Emissionen nicht dauerhaft gebunden werden. Nur in wenigen, im Umwandlungsprozess teils energieaufwändigen CCU-Anwendungen, wie z.B. Zement oder Dämmmaterialien, kann CCU die CO₂-Emissionen längerfristig verzögern. Wichtig ist jedoch vor allem, dass CCU-Technologien über indirekte Effekte wie Effizienzsteigerungen oder Rohstoffsubstitution zu Emissionsreduktionen führen und sich somit ähnlich wie andere Effizienzmaßnahmen auf die CO₂-Bilanz einer Anlage auswirken können [9]. Nicht die durch CCU genutzte Menge CO₂ sollte daher als Reduktion angerechnet werden, sondern die für die jeweilige Industrieanlage zu bestimmende, insgesamt vermiedene Emissionsmenge. Wenn in der Emissionsberichterstattung solche Einsparungen nachgewiesen werden können [19], ist es somit möglich, über bestehende Überwachungspläne und Veränderungsmitteilungen eine Anrechnung von CCU-Prozessen im Emissionshandel zu erreichen. In diesen Fällen können also in klimapolitischen Mechanismen wie dem Emissionshandel Kosteneinsparungen im Hinblick auf eventuell anfallende Emissionssteuern oder -zertifikate erreicht werden.

8. CO₂-basierte Produkte als „erneuerbar“ („renewable based product“) zu bezeichnen kann im politischen Kontext irreführend sein.

CO₂ kann sowohl Teil eines natürlichen als auch eines technischen Kreislaufs sein [6]. Es ist somit aus technischer Sicht richtig, dass CO₂ im Kontext von CCU eine erneuerbare bzw. regenerierbare Ressource darstellt. Im politischen Kontext dagegen, insbesondere im Hinblick auf Gesetze, Richtlinien oder Fördermaßnahmen, könnte es jedoch zu Missverständnissen führen, CO₂ als „erneuerbare Ressource“ zu bezeichnen, wie manche Akteure fordern [20]. So könnte zum Beispiel der Eindruck entstehen, dass Kohlenstoffdioxid in seiner Rolle für den Klimawandel insgesamt umgedeutet werden soll. Eine Nutzung von größtenteils aus fossilen Quellen generiertem CO₂ als Rohstoff in industriellen Prozessen entspricht jedoch nicht den existierenden politischen Definitionen von „erneuerbar“, wie sie z.B. für die Förderung erneuerbarer Energien festgelegt wurden [21], sondern erfordert eine separate Betrachtung und Einordnung im politischen Kontext.

9. Die Nutzung von CO₂ aus natürlichen Vorkommen ist aus ökologischer Sicht weniger sinnvoll als von CO₂ aus anderen Quellen.

Die Abscheidung von CO₂ ist mit einem gewissen Aufwand verbunden, der abhängig von der gewählten Quelle und der eingesetzten Technologie variiert und dementsprechend mit unterschiedlichen Nebenwirkungen einhergehen kann [22]. Die Herkunft des genutzten CO₂ beeinflusst somit auch die ökologische Bewertung. In vielen Ländern wird die derzeitige Nachfrage nach CO₂ auch aus natürlichen Vorkommen wie z.B. aus Gesteinsformationen gedeckt, in den USA derzeit ungefähr 45 Mio. Tonnen CO₂ [23]. Dies liegt auch daran, dass die Abscheidungskosten von CO₂-Emissionen aus natürlichen Quellen aufgrund des häufig hohen Reinheitsgrads dieser natürlichen Vorkommen mit 15–20 € pro Tonne sehr gering sein können [1]. Allerdings ist zu beachten, dass diese Quellen oft erst erschlossen werden, um das hochreine CO₂ für die Nutzung zu gewinnen. Ein solcher Ansatz widerspricht daher den ökologischen Zielen des Klimaschutzes und der Kreislaufwirtschaft, da er in der Natur gespeichertes CO₂ zusätzlich freisetzt, anstatt auf verfügbare industrielle Emissionen zurück zu greifen. Es wird somit empfohlen, die Nutzung von CO₂ aus natürlichen Vorkommen durch CO₂ aus industriellen Abgasen zu ersetzen, um insgesamt eine Netto-Emissionsminderung zu erreichen [1, 18].

10. Für die Bewertung von CCU-Technologien ist eine zeitnahe Einführung von Standards empfehlenswert.

Während das Technologiefeld CCU wächst, werden begleitend häufig techno-ökonomische und ökologische Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen hängen jedoch stark von den jeweils gewählten Annahmen, Systemgrenzen und Allokationsmethoden der Bewertung ab, wie die ISO-Standards für Umweltmanagement und Ökobilanz betonen [24, 25]. Einheitliche Standards, die sowohl die Methodik als auch die Analysekriterien festlegen, werden daher benötigt, um die Ergebnisse techno-ökonomischer und ökologischer Analysen vergleichbar zu machen. Dies würde auch die allgemeine Verständlichkeit der Ergebnisse und die Gültigkeit der Aussagen der potenziellen Auswirkungen von CCU-Technologien verbessern. Diese Aspekte werden derzeit in CCU-Fachkreisen vor allem im Rahmen der ökologischen Bewertung diskutiert [26].

III. Gesellschaftliche Akzeptanz

11. Eine übertrieben optimistische Kommunikation insbesondere der ökologischen Zukunftspotenziale von CCU birgt die Gefahr der Instrumentalisierung für „Greenwashing“.

Technische Innovationen und große industrielle Anlagen stehen in der Öffentlichkeit unter einem Rechtfertigungszwang, der sich häufig in einem Wahrnehmungs- und Bewertungsprozess von Individuen oder Gruppen manifestiert und in einer beobachtbaren Akzeptanz oder Ablehnung durch Teile der Bevölkerung münden kann [27]. Im öffentlichen Diskurs und in den Medien sind CCU-Anwendungen bislang überwiegend positiv aufgenommen worden [28–30]. Immer wieder sind jedoch die zu erwartenden Effekte insbesondere bezüglich des klimaschützenden Potenzials in entsprechenden Berichten deutlich optimistisch dargestellt [31, 32]. Um hier dem Verdacht eines „Greenwashings“ entgegen zu wirken, sollten bereits in der Forschungs- und Entwicklungsphase die Potenziale realistisch kommuniziert und keine unerfüllbaren Erwartungen geweckt werden.

12. CCU stellt kein valides Argument dar, um die Einführung und Etablierung von CCS-Technologien zu fördern.

CCS-Technologien werden in Deutschland weitestgehend gesellschaftlich abgelehnt [33]. Trotz der semantischen und technischen Nähe in den frühen Stadien der Prozesse (Capture/ Abscheidung) unterscheiden sich die Risiken und Potenziale der beiden Technologiekonzepte CCU und CCS sehr deutlich. Daher ist es von größter Wichtigkeit, beide Technologiefelder im gesellschaftlichen und politischen Diskurs klar voneinander zu trennen und abzugrenzen. Dies ist nicht nur für eine den Besonderheiten von CCU-Technologien gerecht werdende Kommunikation wichtig, sondern auch für die Einordnung des CCU-bezogenen politischen Diskurses, der nicht analog zu CCS erfolgen kann und sollte. Trotz gewisser technischer Gemeinsamkeiten empfiehlt es sich in der Wissenschaftskommunikation, die sehr unterschiedlichen Ziele und Beweggründe der beiden Konzepte entsprechend darzustellen.

Referenzen

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] U.S. DOE (n.d.) *Innovative concepts for beneficial reuse of carbon dioxide*, Washington: U.S. Department of Energy, URL: <<http://energy.gov/fe/innovative-concepts-beneficial-reuse-carbon-dioxide-0>>.
- [5] Climate-KIC (2014) *Climate-KIC to unveil multimillion Euro investment in four climate change innovation programmes at European Business Summit*, London: Climate-KIC, URL: <<http://www.climate-kic.org/press-releases/climate-kic-to-unveil-multimillion-euro-investment-in-four-climate-change-innovation-programmes-at-european-business-summit/>>.
- [6] Bringezu, S. (2014) 'Carbon Recycling for Renewable Materials and Energy Supply: Recent Trends, Long-Term Options, and Challenges for Research and Development', *J. Ind. Ecol.* 18(3), 327–340.
- [7] Ausfelder, F. & Bazzanella, A. (2008) *Diskussionspapier Verwertung und Speicherung von CO₂*, Frankfurt: DECHEMA, URL: <http://www.dechema.de/dechema_media/diskussionco2.pdf>.
- [8] 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.
- [9] von der Assen, N., Lorente Lafuente, A.M., Peters, M. & Bardow, A. (2015) 'Environmental Assessment of CO₂ Capture and Utilisation' in Armstrong, K., Styring, P. & Quadrelli, E. A., Hg., *Carbon Dioxide Utilisation*, Amsterdam: Elsevier, 45–56.
- [10] von der Assen, N. & Bardow, A. (2014) 'Life cycle assessment of polyols for polyurethane production using CO₂ as feedstock: insights from an industrial case study', *Green Chem.* 16, 3272–3280.
- [11] Müller, A., Weigelt, J., Götz, A., Schmidt, O., Alva, I.L., Matuschke, I., Ehling, U. & Beringer, T. (2015) 'The Role of Biomass in the Sustainable Development Goals: A Reality Check and Governance Implications', *IASS Working Paper*, Potsdam: IASS.
- [12] Naims, H. (o.D.) 'Economics of carbon capture and utilization – A supply and demand perspective', *Environmental Science and Pollution Research* (under review).
- [13] Varone, A. & Ferrari, M. (2015) 'Power to liquid and power to gas: An option for the German Energiewende', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, 207–218.
- [14] Sternberg, A. & Bardow, A. (2015) 'Power-to-What? – Environmental assessment of energy storage systems', *Energy & Environmental Science* 8(2), 389–400.
- [15] Klankermayer, J. & Leitner, W. (2015) 'Love at second sight for CO₂ and H₂ in organic synthesis', *Science* 350(6261), 629–630.

-
- [16] Möllersten, K., Yan, J. & R. Moreira, J. (2003) 'Potential market niches for biomass energy with CO₂ capture and storage – Opportunities for energy supply with negative CO₂ emissions', *Biomass Bioenerg.* 25(3), 273–285.
- [17] van Straelen, J., Geuzebroek, F., Goodchild, N., Protopapas, G. & Mahony, L. (2010) 'CO₂ capture for refineries, a practical approach', *Int. J. Greenh. Gas Con.* 4(2), 316–320.
- [18] 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, URL: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf>.
- [19] Deutsche Emissionshandelsstelle (2015) *Leitfaden zur Erstellung von Überwachungsplänen und Emissionsberichten für stationäre Anlagen in der 3. Handelsperiode (2013–2020)*, Berlin: Umweltbundesamt, URL: <http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/DE/Emissionsberichterstattung/stationaer/2013/Emissionsbericht_Leitfaden.pdf>.
- [20] SusChem (2015) *Circular Economy: SusChem Position Paper*, URL: <<http://suschem.blogspot.be/2015/10/suschem-position-paper-on-circular.html>>.
- [21] Europäische Union (2009) 'Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG', *Amtsblatt der Europäischen Union* 140, 16–62.
- [22] 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*, Potsdam: IASS.
- [23] Wilcox, J. (2012) *Carbon capture*, New York: Springer.
- [24] International Organization for Standardization (2006) ISO 14040: *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, 2. Aufl., Genf: ISO, URL: <http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=37456>.
- [25] International Organization for Standardization (2006) ISO 14044: *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*, Genf: ISO, URL: <http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=38498>.
- [26] 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.
- [27] Renn, O. (2005) 'Technikakzeptanz: Lehren und Rückschlüsse der Akzeptanzforschung für die Bewältigung des technischen Wandels', *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 14(3), 29–38.
- [28] Schramm, S. (2014) 'Unser umtriebige Element', *DIE ZEIT*, Printausgabe, 25.9.2014.
- [29] Schrader, C. (2012) 'Klimagas in der Matratze', *Süddeutsche Zeitung*, Printausgabe, 11.12.2012.
- [30] Deffke, U. (2012) 'Ressource CO₂ – Vom Klimakiller zum Rohstoff', *Spiegel Online*, 26.12.2012, URL: <<http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/kohlendioxid-klimakiller-als-rohstoff-a-873928.html>>.
- [31] Fröndhoff, B. (2015) 'Die Welt hat kein Rohstoffproblem' *Handelsblatt*, Printausgabe, 21.10.2015.
- [32] Lim, X. (2015) 'How to make the most of carbon dioxide', *Nature* 526, 29.10.2015, URL: <<http://www.nature.com/news/how-to-make-the-most-of-carbon-dioxide-1.18653>>.
- [33] Pietzner, K. (2015) 'Gesellschaftliche Akzeptanz: Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie' in Fishedick, M., Görner, K. & Thomeczek, M., Hg., *CO₂: Abtrennung, Speicherung, Nutzung*, Berlin: Springer, 671–697.



IASS Working Paper Dezember 2015

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

Kontakt Autor:

Henriette.Naims@iass-potsdam.de

Adresse:

Berliner Straße 130
14467 Potsdam
Deutschland
Telefon 0049 331-28822-389
www.iass-potsdam.de

E-Mail:

media@iass-potsdam.de

Vorstand:

Prof. Dr. Mark G. Lawrence

DOI: 10.2312/iass.2015.034

