

3.6 Ist CCU treibhausgasneutral? Eine Bewertung

JOSÉ L. LOZÁN & HARTMUT GRAßL

Insgesamt ist der Beitrag von CCU (CO₂-Abscheidung und Nutzung) zum Klimaschutz gering aber nötig. Sowohl die direkte als auch die industrielle CO₂-Nutzung können den Verbrauch fossiler Energien etwas reduzieren. Nur treibhausgasneutrale CCU-Technologien werden eine Bedeutung haben. Einige haben sogar eine positive CO₂-Bilanz und können zur langfristigen Speicherung vom abgeschiedenen CO₂ – wie die Verwendung von Baumaterialien aus karbonisierten CO₂ führen; andere wie synthetische eFuels haben eine kurze Speicherungszeit; sie verhindern aber den Verbrauch fossiler Energien und die Emission vom neuen CO₂. Synthetisches Methan oder Ammoniak können zur Speicherung und zum Transport von Energie dienen. Einige CCU-Produkte wie Methanol werden bereits in industriellem Maßstab hergestellt; andere sind noch in der experimentellen Phase. Die volle Durchsetzung von CCU-Technologien wird stark von der zukünftigen Preisentwicklung zur CO₂-Abscheidung und Produktion von grünem Wasserstoff abhängen.

Is CCU greenhouse gas neutral? An assessment: Overall, the contribution of CCU (CO₂ capture and use) to climate protection is small but necessary. Both direct and industrial CO₂-use can reduce fossil energy consumption somewhat. Only greenhouse gas-neutral CCU technologies will have any significance. Some even have a positive CO₂ balance and can lead to long-term storage of captured CO₂ - such as the use of building materials made from carbonised CO₂; others, such as synthetic eFuels, have a short storage time; but they prevent the consumption of fossil energies and the emission of new CO₂. Synthetic methane or ammonia can be used to store and transport energy. Some CCU products such as methanol are already being produced on an industrial scale; others are still in the experimental phase. The full penetration of CCU technologies will strongly depend on the future price development for CO₂ capture and production of green hydrogen.

¿Es la CCU neutra en gases de efecto invernadero? Una evaluación: En general, la contribución de la CCU (captura y uso de CO₂) a la protección del clima es pequeña pero necesaria. Tanto el uso directo como el industrial del CO₂ pueden reducir algo el consumo de energía fósil. Sólo las tecnologías CCU neutras en gases de efecto invernadero tendrán alguna importancia. Algunos incluso tienen un balance positivo de CO₂ y pueden conducir al almacenamiento a largo plazo del CO₂ capturado - como el uso de materiales de construcción hechos de CO₂ carbonizado; otros, como los eFuels sintéticos, tienen un tiempo de almacenamiento corto, pero evitan el consumo de energías fósiles y la emisión de nuevo CO₂. El metano sintético o el amoníaco pueden utilizarse para almacenar y transportar energía. Algunos productos como el metanol, ya se producen a escala industrial; otros están aún en fase experimental. La plena aceptación de las tecnologías de CCU dependerá en gran medida de la evolución futura de los precios de la captura de CO₂ y la producción de hidrógeno verde.

Was ist CCU »Carbon Capture and Utilization« ?

Als CCU wird die Abscheidung, der Transport und die anschließende Nutzung von Kohlenstoff, meistens in Form von CO₂ oder CO, bezeichnet (Abb. 3.6-1). Mit der CCU-Technik wird schon eine Reihe von Produkten zumindest im Labormaßstab hergestellt. Einige CCU-Maßnahmen haben sogar eine positive CO₂-Bilanz. D.h. es wird dabei mehr CO₂ gebunden als bei der Herstellung der Produkte emittiert wird. Das optimale Ziel einer CCU-Maßnahme ist, CO₂ möglichst dauerhaft zu binden. Ein Beispiel dafür sind Baumaterialien mit mineralisiertem CO₂ (s. Kap.3.3).

Was ist klimaneutral?

Klimaneutral bedeutet in der Alltagssprache, dass bei der Herstellung eines Produkts oder bei der Durchführung einer Dienstleistung die Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre nicht erhöht wird. Treffender wäre es dafür das Wort treibhausgasneutral zu verwenden. Bei der Klimaneutralität spielt nicht nur die Treibhausgasneutralität sondern auch andere klimarelevante Faktoren wie die Veränderung der Albedo eine Rolle. Mittlerweile gibt es auf dem Markt viele »klimaneutrale«

Produkte von Kaffeebechern bis zu synthetischem Methanol. Einige Unternehmen machen sogar Werbung dafür, insgesamt »klimaneutral« zu sein. So verkaufen Unternehmen Schmierstoffe, die – wie sie behaupten – aus einer CO₂-neutralen Produktion stammen. Die »Klimaneutralität« erreichen sie durch Nachhaltigkeit beim Einkaufen und die Verwendung biogener Stoffe. Die dabei noch nicht vermiedenen CO₂-Emissionen werden durch Kompensationsmaßnahmen wie die Produktion erneuerbarer Energie und/oder Unterstützung klimafreundlicher Projekte ausgeglichen.

Treibhausgasneutralität einer CCU-Maßnahme wird erreicht, wenn bei möglichst allen Produktionsschritten die Energie von erneuerbaren Energieträgern stammt. Auf jeden Fall muss in der Summe eine geringere Menge Treibhausgase gegenüber der Herstellung eines traditionellen Produkts emittiert werden.

Prüfung auf Treibhausgasneutralität

Eine strenge Kontrolle ist besonders wichtig für die Beurteilung, ob ein Produkt tatsächlich treibhausgasneutral ist. Die Menge an eingesparten CO₂ bei der Herstellung eines CCU-Produkts entspricht meist nicht einer 100% Minderung des CO₂. Die emittierte Menge der Treibhausgase (THG) während aller Arbeitsschritte

bis zum Endprodukt muss für die abschließende Bewertung einer CCU-Maßnahme abgezogen werden. Es ist wichtig, nicht nur für lokale Produkte, sondern auch bei importierten Produkten zu kontrollieren, ob die Bezeichnung treibhausgasneutral gerechtfertigt ist. Die Nutzung von »blauem« Wasserstoff in der Industrie würde beispielsweise zu einer erheblich höheren Emission von CO₂ als bei Nutzung von Kohle oder Erdgas führen; im Gegensatz zu grünem Wasserstoff, der mit Energien aus erneuerbaren Energieträgern durch Wasserelektrolyse produziert wird, gewinnt man den blauen Wasserstoff aus Erdgas. Nach IEA (2019) kostet 1 kg grüner Wasserstoff zurzeit 2,5-6,0 US\$. Der Preis für blauen ist mit 1,5-2,5 US\$ deutlich niedriger, weshalb er weltweit noch viel produziert wird. Bei seiner Herstellung wird jedoch eine große Menge CO₂ (10 kg CO₂/kg H₂) freigesetzt.

Zusammenfassend sind folgende Kriterien in Anlehnung an UBA (2021b) zur Bewertung der Bedeutung und des möglichen Beitrags einer CCU-Methode zum Klimaschutz zu berücksichtigen:

- Menge entstandenes neues CO₂.
- Einsparung von Treibhausgasemissionen gegenüber traditionellen Verfahren,
- Ursprung des Kohlenstoffs: aus der Luft, aus energieeffizientem Recycling oder aus biogenen Reststoffen
- Nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt werden vermieden.

CO₂: Quellen und verfügbare Menge

Für die CO₂-Nutzung gibt es grundsätzlich folgende Quellen:

- CO₂ in der Luft
- CO₂ aus der Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl und Erdgas)
- CO₂ aus der Zement-, Kalk- und Glasproduktion (z.B. $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)
- CO₂ aus der Erdkruste (z.B. aus Gebieten mit Vulkanismus)
- chemisches Recycling (Kunststoff)
- CO₂ aus Bioabfällen und Müllverbrennungsanlagen

In der Zukunft wird die Nutzung fossiler Energieträger stark abnehmen. Die Verminderung des Brenn- und Kraftstoffbedarfs wird z.B. aufgrund der Elektromobilität im Jahr 2050 weit mehr als die Hälfte betragen. Und die industrielle CO₂-Nutzung wird zunehmen. Es ist daher zu erwarten, dass man zukünftig sehr sparsam mit dem freigesetzten CO₂ umgehen muss. Der Kohlenstoff soll nach einer Nutzung nicht in die Atmosphäre verloren gehen, sondern – soweit möglich – im System bleiben und so oft wie möglich weiter genutzt werden.

Laut der Internationalen Energieagentur (IEA 2019) liegt der jährliche Bedarf an CO₂ als Rohstoff weltweit bei nur etwa 230 Mio. t, also weit unter 1% der gegenwärtigen globalen Emissionen. Die Düngemittelproduk-

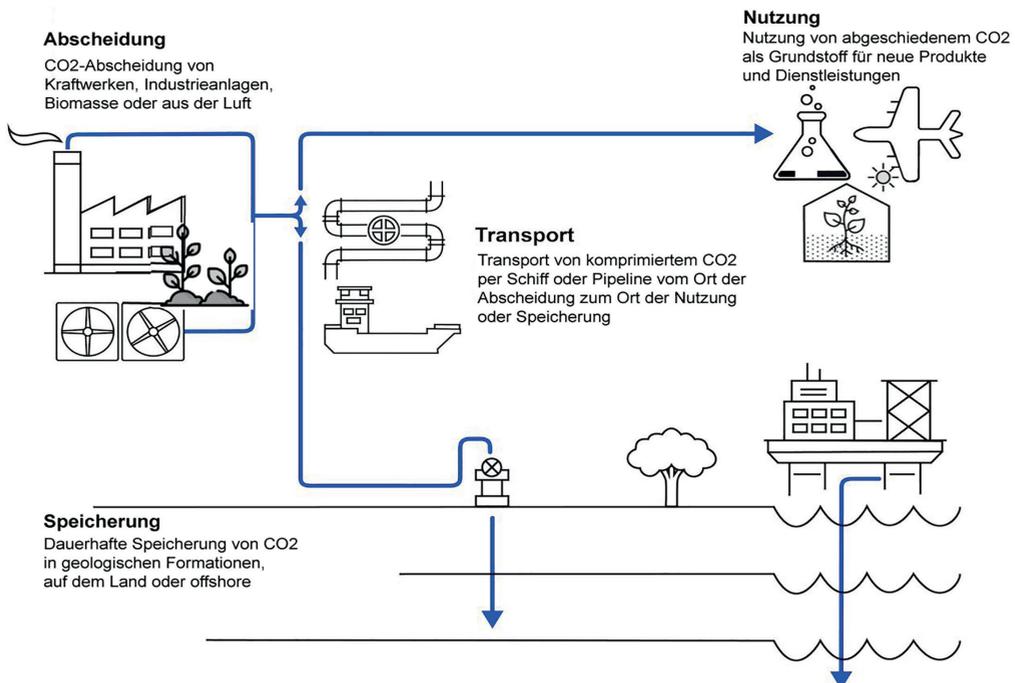


Abb. 3.6-1: Abscheidung, Transport, Nutzung und Speicherung von CO₂ (aus CHAO et al. 2022).
Lizenz: CC BY <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

tion (chemische Industrie) wird als der größte Abnehmer mit zurzeit ca. 130 Mio. t pro Jahr angesehen. In Deutschland werden die chemische und die synthetische Brenn- und Kraftstoffindustrie den größten Bedarf an CO₂ haben. Dieser wird je nach Szenario auf 30 Mio. bis 148 Mio. t CO₂ pro Jahr beziffert (UBA 2021b).

Die verfügbare CO₂-Menge kann für die Durchführung bestimmter CCU-Maßnahmen limitierend wirken. Denn der Energieaufwand bei der Abscheidung des CO₂ aus der Luft (DAC) führt zu relativ hohen Kosten. In Ländern, die preisgünstige CO₂-freie Energie haben (z.B. Island), ist die Abscheidung des CO₂ aus der Luft attraktiver. Nach der BÖLL-STIFTUNG (2020) benötigt die Firma Climeworks für die Gewinnung von 1 t CO₂ zwischen 8,6 und 11,2 GJ thermische und elektrische Energie. Bei einer CO₂-Abscheidung aus den viel höher konzentrierten Abgasen von Punktquellen wie Kraftwerken oder energieintensiven Industrien reduzieren sich die Kosten stark, auch wenn die Kosten zur Reinigung der Abgase hinzukommen. Das aus der Luft abgeschiedene CO₂ hat dagegen einen hohen Reinheitsgrad und kann direkt genutzt werden. Bei der Produktion von Baumaterialien oder Zementzusätzen spielt der Reinheitsgrad des CO₂ keine wichtige Rolle. Die Kosten für die Abscheidung von CO₂ aus der Luft liegen nach IEA (2019) bei 94 - 132 US\$ pro t CO₂ und aus den Punktquellen der Eisen- und Stahlproduktion bei 60 - 100 US\$. Die CO₂-Abscheidung aus Erdgas ist noch günstiger (15 - 25 US\$). Diese Preise werden wahrscheinlich mit der technischen Entwicklung in der Zukunft sinken.

CCU: Energiebedarf

»Die derzeitigen regionalen Stromüberschüsse reichen nicht für den wirtschaftlichen Betrieb von CCU-Verfahren aus und werden wohl auch nicht im nächsten Jahrzehnt in Deutschland ausreichen« (UBA 2021b). Zurzeit wird bei der Entwicklung von CCU-Verfahren im Labor meist Strom aus dem Stromnetz bezogen. Bei industrieller Nutzung der Verfahren würde die erforderliche Energie stark ansteigen und zum Ausbau des Stromnetzes mit noch höheren CO₂-Emissionen zwingen. Der Standort für den Betrieb eines CCU-Verfahrens wird daher von Bedeutung sein.

Sowohl bei der Abscheidung von CO₂ aus der Luft und aus Punktquellen als auch bei der Produktherstellung wird viel Energie gebraucht. Am wenigsten gilt das für die direkte Nutzung als gasförmiges CO₂. Die Anlagen zur Injektion von CO₂ in Erdöl- oder Gaslagerstätten zur Unterstützung der Förderung benötigen nur wenig zusätzliche Energie im Vergleich zur industriellen CO₂-Nutzung. Ebenfalls ist die Anreicherung der Luft mit CO₂ in Gewächshäusern zur Steigerung

des Pflanzenwachstums wenig energieaufwendig. Aber bei der Erzeugung z.B. von synthetischen Kraftstoffen oder Kunststoffen ist dagegen viel Energie erforderlich; hinzu kommt die Energie zur Produktion des benötigten grünen Wasserstoffs.

Gehen wir von der Nutzung von 100 Mio. t CO₂ aus, liegt der grob berechnete Energiebedarf, um daraus höherwertige Produkte (z.B. Methan oder Methanol) herzustellen, bei etwa 1.000 Terawattstunden (TWh). Das ist allein für die chemischen Reaktionen, ohne die notwendige Energie zur Abscheidung und für den Transport des CO₂ zu berücksichtigen (UBA 2021b). Bei einer aktuellen Stromproduktion aus erneuerbaren Energien von knapp 250 TWh im Jahr 2020 bzw. 238 TWh im Jahr 2021 in Deutschland wird klar, dass CCU an zu hohem Energiebedarf scheitern wird.

Ein weiteres Beispiel für den hohen Energiebedarf ist der Umbau des Stahlsektors in eine CO₂-freie Industrie. In Deutschland bewegt sich die Stahlproduktion seit Ende der 1990er Jahre auf einem annähernd konstanten Niveau von 45 Mio. t mit einer Emission von 56 Mio. t CO₂ pro Jahr. Sie ist damit für 30% der THG-Emissionen des industriellen Sektors verantwortlich. Nach dem Deutschen Klimaschutzgesetz von 2021 muss die Produktion der Stahlindustrie bis 2045 ohne CO₂-Emissionen sein. Die aussichtsreiche Alternative ist das sog. »Direktreduktionsverfahren« mit grünem Wasserstoff statt Kohle, wobei Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser mit erneuerbarer Energie erzeugt wird. Auch bei weiteren Energiesparmaßnahmen in der Stahlindustrie wäre der Bedarf an grünem Wasserstoff sehr hoch (siehe Kap. 4.1). Diese Information ist wichtig, um zu zeigen, dass CCU und Industrie in der Zukunft um die verfügbare erneuerbare Energie und den produzierten grünen Wasserstoff konkurrieren werden.

Insgesamt wird der zukünftige Bedarf an elektrischem Strom trotz weiterer Energieeffizienzmaßnahmen wohl deutlich über dem heutigen Niveau liegen. Allein die Ausweitung der Elektromobilität wird den Strombedarf in die Höhe treiben.

CCU: Speicherungszeit & Klimaschutz

Im Gegensatz zu CCS (*carbon capture and storage*) wird CO₂ bei der CCU meist nur während der Lebensdauer der erzeugten Produkte (z.B. Treibstoffe, Chemikalien, Baumaterialien) gespeichert. Deshalb ist die zeitlich begrenzte Speicherung von Kohlenstoff bei den meisten CCU-Produkten oft ein weiteres Argument gegen die CCU-Verfahren.

DE KLEIJNE et al. (2022) kommen zu dem Schluss, dass nur wenige CCU-Verfahren das Potenzial haben, einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Zu diesen wenigen CCU-Verfahren gehören vor allem die Pro-

dukte aus karbonisiertem Kohlenstoffdioxid, die zur Herstellung von Baumaterialien (Zement, Beton, Ziegelsteinen, Isolierungsmaterialien, Platten etc.) eingesetzt werden. Die damit konstruierten Gebäude bleiben sehr lange bestehen, wodurch das Kohlenstoffdioxid 50-100 Jahre oder länger gespeichert bleibt.

Die CO₂-Karbonisierung kann einen kleinen Beitrag zur Lösung des Klima-Problems leisten. Einige Verfahren haben bereits offiziell die Anerkennung vom Europäischen Gerichtshof als CO₂-Speicher im Rahmen des EU-ETS (Europäischen Emissionshandelssystems) (SCHAEFER KALK 2017).

In einigen Industriebranchen wie in der Zement-, Kalk- und Glasindustrie wird sehr viel CO₂ emittiert, das nach dem aktuellen Wissensstand – auch in der Zukunft – nicht komplett vermeidbar sein wird. Es besteht die Hoffnung, dass CCU-Technologien auch hierfür eine nachhaltige Lösung liefern können.

Nach DE KLEIJNE et al. 2022 & NEUBERT (2022) liefert auch die erhöhte Erdölgewinnung bei CO₂-Injektion, Vorteile beim Klimaschutz, da das CO₂ lange Zeit unterirdisch gespeichert bleibt. Allerdings nur dann, wenn nicht mehr als zwei Barrel Rohöl (318 Liter) pro eingespeiste und unterirdisch verbleibende Tonne CO₂ gewonnen werden. Die CO₂-Injektion wird daher auch als eine Mischform von CCU und CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage*) bezeichnet (z.B. IEA 2019) (siehe Kap.3.2).

Bei synthetischen Kraftstoffen (z.B. PtL) (s.Kap. 3.4), die man u.a. für große Flugzeuge und Schiffe haben möchte, ist die Situation ganz anders. Die Speicherungszeit ist sehr kurz, da das CO₂ bei der Verbrennung wieder in die Atmosphäre emittiert wird. Das CO₂ aus der Luft kann mithilfe von künstlichen Bäumen – jedoch mit großem Energieaufwand – wieder abgetrennt und erneut zur Herstellung von Kraftstoffen verwendet werden. Damit bleibt das CO₂ sozusagen in einem Kreislauf. Der Verbrauch fossiler Kraftstoffe und die Emission von neuem CO₂ werden aber vermieden. Allerdings ändert sich an der Klimawirkung des ursprünglichen Kohlenstoffs nichts, da der Kohlenstoff letztlich immer als Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre emittiert wird und dort seine Treibhausgaswirkung entfaltet. An dieser Stelle muss betont werden, dass die Voraussetzung für einen treibhausgasneutralen Kraftstoff die Verwendung von CO₂ aus der Luft oder Biomasse und Energie aus erneuerbaren Energieträgern sein muss. Verbraucht man fossile Energien, dann würde neues CO₂ entstehen.

Insgesamt ist die Produktion von synthetischen Kraftstoffen von der CO₂-Abscheidung bis zum Ende der Verarbeitung sehr energieintensiv. Bei der Pro-

duktion der meisten synthetischen Kraftstoffe steht im Mittelpunkt die Nutzung von grünem Wasserstoff, der durch die Elektrolyse von Wasser mit elektrischer Energie aus erneuerbaren Energieträgern erzeugt wird. Da diese Energieform knapp ist und sein wird, ist die Frage berechtigt, ob die direkte Nutzung des grünen Wasserstoffs nicht effizienter wäre. Tab. 3.4-1 zeigt die unschlagbar hohe Energiedichte des Wasserstoffs gegenüber anderen Kraftstoffen. Berücksichtigt man den notwendigen Strom für die H₂-Herstellung, dann ist der Stromverbrauch eines mit CCU-Benzin fahrenden Autos vielfach höher als der eines Elektroautos (WWF 2018). Andererseits ist die Einführung eines elektrischen Antriebs nicht überall möglich. Besonders die großen Passagierjets sind – nach dem heutigen Stand der Technik – wegen des hohen Gewichts der Batterien weiterhin auf flüssige Treibstoffe angewiesen (s.Kap.3.4).

Bei der Herstellung von Kunststoffen wurden kleine Fortschritte erzielt. Es wird von einigen wenigen Produkten wie Polyol (Hauptkomponente des Polyurethan-Schaumstoffs) bereits semi-industriell produziert. Dabei werden jedoch nur bis zu 20% des Erdöl-Verbrauchs durch CO₂ ersetzt. D.h. die Emission von CO₂ ist immer noch erheblich. Ein kleiner Beitrag zum Klimaschutz könnte geleistet werden, nur wenn das verwendete CO₂ aus der Luft, aus Biomasse oder aus Recyclingprozessen (d.h. aus alten Kunststoffen) und die nötige Energie aus erneuerbaren Quellen stammen.

Ein weiteres CCU-Produkt ist das synthetische Methan, das aus grünem Wasserstoff und CO₂ hergestellt wird (siehe Kap. 3.3). Im Gegensatz zum elektrischen Strom aus erneuerbaren Energieträgern, der bei Produktionsüberschuss gespeichert werden muss, kann Methan ins Netz eingespeist und direkt als Ersatz für Erdgas genutzt werden. Das ist wirtschaftlich ein Vorteil.

Verwendet man synthetisches Methan zum Heizen dann gilt auch hier das oben Gesagte für synthetische Kraftstoffe. Der Strombedarf ist im Vergleich zu anderen Optionen (z.B. Wärmepumpe) viel höher.

Die CO₂-Nutzung zur Düngung in Gewächshäusern ist eine alte und häufige CO₂-Nutzung. Oft stammt das dort verwendete CO₂ jedoch aus fossilen Quellen. Die Firma Climeworks in der Schweiz filtert CO₂ aus der Luft – wie bereits erwähnt – mit viel Energieaufwand und beliefert ein Gewächshaus in der Nähe, um das Pflanzenwachstum zu steigern. Zur permanenten CO₂-Speicherung leistet diese CO₂-Nutzung keinen Beitrag, da das meiste CO₂ wieder freigesetzt wird, sobald die geernteten Pflanzen verdaut oder kompostiert werden. Allerdings verhindert die Nutzung von CO₂ aus der Luft die Verwendung fossiler Energien zur CO₂-Anreicherung in den Gewächshäusern (s. Kap. 3.2).

Schätzungen zur Nutzungskapazität von CO₂ in CCU-Maßnahmen reichen von 1-7 Gt CO₂ pro Jahr in 2030, wobei der höhere Wert als extrem optimistisch gilt. Diese Werte hängen u.a. davon ab, wie schnell sich die neuen CO₂-Umwandlungstechnologien entwickeln und durchsetzen werden. IEA (2019) geht bei der direkten Speicherung (CCS) von einem Potenzial von mindestens 10 Gt CO₂ pro Jahr aus und sieht daher in CCU allenfalls eine Ergänzung zu CCS, indem es etwa neue und ökonomisch günstige Methoden der CO₂-Abscheidung oder eine verbesserte CO₂-Transportinfrastruktur entwickelt bzw. schon entwickelt hat. Zur Erreichung der Pariser Klimaziele sei jedoch von der CO₂-Nutzung nur ein geringer Anteil zu erwarten.

Schlusswort

Das Interesse an CCU-Technologien ist in den letzten Jahren gestiegen. Dies spiegelt sich in der Anzahl an geförderten Projekten und in der Höhe der Finanzierung wider. Zur Einführung von CCU-Methoden gibt es jedoch limitierende Faktoren. Diese hängen hauptsächlich mit dem hohen Energiebedarf fast aller dieser Methoden zusammen. Das ist offensichtlich aufgrund des existierenden Mangels an grünem Strom, der sowohl für die CO₂-Abscheidung als auch für die Erzeugung von grünem Wasserstoff notwendig ist.

Die CO₂-Bilanz der einzelnen CCU-Verfahren muss durch unabhängige Studien (Lebenszyklusanalyse) überprüft werden. Statt CCU-Technologien mit wenig Klimaschutzpotenzial zu fördern, sind weiterhin Maßnahmen zur Vermeidung von CO₂-Emissionen zu unterstützen. Weitreichende CO₂-Vermeidungsmaßnahmen sind der beste Klimaschutz.

Die Politik hat den zukünftigen großen Bedarf an grünem Wasserstoff erkannt und verstärkt die Zusammenarbeit z.B. mit Kanada und Norwegen sowie Katar bezüglich der Lieferung von grünem Wasserstoff. Der geplante Import von grünem Wasserstoff aus Afrika (Namibia) oder anderen Entwicklungsländern ist kontraproduktiv. Man plädiert dafür, dass die armen Länder nicht die gleichen Fehler machen wie die Industrieländer; sie sollen bei ihrer Entwicklung gleich saubere und nicht fossile Energien verwenden. Man erreicht das Gegenteil, wenn die Produktion von grünem Wasserstoff komplett für den Export geplant wird. Ähnliches

gilt für den Import von Soja aus Brasilien. Für den dortigen Sojaanbau wird massiv der Regenwald abgeholzt, was man nicht will und international mit Fördermitteln bekämpft.

Literatur

- CAO L, S. LEI, Y. GUAN, Y. WANG et al. (2022): CCUS Industry Under Target of Carbon-Peak and Carbon-Neutrality: Progress and Challenges. *Front. Energy Res.* 10:860665. doi: 10.3389/fenrg.2022.860665.
- CLIMEWORK (2015): Climeworks builds first commercial-scale direct air capture plant. <https://climeworks.com/news/climeworks-ag-builds-first-commercial-scale-co2-capture>. *Stand* 21.10.2015
- DE KLEIJNE, K., S. V. HANSEN, L. VAN DINTEREN et al. (2022): Limits to Paris compatibility of CO₂ capture and utilization. *One Earth* 5, Elsevier Inc. 168-185.
- IEA (2019): World Energy Outlook 2019 | Global Energy Trends. 810 pages. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909c1b-aabc-4797-9926-35307b418cdb/WEO2019-free.pdf> (zit in IASS 2021).
- MARKEWITZ, P., L. ZHAO & M. ROBINIUS (2017): Technologiebericht 2.3 CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- NEUBERT, H.-J. (2022): CO₂ einfangen und nutzen: Nur 4 von 74 Konzepten brauchbar. <https://www.heise.de/hintergrund/CO-einfangen-und-nutzen-Nur-4-von-74-Konzepten-brauchbar-6490932.html>.
- SCHAEFER KALK GmbH (2017): Suits against governments. GHG emissions reduction and trading. EU ETS. <http://climatecasechart.com/non-us-case/schaefer-kalk-gmbh-co-kg-v-germany/?cn-reloaded=1>.
- UBA (2021a): Carbon Capture and Utilization (CCU): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/carbon-capture-utilization-ccu#Hintergrund> (Stand 27.9.2021)
- UBA (2021b): Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2021_hgp_ccu_final_bf_out_0.pdf (Abgerufen Nov.2022)
- UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE – Studie. *Climate Change* 36/2019. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_aufgabe2_juni-2021.pdf.
- WWF (2018): Carbon Capture and Utilization (CCU) – Wie klimaneutral ist CO₂ als Rohstoff wirklich? 24 S.

Kontakt:

Dr. José L. Lozán
Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg
jl-lozan@t-online.de
Prof. Dr. Hartmut Graßl
Max Planck Institut für Meteorologie (Hamburg)
hartmut.grassl@mpimet.mpg.de

LOZÁN, J. L. & H. GRAßL (2023): Ist CCU treibhausgasneutral? Eine Bewertung. In: LOZÁN J. L., H. GRAßL, S.-W. BRECKLE, D. KASANG & M. QUANTE (Hrsg.). *Warnsignal Klima*. S. 201-205. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.climate.engineering.31