

Carbon Management

Schlüsseltechnologie im Kampf gegen den Klimawandel

Hans-Joachim Kümpel
Franz Josef Radermacher
Reinhard Hüttl



Impuls-Studie Nr. 2

November 2023

Dies ist die zweite Studie des im Juli 2023 gegründeten Clean Energy Forums (CEF). Die Studie gibt jeweils die persönliche Meinung der Autoren wieder. Sie soll die Debatte um inhaltliche der Energie- und Klimapolitik befruchten.

Das **Clean Energy Forum (CEF)** ist eine unabhängige Denkfabrik. Sie will, dass die deutschen, europäischen und weltweiten Klimaziele erreicht werden – was nur durch die Entfesselung aller wissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Potenziale zu schaffen ist.

Das Clean Energy Forum bietet eine Plattform zum offenen Austausch über wissenschaftliche und technische Erkenntnisse und verbindet sie mit den konkreten Erfahrungen der Menschen in Wirtschaft und Gesellschaft.

Inhaltsverzeichnis

EINLEITUNG: CCUS – SCHLÜSSEL FÜR DEN KAMPF GEGEN DIE ERDERWÄRMUNG.....	4
GRUNDBEGRIFFE ZU CARBON MANAGEMENT.....	14
I. ZUR ROLLE VON CARBON CAPTURE.....	16
1. ZUR PROBLEMLAGE	16
2. ENERGIEWOHLSTAND ALS SCHLÜSSELTHEMA	17
3. ZUR ROLLE DER ERNEUERBAREN	17
4. „ALL ELECTRIC“ – EINE FEHLORIENTIERTE PHILOSOPHIE TREIBT DEUTSCHLAND IN WOHLSTANDSVERLUSTE.....	18
5. CARBON CAPTURE: FOSSILE ENERGIE VERSUS FOSSILE EMISSIONEN	20
6. WAS LEISTET CARBON CAPTURE?.....	21
7. DROHENDE INTERNATIONALE AUSEINANDERSETZUNGEN UM DIE EUROPÄISCHE KLIMAPOLITIK	24
8. DIE DEUTSCHE KLIMAPOLITIK HAT EIN IDEOLOGIEPROBLEM.....	25
9. WELCHE MAXIME FAVORISIERT DIE DEUTSCHE POLITIK FÜR ENTWICKLUNGS- UND SCHWELLENLÄNDER?	26
10. ZUSAMMENFASSUNG.....	27
II. CCS-TECHNOLOGIE IN DEUTSCHLAND UND EUROPA	28
1. ZUR GESCHICHTE	28
2. KRITIK AN CCS	34
3. WIDERLEGUNG DER KRITIK.....	39
4. STATUS HEUTE – IN DEUTSCHLAND UND EUROPA	49
III. WASSERSTOFF ALS VORAUSSETZUNG FÜR CCU – DIE KLIMANEUTRALE ENERGETISCHE NUTZUNG DES ROHSTOFFS CO₂	58
1. HANDLUNGS-KORRIDOR.....	58
2. MOTIVATION: KLIMAWANDEL	59
3. KONSEQUENZ: TRANSFORMATION DER ENERGIEVERSORGUNG – AKTUELLE HERAUSFORDERUNGEN.....	60
4. VON ZENTRALER BEDEUTUNG: DER CO ₂ -FUßABDRUCK	62
5. LÖSUNGSOPTIONEN: KLIMANEUTRALER WASSERSTOFF ALS ENERGIETRÄGER UND CO ₂ ALS ROHSTOFF.....	63
6. KLIMANEUTRALER WASSERSTOFF – OPTIONEN DER BEREITSTELLUNG	64
7. WASSERSTOFF UND CCU: SYNTHETISCHE KRAFT- UND BRENNSTOFFE	67
8. FAZIT	71
DIE AUTOREN.....	72
DAS BERATENDE KURATORIUM DES CLEAN ENERGY FORUM	74

Einleitung: CCUS – Schlüssel für den Kampf gegen die Erderwärmung

Dr. Friedbert Pflüger

Anfang Januar 2023 besuchte Bundeswirtschaftsminister Robert Habeck Norwegen, um sich vor Ort ein Bild von der Technologie *Carbon Capture and Storage* (CCS) zu machen. Das war ein deutliches Signal an die deutsche Öffentlichkeit, vor allem auch an die eigene Partei, dass die Bundesregierung beabsichtigt, das Thema CO₂-Abscheidung und -Lagerung aus dem Dornröschenschlaf zu wecken, in den diese innovative Technologie mehr als zehn Jahre zuvor versetzt worden war. Bereits wenige Tage zuvor hatte das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) einen Evaluierungsbericht zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz von 2012 vorgelegt, welcher die CCS-Technologie erstmals positiv bewertete. **Die Bundesregierung arbeitet an einer *Carbon Strategie* und strebt noch 2023 ein Gesetz an, das Abscheidung, Transport und Lagerung von CO₂ ermöglicht. Damit ist ein neues Kapitel in der politischen Auseinandersetzung um den Umgang mit CO₂ eröffnet.** Angesichts der Proteste, die CCS in der Vergangenheit in Umweltverbänden und bei den Grünen hervorgerufen haben, kann man diese vorsichtige Öffnung der Debatte durch Robert Habeck durchaus als einen Schritt in Richtung einer Pragmatisierung der Klimapolitik der Bundesregierung bezeichnen. Ohne ihn würde sich Deutschland von Klimapolitiken auf der Welt und zunehmend auch in Europa isolieren.

Die EU-Kommission hat nämlich in ihrem Entwurf für den *Net Zero Industry Act* vom Frühjahr 2023 wichtige Schritte in Richtung CCS unternommen. CCS gilt hier als *Net Zero Technology*, die staatlich gefördert werden soll. Die Kommission hat weiter ein erstes verbindliches Ziel definiert, nämlich bis 2030 immerhin 50 Millionen Tonnen CO₂ aus industriellen Prozessen abzuscheiden und einzulagern. Diese Bewegung bei CCS und immer mehr auch bei der Nutzung von Kohlendioxid – das sogenannte *Carbon Capture Utilization* (CCU) – sind Anlass für die vorliegende Studie des Clean Energy Forums (CEF). Diese ersten Schritte auf nationaler und europäischer Ebene – und die seit geraumer Zeit bereits auf anderen Kontinenten erfolgten Aktivitäten – sollen hier dargestellt und analysiert werden. Zurecht hat der Weltklimarat der Vereinten Nationen, das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), in seinem 6. Sachstandsbericht (2021-23) einmal mehr die zentrale Rolle von CCS und CCU hervorgehoben.

Dass CCS und CCU zentrale Schlüsselrollen im globalen Kampf gegen die Erderwärmung zukommen, hatten unsere Forschungsarbeiten am *King's College London* bereits vor über zehn Jahren ergeben. Im Rahmen meiner Gastprofessur und als Direktor des *European Centre for Climate, Energy and Resource Security* (EUCERS) am *King's College London* hatten wir in enger Zusammenarbeit mit dem *Atlantic Council* (USA), *TERI* (Indien) und dem *Global CCS Institute* (Australien) im Dezember 2012 in Neu Delhi eine internationale Konferenz zu diesem Thema durchgeführt und die gemeinsame *Delhi Declaration on CCS* verabschiedet. Ein Jahr zuvor hatten wir eine Studie *The Future of Clean Coal* (EUCERS Strategy Paper 2) veröffentlicht und diese gemeinsam mit EU-Energiekommissar Günther Oettinger in Berlin im Dezember 2011 vorgestellt. 2015 hatten wir eine weitere Studie zum Thema erarbeitet (*Frank Umbach, The Future Role of Coal: International Market Realities vs. Climate Protection?*, EUCERS-Strategy Papers 6, London 2015). Im

Mai 2016 schließlich veranstaltete EUCERS mit dem *Atlantic Council* (USA), der *National University of Singapore* und der *Konrad Adenauer Stiftung* in Seoul eine Konferenz zum Thema *The Future of Coal and Chances for Clean Coal*. Alle diese Konferenzen, Workshops und Studien waren freilich nur auf das Thema CO₂-Abscheidung bei der Kohlenutzung konzentriert, also auf den Bereich, wo ein Stopp der Emissionen zunächst am dringlichsten erschien. Die heute im Fokus der Bundesregierung und der EU-Kommission stehende Nutzung der CCS-Technologie zur Abscheidung bei industriellen Prozessen, die sich nicht oder nur schwer elektrifizieren lassen, spielte damals kaum eine Rolle.

In Deutschland hatte der Vorstandsvorsitzende von RWE, Jürgen Großmann, bereits 2008 Pläne verkündet, in Hürth bei Köln ein modernes Kohlekraftwerk mit einer Kohlenstoff-Abscheidetechnologie zu bauen. Großmann hatte dafür die eindeutige Unterstützung von Bundeskanzlerin Angela Merkel. Großmann schlug – in Anwesenheit der Kanzlerin – eine 500 km lange unterirdische Pipeline vor, die das abgeschiedene CO₂ nach Schleswig-Holstein transportieren sollte, wo es in unterirdischen Lagerstätten dauerhaft gespeichert werden sollte. Dort existieren geologische Formationen, die eine besonders sichere Speicherung von Kohlendioxid ermöglichen. Im gleichen Jahr nahm das schwedische Unternehmen Vattenfall ein 30 Megawatt CCS-Pilotprojekt im Industriepark Schwarze Pumpe im brandenburgischen Spremberg in Betrieb, die weltweite erste CO₂-Abscheideanlage. Vattenfall-Vorstandschef Tuomo Hatakka verkündete damals: „Kohle hat auch weiterhin Zukunft, aber die Emission von CO₂ nicht.“ – Vattenfall plante, die Erkenntnisse aus Schwarze Pumpe bis 2015 im Lausitzer 500 Megawatt-Kohlekraftwerk Jämschwalde in einer Demonstrationsanlage anzuwenden, um CCS bis 2020 serienreif zu machen.

Aber die Pioniere von CCS in Deutschland wurden von Klimaaktivisten in Deutschland entschieden bekämpft. Es wurden Ängste geschürt und vor allem das Argument verbreitet, bei CCS gehe es nur um die Verlängerung der Kohleförderung, was den Ausbau der Erneuerbaren Energien bremsen würde. Das gewaltige Potenzial von CCS bei der Abscheidung von Kohlenstoff in der Schwerindustrie (z.B. Zement) wurde kaum beleuchtet. Vor dem Hintergrund von Protesten von Klimaaktivisten und von Ängsten in der Bevölkerung wurden die Projekte schließlich ad acta gelegt. Der Bundestag verabschiedete ein Gesetz, das den Unternehmen eine Weiterführung ihrer Pläne defacto unmöglich machte. Anfang Dezember verkündete Vattenfall vor dem Hintergrund der politischen Gesamtlage und der „Hängepartie um das deutsche CCS-Gesetz“ das Ende des 1,5 Milliarden CCS-Projektes Jämschwalde. Der schwedische Staatskonzern machte aus seiner Enttäuschung keinen Hehl und bezeichnete das erzwungene Aus als „herben Rückschlag für Innovation, Klimaschutz und die deutsche Wirtschaft.“

Es drängt sich die Frage auf, wieviel weiter wir bei der globalen Bekämpfung des Klimawandels wären, wenn wir in Deutschland damals den von RWE und Vattenfall vorgezeichneten CCS-Weg gegangen wären. Wie viele Tonnen CO₂-Emissionen hätten seitdem weltweit eingespart werden können! Wie viele Kohlekraftwerke hätten inzwischen mit in Deutschland erprobter Technologie sauber gemacht werden können! Anstatt den Kampf gegen die Kohle an sich zu führen, wäre man besser gefahren, den Kampf auf die CO₂-Emission bei der energetischen Nutzung der Kohle zu konzentrieren. Hier hätte zudem das Potenzial gelegen, mit Klimaschutztechnik auch eine signifikante Stärkung der deutschen Wirtschaft zu erreichen. So aber hat Deutschland einmal mehr einen technologischen Vorsprung, eine eigene Pionier-Rolle, aufgegeben.

Außerdem wurde durch das Aus für CCS auch die Forschung zur Sicherheit der Technologie bei Abtrennung, Transport und Lagerung gestoppt. Jetzt, wo in Europa und in der Welt CCS wieder in den Mittelpunkt rückt, hätten uns zehn Jahre Forschung und Entwicklung an Sicherheitskonzepten gutgetan. So sind wir hier heute auf andere Länder, etwa auf Norwegen, angewiesen, die bei Standortauswahl und -erkundung, bei den daraus folgenden geotechnischen Maßnahmen, bei Monitoring, Reporting und Verification (MRV), der Methode der Messwerterhebung und der Prüfparameter, der Festlegung von Toleranzen, Schwellwerten und Ausschlusskriterien sowie bei der Störfallvorsorge durch ihre praktische Erfahrung viel weiter sind. Gerade weil CCS teuer und komplex ist und die Bevölkerung zurecht hohe Sicherheitsstandards erwartet, ist die Beendigung des Pilotprojektes von Jämschalde, aber generell der Stopp des Ausbau jeglicher Infrastruktur, das Ende der Suche nach geeigneten Lagerstätten und die fehlende Forschung und praktische Erprobung besonders schmerzhaft. All das muss nun – in enger Kooperation mit den Ländern, die hier inzwischen weiter sind – mit großer Sorgfalt, aber eben auch zielstrebig vorangebracht werden.

Der CCS-Stopp in Deutschland wurde anderswo als Chance begriffen. Schon im Juli 2008, auf dem Toyako Gipfel in Japan, verpflichteten sich die G8 Staats- und Regierungschefs dazu, 20 große CCS-Testprojekte durchzuführen und CCS-Roadmaps zu erarbeiten sowie die Kommerzialisierung vorzubereiten.

Während Deutschland die hoffnungsvolle CCS-Technologie lange Zeit weder fortentwickelte, geschweige denn erprobte, gingen viele Länder auf der Welt das Thema beherzt an. Sie verfügen heute entweder über klare Pläne, über im Bau befindliche Projekte oder bereits über funktionierende Abscheidungs- und Speichervorrichtungen. Weltweiter Vorreiter ist die norwegische Firma Equinor, die seit 25 Jahren CCS erfolgreich praktiziert. Die folgenden Beispiele aus ausgewählten Ländern zeigen, wie sehr die Welt sich inzwischen auf den CCS-Pfad begeben hat, der ein so enormes Potenzial hat – für wirtschaftliche Entwicklung und Klimaschutz zugleich:

China

China strebt 2030 den Höhepunkt seiner Treibhausgas-Emissionen an und will bis 2060 vollständige Klimaneutralität erreichen. Durch Techniken zur CO₂-Abscheidung kann China bis 2050 seine jährlichen Emissionen um bis zu 1,45 Milliarden Tonnen reduzieren, bis 2060 sollen es sogar 1,82 Milliarden Tonnen sein. Angesichts der Tatsache, dass Chinas Wirtschaft auch in Zukunft noch auf fossile Brennstoffe setzt, wird dieses enorme CCS-Potenzial eine zentrale Rolle für Chinas Erfolge in Richtung Klimaneutralität spielen. **Die Frage, ob und wie sehr China CCS anwendet, wird aufgrund seiner Größe auch entscheidend für den Kampf gegen die Erderwärmung im globalen Maßstab sein.**

Die Hauptakteure der chinesischen CCS-Industrie sind – ganz oder teilweise – im Besitz der Regierung. Wichtige CCS-Projekte werden in China von SINOPEC, Huaneng und CNPC durchgeführt. Diese Unternehmen verzeichnen bereits beachtliche Erfolge. Im Jahr 2022 hat Sinopec mehr als 1,52 Millionen Tonnen Kohlendioxid abgeschieden und

gespeichert.¹ Angestrebt wird eine CO₂-Minderung von 1,6 Milliarden pro Jahr und 41,2 Milliarden kumulativ im Zeitraum 2025–2060.² Jüngste CCS-Erfolge wie diese werden sich als entscheidend für die langfristigen Bemühungen des Landes zur Dekarbonisierung eines Wirtschaftssystems erweisen, das auf fossilen Brennstoffen basiert – und trotz des enormen Ausbaus Erneuerbarer Energien noch lange darauf basieren wird.³

China weitet auch Offshore-CCS-Projekte im Südchinesischen Meer aus, also in einem der politisch am stärksten umkämpften Teile der Welt. Das im Südchinesischen Meer gelegene Projekt ist auf der Ölplattform Enping 15-1 installiert, etwa 125 Meilen (200 km) von der Stadt Shenzhen entfernt, wo aus den Kohlefeldern des Landes aufgefangenes Kohlendioxid in eine kuppelförmige Formation, fast eine halbe Meile unter dem Meeresboden, injiziert wird.⁴

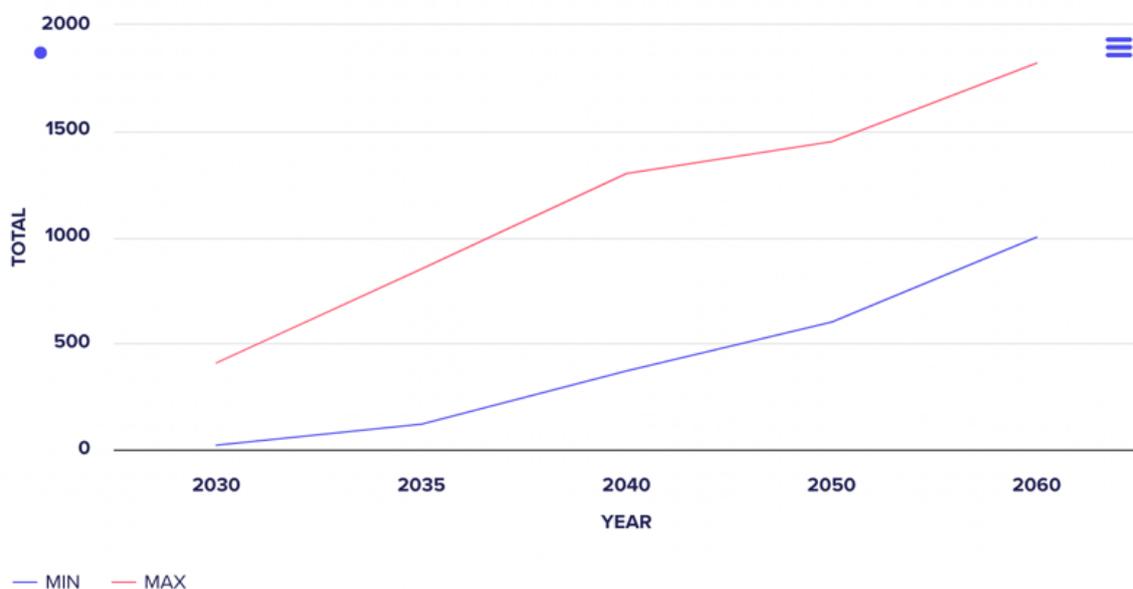


Abbildung 1: Potenzial des CCUS-Einsatzes in China, Angaben in Millionen Tonnen CO₂.⁵

Im Gegensatz zu den europäischen Ländern konzentriert China seine CCS-Bemühungen auf Kohle und Öl. Dies ist umstritten, da Kritiker fürchten, dass so die Nutzung

¹ Chen Aizhu (2022): „China's Sinopec starts first carbon capture, storage facility, plans another two by 2025," Reuters, last modified August 29, 2022, <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/chinas-sinopec-starts-first-carbon-capture-storage-facility-plans-another-two-by-2022-08-29/#:~:text=Last%20year%20Sinopec%20captured%20and,nearby%20Huadong%20and%20Jiangsu%20oilfields.&text=Our%20Standards%3A%20The%20Thomson%20Reuters%20Trust%20Principles>.

² Fan, JL., Fu, J., Zhang, X. et al. (2023): „Co-firing plants with retrofitted carbon capture and storage for power-sector emissions mitigation". *Nat. Clim. Chang.* 13, S. 807–815. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01736-y>.

³ IEA (2022): „World Energy Outlook 2022". <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.

⁴ Hanley, Steve (2023): „China Pushes Ahead With Carbon Capture While IPCC Warns Against It," Clean Technica, last modified June 6, 2023, <https://cleantechnica.com/2023/06/06/china-pushes-ahead-with-carbon-capture-while-ipcc-warns-against-it/#:~:text=Located%20in%20the%20South%20China,mile%20below%20the%20sea%20bed>.

⁵ Global CCS Institute (2022): „Global Status of CCS 2022," Global CCS Institute, <https://status22.globalccsinsmtute.com/2022-status-report/regional-overview/>.

fossiler Brennstoffe nur verlängert wird. Aber muss sich das Streben nach CO₂-Neutralität nicht an die Realität einer Zukunft mit Kohle anpassen? In Ländern wie China, in denen Kohle aus politischen und wirtschaftlichen Gründen noch weit in der Zukunft genutzt werden wird, liegt die wahrscheinlich realistischste Option zur Erreichung der CO₂-Neutralität darin, CCS breit anzuwenden. Abbildung 1 zeigt die potenzielle Entwicklung der CO₂-Emissionsreduzierungen Chinas, die sich aus dem Einsatz von CCUS in den nächsten drei Jahrzehnten ergeben werden.

Japan

Japans jüngste Unternehmungen im Bereich der CO₂-Abscheidung versuchen explizit Wege aufzuzeigen, die klimatischen und gleichzeitig wirtschaftlichen Erfolg erzielen. Bemerkenswert ist zum Beispiel das Tomakomai-Demonstrationsprojekt, das zwischen 2016 und 2019 durchgeführt wurde. Dabei handelte es sich um ein CCS-Projekt, bei dem die Emissionen einer Küstenölraffinerie auf Hokkaido erfasst wurden.⁶

Einige Experten warnen davor, dass Umweltprobleme im Zusammenhang mit Meeresökosystemen auftreten könnten, wenn CCS-Projekte in Küstengebieten durchgeführt werden. Allerdings zeigte das Tomakomai-Demonstrationsprojekt keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt, was ohne Zweifel auch auf die technische Sorgfalt und umfassende Überwachung zurückgeführt werden kann.⁷

Das Projekt weist den Weg für die zukünftige japanische CCS-Politik. Japan stellt die Weichen für die Nachrüstung alter Kraftwerke mit Carbon Capture-Technologie.

Indien

Derzeit sind Indiens CCS-Kapazitäten noch nicht sehr ausgeprägt. Aber Indien ist extrem ambitioniert. Es setzt nicht nur auf Klimaneutralität, sondern auf kohlenstoffnegative Methoden im Kampf gegen den Klimawandel. Indien gibt sich nicht mit der Abscheidung von Kohlendioxid zufrieden, sondern will es nutzen.

Indiens Strategie zur Erreichung der Klimaneutralität zielt darauf ab, mehr als 40 Prozent seiner Emissionen durch kohlenstoffnegative Technologien wie CCUS zu mindern. Die CCUS-Technologie ist auch Teil der Übergangsstrategien der Bharat Petroleum Corporation Limited (BPCL), die bis 2026 die Einführung der neuen CCUS-Technologie in ihrer Raffinerie anstrebt, und der Hindustan Petroleum Corporation Limited (HPCL), die die Installation einer Kohlenstoffabscheidungsanlage in der Visakh-Raffinerie bis Dezember 2023 plant.⁸ Daher wird CCUS eine entscheidende Rolle bei der Förderung kohlenstoffnegativer Technologien spielen. Da auf diese Weise 40 % der Emissionen eingespart werden sollen, reicht das Pflanzen von Bäumen allein nicht aus. Insgesamt

⁶ International Energy Agency (2023): „Tomakomai CCS Demonstration Project," International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/tomakomai-ccs-demonstration-project> .

⁷ JCCS (2023): „Tomakomai CCS Demonstration Project", Japan CCS Co Limited, <https://www.japanccs.com/en/business/demonstration/index.php> .

⁸ Pandey, Kunday (2023): „Carbon Capture Technology on the Rise in India's Energy Transition". In: Eco Business, June 7 2023, <https://www.eco-business.com/news/carbon-capture-technology-on-the-rise-in-indias-energy-transition/> .

hängt die Zukunft der indischen Klimastrategie maßgeblich vom Erfolg oder Misserfolg der Umsetzung von CCUS ab.

Schritte zur Verbesserung der indischen CCS-Industrie werden bereits unternommen. „ONGC [Oil and Natural Gas Corporation] arbeitet in Zusammenarbeit mit der Indian Oil Corporation (IOCL), einem weiteren Ölproduzenten des öffentlichen Sektors, auch an Indiens erstem CO₂-Abscheidungsprojekt im industriellen Maßstab in der Koyali-Raffinerie. Das Projekt wird CO₂-Emissionen in der Raffinerie auffangen, die über Pipelines zum Gandhar-Ölfeld transportiert werden, das sich im Besitz von ONGC befindet, wo Medienberichten zufolge Kohlenstoff gespeichert wird.“⁹ Wie diese Projekte zeigen, hat Indien erkannt, dass die CO₂-negative Klimapolitik im Vordergrund stehen muss bei dem Vorhaben, als Weltmacht Klimaneutralität zu erreichen. Die Koyali-Raffinerie, ein wichtiger Industriestandort des Landes, wird bis zu 0,7 Mio. t CO₂ pro Jahr abscheiden und damit den Weg für einen breiteren, groß angelegten CCUS-Erfolg in Indien ebnen.¹⁰

Vereinigte Staaten und Kanada

In Nordamerika hat CCS in den letzten Jahren eine bahnbrechende Finanzierung erhalten. Durch den *Inflation Reduction Act (IRA)* der Vereinigten Staaten und die jüngsten Bundeshaushalte Kanadas haben CCS-Anwender von einer Reihe neuer Steuergutschriften (*tax credits*) profitiert. In beiden Ländern hat sich CCS zu einer entscheidenden Methode zur Bekämpfung des Klimawandels entwickelt, da sich CCS-Richtlinien mit Marktinstrumenten leicht erstellen lassen. Und ebenso wie China und Japan schränken auch die Vereinigten Staaten und Kanada die Einsatzmöglichkeiten von CCS nicht eng ein.

Erstens förderte der Bundeshaushalt der kanadischen Regierung im Jahr 2022 CCS in seiner Steuergesetzgebung. Für *Direct Air Capture (DAC)* gab es einen Investment Tax Credit von 60 %. Jedes andere Projekt zur CO₂-Abscheidung erhielt eine 50-prozentige Anrechnung, ferner gab es eine 37,5-prozentige Anrechnung für Transport und Lagerung.¹¹ Diese Steueranreize nutzen die Macht des Marktes, um die verschiedensten CCS-Strategien – und vermehrt auch CCU – zu fördern.

Ebenso unterstützen die Vereinigten Staaten CCS – unter anderem durch den Abschnitt 45 D des *Inflation Reduction Acts* – Unternehmen, die „blauen Wasserstoff“ aus Erdgas gewinnen und das dabei entstehende CO₂ in die Erde verpressen wollen. In den letzten Jahren haben Innovationen in der CCS-Technologie in Amerika stark zugenommen. Das Unternehmen Remora beispielsweise hat einen neuen Filtertyp entwickelt, der an

⁹ Pandey, Kunday (2023): „Storing or reusing captured carbon is emerging as tool in energy transition,” Mongabay, last modified May 22, 2023, <https://india.mongabay.com/2023/05/storing-or-reusing-captured-carbon-is-emerging-as-tool-in-energy-transition/>.

¹⁰ Business Wire (2022): „Dastur Successfully Completes Techno-Economic Feasibility of India's Largest Carbon Capture and Utilization Project at the IOCL Koyali Refinery,” Business Wire, last modified April 14, 2022, <https://www.businesswire.com/news/home/20220414005333/en/Dastur-Successfully-Completes-Techno-Economic-Feasibility-of-India%E2%80%99s-Largest-Carbon-Capture-and-Utilization-Project-at-the-IOCL-Koyali-Refinery>.

¹¹ International Energy Agency (2022): „Investment tax credit for carbon capture, utilisation and storage (CCUS),” International Energy Agency, last modified November 4, 2022, <https://www.iea.org/policies/13346-investment-tax-credit-for-carbon-capture-utilisation-and-storage-ccus>.

Sattelschleppern angebracht werden kann und den Kohlenstoffausstoß aus Auspuffrohren direkt an der Quelle auffängt.¹² Diese Emissionen können dann wie bei einem herkömmlichen CCS-Projekt unter der Erde transportiert und gelagert werden.

Besonders innovativ ist ein Projekt in Texas von den Unternehmen *NET Power*. Hier wird ein Gaskraftwerk mit integrierter CO₂-Nutzung und -Speicherung betrieben. Es gibt viele Beispiele, die zeigen, was möglich ist, wenn Technologieoffenheit und Markt zusammenkommen.

Australien

Als einer der weltweit größten Exporteure von Kohle und Flüssiggas (LNG) steht Australien vor der Herausforderung, die Nachfrage von Importeuren wie China oder Südkorea zu decken und gleichzeitig so weit wie möglich zu dekarbonisieren.¹³ Australien sieht vor diesem Hintergrund keinen Grund zu Beschränkungen von CCS auf bestimmte Industrien, sondern wendet CCS überall dort an, wo Kohlendioxid entsteht.

Australien gehörte immer zu den Vorreitern bei CCS. Es plant seine CO₂-Abscheidung zwischen 2022 und 2030 in nur acht Jahren zu vervierfachen. Es nutzt seine fossilen Rohstoffe weiter – aber scheidet die Emissionen ab, verpresst oder verarbeitet sie. Nicht die Kohle, das Öl oder das Gas an sich, sondern das bei der Nutzung entstehende Treibhausgas ist es, was klimaschädlich ist.

In den letzten Jahren hat Canberra eine Vielzahl neuer CCS-Projekte finanziell unterstützt. Ein solches Beispiel ist die Unterstützung eines Vorhabens, das von Australiens zweitgrößtem unabhängigen Gasproduzenten Santos Ltd (STO.AX) und seinem Partner Beach Energy (BPT.AX) durchgeführt wird. Das Joint-Venture hat 15 Millionen A\$ für ihr 210 Millionen A\$ teures Moomba CCS-Projekt eingeworben und plant, zunächst 1,7 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr in erschöpften Öl- und Gasfeldern zu speichern.¹⁴ Darüber hinaus erhält Glencore von der Regierung zusätzliche Mittel für ein 210-Millionen-Projekt zur Nachrüstung eines alten Kohlekraftwerks mit CCUS-Technologie.¹⁵

Europa

Vor allem in Nordeuropa tut sich inzwischen viel beim Thema CCS. Norwegen war lange einsamer Vorreiter. Das Unternehmen Equinor hat vor 25 Jahren mit CCS begonnen und demonstriert der Welt inzwischen eindrucksvoll, dass es sich – wenn Umwelt- und Sicherheitsstandards eingehalten werden – um eine sichere Technologie handelt. Das in den Gasfeldern *Snohvit* und *Sleipner* mitgeförderte CO₂ wird abgetrennt und mehrere tausend Meter tief unter dem Meeresboden in geeigneten Gesteinsschichten, die mit

¹² Remora (2023): „TURNING AMERICA'S 2 MILLION SEMI-TRUCKS INTO CARBON REMOVAL DEVICES," Remora, <https://remoracarbon.com/>.

¹³ Chow, Emily (2023): „Australia to Scale Up Offshore Carbon-Capture Storage," Reuters, last modified May 15, 2023, <https://www.reuters.com/business/energy/australia-scale-up-offshore-carbon-capture-storage-minister-2023-05-16/>.

¹⁴ Paul, Sonali (2021): „Australian Government Backs Six Carbon Capture Projects with \$39 mln," Reuters, June 8, 2021, <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/australian-government-backs-six-carbon-capture-projects-with-39-mln-2021-06-08/>.

¹⁵ Paul, Sonali (2023): „Australian Government Backs Six Carbon Capture Projects with \$39 mln," Reuters.

Sandstein und Salz gefüllt sind, verpresst (saline Aquifere). Zur Sicherheit trägt wesentlich bei, dass das CO₂ in die Poren des Gesteins injiziert und dort dauerhaft eingeschlossen wird. Mit den Jahren löst sich das CO₂ im Salzwasser langsam auf. Ein Teil des CO₂ bildet Mineralien, es wird im wahrsten Sinne des Wortes „versteinert“. Die Sicherheit der Speicherung wird ferner durch Überwachungsprogramme und Lagerstättensimulation ständig beobachtet. Neue Projekte wie **Longship** und vor allem **Northern Light**, das die Transport- und Speicherkapazität so ausbaut, dass die Verpressung von CO₂ aus anderen europäischen Ländern ermöglicht wird. Total, Shell und Wintershall/DEA sind hier inzwischen Partner, es entsteht langsam aber sicher eine veritable CO₂ Infrastruktur.

Eine weitere markante Wegmarke auf dem Weg zur Dekarbonisierung in Europa ist das Projekt **Greensand**, das seit April 2023 die gesamte Wertschöpfungskette bei CCS grenzüberschreitend umfasst. Aus Belgien werden „schwer vermeidbare CO₂-Emissionen“ aus der Industrie per Schiff zur Nini-West Lagerstätte in Dänemark transportiert und dann über Bohrlöcher in eine fast 2.000 m tiefe Sandsteinschicht injiziert. Das Projekt, federführend von Wintershall/DEA durchgeführt, wird von der EU unterstützt. Mit deutschem CO₂ wäre **Greensand** zurzeit noch nicht möglich, weil nach bisherigem Recht schon der CO₂-Transport verboten ist.

Auch Island ist mittlerweile ganz vorne dabei. In Hellisheidi gibt es eine Pilotanlage, die CO₂ aus Geothermiekraftwerken abscheidet und dann in tiefe Basaltschichten verpresst. Inzwischen wollen die Isländer mehr: in Straumsvik entsteht ein CO₂-Importhafen.

Ebenso gibt es in Großbritannien und den Niederlanden CCS-Projekte; hier wird dieser Technologie ein enormes Potenzial hinsichtlich der Bekämpfung des Klimawandels eingeräumt. Bewegung bei CCS gibt es seit 2023 auch in Frankreich, wo Pilotprojekte ab 2024 starten. Dort gibt es seit 2023 eine nationale CCS-Strategie, mit der man bis 2030 zwischen 4 und 8,5 Millionen Tonnen CO₂ abscheiden und speichern will. Bis zum Jahr 2050 wollen die Franzosen 30 Millionen Tonnen im Jahr abscheiden und speichern.

Daneben schreitet die Entwicklung in Belgien voran: nach intensiven Gesprächen mit potenziellen Industriekunden hat der Infrastrukturbetreiber Fluxys Pläne für ein offen zugängliches CO₂-Netz entwickelt, das mit Schiffsterminals in Antwerpen und Gent sowie einer von Zeebrugge zu norwegischen Speicherstätten führenden Offshore-Pipeline über drei Ausspeisepunkte verfügen soll. Mit Partnern wird die zukünftige Betreibergesellschaft „C-grid“ gegründet. Bis 2030 will Fluxys dem Markt Kapazitäten für den Transport von 30 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr zur Verfügung stellen und Belgien durch die Anbindung an Deutschland und weitere Nachbarländer zu einem europäischen CO₂-Hub weiterentwickeln.

Die nächsten Schritte in Europa, Deutschland und der Welt

CCS in Kohlekraftwerken ist heute in der EU kein Thema mehr. Dieser Weg wurde vor 15 Jahren verworfen – und heute ist die Entwicklung daran vorbei gegangen. Durch den erfolgreichen Ausbau der Erneuerbaren Energien laufen die flexiblen konventionellen Kraftwerke nur wenige Stunden. Die Anlagentechnik würde sich hier kaum amortisieren, ein Projekt folglich ökonomisch kaum sinnvoll sein. Für Deutschland und die EU kommt es vielmehr darauf an, einen gesetzlichen Rahmen zu schaffen, um

schwer vermeidbare Emissionen etwa aus den Grundstoffindustrien (z.B. Chemie, Zement, Kalk, Glas) abzuscheiden, zu transportieren und in sicheren Lagerstätten zu verpressen. Im Sinne einer CO₂-Kreislaufwirtschaft wird so auch die Nutzung von CO₂ als Rohstoff möglich. CCS und CCU sind Klimaschutztechnologien und müssen als solche anerkannt werden.

Außerhalb von Europa aber sollte die Nutzung von CCS und CCU nicht nur im Rahmen industrieller Produktionen, sondern auch bei der Energieerzeugung selbst eine zentrale Option sein. Der Ausbau der Erneuerbaren Energien, der Produktion und Nutzung von Wasserstoff kommt zwar überall auf der Welt die zentrale Rolle in der Klimapolitik zu. Aber wir werden China, Indonesien, Indien oder Kolumbien – um nur einige wenige Länder zu nennen – nicht davon abhalten, ihre fossilen Energiequellen weiter zu nutzen. In China allein wurden 2022 allein neue Kohlekraftwerke für 106 GW genehmigt. In einem Jahr! Viele Länder sind der Überzeugung, dass sie für den steigenden Energiebedarf in ihren Ländern auch zukünftig stark auf fossile Energien angewiesen sind, um die Bedürfnisse einer rasch wachsenden Bevölkerung zu befriedigen. Deshalb erscheint es klimapolitisch unklug, wenn man hier Technologien zur Abscheidung, Lagerung und Nutzung von CO₂ unterbinden wollte. Das wird ein Thema, dass bei den nächsten COP-Treffen eine wesentliche Rolle spielen wird.

Für die Studie haben wir die drei renommiertesten Experten in Deutschland in Sachen CCS/CCU gewonnen. Sie schreiben auf der Grundlage von langjährigen praktischen Erfahrungen und wissenschaftlichen Erkenntnissen, die sie schon früher in ausführlichen anerkannten Studien niedergelegt haben.

Diese Studie wird von einer profilierten Analyse von **Professor Dr. Franz Josef Radermacher** über CCS im Gesamtkontext internationaler Klimapolitik eingeleitet. Er hat in diesem Jahr mit dem Verein Global Energy Solutions e.V. und seinem Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung eine umfassende Referenzlösung für ein weltweit klimaneutrales und Wohlstand schaffendes Energiesystem vorgelegt, das für den Zeitraum 2050-70 allen dann lebenden zehn Milliarden Menschen ein Leben in Freiheit und angemessenen Wohlstand in sozialer Balance, intakter Umwelt und stabilem Klimasystem ermöglicht. Diese umfassende wissenschaftliche Studie, die vom Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ) gefördert wurde, hat in CCS einen wesentlichen Baustein im Rahmen einer solchen Referenzlösung ausgemacht. Prof. Radermacher, der auch dem beratenden Kuratorium des CEF angehört, wird im November 2023 mit dem Ehrenpreis Green Innovator der Deutschen Wirtschaft ausgezeichnet.

Professor Dr. Hans-Joachim Kümpel gehört seit langem zu den anerkanntesten Geophysikern. Er war von 2007 bis 2016 Präsident der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und beschreibt anschaulich und mit wissenschaftlichem Tiefgang die Auseinandersetzungen zu CCS in Deutschland. Seine Beschreibung ist ein Dokument energiepolitischer Zeitgeschichte.

Professor Dr. Reinhard Hüttl geht einen Schritt weiter. CO₂ wird in seiner prägnanten Analyse zu einem Rohstoff, den wir für die klimaneutrale Produktion von Wasserstoffderivaten benötigen. Carbon Capture and Utilization (CCU) ist technisch in vielen Varianten möglich und enthält enorme Chancen für Wirtschaft und Klima zugleich. Hüttl

war von 2007 bis 2020 Wissenschaftlicher Vorstand und Sprecher des Vorstands am Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches Geoforschungszentrum sowie von 2008 bis 2017 einer von zwei Präsidenten von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. In dieser Funktion war er initiativ an der acatech-Studie zu CCS im Jahr 2019 beteiligt. Er skizziert in seinem Beitrag die vielfältigen Möglichkeiten zur Nutzung und damit dauerhaften Bindung von CO₂. Auch Hüttl gehört, wie sein Kollege Radermacher, dem beratenden Kuratorium des CEF an.

Ich bin den Autoren dieser Studie sehr dankbar, dass sie pro bono gearbeitet haben und damit dem Clean Energy Forum Starthilfe geben.

Berlin, im November 2023

Friedbert Pflüger

Grundbegriffe zu Carbon Management

Hannes Vogel

Carbon Management¹⁶ umfasst Technologien zur Abscheidung, Nutzung und Speicherung von CO₂. Wie der IPCC^{17,18} und die IEA¹⁹ hervorheben, ist Carbon Management ein notwendiger Baustein zur Erreichung der weltweiten Klimaziele. Hier eine Übersicht zu den wichtigsten Begrifflichkeiten:

Carbon Capture and Utilization (CCU) umfasst alle Formen der (Weiter-) Nutzung von CO₂ als Rohstoff, sei es bei der Herstellung von Grundchemikalien, eFuels oder Baustoffen. Die Klimabilanz variiert von Produkt zu Produkt – in Abhängigkeit von der Speicherdauer und dem Lebenszyklus. CCU kann ein wichtiger Schritt hin zur Kreislaufwirtschaft sein.

Carbon Capture and Storage (CCS), auch **CO₂-Sequestrierung** genannt, umfasst die Umwandlung und Speicherung von CO₂ in kurzfristigen Speichern wie Böden, Holz oder Pflanzenkohle und in langfristigen Speichern wie Sedimenten, Mineralien und geologischen Untergrundspeichern.

Carbon Dioxide Removal (CDR) bezeichnet die langfristige Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre. Diese Prozesse weisen negative CO₂-Emissionen auf und sind mit der Hoffnung verbunden, den Klimawandel stückweise rückgängig machen zu können. Für CDR können Direct Air Capture-Verfahren oder biogene Quellen zum Einsatz kommen.

Carbon Transport umfasst den Transport von CO₂ und Kohlenwasserstoffen durch Tankwagen, Güterzüge, Schiffe, Pipelines und Verteilnetze. Ob dabei bestehende Infrastruktur und Netze weiterverwendet, umgebaut oder neugebaut werden, hängt davon ab, in welcher Form das CO₂ genutzt wird (beispielsweise nach Umwandlung in Methan oder Methanol).

CO₂-Abscheidungsverfahren basieren beispielsweise auf chemischen und physikalischen Mechanismen wie Adsorption (Anlagerung an einer Oberfläche), Absorption (Aufnahme durch eine Flüssigkeit oder einen Feststoff), Gastrennung durch Membranen oder Gasverflüssigung. Während sich viele Verfahren noch in der Entwicklung befinden, finden beispielsweise Amine als Absorptionsmittel bereits breite industrielle Anwendung.^{20, 21}

¹⁶ Hepburn et al. (2019): "The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal". In: Nature 575, pages 87–97.

¹⁷ IPCC Fifth Assessment Report.

¹⁸ IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C.

¹⁹ IEA (2022): "Direct Air Capture – A key technology for net zero". <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022> (abgerufen 15. September 2023).

²⁰ Wang und Song (2022): "Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective". In: Frontiers in Energy Research. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.560849/full> (abgerufen 15.09.2023).

²¹ United States Government Accountability Office (2022): "Technology Assessment – Decarbonization".

Point-source Capture bezeichnet die CO₂-Abscheidung aus Abgasen und Abwasser an Punktquellen wie Gaskraftwerken oder der Stahl-, Zement- und Papierindustrie. Viele Verfahren sind bereits technisch fortgeschritten und zum Teil schon im industriellen Einsatz. Zusätzlich kann danach unterschieden werden, zu welchem Verfahrensschritt CO₂-Abscheidung zum Einsatz kommt (**Pre-combustion, Post-combustion** und **Oxy-combustion**).

Direct Air Capture (DAC, in Verbindung mit CCS auch DACCS) bezeichnet Verfahren, um CO₂ aus der Atmosphäre zu entziehen. Aufgrund der geringeren CO₂-Konzentration ist DAC bisher technisch aufwendiger als Point-source capture. Gleichzeitig ist der Einsatz von DAC nicht gebunden an lokale Emittenten und perspektivisch weltweit skalierbar. In Kombination mit einer grünen Energiequelle kann DAC zum Carbon Dioxide Removal genutzt werden.

Direct Ocean Capture (DOC) bezeichnet Verfahren, die die Meere zur verstärkten Speicherung von CO₂ nutzen. Dazu gehören Methoden zur Anregung des Algenwachstums (Eisendüngung, Künstlicher Auftrieb), zur Kohlenstoffspeicherung in der Küstenzone oder zur Veränderung des pH-Werts, um CO₂ als Kohlensäure zu speichern (Alkalinitätseintrag). Im Vergleich zu Point-source Capture und Direct Air Capture befindet sich DOC noch im Konzeptionsstadium.

Die Unterschiede zwischen CCU, CCS und CDR werden durch die folgende Abbildung 2 zusammengefasst.

Carbon Management		
Fossile CO ₂ -Quellen (Energieträger oder Prozessemissionen)		Biomasse und Umgebungsluft als CO ₂ -Quellen
CCU <i>Verzögern</i> von schwer vermeidbaren Emissionen	CCS <i>Reduzieren</i> von schwer vermeidbaren Emissionen	CDR <i>Ausgleichen</i> von Restemissionen

Abbildung 2: Zentrale Begriffe rund um Carbon Management. Quelle: SWP 2023.²²

²² Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP, 2023): „Carbon Management«: Chancen und Risiken für ambitionierte Klimapolitik“.

I. Zur Rolle von Carbon Capture

Prof. Dr. Franz Josef Radermacher

Beim Thema Carbon Capture müssen wir über den Tellerrand der europäischen Klimapolitik hinausdenken und nach globalen Lösungen für globale Ziele suchen. Franz Josef Radermacher ist stellvertretender Vorsitzender von Global Energy Solutions und berät UN-Generalsekretär Guterres als Mitglied im UN-Council for Engineers for the Energy Transition. Zu seinen einschlägigen Veröffentlichungen gehört der BMZ-Abschlussreport Global Energy Perspectives. Franz Josef Radermacher ist Mitglied im beratenden Kuratorium des Clean Energy Forums.

1. Zur Problemlage

Die Welt hat sich mit der Agenda 2030 (UN-Nachhaltigkeitsziele), dem Klimavertrag von Paris (2015) und den ambitionierten Zielsetzungen im Bereich Biodiversität sehr viel vorgenommen. Es geht allerdings in allen Bereichen nicht wirklich vorwärts. Teilweise bewegen sich die Trends sogar in die falsche Richtung, so beim Klima und der weltweiten Bekämpfung des Hungers. Das ist aber für große, internationale Zukunftsprogramme nichts Neues. In der Regel handelt es sich bei den Programmen um Worte, die weder durch Pläne noch Verantwortung bindend hinterlegt sind und denen generell die Finanzierung fehlt. Die Finanzierung ist aber eine Schlüsselfrage.

Die aktuellen Planungen setzen stark auf **nationale Ansätze** und Verantwortungen, obwohl der Charakter des Problems globaler Natur ist. Nicht überraschend sind gerade die ärmsten Staaten überfordert. Bei den Entwicklungs- und Schwellenländern (129 an der Zahl) steht bis 2050 ein Wachstum der Bevölkerung von 5 auf 7 Milliarden Menschen an. Der Zuwachs entspricht mehr als 4-Mal der Bevölkerungsgröße der EU. Man erwartet bis 2060 weltweit ein Bauvolumen für Gebäude und Infrastruktur, das 500 Mal der Größe New Yorks entspricht. Einmal New York pro Monat.²³

Die dortigen Bevölkerungen wollen nachvollziehbar in erheblichem Umfang Wohlstand aufbauen, daraus resultiert u. a. das große Bau- und Infrastrukturwachstum, insbesondere in Afrika. Das ist in jeder Hinsicht legitim und nachvollziehbar. In Afrika wird eine Verdoppelung der Bevölkerung bis 2050 auf rund 2,4 Milliarden Menschen erwartet. Viele Menschen im Süden Afrikas leiden Hunger und 800 Millionen haben dort keinen Zugang zu elektrischem Strom. Mehr Menschen bedeuten jedoch zusätzliche Bautätigkeit, einschließlich Infrastrukturausbau und das heißt auch ein enormer Verlust fruchtbarer Böden. Zudem macht der Klimawandel ganze Landstriche unbewohnbar. Wie soll das alles bewältigt werden – und das in den armen Ländern?

²³ Gates, B. (2021): „Wie wir die Klimakatastrophe verhindern – Welche Lösungen es gibt und welche Fortschritte nötig sind“, Piper Verlag, ISBN-13: 978-3-49207-100-0.

2. Energiewohlstand als Schlüsselthema

Die wichtigsten Voraussetzungen für breiten Wohlstand und eine verbesserte Lebensqualität ist **Energiewohlstand**. Beides kam vor 250 Jahren mit der Erfindung der Dampfmaschine und der massiven Nutzung der Kohle auf die Welt.²⁴ Die Folge waren drei große industrielle Revolutionen. Die Zahl der Menschen hat sich in der Folge fast verzehnfacht, der Wohlstand ver Hundertfacht. Der Schlüssel dafür waren die fossilen Energieträger. Sie stellen auch heute weltweit fast 80 Prozent des Primärenergieeinsatzes, während es die Neuen Erneuerbaren nur auf etwa vier Prozent bringen. Die Wirksamkeit des Programms der fossilen Energie zeigt China – der größte Entwicklungserfolg der letzten 60 Jahre. Die Basis ist ein massiver Verbrauch von Kohle – der Umfang nimmt nach wie vor zu. Ein ähnliches Bild entwickelt sich in Indien, Indonesien und Südafrika.

So könnte es weiter gehen, wenn da nicht die hohen CO₂-Emissionen der Kohleverbrennung – und ebenso der Verbrennung anderer fossiler Energieträger – wären. Sie treiben die Erderwärmung an. Deshalb hat sich die Weltgemeinschaft entschieden, solche Emissionen bis irgendwann in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts möglichst ganz zu vermeiden bzw. über andere Maßnahmen auszugleichen: das sogenannte **Net-Zero-Ziel**. Unklar ist allerdings, wer was wann tun muss, um dieses Ziel zu erreichen. Dabei ist UN-Konsens, dass die Entwicklungs- und Schwellenländer ihre CO₂-Emissionen noch weiter erhöhen dürfen. Sie brauchen mehr Energie (schon aus Nachhaltigkeitsgründen, weil die Menschen meist sehr arm sind und die Bevölkerungen stark wachsen), sie erzeugen bisher kaum Emissionen und historisch haben sie zur Belastung der Atmosphäre mit CO₂ fast nichts beigetragen. Andererseits droht eine Wiederholung des Beispiels China. Chinas wirtschaftliche Entwicklung auf Basis von Kohle hat dem Land Wohlstand gebracht, wovon seine Partner – gerade auch wir in Deutschland – massiv profitiert haben. Aber zugleich sind die CO₂-Emissionen enorm gewachsen. Sie sind heute genauso hoch wie die Emissionen der reichen Welt insgesamt. Viele Wohlstandsgewinne waren in diesem Sinne „Scheingewinne“ aus der Externalisierung von Kosten zu Lasten des Klimaproblems und dadurch auch insbesondere zu Lasten kommender Generationen. Das soll sich in der weiteren Entwicklung möglichst nicht wiederholen. Sonst kann man das Net-Zero-Ziel vergessen. Was soll man tun?

3. Zur Rolle der Erneuerbaren

Der Weg aus den fossilen Energieträgern ist schwierig. Das erklärt die nach wie vor bestehende Dominanz der fossilen Lösungen. Es gibt die sogenannten Alten Erneuerbaren, wie Wasserkraft, Geothermie oder Biomasse mit einem Anteil von vielleicht 15 Prozent am weltweiten Bruttoenergieaufkommen. Dieses Potenzial ist kaum noch steigerbar. Daneben gibt es die Kernenergie mit einem globalen Anteil von etwa 10 Prozent. Auch dieser Anteil ist nur schwer ausbaubar. Kernenergie wird von vielen Menschen vehement bekämpft, unter anderem wegen möglicher Unfälle, Verseuchungsrisiken und dem Endlagerproblem. Hinzu kommen die Neuen Erneuerbaren, also

²⁴ Radermacher, F. J.; Beyers, B. (2011): „Welt mit Zukunft – Die Ökosoziale Perspektive“, Murmann Verlag, Hamburg.

Photovoltaik (PV) und Windkraft. Sie tragen zur Stromerzeugung bei, die aber klassisch den kleineren Teil der erzeugten Energiemenge betrifft (etwa 20 Prozent). Dies ist **Energie in Form von Elektronen**.

In Deutschland bewegt sich der Anteil der Erneuerbaren an der Stromerzeugung, nach großen Anstrengungen und Milliardenförderung, auf 50 Prozent zu. Parallel dazu wächst der Anteil der Stromerzeugung am Gesamtenergieverbrauch kontinuierlich an. Im Unterschied zu **Energie aus Molekülen**, z. B. Kohle, Gas und Öl, ist Strom vergleichsweise schwer zu transportieren und zu speichern. Strom muss immer auf Sekundenebene in dem Umfang verbraucht werden, wie er erzeugt wird, sonst kollabiert das Netz. Ein Überangebot an Energie ist daher genauso ungünstig wie eine zu geringe Menge. Ein großes Problem der Neuen Erneuerbaren ist deren **Volatilität**. Die Energie steht mal zur Verfügung – wenn der Wind weht und/oder die Sonne scheint – mal steht sie nicht, oder nur in zu geringer Menge, zur Verfügung. Das kann auch Wochen lang so gehen. Besonders schlimm sind die berüchtigten Dunkelflauten im Winter. In der Praxis wird dann oft als letzter Ausweg der Dieselgenerator angeworfen.

Je größer der Anteil der Neuen Erneuerbaren, umso schwieriger wird die Bewältigung der Volatilität. Ab 50 Prozent volatilem Stromanteil wird es schwierig, denn es gibt keine Speicher, die z. B. ein Land wie Deutschland auch nur für Stunden mit Strom versorgen könnten. Man braucht daher geeignete Back-Up-Lösungen, z. B. durch Gas- oder Nuklearenergie. Diese werden aber von Vertretern einer rigorosen Politik der Dekarbonisierung, für die nur erneuerbar generierter Strom in Frage kommt, nicht gewollt. Als Königsweg für ein Back-Up wird von dieser Seite der **Elektrolyse-Wasserstoff** propagiert. Aus Elektronen (Strom) entstehen dann Moleküle (Wasserstoff). Der Wasserstoff lässt sich speichern (bedarf allerdings besonderer Vorkehrungen, da Wasserstoff sehr flüchtig ist) und kann bei Bedarf zur Stromerzeugung verbrannt werden. Wasserstoff übernimmt dann die Rolle von Erdgas. Der Weg ist allerdings prohibitiv teuer und mit vielen weiteren Problemen behaftet, so sind z. B. das sichere Handling und der Transport mit besonderem Aufwand verbunden. Auch gibt es die benötigte Menge Neuer Erneuerbarer nicht. Zudem ist der erhoffte Hochlauf der Elektrolysekapazität bis 2050 durch maximal wohl 4.000 Gigawatt Bruttovolumenleistung begrenzt. Anders ausgedrückt: Grüner Wasserstoff ist bis auf weiteres nur ein unzureichender Ersatz für Erdgas. Man würde das nur machen, wenn es anders gar nicht geht und selbst dann bleiben immer noch die Mengenbeschränkungen.

4. „All Electric“ – eine fehlorientierte Philosophie treibt Deutschland in Wohlstandsverluste

Die in Deutschland verfolgte Programmatik eines immer weitergehenden Ausbaus der Neuen Erneuerbaren bedroht in unserem Land den Wohlstand. Gemäß der „**All Electric**“-**Philosophie** sollen möglichst alle energetischen Anforderungen so weit wie möglich elektrisch bewältigt werden. Das Einsatzspektrum reicht von Elektroautos bis hin zu Wärmepumpen. Dazu müssen bestehende Infrastrukturen für viel Geld beseitigt werden, um Neues zu schaffen, z. B. Lademöglichkeiten für batterieelektrische Automobile. Ein gigantischer Ausbau der Stromnetzinfrasturktur steht an, geschätzt sollen dafür etwa 300

Milliarden Euro bis 2045 (oder 145 Milliarden Euro bis 2037 eingesetzt werden. Parallel dazu nehmen die Volatilitätsprobleme zu. Als Konsequenz sind Strom-Kontingentierung bei Stromknappheit (Verfügbarkeitsmanagement) geplant, ebenso der massive Ausbau der Produktion von grünem Wasserstoff, der wiederum durch den Engpass bei den Erneuerbaren extrem erschwert wird. Die Kosten für den Umbau würden die Allgemeinheit durch deutlich höhere Ausgaben belasten, die Kaufkraft weiter schwächen und somit zu weiteren Wohlstandsverlusten breiter Bevölkerungsschichten beitragen.

In der öffentlichen Kommunikation in Deutschland unternehmen wir das alles, um zur Einhaltung des sogenannten 1,5-Grad-Zieles im Klimabereich²⁵ beizutragen, das mit Bezug auf den angeblich völkerrechtlich verpflichtenden **Pariser Vertrag von 2015** in Deutschland wie eine „Gebetsmühle“ bei jeder passenden und unpassenden Gelegenheit zitiert wird und den deutschen Klimadiskurs beherrscht. Die USA sind zeitweilig aus dem Pariser Vertrag ausgestiegen, dann wieder beigetreten. Das scheint niemanden zu stören, der in diesem Kontext von völkerrechtlicher Verpflichtung spricht. Auch das wenig hilfreiche Urteil des Bundesverfassungsgerichtes²⁶ in der Angelegenheit wirkt sich hier negativ aus. Die Welt muss dankbar sein, wenn das Zwei-Grad-Ziel eingehalten wird. Aber auch das ist alles andere als sicher. Und die Agenda 2030, die sogenannten Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen mit Zieldatum 2030, werden natürlich genauso wenig umgesetzt werden.

Die Wohlstandsseite der Energietransformation gilt es in diesem Kontext richtig zu verstehen. Kanzler Scholz sieht als Folge von Investitionen in Milliardenhöhe im Kontext der Energietransformation in Deutschland ein Wirtschaftswunder wie nach dem Zweiten Weltkrieg für unsere Zukunft. Eine totale Fehlinterpretation. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden neue materielle Werte in großem Umfang geschaffen. Es gab mehr und neue Güter und Dienstleistungen, die die Menschen sich wünschten und für die sie bereit waren, zu arbeiten und gerne auch Überstunden zu leisten. Vom Auto über den Fernseher und das Radio, bis zur Hollywoodschaukel im Garten.

In der Energietransformation bekommen sie nur, was sie schon hatten, also z. B. Strom oder Wasserstoff oder Wärme. Die sogenannte grüne Variante ist jeweils physikalisch identisch mit der bisherigen. Nur die Herstellung ist anders und, wie nicht anders zu erwarten, in der Regel teurer. Diese Art von Transformation verlangt unter anderem den kostspieligen Ersatz zahlreicher Infrastrukturen, die uns noch für Jahrzehnte gute Dienste hätten leisten können. So soll z. B. irgendwann das ganze Tankstellennetz verschwinden. Stattdessen müssen Milliarden Euro in den Ausbau der erneuerbaren Stromkapazitäten, entsprechender Stromnetze und unzählige Aufladepunkte für batterieelektrische Automobile investiert werden. Eine gigantische Geldvernichtung, die nur dann akzeptabel sein könnte, wenn sie die einzige Möglichkeit wäre, das Klimaproblem zu lösen. Dann müssten wir diese „Kröte“ schlucken. Aber so ist die Lage nicht. Man kann viel klüger vorgehen. Einen zentralen Schlüssel für das Erreichen von

²⁵ Umweltbundesamt (UBA, 2023): „IPCC-Synthesebericht macht Aktionsdruck für 1,5°C noch deutlicher“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/ipcc-synthesebericht-macht-aktionsdruck-fuer-15degc> (abgerufen 28.08.2023).

²⁶ Vgl. Radermacher, F. J. (2021): Zum Urteil des Bundesverfassungsgerichts zum Bundes-Klimaschutzgesetz, https://web.leitz-cloud.com/1/files/share/2522/dgcor/kommunikation/publikationen/mitglieder/210525_Stellungnahme%20Verfassungsgerichtsurteil%20zum%20Klimagesetz_final.pdf/iW0Q8J3YaBl?view=1 (abgerufen 28.08.2023).

Klimaneutralität auf der ganzen Welt stellt Carbon Capture dar. Warum stellen sich bei uns viele Umweltschützer und ökologisch Denkende dagegen?

5. Carbon Capture: Fossile Energie versus fossile Emissionen

Glücklicherweise hat die Welt mehr Optionen als „**All Electric**“. Im Zentrum steht **Carbon Capture**, also das Abfangen von CO₂ bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe.²⁷ Das gilt für die Energieproduktion (z.B. aus Kohle, Gas, Erdöl) und für große Industrien wie z. B. Stahl und Zement sowie die Chemie (z. B. für die Herstellung von Blauem Wasserstoff aus Gas). Überall kann CO₂ abgefangen und entweder genutzt („utilization“) oder verpresst („storage“) werden. Letzteres z. B. in sogenannten Porenspeichern (salinare Aquifere) oder Lagerstätten von Öl und Gas. Aber das abgefangene CO₂ kann auch durch **unterirdische Mineralisierung**, also die chemische Umwandlung von Silikat- in Carbonatgesteine gebunden werden.

Carbon Capture²⁸ hat eine Schlüsselrolle, denn ca. 80 Prozent der weltweit genutzten Energie stammen heute noch aus fossilen Quellen. Viele denken, dass die Energiewende einen vollständigen Ausstieg aus Kohle, Gas und Öl bedeutet und die Erneuerbaren Schritt für Schritt die gesamte Energieversorgung übernehmen – alleine und endgültig. Das ist eine Illusion. Alle seriösen Studien zu einer klimaneutralen Welt 2050 gehen auch für die Zukunft von einem hohen Anteil fossil erzeugter Energie aus – neben der stetig wachsenden Nutzung von erneuerbarer Energie. Das ist nicht verwunderlich, denn der weltweite Energiebedarf wird in den kommenden Jahrzehnten weiter steigen. Schon weil die Zahl der Menschen von heute 8 auf bald 10 Milliarden anwachsen wird und die Entwicklungs- und Schwellenländer eine substantielle Erhöhung ihres Lebensstandards anstreben.

Kohle, Gas und Öl haben ein CO₂-Problem. Wenn es gelingt, dieses CO₂ zuverlässig abzufangen, um es anschließend zu entsorgen oder zu nutzen, wäre die Welt einen Schritt weiter. Deshalb ist Carbon Capture and Utilization/Storage (CCUS) ein Schlüsselthema. Der Faktor Zeit spielt dabei eine große Rolle. Denn CCUS verspricht **rasche Verbesserungen** hinsichtlich des CO₂-Fußabdrucks der Zivilisation. Für viele Anwendungen sind Technik und Businessmodelle ausgereift, Wirksamkeit und Effizienz sind hoch.

Interessant ist, dass die britische Regierung plant, eine **neue Kohlegrube zu eröffnen**, um Kohle dann massiv **mit Carbon Capture** zu nutzen. Der norwegische Ministerpräsident Jonas Gahr Støre hat im August 2022 in Oslo, nach einem Treffen mit Kanzler Olaf Scholz²⁹ angeboten, das gesamte in Europa in diesem Jahrhundert produzierte CO₂ bei

²⁷ Global Energy Solutions e. V. (2023): „Entwicklung einer Referenzlösung für ein weltweites klimaneutrales und Wohlstand schaffendes Energiesystem – BMZ-Abschlussreport Global Energy Perspectives“, <https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2023/10/2023-Abschlussreport-Global-Energy-Perspectives.pdf> (abgerufen 09.10.2023).

²⁸ Die Ausführungen in Kapitel 5 lehnen sich stark an folgender Quelle an: BMZ-Abschlussreport Global Energy Perspectives, Kapitel 5.4 (vgl. auch Fußnote 6).

²⁹ Welt (Hrsg., 2022, 15.08.): „Norwegen will gesamtes europäisches CO₂ unter Nordsee einspeichern“. In: WELT, <https://www.welt.de/politik/ausland/article240500141/Norwegen-will-gesamtes-europaeisches-CO- unter-Nordsee-einspeichern.html> (abgerufen 09.10.2023).

sich in Norwegen in 3.000 Metern Tiefe unter der Nordsee einzulagern. Norwegen will das CO₂ später wieder als Rohstoff nutzen. Die Briten wollen ähnliche Angebote machen und mit dem Verpressen von CO₂ einmal mehr Geld verdienen, als sie ursprünglich mit dem Erdgas in den entsprechenden Kavernen verdient haben. Es gibt weitere Aktivitäten dieser Art in Europa, es gibt sie sowieso in den USA, Indien, China und Indonesien. Alle setzen sie bei ihren Net Zero-Zielen auf **Carbon Capture**. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass sowohl der **G20-Gipfel in Rom** wie die letzte **Klimakonferenz in Sharm El Sheikh** bezüglich Kohle immer von einem Ausphasen der Kohle gesprochen haben, soweit sie „unabated“ ist, also kein Abfangen von CO₂ stattfindet.

Dieser Punkt wird in der Kommunikation in den deutschen Medien oft nicht erwähnt. Carbon Capture wird kaum thematisiert. Dr. Uwe Lauber, Chef von MAN Energy Solutions, beklagt dies vehement in einem Interview in „Die Zeit“.³⁰ Lauber berichtet, dass MAN Weltmarktführer ist, dass eine gute Nachfrage in den USA besteht, aber bei uns alles viel zu langsam geht bzw. teilweise gar nicht gewollt wird. In den Medien wird gerne so getan, als würden sich alle Länder von der Kohle verabschieden. So ist es aber nicht, nur von „unabated coal“. Wir brauchen Klimaneutralität insbesondere auch mit Carbon Capture bei Fossilen. Der einzige alternative Weg, nämlich direkt vom Strom, also von den Elektronen zu Wasserstoff und damit zu Molekülen zu kommen, und zwar über den Einsatz von Elektrolyseuren ist, wie oben beschrieben, angesichts der erforderlichen Dimensionen keine Alternative.

An dieser Stelle sei auf die **aktuelle Johannesburg Deklaration der BRICS-Staaten** (Sandton, Gauteng, South Africa, 23. August 2023) verwiesen. Besonders eindrucksvoll und klar ist in diesem Kontext der Punkt 63, in dem sich die Vertragspartner deutlich gegen **Handelshemmnisse aussprechen**, welche ihnen „gewisse entwickelte Länder“ im Zusammenhang mit dem Klimawandel (der als „Vorwand“ benutzt wird) auferlegen wollen. Stattdessen wird betont, man wünsche sich eine verbesserte Abstimmung bei derartigen Entscheidungen. Zudem ist man sich darüber einig, dass eine engere Zusammenarbeit der BRICS-Staaten notwendig ist, da sie wichtige Produzenten und Konsumenten von Energieprodukten- und Dienstleistungen sind. Die BRICS-Länder geben an, ihre gemeinsame Auffassung würde sowohl nationale Interessen als auch die effiziente Nutzung sämtlicher Energiequellen berücksichtigen. Aufgezählt werden Erneuerbare, einschließlich Kraftstoffe, Wasserkraft, fossile Brennstoffe, Nuklearenergie und Wasserstoff, sowie Technologien und Herstellungsprozesse, die emissionsfrei oder mit geringen Emissionen arbeiten und unerlässlich sind, um flexiblere, widerstandfähigere und nachhaltigere Energiesysteme zu schaffen. Dabei wird die Rolle fossiler Brennstoffe für den Erhalt der Energiesicherheit bei der Energiewende explizit deutlich gemacht.

6. Was leistet Carbon Capture?

Durch Carbon Capture (CC) kann man CO₂ aus sogenannten Punktquellen, z. B. an Gaskraftwerken oder Zementfabriken, abscheiden.³¹ Dafür gibt es viele technische

³⁰ Widmann, Marc (2023, 20.04.): „Andere rennen uns davon“. In: Die Zeit, Jg. 2023, Nr. 17, S. 24 / Wirtschaft, <https://www.zeit.de/2023/17/klimaschutz-deutschland-technologien-uwe-lauber>.

³¹ Auch dieses Kapitel orientiert sich stark an: BMZ-Abschlussreport Global Energy Perspectives.

Möglichkeiten. Weit verbreitet ist die chemische Absorption durch **Amine**. CO₂ wird aus den Abgasen herausgewaschen. Das Klimagas kann aber auch durch Membranen abgetrennt werden.

Rund 30 CCUS-Projekte sind weltweit in Betrieb. Die mit Abstand meisten befinden sich in den USA und Kanada. Schon seit langem wird dort CO₂ in großen Mengen gewonnen, in Lagerstätten von Öl und Gas verpresst, um sie besser auszunutzen (Enhanced Oil/ Gas Recovery, EOR/ EGR).

CO₂ in Gas- und Ölfeldern sowie sogenannten Porenspeichern zu verpressen ist markt-reif und hat seinen Ursprung in der Öl- und Gasförderung, als Mittel zum Zweck, um die Produktion zu unterstützen, sog. **Enhanced Oil Recovery**. Dabei geht es nicht primär um den Klimaschutz, sondern um die Erhöhung der **Ausbeute aus Öl- und Gasfeldern**. Dort nimmt nämlich mit zunehmender Förderung der Druck ab. Oft sind die Depots noch halb voll, „Restbestände“ von Öl- und Gas bleiben unter der Erde. Führt man nun CO₂ in die Felder, erhöht sich der Druck und das Feld kann fast bis zur Neige ausgebeutet werden. Das ist auch unter Klima- und Emissionsaspekten vernünftig, wenn bei dem Einsatz der zusätzlich gewonnenen Mengen Öl und Gas konsequent Carbon Capture genutzt wird, oder emittiertes CO₂ über z. B. **Naturbasierte Lösungen** vollständig kompensiert wird. Dabei sind die ökonomischen Vorteile so hoch, dass sie die Kosten für Carbon Capture (Abfangen, Transport, Verpressen) bei Enhanced Oil Recovery decken. Ein weiteres kommt hinzu. Storage von CO₂ in ehemaligen Gas- und Kohlelagerstätten ist eine **Form von Kohlenstoffrecycling** und Recycling ist ja ein zentrales Thema im aktuellen Nachhaltigkeitsdiskurs. Kohlenstoff wird den Depots in Form von Öl oder Gas entnommen und wandert anschließend in Form von CO₂ wieder in die Depots zurück.

CO₂ kann per Pipeline, LKW, Bahn oder Schiff transportiert werden.³² Bis zu einer Entfernung von etwa 1.800 Kilometern ist der Bau von Pipelines trotz anfänglich hoher Investitionskosten günstiger als der Schiffstransport. Anders als bei Erdgas gibt es beim Transport von CO₂ keine Risiken, die durch Feuer oder Explosionen auftreten können. Bislang ist eine CO₂-Transportinfrastruktur kaum vorhanden, Ausnahmen bilden die USA und Kanada. Hier gibt es ein CO₂- Pipelinenetz von über 8.000 Kilometern Länge.³³

Will man CCUS im großen Maßstab einsetzen, wächst auch die Bedeutung von Transport und Logistik in der gesamten CO₂-Kette. Damit hängt die Zukunft von CCUS auch an der Bereitschaft der jeweiligen Staaten, die notwendige Infrastruktur zu schaffen.

Die Abscheidung von CO₂ in der Industrie kostet derzeit zwischen 40 und 120 US-Dollar pro Tonne.^{34,35} Die Preisspanne gilt sowohl für konventionelle Kraftwerke, also im Wesentlichen Kohle und Gas, vereinzelt auch Öl, als auch für die Stahl- und

³² Massey, J. (2021): „Carbon Capture, Utilisation & Storage (CCUS). A Green power Global event Dec 7th-9th“.

³³ Righetti, T. (2017): „Siting Carbon Dioxide Pipelines. Oil and Gas, Natural Resources, and Energy Journal 3(4)“. Im Internet unter: <https://digitalcommons.law.ou.edu/onej/vol3/iss4/3> (abgerufen 05.07.2023).

³⁴ dena –Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg., 2021): „dena-Leitstudie – Aufbruch Klimaneutralität“. <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/abschlussbericht-dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/> (abgerufen 27.07.2023).

³⁵ Massey, J. (2021).

Zementproduktion. Nach chinesischen Angaben spricht viel dafür, dass die **Kosten bis 2050 auf ein Drittel sinken** könnten.

Kann CCUS bei der Lösung des Energie- und Klimaproblems eine tragende Rolle spielen? Die weltweit ausgestoßenen CO₂-Mengen aus dem energienahen Bereich betragen 2025 etwa 39 Milliarden Tonnen pro Jahr. Hinzu kommen etwa 14 Milliarden Tonnen CO₂eq zum Teil aus anderen Treibhausgasen wie Methan. Natürliche Puffer, wie Ozeane oder Wälder, speichern zugleich mindestens 14 Milliarden Tonnen CO₂ und helfen uns bei der Bekämpfung des Klimaproblems. Methan bleibt übrigens in der Atmosphäre, bis es nach ca. 12 Jahren zu Wasser und CO₂ wird. Von den 34 Milliarden Tonnen im energienahen Bereich wird derzeit nur etwas über 14 Promille abgeschieden und eingelagert. Bei den „Schwergewichten“ der globalen Emissionen liegen die Kohlekraftwerke, und hier vor allem die Anlagen in China und Indien, weit vorne; global handelt es sich um etwa 10 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr.

Die Wirkungsgradverluste beim Einsatz von CCS sind jedoch erheblich. Um den gleichen Strom-Output zu erzielen, muss *mehr* Kohle verbrannt werden, alternativ muss erneuerbare Energie zu diesem Ziel bereitgestellt werden. Gleichzeitig entstehen gewaltige Mengen CO₂, die entsorgt oder genutzt werden müssen. Dafür sind Investitionen erforderlich: in die Anlagen zur Abscheidung, für die Kompression und eine zur Geographie passende Transportinfrastruktur.

Es sind aber nicht die Kohlekraftwerke alleine: Gas- und Ölkraftwerke, Stahlwerke, Zementwerke, Anlagen in der Chemie etc. kommen hinzu. Wenn CCUS eine entscheidende Rolle bei der Lösung der Klimakrise spielen soll, stellt sich die Frage noch einmal härter: Gibt es eine realistische Chance, mittels dieser Technologie **im jährlich wachsenden Umfang bis 2050 schließlich 15-20 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr abzufangen**, und das mit einer Abscheidungsrate von rund 90 Prozent? Ist das überhaupt realistisch?

Die kurze Antwort lautet: technisch ja, die Knackpunkte sind – wie so häufig – ökonomischer und politischer Natur. Das Ganze muss politisch gewollt oder zumindest akzeptiert und finanziert werden. Und man sollte klug mit vorhandenen Infrastrukturen umgehen, d. h. sie eher nutzen als um- oder neu zu bauen, wobei Umnutzung in der Regel teurer ist als Neubau.

Letztlich braucht es einen praktischen Willen zur Kooperation, auch global. Beispiel Afrika: Der Kontinent ist gesegnet mit Potenzialen für erneuerbare Energie, also Sonne, Wind, ungenutzte Flächen in der Wüste. Aber Afrika verfügt auch über Kohle, Gas und Öl. Und das ist häufig die billigere Lösung, vor allem wenn Volatilität im Stromangebot vermieden werden soll. Was wiederum Voraussetzung für eine **Industrialisierung** ist. Und die braucht z. B. Afrika bei der anstehenden Verdoppelung der Bevölkerung auf rund 2,4 Milliarden Menschen bis 2050 dringend.

Wie soll man mit dieser Situation umgehen? Die Antwort liegt auf der Hand. Wenn sich afrikanische Staaten für fossile Energieträger entscheiden, müssen aus Sicht der Referenzlösung von Global Energy Solutions die reichen Länder aus schierem Eigennutz (**einsichtsvoller Egoismus**) die Mehrkosten für CC mittragen und die Verantwortung dafür übernehmen, dass die Energiebereitstellung auf diese Weise auf eine klimagerechte Art und Weise geschieht. Dies entspricht der Logik des **Montrealer Protokolls**, über das seit 1987 das **Ozon-Problem** erfolgreich adressiert wurde. Das Ozonloch

konnte durch den Einsatz neuer Technologien wieder geschlossen werden. Die reichen Länder haben die Differenzkosten übernommen, z.B. für neue Kühlschranksarten. So kam es zu einem Konsens. Nach diesem Vorbild kann auch die Kooperation mit den Entwicklungs- und Schwellenländern in der Klimafrage gelingen.

7. Drohende internationale Auseinandersetzungen um die europäische Klimapolitik

Die Ablehnung von Carbon Capture durch viele Klimaakteure in den reichen Ländern stellt ein großes Problem für die Welt dar. Europa organisiert sich nämlich so, dass die Mehrkosten des eigenen Weges auch allen Handelspartnern außerhalb der EU auferlegt werden sollen, um unsere eigenen Märkte zu „schützen“. Hierfür gibt es in der ökonomischen Literatur den Begriff des **Protektionismus**. Den weist man in der EU aber weit von sich. Stattdessen wird die kritische Situation im Klimaschutz als Begründung benutzt. D. h., dass die EU, wie so oft, **Eigeninteressen** verfolgt, dann aber Narrative verbreitet (insbesondere gegenüber den eigenen Bürgern), dass wir die „Guten“ sind, dass wir uns für den Klimaschutz viele Mühen antun und für die **ganze Welt ein Vorbild sind**.

An zwei Stellen wird der Protektionismus besonders deutlich: einerseits beim **Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz**, das europäische Unternehmen zwingt, in ihren Lieferketten sicherzustellen, dass alle Lieferanten die europäischen Standards im Klimabereich beachten bzw. sich andernfalls von diesen Lieferanten trennen müssen. Das widerspricht den Regeln der **Welthandelsordnung**, denen fast alle Staaten zugestimmt haben. Die zweite Stelle, an der es Probleme geben wird, ist der geplante Außenzoll an den EU-(Außen-)Grenzen für alle Produkte, bei denen CO₂ im Entstehungsprozess der Produkte nicht ähnlich besteuert wurde – und entsprechend niedrig ist –, wie das jetzt in der EU geregelt wird. Dies widerspricht klar der „**same product logic**“ der WTO, gemäß derer Produkte nur dann verschieden behandelt werden dürfen, wenn sie physikalisch anders sind, also sich in der Funktion unterscheiden. Unterschiede im Herstellungsprozess, also z.B. Herstellung mit mehr oder weniger CO₂-Emissionen, sind als Differenzierungsgrund in der WTO-Logik nicht zugelassen.

Nun ist es unklar, ob die EU diese Maßnahmen, wie vorbereitet, umzusetzen versuchen wird. Nicht auszuschließen ist, dass starke Marktakteure und Handelspartner mit einem Wirtschaftskrieg drohen werden. Wenn die EU es aber versucht, wird sie sich bzgl. Carbon Capture und Nuklearenergie selber in eine Zwickmühle bringen. Es ist damit zu rechnen, dass Lieferanten niedrige CO₂-Belastungen ihrer Produkte **richtigerweise** auch dann deklarieren werden, wenn diese niedrigeren Belastungen über den Einsatz von **Carbon Capture** und/oder **Nuklearenergie** erreicht werden. Sollte die EU das nicht akzeptieren, hat sie in internationalen Rechtsstreitigkeiten eine **nicht haltbare Position**. Akzeptiert sie hingegen die entsprechenden, naturwissenschaftlich unbestreitbaren Tatbestände, wird es in den internen EU-Diskussionen kaum noch realistische Chancen geben, Carbon Capture und/oder Nuklearenergie abzulehnen. Nuklearenergie ist ja auch in der entsprechenden **EU-Taxonomie** inzwischen als nachhaltig anerkannt.

Eine neue Situation ergibt sich zwischenzeitlich bzgl. möglicher Auseinandersetzungen vor der WTO-Schiedsgerichtsbarkeit. Hier ist es wichtig, wie stark die in eine

Auseinandersetzung verwickelten Akteure ökonomisch sind, auch bzgl. der jeweiligen Handelsvolumina. Denn die Seite, die vor dem Schiedsgericht gewinnt, darf in einem bestimmten Umfang **Strafzölle gegen die andere Seite verhängen**. Dass sich jetzt die **BRICS-Staaten** mit ihrem insgesamt sehr hohen Handelsvolumen in einer gemeinsamen Position dieses Themas annehmen (vgl. die Hinweise zum Abschluss von Abschnitt 5), verändert die Machtbalance **zulasten der EU**, denn die EU stünde an dieser Stelle einer großen Handelsmacht gegenüber. Es sei wegen der Bedeutung noch einmal festgehalten, dass sich die BRICS-Staaten auf ihrer jüngsten Sitzung in Südafrika im Communiqué „XV BRICS Summit – Johannesburg II Declaration“ vom 23. August 2023 energisch dagegen wenden, dass unter **dem Vorwand „Klimaschutz“** Handelsregeln der WTO außer Kraft gesetzt werden und Entwicklungs- und Schwellenländer mit neuen Extrakosten belegt werden. Explizit erwähnt wird in dem Communiqué die Rolle fossiler Brennstoffe für den Erhalt der Energiesicherheit bei der Energiewende.

XV BRICS Summit – Johannesburg II Declaration, art. 63³⁶

“We oppose trade barriers including those under the pretext of tackling climate change imposed by certain developed countries and reiterate our commitment to enhancing coordination on these issues. We underline that measures taken to tackle climate change and biodiversity loss must be WTO-consistent and must not constitute a means of arbitrary or unjustifiable discrimination or a disguised restriction on international trade and should not create unnecessary obstacles to international trade. Any such measure must be guided by the principle of common but differentiated responsibilities and respective capabilities (CBDR-RC), in the light of different national circumstances. We express our concern at any WTO inconsistent discriminatory measure that will distort international trade, risk new trade barriers and shift burden of addressing climate change and biodiversity loss to BRICS members and developing countries.”

8. Die deutsche Klimapolitik hat ein Ideologieproblem

Das Ideologieproblem in der Umsetzung der Energiewende (die „**All Electric**“-Philosophie, vgl. Abschnitt 4) bedeutet für unser Land ein hohes Risiko der **Absenkung des Lebensstandards**. Es wäre nicht das erste Mal, dass ein Volk wegen einer Ideologie verarmt, man denke nur an Maos „großen Sprung“ in China. Deutschland könnte, aufgrund seines großen Einflusses in Europa und seiner starken Rolle in der internationalen Entwicklungspolitik, andere Länder mit in die Verarmung ziehen. Das ist tragisch.

Die steigenden Belastungen der deutschen Bevölkerung wie auch der Staatskasse im Energie- und Klimabereich sind, wie oben schon beschrieben, Folgen der „**All Electric**“-Philosophie.

³⁶ XV BRICS Summit (2023): „Johannesburg II Declaration (2023)“, <https://brics2023.gov.za/wp-content/uploads/2023/08/Jhb-II-Declaration-24-August-2023-1.pdf>.

Die Forderung, den Energiebedarf allein aus erneuerbaren Ressourcen zu generieren, erscheint als wenig realistisch. Dieser Weg ist wenig wirksam und zugleich prohibitiv teuer bei der Lösung der Energie- und Klimaprobleme. „All Electric“ ist daher keine besonders kluge Ideologie. Auch wenn einige Branchen daran sehr viel Geld verdienen, das allerdings die Bürger oder der Staat aufbringen müssen. Darum haben wir in Deutschland mittlerweile die höchsten Stromkosten Europas, wobei auch die CO₂-Zertifikatekosten aufgrund des Strommixes eine wichtige Rolle spielen. Hinzu kommt, dass „All Electric“ insbesondere die weltweiten Klima- und Energieprobleme nicht lösen kann.

Weltweit ist dieser Weg zudem **nicht friedensfähig**. Wie oben dargestellt, ist dieser Ansatz weder für Staaten wie China oder Russland, noch die Öl-Staaten oder die Entwicklungs- und Schwellenländer zielführend. Allein diese Tatsache schließt die „All Electric“-Philosophie zur Lösung der Weltenergie- und Klimaprobleme aus. Denn es wird ohne die Beteiligung von China, Russland und den Öl-Staaten keine Lösung des globalen Klimaproblems geben. Sicherlich werden sich diese Staaten keine Strategie aufzwingen lassen, die in der Sache nicht gelingen kann und gleichzeitig ihren Wohlstand massiv bedroht. Dies vor allem deshalb, weil es zur Lösung des Klimaproblems sehr viel bessere Wege gibt.

Auf der Klimakonferenz in Dubai Anfang Dezember 2023 wird das ein Hauptthema sein. Die Auseinandersetzung um das Thema „**fossile Energie vs. fossile Emissionen**“ und damit um Carbon Capture als unverzichtbares Element der Energietransformation wird dort zentral diskutiert werden. Deutschland sollte hier rasch umdenken. Auch bezüglich des Umgangs mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

9. Welche Maxime favorisiert die deutsche Politik für Entwicklungs- und Schwellenländer?

Das Wunschprogramm lautet „**Renewables Only**“. Der Ausbau der Nutzung fossiler Energieträger soll in diesen Ländern möglichst vermieden werden. Richtig betrachtet ist das ein Programm, das dem Klimaschutz dient, indem es die **ärmeren Länder in Armut hält**, nicht zuletzt dadurch, dass ihnen die Nutzung ihrer eigenen fossilen Ressourcen erschwert wird. Genutzt werden hierzu **Taxonomien**, die angeblich auf Nachhaltigkeit abzielen. Die reichen Länder geben dazu der Bankenwelt und insbesondere auch den internationalen Entwicklungsbanken und dem internationalen Währungsfonds Anforderungen vor, die letztlich die Logik durchsetzen sollen, dass Nachhaltigkeit die Finanzierung der Nutzung fossiler Energieträger ausschließt. Das läuft völlig den Interessen ärmerer Länder, als den Adressaten von Weltbank und Entwicklungsbanken, entgegen, die sich aus der Armut befreien wollen. Eine solche Befreiung ist ein zentrales, internationales Nachhaltigkeitsanliegen. Diese Staaten haben dazu nach UN-Logik das Recht, ihre **CO₂-Emissionen weiter zu erhöhen**, weil sie ohnehin nur wenig Emissionen erzeugen und historisch kaum zu Emissionen beigetragen haben. Insbesondere darf aus UN-Sicht jedes Land seine eigenen Ressourcen nutzen, um sich zu entwickeln, natürlich auch fossile Energieträger. Dabei ist zu beachten, dass die reichen Länder nach wie vor mehr als 60 % ihrer Bruttoenergie auf Basis fossiler Energieträger nutzen.

Die ärmeren Länder sprechen in diesem Zusammenhang von der „**Heuchelei des Nordens**“³⁷, der ja, wie erwähnt, nach wie vor mehr als 60 Prozent seiner Bruttoenergie aus fossilen Brennstoffen gewinnt. An dieser Stelle sei erneut auf Punkt 63 der 2023, anlässlich des Summits in Südafrika, veröffentlichten Erklärung der **BRICS-Staaten** verwiesen. Die Entwicklungs- und Schwellenländer orientieren sich in dieser Situation auch deshalb **in Richtung China als Partner**. Konflikte sind absehbar. Für die reiche Welt ist das keine gute Perspektive, für die übrige Welt auch nicht. Wohlstand und Wachstum für die Welt sind so nicht erreichbar.

10. Zusammenfassung

Wir verfolgen in Deutschland eine verfehlte Energie- und Klimapolitik. Als einziges Industrieland steigen wir gleichzeitig aus Nuklearenergie und fossilen Energieträgern aus. Als Folge der „All Electric“-Philosophie wird unser Wohlstand und letztlich auch der Frieden auf der Welt gefährdet. Alle Klimaziele sind anders und preiswerter zu erreichen, nämlich durch eine Kopplung der Neuen Erneuerbaren mit zuverlässig steuerbarer Energie, das heißt mit Kernenergie oder mit fossiler Energie und Carbon Capture, wobei Carbon Capture als „Game-Changer“ fungiert. **Dieser Ansatz ist weltweit extendierbar**. Im Gegensatz zur jetzigen, falsch orientierten Philosophie erlaubt das irgendwann die Lösung der weltweiten Herausforderungen. Heute sind weltweit noch fast 80 Prozent der Primärenergie fossiler Natur. Transformations-Maßnahmen kosten generell viel Zeit. Auch wird man eher umbauen, als abreißen. Für die Ölstaaten, China, Russland und viele andere, geht es in der Frage fossil oder nicht um den Erhalt ihres Wohlstandes. Für viele Entwicklungs- und Schwellenländer geht es entsprechend um den erstmaligen Aufbau von Wohlstand. Die „All Electric“-Philosophie würde den einen ihre ökonomische Basis nehmen, bei den anderen wird mit „Renewables Only“ weitestgehend die Armut perpetuiert.

Niemand will sich das bieten lassen. China und Russland wissen sich gegen solche Zumutungen zu wehren. Die Entwicklungs- und Schwellenländer sprechen, wie oben schon erwähnt, von der „**Heuchelei des Nordens**“ und orientieren sich stärker in Richtung China und Russland. Die Unzufriedenheit der **BRICS-Staaten** zeigt sich deutlich in der oben zitierten Johannesburg Declaration. Die verfehlte, in Deutschland vielfach vertretene, „All Electric“-Philosophie gilt es rasch zu kippen. Sie ist der Gegenpunkt zu einer Energiebereitstellungs-Philosophie, die auf zwei Säulen ruht, wobei Carbon Capture ein zentrales Element der zweiten Säule ist. Die beiden Säulen der Energiewirtschaft sind dabei die Neuen Erneuerbaren einerseits und die zuverlässig steuerbaren Energien, also grün-fossil, nuklear, oder Alte Erneuerbare andererseits. Das gilt es zu managen. Navigation in schwierigem Gelände.

³⁷ Herlyn, E., Radermacher, F. J. (2022): „Die ‚Heuchelei‘ der reichen Länder. Einblicke in die aktuelle internationale Debatte um den richtigen Weg zur Transformation des globalen Energiesystems“, <https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/08/heuchelei.pdf> (abgerufen 28.08.2023).

II. CCS-Technologie in Deutschland und Europa

Prof. Dr. Hans-Joachim Kümpel

Die wichtigste und langfristigste Möglichkeit zur Speicherung von CO₂ bietet der geologische Untergrund – in erschöpften Erdgaslagerstätten und tiefen salinaren Aquiferen. Hans-Joachim Kümpel war von 2007 bis 2016 Präsident der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und ist einer der angesehensten Wissenschaftler auf dem Gebiet Carbon Capture and Storage (CCS). So war er beispielsweise Leiter des acatech-Projekts „CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie“.

1. Zur Geschichte

Der geologische Untergrund enthält neben Fest- und Lockergesteinen große Mengen an Flüssigkeiten und Gasen. Letztere treten sowohl in gelöster Form auf, in mineralhaltigen Wässern, als auch gasförmig. Die Fluide füllen kleine Hohlräume, Klüfte und Risse im Gestein, vor allem aber winzige Poren, die jede Gesteinsart besitzt. Unter den Festgesteinen besitzen besonders Sandsteine in den Zwischenräumen ihres Korngerüsts viel Porenvolumen. Das Wissen um Vorkommen, chemische Zusammensetzung, Temperatur, Druck, Alter, Löslichkeit und Beweglichkeit der Fluide im geologischen Untergrund und Kenntnisse über moderne Untersuchungsmethoden sind zentrale Inhalte der Fachgebiete Hydrogeologie und Reservoirgeologie.

Beide Wissensgebiete finden in vielen Fragestellungen des Alltags ihre Anwendung: Aufschluss, Förderung und Schutz von Grund- und Mineralwasservorkommen, Nutzung balneologischer Tiefenwässer, Beeinträchtigung von Bergbauaktivitäten, Verbringung von festen und flüssigen Abfallstoffen in den Untergrund, die Zirkulation von Wässern zur Gewinnung geothermischer Energie und das Aufsuchen und Fördern fossilen Erdöls und Erdgases, solange andere Energieträger, erneuerbare Energien und Ersatzstoffe nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen.

Erdgasspeicherung im geologischen Untergrund ist Routine – und akzeptiert

Natürliche, massenhaft im Untergrund vorhandene Gase sind Methan (Erdgas/Grubengas), andere flüchtige Kohlenwasserstoffe, Kohlendioxid (CO₂), Wasserdampf und stickstoff- sowie schwefelhaltige Gase. Aktive Vulkangebiete sind sichtbare Zeugen der fortlaufenden Ausgasung der Erde. **Fachwissen um den geologischen Untergrund war die Voraussetzung dafür, dass man bereits vor Jahrzehnten Erdgasspeicher in tiefen Sandsteinschichten anlegte, um die saisonal schwankende Nachfrage nach diesem Energieträger abzupuffern und so auf stadtbildprägende Gasometer verzichten konnte. Das Errichten unterirdischer Speicher in porösen Sandsteinschichten, aus denen zuvor Erdöl bzw. Erdgas gefördert wurde, oder in technisch ausgesolten Kavernen in mächtigen Steinsalzlagen wird von der Zivilgesellschaft nicht in Frage gestellt. Havarien mit ernsthaften Folgen sind nicht bekannt. Die Vorratshaltung von Erdöl und Erdgas in geologischen Speichern, künftig auch Wasserstoff, ist tägliche Praxis.**

Dies vorausgeschickt lagen Ende der 1990er Jahre Überlegungen nahe, CO₂, das als Begleitgas zu Erdöl/Erdgas gefördert wurde, aber nicht verwertbar war, zurück in den Untergrund zu pumpen. Auf diese Weise gelangte es nicht in die Atmosphäre. Das norwegische Unternehmen Statoil³⁸ setzte bereits 1996 ein solches Vorhaben im Sleipner-Projekt um und re-injiziert seither jährlich bis zu 1 Million Tonnen CO₂ in eine untermeerische Sandsteinformation. Das Reservoir, rund 250 Kilometer vor der norwegischen Küste und ca. 800 Meter unter dem Meeresboden gelegen, ist ein sogenannter salinärer Aquifer, dessen Porenraum mit einer salzhaltigen Lauge gefüllt ist. Mit einer Breite von 150 Kilometern erstreckt er sich in Längsrichtung über mehrere hundert Kilometer. Nach oben hin ist er durch eine undurchlässige geologische Deckschicht abgedichtet, was vor der CO₂-Einspeicherung durch umfangreiche geophysikalische Messungen und Labortests an zuvor entnommenen Bohrproben überprüft wurde. Durch ein begleitendes Monitoring konnte in den Folgejahren die stetige seitliche Ausbreitung des sich in der Salzlauge lösenden CO₂ verfolgt und so die Einsatzreife der tiefengeologischen Speicherung nachgewiesen werden.

Erfahrungen mit CCS liegen vor – über Jahrzehnte

Mittlerweile sind weltweit verschiedene CCS-Großprojekte der Abscheidung, des Transports und der Speicherung von CO₂ in Betrieb, andere befinden sich in der Entwicklung oder in Planung, wieder andere sind aus verschiedenen Gründen gescheitert oder liegen zeitlich hinter den Erwartungen zurück. Entsprechend hat der Erfahrungshorizont zugenommen und wächst ständig weiter. Um nur zwei Vorhaben zu nennen: Im Zementwerk Norcem in Brevik/Norwegen will Heidelberg Materials 2024 eine CCS-Anlage in Betrieb nehmen, die jährlich 400.000 Tonnen CO₂-Emissionen abscheiden und untermeerisch speichern soll³⁹. Im Zementwerk Höver bei Sehnde, Region Hannover, will der Betreiber Holcim bereits im laufenden Jahr die Leistung, Wirtschaftlichkeit und das Einsatzverhalten einer erweiterten CO₂-Abscheidung testen⁴⁰. **Einer CO₂-Einspeicherung geht immer eine umfassende, standort-spezifische geologisch-geophysikalische Vorerkundung der potenziellen Speicherformation voraus. Sie ist die Grundlage für eine Prüfung und abschließende Bewertung der Eignung durch die zuständige Bergbehörde, ein Prozess, der mit hoher Zuverlässigkeit eine umweltgerechte und langzeitsichere Speicherung gewährleistet.**

Im Jahr 2005 hatte die Europäische Kommission eine Arbeitsgruppe zum Thema „Abscheidung und geologische Speicherung von Kohlendioxid“ eingerichtet und sie beauftragt zu prüfen, ob die CCS-Technologie als Klimaschutzmaßnahme geeignet ist. Im Ergebnis forderte die Arbeitsgruppe einen Rechtsrahmen für den Einsatz von CCS. Dieser wurde mit einer Richtlinie⁴¹ über die geologische Speicherung von CO₂ bereitgestellt, die am 12. Juni 2009 in Kraft trat. Als CCS wird im Folgenden ein Prozess verstanden, bei dem CO₂ entweder an Punktquellen fossiler CO₂-Emissionen industrieller oder energiebezogener Art oder an biogenen Punktquellen abgeschieden oder aus der

³⁸ Heute Equinor.

³⁹ Norcem (2022): „Brevik CCS – Tero emission by 2023“, <https://www.heidelbergmaterials-northerneurope.com/en/brevik-ccs> (abgerufen 28.08.2023).

⁴⁰ Holcim Deutschland (2021): „Carbon Capture: Holcim investiert in die Zukunft“, <https://perspektiven.holcim.de/dekarbonisierung/carbon-capture-holcim-investiert-in-die-zukunft/> (abgerufen 28.08.2023).

⁴¹ Richtlinie 2009/31-EG.

Atmosphäre entnommen, aufbereitet, komprimiert und zu einer Speicherstätte transportiert und im geologischen Untergrund dauerhaft von der Atmosphäre isoliert wird (vgl. Abb. 3). Insbesondere in Nordamerika wird unter CCS auch das Verpressen von CO₂ in kohlenwasserstoffhaltige Lagerstätten mit dem Ziel verstanden, den Fluiddruck im Reservoir zu erhöhen und so die Ausbeute von Erdöl oder Erdgas zu steigern (enhanced oil/gas recovery). Auch hierbei verbleibt der weitaus größte Teil des CO₂ dauerhaft in der Lagerstätte.⁴²

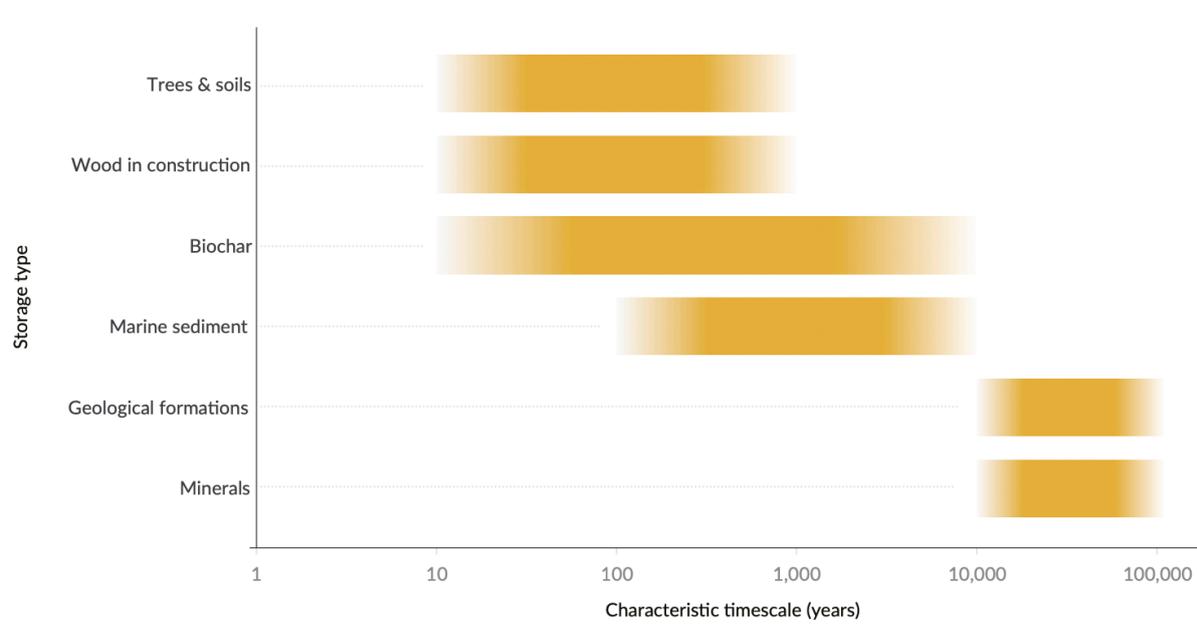


Abbildung 3: Vergleich der Zeiträume, über die verschiedene Speichermöglichkeiten CO₂ binden können. Quelle: GAO, 2022.⁴³

In der CCS-Richtlinie der EU-Kommission wird die Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂ als Brückentechnologie bezeichnet. Erklärtes Ziel war, einen Beitrag zur Abschwächung des Klimawandels zu leisten, ohne Anreize zu bieten, die Zahl fossil befeuerter Kraftwerke auszuweiten. Die Förderung von Energiesparmaßnahmen, des Ausbaus erneuerbarer Energien und des Einsatzes anderer kohlenstoffarmer Technologien sollten nicht behindert werden.

Noch im Jahr 2009 verabschiedete die Bundesregierung einen ersten Entwurf für ein Gesetz, das die großtechnische Anwendung der CCS-Technologie mit einer unterirdischen Speicherung von CO₂ in Deutschland ermöglichen sollte. Im Rahmen eines Pilotvorhabens am Standort Ketzin/Havel wurden unter Leitung des Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ) und Aufsicht des Landesamts für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) die Einlagerung und Ausbreitung von CO₂ in einer geologischen Speicherformation während einer Injektions- und Postinjektionsphase wissenschaftlich untersucht. Von Juni 2008 bis August 2013 wurden ca. 67.000 Tonnen CO₂ in einen porösen Sandstein in einer Tiefe von 630 bis 650 m injiziert – komplikationslos. Die Genehmigung erfolgte für den ‚Betrieb eines Forschungsspeichers‘ nach Bergrecht, die Menge des injizierten CO₂ war moderat, Forschungsinteressen standen im Mittelpunkt, Akzeptanz vor Ort war gegeben.

⁴² Jährlich mehrere 10 Millionen Tonnen CO₂.

⁴³ United States Government Accountability Office (2022): „Technology Assessment – Decarbonization“.

Zu damaliger Zeit war für Deutschland nicht ausgeschlossen, CCS auch für einen klimaverträglichen Weiterbetrieb von Kohlekraftwerken zu nutzen. Erste Kraftwerksbetreiber entwickelten bereits diesbezügliche Aktivitäten, was in Teilen der Bevölkerung bald auf Widerstand stieß. Von öffentlich auftretenden Gegnern wurden insbesondere Sicherheitsbedenken bezüglich der Speicherung von CO₂ vorgebracht. Vorhaben von RWE (Nordfriesland) und Vattenfall (Ostbrandenburg) wurden daraufhin beendet, ohne dass eine fachliche Erkundung des Untergrunds durchgeführt bzw. abgeschlossen wurde. In der Altmark, Sachsen-Anhalt, wurden im Rahmen eines Verbundforschungsprojektes⁴⁴ unter Beteiligung von GDF SUEZ und Vattenfall zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt, aber kein CO₂ gespeichert. Bei all diesen Vorhaben ging es um eine großvolumige CO₂-Speicherung. Industrieakteure, denen viele misstrauten, spielten eine maßgebliche Rolle. Mit Blick auf die zum Oktober 2009 anstehenden Bundestagswahlen wurde das Gesetzgebungsverfahren gestoppt und in die nächste Legislaturperiode verlagert.

Das Kohlenstoffdioxid-Speicherungsgesetz hat CCS in Deutschland ausgebremst

Die nachfolgende Bundesregierung veröffentlichte im Jahr 2010 ein Energiekonzept, das bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgas (THG)-Emissionen von 80 bis 95 Prozent vorsah. Um dieses Ziel zu erreichen, sollte CCS sowohl in energieintensiven Industriezweigen mit hohen prozessbedingten CO₂-Emissionen als auch bei der Verstromung fossiler Energieträger zum Einsatz kommen. **Der vorgelegte CCS-Gesetzesentwurf sah im Unterschied zur vorherigen Version allerdings nur die Erprobung und Demonstration einer unterirdischen CO₂-Speicherung vor. Die pro Speicherreservoir erlaubte CO₂-Menge war auf jährlich drei Millionen Tonnen begrenzt, bundesweit auf jährlich acht Millionen Tonnen CO₂. Anträge mussten bis Ende 2016 gestellt werden.** Über die Frage einer großtechnischen Anwendung sollte erst entschieden werden, wenn nach der Erprobungsphase die Unbedenklichkeit der CCS-Technologie nachgewiesen war.

Kontrovers debattiert, schließlich aber aufgenommen wurde eine sogenannte Länderklausel, nach der die Bundesländer die CO₂-Speicherung nur in bestimmten Gebieten für zulässig oder in bestimmten Gebieten für unzulässig erklären konnten. **Am 24. August 2012 trat das „Gesetz zur Demonstration und Anwendung von Technologien zur Abscheidung, zum Transport und zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid“ in Kraft. Artikel 1 enthält das „Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von CO₂“, das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz, kurz KSpG.**

Die Länder Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein haben von der Länderklausel umgehend Gebrauch gemacht und die CO₂-Speicherung für ihr Landesgebiet vollumfänglich ausgeschlossen⁴⁵. Die Bremer Bürgerschaft hatte schon 2010 beschlossen, Anträge auf unterirdische CO₂-Speicherung und den Bau von CO₂-Leitungen abzulehnen⁴⁶. Brandenburg hat sich gegen eine Speicherung von CO₂ ausgesprochen, solange keine bundeseinheitlichen Regelungen in Kraft treten⁴⁷.

⁴⁴ CLEAN (CO₂ Large-Scale Enhanced Gas Recovery in the Altmark Natural Gas Field).

⁴⁵ NKSpG vom 14.7.2015, KSpG SH vom 27.4.2014, KSpAusschlG M-V vom 30. Mai 2012.

⁴⁶ Beschlussprotokoll der Bremer Bürgerschaft vom 20.05.2010.

⁴⁷ Landtag Brandenburg, Drs. 5/7843.

Als beispielhaft für die zwischen Bund und Ländern geführte Kontroverse im Vorfeld der Verabschiedung der Landesgesetze mag die Situation in Niedersachsen gelten.

Landesregierung Niedersachsen, Pressemitteilung vom 26.08.2014⁴⁸

„Die Niedersächsische Landesregierung hat in ihrer Sitzung am (heutigen) Dienstag das Niedersächsische Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (NKSpG) im Entwurf verabschiedet und zur Verbandsbeteiligung freigegeben. Das Gesetz soll sicherstellen, dass es in Niedersachsen keine dauerhafte Speicherung von Kohlendioxid (CO₂) geben wird. / In weiten Teilen Niedersachsens fehlen die geologischen Voraussetzungen, um Kohlendioxid dauerhaft und sicher unterirdisch einlagern zu können. In anderen Gebieten stehen einer Speicherung gewichtige Belange entgegen, wie beispielsweise der Schutz vorhandener Wasser- und Heilquellenschutzgebiete, der Erhalt der Kulturlandschaft, touristische Interessen oder aber auch bereits erteilte Bergbauberechtigungen. / Die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid – die so genannte CCS-Technologie – ist national wie international hoch umstritten und birgt nach Auffassung der Landesregierung durchaus Risiken. Wirtschaftsminister Olaf Lies sagte, Untersuchungen hätten gezeigt, dass Niedersachsen nicht geeignet sei, um Kohlendioxid dauerhaft und sicher unterirdisch einzulagern. Der jetzt vorgelegte Gesetzentwurf trage diesem Umstand Rechnung und schließe daher die Anwendung einer derartigen Technologie aus. Umweltminister Stefan Wenzel wies darauf hin, dass es im Land mit fragwürdigen Endlagerprojekten und den damit verbundenen umweltpolitischen Risiken viele schlechte Erfahrungen gegeben habe. / ... / Aufgrund einer Länderklausel, für die sich Niedersachsen im Vorfeld eingesetzt hatte, können Länder auf der Grundlage von objektiven Kriterien die Erprobung und Demonstration von Techniken zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid in bestimmten Gebieten ausschließen. Von dieser Länderklausel macht Niedersachsen mit dem vorliegenden Gesetzentwurf nun Gebrauch.“

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) hat den fachlichen Ausführungen des Entwurfs des Niedersächsischen Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes⁴⁹ in mehreren Punkten widersprochen und auf eine Reihe von Defiziten hingewiesen. Der Gesetzentwurf der Landesregierung wurde dennoch ohne nennenswerte Änderungen verabschiedet.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stellungnahme vom 03.03.2015⁵⁰

„Begründungen werden häufig ohne Nennung von Quellen bzw. Nachweisen gegeben; Annahmen entsprechen zum Teil nicht dem Stand von Wissenschaft und Forschung; potenzielle Nutzungskonflikte sind lückenhaft dargestellt, die Abwägungen sind einseitig und

⁴⁸ Landesregierung Niedersachsen (2014): „Landesregierung wird unterschiedliche CO₂-Speicherung gesetzlich ausschließen“, <https://www.stk.niedersachsen.de/startseite/presseinformationen/landesregierung-wird-unterirdische-co2-speicherung-gesetzlich-ausschließen--niedersachsen-ist-fuer-anwendung-von-ccs-nicht-geeignet-127369.html>.

⁴⁹ NKSpG, Drs. 17/2608.

⁵⁰ Landesregierung Niedersachsen (2014).

nicht nachvollziehbar begründet; durch das Gesetz wird eine im KSpG festgelegte Eignungsprüfung konkreter Standorte vorweggenommen.“

Große Kapazitäten für heimische CO₂-Speicherung – on- wie offshore

Die BGR hatte als Geologischer Dienst des Bundes in vorausgehenden Untersuchungen die CO₂-Speicherpotenziale für den geologischen Untergrund Deutschlands abgeschätzt. Mit ca. 9 Milliarden Tonnen CO₂ an Land (onshore) und drei Milliarden Tonnen im Nordseesektor (offshore) sind sie beträchtlich. Bei einer prognostizierten künftig unvermeidbaren Speichermenge von jährlich 50 Millionen Tonnen CO₂ würden diese Speicher einen CCS-Betrieb über einen Zeitraum von 240 Jahren ermöglichen. Noch größere Speicherkapazitäten liegen im marinen Bereich anderer Nordsee-Anrainerstaaten und unter der Norwegischen See vor (Abb. 4).

Im Hinblick auf das Erreichen der Klimaschutzziele, das in Deutschland durch das CCS-Quasi-Verbot der Bundesländer nun erschwert war, wurde die Lage auch als „Pyrrhussieg der Klimaschützer“ bezeichnet⁵¹. Die Möglichkeit, CO₂-Emissionen der Grundstoffindustrie und aus dem Umstieg auf den Energieträger (blauen) Wasserstoff durch Einsatz von CCS von der Atmosphäre fernzuhalten, war verbaut. Selbst den nach derzeitigem Wissensstand in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts für erforderlich gehaltenen Weg, negative Emissionen mithilfe einer Speicherung von CO₂, welches der Atmosphäre entzogen wird, zu erzielen, war ein Riegel vorgeschoben.

Von der Option der Erprobung der CO₂-Speicherung, wie es das KSpG vorsah, wurde aufgrund der Länderverbote kein Gebrauch gemacht, Anträge bis zum Ablauf der eingeräumten Frist (Ende 2016) wurden nicht gestellt. Der umfassenden Bewertung von CCS-Maßnahmen, die für 2017 vorgesehen war, fehlte damit die Basis. Gleichwohl sieht das KSpG alle vier Jahre die Vorlage eines Evaluierungsberichts der Bundesregierung an den Bundestag vor. Einen solchen Bericht hat die Bundesregierung 2018 erstellt und den Bundestag unterrichtet⁵².

Ein aktualisierter Bericht wurde am 21.12.2022 vom Bundeskabinett beschlossen⁵³. Er stellt den technischen Fortschritt, die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und den potenziellen Beitrag der CCS-Technologie für den Klimaschutz dar. Der Bericht kommt zu dem Ergebnis, dass der aktuelle Rechtsrahmen dem Einsatz von CCS und CCU (Carbon Capture and Utilization) entgegensteht. So sei etwa die Genehmigung von CO₂-Leitungen zum Zwecke von CCU rechtlich nicht möglich. Gleichzeitig sehen aber die in dem Bericht analysierten Klimaneutralitätsstudien den Einsatz beider Technologien als Beitrag zum Erreichen der im Klimaschutzgesetz festgelegten Treibhausgasneutralität für Deutschland bis 2045 vor. Empfehlungen für mögliche Maßnahmen, mit denen Unsicherheiten in der bestehenden Rechtslage behoben werden könnten, stünden unter dem Vorbehalt einer vertieften Prüfung.

⁵¹ Pötter, Bernhard (2013): „Pyrrhussieg der Klimaschützer - Kohlendioxid soll in Deutschland nicht unterirdisch gelagert werden. Was die Umweltbewegung freut, kann gefährlich für das Weltklima werden“. In: taz online vom 13.09.2013, <https://taz.de/Kommentar-CCS-Technik/!5059223/>.

⁵² Drs. 19/6891 v. 21.12.2018.

⁵³ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK, 2023): <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/12/20221221-bundeskabinett-beschliesst-evaluierungsbericht-zum-kohlendioxid-speicherungsgesetz-kspg.html> (abgerufen 28.08.2023).

Der Bundestag hat die für März 2023 vorgesehene Beratung über den Bericht von der Tagesordnung abgesetzt und zur weiteren Beratung an den federführenden Ausschuss für Klimaschutz und Energie überwiesen. Erst in der für den Herbst 2023 erwarteten Vorlage einer Carbon Management Strategie (CMS) soll festgelegt werden, wie CCU und CCS in ein Portfolio von Maßnahmen zum Erreichen der Treibhausgasneutralität in Deutschland eingebettet werden können.

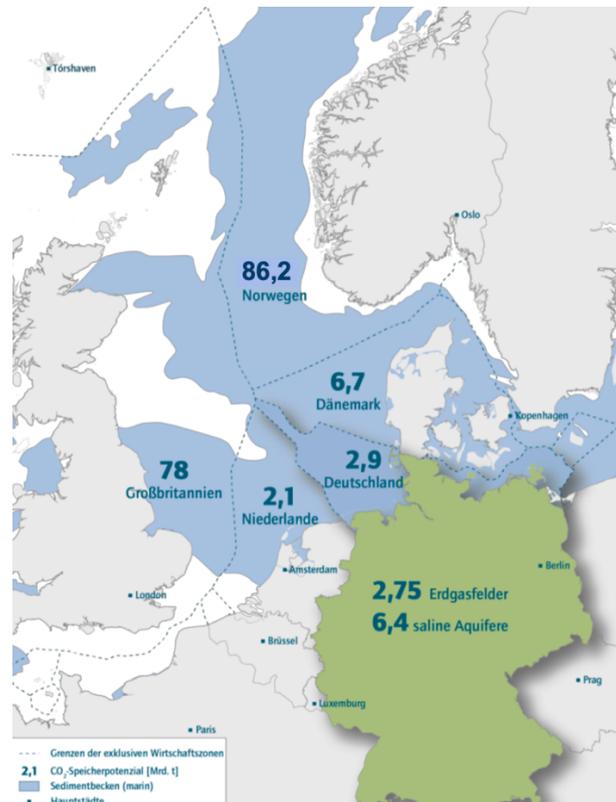


Abbildung 4: CO₂-Speichermöglichkeiten unter der Nord- und Ostsee. Quelle: acatech, 2018⁵⁴, korrigierte Angabe für Norwegen.

2. Kritik an CCS

Die Wahrnehmung der CCS-Technologie im öffentlichen Raum ist aufgrund der oben skizzierten Vorgeschichte skeptisch bis ablehnend. **Zwar wurde und wird von Wissenschaftsseite auf umfangreiche Erfahrungen im Umgang mit unterirdischen flüssigen und gasförmigen Ressourcen verwiesen und CCS grundsätzlich als eine risikoarme, gut kontrollierbare Technologie bewertet. Dennoch liegt insbesondere bei zivilgesellschaftlichen Akteuren im Umweltbereich eine anhaltende Ablehnung vor.**

⁵⁴ Acatech (2018): „CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. Analyse, Handlungsoptionen und Empfehlungen“.-

Wissenschaftliche Bewertungen finden schwer Gehör

Dafür lassen sich im Wesentlichen drei Gründe anführen: Einerseits wird von Skeptikern behauptet, dass die langfristige unterirdische CO₂-Speicherung mit hohen, nicht beherrschbaren Risiken einhergehe. Dementsprechend wird beklagt, dass Risiken und Haftungsfragen unzureichend geklärt seien. Gezielt werden Vergleiche mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle aus der Kernenergienutzung gezogen.

Andererseits lag anfangs der Fokus der öffentlichen Diskussion auf der Anwendung von CCS im Bereich der Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern, vornehmlich durch Kohlekraftwerke. Es bestand aber die Hoffnung, bei der Erzeugung von elektrischer Energie durch Windräder, Photovoltaikanlagen und Biomasse in absehbarer Zeit Treibhausgasneutralität ohne CCS erreichen zu können. Auch sah man in der Einführung von CCS für laufende oder neu zu errichtende Kraftwerke ein Festschreiben von Pfadabhängigkeiten (Lock-in-Effekte) und damit eine Konkurrenz zu erhofften Investitionen in Anlagen einer regenerativen, wenn auch volatilen Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie.

Und schließlich spielten Aspekte der Verteilungsgerechtigkeit eine Rolle. Vielfach bestand der Eindruck, dass der weniger dicht besiedelte Norden und Osten Deutschlands für die als risikobehaftet angesehene CO₂-Speicherung aufkommen solle, während die maßgeblichen CO₂-Emittenten vornehmlich im bevölkerungsreicheren Süden und Westen angesiedelt sind. Nutzen und empfundene Risiken fielen geografisch auseinander.

Dass die Produktion von Zement, Eisen und Stahl, Papier, Glass, Keramiken und anderer Grundstoffe noch auf längere Sicht unvermeidbar mit beträchtlichen CO₂-Emissionen verbunden ist, die durch CCS weitgehend vermieden werden könnten, wurde ausgeblendet, ebenso der potenzielle Beitrag von CCS bei der Gewinnung von blauem Wasserstoff (aus Erdgas, mit Speicherung des dabei anfallenden CO₂) bei dem sich abzeichnenden Hochlauf einer Wasserstoffindustrie. Mit großen Mengen Wasserstoff, so die wiederum berechtigte Hoffnung, lassen sich künftig Eisen- und Stahlwerke emissionsarm betreiben.

Bei Debatten um die CCS-Technologie wird von Akteuren aus dem Umweltbereich vor allem die Speicherung im tiefen geologischen Untergrund als risikoreich dargestellt – mehr als die CO₂-Abscheidung und der Transport von CO₂. Neben Fragen nach der Notwendigkeit und möglichen Anwendungsgebieten für die Technologie werden insbesondere Bedenken aufgrund vermeintlich nicht tragbarer Umwelt- und Gesundheitsgefahren geäußert.

Risiken und Gefahren von CCS-Skeptikern überzeichnet

So herrschen Vorstellungen, es könnte zu CO₂-Leckagen aus dem Untergrund kommen, die an der Erdoberfläche zu Erstickung führen können. Greenpeace und BUND etwa warnen davor, dass die Gefahr der ‚CO₂-Endlagerung‘ systematisch unterschätzt werde. Es bestehe das Risiko der Verunreinigung des Grundwassers, der Versauerung des Meerwassers und CO₂-Austritte könnten Gefahren für Mensch und Umwelt

darstellen⁵⁵. Als Beispiel wird von manchen Skeptikern auf die schlagartige Entgasung des afrikanischen Kratersees Nyos verwiesen, die sich 1986 in Kamerun ereignete und für die lokal ansässige Bevölkerung fatale Folgen hatte.

Für die eigene Auffassung wurde auch plakativ mit Emotionen gearbeitet, so beim erwähnten Vergleich von CCS mit der Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe. Der BUND warb mit einem Gasmasken-tragenden Maulwurf für seine Gegnerschaft zu CCS. Insgesamt wird die CCS-Technologie durchgehend als ‚umstritten‘ gebrandmarkt, ein Label, das ihr nach wie vor anhaftet und das benutzt wird, Ängste fernab der Realität zu nähren.

Große Teile der Zivilgesellschaft sind verunsichert

Die überzogene Schilderung von Gefahren, die sich auch teilweise in Medienberichten widerspiegelt, hat bei großen Teilen der Bevölkerung für eine hohe Unsicherheit gesorgt. Infolgedessen wurde der nüchtern berichtenden Fachseite kaum mehr Glauben geschenkt, was zweifellos erklärter Zweck mancher Kampagnen war. In Aktionen gegen CCS wurde großen Energieversorgern zudem vorgeworfen, dem Ausbau einer erneuerbaren Stromversorgung keine Priorität einzuräumen und diese zu behindern. Das CCS-Gesetz, so hieß es, würde nur den Interessen großer Stromkonzerne dienen und als „Feigenblatt für neue Kohlekraftwerke“ benutzt⁵⁶ beziehungsweise sei ein „gefährlicher politischer Irrweg“⁵⁷. Die Bedenken zu Risiken für Gesundheit und Umwelt fasst beispielsweise das Lexikon der Nachhaltigkeit der Aachener Umweltstiftung wie folgt zusammen.

„CCS“ im Lexikon der Nachhaltigkeit der Aachener Umweltstiftung⁵⁸

„CO₂ führt mit hoher Wahrscheinlichkeit bei einer Konzentration von circa acht Prozent innerhalb von 30 bis 60 Minuten zum Tode. Erreicht werden könnte diese Konzentration, wenn CO₂ durch eine Leckage in großen Mengen austritt und sich dieses in Senken ablagert. Die Gefahr, die von derartigen CO₂-Konzentrationen ausgeht, wird durch ein Unglück verdeutlicht, das 1986 am Lake Nyos in Kamerun geschah. Große Mengen CO₂ traten plötzlich aus dem See aus, was 1700 Menschen sowie Tausende Tiere in einem Umkreis von 27 Kilometern Entfernung das Leben kostete. Bereits zwei Jahre zuvor starben bei einem vergleichbaren Unglück am Manoun-See 37 Menschen. / Auch Deutschland ist von solchen Unglücken nicht ausgenommen. So kommt es aufgrund hoher CO₂-Konzentrationen immer wieder zu Unfällen. CO₂ tritt hier in Weinkellern, Baugruben und Bergwerken aus. So wurden am 17. August 2008 in Mönchengladbach 107 Menschen verletzt, als große Mengen CO₂ aus einer Löschanlage ausströmten und sich in einer Senke sammelten.“

„CO₂-Leckagen stellen für die Umwelt ein erhebliches Risiko dar. Durch das Austreten von CO₂ aus den Lagerstätten würden sämtliche positiven Auswirkungen der CCS-Technologie auf das Klima umgehend negiert werden. Die Bemühungen zum Schutz des Klimas wären

⁵⁵ Greenpeace, 2008; Greenpeace, 2019.

⁵⁶ BUND, 2009.

⁵⁷ Greenpeace, 2008.

⁵⁸ „CCS“ im Lexikon der Nachhaltigkeit der Aachener Umweltstiftung Kathy Beys (Hrsg.).

umsonst, und für Gegenmaßnahmen wäre es zu spät. Durch CO₂ gelöste Schadstoffe könnten infolgedessen ins Grundwasser gelangen. Bei der Verpressung von CO₂ in salzhaltige Gewässer könnte das Salzwasser verdrängt werden und ebenfalls ins Grundwasser gelangen. Durch das Aufsteigen des CO₂ bis kurz unter die Oberfläche würden Pflanzen und Tiere getötet werden und zudem die Böden versauern.“

„Der [nach einigen Jahrzehnten vorgesehene] Haftungsübergang für die Lagerstätten an die Länder stellt ein großes Risiko für die Landeshaushalte dar. Die Investitionen in erneuerbare Energien müssen ohnehin getätigt werden, da es sich bei Kohle um eine nicht erneuerbare Ressource handelt. Jedoch steht CCS mit Geothermie und Druckluftspeichern in einem Nutzungskonflikt, da für CO₂-Lagerung bei der Geothermie bzw. bei den Druckluftspeichern ähnliche geologische Strukturen benötigt werden. Sind diese Strukturen erst einmal mit CO₂ gefüllt, sind sie für die anderen Technologien auf Dauer unbrauchbar. CCS könnte somit die Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland verlangsamen, sodass eine Führungsrolle der deutschen Wirtschaft bei den Erneuerbaren nicht ausgebaut werden kann.“

Von Teilen der Politik wurden diese Ansichten aufgegriffen⁵⁹, was in der Folge zu dem im KSpG verankerten Quasi-Verbot der unterirdischen Speicherung von CO₂ geführt hat. Anhaltend ablehnend sprach sich auch das Umweltbundesamt (UBA) gegen den Einsatz der CCS-Technologie aus und erklärte etwa: *„Das UBA stellt in seiner Stellungnahme heraus, dass die Speicherung von CO₂ im Untergrund keine nachhaltige Klimaschutzmaßnahme ist. Allerdings kann die weitere Erforschung und Erprobung der Technologie dennoch sinnvoll sein, falls sich nachhaltige Klimaschutzmaßnahmen nicht als hinreichend erweisen.“* Und bald darauf, *„Nach derzeitigem Kenntnisstand könne keine sichere und vollständige CO₂-Einlagerung gewährleistet werden. Mögliche Leckagen würden eine Gefahr für Gesundheit, Ökosysteme und Klima darstellen.“*⁶⁰

Auch Greenpeace Deutschland äußert sich in einer aktuellen Stellungnahme dazu.

Greenpeace, Stellungnahme vom 31.03.2023⁶¹

„CCS ist weder nachhaltig noch effizient. CCS ist eine Scheinlösung, die innovative Klimaschutzverfahren blockiert. Deshalb ist für uns wichtig, vor dem Beginn des Aufbaus einer großindustriellen Entsorgungsinfrastruktur mit CCS auch Alternativszenarien zu prüfen, die ohne CCS auskommen.“

⁵⁹ In einer Pressemitteilung der niedersächsischen Grünen vom 09.03.2015 hieß es u.a.: *„Der Klimaschutz in Niedersachsen braucht keine CO₂-Speicherung. Mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Steigerung der Energieeffizienz können Stromwirtschaft und Industrie auf deutlich kostengünstigere und umweltverträgliche Instrumente zur Emissionsminderung zurückgreifen. / Rot-Grün erteilt auch Erprobungsmaßnahmen für eine unterirdische CO₂-Verpressung eine klare Absage. Wir haben schon Atomkraftwerke, Atommülllager, Erdgas-, Erdölförderung und Fracking sowie unterirdische Kavernenspeicher. Noch mehr Risiken für Mensch und Umwelt und noch mehr unkalkulierbare Ewigkeitskosten sind nicht akzeptabel.“*

⁶⁰ UBA, 2013, 2015.

⁶¹ Greenpeace, Stellungnahme an den Umweltausschuss des Schleswig-Holsteinischen Landtags v. 31.03.2023, Umdruck 20/1231.

„CCS ist teuer, riskant und ineffizient. Die Verpressung und unterirdische Speicherung von CO₂ kann niemals eine Alternative zur CO₂-Reduktion sein. Die ernüchternde Bilanz zeigt, dass die vielfach postulierten CO₂-Reduktionsversprechen der CCS-Technologie weder heute noch in den kommenden Jahren zu erwarten sind. / Die Langzeitsicherheit potenzieller CO₂-Deponien ist nicht nachgewiesen. Es entstehen neue systemische Risiken. Ewigkeitslasten werden auf zukünftige Generationen abgeschoben. / Die CO₂-Endlagerung ist eine Scheinlösung, die der Wirtschaft auf dem Weg zur Klimaneutralität nicht helfen wird. / In der aktuellen politischen Debatte dient CCS als Vorwand, um den Umbau der Industrie hin zu CO₂-freien Produkten und Produktionsprozessen weiter in die Zukunft zu verschieben. / Eine auf rein technische Verfahren verengte CO₂-Managementstrategie (CMS) inklusiv dem Aufbau einer großindustriellen CO₂-Entsorgungsinfrastruktur bedient einseitig die Interessen der treibhausgasintensiven Energie- und Schwerindustrie. / Es fehlt eine ergebnisoffene gesellschaftliche Debatte. Eine frühzeitige Vorfestlegung auf einen bestimmten Technologiepfad wie CCS engt den Handlungsspielraum für den Klimaschutz ein und verhindert Innovationen.“

Die Verhärtung in der öffentlichen Debatte um CCS wird auch an Beiträgen prominenter Vertreter der Politik deutlich. So titelte der vielfach für das Eintreten ökologischer Ziele ausgezeichnete ehemalige MdB von Bündnis 90/Die Grünen, Hans-Josef Fell, kürzlich „CCS als Klimawunderwaffe: Die Renaissance einer fossilen Propagandalüge“.

Hans-Josef Fell, Artikel vom 23.05.2023⁶²

„Die Bevölkerungen befürchteten Kontaminierung von Grundwasser und Boden sowie Erstickungsgefahr durch austretendes CO₂ einhergehend mit einem Niedergang der allgemeinen Lebensqualität in ihrer Heimat. ... In der Altmark (Sachsen-Anhalt) erreichte die Bürgerinitiative, dass die dort von Gaz de France bereits errichtete CO₂-Verpressungsanlage rückgebaut wurde, ohne je in Betrieb gegangen zu sein. Doch die fossilen Konzerne gaben nicht auf und propagierten weiter CCS, wobei sie von Klimaschützern, z.B. aus dem Klimaforschungsinstitut PIK in Potsdam und vom Weltklimarat IPCC unterstützt wurden. ... Wenn man versucht, das CCS unter der Erde z.B. in ausgeförderten Gas- oder Ölfeldern zu speichern, entweichen große Mengen durch undichte Bohrungen sowie durch Brüche, Spalten und Wegsamkeiten, die durch Erdbeben und Niveausenkungen entstanden sind und mit der Gasförderung einhergehen. ... Klimaschutz ist also mit CCS nicht möglich. ... Genau wie vor 20 Jahren ist auch heute die "Klimaschutztechnologie" CCS nichts weiter als eine Propaganda-Aktion der fossilen Konzerne, damit ihre Geschäfte weitergehen können. Dass diese Regierungen und viele Klimaschützer:innen nicht durchschauen, ist das eigentlich Dramatische daran. Mit CCS wird es jedenfalls keinen Klimaschutz geben, den die Menschheit so dringend benötigt. Die Lösung kann im Energiesektor nur bei 100 Prozent erneuerbare Energien liegen und im Industriesektor bei regenerativen Rohstoffen. Auf Initiative der schleswig-holsteinischen Bürgerinitiative hat sich ein Kreis aus BUND, Greenpeace, Deutsche Umwelthilfe, Bundesverband Bürgerinitiativen Umweltschutz, Umweltinstitut München, Bürgerinitiative "Saubere Umwelt & Energie Altmark" und Weiteren gebildet, der gegen die von der Ampel beabsichtigte Neuauflage des CCS Front macht.“

⁶² Telepolis (2023): „CCS als Klimawunderwaffe“, <https://www.telepolis.de/features/CCS-als-Klimawunderwaffe-Die-Renaissance-einer-fossilen-Propagandaluege-9062311.html> (abgerufen 10.09.2023).

Dilemma der Forderung nach mehr Klimaschutz und CCS-Blockade

Letztlich ist es durch die bestehende breite Front gegen CCS zu dem Dilemma gekommen, dass große Teile der Zivilgesellschaft Deutschlands zwar dem Klimaschutz eine hohe Priorität einräumen, einer Speicherung großer Mengen unvermeidbarer CO₂-Abgase aus der Keramik-, Glass-, Papier-, Zementproduktion etc. aber eine Absage erteilen. Auch wenn der Klimawandel als eine der größten Bedrohungen des Daseins wahrgenommen wird, will man sich den von vielen Umweltvertretern als unbeherrschbar dargestellten Risiken durch CCS nicht aussetzen. Die sowohl früher als auch gegenwärtig wieder extensiv geschürten Ängste bestehen fort, ungeachtet der Tatsache, dass CCS im IPCC-Sachstandsbericht als sichere, wirkungsvolle und unverzichtbare Klimaschutz-Maßnahme befürwortet wird. Die von den Gegnern der CCS-Technologie durchgeführten Aktionen waren somit erfolgreich. So merkt auch der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) kritisch an: „Zum Schutz der Grundwasserressourcen und angesichts entsprechender hoher Bevölkerungsdichte sowie dem Vorkommen bestimmter tektonischer und seismischer Gegebenheiten sind derzeit Lagerstätten für die Speicherung von CO₂ onshore nach Auffassung des BDEW nicht zu berücksichtigen.“⁶³

3. Widerlegung der Kritik

Tatsächlich sind die vorgebrachten Risiken bei näherer Betrachtung, wie nachfolgend dargelegt, gering und keineswegs höher als die anderer Gegebenheiten des täglichen Umfelds (Betrieb von LNG-Terminals, von Erdgaspipelines, unterirdischer Erdgasspeicher etc.). Eine naheliegende Abwägung mag darin bestehen, ob man der Emission großer Mengen CO₂ ein klimabedeutsam niedrigeres Risiko beimisst als dem Einsatz der CCS-Technologie. **Von Klimaaktivisten wird eindrücklich darauf hingewiesen, dass die Emission von Treibhausgasen angesichts befürchteter Auswirkungen des Klimawandels unter allen Umständen eingedämmt werden müsse. Das Eintreten für einen Fortbestand des CCS-Verbots steht dazu klar im Widerspruch. Es stellt sich auch die Frage, warum sich viele CCS-Skeptiker und -Gegner fachlichen Argumenten gänzlich verschließen, obgleich sie erkennbar nur geringe Kenntnisse der zugrundeliegenden Verhältnisse haben.**

Keine Genehmigung ohne Fachkenntnisse

Vertiefte Kenntnisse über den geologischen Untergrund sind nicht Allgemeinwissen. Nur den Wenigsten sind sie durch eigene berufliche Praxis und konkrete Erfahrungen mit tiefen Eingriffen in den Untergrund unmittelbar zugänglich. Insofern fällt es leicht, Sorgen, Risikoszenarien und Ängste zu propagieren, die plausibel klingen mögen, aber realitätsfern sind. Geschieht dies dennoch, wird ausgenutzt, dass die meisten Menschen nur eine vage, stark vereinfachte Vorstellung vom geologischen Untergrund haben. Von Manchen wird der natürliche, unberührte Untergrund beispielsweise als besonders rein angesehen, den es zu erhalten gilt. Menschliche Eingriffe stehen für diese Mitbürgerinnen und Mitbürger oft unter einer Art Generalverdacht, den ursprünglichen, naturgegebenen Zustand zu verschlechtern. Nachfolgende Ausführungen geben

⁶³ BDEW, Presseinformation vom 14.09.2023, <https://www.bdew.de/presse/bdew-zur-ccs-speicherung/> (abgerufen 13.10.2023).

einen skizzenhaften Einblick in die spezifischen Verhältnisse des Untergrundes, die für die geologische CO₂-Speicherung und ihr Verständnis relevant sind.

Für die geologische Speicherung von CO₂ kommen prinzipiell vier Optionen in Betracht: (a) tiefe, salzwasserführende Grundwasserleiter (salinare Aquifere), (b) erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten, (c) tiefe, nicht abbaubare Kohleflöze und (d) geologisch junge, reaktive Basalte. Bei den zwei erstgenannten Optionen erfolgt die Speicherung von CO₂ im Porenraum eines Speichergesteins. Um diesen effizient zu nutzen, sollte das CO₂ in verflüssigter Form vorliegen, was bei Druck- und Temperaturbedingungen ab einer Untergrundtiefe von etwa 1.000 Meter der Fall ist. Das Verpressen von flüssigem CO₂ und seine Verbreitung im Speicher erfolgen zudem leichter als das von gasförmigem Gas. Die Speicherung in Basalten nutzt neben dem Poren- auch den Kluft- raum des Gesteins und zielt auf eine schnelle mineralische Bindung des CO₂ und einer Umwandlung zu Karbonatgestein ab. Die Speicherung in Kohleflözen beruht auf der Sorption von CO₂ an Kohlen.

Letztere kommt in Deutschland wegen der hier vorkommenden dichten Kohlearten und den daher potenziell geringen Injektionsraten nicht in Betracht. Ebenso spielen Basalte wegen ihrer spärlichen Verbreitung in Deutschland keine Rolle. Ausgeförderte Erdöllagerstätten wiederum sind in der Regel zu klein, zudem oft durch Störungen in Kompartimente zergliedert und in vielen Fällen auch in zu geringer Tiefe lagernd, um eine effiziente CO₂-Speicherung zu gewährleisten. Somit verbleiben als wesentliche Speicheroptionen für Deutschland erschöpfte Erdgaslagerstätten und tiefe salinare Aquifere. Die Speicherung in ehemaligen Erdgaslagerstätten entspricht einer Rückverlagerung von Kohlenstoff in Formationen, aus denen dieser zuvor als fossiler Kohlen(wasser)stoff, mit CO₂ als Begleitgas, gefördert wurde. Eine Rückholung des eingelagerten CO₂ ist im Bedarfsfall⁶⁴ – bis auf eine in der Lagerstätte verbleibende Restmenge, fachlich ‚Kissengas‘ – möglich.

Damit eine geologische Formation als CO₂-Speicher in Betracht kommt, sind neben der Mindesttiefe folgende Voraussetzungen erforderlich:

- Das Speichergestein muss ausreichend porös und der Porenraum in sich durchlässig (permeabel) sein.
- Die Speicherformation soll eine große Mächtigkeit und lateral eine weite Erstreckung besitzen (hohe Speicherkapazität).
- Sie muss flächendeckend und lückenlos von einem undurchlässigen Deckgebirge, einem ‚Barrieregestein‘ (z.B. Tonstein), überdeckt sein, welches einen Aufstieg des CO₂ aus dem Speicher wirksam verhindert.
- Speicher- und Barrieregestein sollten eine geologische Fallenstruktur bilden (wie von konventionellen Erdgas-/Erdöl-Lagerstätten bekannt), die die seitliche Ausbreitung des eingelagerten CO₂ begrenzt.

Zur dauerhaften Speicherung tragen mehrere physikalisch-chemische Mechanismen bei: Physikalisch wird der Aufstieg von freiem CO₂ auf der Makroskala durch das Barrieregestein begrenzt, auf der Mikroskala, im Porenraum, schränken Kapillarkräfte die

⁶⁴ Z. B. bei wirtschaftlichem Interesse an CO₂ als Rohstoff oder zur Unterstützung von Pflanzen- und Algenwachstum in landwirtschaftlichen Kulturen.

Beweglichkeit des CO₂ ein. Schon aufgrund dieser Gegebenheiten ist ein plötzliches Entweichen großer Mengen von CO₂ aus geologischen Speicherformationen ausgeschlossen, auch über gegebenenfalls unbekannte Klüfte oder Altbohrungen. Überdies wird CO₂ in Formationswässern chemisch gelöst. Mit darin enthaltenen Inhaltsstoffen reagiert es und fällt in Form stabiler Minerale (Karbonate) aus. Die physikalischen Mechanismen wirken unmittelbar, die chemischen über einen längeren Zeitraum, was insofern von Vorteil ist, als das Verpressen von CO₂ nicht zu einem raschen Verschluss der feinen Fließwege führt. Da die sich bildenden Karbonate langfristig in eine feste Gesteinsmatrix eingebaut werden, nimmt die naturgegebene Speichersicherheit im Laufe der Zeit zu (Abb. 5). CO₂-gesättigtes Formationswasser hat überdies eine höhere Dichte als CO₂-freies Formationswasser und sinkt infolge der Erdschwere im Speicher ab.

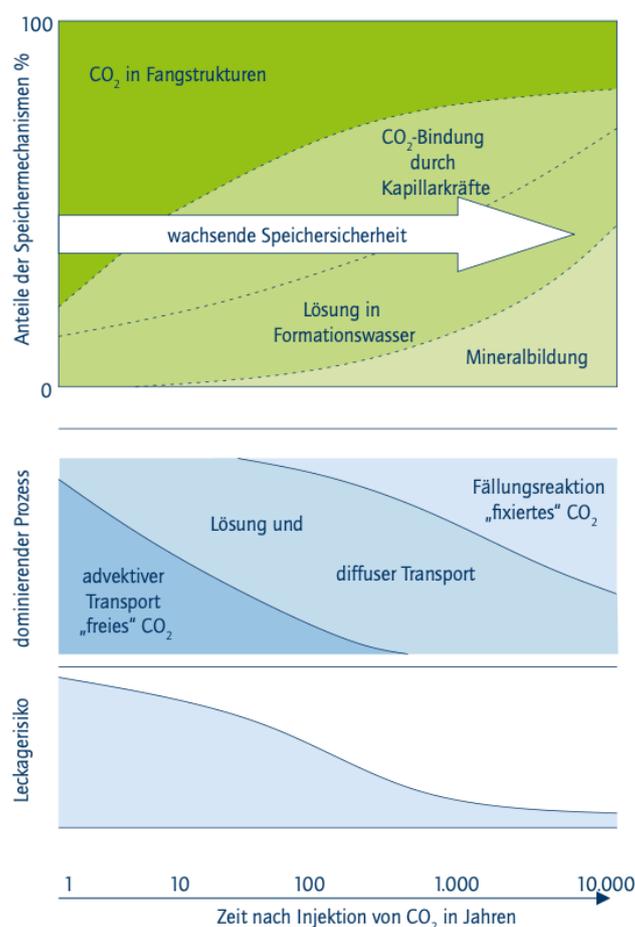


Abbildung 5: Wachsende Speichersicherheit und abnehmendes Leckagerisiko über die Zeit. Quelle: acatech 2018.⁶⁵

Die Wirksamkeit der Abdichtung durch das ‚Hangende‘ (Deckgebirge) eines potenziellen Speichers ist offensichtlich, wenn der in tieferen Gesteinsschichten herrschende Fluiddruck überhydrostatisch, das heißt höher als am Boden einer offenen vertikalen Fluidsäule ist. Ein solcher Zustand ist dann über geologische Zeiträume gegeben. Ein anderes Indiz für die Abgeschlossenheit tieferer Gesteinsschichten ist das mittels isopenanalytischer Verfahren bestimmbare Alter tiefer Kluft- und Porenwässer.

⁶⁵ Acatech (2018): „CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. Analyse, Handlungsoptionen und Empfehlungen“.

Unterhalb der obersten Deckschicht ist es in der Regel viele Tausend Jahre alt, anders als das Grundwasser im oberflächennahen Untergrund, das am sogenannten meteorischen Wasserkreislauf teilnimmt.

Durch die Injektion von CO₂ werden auch im weiteren Umfeld der Injektionsstelle Effekte hervorgerufen. So führt die Einlagerung von CO₂ zu einer Druckerhöhung und einer partiellen Verdrängung des Formationswassers, die im Bereich von zehn Kilometern um die Injektionsstelle herum auftreten kann. Bei großen CO₂-Mengen können damit Hebungen der Erdoberfläche (in der Größenordnung von Millimetern) sowie eine induzierte Mikroseismizität verbunden sein. Beide Effekte sind ohne hochauflösende Spezialgeräte in der Regel nicht wahrnehmbar. Im Rahmen des vorgeschriebenen Genehmigungsverfahrens werden sie anhand im Vorfeld erhobener Daten von Bergbauingenieuren ermittelt und bewertet. Ihre Überwachung ist notwendig und sinnvoll, um die Ausbreitung des CO₂ im Speicher zu verfolgen.

Um das CO₂ ins Speichergestein einbringen zu können, muss ein Injektionsdruck aufgebracht werden, der höher ist als der jeweils vorhandene Lagerstättendruck. Dabei darf der Injektionsdruck unter Einhaltung einer Sicherheitsmarge die Bruchgrenze von Speicher- und Barrieregestein nicht überschreiten, was zuvor durch Labortests an Bohrlochproben und in-situ Packertests untersucht wird.

Zwei Lagerstättentypen für inländische CO₂-Speicherung

Erschöpfte Erdgaslagerstätten stellen inländisch die beste Option zur Speicherung von CO₂ dar. Ihre Deckschichten konnten das hydrostatische Aufsteigen von Flüssigkeiten und Gasen erwiesenermaßen über Millionen von Jahren hinweg verhindern. Aufgrund der Förderhistorien ist der Kenntnisstand über die geologischen Charakteristika der jeweiligen Lagerstätte hoch. Gegebenenfalls kann ein Teil der noch vorhandenen Infrastruktur der Erdgasförderung für einen CO₂-Speicherbetrieb nachgenutzt werden.

Ausgeförderte Erdgaslagerstätten haben weiterhin den Vorteil, dass sie ein herabgesetztes Porendruckregime aufweisen. Zum einen ist dadurch der aufzubringende Injektionsdruck geringer als bei einer Speicherung in salinaren Aquiferen, zum anderen unterstützt das noch verbliebene, zum Bohrloch hin gerichtete negative Druckgefälle einen Fluss des CO₂-angereicherten Formationswassers in die Speicherstätte. Die weiträumige Ausbreitung des erhöhten Reservoirdrucks, wie sie bei der Speicherung in salinaren Aquiferen zu erwarten ist, spielt nur eine untergeordnete Rolle. Andererseits ist zu beachten, dass im Bereich von Erdgasfeldern Altbohrungen vorhanden sein können, die für das injizierte CO₂ ungewollte Migrationspfade zur Erdoberfläche darstellen können. Für eine Nutzung als CO₂-Speicher müssen die vorhandenen Altbohrungen aufgefunden, geprüft und gegebenenfalls neu verschlossen und überwacht werden. Eine schnelle, kritische Entgasung über eine unzureichend abgedichtete Altbohrung ist gleichwohl in keinem Fall zu befürchten, da mögliche Leckageraten klein wären.

Vom Prinzip her sollten die erschöpften Lagerstätten durch das injizierte CO₂ wieder aufgefüllt und die ursprünglichen Druckbedingungen in den Reservoirs wiederhergestellt werden können. Die zuvor gesamtheitlich geförderte Menge an

Kohlenwasserstoffen sollte dabei in etwa durch entsprechende Mengen CO₂ in einem Austauschverhältnis von 1:1 (Volumenteile unter Reservoirbedingungen) ersetzt werden.

Aufgrund ihrer weiten Verbreitung weisen die salinaren Aquifere in Deutschland das mengenmäßig größte Speicherpotenzial auf. Die in den porösen und permeablen Gesteinsschichten (zumeist Sandsteine) enthaltenen stark salzhaltigen Formationswässer sind für eine Trinkwassergewinnung oder zu Bewässerungszwecken nicht nutzbar. Vereinzelt werden tiefe, salzreiche Wässer zu Kurzwecken in Heilbädern genutzt oder zur Gewinnung geothermischer Energie. Da an salinaren Aquiferen kein wirtschaftliches Interesse besteht, sind sie weniger intensiv erkundet als ehemalige Erdgas- und Erdöllagerstätten. Die Speicherung von CO₂ in solchen Aquiferen erfordert somit eine eingehendere standortspezifische Voruntersuchung der strukturgeologischen Situation, des Aquifertyps, der speichergeologischen Bedingungen und der Barrierequalität des Deckgebirges.

Das Speicherpotenzial von inländischen Erdgaslagerstätten wurde von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bewertet⁶⁶. Dabei wurden nur Erdgasfelder betrachtet, bei denen bis 2008 mindestens 2 Milliarden Kubikmeter Erdgas gefördert wurden. Demzufolge wurde die Speicherkapazität von 39 bekannten Erdgasfeldern, die fast ausschließlich in Nordwestdeutschland liegen, mit insgesamt etwa 2,75 Milliarden Tonnen CO₂ abgeschätzt. Mithilfe statistischer Simulationen wurden auch Speicherkapazitäten in möglichen salinaren Aquiferstrukturen heimischer Sedimentbecken ermittelt. Dazu wurden etwa drei Viertel des Norddeutschen Beckens (inklusive des Deutschen Nordseesektors), des Oberrheingrabens und des Alpenvorlandbeckens erfasst und die darin bekannten räumlich begrenzten Fallenstrukturen einbezogen.

In Summe ergeben sich mit einer 90-prozentigen Wahrscheinlichkeit Speicherkapazitäten von 6,4 Milliarden Tonnen CO₂. Die untersuchungswürdigen Gebiete, in denen nach jetzigem Kenntnisstand die Bedingungen für eine Speicherung von CO₂ am besten erfüllt sind, befinden sich in Norddeutschland. Ähnliche Untersuchungen wurden für den offshore-Bereich des deutschen Nordseesektors vorgenommen. Sie ergeben ein Potenzial von 2,9 Milliarden Tonnen CO₂ (Abb. 4 u. 6). Für eine inländische Speicherung stehen somit große Kapazitäten bereit; sie nutzt kürzere Transportwege, verringert Abhängigkeiten und senkt auch die Kosten. Auch weltweit gibt es bereits Abschätzungen des CO₂-Speicherpotenzials (Abb. 7).

Die hier stark vereinfachten (!) Ausführungen machen deutlich, dass eine Bewertung von CO₂-Speicheroptionen und der Sicherheit von CO₂-Speichern ohne fundiertes Wissen über den tiefen geologischen Untergrund nicht möglich ist. Solches Wissen ist zuvorderst in den Staatlichen Geologischen Diensten und Bergbehörden vorhanden, wo ausgebildete Teams mit jahrzehntelanger einschlägiger Berufserfahrung ihre Untersuchungen und Analysen unabhängig von wirtschaftlichen Interessen durchführen. Die im öffentlichen Diskurs oft unsachgemäß verzerrten und falsch dargestellten

⁶⁶ Müller et al. (2011): „Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – Synthese (BGR)“.

Sachverhalte offenbaren dagegen das Fehlen selbst elementarster Grundkenntnisse der tangierten Fachdisziplinen⁶⁷.

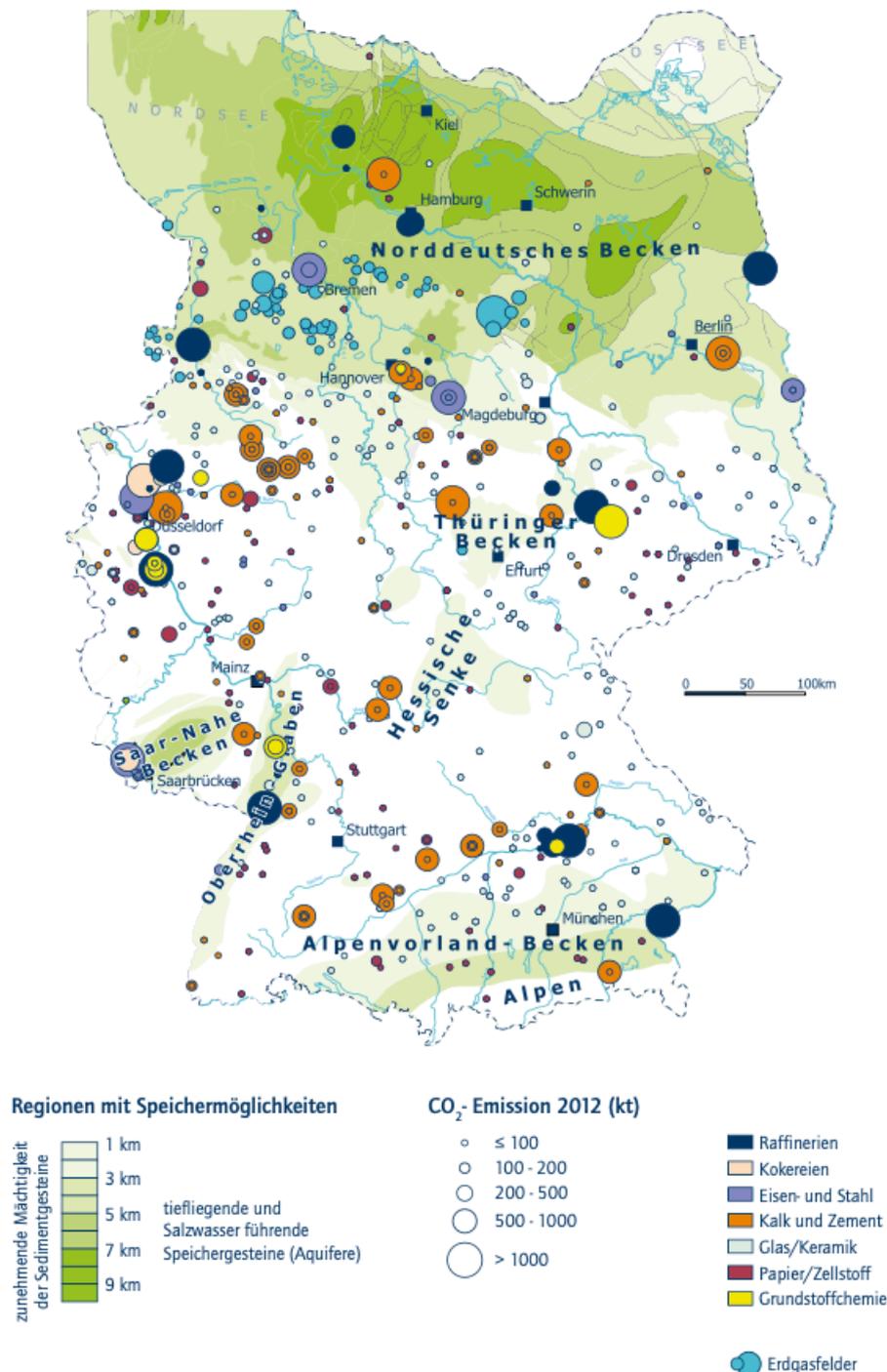


Abbildung 6: Industrielle Punktquellen und mögliche CO₂-Untergrundspeicher in Deutschland. Quelle: acatech, 2018⁶⁸

⁶⁷ Dazu gehören neben Hydro- und Reservoirgeologie insbesondere Gesteinsphysik, Tiefbohrtechnik, Seismologie und Geochemie.

⁶⁸ Acatech (2018): „CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. Analyse, Handlungsoptionen und Empfehlungen“.

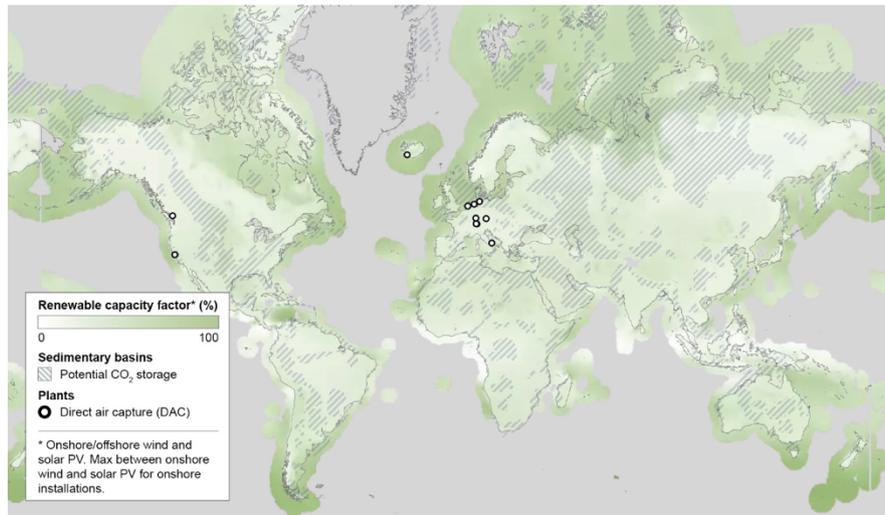


Abbildung 7: Weltweite Potenziale von CO₂-Speichern und Erneuerbaren Energien – als Voraussetzung für Carbon Dioxide Removal. Quelle: IEA, 2022.⁶⁹

Fehlwahrnehmungen und verdrehte Sachverhalte

Häufig wird der Inhalt wissenschaftlich-fachlicher Aussagen falsch verstanden oder im Sinne der präferierten eigenen Auffassung umgedeutet. So wird die in der Forschungscommunity triviale Bekundung, „auch bei der CCS-Technologie gibt es keine 100%tige Sicherheit“, als Eingeständnis eines hohen, jedenfalls nicht zumutbaren Gefährdungspotenzials interpretiert. Mit dieser Botschaft lassen sich bei Mitmenschen leicht und nachhaltig Sorgen und Ängste schüren. Eine Einordnung der fachlichen Aussage im Kontext allzeit bestehender Gefährdungen des täglichen Lebens unterbleibt. Der Vergleich mit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle insinuiert, dass CCS eine Hochrisiko-Technologie sei.

Ein Beispiel für eine besonders drastische Falschdarstellung liefert der Vergleich von potenziellen Leckagen entlang der CCS-Prozesskette mit der oben erwähnten schlagartigen Entgasung des afrikanischen Nyos Sees, der von einigen Skeptikern der CCS-Technologie vorgebracht wird⁷⁰. Im Nachgang der Katastrophe⁷¹ durchgeführte Untersuchungen haben ergeben, dass bei dem kurzzeitigen Ereignis etwa 1,6 Millionen

⁶⁹ International Energy Agency (IEA, 2022): Direct Air Capture – A key technology for net zero. URL: <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>.

⁷⁰ Vgl. ‚CCS‘ im Lexikon der Nachhaltigkeit der Aachener Umweltstiftung Kathy Beys (Hrsg.) oder Frankfurter Rundschau vom 02.02.2019, „Angst vor dem Gas aus der Tiefe“.

⁷¹ Zum Hintergrund: Der Kratersee im Nordwesten Kameruns wird in der Tiefe stetig von CO₂-Gasen vulkanischer Herkunft infiltriert. Diese reichern sich in den unteren Wasserschichten des ca. 200 Meter tiefen Sees in gelöster Form an und führen im Laufe der Zeit zu einer instabilen Schichtung der Wassersäule. Eine ungeklärte Instabilität, z. B. ein leichtes Beben oder ein Hangrutsch am Ufer, hatte im August 1986 ein Umlappen der instabilen Wasserschichtung getriggert, wodurch sehr große Mengen des zuvor gelösten CO₂ explosionsartig freigesetzt wurden. Das ausströmende Gas hat sich um den See herum am Boden gesammelt und lawinenartig in tieferliegende Täler ergossen. In der unmittelbaren Folge fanden etwa 1.700 Bewohner anliegender Dörfer den Tod, ebenso tausende von Rindern und Schafen. Geowissenschaftlich handelte es sich um ein tragisches Ereignis vulkanischen Ursprungs, vergleichbar mit dem episodischen Ausbruch eines aktiven Vulkans. Dies gilt auch für die 1984 eingetretene Entgasung des im Westen Kameruns gelegenen Manoun-Sees, die 37 Menschen den Tod brachte.

Tonnen CO₂ freigesetzt wurden⁷², was einem Volumen von 800 Millionen Kubikmetern (fast einem Kubikkilometer) CO₂ entspricht. Das ist etwa die doppelte CO₂-Menge, die ein mittelgroßes Zementwerk im Laufe eines Jahres ausstößt. Dass eine auch nur annähernd vergleichbare Menge CO₂ durch den Einsatz der CCS-Technologie schlagartig freigesetzt wird, ist vollkommen abwegig.

Die CO₂-Emissionen eines Zementwerkes können stündlich etwa 100 Tonnen betragen, die eines größeren Stahlwerkes 500 Tonnen. Trotzdem gibt es im Umfeld dieser Werke keine Zonen, in denen Menschen oder Tiere Gefahr laufen, Schaden zu nehmen. Grund ist die leichte Mischbarkeit von CO₂ und Luft (was uns zugutekommt, da ausgeatmete Luft CO₂-reich ist). Die Zahlen verdeutlichen, dass auch von dem unwahrscheinlichen Fall einer Leckage beim Prozess der CO₂-Abscheidung, des Transports oder der CO₂-Speicherung keine überhöhte Gefahr ausgeht. Hinsichtlich des Transports und der Tiefenspeicherung von Methan (Erdgas), das toxischer als CO₂ und leicht entflammbar ist, bestehen bekanntlich keine Vorbehalte, wodurch ersichtlich wird, dass die oben vertretene Wahrnehmung selektiv ist.

Natürliche CO₂-Emissionen sind auch von aktiven und erloschenen Vulkanen bekannt. So setzt das Gebiet des Laacher Sees (Rheinland-Pfalz) in einem Areal von wenigen Hektar jährlich etwa 3.000 Tonnen CO₂ frei, pro Stunde 340 Kilogramm⁷³. Das Gelände ist frei zugänglich. Unbestritten ist das farb- und geruchslose CO₂ schwerer als Luft und kann sich daher bei fehlendem Luftaustausch in Senken ansammeln und dort zur Erstickung führen. In unmittelbarer Nähe einer Havarie ist deswegen eine kurzfristige Gefährdung von Menschen nicht auszuschließen. Liegt eine erhöhte Gefährdung vor, sind geeignete Überwachungs- und Schutzmaßnahmen notwendig, wie dies generell in Gefahrenzonen der Fall ist. Da die CO₂-Konzentration in der Umgebung rasch sinken würde, sind dauerhafte Ökosystemveränderungen nicht zu erwarten.

Das oben zitierte Argument, „durch das Austreten von CO₂ aus den Lagerstätten würden sämtliche positiven Auswirkungen der CCS-Technologie auf das Klima umgehend negiert werden“, ist abwegig. Würde ein hypothetischer CO₂-Speicher mit einem Fassungsvermögen von 100 Millionen Tonnen durch eine unvorhergesehene Leckage dieselbe (hohe) CO₂-Rate wie der Laacher See abgeben, würde es 33.000 Jahre dauern, bis er gänzlich entleert wäre. Eine Abwägung, jährlich Millionen Tonnen von unvermeidbarem CO₂ in die Atmosphäre zu emittieren oder in den tiefen Untergrund zu verbringen, spricht aus Klimaschutzgründen eindeutig für letzteres, selbst wenn für den höchst unwahrscheinlichen Fall, dass damit Leckagen von mehreren Tonnen CO₂ pro Jahr verbunden wären. Der Rückhalt von zig Millionen Tonnen tiefengespeichertes CO₂ über tausende von Jahren ist unabweisbar eine wirkungsvolle Klimaschutzmaßnahme.

Befürchtungen, durch CO₂ gelöste Schadstoffe könnten ins Grundwasser gelangen, oder beim Verpressen von CO₂ in salzhaltige Gewässer könnte das Salzwasser ins Grundwasser einsickern, adressieren das gleiche Problem. Wie oben ausgeführt, können Leckagen durch das obligatorische Vorhandensein einer ausreichend mächtigen, gut abdichtenden Deckschicht praktisch ausgeschlossen werden. Die Sorge, durch das

⁷² <https://de.wikipedia.org/wiki/Nyos-See> (abgerufen 05.08.2023).

⁷³ Scienexx (2003): „Von Magmakammern und stabilen Schichten“, <https://www.scinexx.de/dossierartikel/von-magmakammern-und-stabilen-schichten/> (abgerufen 05.08.2023).

Aufsteigen des CO₂ bis kurz unter die Oberfläche würden Pflanzen und Tiere getötet werden und die Böden versauern, ist vor diesem Hintergrund nicht nachvollziehbar.

Insgesamt kann, wie es auch der Evaluierungsbericht 2022 der Bundesregierung ausdrückt, das mit CO₂-Leckagen verbundene Risiko als gering eingeschätzt werden. Die Regelung einer Haftung für eine Speicherlagerstätte ist dennoch sinnvoll, um dem Betreiber die nach Stand der Technik höchstmögliche Sorgfalt und Gewährleistung für Sicherheit und Dichtheit des CO₂-Einschlusses abzuverlangen. Ist dies über wenige Jahrzehnte nachgewiesen, stellt der Haftungsübergang an die öffentliche Hand nur ein sehr geringes Risiko dar. Auf der Habenseite steht der erwirkte Beitrag zum Klimaschutz.

Der o.g. Vorstellung, „CCS stehe mit Geothermie und Druckluftspeichern in einem Nutzungskonflikt, da für CO₂-Lagerung bei der Geothermie bzw. bei den Druckluftspeichern ähnliche geologische Strukturen benötigt werden und wenn diese Strukturen erst einmal mit CO₂ gefüllt, sind sie für die anderen Technologien auf Dauer unbrauchbar“, rührt von einem wenig realistischen Bild des Untergrundes her. In inländischen Sedimentbecken, die denen mögliche CO₂-Speicher liegen, wird eine Wechsellagerung von mehr oder weniger guten Speichergesteinen und mehr oder weniger gut abdichtenden Barrieregesteinen vorgefunden. Aussagen über die Qualität der Speicher- und Barriereigenschaften kann nur eine Kombination aus geologisch-geophysikalischen Erkundungen und Laboranalysen an Bohrproben liefern. Anhand der Ergebnisse kann festgestellt werden, ob eine Stockwerksnutzung des Untergrundes, das heißt eine Nutzung verschiedener Tiefenstufen für unterschiedliche Zwecke, möglich ist. Dies ist in Deutschland der Regelfall⁷⁴. Das Durchbohren von Gesteinspaketen, ohne dass deren potenzielle Nutzung für andere Zwecke beeinträchtigt wird, ist bei heutiger Tiefbohrtechnik Routine.

Verhärtete Standpunkte bei NGOs des Umweltbereichs

Die jüngst von Greenpeace vorgebrachten Bedenken gegen CCS⁷⁵ seien hier auch stellvertretend für andere Akteure aus dem Umweltbereich betrachtet. Dass CCS mit Kosten verbunden ist, muss nicht weiter bestätigt werden, ebensowenig, dass ökonomisch vertretbare alternative Optionen der CO₂-Reduktion im Sinne von Ressourcenschutz als vorrangig einzustufen sind.

Generell machen Transport und Speicherung von CO₂ den geringeren Anteil an den Gesamtkosten einer CO₂-Minderungsmaßnahme aus. Der finanzielle Bedarf ist abhängig von der Entfernung zwischen CO₂-Punktquelle und Speicherort, dem genutzten Transportmittel (Pipeline, Schiene, Schiff, Lkw), Möglichkeiten der Wiederverwendung existierender Infrastruktur (Pipelines, Bohrlöcher) sowie der Speicherkapazität und Injektionsrate. Grobe Abschätzungen für CCS ergeben einen Kostenrahmen von 50 bis 150 € pro Tonne CO₂. Im Offshore-Bereich dürften die Speicherkosten etwa doppelt so hoch liegen wie im Onshore-Bereich. Damit fallen die Kosten für den Einsatz von CCS bereits heute in den Bereich der von einzelnen Staaten erhobenen CO₂-

⁷⁴ Schulz et al. (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie (LIAG).

⁷⁵ Greenpeace, Stellungnahme an den Umweltausschuss des Schleswig-Holsteinischen Landtags v. 31.03.2023, Umdruck 20/1231.

Vermeidungskosten⁷⁶. Ab 2025 sollen sie für Deutschland mindestens 50 € pro Tonne CO₂ betragen und danach weiter ansteigen. Die Greenpeace-Behauptung, „CCS ist teuer, riskant und ineffizient“, blendet diesen Gesichtspunkt aus.

Ohne die Option CCS droht zudem eine Abwanderung der betroffenen Industrien in Staaten mit geringeren Vermeidungskosten und damit ein Umgehen von Klimaschutzmaßnahmen. Dies kann eine Aufhebung des CCS-Verbots verhindern, mit vertretbaren Kosten können Arbeitsplätze und das derzeitige Wohlstandsniveau gesichert werden (vgl. Abb. 8). Der Zugang zu einer CCU-/CCS-Infrastruktur einschließlich einer entsprechend hohen Verfügbarkeit erneuerbar erzeugter elektrischer Energie vor Ort kann sogar zum Ausbau eines Produktionsstandorts führen, weil eine konkrete Lösung zur CO₂-Neutralität betroffener Industrien vorliegt. Industriezweige, die Teil eines CCU-/CCS-Systems sind, produzieren emissionsarme Produkte, denen in einer umwelt- und klimabewussten Gesellschaft ein wachsender Stellenwert beigemessen wird. Dies gilt sowohl für Grundstoffe als auch für Endprodukte, sofern das verarbeitende Gewerbe ebenfalls emissionsarm produziert. Industrien können sich in einem solchen Umfeld einen Wettbewerbs- und Standortvorteil gegenüber einer emissionslastigen Produktion in anderen Ländern schaffen.



Abbildung 8: Potenzial für die Schaffung heimischer Arbeitsplätze durch Investment in Carbon Management am Beispiel USA. Quelle: GAO, 2022.⁷⁷

Der Aufbau einer vollständigen CCS-Wertschöpfungskette benötigt grob geschätzt zehn Jahre. Die Greenpeace-Behauptung, „dass die vielfach postulierten CO₂-Reduktionsversprechen der CCS-Technologie weder heute noch in den kommenden Jahren zu erwarten sind“, ist unrichtig. Ein solches Versprechen wurde nie abgegeben. Wäre vor zehn Jahren ein CO₂-Speicherungsgesetz verabschiedet worden, dass CCS ermöglichte, hätte die CO₂-Speicherung heute Praxis sein können.

Die Greenpeace-Behauptung „die Langzeitsicherheit potenzieller CO₂-Deponien ist nicht nachgewiesen. Es entstehen neue systemische Risiken. Ewigkeitslasten werden auf zukünftige Generationen abgeschoben“ verkennt, dass für jeden Speicherort eine umfassende Prüfung der Langzeitsicherheit durch die zuständige Bergbehörde verbindlich ist. Das Prüfergebnis wird fachkundig bewertet, die Vorgehensweise ist erprobt und wie beim Betrieb unterirdischer Erdgasspeicher Stand der Technik. **Das Vorhandensein selbst großer Mengen CO₂ im Untergrund stellt weder ein systemisches Risiko noch eine Ewigkeitslast dar.**

⁷⁶ U. a. Norwegen, Schweden, Schweiz, Großbritannien; z. B. Levinger u. Schwarz, 2013: Globaler CO₂-Preis - Der schwierige Weg zu einer effektiven internationalen Antwort auf den Klimawandel (kfw-Research Nr. 417).

⁷⁷ United States Government Accountability Office (2022): „Technology Assessment – Decarbonization“.

Die Behauptung, „die CO₂-Endlagerung ist eine Scheinlösung, die der Wirtschaft auf dem Weg zur Klimaneutralität nicht helfen wird“, ist unbewiesen. Ähnlich polemisch klingt die Unterstellung, dass die aktuelle Debatte um CCS „als Vorwand dient, den Umbau der Industrie hin zu CO₂-freien Produkten und Produktionsprozessen weiter in die Zukunft zu verschieben“ oder „eine auf rein technische Verfahren verengte CO₂-Managementstrategie (CMS) inklusiv dem Aufbau einer großindustriellen CO₂-Entsorgungsinfrastruktur einseitig die Interessen der treibhausgasintensiven Energie- und Schwerindustrie bedient.“ Wie eine wirksame CMS ohne Einbeziehung der genannten Industrie vollzogen werden kann, lässt Greenpeace offen.

Angesichts der unübersehbaren Zahl nationaler wie internationaler Forschungsleistungen und Projektentwicklungen zu neuen, klimaverträglichen Technologiepfaden, die an Hochschulen, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und seitens der Industrie betrieben werden, ist die Greenpeace-These, „eine frühzeitige Vorfestlegung auf einen bestimmten Technologiepfad wie CCS engt den Handlungsspielraum für den Klimaschutz ein und verhindert Innovationen“ unrichtig.

Warum sich namhafte gemeinnützige Umweltorganisationen entschieden unipolar gegen CCS positionieren und somit große Mengen von CO₂-Emissionen entgegen eigener Überzeugung zur Klimaschutz-Dringlichkeit in Kauf nehmen, ist schwer nachvollziehbar. Sofern nicht fehlender Sachverstand der Grund ist, stellt sich die Frage nach anderen Beweggründen (cui bono?), etwa frühere Beteuerungen und das Verbreiten eigener Behauptungen und Meinungen, von denen man glaubt, ohne Gesichtsverlust nicht Abstand nehmen zu können. Dies gilt wohl auch für die oben zitierten, populistisch anmutenden Darlegungen von Hans-Josef Fell.

4. Status heute – in Deutschland und Europa

Aufgrund jahrzehntelanger Erfahrungen ist die Beherrschbarkeit der CCS-Technologie als potenziell wichtiger Beitrag zum Erreichen von Klimaschutzziele nachgewiesen. Jegliche Maßnahmen im Zusammenhang mit der CO₂-Speicherung sind neben einem Standortauswahlverfahren samt umfassender Standorterkundung möglicher Lagerstätten feste Bestandteile eine Risikoanalyse, der Durchführung geotechnischer Maßnahmen, eines strikten Systems von Monitoring, Reporting and Verification (MRV), einer Störfallvorsorge und des Speicherverschlusses. Für zu erhebende Messwerte und Prüfparameter sind im Vorfeld Toleranzen, Schwellwerte und Ausschlusskriterien festzulegen. Emissionen und Emissionsvermeidung sind zu bilanzieren.

Wie etwa auch beim Brücken- und Tunnelbau im Verkehrswesen oder bergbaulichen Aktivitäten im Tage- bzw. Untertagebau wird nach Stand der Technik vorgegangen. Für die CO₂-Speicherung gibt es ein standortspezifisches Sicherheitskonzept, das von Fachleuten mit einschlägiger Berufserfahrung erstellt wird. Entsprechendes gilt für die CO₂-Abscheidung und den Transport von CO₂. **Staatlicherseits autorisierte Aufsichtsbehörden entscheiden über die Genehmigung der beantragten Vorgehensweise, überwachen und bewerten das Einhalten von Vorgaben und schreiten bei Nichtbeachtung ein. Vorstellungen, bei CCS würden Risikobetrachtungen hintangestellt und eine Gefährdung von Menschen und Umwelt hingenommen, sind weltfremd.**

Vorschnelle Regierungsentscheidungen einzelner Bundesländer haben in den Jahren 2010 bis 2015 den Einsatz von CCS auf ihrem Hoheitsgebiet kategorisch ausgeschlossen. Hinsichtlich einer möglichen geologischen CO₂-Speicherung wurden in keinem Fall dezidierte Standortuntersuchungen von potenziellen Lagerstätten durchgeführt, eine Eignung nie ernsthaft geprüft. Anhand der vorhandenen, jedoch unvollständigen Datenlage hat man pauschale Bewertungen vorgenommen, die ein vorhersehbares Ergebnis geliefert haben (und sollten). Auf Eignungsuntersuchungen, wie sie das KSpG im Antragsverfahren einer CO₂-Einlagerung vorsieht, um auf dieser Grundlage eine fachlich gestützte Entscheidung zu treffen, wurde verzichtet. Die von kaum sachkundigen Akteuren in Gang gebrachten Widerstände in der Bevölkerung haben obsiegt. Angesichts der dagegenstehenden Aussagen der vom Staat und Steuerzahler unterhaltenen Fachseite ist darin ein Politikversagen zu sehen.

Zwangslage verloren gegangener Akzeptanz

Ob die CCS-Technologie in Deutschland von der breiten Öffentlichkeit in absehbarer Zeit eine hinreichende Akzeptanz erfahren wird, ist derzeit fraglich. Zwar stehen Emissionen aus der Kohleverbrennung als Quelle des CO₂ bei uns nicht mehr zur Disposition, doch bleibt ungewiss, ob sich eine neue öffentliche Diskussion der „alten“ CCS-Vorbehalte entledigen kann und dabei sowohl objektive Fakten anerkannt als auch subjektiv wahrgenommene Ängste und Bedenken ausgeräumt werden können. In dem Glauben, dass die früher vorgebrachten Bedenken gegen die Beherrschbarkeit von CCS begründet waren, bestehen sie auch bezüglich CO₂, das aus unabwendbaren Quellen stammt.

Darauf setzen medienstark diejenigen Umweltverbände, die an ihrer früheren Sichtweise festhalten, obwohl mit dem norwegischen Sleipner-Projekt bald dreißig Jahre positive, wissenschaftlich abgesicherte Erfahrungen vorliegen und Geowissenschaftlerinnen und -wissenschaftler explizit und wiederholt ausgeführt haben, warum eine dauerhafte Speicherung von CO₂ im Untergrund machbar und sicher ist.

Immerhin bedeutet eine Beschränkung der CCS-Anwendung auf CO₂ aus dem energieintensiven Industriesektor im Vergleich zu einem großmaßstäblichen Einsatz von CCS einschließlich des Kohlekraftwerkssektors eine deutliche Reduktion der zu speichernden CO₂-Mengen. Zudem steht ein CCS-Einsatz im energieintensiven Industriesektor den Zielen der Energiewende und des Klimaschutzes nicht entgegen, sondern reiht sich in die verschiedenen Handlungsoptionen und Szenarien der Energiewende ein. **Da für den Bau von Anlagen zur Gewinnung regenerativer Energie Leichtmetalle für Photovoltaik-Anlagen oder Eisen-/Stahlerzeugnisse und Betonfundamente für Windkraftanlagen unabdingbar sind, ist der Erhalt energieintensiver Industrien für auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Ziele ein Teil der Zukunftsvorsorge. Von einigen Umweltverbänden^{78,79} wird folgerichtig akzeptiert, dass Klimaneutralität eine CO₂-Abscheidung und -Speicherung erfordert.**

⁷⁸ Treber, Manfred (2017): „Anstoß zu neuer CCU-/CCS-Debatte für Prozessemissionen“, <https://www.germanwatch.org/en/node/14541> (abgerufen 08.08.2023).

⁷⁹ Bellmann, Erika (2020): „Industrie: Klimaschutz durch CCU und CCS?“, <https://blog.wwf.de/ccs-ccu/> (abgerufen 08.08.2023).

Auch zeigen Szenario-Rechnungen⁸⁰ im Hinblick auf das kosteneffiziente Erfüllen der Klimaziele entsprechend dem Klimaschutzplan 2050, dass Deutschland bis Mitte des Jahrhunderts eine weitgehende Treibhausgasneutralität nicht allein mittels neuartiger Verfahren und der Nutzung von CO₂ (CCU) erreichen kann, sondern die unterirdische Speicherung von CO₂ ein wichtiger Beitrag ist. All dies, so die zuversichtliche Erwartung, könnte die negativ besetzte subjektive Risikowahrnehmung von Menschen ändern und Akzeptanz schaffen, obwohl es für das Risikoprofil bei Transport und Speicherung keinen Unterschied macht, ob das CO₂ aus fossil betriebenen Kraftwerken oder Industrieprozessen (Chemie, Eisen und Stahl, Zement, Glas, Papier etc.) stammt.

Abscheidung, Transport und Speicherung von CO₂ in Europa

Der gegenwärtige Status der CCS-Wertschöpfungskette lässt sich wie folgt zusammenfassen: Der Einsatz der **CO₂-Abscheidung** (CO₂ Capture) bietet sich aus ökonomischer Sicht vor allem bei großen, stationären CO₂-Quellen an, bei denen die Reinheitsgrade hoch sind. Die bisher bekannten Technologien sind das Post-Combustion-, das Pre-Combustion- und das Oxyfuel-Verfahren. Generell benötigt die Abscheidung einen vergleichsweise hohen Energieeinsatz. Pre-Combustion-Verfahren scheiden das CO₂ bereits vor der energetischen Nutzung ab, häufig über eine Gasifizierung des Energieträgers. Beim Post-Combustion wird das CO₂ nach der energetischen Nutzung abgeschieden, und zwar mittels einer Aminwäsche. Beide Verfahren sind marktreif. Die auf diese Weise durchgeführte großtechnische Produktion von CO₂ für chemische Prozesse und die Verwendung in der Lebensmittelindustrie sind Stand der Technik. Beim Oxyfuel-Verfahren erfolgt der Verbrennungsprozess mit reinem Sauerstoff, wodurch ein hochkonzentrierter CO₂-Abgasstrom (Anteil CO₂ etwa 80 Prozent, Rest größtenteils Wasserdampf) entsteht, an dem die CO₂-Abscheidung erfolgt. Dieses Verfahren wird bisher nicht kommerziell betrieben. Weitere Abscheidetechniken befinden sich in der Entwicklung oder Erprobung⁸¹.

Umweltbelastungen hängen vom eingesetzten Abscheideverfahren, den Energieträgern sowie der Reinheit des abgeschiedenen CO₂-Stromes ab. Gefährdungen durch kurzfristige Luftemissionen, z.B. bei der Wartung, gehen in erster Linie von den bei der Abscheidung eingesetzten Substanzen aus, nachrangig vom CO₂ selbst, das ohne Abscheidung ohnehin in die Atmosphäre gelangt wäre. Die bei der Aminwäsche eingesetzten Amine sind organische Stickstoffverbindungen, die nach der Wäsche zusammen mit dem Restabgasstrom austreten und in der Luft zur Bildung sekundärer Aerosole führen können oder zu Nitraminen und Nitrosaminen umgewandelt werden. Der Umgang mit solchen Substanzen ist in der Chemieindustrie gängige Praxis.

Weltweit beträgt die jährliche Abscheidekapazität von CO₂ derzeit gut 40 Millionen Tonnen⁸², vorrangig in Branchen, bei denen ohnehin prozessbedingt ein CO₂-reicher Gasstrom entsteht. Die Kohlenstoffquellen sind in den meisten Fällen fossile Kohlenwasserstoffe, so bei der Erdgasaufbereitung, der Düngemittelherstellung oder der Produktion von blauem Wasserstoff (Dampf-Methanreformierung).

⁸⁰ Z. B. BMWi-Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“, BDI-Studie „Klimapfade für Deutschland“.

⁸¹ Projekte LEILAC, MemKoWI, MemCCSea, LOUISE, ANICA.

⁸² Global CCS Institute (2022).

Installationen einer direkten CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (Direct Air Capture – DAC; vgl. Abb. 9) sind bisher auf einige Tausend Tonnen CO₂ pro Jahr beschränkt⁸³. Auch wenn größere DAC-Anlagen geplant oder im Bau sind, ist diese Technologie auf mittlere Sicht noch weit davon entfernt, einen maßgeblichen Beitrag zum Klimaschutz zu liefern. Große Herausforderungen sind die im Vergleich zu Abgasströmen geringe CO₂-Konzentration in der Luft (400 ppm) und der hohe Energiebedarf, der notwendig ist, um große Mengen Luft anzusaugen und das sich an Sorptionsmedien anhaftende CO₂ abzulösen. Damit das Verfahren zusammen mit einer anschließenden Nutzung oder Speicherung des eingefangenen CO₂ klimapositiv ist, muss der Energiebedarf regenerativ gedeckt werden. Die Kosten liegen pro Tonne CO₂ um ein Vielfaches über denen einer CO₂-Abscheidung an Industrieanlagen.

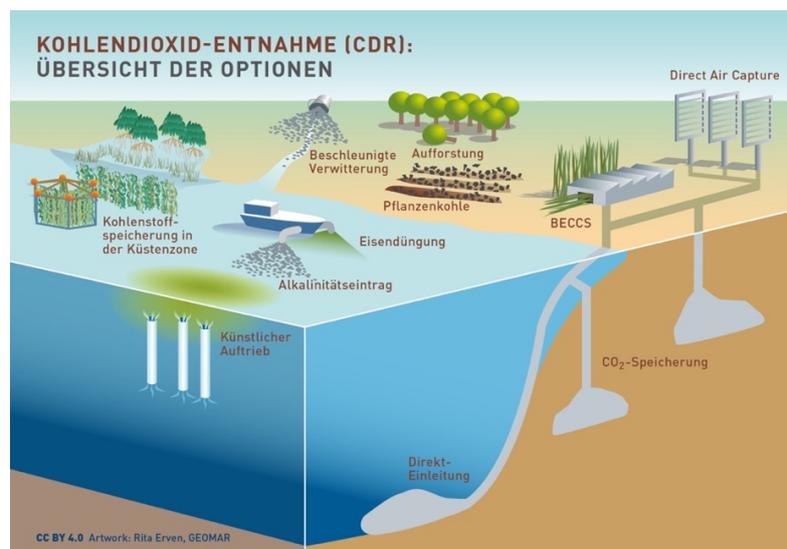


Abbildung 9: Zusätzliche Möglichkeiten der CO₂-Entnahme neben Point-Source-Capture an Industrieanlagen (nicht maßstabsgetreu). Quelle: GEOMAR.⁸⁴

Da CO₂-Quellen aus dem Industriesektor und mögliche Nutzer oder CO₂-Speicherstätten meist an unterschiedlichen Orten liegen, muss CO₂ transportiert werden. Dies geschieht in Kesselwagen (auf Schiene und/oder Straße), per Pipeline oder mit Tankschiffen. Der **Transport von CO₂** in korrosionsbeständigen Stählen ist gesetzlich geregelt und erfolgt seit Jahrzehnten für kommerzielle Zwecke in gasförmigem, flüssigem oder überkritischem Zustand. Die Reinheit des CO₂ beziehungsweise etwaige Verunreinigungen finden jeweils Berücksichtigung. Im KSpG decken die bestehenden Regelwerke den leitungsgebundenen CO₂-Transport bisher nur für die Speicherung ab, nicht für die Nutzung von CO₂⁸⁵.

Fallen regelmäßig größere Mengen CO₂ an, ist der Bau von Pipelines eine ökonomisch wie ökologisch naheliegende Lösung. Schon die Beförderung von 1 Million Tonnen CO₂ erfordert 1.000 Güterzüge, 50.000 Tankwagen oder etwa 250 Binnenschiffe⁸⁶ (vgl. Abb. 10).

⁸³ IEA (2022).

⁸⁴ <https://carbondioxide-removal.eu/materialien/>.

⁸⁵ Neupert u. Hilgenstock, (2022): „CO₂-Transport in Leitungen – nach welchen Regeln?“, <https://gwfgas.de/produkt/co2-transport-in-leitungen-nachwelchen-regeln/> (abgerufen 12.08.2023).

⁸⁶ Der jährliche Bedarf beläuft sich in Deutschland Schätzungen zufolge auf 50 bis 60 Millionen Tonnen CO₂.

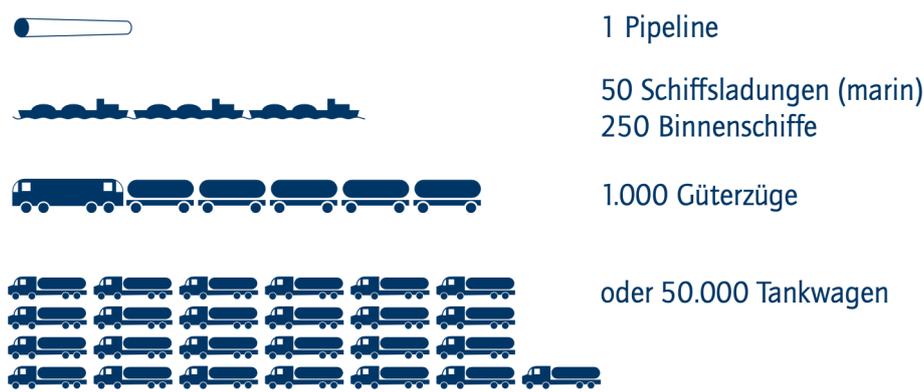


Abbildung 10: Transportaufwands für 1 Million Tonnen CO₂ per Pipeline, Schiff, Bahn oder Tankwagen. Quelle: Acatech 2018⁸⁷

Beim Transport in Tankfahrzeugen und Kesselwagen wird die Wahrscheinlichkeit von Unfällen der statistischen Unfallhäufigkeit im Schienen- bzw. Straßengüterverkehr entsprechen. Die bei weitem höchsten Unfallkosten pro Kilometer werden von Last- und Sattelzügen verursacht. Anders als bei Pipelines sind Umweltbelastungen zudem durch Verkehrslärm und Abgase gegeben. Im Wissen um den beträchtlichen zeitlichen Vorlauf, den ein Pipelinebau erfordert, und die Dringlichkeit von Maßnahmen zur Minderung von CO₂-Emissionen, sind bereits nachfolgend genannte Entwicklungen in Gang gekommen.

Anhand einer von der EU-Kommission fortgeschriebenen Liste von ‚Vorhaben gemeinsamen Interesses‘ erhalten Planungen von grenzüberschreitenden Pipeline-Infrastrukturprojekten Aussicht auf eine Förderung der EU. In der Carbon Management Strategie von Nordrhein-Westfalen wurden zwecks Transportes zu Umschlagplätzen in Rotterdam bzw. Wilhelmshaven Cluster für CO₂-Pipelinenetze an Rhein und Ruhr sowie in Westfalen skizziert⁸⁸. Das Unternehmen Open Grid Europe⁸⁹ erwägt den Aufbau eines CO₂-Pipelinenetzes von Köln bzw. Wolfsburg und Salzgitter über einen Knotenpunkt in Oldenburg bis nach Wilhelmshaven. Mit einer Länge von 964 Kilometern sollen in einer ersten Phase jährlich bis zu 19 Millionen Tonnen CO₂ transportiert werden können. Wintershall Dea und Equinor gaben 2022 Pläne für den Bau einer CO₂-Pipeline von Wilhelmshaven bis in die norwegische Nordsee bekannt⁹⁰. Für einen CO₂-Umschlagplatz in Wilhelmshaven wurde eine Machbarkeitsstudie erstellt.

Aktuell werden in Zusammenhang mit dem CO₂-Transport per Pipeline Forschungsfragen bearbeitet, die wechselnde Verunreinigungen von CO₂-Strömen beinhalten, dynamische Vorgänge bei einem Versagen von Rohrleitungen (z.B. aufgrund äußerer Einwirkungen oder innerer Korrosion), die Optimierung von Pipelinenetzen, um

⁸⁷ Acatech (2018): „CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. Analyse, Handlungsoptionen und Empfehlungen“.

⁸⁸ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2021.

⁸⁹ OGE (2023): „Mit OGE auf dem Weg zur Klimaneutralität“, <https://co2-netz.de/de> (abgerufen 12.08.2023).

⁹⁰ Equinor (2022): „Equinor and Wintershall Dea partner up for large-scale CCS value chain in the North Sea“, <https://www.equinor.com/news/20220830-equinor-wintershall-dea-large-scale-ccs-value-chain> (abgerufen 12.08.2023).

unterschiedliche CO₂-Quellen und Speicherstätten zu verbinden, und Optionen der Nachnutzung bestehender Infrastruktur aus der Kohlenwasserstoffförderung (z.B. Erdgasleitungen). Auch wechselnde zeitliche Abfolgen der Verfügbarkeit von CO₂-Quellen und -Speichern sind Gegenstand von Untersuchungen, ebenso der Umgang mit Überkapazitäten bei steigenden Transportraten und erforderlichen Netzanpassungen, wenn Erdgasreservoirs zu unterschiedlichen Zeiten ausgefördert und Speicher sukzessive vollgefüllt sind oder CO₂-Quellen aufgrund von Umstellungen in der Energieversorgung wegfallen. Im Sinne europaweiter Klimaschutzanstrengungen sind Überlegungen anzustellen, inwieweit Deutschland Transitland für abgediebstes CO₂ werden sollte, das aus benachbarten Staaten stammt, insbesondere solchen, die selbst kein CO₂-Speicherpotenzial haben (z.B. Tschechien, Schweiz). Transitmengen könnten auch zur besseren Auslastung der ohnehin benötigten CO₂-Transportinfrastruktur beitragen.

Rechtlich gesehen ist das London-Protokoll⁹¹ von Relevanz, das die CO₂-Speicherung in tiefem Meerwasser (,in der Wassersäule‘) verbietet. Nach einer Ergänzung von 2009 ist der Export von CO₂ zum Zweck seiner geologischen Speicherung zudem nur dann erlaubt, wenn die betroffenen Staaten eine bilaterale (oder multilaterale) Vereinbarung treffen, die die Verantwortung und Aufteilung von Zuständigkeiten im Einklang mit dem London-Protokoll regelt. Bis 2022 haben nur acht Staaten diese Ergänzung ratifiziert⁹², sodass diese noch nicht wirksam ist (benötigt werden mindestens zwei Drittel der Vertragsparteien). Man beschloss daher die Möglichkeit einer provisorischen Anwendung, wodurch der CO₂-Export bei Abschluss eines entsprechenden bilateralen Abkommens zwischen den betroffenen Staaten zulässig wird. Bis 2022 haben diesbezüglich nur Norwegen, Dänemark und die Niederlande eine provisorische Anwendung bei der zuständigen International Maritime Organization (IMO) erklärt⁹³. Norwegen und Schweden wollen zeitnah auf ein solches Abkommen hinarbeiten.

Auf die fachspezifischen Besonderheiten der tiefengeologischen **Speicherung von CO₂** wurde bereits eingegangen. **In Europa sind derzeit 17 CCS-Vorhaben geplant bzw. in der Umsetzung, darunter sechs in Großbritannien, fünf in Belgien und den Niederlanden sowie je zwei in Dänemark und Norwegen. Das CO₂ stammt jeweils aus Industrieprozessen der chemischen Industrie, von Erdölraffinerien, der Eisen- und Stahlproduktion, der Müllverbrennung, der Zementherstellung, aus Erdgaskraftwerken und der Wasserstoffproduktion. Drei fortgeschrittene Vorhaben mit Beteiligung deutscher Unternehmen seien hier beispielhaft aufgeführt. Es sind das niederländische Porthos-Projekt, das Longship/Northern-Lights-Projekt in der südlichen Norwegischen See und das Greensand-Vorhaben vor der Westküste Dänemarks (vgl. auch Abb. 11).**

Das Porthos-Projekt („Port of Rotterdam CO₂ Transport Hub and Offshore Storage“) ist auf eine Abscheidekapazität von 2,5 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr ausgelegt. Das CO₂ stammt aus dem Chemiesektor und der Produktion von ‚blauem‘ Wasserstoff und wird

⁹¹ Protokoll zum Londoner Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen, 1972/1996.

⁹² Dänemark, Estland, Finnland, Niederlande, Norwegen, Schweden, Vereinigtes Königreich, Iran.

⁹³ Global CCS Institute (2022): „Developments and Opportunities . A review of national responses to CCS under the London Protocol“, <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/05/Perspective-A-review-of-national-responses-to-CCS-under-the-London-Protocol-Global-CCS-Institute.pdf> (abgerufen 12.08.2023).

über ein Pipelinenetz, das vier Industrieanlagen verbindet, in drei ausgeförderte Erdgaslagerstätten 20 Kilometer vor der Küste der Niederlande verbracht. Ab 2026 sollen auf diese Weise über eine Betriebszeit von 15 Jahren bis zu 37 Millionen Tonnen CO₂ in einer Tiefe von etwa 3 Kilometern gespeichert werden⁹⁴.

Dies füllt nur einen kleinen Teil des unserem Nachbarland zur Verfügung stehenden Speicherpotenzials. Der Geologische Dienst der Niederlande (Abteilung der Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, TNO) schätzt die realisierbare Speicherkapazität in ca. 100 entleerten Erdgasfeldern auf 1,6 Milliarden Tonnen CO₂. Etwa ebenso groß ist die prognostizierte Speicherkapazität in salinaren Aquiferen. Geologisch gespeichertes CO₂ gilt in den Niederlanden als nicht emittiert und wird nicht besteuert. Eine über die kommenden Jahre steigende CO₂-Steuer soll zu einem steigenden wirtschaftlichen Anreiz für die Implementierung von CCS führen.

Das Longship-Projekt Norwegens⁹⁵ fokussiert auf abgeschiedenes CO₂ aus der Müllverbrennung und der Zementindustrie und auf seine Injektion in saline Aquifere. Aufgrund der geologischen Bedingungen ist die Speicherung von CO₂ in Norwegen nur offshore unter dem Meeresboden des norwegischen Kontinentalschelfs möglich. Die potenziellen Speicherkapazitäten betragen konservativ geschätzt 70 Milliarden Tonnen CO₂ und sind damit etwa 2.000-mal größer als die jährlichen Gesamtemissionen Norwegens. Das Longship-Vorhaben deckt die gesamte CCS-Kette von der Abscheidung bis zur Speicherung ab und umfasst neben einer Pipeline und Schiffen für den CO₂-Transport Onshore-Anlagen zur CO₂-Zwischenspeicherung sowie Anlagen zur Injektion von verflüssigtem CO₂ in den Meeresuntergrund. Bislang ist eine Verbringung von jährlich 1,5 bis 5 Millionen Tonnen CO₂ in saline Aquifere projektiert.

Transport und Speicherung des CO₂ werden zudem vom Unterprojekt „Northern Lights“ als Dienstleistung für andere europäische Interessenten angeboten. Eine erste Vereinbarung mit grenzüberschreitendem CO₂-Transport wurde im August 2022 mit dem norwegischen Ammoniak- und Düngemittelhersteller Yara abgeschlossen, der auch in den Niederlanden produziert⁹⁶. Das norwegische Ministry of Petroleum and Energy (MPE) bietet überdies seit 2019 Speicherlizenzen für ausgewählte Gebiete zum Erwerb an. Die vierte Lizenz dieser Art wurde im Oktober 2022 von Wintershall Dea erworben.

Wintershall Dea ist auch zu 40% an dem am weitesten fortgeschrittenen CCS-Projekt Dänemarks, „Greensand“, beteiligt. Ziel dieses Vorhabens ist es, CO₂ in einem alten Erdölfeld 1.800 Meter unter der Nordsee zu speichern, etwa 200 Kilometer vor der dänischen Küste. Das aus noch weiteren Partnern bestehende Greensand-Konsortium geht davon aus, dass bis 2025 jährlich 0,5 bis 1 Million Tonnen CO₂ eingelagert werden können, bis 2030 soll die Menge auf bis zu 8 Millionen Tonnen pro Jahr ansteigen.⁹⁷

⁹⁴ Porthos (2022): <https://www.porthosco2.nl/en/project/> (abgerufen 26.08.2023).

⁹⁵ Longship (2023): <https://ccsnorway.com/> (abgerufen 26.08.2023).

⁹⁶ YARA (2022): „Northern Lights and Yara sign first cross-border CO₂ transport and storage deal in ‘major milestone’ for decarbonising Europe“, <https://www.offshore-energy.biz/major-milestone-for-decarbonising-europe-as-northern-lights-and-yara-sign-first-cross-border-co2-transport-and-storage-deal/> (abgerufen 27.08.2023).

⁹⁷ Greensand (2023): <https://www.projectgreensand.com/en> (abgerufen 27.08.2023).

Das CO₂ soll von einem dänischen Zementhersteller, aus der Müllverbrennung Kopenhagens und einem belgischen Chemieunternehmen per Pipeline bzw. von Antwerpen per Schiff antransportiert werden. Für die Einlagerung wird eine bestehende Nordsee-Plattform genutzt, Injektionsbohrungen werden neu abgeteuft. Ein weiteres CCS-Projekt ist in Vorbereitung. Der französische Energiekonzern TotalEnergies erhielt kürzlich von Dänemark die Genehmigung, 250 Kilometer vor der dänischen Westküste CO₂ in einem ehemaligen Gasfeld einzulagern.

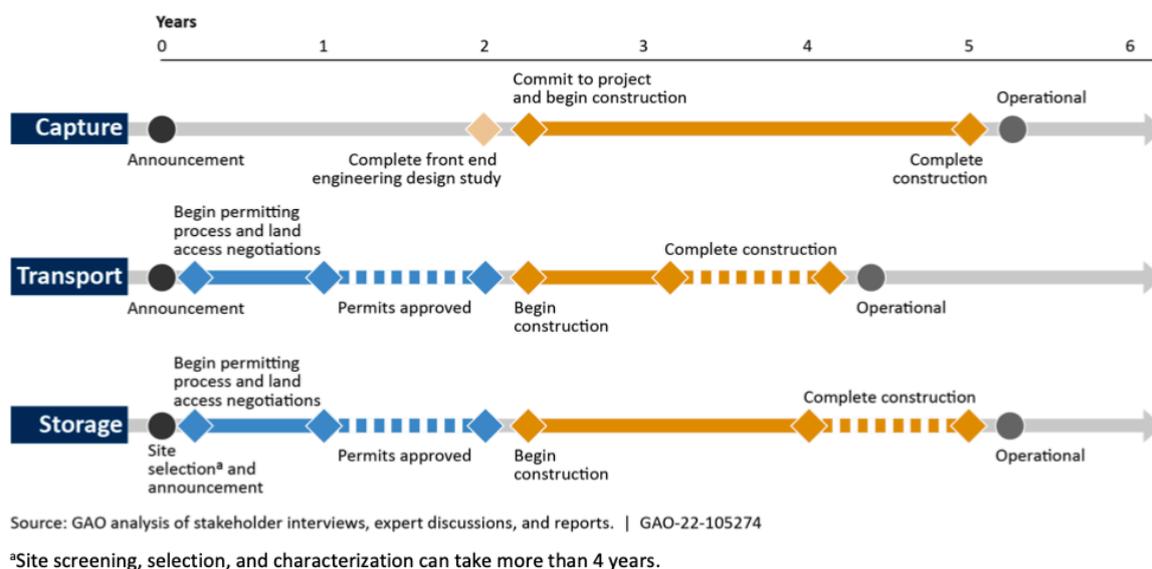


Abbildung 11: Zeitskalen für die Entwicklung und Umsetzung von Carbon-Management-Projekten am Beispiel USA. Quelle: GAO 2022.⁹⁸

Fokus laufender Forschungsvorhaben

Größere aktuelle Forschungsaktivitäten zu CCU und CCS, die von der EU gefördert werden, sind beispielsweise die Vorhaben C4U und LEILAC2, mit jeweils deutscher Beteiligung. Bei dem auf eine Laufzeit von vier Jahren ausgelegten C4U-Projekt stehen die Weiterentwicklung von CO₂-Abscheidungsverfahren in der Eisen- und Stahlindustrie und deren Integration in ein Stahlwerk im Industriecenter „North Sea Port“ in Belgien und den Niederlanden im Mittelpunkt⁹⁹. Abgeschiedenes CO₂ soll hierbei in ausgefördernde Erdgaslagerstätten unter der Nordsee gespeichert werden. An dem Projekt beteiligen sich 21 Partner aus 11 Staaten, darunter solche aus Kanada und den USA.

Das LEILAC2-Projekt („Low Emissions Intensity Lime And Cement“) umfasst die zweite Phase von Forschungsaktivitäten zur emissionsarmen Herstellung von Kalk und Zement. Ziel dieses auf eine Laufzeit von fünf Jahren ausgelegten Vorhabens ist die Demonstration der bisher lediglich im kleinen Maßstab erprobten Technologie zur deutlichen Reduktion von CO₂-Emissionen bei geringem zusätzlichem Energie- und Kostenaufwand. Die an einem Zementwerk in Belgien getestete Pilotanlage soll in größerem Maßstab in einem Zementwerk der Firma Heidelberg Materials bei Hannover realisiert

⁹⁸ United States Government Accountability Office (2022): „Technology Assessment – Decarbonization“.

⁹⁹ The C4U Project (2020): <https://c4u-project.eu/> (abgerufen 28.08.2023).

werden. Dadurch sollen künftig 100.000 Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr vermieden werden¹⁰⁰.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die CCS-Technologie für Industriestaaten wie Deutschland eine unverzichtbare Wertschöpfung darstellt, ohne die die notwendigen, ambitionierten Klimaschutzziele nicht zu erreichen sind. Maßgebliche Gesichtspunkte, die es bei der Einführung gesamtheitlich zu berücksichtigen und zu optimieren gilt, sind

- die CO₂-Mengen, die durch CCS vermieden werden können,
- der zeitliche Rahmen, in dem dies geschehen kann,
- der Fußabdruck, welchen Energieaufwand, CO₂-Transport und Flächenbedarf hinterlassen,
- die Kosten, die hiermit jeweils verbunden sind und
- die Akzeptanz in der Zivilgesellschaft.

Chancen für neue Glaubwürdigkeit

Hinsichtlich des letzten Punktes ist zu beklagen, dass frühere Schilderungen widersinnig überzogener Risiken und die extensive Verbreitung von Ängsten, die vornehmlich von Wortführern aus dem Umweltbereich vorgetragen und von politischen Entscheidungsträgern ohne ausreichende Fachkenntnis übernommen wurden, dem Einsatz von CCS in Deutschland abträglich waren. Besonders nachteilig waren unredliche und unwahre Behauptungen, gezielt verbreitete Falschinformationen und Emotionen ansprechende Darstellungen, selbst wenn sich dahinter die aus heutiger Sicht vertretbare Absicht verborgen haben mag, den Einsatz von CCS für den Kohlekraftwerksektor zu verhindern oder auch die Ablehnung parteitaktisch motiviert war. **Die Wirkung dieser breit angelegten Desinformation hat in großen Teilen der Bevölkerung verfangen und ist noch heute präsent.**

Umso schwieriger ist es – nachdem bei vielen politischen Akteuren die Einsicht in die Notwendigkeit von CCS zugenommen hat –, verschüttete Milch wieder einzusammeln. **Hier dürfte am ehesten ein selbstkritisches, offenes Eingeständnis der eigenen Missdeutung oder Fehleinschätzung seitens der Verantwortlichen dazu führen, verlorenes Vertrauen in CCS-Maßnahmen wiederzugewinnen.** Mutmaßlich nur so kann in großen Teilen der Bevölkerung ein Umdenken stattfinden.

¹⁰⁰ LEILAC2 Project (2020): <https://www.leilac.com/project-leilac-2/> (abgerufen 28.08.2023)

III. Wasserstoff als Voraussetzung für CCU – die klimaneutrale energetische Nutzung des Rohstoffs CO₂

Prof. Dr. Reinhard Hüttl und Dr. Uwe Schneider

Carbon Capture tut nicht nur dem Klima gut, sondern eröffnet als Carbon Capture and Utilization (CCU) auch neue wirtschaftliche Möglichkeiten. CO₂ wird damit zum Rohstoff für die Herstellung von Wasserstoffderivaten. Reinhard Hüttl war von 2007 bis 2021 Leiter des Deutschen GeoForschungsZentrums und von 2008 bis 2017 Präsident der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech). Zu seinen einschlägigen Veröffentlichungen gehören die Berichte des Kuratoriums „Forum für Zukunftsenergien“. Reinhard Hüttl ist Mitglied im beratenden Kuratorium des Clean Energy Forums.

Uwe Schneider ist ein gefragter Experte für ökologische Nachhaltigkeit des Klimaschutzes und der Energiewende. Am Deutschen GeoForschungsZentrum war er Leiter im wissenschaftlichen Vorstandsbereich. Zu seinen zentralen Aufgaben gehörten u.a. die Koordination des Forschungsbereichs Geoenergie und zahlreiche Sonderaufgaben des Vorstands wie die Koordination des 1. und 2. Klimaschutzgipfels der Bundesregierung.

1. Handlungs-Korridor

- Die vom Menschen verursachten CO₂- (bzw. Treibhausgas-) Emissionen wirken global mit regionalspezifischen Auswirkungen; zu den Folgen des Klimawandels gehören Feedbacks mit erheblichen Treibhausgasemissionen aus natürlichen Systemen (z. B. großflächige Waldbrände, Bodendegradation, auftauende Permafrostböden).
- Klimaschutz bedeutet die Reduktion von Treibhausgasen und gelingt nur durch die Transformation der Energieversorgung weg von fossilen hin zu klimaneutralen Energien.
- Aktuell beruht die Energieversorgung Deutschlands zu 80% auf fossilen Energieträgern. 7-8-% der Primärenergiebereitstellung werden derzeit durch Windkraft und Photovoltaik abgedeckt. Somit wird ein neuer klimaneutraler Energieträger benötigt: klimaneutraler Wasserstoff.
- Für die Herstellung von klimaneutralem Wasserstoff existieren vielfältige Technologien, die den notwendigen Hochlauf einer globalen Wasserstoffwirtschaft ermöglichen. Die Frage des Anteils von Importen und eigener Produktion einschließlich entsprechender Derivate (z. B. Ammoniak, synthetische Brennstoffe, e-Fuels) hängt entscheidend von den sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen ab. Eine Einengung auf bestimmte Technologien innerhalb des Spektrums von Herstellungsverfahren für klimaneutralen Wasserstoff wird den damit verbundenen Herausforderungen nicht gerecht.
- Klimaneutraler Wasserstoff ist die Voraussetzung für die klimaneutrale energetische Nutzung des Rohstoffs CO₂.

- Notwendig hierfür ist eine umfassende CO₂-Kreislaufwirtschaft, die Schritt für Schritt die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre priorisiert.
- Neben der direkten energetischen Nutzung von klimaneutralem Wasserstoff können damit unter Nutzung von CO₂ als Rohstoff alle Produkte, die bislang auf Basis fossiler Energieträger hergestellt wurden, als klimaneutrale Wasserstoff-Derivate zur Verfügung gestellt werden.
- Schritt für Schritt zum Ziel: Ein entscheidender Klimaschutzvorteil dieser Strategie ist die weitgehende Weiternutzung bereits mit großem Rohstoff- und Energieaufwand gebauter Infrastrukturen, ohne damit moderne Infrastrukturmaßnahmen (z. B. E-Mobilität, Wärmepumpen, Wasserstoffnetze) zu gefährden. Insgesamt werden so beträchtlichen CO₂-Emissionen vermieden und schädliche Eingriffe in den Natur- und Landschaftshaushalt minimiert.
- Maßstab dieses Konzeptes ist die möglichst exakte Erfassung des CO₂-Fußabdrucks – insbesondere unter der Berücksichtigung, dass das CO₂-Molekül weit über 100 Jahre in der Atmosphäre wirksam ist.
- Jedes Treibhausgas- bzw. CO₂-Molekül, das nicht zusätzlich in die Atmosphäre gelangt, ist ein Klimaschutz-Molekül, denn diese Strategie ermöglicht, den noch vorhandenen CO₂-Emissionsrahmen der Erderwärmungs-Abkommen auch für tatsächlich nicht zu vermeidende CO₂-Emissionen zu nutzen.

2. Motivation: Klimawandel

Hintergrund

Unser Planet Erde ist vor etwa 4,5 Milliarden Jahren entstanden; seit etwa 3,7 Milliarden Jahren gibt es Leben auf der Erde und vor etwa 300.000 Jahren begann der Homo sapiens seine bemerkenswerte Entwicklung. Von Anfang an befindet sich die Erde in einer ständigen Entwicklung, und dies gilt insbesondere für das Klima auf unserem Planeten. Es gab Phasen, in denen es kein Eis auf der Erde gab, und es gab Phasen mit viel Eis – einmal war unsere Erde sogar ein Schneeball.^{101,102,103}

Dennoch ist das, was wir derzeit mit unserem Klima erleben, neu: Warum?

Spätestens seit Anfang der 1970er Jahre können wir die Klimadynamik, insbesondere die Entwicklung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, nicht mehr mit natürlichen Faktoren erklären.

¹⁰¹ Petit, J.-R. et al. (1999): Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica. Nature 399, S. 429-436.

¹⁰² Siegenthaler, U. et al. (2005): Carbon dioxide concentrations for the Last Millenium, Antartica. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.728135>.

¹⁰³ Hüttl, R. F. (2011): Ein Planet voller Überraschungen. Spektrum, S. 316.

Spätestens zu diesem Zeitpunkt wurde der Mensch zu einem Geofaktor. Die enorme Bevölkerungsdynamik des Menschen mit aktuell 8 und bald 10 Milliarden Menschen und vor allem die intensive Nutzung fossiler Energieträger durch den Menschen in Verbindung mit einer großflächigen Landnutzung haben zu einer dramatischen Entwicklung der Treibhausgasemissionen, vor allem von CO₂ geführt. Dieser Prozess bewirkt eine verstärkte globale Erwärmung.¹⁰⁴

Seit den Verhandlungen über das Kyoto-Protokoll im Jahr 1995, verstärkt durch das Pariser Abkommen von 2015 zur Einhaltung des 1,5°C-Ziels, wissen wir, dass akuter Handlungsbedarf besteht: Wir müssen die vom Menschen verursachten Emissionen der Treibhausgase in die Atmosphäre reduzieren! Als Folge des gestiegenen gesellschaftlichen Bewusstseins haben sich die EU mit dem European Green Deal und viele andere Staaten auf Klimaneutralität geeinigt. Deutschland und andere EU-Staaten wollen die Klimaneutralität nicht erst im Jahr 2050, sondern bereits im Jahr 2045 erreichen. Dieses Ziel kann nur realisiert werden, wenn wir aus der Nutzung fossiler Rohstoffe, konkret der klimaschädlichen Verwendung dieser Materialien, aussteigen. Nicht nur für wichtige industrielle Produktionsprozesse in der Chemie-, Zement-, Stahl-, Glas- und Düngemittelindustrie, sondern auch in den Sektoren Mobilität und Wohnen – hier geht es vor allem um Wärme – sowie in der Landnutzung bedeutet dies einen dramatischen Wandel unserer Energieversorgungssysteme hin zu klimaneutralen Energiequellen – also der klimaneutralen Verwendung entsprechender Rohstoffe.

3. Konsequenz: Transformation der Energieversorgung – Aktuelle Herausforderungen

In der gesamten EU ist zur Transformation der Energieversorgung ein weiterer massiver Ausbau der erneuerbaren Energien geplant. In Deutschland beträgt dieser Anteil aktuell etwa 19-20% der Energiebereitstellung, wobei davon wiederum über 50% aus Biomasse stammen, insbesondere aus der Nutzung von Holz. Nach dem kompletten Ausstieg aus der Kernenergie Ende April 2023 basiert unser Energiesystem zu etwa 80% aus fossilen Rohstoffen. Über alle Sektoren der Energieversorgung hinweg leisten Wind- und Sonnenkraft zurzeit etwa 7-8 % der deutschen Energieversorgung.¹⁰⁵

Interessant ist die in Deutschland installierte elektrische Leistung. Dies betrifft die konventionellen Kraftwerke auf Basis von Kohle, Erdgas und Erdöl mit insgesamt etwa 100.000 – 110.000 MW. Eine deutlich größere elektrische Leistung ist inzwischen über Windkraftträder und Photovoltaikanlagen installiert – insgesamt verfügen wir in Deutschland aktuell also über mindestens 250.000 MW.¹⁰⁶ Was den tatsächlichen

¹⁰⁴ Le Quéré, C. et al. (2015): Global Carbon Budget. ESSD, Vol. 7, Issue 2, S. 349–396 (<https://doi.org/10.5194/essd-7-349-2015>).

¹⁰⁵ Hüttl, R. F. (2022): Berichte des Kuratoriums „Forum für Zukunftsenergien“ (DOI:10.1038/20859).

¹⁰⁶ BDEW (2022): „Die Energieversorgung 2021 – Jahresbericht“, https://www.bdew.de/media/documents/Jahresbericht_2021_UPDATE_Juni_2022.pdf.

Verbrauch elektrischer Leistung in Deutschland anbelangt, so liegt dieser bei etwa 80.000 MW für einen typischen Werktag und bei ca. 40.000 bis max. 60.000 MW an einem Wochenendtag.¹⁰⁷ Mit der (noch) vorhandenen Leistung der konventionellen Kraftwerke könnten wir also unseren Strombedarf nach wie vor decken einschließlich der „Auszeiten“ für Erhaltungs- und Reparaturarbeiten an den entsprechenden Infrastrukturen. Dagegen deckt die installierte elektrische Leistung von Windkraft und Photovoltaik mit etwa 150.000 MW aktuell nur die Hälfte des Strombedarfs, weil eben der Wind nicht immer weht und die Sonne nicht immer scheint bzw. der Strom nicht immer dort produziert wird, wo er tatsächlich gebraucht wird und notwendige Leitungssysteme fehlen.

Um die geplanten 80% erneuerbaren Strom bis 2030 zu erreichen, müsste die aktuell installierte Leistung im Bereich der erneuerbaren Energien mindestens verdoppelt, vermutlich sogar verdreifacht werden, auch deshalb, weil z. B. viele günstige Windstandorte schon für Windkraft genutzt werden. Dies würde bedeuten, dass zu diesem Zeitpunkt allein im Bereich der erneuerbaren Energien über 300.000 MW installierte Leistung etabliert wären.¹⁰⁸ Hier ist der geplante weitere Ausbau der Photovoltaik mit etwa 200.000 MW nur teilweise einbezogen. Zur Sicherung der notwendigen Grundlast muss ein Teil der konventionellen Kraftwerke weiter betrieben bzw. soll durch den Bau von mindestens 20-30 modernen Gaskraftwerken ersetzt bzw. ergänzt werden. Konkret ist geplant, bis zu 30 Gigawatt Strom in diesen neu zu errichtenden Kraftwerken zu erzeugen, die bis 2035 mit Erdgas und danach mit Wasserstoff betrieben werden sollen.¹⁰⁹ Parallel dazu müsste ein Teil der formal stillgelegten konventionellen Kraftwerke in die sogenannte Netzreserve überführt werden, um für bestimmte Bedarfssituationen, wie z.B. Dunkelflauten, also für Zeiten ohne Sonnenschein und Wind, wieder zur Stromlieferung aktiviert zu werden. Wenn wir gleichzeitig von einer stärkeren Elektrifizierung ausgehen, z.B. für die E- Mobilität oder im Bereich der Haushalte durch Wärmepumpen oder für die chemische Industrie, dann erhöht sich der Strombedarf abermals. Und um diesen zu decken, müsste der Ausbau der erneuerbaren Energien nochmals gesteigert werden. Damit erhöht sich dann auch der bereits heute bestehende Bedarf an neuen Übertragungs- und insbesondere bei den Verteilnetzen.

Ist das der richtige Weg in die Zukunft? Und wenn er es wäre, kann er tatsächlich realisiert werden? Und wenn er realisiert würde, was ist der damit verbundene CO₂-Fußabdruck? Gäbe es Alternativen?

¹⁰⁷ Statista (2023), <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164149/umfrage/netto-stromverbrauch-in-deutschland-seit-1999/>.

¹⁰⁸ Hüttl, R. F. (2022): Berichte des Kuratoriums „Forum für Zukunftsenergien“ (DOI:10.1038/20859).

¹⁰⁹ NDR (2023): „Habeck: Wasserstoff-Anlagen sollen Kohle- und Gaskraftwerke ersetzen“, <https://www.ndr.de/nachrichten/hamburg/Habeck-Wasserstoff-Anlagen-sollen-Kohle-und-Gaskraftwerke-ersetzen,wasserstoff468.html>.

4. Von zentraler Bedeutung: Der CO₂-Fußabdruck

Jedes CO₂-Molekül, das in die Atmosphäre gelangt, wirkt dort für mindestens 100, vermutlich sogar über 1.000 Jahre.¹¹⁰ Infolge der weltweiten Corona-Pandemie sank im Jahr 2020 der anthropogene CO₂- Ausstoß global um etwa 6%. Trotzdem erreichte der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre mit etwa 416 ppm einen neuen Höchstwert.¹¹¹ Grund hierfür sind massive CO₂-Emissionen z.B. aus verbrennenden und absterbenden Wäldern sowie aus auftauenden Permafrostböden, resultierend aus den Effekten des bereits stattfindenden Klimawandels mit seinen regionalspezifischen Auswirkungen. Noch ungeklärt sind hierbei die Wechselwirkungen zwischen Biodiversitätsverlust und CO₂-Speicherfähigkeit von Ökosystemen. Hier spielen die Böden und deren Dynamik eine entscheidende Rolle. Hinzukommen aber auch erhebliche CO₂-Effekte, die bei der Umstellung bzw. Erneuerung des Energiesystems entstehen. Die Herstellung jeder Windkraftanlage, jedes Photovoltaik-Moduls, jedes Elektroautos, und der dafür erforderlichen neuen Leitungs- und Anschlussinfrastruktur ist zunächst einmal mit CO₂- bzw. Treibhausgasemissionen verbunden. Deshalb ist es zwingend notwendig, nicht nur die zukünftige Reduktion der CO₂-Emissionen zu kalkulieren, sondern jeweils den gesamten CO₂-Fußabdruck in den Blick zu nehmen. Alles andere wäre eine Milchmädchenrechnung, die nicht aufgehen kann; denn die Atmosphäre „versteht“ unsere Kalkulationen nicht, sondern reagiert nach physikalischen und chemischen Gesetzmäßigkeiten, die im Kontext Erderwärmung vor allem auf dem tatsächlichen Input der Treibhausgase und deren Verweildauer in der Atmosphäre beruhen. Auch veränderte Bewölkungsregime, z. B. infolge reduzierter Partikelemissionen, können hierbei eine Rolle spielen.

Ein Effekt des Klimawandels ist anderes Wetter. Oder anders ausgedrückt: Ohne anderes Wetter gäbe es keinen Klimawandel. Dies mag banal klingen, ist aber für unsere Debatte hoch aktuell; denn verändertes Wetter heißt eben auch andere Windregime. Die Vorstellung, wir bauen verstärkt neue Windräder und ernten dann mehr Windenergie, ist – jedenfalls linear betrachtet – nicht richtig. Es kann mehr, aber auch weniger sein, so wie wir dies im Jahr 2021 im Vergleich zum Vorjahr wegen geringer Windaktivität erlebt haben.¹¹² Durchschnittlich weht der Wind an der Küste etwa 2.500 Stunden, im Inland ca. 1.800 Stunden und auf dem Meer bis zu 3.500 Stunden pro Jahr. Anderes Wetter betrifft auch die Sonnenenergie, z.B. durch veränderte Bewölkung, sowie die Bioenergie, z.B. durch veränderte Biomasseproduktion in Folge von Trockenheit, Überschwemmungen oder Schädlingsbefall. Von den 8.760 Stunden eines Jahres scheint die Sonne in Deutschland im Durchschnitt ca. 900 bis 1.200 Stunden.

¹¹⁰ DKK (2023): <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-12-3.html>.

¹¹¹ SCRIPPS Institution of Oceanography – NOAA Global Monitoring Laboratory (2022): <https://www.klimawandel-rlp.de/de/daten-und-fakten/klimawandel-global/kohlendioxid-in-der-atmosphaere/>.

¹¹² Fraunhofer ISE (2021): „Nettostromerzeugung im 1. Halbjahr 2021“, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2021/nettostromerzeugung-im-1-halbjahr-2021-schwacher-wind-sorgt-fuer-rueckgang-der-erneuerbaren-energien.html>.

5. Lösungsoptionen: Klimaneutraler Wasserstoff als Energieträger und CO₂ als Rohstoff

Auch wenn der Sektor Strom durch gesteigerte Elektrifizierung verschiedener Bereiche an Bedeutung gewinnt, werden aktuell vor allem die beiden anderen energierelevanten Sektoren, nämlich Wärme (inkl. Kälte) und Mobilität, die zusammen über 75% unserer Energieversorgung ausmachen, intensiv diskutiert; denn in diesen Bereichen spielen die fossilen Energieträger – neben Kohle insbesondere Erdgas und Erdöl mit einem Anteil von bis zu 90% des Verbrauchs – die entscheidende Rolle. Da auch für den Sektor Strom 50% aus fossilen Energiequellen erzeugt werden, beträgt der Anteil der fossilen Rohstoffe am Gesamtenergiesystem aktuell tatsächlich 80%!

Somit gilt es, diese fossilen Energieträger durch einen neuen klimaneutralen Energieträger zu ersetzen. Dies ist Wasserstoff. Wasserstoff ist sicherlich der zentrale zukünftige Energieträger. Denn die politisch gesetzten Etappenziele zur Erreichung der Klimaneutralität in der EU können nur realisiert werden, wenn die fossilen Energieträger – allem voran Kohle und Erdöl sowie schrittweise auch Erdgas – durch klimaneutralen Wasserstoff ersetzt werden. Dieser Transformationsprozess sollte in Kombination mit optimierter Energieeffizienz und verstärkter Elektrifizierung realisiert werden.

Voraussetzung für die energetische Nutzung von CO₂ und damit für eine nachhaltige CO₂-Kreislaufwirtschaft ist klimaneutraler Wasserstoff. Dabei geht es um die Anforderung, fossile Rohstoffe durch klimaneutralen Wasserstoff zu ersetzen. Konkret geht es vor allem darum, möglichst alle energetischen Produkte und Leistungen, die bislang auf Basis von fossilen Kohlenwasserstoffen bereitgestellt wurden, durch wasserstoffbasierte Produkte und Leistungen klimaneutral zu ersetzen.

Dabei ist die Frage entscheidend, wann steht Wasserstoff, und das heißt klimaneutraler Wasserstoff, in hinreichenden Mengen und zu entsprechenden Kosten zur Verfügung? Grundsätzlich kann dieser, wie letztendlich alle aktuell vorliegenden Studien zeigen, durch den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien sowie auf der Basis von Biomasse einschließlich entsprechender Abfälle, aber auch mit Kernenergie sowie mit Erdgas (und anderen fossilen Energieträgern) erzeugt werden (vgl. Abb. 12).

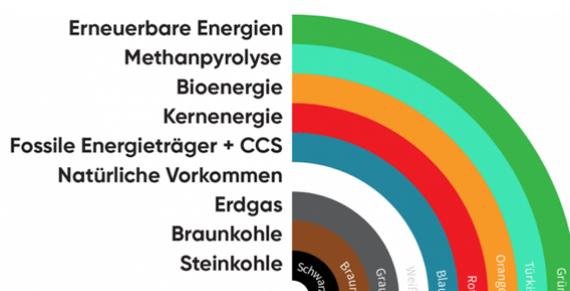


Abbildung 12: Farbenlehre für die Erzeugung von Wasserstoff nach Energieträgern¹¹³

¹¹³ IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität (2020): „Wasserstoff-Farbenlehre“, https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/01/IKEM_Kurzstudie_Wasserstoff_Farbenlehre.pdf.

6. Klimaneutraler Wasserstoff – Optionen der Bereitstellung

Von Anfang an wurde die Wasserstoffstrategie der EU darauf ausgerichtet, dass „grüner Wasserstoff“ zum Einsatz kommt – das ist klimaneutraler Wasserstoff, hergestellt aus Wasser mit Windkraft und Sonnenenergie über das Verfahren der **Elektrolyse** (vgl. Abb. 12). Mit diesem Vorhaben lassen sich auch die sporadisch auftretenden Stromüberschuss-Situationen für die Herstellung von Wasserstoff nutzen, also Strom aus Wind und Sonne, der bislang nicht genutzt werden kann, aber gleichwohl kontinuierlich finanziell gefördert wird.

Das politisch gesetzte Ziel einer möglichst ausschließlichen Nutzung von grünem Wasserstoff ist an hinreichende Importe aus wind- und sonnenreichen Regionen dieser Erde gebunden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Importe von grünem Wasserstoff oder entsprechenden grünen Wasserstoff-Derivaten vor allem dann Sinn machen, wenn in den Exportländern der heimische Energiebedarf möglichst klimaneutral gedeckt wird. Export von grüner Energie bei gleichzeitiger Weiternutzung fossiler Energieträger im Exportland ist für den Klimaschutz wenig hilfreich; denn Klimawandel ist ein globales Problem – die CO₂-Emissionen wirken global, ganz egal, ob sie in der EU oder z.B. in Australien oder in Marokko in die Atmosphäre gelangen. Eine rasche und vollständige Versorgung mit grünem Wasserstoff allein aus der Produktion in der EU erscheint mit Blick auf die Dimension des Bedarfs und der bestehenden sozio-ökonomischen bzw. legislativen Rahmenbedingungen sowie wegen unzureichender Akzeptanz unrealistisch.

Wie in Abbildung 13 zu erkennen ist, kann durch die Bereitstellung von Wasserstoff und das breite Spektrum der aus Wasserstoff herstellbaren Derivate und Nebenprodukte ein großer Teil des Energiebedarfs sowie bestimmter Rohstoffe der deutschen Wirtschaft abgedeckt werden.

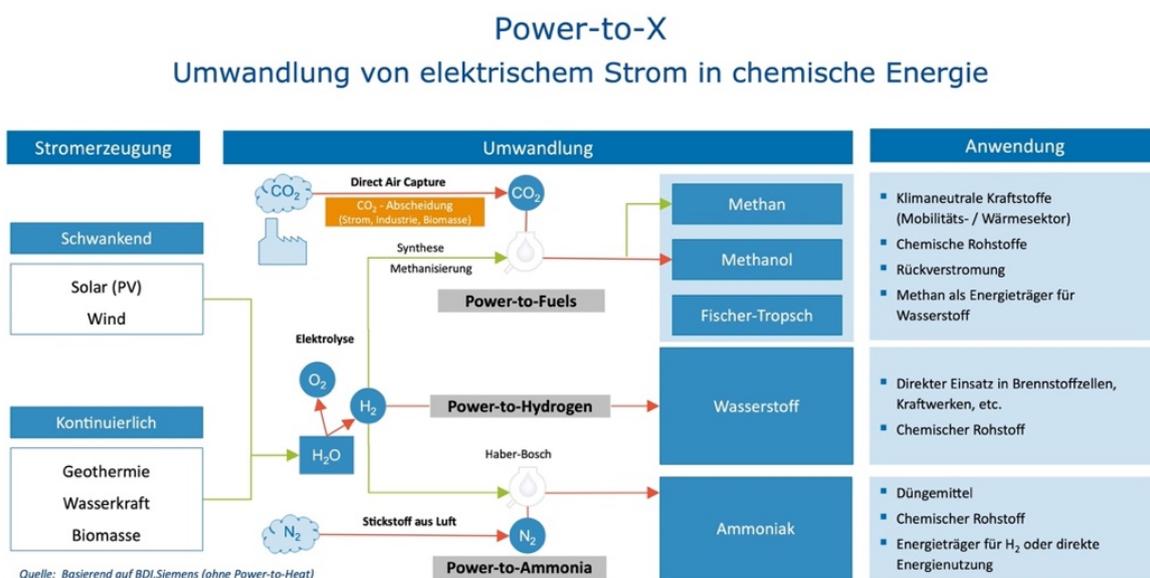


Abbildung 13: Pfade der Erzeugung von Wasserstoff und Wandlung von Wasserstoff in wasserstoffbasierte Derivate (basierend auf BDI, Siemens / Power-to-Heat).

Neben der Elektrolyse stehen zur Produktion von klimaneutralem Wasserstoff weitere Technologien zur Verfügung. So wird „**Türkiser Wasserstoff**“ aus Erdgas mittels **Pyrolyse** oder **Plasmalyse** gewonnen (Abb. 14). Dabei entstehen Wasserstoff sowie fester Kohlenstoff. Dieser feste Kohlenstoff kann bei Produkten, deren Herstellung bislang mit hohen CO₂-Emissionen verbunden ist, wie z.B. Asphalt oder Reifen, zum Einsatz kommen und deren Klimabilanz verbessern.

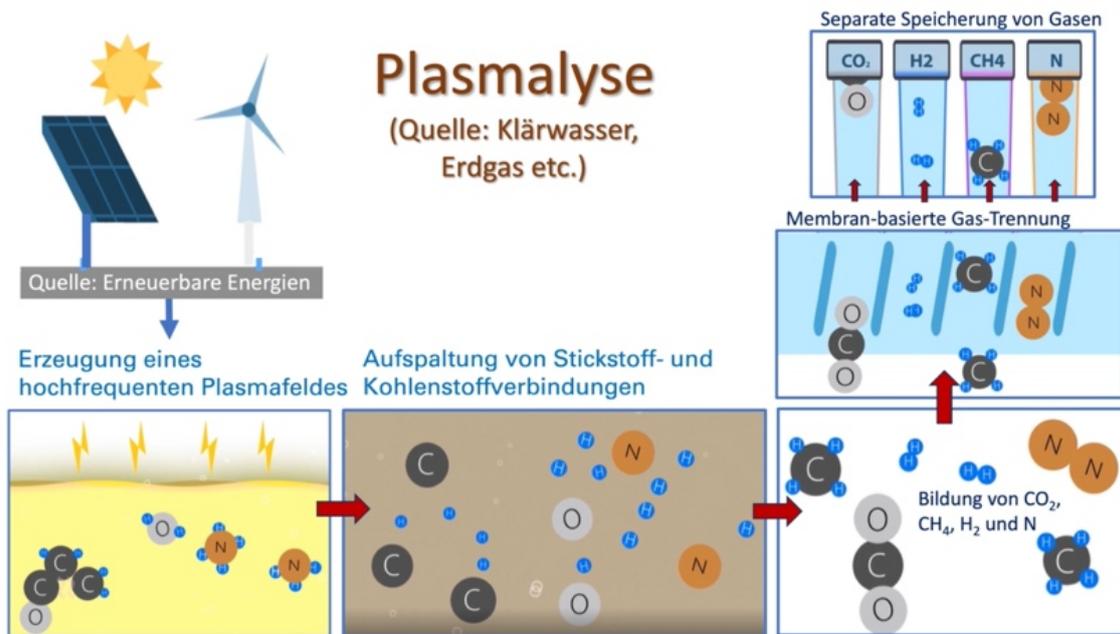


Abbildung 14: Abspaltung von Wasserstoff aus Erdgas und organischen Reststoffen (u. a. Klärwasser) mit Hilfe der Plasmalyse.¹¹⁴

„**Blauer Wasserstoff**“ wird aus Erdgas gewonnen. Dazu stehen zwei Verfahren zur Verfügung. Bei dem **Enhanced Gas Recovery (EGS)** -Verfahren wird blauer Wasserstoff durch die Abscheidung von CO₂ durch **Dampfreformierung** unmittelbar bei der Erdgasförderung und die direkte CO₂-Injektion in die Lagerstätte, möglichst auch zur Verbesserung der Erdgasausbeute, gewonnen. Blauer Wasserstoff aus Erdgas mit **konventionellem CCS (Carbon Capture & Storage)**, also der CO₂-Abscheidung am Import- bzw. Nutzungsort und einer CO₂-Speicherung im geologischen Untergrund, wird – jedenfalls in Deutschland und in anderen Staaten der EU – politisch nach wie vor kontrovers diskutiert, obwohl wissenschaftliche Untersuchungen zur Machbarkeit von CCS zu durchaus positiven Ergebnissen kamen. Andererseits ist auch ein Transport von CO₂ nach der Abscheidung aus dem Erdgas zur Lagerung z. B. in marinen Sedimenten möglich. Dazu liegen in Deutschland entsprechende Angebote, z. B. aus Norwegen und Dänemark, vor. Notwendig dafür ist der Bau entsprechender CO₂-Pipelines.

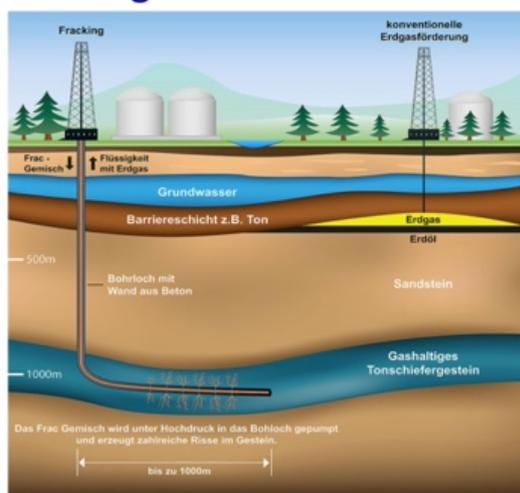
Auch Deutschland verfügt über umfangreiche Gas-Vorkommen im geologischen Untergrund des Nordwestdeutschen Beckens. Die Nutzung dieser Vorkommen durch fortgeschrittene Fracking-Technologien für die Produktion von Wasserstoff über Dampfreformierung in Kombination mit EGS oder CCS könnte ein wichtiges strategisches

¹¹⁴ Graforce (2023): <https://www.graforce.com/leistungen/wasserstoff-produktion>.

Element sein, um die Volatilität der heimischen Wasserstoffproduktion mit Wind und Sonne sowie Engpässe bei Wasserstoff-Importen abzufedern (vgl. Abb. 15).

Klimaneutralität setzt bei diesen Optionen voraus, dass für die Abscheidungsprozesse des Wasserstoffs aus dem Erdgas erneuerbare Energien zum Einsatz kommen und mögliche Erdgas-Leckage-Prozesse unterbunden werden.

Fracking



- Deutschland verfügt über eigene Erdgasvorräte in Höhe von 380 - 2.300 Mrd. m³
- Davon sind bis zu 1,000 Mrd. m³ direkt verfügbar
- Die THG-Emissionen für LNG aus den USA liegen aufgrund der spezifischen Förder- und Bereitstellungstechnologien ca. 25-30% über dem Export von konventionellem Erdgas¹⁾

(Quelle: UBA, 2019)

THG Emissionen für die Bereitstellung von LNG¹⁾

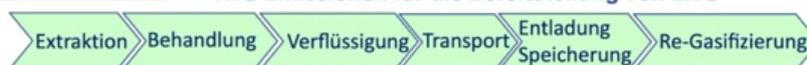


Abbildung 15: Gewinnung von Shale-Gas aus Tonschieferformationen.¹¹⁵

Des Weiteren kann die Bereitstellung von klimaneutralem Wasserstoff mit Hilfe von Kernkraft realisiert werden („**roter Wasserstoff**“), wobei hierbei ebenfalls das **Elektrolyse-Verfahren** zum Einsatz kommt. In der Mehrzahl der EU-Partnerländer, insbesondere aber in China, den USA und Südkorea, wird der Ausbau der Kernenergie – insbesondere mit neuen Technologien (z. B. *small modular reactors, dual fluid reactors*) – diskutiert bzw. befindet sich in der Umsetzung.

Ebenfalls mit dem **Elektrolyse-Verfahren** kann klimaneutraler Wasserstoff aus verschiedenen Biomasse-Produkten einschließlich Abfall hergestellt werden („**oranger / gelber Wassertoff**“).

Auch Kohle („**brauner / schwarzer Wasserstoff**“) könnte für die Wasserstoff-Herstellung eine Rolle spielen. So bezieht Japan aktuell Wasserstoff aus Australien, der dort auf Basis von Braunkohle mittels **Pyrolyse** produziert wird. Dabei ist vorgesehen, Klimaneutralität durch die Anwendung des CCS-Verfahrens zu erzielen.

Aktuell wird Wasserstoff direkt aus Erdgas produziert („**grauer Wasserstoff**“). Das dabei entstehende CO₂ wird direkt in die Atmosphäre emittiert.

Wasserstoff-Importe in großen Mengen erfolgen sinnvollerweise Pipeline-gebunden oder als Derivate, wie z.B. als Ammoniak, Methanol, Synthesegas oder E-Fuels, also

¹¹⁵ H.-J. Kümpel zitiert v. Reinhard Bingener in *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 2. Oktober 2023: „Die Interessen hinter Deutschlands Nein zum Fracking“

synthetische Kraftstoffe. Besonders klimafreundlich ist hierbei, dass die bestehenden Transport- und Leitungs-Infrastrukturen zu einem großen Teil weitergenutzt werden können.

7. Wasserstoff und CCU: Synthetische Kraft- und Brennstoffe

So richtig es ist, auf Elektrifizierung und direkte Wasserstoffnutzung (z.B. für Stahl-, Zement- und Düngerproduktion, für Brennstoffzellen oder auch im Bereich Wärme) zu setzen, so zwingend notwendig ist es, Wasserstoff für bestehende Infrastrukturen, insbesondere für die existierende Antriebstechnologien im Bereich der Mobilität, zu nutzen. Hier steht die Luftfahrt, die Schifffahrt, die Bahn, der Schwerlastverkehr, aber auch der Pkw-Betrieb im Fokus. Dies kann über synthetische Kraftstoffe realisiert werden, also über E-Fuels, die die aktuellen Kraftstoffe auf Basis von Erdöl durch solche auf Basis von Wasserstoff ersetzen. Sie müssen letztendlich die gleichen Eigenschaften wie die konventionellen Kraftstoffe haben, allerdings mit dem zentralen Unterschied der Klimaneutralität (Abb. 16). Das für diese Produktionsprozesse notwendige CO₂ muss deshalb aus der Kohlenstoff-Kreislaufwirtschaft oder direkt aus der Atmosphäre stammen. Die für die Herstellung der E-Fuels notwendige Energie muss aus klimaneutralen Quellen kommen. Unter diesen Voraussetzungen ist der gesamte Produktionsprozess klimaneutral.

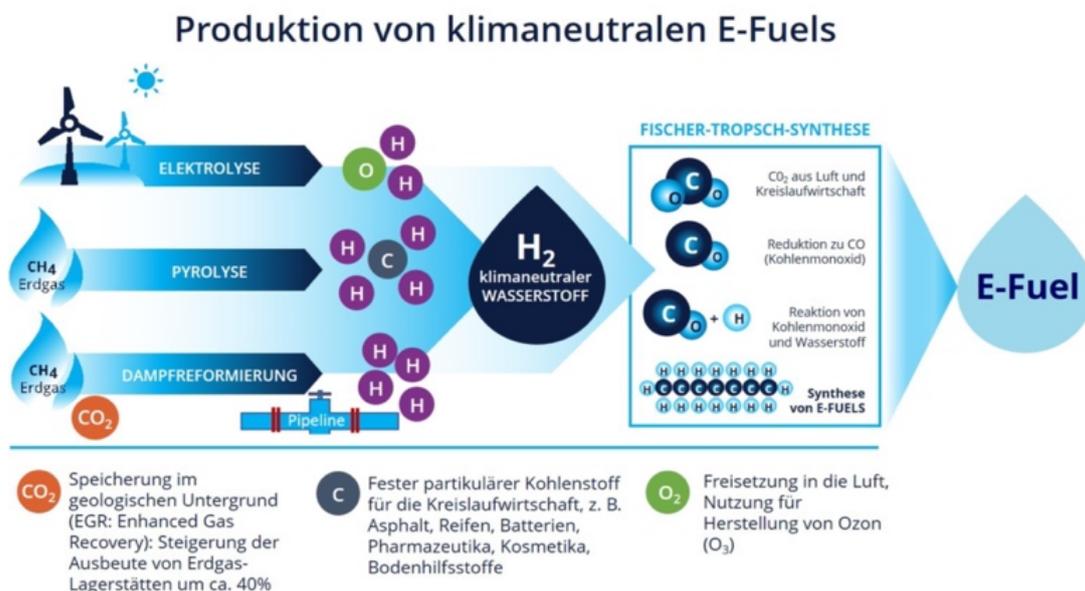


Abbildung 16: Pfade der Erzeugung von klimaneutralem Wasserstoff als Grundlage für die Produktion von e-Fuels.

Ein Beispiel für die Umsetzung dieser technologischen Ansätze ist die TES (Tree Energy Solutions)-Initiative. Dieses Unternehmen hat einen CO₂-Kreislauf entwickelt, der erneuerbare Energien zur Herstellung von grünem Wasserstoff nutzt und diesen mit recyceltem CO₂ kombiniert, um daraus transportierbares e-NG (electrical natural gas)

herzustellen.¹¹⁶ Dabei wird das Ziel verfolgt, einen geschlossenen, selbsterhaltenden CO₂-Kreislauf zu schaffen, indem das bei der Gasverwendung freigesetzte CO₂ wieder eingefangen und an den Produktionsort zurückgeführt wird, um es erneut für die Herstellung von synthetischem Brennstoff zu nutzen.

Trotz der Debatte in der EU, Verbrennungsmotoren bei Pkw-Neuzulassungen ab 2035 zu verbieten, gilt: Das Problem sind nicht die Verbrennungsmotoren, sondern die klimaschädlichen fossilen Kraftstoffe!

Das gleiche gilt für konventionelle Heizungsanlagen. Auch hier sind nicht die Brenner das Problem, sondern die fossilen Brennstoffe. Dabei geht es vornehmlich um den Ersatz von Erdgas durch synthetisches Gas – also von CH₄ (Methan) durch klimaneutralen H₂ (Wasserstoff) und CO₂ aus Punktquellen, z. B. aus Zementwerken, (Braun-)Kohle-Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen oder direkt aus der Atmosphäre.

In Abbildung 17 sind beispielhaft die für eine Produktion von klimaneutralen marinen E-Diesel kostenrelevanten Komponenten dargelegt. Für jede der hier genannten Teilkomponenten stehen entsprechende Technologien und Unternehmen zur Verfügung. Gleichwohl ist anzumerken, dass gerade in den letzten Jahren in diesem Bereich eine immense Innovationsdynamik zu beobachten ist und dieser technologische Fortschritt ganz wesentlich die Vielfalt und Effizienz dieser Herstellungsverfahren gesteigert hat und damit absehbar wettbewerbsfähige Preise für synthetische Kraftstoffe ermöglicht werden. Auch wird klar, dass eine zielführende Amortisation derartiger Anlagen nur dann gelingen kann, wenn eine entsprechende Auslastung erreicht wird, z. B. während Dunkelflauten durch Nutzung von klimaneutralem Wasserstoff aus Erdgas oder mittels Kernkraft.

Zielsetzung

Produktion von klimaneutralem marinem E-Diesel

Vergleich der Kosten für 3 alternative Wasserstoff Produktionspfade:

- Elektrolyse (Hauptbetrieb) und Plasmalyse (residualer Betrieb)
- Nur Plasmalyse
- Nur Elektrolyse

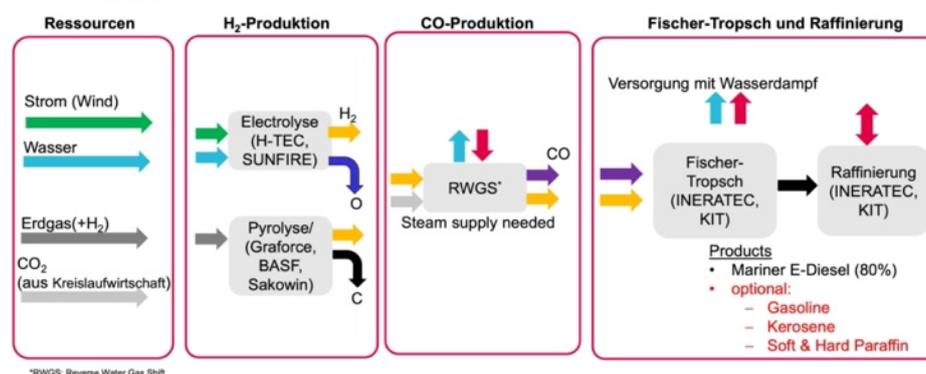


Abbildung 17: Kostenrelevante Hauptkomponenten für die Herstellung von klimaneutralem Gewinnung von Shale-Gas aus Tonschieferformationen.

¹¹⁶ Tree Energy Solutions (TES, 2023): <https://tes-h2.com/de>.

Ein weiteres wesentliches kostenrelevantes Element betrifft die für die Herstellung von Wasserstoff benötigte Energie (Abb. 18). Ein Vergleich möglicher Produktionsverfahren zeigt, dass sich die Investitionsentscheidung angesichts steigender Energiekosten nachhaltig auf das Betriebsergebnis und damit auf die Gestaltung wettbewerbsfähiger Preise auswirkt.

Energiebedarf für verschiedene Pfade der Wasserstoff-Produktion

Technologie	Energie-Input für die Produktion von 1 kg H ₂
Elektrolyse	40-45 kWh
Dampf-Reformierung	20-22 kWh
Pyrolyse	20-25 kWh
Plasmalyse	10-14 kWh

Abbildung 18: Energieaufwand für die Herstellung von 1 kg klimaneutralem Wasserstoff.

Mit dem Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft wird auch die Produktion von wasserstoffbasierten Derivaten massiv steigen. Synthetisches Methan und Methanol werden in den Sektoren Wärme und Mobilität eine große Rolle spielen. Mit der Bereitstellung entsprechender Mengen an Wasserstoff wird es daher zu einer erheblichen Steigerung der Nachfrage nach CO₂ kommen. Zu den zukünftigen CO₂-Quellen zählen das in der Atmosphäre gespeicherte CO₂, sowie das aus industriellen Prozessen im Kreislauf genutzte CO₂, aber auch das mittels CCS im geologischen Untergrund gespeicherte CO₂. Vorrang sollte die Nutzung atmosphärischen CO₂ haben. Inzwischen sind erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung energieeffizienter Technologien der CO₂-Fixierung aus der Atmosphäre erzielt worden.

Hierzu zählt das in Deutschland entwickelte DAC-System (Direct Air Capture) der Fa. Obrist (Abb. 19). Dieses Unternehmen hat in Ergänzung zu diesem DAC-System eine Motortechnologie entwickelt, bei dem der im synthetischen Methanol enthaltene Kohlenstoff in einer partikulären Form anfällt. Die Überführung von CO₂ aus der Atmosphäre via synthetischem Methan in partikulären Kohlenstoff führt zu einem nachhaltigen CO₂-Entzug aus der Atmosphäre – also zu sogenannten negativen CO₂-Emissionen. Das Verfahren wird **aFuel®** genannt. Sollte sich dieses Verfahren durchsetzen, könnte ein auf Basis von e-Fuels betriebener Verkehr zu einer realen CO₂-Senke werden und einen aktiven und wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

CO₂ Capture, Electrolysis & Thermal Decomposition at Temperatures below 280°C

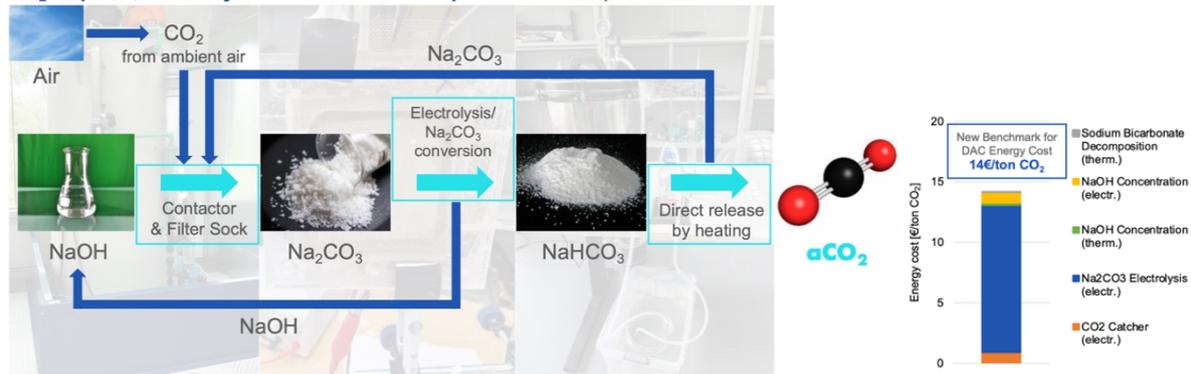


Abbildung 19: Verfahren der Fa. Obrist zur Bindung von CO₂ aus der Atmosphäre.¹¹⁷

Grundsätzlich existiert kein Widerspruch zwischen einerseits synthetischen Kraft- und Brennstoffen und andererseits z. B. E-Mobilität und Wärmepumpen. Für den Sektor Mobilität sind die relevanten „pro und cons“ in Abbildung 20 und 21 dargelegt. Das eine ist die bereits „existierende Zukunft“ der nächsten mindestens zwei bis drei Jahrzehnte, das andere ist eine neue „zukünftige Zukunft“, die im Wesentlichen erst noch gebaut werden muss. Beide Ansätze – synthetische Kraft- und Brennstoffe als auch E-Mobilität und Wärmepumpen – sind notwendig und zielführend. Denn es geht beim Klimaschutz nicht nur darum, zukünftige CO₂-Emissionen, z. B. im Sektor Mobilität, durch neu zu bauende Infrastrukturen einschließlich neuer Antriebstechnologien zu vermeiden, sondern auch darum, bereits heute alle möglichen CO₂-Einsparungen vorzunehmen. Daher gilt es, auch zu bedenken, dass es einer gut fundierten Rahmensetzung bedarf, die als zentrale Priorität immer und überall den CO₂-Fußabdruck und die Langzeitwirkung des CO₂-Moleküls in der Atmosphäre berücksichtigt – auch wenn dies an der einen oder anderen Stelle schwierig und mit gewissen Unsicherheiten verbunden ist. Dies ist dann ein konstruktiver Lernprozess.

Rolle der Elektromobilität

Die Rolle der Elektromobilität im Energiesystem wird zunehmen

- ▶ **Pro:**
 - hohe Effizienz beim Energieeinsatz; direkte Verwendung des Stroms aus EE
- ▶ **Contra:**
 - Aufbau und Betrieb eines Verteilnetzes: „Ladenetz“/Ladesäulen/Ladeinfrastrukturen
 - Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe für Batterieproduktion
 - hoher CO₂-Footprint bei der Batterieproduktion
 - CO₂-freier/-armer Strommix notwendig
 - schadstofflastiges Batterie-Recycling
 - Konkurrenz alternativer Antriebstechnologien



Abbildung 20: Vor- und Nachteile der Elektromobilität im Energiesystem.

¹¹⁷ Obrist (2023): <https://www.obrist.at/technologies-archive/>.

Rolle synthetischer Kraftstoffe

- ▶ Bei zahlreichen Anwendungen sind rein elektrische Lösungen nicht absehbar (z. B. Schiffs-, Flugverkehr- und Schwerlastverkehr).

→ synthetische Kraftstoffe (Wasserstoff, Methanol, Designer-Kraftstoffe) aus klimaneutraler Produktion

Pro: Nutzung synthetischer Kraftstoffe einschl. Wasserstoff fügt sich nahtlos in bestehende Wertschöpfungs- bzw. Infrastrukturketten ein; blauer, türkiser und roter sowie insbesondere grüner Wasserstoff (alle klimaneutral!)

Contra: Produktion auf Basis von Strom aus erneuerbaren Energien mit Effizienzverlust verbunden



Abbildung 21: Vor- und Nachteile der Nutzung synthetischer Kraftstoffe im Mobilitäts-Sektor

Aus dieser Sicht erwächst die Forderung, die Entwicklung und Umsetzung technologischer Ansätze zur Erzeugung synthetischer Kraft- und Brennstoffe in gleicher Weise zu fördern, wie dies für E-Mobilität bzw. Wärmepumpen der Fall ist.

8. Fazit

Jedes CO₂-Molekül, das nicht zusätzlich in die Atmosphäre gelangt, ist ein „Klimaschutz-Molekül“, denn diese Strategie ermöglicht, den noch vorhandenen CO₂-Emissionsrahmen der Erderwärmungs-Abkommen für tatsächlich nicht zu vermeidende CO₂-Emissionen zu nutzen – wie diese bereits heute durch Klimawandel-Feedbacks in den natürlichen Systemen entstehen. Dies sind die bereits erwähnten Waldbrände, trockenheitsbedingt absterbende Wälder und auftauende Permafrostböden sowie erhebliche CO₂-Verluste aus degradierenden Böden, entwässerten Moorlandschaften und auch aus marinen und aquatischen Ökosystemen.

Die CO₂-Kreislaufwirtschaft und innovative DAC-Verfahren in Kombination mit klimaneutralem Wasserstoff und daraus hergestellten synthetischen Kraft- und Brennstoffen erlauben in Verbindung mit der nachhaltigen Nutzung bereits bestehender Infrastrukturen und moderner Weiterentwicklungen einen optimalen Beitrag zum Klimaschutz. Maßstab hierfür ist der CO₂-Fußabdruck des jeweiligen Gesamtsystems.

Die Autoren

Prof. Dr. Hans-Joachim Kümpel studierte in Freiburg drei Jahre Mathematik und Informatik, bevor er an die Universität Kiel wechselte, um Geophysiker zu werden. 1977 folgte das Diplom, 1982 die Promotion und 1989 die Habilitation. 1991 wurde Hans-Joachim Kümpel als Professor für Angewandte Geophysik an die Universität Bonn berufen. Von 2001 bis 2007 war er Direktor des Instituts für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, einer Mitgliedseinrichtung der Leibniz-Gemeinschaft. In dieser Funktion lehrte er auch an der Technischen Universität Clausthal und an der Leibniz Universität Hannover. Von 2007 bis 2009 war er Präsident der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft. Von 2007 bis 2016 leitete Hans-Joachim Kümpel als Präsident die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover. Sein Spezialgebiet sind die Wechselwirkungen zwischen Druckänderungen im Grundwasser und dem umgebenden Gebirge.

Prof. Dr. Dr. Dr. h.c. Franz Josef Radermacher, Professor (em.) an der Universität Ulm, Vorstand des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n (FAW/n) Ulm, Ehrenpräsident des Senats der Wirtschaft e. V., Bonn, Vizepräsident des Ökosozialen Forum Europa, Wien, langjähriges Mitglied im Verkehrsbeirat der Bundesregierung, sowie Mitglied des Club of Rome. Seit 2012 ist Radermacher Mitglied im Beirat des Vodafone Instituts für Gesellschaft und Kommunikation. Seit August 2018 ist er Mitglied im Österreichischen Rat für Nachhaltige Entwicklung sowie seit 2020 Mitglied im Nachhaltigkeitsbeirat der Vodafone Deutschland GmbH. Seit August 2020 ist Prof. Radermacher Vorstandsmitglied des Vereins Global Energy Solutions e.V. Seit 2022 ist er Mitglied im UN-Council for Engineers for the Energy Transition (CEET).

Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard Hüttl ist seit Anfang 2021 geschäftsführender Gesellschafter und Wissenschaftlicher Direktor der Eco Environment Innovation GmbH (EEI) in Berlin, die sich mit Fragen der ökologischen Nachhaltigkeit, des Klimaschutzes und der Energiewende befasst. Er war lange Jahre Mitglied des Vorstands des Forums für Zukunftsenergien e. V. sowie Mitinitiator der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften acatech. Von 2008 bis 2017 war er deren Präsident. Als Vizepräsident war er am Aufbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus beteiligt und leitete von 2007 bis 2020 das Deutsche GeoForschungsZentrum in Potsdam. Er ist international vernetzt und Mitglied in zahlreichen Wissenschaftsakademien.

Der Herausgeber

Dr. Friedbert Pflüger, Parl. Staatssekretär a.D., ist Geschäftsführer des Clean Energy Forums (CEF). Er war von 2009-2020 Gastprofessor am King's College London und hat dort das European Cluster for Energy, Climate and Resource Security (EUCERS) geleitet. Seit 2020 lehrt er an der Universität Bonn Klima- und Energiepolitik. Er ist (non-resident) Senior Fellow des Global Energy Center des Atlantic Council, Washington D. C. und Aufsichtsratsvorsitzender von Zukunft Gas. Die Stimme der Gas- und Wasserstoffwirtschaft. 1993 erschien von ihm das Buch: Ein Planet wird gerettet. Eine Chance für Mensch, Natur, Technik (Econ-Verlag). Pflüger ist Founding Partner der Strategic Minds Company (SMC).

Redaktion

Hannes Vogel arbeitet als wissenschaftlicher Referent beim Clean Energy Forum und als Consultant für Klima und Energie bei Strategic Minds Company. Er hat Physik in Berlin und Stockholm studiert und sich wissenschaftlich unter anderem mit dem Ausbau der Stromnetze für die Energiewende und mit nachhaltiger Landnutzung beschäftigt. Als Vorsitzender der jungen Deutschen Physikalischen Gesellschaft hat Hannes Vogel die Interessen von 30.000 jungen Physikern vertreten. Hannes Vogel ist mehrfach preisausgezeichneter Wissenschaftskommunikator und Mitglied der Deutschen UNESCO-Kommission. Dort berät er die auswärtige Wissenschafts-, Kultur- und Bildungspolitik der Bundesregierung.

Darüber hinaus danken wir Herrn **Dr. Uwe Schneider**, Geschäftsführer der Eco Environment Innovation GmbH (EEI) in Berlin, für die fundierten Kommentare und Zuarbeiten zum Kapitel III „Wasserstoff als Voraussetzung für CCU – die klimaneutrale energetische Nutzung des Rohstoffs CO₂“.

Das Beratende Kuratorium des Clean Energy Forum

Vorsitzende des Beratenden Kuratoriums:

Barbara Lempp

COO ecotec, COO European Federation of Energy Traders

Mitglieder des Beratenden Kuratoriums:

Wolfram Axthelm

Geschäftsführer Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE), Geschäftsführer Bundesverband Windenergie

Jorgo Chatzimarkakis

CEO Hydrogen Europe, Mitglied des Europäischen Parlaments a.D.

Martine Dornier-Tiefenthaler

Unternehmerin und Juristin

Vince Ebert

Physiker, Kabarettist, Bestsellerautor („Lichtblick statt Blackout“, 2022)

Monika Griefahn

Präsidentin der eFuel-Alliance, ehem. Geschäftsführerin von Greenpeace Deutschland, Landesministerin a.D.

Christian Held

Partner bei BeckerBüttnerHeld, stv. Vorsitzender des Instituts für Klimaschutz, Energie und Mobilität (IKEM)

Reinhard Hüttl

Forst- und Bodenwissenschaftler, ehem. Direktor des Deutschen GeoForschungszentrums (GFZ), ehem. Präsident von acatech

Joachim Lang

Geschäftsführender Gesellschafter der Strategic Minds Company (SMC), ehem. Hauptgeschäftsführer des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI)

Günther Oettinger

EU-Energiekommissar a.D., Präsident der EBS Universität für Wirtschaft und Recht

Birgit Ortlieb

Director Government Affairs Dow Deutschland, Chairwoman Energy and Climate Committee AmCham

Franz Josef Radermacher

Leiter des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n, Präsident des Global Economic Network

Alexander Voigt

Gründer und Vorstand HH2E, Gründer und ehem. CEO von Solon, Younicos und anderer „grüner“ Unternehmen

Nargis Wieck

Leiterin der Stabsstelle Internationale Kooperationen der dena

Stiftung Clean Energy Forum gGmbH

Uhlandstraße 175
10719 Berlin

+49 30 88 77 429 200

HRB 253059 B
Amtsgericht Charlottenburg

Geschäftsführer: Friedbert Pflüger

November 2023

clean-energy-forum.org