

Systemische Betrachtung der energetischen und emissionsseitigen Implikationen einer inländischen CO₂-Nutzung

Georg Holtz und Sascha Samadi

Einige Klimaneutralitätsszenarien für Deutschland nehmen an, dass zukünftig „unvermeidbares“ CO₂, z. B. aus der Zementproduktion, als Kohlenstoffquelle für die inländische Herstellung von Kraftstoffen oder chemischen Grundstoffen genutzt wird. In diesem Artikel wird dargelegt, warum eine solche CO₂-Nutzung verglichen mit einem alternativen Pfad einer geologischen Speicherung des CO₂ und einem gleichzeitigen Import „grüner“ Kraft- und Grundstoffe zumindest aus energetischer Sicht nachteilig erscheint.

Auch in einem klimaneutralen Energiesystem der Zukunft wird die Entstehung von CO₂ nach heutigem Wissensstand nicht vollständig vermieden werden können. Größere Punktquellen wird es voraussichtlich insbesondere in bestimmten Industrieprozessen wie der Zement- und Kalkherstellung weiterhin geben [1-4]. Zudem besteht auch zukünftig ein gewisser Bedarf an Kohlenwasserstoffen wie Kerosin und chemischen Grundstoffen, die heute aus fossilen Kohlenwasserstoffen (Erdöl, Erdgas) gewonnen werden und für die zukünftig alternative, CO₂-neutrale und nachhaltige Herstellungsverfahren gefunden werden müssen.

Die doppelte Herausforderung „Wohin zukünftig mit dem noch entstehenden unvermeidbaren CO₂?“ und „Woher kommt zukünftig der Kohlenstoff für Flugzeugtreibstoffe oder Kunststoffe?“ legt eine inländische Nutzung des noch entstehenden industriellen CO₂ für die Herstellung von Kohlenwasserstoffen und Methanol (CCU_{CH}) [5] als potenzielle Lösung für beide Herausforderungen prinzipiell nahe.

Andererseits bleibt Kohlenstoff in Kunststoffen oder Kraftstoffen nur für bestimmte Zeiträume gebunden, was die Frage aufwirft, ob CCU_{CH}-Verfahren unter Nutzung von industriellem CO₂ in einem klimaneutralen System eine Rolle spielen können, und falls ja, welche. Zudem gibt es Alternativen für beide oben genannten Herausforderungen: CO₂ kann prinzipiell auch dauerhaft geologisch gespeichert werden. Und die Herstellung synthetischer Kohlenwasserstoffe könnte wiederum aus Kostengründen in Weltregionen mit hervorragenden Bedingungen für erneuerbare Energien und unter Verwendung von direkt

aus der Atmosphäre abgeschiedenem CO₂ erfolgen, mit einem anschließenden Transport der Kohlenwasserstoffe nach Deutschland.

Vor diesem Hintergrund beleuchten wir in diesem Artikel aus systemischer Sicht die energetischen und emissionsseitigen Implikationen der Durchführung von CCU_{CH} in Deutschland im Vergleich zu der erwähnten Alternative, also der geologischen Speicherung von CO₂ in Verbindung mit einem Import von synthetischen Kohlenwasserstoffen.

Vorüberlegungen und Bilanzgrenzen

Um einen aussagekräftigen Vergleich durchführen zu können, müssen zunächst einige Vorüberlegungen angestellt sowie Bilanzgrenzen festgelegt werden. Wir gehen dabei

davon aus, dass importierte synthetische Kohlenwasserstoffe mittels Kohlenstoffs aus einer Direktabscheidung aus der Luft („Direct Air Capture“, DAC) hergestellt werden. Bei ihrer Erzeugung wird daher (zunächst) CO₂ gebunden („Negativ-Emission“).

Bezüglich der inländischen industriellen CO₂-Mengen fokussieren wir auf die potenzielle Nutzung von CO₂ aus der Zement- und Kalkindustrie, die aus der Entsäuerung des Kalksteins entstehen – prozessbedingte CO₂-Mengen, die sich nach heutigem Kenntnisstand besonders schwer bzw. gar nicht vermeiden lassen. Bei CCU_{CH} wird in diesem Fall Kohlenstoff, der ursprünglich in Form von Calciumcarbonat aus der Lithosphäre (der Erdkruste) entnommen wird, (temporär) gebunden, so dass in Summe eine Emission von CO₂ vermieden wird („Null-Emission“).

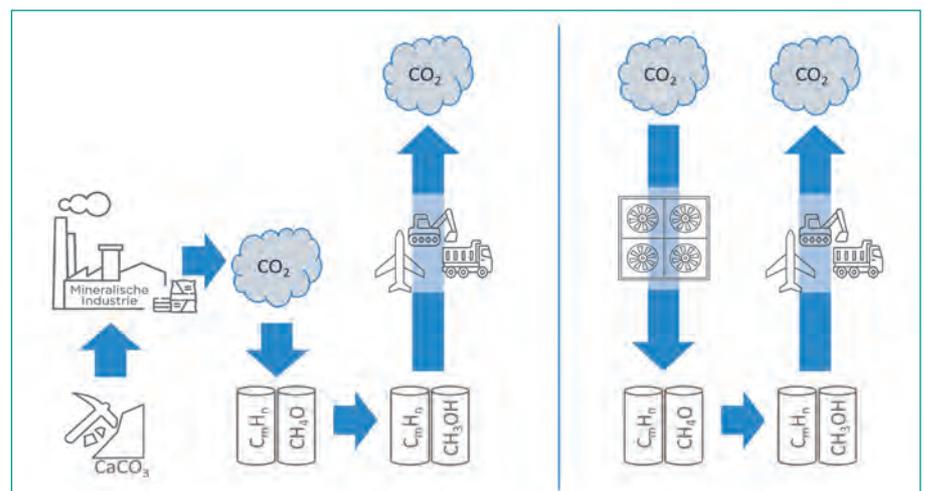


Abb. 1 Links: CCU_{CH} mit anschließender Nutzung der Kraft-/Grundstoffe. Kohlenstoff aus der Erdkruste wird schlussendlich in die Atmosphäre emittiert. Rechts: Herstellung von Kraft-/Grundstoffen mit CO₂ aus DAC. Es ergibt sich eine neutrale CO₂-Bilanz

Hinweis zu den chemischen Formeln: CaCO₃ = Calciumcarbonat; C_mH_n = Kohlenwasserstoffe; CH₃OH = Methanol

Der Kohlenstoff, der in Kunststoffen und Kraftstoffen gebunden ist, die aus Kohlenwasserstoffen produziert wurden, wird entweder bei der Nutzung (Kraftstoffe) oder am Ende der Lebensdauer (Kunststoffe) wieder in Form von CO₂ freigesetzt. In Summe ergeben sich somit positive Emissionen, falls Grund-/Kraftstoffe aus industriellem CO₂ hergestellt werden, und eine neutrale Klimabilanz, falls CO₂ aus DAC-Anlagen genutzt wird (vgl. Abb. 1). Insbesondere bei Kunststoffen entsteht die Emission nicht in jedem Fall in unmittelbarer zeitlicher Nähe zur Herstellung der Produkte, da das CO₂ je nach Produkt unterschiedlich lange gebunden wird.

Die Bindungsdauer kann dabei von weniger als einem Jahr (z. B. Verpackungen) bis zu mehreren Jahrzehnten (z. B. Fensterrahmen) reichen. Wir gehen hier jedoch vereinfachend davon aus, dass sich das Kunststoff- und Kraftstoffsystem im klimaneutralen Zielsystem in einem Fließgleichgewicht befinden werden und jeglichem Kohlenstoffzufluss (z. B. durch CCU_{CH}) ein entsprechender Kohlenstoffabfluss in Form von CO₂ gegenübersteht – durch Verbrennung von Kraftstoffen, die thermische Nutzung von Abfällen oder aufgrund von Verwitterung. Ein Aufbau immer größerer Kraftstoff- bzw. Kunststoffmengen im anthropogenen System wird hier demnach nicht als langfristig nachhaltige „Strategie“ für eine CO₂-Bindung angesehen [6].

Aus einer systemweiten Betrachtung heraus steht CCU_{CH} also in Verbindung mit positiven Emissionen, da Kohlenstoff aus der Lithosphäre zunächst in die anthropogen genutzte Kohlenstoffmenge eingebracht und schlussendlich in die Atmosphäre emittiert wird. Synthetische Kohlenwasserstoffe, die mit Kohlenstoff aus DAC hergestellt werden, sind über ihren Lebenszyklus hinweg betrachtet hingegen klimaneutral. Um Klimaneutralität zu erreichen, muss CCU_{CH} daher in Kombination mit Kompensationsmaßnahmen gedacht werden. Natürliche Senken wie Wälder und Moore werden gemäß Klimaschutzszenarien voraussichtlich benötigt, um Restemissionen aus der Landwirtschaft auszugleichen [1-4]. Aus heutiger Sicht ist als zusätzliche, großmaßstäbliche CO₂-Bindungstechnologie, die ausreichend hochskaliert werden kann, insbesondere die CO₂-Abscheidung aus der Luft (DAC) mit anschließender geologischer Speicherung (CCS) denkbar.

Im Folgenden wird daher davon ausgegangen, dass die Emissionen von fossilem Kohlenstoff, die sich durch die Nutzung von mittels CCU_{CH} hergestellten Kraftstoffen und Kunststoffen ergeben, in einem klimaneutralen Zielsystem durch DAC in Verbindung mit CCS (DACCS) kompensiert werden müssten. Diese Kompensation ist bei der Betrachtung und Bewertung der Rolle von CCU_{CH}-Verfahren in einem klimaneutralen Energiesystem stets mit zu berücksichtigen.

Für die Herstellung von Kohlenwasserstoffen und Methanol auf der Basis von CCU_{CH} wird neben CO₂ auch Wasserstoff benötigt. Vorliegende Klimaschutzszenarien [1-4] gehen davon aus, dass Deutschland zukünftig nicht seinen gesamten Wasserstoffbedarf inländisch decken können. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird daher davon ausgegangen, dass der für CCU_{CH} benötigte Wasserstoff im klimaneutralen Energiesystem vollständig importiert werden müsste, da er gegenüber der Alternative (mit einem Import von Kohlenwasserstoffen) zusätzlich zu anderen Wasserstoffbedarfen entstehen würde.

Vergleich zweier Konstellationen

Basierend auf den zuvor geschilderten Vorüberlegungen werden im Folgenden für den Vergleich von CCU_{CH} mit einer Alternative die in Abb. 2 dargestellten „Konstellationen“ betrachtet, die beide klimaneutral sind und beide auch den Kohlenstoffbedarf der chemi-

schen Industrie und der Kraftstoffindustrie decken können. Diese beiden Konstellationen werden in der Tab. näher spezifiziert und miteinander verglichen.

Abb. 2 und die Tab. zeigen, dass in beiden Konstellationen die CO₂-Abscheidung an den Industrieanlagen sowie die benötigte CO₂-Speicherung prinzipiell identisch sind [7]. Die Wahl des CO₂-Speicherorts kann jedoch unterschiedlich ausfallen. Die mittels DAC aus der Luft abzuschneidende CO₂-Menge ist in beiden Konstellationen ebenfalls als prinzipiell identisch anzunehmen und entspricht dem Durchfluss von Kohlenstoff durch den Kunststoff- und Kraftstoffsektor: Im Fall CCU_{CH}/DACCS leitet sich diese Menge aus dem Ausfluss, d. h. den CO₂-Emissionen ab, die kompensiert werden müssen. Im Fall Import/CCS leitet sich dieselbe Menge über den Zufluss ab, d. h. über den Kohlenstoffbedarf für die benötigten Kraftstoffe und chemischen Grundstoffe.

Die Standortwahl der DAC-Anlagen kann in beiden Konstellationen unterschiedlich erfolgen, da im Fall CCU_{CH}/DACCS eine räumliche Nähe zur CO₂-Speicherung vorteilhaft erscheint und im Fall Import/CCS die räumliche Nähe zu Produktionsstätten von synthetischen Energieträgern bzw. Grundstoffen.

Die Unterschiede zwischen beiden Konstellationen bestehen insbesondere in den leicht abweichenden Transporterfordernissen für

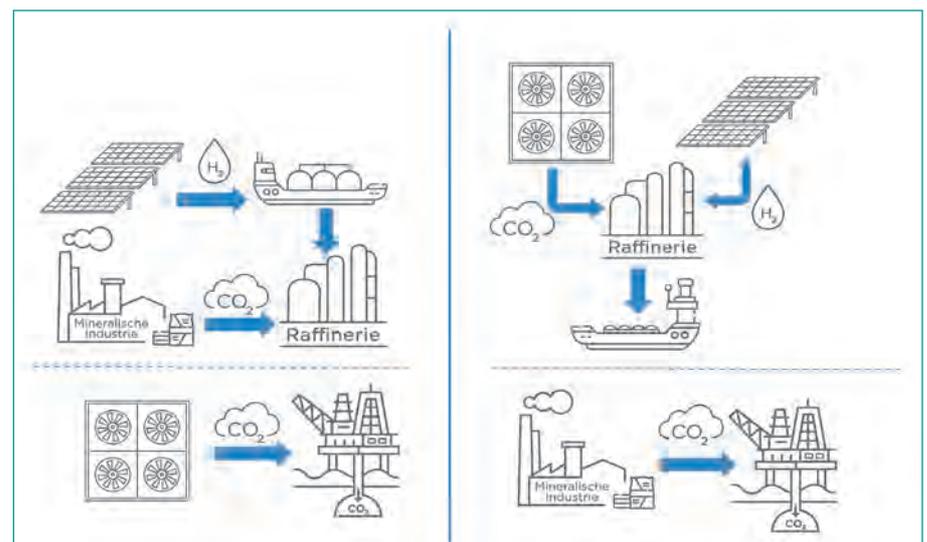


Abb. 2 Vergleich: Inländisches CCU_{CH} unter Verwendung von importiertem Wasserstoff in Kombination mit DACCS („CCU_{CH}/DACCS“, links) sowie Import von Kraftstoffen und Grundstoffen in Kombination mit geologischer Speicherung industrieller CO₂-Mengen („Import/CCS“, rechts)

CO₂ sowie in dem zusätzlichen Wasserstoff-Importbedarf nach Deutschland in der Konstellation CCU_{CH}/DACCS. Es wird hier davon ausgegangen, dass die erforderlichen Infrastrukturen aufgrund der zukünftig (für andere Zwecke als CCU_{CH}) voraussichtlich benötigten Wasserstoff-Importe auch ohne CCU_{CH} aufgebaut werden, und somit der Aufbau dieser Infrastrukturen prinzipiell kein spezifisches Erfordernis der Konstellation CCU_{CH}/DACCS darstellt.

Diese Infrastruktur müsste jedoch ggf. größer dimensioniert werden, um einen deutlich erhöhten Wasserstoffbedarf bewältigen zu können. Es sind beim Wasserstoff-Transport zudem energetische Verluste in Höhe von 0,8 % / 100 km (bei Pipelinetransport) bzw. von ca. 30 % für die Verflüssigung (bei Schiffstransport) zu veranschlagen [8]. Bei einem beispielhaft angenommenen Import via Pipeline aus Südspanien (Transportdistanz 2.000 km) beliefen sich die energetischen Verluste auf ca. 17 % der erzeugten Energiemenge. Im Fall Import/CCS hingegen ist der Transport von flüssigen Kohlenwasserstoffen vorgesehen. Die dafür erforderlichen Infrastrukturen bestehen prinzipiell bereits. Die energetischen Verluste durch diesen

Transport sind vergleichsweise gering und werden hier vernachlässigt.

Beim Vergleich der beiden Konstellationen erscheint die Konstellation Import/CCS somit aus energetischer Sicht günstiger, da energetische Verluste beim Wasserstofftransport vermieden werden können. Die Wasserstofftransportverluste sowie die beim Transport von Kohlenwasserstoffen vergleichsweise größeren Möglichkeiten, bereits bestehende Transportinfrastrukturen zu nutzen legen zudem eine höhere Wirtschaftlichkeit des Imports von Kohlenwasserstoffen gegenüber inländischem CCU_{CH} nahe. Ein detaillierter Vergleich der Wirtschaftlichkeit der beiden Alternativen wurde im Rahmen dieser Analyse jedoch nicht vorgenommen.

Kurzbetrachtung veränderter Rahmenbedingungen

Die obigen Schlussfolgerungen sind voraussetzungs- und anforderungsvoll, da sowohl die Möglichkeit zur geologischen Speicherung von CO₂ als auch die Möglichkeit eines Imports synthetischer Kohlenwasserstoffe angenommen wird [9]. In einer Übergangsphase hin zur Klimaneutralität bzw. in Fällen, in denen die Voraus-

setzungen, die in der obigen Analyse zum klimaneutralen Zielsystem unterstellt wurden, (noch) nicht erfüllt sind, kann die Bewertung von CCU_{CH} anders ausfallen. CCU_{CH} kann dann einen Beitrag zur Emissionsminderung leisten, indem Kohlenstoff zumindest „doppelt genutzt“, dabei aber nur einmal in Form von CO₂ emittiert wird – auch wenn CO₂-Emissionen nicht vollständig vermieden werden können.

Es stellen sich jedoch Fragen bzgl. der Verfügbarkeit von Wasserstoff für CCU_{CH} – insbesondere in der näheren Zukunft. Zudem müssten für CCU_{CH} Anlagen und Strukturen errichtet werden, deren Wirtschaftlichkeit im klimaneutralen Zielsystem fraglich ist, da die Kosten einer Kompensation der entstehenden CO₂-Emissionen (z. B. durch DACCS) letztlich (unter Anwendung des Verursacherprinzips) in die Kosten der mittels CCU_{CH} hergestellten Kraftstoffe und Kunststoffe eingepreist bzw. von den Verursachern des CO₂ getragen werden müssten.

Der Zeitraum, in denen eine CCU_{CH}-Anlage Deckungsbeiträge für ihre Investitionskosten realisieren kann, könnte sich daher möglicherweise für eine Amortisation als zu kurz darstellen, so dass „stranded assets“ zu befürchten und Investitionen entsprechend riskant wären. CCU_{CH} erscheint daher in erster Linie nur für solche Standorte aus energetischer und aus CO₂-Vermeidungssicht vorteilhaft zu sein, an denen a) auch langfristig unvermeidbar CO₂ entsteht, b) auch langfristig keine Möglichkeit zur permanenten geologischen Speicherung des entstehenden CO₂ besteht und zusätzlich c) eine ausreichend leistungsfähige Wasserstoff- oder Strominfrastruktur vorhanden ist bzw. einfacher als eine CO₂-Infrastruktur errichtet werden kann.

Fazit

Bei der Betrachtung der emissionsseitigen und energetischen Implikationen von inländischem CCU_{CH} gegenüber einem Import von grünen Kohlenwasserstoffen und grünem Methanol muss die – für Klimaneutralität erforderliche – Kompensation der mittels CCU_{CH} nur zeitlich bzw. bilanziell verschobenen CO₂-Emissionen mitgedacht werden. Die Betrachtungsgrenzen einer vergleichenden Analyse klimaneutraler Zielsysteme sollten

	CCU _{CH} /DACCS	Import/CCS
CO ₂ -Abscheidung an Industrieanlagen	In beiden Fällen identisch	
CO ₂ -Speicherbedarf	Prinzipiell in beiden Fällen identisch; ggf. unterschiedliche Speicherstätten	
DAC – CO ₂ -Menge	Prinzipiell in beiden Fällen identisch	
DAC – räumliche Verortung	Idealerweise in räumlicher Nähe zu CO ₂ -Speicherstätten	Idealerweise in räumlicher Nähe zur Herstellung synthetischer Stoffe (in Regionen mit Erneuerbaren-„Sweet-Spots“)
CO ₂ -Transport des industriellen CO ₂	Zu Standorten der CO ₂ -Nutzung	Zu Seehäfen und von dort zu Offshore-Speicherstätten
H ₂ -Transport nach Deutschland	Erforderlich; energetische Verluste sind zu veranschlagen (bis zu 30 %)	Nicht erforderlich
Transport flüssiger Kohlenwasserstoffe und Methanol	Nur inländisch	Aus globalen Erzeugungs-„Sweet-Spots“ & inländisch; Transportinfrastrukturen prinzipiell vorhanden
Wasserbedarf	Entsteht an „Sweet-Spots“ der Erneuerbaren-Erzeugung; ggf. Meerwasser-Entsalzung mit verbundenen finanziellen und energetischen Kosten erforderlich. Energetische Verluste beim H ₂ -Transport erhöhen den Wasserbedarf ggü. „Import/CCS“ um bis zu 30 %	Entsteht an „Sweet-Spots“ der Erneuerbaren-Erzeugung; ggf. Meerwasser-Entsalzung mit verbundenen finanziellen und energetischen Kosten erforderlich

Tab. Gegenüberstellung der Konstellationen CCU_{CH}/DACCS und Import/CCS in einem klimaneutralen Energiesystem

daher stets so gewählt werden, dass die betrachteten Systemausschnitte sowohl klimaneutral sind als auch die Bereitstellung von Kohlenstoff für die chemische Industrie bzw. für Kraftstoffe sicherstellen. Beim Vergleich zweier solcher Konstellationen – „CCU_{CH}/DACCS“ vs. „Import/CCS“ – erscheint die Konstellation Import/CCS aus energetischer Sicht günstiger.

Neben den hier betrachteten Aspekten des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen können eine Reihe weiterer Faktoren wesentlich für eine Entscheidung für oder gegen inländisches CCU_{CH} sein – z. B. Überlegungen zur Versorgungssicherheit und zur inländischen industriellen Wertschöpfung – die im Rahmen dieses Textes nicht betrachtet werden konnten.

Anmerkungen/Literatur

- [1] EWI (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 – Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).
- [2] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung

- Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- [3] SCI4climate.NRW (2023): Treibhausgasneutralität bis 2045 – Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW. Wuppertal Institut & Institut der deutschen Wirtschaft.
- [4] Stolten et al. (2022): Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045. FZ Jülich.
- [5] Es bestehen weitere Möglichkeiten der CO₂-Nutzung. In diesem Text thematisieren wir jedoch (nur) die Nutzung von CO₂ für die Herstellung von Kohlenwasserstoffen und Methanol. Um dies kenntlich zu machen, wird die übliche Abkürzung CCU (Carbon Capture and Usage) mit dem Subskript „CH“ versehen, wobei C und H für die chemischen Symbole für Kohlenstoff und Wasserstoff stehen. Im weiteren Text verzichten wir zudem aus Gründen der Leslichkeit auf die explizite Nennung von Methanol und meinen dieses implizit bei der Nennung von „Kohlenwasserstoffen“ mit.
- [6] Im Falle auch langfristig wachsender Kunststoff- bzw. Kraftstoffmengen könnten jedoch prinzipiell zu den im weiteren Verlauf des Texts durchgeführten Überlegungen analoge Schlüsse gezogen werden. Dies lässt sich wie folgt begründen: Im Fall von CCU_{CH} wären die in einem wachsenden anthropogenen Kohlenstofflager „gespeicherten“ Kohlenstoffmengen klimaneutral. Im alternativen Fall einer Bereitstellung von Kohlenstoff für die Kunststoff-/Kraftstoffproduktion aus DAC würde ein wachsendes anthropogenes Kohlenstofflager als

CO₂-Senke wirken und es könnten entsprechend negative Emissionen verbucht werden.

- [7] Möglicherweise bestehen bei einer Nutzung des CO₂ via CCU_{CH} bzw. geologischer Speicherung etwas unterschiedliche Anforderungen an die Reinheit des CO₂.
- [8] Merten, F.; Scholz, A.; Krüger, C. et al. (2020): Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Wuppertal Institut.
- [9] Insbesondere die Weiterentwicklung und der großskalige Markthochlauf von Direct-Air-Capture-Technologie erfolgt erwartungsgemäß erst langfristig.

*Dr. G. Holtz, Senior Researcher, Dr. S. Samadi, Co-Leiter des Forschungsbereichs Sektoren und Technologien, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
georg.holtz@wupperinst.org*

Dieser Artikel stellt eine gekürzte Fassung eines Textes dar, der im März 2023 als Teil des Berichts „Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045 – Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW“ [3] erschienen ist. Das Projekt SCI4climate.NRW wird vom Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert.