

Bern, im Juni 2024

Reflexionen des Wissenschaftlichen Beirats der aeesuisse

CO₂-Abscheidung, -Transport, -Speicherung und -Nutzung – ein wichtiges Element einer erfolgreichen Netto-Null-Strategie

Zusammenfassung

- Der Grundpfeiler jeder Netto-Null-Strategie ist die weitgehende Vermeidung fossiler Emissionen durch Effizienzmassnahmen, durch die Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Mobilität sowie die dafür nötige Steigerung der CO₂-freien Stromproduktion aus Photovoltaik, Windkraft usw.
- Allerdings verbleiben auch dann noch Treibhausgasemissionen – insbesondere aus der Landwirtschaft, aus Zementwerken und Kehrlichtverbrennungsanlagen –, die anderweitig vermieden oder ausgeglichen werden müssen.
- Das grösste Potential hat dabei die Abscheidung von CO₂ aus dem Abgas verschiedener Anlagen mit Hilfe bekannter Prozesse wie der Aminwäsche oder durch Membranen. Das abgeschiedene CO₂ muss anschliessend zu geeigneten Lagerstätten transportiert werden, am besten über ein nationales und europäisches Pipeline-Netzwerk.
- Die dauerhafte Lagerung des CO₂ erfolgt dann in geologischen Formationen mit ausreichender Porosität. Entscheidend ist der sichere Einschluss durch eine darüberliegende undurchdringliche Deckschicht, die ein Entweichen verhindert. Alternativ kann der natürliche Prozess der Mineralisierung des CO₂ künstlich beschleunigt werden.
- Andere Ansätze können diesen Weg ergänzen, insbesondere solange eine solche Pipeline-Infrastruktur nicht vorhanden ist. Zu nennen sind hier die Lagerung von CO₂ durch Mineralisierung in Abbruchbeton sowie die indirekte Speicherung über Biomasse; entweder in Form von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft oder in Holzgebäuden. Die letztgenannten Optionen können zusätzliche positive Auswirkungen haben wie eine Verringerung landwirtschaftlicher Treibhausgasemissionen oder des Zementverbrauchs.
- Ein Teil des abgeschiedenen CO₂ stammt aus Umwandlungsprozessen von Biomasse. Wird dieses dauerhaft gespeichert, ergeben sich wie auch bei der Pflanzenkohle und dem Holzbau Negativemissionen, es wird also der Atmosphäre CO₂ entzogen. Negativemissionen sind nötig, um schwer vermeidbare Emissionen aus der Landwirtschaft auszugleichen.
- Entscheidende Kriterien zur Bewertung dieser Optionen sind die jährliche Speicherleistung, das mögliche Gesamtvolumen sowie die Permanenz der Speicherung. Die Abscheidung von CO₂ mit anschliessender geologischer Speicherung ist gemäss diesen Kriterien klar die

beste Variante, sie erfordert allerdings ein koordiniertes Vorgehen mit unseren europäischen Nachbarn.

- Wie erwähnt, kann die Speicherung von CO₂ nicht die primären Massnahmen einer Netto-Null-Strategie ersetzen, auch weil die CO₂-spezifischen Vermeidungskosten höher sind. Nach heutigem Kenntnisstand ist sie dennoch ein entscheidendes Element einer solchen Strategie.

Der Kern von Netto-Null ist die Vermeidung fossiler Emissionen durch Substitution

Die Reduktion der Schweizer Treibhausgasemissionen auf Netto-Null erfordert in erster Linie eine Abkehr von fossilen Energiequellen in den Verbrauchssektoren Wärme und Mobilität. Dabei ist die **Elektrifizierung** entscheidend, also die Kopplung dieser Sektoren mit dem Stromsektor. Dies bedeutet bei der Mobilität den Umstieg auf **batterieelektrische Fahrzeuge** und im Bereich von Raumwärme und Warmwasser die konsequente Nutzung von **Wärmepumpen**. Dies erfordert aber auch eine Steigerung der Stromerzeugung von heute 60 TWh pro Jahr auf 80–90 TWh/a, vor allem durch den Ausbau von Photovoltaik und Windkraft verbunden mit einem entsprechenden Ausbau der Stromnetze. Bei der industriellen Prozesswärme werden je nach Temperaturniveau verschiedene Technologien zum Einsatz kommen: von der Solar- und Geothermie für < 100 °C über industrielle Wärmepumpen, die 200 °C erreichen können, und industrielle Widerstandsheizungen, die deutlich höhere Temperaturen erlauben, bis hin zur Verbrennung von festen (Biomasse, Kehrlicht), flüssigen (Diesel, Bio-Diesel) oder gasförmigen (fossiles Methan, Bio-Methan, Wasserstoff) Brennstoffen. Letztere können auch die höchsten Temperaturen von 1'500 °C erreichen, wie sie bei der Zementherstellung benötigt werden. Da auch die Verfügbarkeit erneuerbarer Energie aufgrund der Kosten, des Flächenbedarfs und anderer Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz begrenzt ist, ist auch die **Minderung des Energiebedarfs** ein wichtiger Teil der Netto-Null-Strategie.

Dazu braucht es aber auch CO₂-Abscheidung und -Speicherung

Allerdings reicht die Vermeidung fossiler Energieträger nicht aus, um Netto-Null zu erreichen. Laut Schätzungen des Bundesamts für Energie BFE verbleiben auch 2050 noch ca. 11,7 Mio Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr (Mt/a), die aus verschiedenen Quellen stammen¹. Den grössten Anteil daran hat die Landwirtschaft mit 4,6 Mt/a, gefolgt von 2,6 Mt/a des fossilen Kehrlichtanteils, der in den KVA verbrannt wird, 2,4 Mt/a aus der Zementherstellung (grösstenteils unvermeidbare geogene Emissionen aus der chemischen Reaktion von Kalkstein zu gebranntem Kalk) sowie ca. 2,1 Mt/a aus verschiedenen Industrieprozessen und von Abfalldeponien.

Im Zero-Basis-Szenario der Energieperspektiven 2050+ werden 7,1 Mt/a dieser Emissionen durch **CO₂-Abscheidung, -Transport und -Speicherung vermieden**, vor allem an KVAs und Zementwerken. Ein Teil des gespeicherten CO₂ stammt aus Biomasse und damit aus der Atmosphäre. Dies entspricht einer **CO₂-Entfernung, die auch als Negativemission**

¹ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>

bezeichnet wird. Die verbleibenden 4,6 Mt/a müssen durch Negativemissionen im Ausland behandelt werden, zum Beispiel durch direkte Abscheidung aus der Luft².

Abbildung 1 zeigt die Kohlenstoffflüsse zwischen der Atmosphäre, dem Untergrund und einer Auswahl an möglichen Speichern (Böden, Holzbau). Netto-Null bedeutet, dass die **Zuflüsse** von CO₂ in die Atmosphäre durch Verbrennung und andere Emissionen durch gleich grosse **Abflüsse** mittels Pflanzenwachstum oder direkte Abscheidung ausgeglichen werden müssen. Da selbst bei vollständiger Vermeidung fossiler Brennstoffe noch immer die Emissionen der Landwirtschaft und der Zementherstellung bleiben, muss zwangsläufig Kohlenstoff dem System entzogen werden.

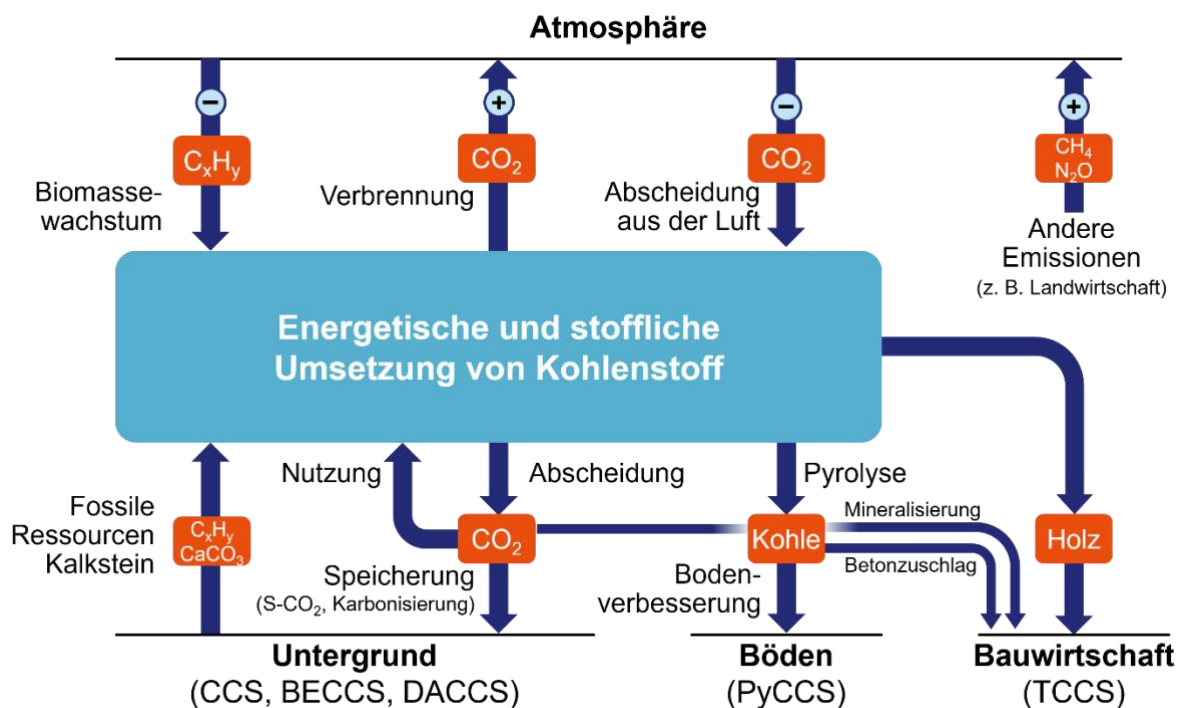


Abb. 1: Bilanz der Kohlenstoffflüsse

Am wichtigsten ist dabei die Abscheidung und Speicherung von CO₂ von KVA's und Zementwerken (CCS). Dazu kommen Optionen, die es erlauben, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen,

- insbesondere die Verbrennung von Biomasse mit anschliessender Abscheidung und Speicherung des biogenen CO₂ (BECCS),
- die direkte Abscheidung von CO₂ aus der Luft mit anschliessender Speicherung (DACCS),
- die Speicherung biogenen Kohlenstoffs aus der Pyrolyse von Biomasse oder Methan im Erdboden (PyCCS) oder
- die Speicherung biogenen Kohlenstoffs in Form von Holz im Holzbau (TCCS).

² <https://climeworks.com/plant-mammoth>

Verschiedene Modellergebnisse bestätigen diese Erkenntnis

Im Rahmen des SWEET-CROSS Projekts³ haben Teams verschiedener Hochschulen und Forschungsinstitute berechnet, wie ein Netto-Null-Energiesystem der Zukunft aussehen könnte. Dabei bestand **grosse Einigkeit hinsichtlich der Bedeutung der Energieeffizienz, des Ausbaus der Stromerzeugung mittels Photovoltaik und Windenergie, der Elektromobilität und der Wärmepumpen.**

Dazu wurden auch die jährlichen Mengen der CO₂-Abscheidung und -Speicherung ausgewertet – getrennt nach Abscheidung in der Schweiz und im Ausland. Abbildung 2 zeigt, dass die **Ergebnisse mit 10–15 Mt/a gut mit denen der Energieperspektiven 2050+ übereinstimmen.** Ein Grund für die Unterschiede liegt darin, dass in manchen Modellrechnungen noch fossile Brennstoffe genutzt werden (z. B. in der Industrie), die dann durch entsprechend höhere Negativemissionen kompensiert werden müssen.

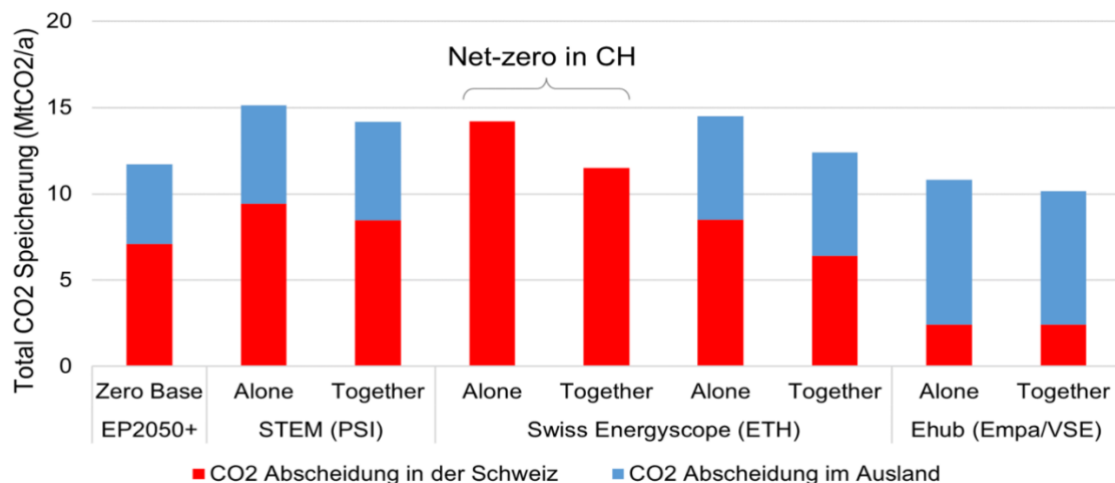


Abb. 2: Modellergebnisse verschiedener Teams im Rahmen von SWEET-CROSS^{3, 4}

Die Ergebnisse von SWEET-CROSS zeigen einmal mehr, dass die CO₂-Abscheidung nicht der alleinige Königsweg zur Erreichung von Netto-Null ist. Vielmehr ist es **eine wichtige zusätzliche Komponente einer umfassenden Energie- und Klimastrategie**, die vor allem auf Effizienzgewinnen und der Vermeidung fossiler Bren- und Treibstoffe beruht.

Verschiedene Technologien erlauben die Abscheidung von CO₂

CO₂ befindet sich in geringer **Konzentration in der Atmosphäre, zurzeit sind dies 0,042%** (420 ppm) mit steigender Tendenz. Wird ein kohlenstoffhaltiger Brennstoff verbrannt, entsteht CO₂, das nun mit deutlich höherer **Konzentration von 5–15% im Abgasstrom** vorliegt. Dies passiert auch bei der Kalzinierung im Zementwerk. Schliesslich bildet sich CO₂ auch bei der Biogaserzeugung durch anaerobe Vergärung. Das Rohbiogas enthält dabei neben Biomethan auch **40–50% CO₂.**

³ <https://sweet-cross.ch/results/>

⁴ <https://www.strom.ch/de/energiezukunft-2050/startseite>

Aufgrund dieser erheblichen Konzentrationsunterschiede gibt es auch unterschiedliche Technologien, um CO₂ abzuscheiden. Bei der **Abscheidung aus der Atmosphäre (Direct Air Capture (DAC))** wird die Luft durch Filtermatten geleitet, auf denen sich ein Material befindet, das CO₂ adsorbiert⁵. Sind diese Filtermatten mit CO₂ gesättigt, wird das CO₂ unter Luftabschluss durch Druckabsenkung und Temperaturerhöhung ausgetrieben und anschliessend für die weitere Verarbeitung aufbereitet. Der Energiebedarf für diesen Prozess ist hoch und beträgt pro Tonne CO₂ ca. 2 MWh Wärme (100 °C) und 0,4 MWh Elektrizität.

Bei der Abscheidung von CO₂ aus dem Abgas einer Verbrennungsanlage wird beispielsweise die **Aminwäsche** angewandt. Dabei kommt das CO₂ in einer Absorberkolonne mit einer wässrigen Aminlösung in Kontakt. Das CO₂ wird von diesem Lösungsmittel aufgenommen, während das nun nahezu CO₂-freie Abgas die Kolonne nach oben verlässt. Wie auch bei der Abscheidung aus der Luft muss das CO₂-gesättigte Lösungsmittel wieder regeneriert werden. Dies erfolgt in einer zweiten Kolonne unter Wärmezufuhr. Das CO₂ wird dann für die weitere Verarbeitung aufbereitet, während das nun CO₂-arme Lösungsmittel wieder zurück zur Absorberkolonne geleitet wird. Der Energiebedarf für diesen Prozess ist niedriger als bei der Abscheidung aus der Luft, er beträgt pro Tonne CO₂ ca. 1 MWh Wärme (100-140 °C) und 0,1 MWh Elektrizität.

Die Aminwäsche ist ein etablierter Prozess für Anlagen ab einer Grösse von etwa 50–100 tausend Tonnen CO₂ pro Jahr. Dies entspricht einem Holzheizkraftwerk oder einer kleinen Kehrlichtverbrennungsanlage. Für kleinere Anlagen wie eine Holzfeuerung in einem Nahwärmenetz oder einem industriellen Öl- oder Gasbrenner können **Membranen zur CO₂-Abscheidung** eingesetzt werden, die zurzeit in Entwicklung sind⁶. Dabei entsteht ein Elektrizitätsbedarf von etwa 0,4 MWh pro Tonne CO₂, dies vor allem zur Überwindung des Druckverlustes über die Membran. Membranen sind auch eine etablierte Technologie zur Abscheidung von CO₂ aus dem Rohbiogas einer Biogasanlage. Der Elektrizitätsbedarf beträgt dabei etwa 0,2–0,3 MWh pro Tonne CO₂⁷. Weitere Technologien zur CO₂-Abscheidung sind in einer frühen Entwicklungsphase.

Möglichkeiten und Herausforderungen der CO₂-Speicherung

Nach der Abscheidung muss das CO₂ zu den möglichen Lagerstätten transportiert werden. Es kann dabei als verdichtetes Gas, als Flüssigkeit (< 31 °C, > 5.2 bar) oder im überkritischen Zustand (> 31 °C, > 73 bar) vorliegen. **Flüssiges CO₂ eignet sich vor allem für den Transport in speziellen isolierten Containern** auf LKW, Zügen oder Schiffen. Für kleinere Punktquellen von 10'–50'000 Tonnen pro Jahr kann dies eine wirtschaftliche Lösung sein. Für grössere Quellen wie KVA oder Zementwerke wird eine **nationale Pipeline-Infrastruktur** erforderlich, die CO₂ von den grossen Punktquellen sammelt (Abbildung 3). Eine solche wurde im Rahmen des CO₂NET Projekts ausgelegt⁸. Dazu benötigt die Schweiz jedoch den **Anschluss an ein europäisches CO₂ Pipeline System**, in das CO₂ (wahrscheinlich in Basel) eingespeist werden kann. In einer solchen Pipeline liegt das CO₂ in überkritischem Zustand vor. Wesentliche Aspekte dieser Prozesskette, inklusive einer Demonstration des Transports

⁵ <https://climeworks.com/direct-air-capture>

⁶ <https://www.unisieve.com/applications>

⁷ <https://biogas.fnr.de/biogas-gewinnung/anlagentechnik/biogasaufbereitung>

⁸ <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=47346>

mittels Containern nach Island, wurden im Ende 2023 abgeschlossenen Projekt DemoUpCarma untersucht⁹.

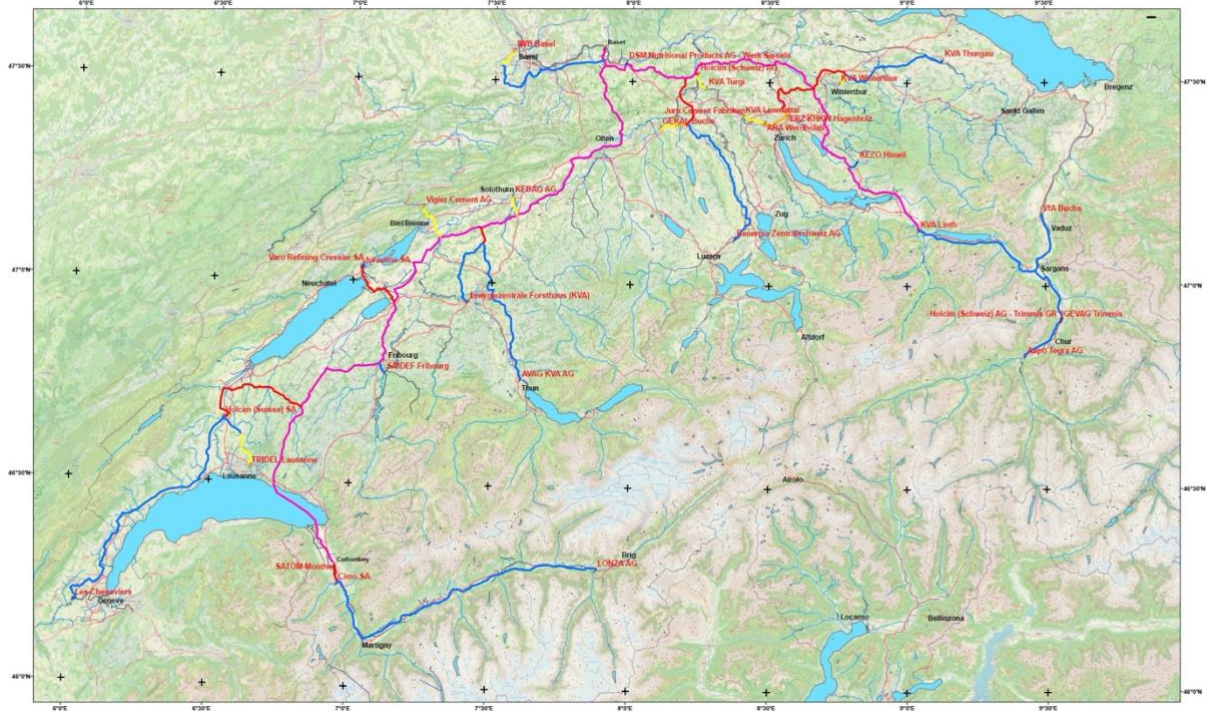


Abb. 3: mögliche Auslegung einer nationalen Pipeline-Infrastruktur für CO₂

Für die endgültige **Speicherung** wird das CO₂ in poröse Gesteinsschichten im **Meeresboden gepresst**. Die Herausforderung besteht darin, dass das CO₂ im dabei vorliegenden überkritischen Zustand eine geringere Dichte als das Wasser in den Gesteinsporen aufweist und es daher aufsteigt. Um ein Entweichen zu verhindern, muss das sogenannte Reservoir durch eine undurchdringbare Deckschicht nach oben abgeschlossen sein. Solche Strukturen finden sich natürlicherweise in Öl- und Gaslagerstätten. Innerhalb des Reservoirs gibt es verschiedene Varianten für den langfristigen Verbleib des CO₂:

- a. Im überkritischen Zustand steigt das CO₂ auf und wird durch die Deckschicht eingeschlossen (structural trapping).
- b. Ein Teil des CO₂ wird wegen Kapillarkräften in den Gesteinsporen eingeschlossen.
- c. Mit der Zeit löst sich das CO₂ im Porenwasser und sinkt ab (dissolution trapping), wonach es
- d. mit dem umliegenden Gestein chemisch reagiert und mineralisiert (mineral trapping).

Die letzte Möglichkeit ist die langfristig sicherste Option. Allerdings dauert dieser Prozess unter natürlichen Bedingungen hunderte bis tausende Jahre. Mit dem Carbfix Prozess¹⁰ kann die Speicherung durch Lösung innerhalb weniger Minuten realisiert werden. Gleichzeitig reduziert

⁹ <https://demoupcarma.ethz.ch/de/home/>

¹⁰ <https://www.carbfix.com/how-it-works>

sich die Zeit für eine vollständige Mineralisierung auf wenige Jahre. Allerdings erfordert dieser Prozess grosse Mengen an Wasser (ca. 25 t pro Tonne CO₂) und geeignete geologische Bedingungen, die nach heutigem Kenntnisstand in der Schweiz nicht vorkommen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die geologische CO₂-Speicherung zu den dauerhaftesten Methoden der Speicherung gehört.

Wie erwähnt eignen sich im Prinzip vor allem **ausgebeutete Öl- und Gaslagerstätten als Reservoirs für die CO₂-Speicherung**. Solche sind in der Schweiz kaum vorhanden – eine Ausnahme bildet die Erdgasförderung Mitte der Achtziger Jahre im Entlebuch. Poröse Gesteinsschichten, sog. Aquifere, finden sich zwar überall unter dem Mittelland, die bisherigen Abschätzungen zum Speicherpotenzial sind aber noch grob und daher unsicher¹¹. Aufgrund der möglichen Vorteile einer nationalen Lösung sind weitergehende Untersuchungen daher dringend empfohlen und werden derzeit geplant¹².

Dagegen wird das Speicherpotenzial für CO₂ in porösen Gesteinsschichten unter der Nordsee auf 100–150 Gigatonnen geschätzt¹³. Die jährlichen Emissionen der EU-27 betragen 2021 ungefähr 3,5 Gigatonnen¹⁴. Wie auch im Falle der Schweiz kann davon ausgegangen werden, dass der grösste Teil dieser Emissionen durch Elektrifizierung und sonstige Effizienzgewinne reduziert werden kann. Nimmt man an, dass am Ende noch 0,5–1 Gigatonne CO₂ pro Jahr gespeichert werden muss, würde das Speicherpotenzial für ein bis zwei Jahrhunderte ausreichen.

Um jedoch dieses Speicherpotenzial für die Schweiz nutzbar zu machen, muss sie Anschluss an eine europäische CO₂-Transportinfrastruktur haben.

Alternative Möglichkeit der indirekten CO₂-Speicherung: Pflanzenkohle und Holzbau

Die Abscheidung von gasförmigem CO₂ und die anschliessende geologische Speicherung scheint gemäss der vorliegenden Modellergebnisse der wichtigste Weg zu sein, um die restlichen, schwer vermeidbaren Emissionen zu behandeln – sowohl im Sinne der **Vermeidung** fossiler und geogener Emissionen als auch zur Erzeugung von **Negativemissionen** durch BECCS oder DACCS. Allerdings hängt dieser Pfad, wie zuvor erwähnt, von Faktoren ab, die ausserhalb der Kontrolle der Schweiz liegen.

Alternativ können insbesondere Negativemissionen durch **Pyrolyse (PyCCS)** und **Holzbau (TCCS)** erzeugt werden. Bei der Pyrolyse, und in ähnlicher Weise bei der hydrothermalen Karbonisierung, wird Biomasse unter Luftabschluss erhitzt. Dabei entsteht Pflanzenkohle als ein kohlenstoffreiches Produkt, das im Gegensatz zum Ausgangsstoff nur schwer durch biologische Prozesse abgebaut wird. Ein alternativer Pfad führt über die Pyrolyse von Bio-Methan, bei der neben Kohlenstoff auch Wasserstoff entsteht.

Die Pflanzenkohle kann nun zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft eingesetzt oder auch als Zusatzstoff bei der Betonherstellung verwendet werden. In beiden Fällen wird atmosphärisches CO₂ durch das Wachstum der Biomasse, die Pyrolyse und die anschliessende Speicherung dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt – daher der Begriff

¹¹ <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000518184>

¹² <https://nagra.ch/bund-prueft-machbarkeiten-von-versuch-auf-dem-bohrplatz-truellikon/>

¹³ https://cdmare.de/wp-content/uploads/2023/06/CDRmare05_speichsandst_kompakt_230620V3.pdf

¹⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#hauptverursacher>

Negativemissionen. Agroscope schätzt das Speicherpotenzial allein in landwirtschaftlichen Böden in der Schweiz auf maximal 4 Mio Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr; dies jedoch unter der Voraussetzung, dass genügend Biomasse für diesen Pfad zur Verfügung steht¹⁵. Berücksichtigt man die konkurrierenden Nutzungspfade, insbesondere für Holz, ergibt sich ein niedrigeres Potenzial von ungefähr **1 Mio Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr**.¹⁶ Der Vergleich mit Abbildung 2 zeigt, dass dies eine signifikante Menge ist.

Alternativ zur Pflanzenkohle kann atmosphärisches CO₂ auch direkt durch die Verwendung von Holz als Baumaterial gespeichert werden. Gemäss einer Studie des BFU¹⁷ liegt das **jährliche Potenzial bei etwa 2 Mio Tonnen CO₂-Äquivalenten**. Wie auch bei der Pflanzenkohle ist dies eine signifikante Menge. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Pflanzenkohle als Ausgangsstoff für Baumaterialien (z. B. zur Gebäudeisolation) zu verwenden und auf diese Weise im Bauwerk zu speichern. Als Nachteil der CO₂-Speicherung als Pflanzenkohle oder Holz muss jedoch der Verlust an primärer Energie, die dem Energiesystem nicht mehr zur Verfügung steht, erwähnt werden. Dieser beträgt in beiden Fällen ungefähr 2,5 MWh pro Tonne gespeichertem CO₂.

Eine weitere alternative Option ist die Speicherung von gasförmigem CO₂ in Abbruchbeton. Dabei wird ein beschleunigter Mineralisierungsprozess ausgelöst, bei dem sich das CO₂ in Kalkstein umwandelt und in den Poren und an der Oberfläche des Beton-Granulats gebunden wird¹⁸. Zurzeit können ungefähr 10 kg CO₂ pro Tonne Abbruchbeton gespeichert werden. Dieser Wert kann durch weitere Verbesserungen möglicherweise auf bis zu 25 kg/t gesteigert werden. Bei jährlich etwa 5 Mio Tonnen Abbruchbeton in der Schweiz entspricht das einer Speicherleistung von 50'-100'000 Tonnen CO₂.

Ist die Speicherung von CO₂ eine langfristige und nachhaltige Lösung?

Damit die CO₂-Speicherung tatsächlich positive Wirkung entfalten kann, muss sichergestellt werden, dass das entfernte CO₂ für mindestens tausend Jahre nicht wieder in die Atmosphäre gelangt. Zwei Fragen stellen sich in dieser Hinsicht bei den zuvor besprochenen Methoden: Wie lange verbleibt das CO₂ im jeweiligen Speicher (Permanenz)? Wie viel CO₂ kann maximal eingespeichert werden, bevor der Speicher voll ist (Speichervolumen)?

Keine dieser Fragen kann heute abschliessend mit Sicherheit beantwortet werden. Hinsichtlich der Permanenz geht man zurzeit davon aus, dass das CO₂ in porösen Gesteinsschichten unter einem undurchdringlichen Deckgestein für zehntausende Jahre eingeschlossen bleibt¹⁹. Welche Risiken damit verbunden sind und wie ein solches Reservoir überwacht werden kann, ist aktuell ein wichtiger Forschungsgegenstand. Bei der Pflanzenkohle hängt die Permanenz von den genauen Prozessparametern der Pyrolyse ab. Aktuelle Schätzungen gehen von einer Halbwertszeit von mehreren hundert bis mehreren tausenden Jahren aus¹⁴.

Beim Holzbau ist die Permanenz zu Recht ein viel diskutierter Aspekt, schliesslich beträgt die Lebensdauer eines heutigen Gebäudes selten mehr als 80 Jahre. Am Ende der Nutzung im Gebäude gibt es mehrere Optionen: die Aufarbeitung und Weiternutzung der Holzelemente in

¹⁵ <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/46567>

¹⁶ <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17583004.2023.2244456>

¹⁷ <https://www.umweltchemie.ch/wp-content/uploads/Szenarien-CO2-Holzbau-BfU.zip>

¹⁸ <https://www.neustark.com/de/wie-unsere-1%C3%B6sung-funktioniert>

¹⁹ https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter12.pdf

neuen Gebäuden, die Erzeugung von Pflanzenkohle (PyCCS) oder die energetische Nutzung durch Verbrennung, idealerweise mit anschliessender CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS). Auf diese Weise können Negativemissionen aufrechterhalten werden.

Eine permanente Speicherleistung des Holzbaus an sich ist nur dann gegeben, wenn ein Holzgebäude nach seinem Abriss wieder durch ein Holzgebäude ersetzt wird. Während einer Aufbauphase würde die Menge an gespeichertem CO₂ im Holzbau also kontinuierlich zunehmen, um dann schliesslich in einem dynamischen Gleichgewicht von Ab- und Zubau konstant zu bleiben. Die Gesamtmasse des dann gespeicherten CO₂ ergibt sich aus groben Schätzungen des Materiallagers Hochbau und des Holzanteils in einem typischen Holzgebäude zu 200–300 Mio Tonnen¹⁶. Ein weiterer positiver Effekt des Holzbaus ist selbstverständlich eine Verringerung des Zementverbrauchs mit einer entsprechenden Minderung der damit verbundenen CO₂-Emissionen.

Das maximale Speichervolumen der Pflanzenkohle kann zurzeit nicht beziffert werden. Die oben erwähnte jährliche Speicherleistung von 4 Mio Tonnen CO₂-Äquivalenten wurde für 30 Jahre als unbedenklich eingeschätzt¹⁴. Dies würde einem Speichervolumen von über 100 Mio Tonnen entsprechen. Wie zuvor erwähnt, wird das maximale Speichervolumen unter der Nordsee auf 100–150 Mrd Tonnen CO₂ geschätzt. Die Emissionen der Schweiz liegen bei 1–2 % der Emissionen der EU27-Staaten. Nimmt man einen ähnlichen Anteil am Speichervolumen an, würden der Schweiz somit 1'-2'000 Mio Tonnen zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass keine der Speicheroptionen für CO₂ unbegrenzt ist, weder in ihrer jährlichen Speicherleistung noch im maximalen Speichervolumen, in beider Hinsicht jedoch mit klarem Vorteil für die geologische Speicherung. **Ein Anschluss an eine europäische CO₂-Transport-Infrastruktur muss daher das Ziel der Schweiz sein.** Der Vorteil der alternativen Speicheroptionen wie PyCCS und TCCS ist wiederum, dass wir sie schon jetzt umsetzen können, während eine solche Infrastruktur aufgebaut wird. In jedem Fall ist nach heutigem Kenntnisstand die jährliche Speicherung der in Abbildung 2 illustrierten 10–15 Mio Tonnen CO₂ für die nächsten ein bis zwei Jahrhunderte möglich.

Die Frage, ob die betrachteten Optionen zur Speicherung von CO₂ in den nächsten Jahrzehnten zur Erreichung der Schweizer Klimaziele beitragen können, kann daher mit ja beantwortet werden.

CO₂-Nutzung – eine Alternative zur Speicherung?

Wie in Abbildung 1 dargestellt, stehen zwei Optionen zur weiteren Behandlung des abgeschiedenen CO₂ zur Verfügung:

- Speicherung (engl. Carbon Capture and Storage (CCS)) und
- Nutzung (Carbon Capture and Utilization (CCU)).

Allerdings sind diese Optionen nicht gleichwertig: Bei der Nutzung wird kein CO₂ aus dem System entfernt. Ihr Wert liegt darin, dass fossile Ressourcen eingespart werden. Da in jedem Fall aber die geogenen Emissionen bei der Zementherstellung, die (fossilen) Emissionen aus der Kehrlichtverbrennung und die nicht-energetischen Emissionen aus der Landwirtschaft vermieden oder ausgeglichen werden müssen, ist ein Netto-Null System, das nur auf CO₂-Nutzung beruht, nicht möglich.

Dazu kommt, dass die Nutzung von CO₂ als Energieträger das Zufügen von Energie erfordert. 1 Tonne CO₂ kann in 5 MWh synthetisches Methan umgewandelt werden, das hilft, fossiles Methan einzusparen. Dazu benötigt man jedoch 6 MWh Wasserstoff, der wiederum 10 MWh Elektrizität für die Elektrolyse verbraucht. Ähnliche Zahlen ergeben sich für die Synthese nachhaltiger Flugtreibstoffe. Ein Vergleich mit dem oben genannten Energieverbrauch bei der CO₂-Abscheidung zeigt einen Unterschied von einer Grössenordnung. **Zusammenfassend kann man sagen, dass das Netto-Null-Ziel nicht ohne CO₂-Speicherung erreicht werden kann und dass diese nicht durch CO₂-Nutzung ersetzt werden kann.**

Modellergebnisse zeigen allerdings, dass die CO₂-Nutzung dann attraktiv werden kann, wenn eine geologische Speicherung teurer oder wegen fehlender Pipeline-Anschlüsse unmöglich wird. Es kann auch festgestellt werden, dass der Pfad der CO₂-Nutzung nicht durch die Menge an verfügbarem CO₂ begrenzt wird. Würde man zum Beispiel das gesamte in der Schweiz getankte Kerosin synthetisch herstellen wollen, würde das 5–6 Megatonnen CO₂ pro Jahr als Ausgangsstoff erfordern, eine im Prinzip verfügbare Menge. Der begrenzende Faktor wäre hier klar die Energie, die nötig wäre, um Wasserstoff für die Synthese zu produzieren.

Was sind die Kosten?

Das Erreichen des Netto-Null-Ziels ist eine gesellschaftliche Aufgabe, die zu wirtschaftlichen Verschiebungen führt – innerhalb des Energiesystems und darüber hinaus. So werden die Kosten und die damit verbundenen Unsicherheiten des Imports fossiler Brenn- und Treibstoffe signifikant sinken. Umgekehrt erfordern der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung und der Umstieg auf Elektromobilität und Wärmepumpen erhöhte Investitionen im Inland. Wie können die betrachteten Optionen der direkten und indirekten CO₂-Speicherung eingeordnet werden?

Jede Massnahme, die zu Netto-Null beiträgt, kann durch ihre CO₂-Vermeidungskosten beschrieben werden – also die Kosten, die anfallen, um eine Tonne CO₂ zu vermeiden. Alle Modellergebnisse zeigen übereinstimmend, dass E-Mobilität und Wärmepumpen klar die günstigsten Optionen sind. Für immer strengere CO₂-Ziele ergibt sich eine Rangfolge von Lösungen mit steigenden Vermeidungskosten. Diese beginnt mit Optionen wie Holzbau und Abscheidung des biogenen CO₂ von Biogasanlagen, geht weiter mit Abscheidung an grossen Punktquellen (KVA, Zementwerke) oder Herstellung von Pflanzenkohle mittels Pyrolyse und endet schliesslich mit der derzeit teuersten Option, der direkten Abscheidung von CO₂ aus der Luft. Dies ist jedoch nur eine qualitative Einordnung. Die tatsächlichen Kosten und die Realisierbarkeit der verschiedenen Optionen hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab, im Falle von CCS vor allem von der Integration der Schweiz mit Europa.

Zuständigkeiten und Perspektiven

Da die Weiterentwicklung und Anwendung dieser Verfahren in der Schweiz und erst recht in der internationalen Zusammenarbeit anspruchsvoll ist, muss diese koordiniert erfolgen. Einige Akteure aus Forschung und Wirtschaft, wie etwa die «Swiss Carbon Removal Plattform», entwickeln dazu Positionen und setzen erste Projekte um. Am bekanntesten ist wohl das Schweizer Unternehmen Climeworks, das z. B. eine Anlage in Island in Betrieb nimmt. Aber auch in der Schweiz gibt es verschiedene Aktivitäten.

Als Orientierungshilfe für die öffentliche Hand sowie für Forschung und Wirtschaft skizziert der Bundesrat in einem Bericht²⁰ verschiedene Zwischenschritte, die sich auf zwei Phasen verteilen: eine Pionierphase von 2022–2030 und eine Phase der gezielten Skalierung von 2031–2050. Eine zentrale Rolle hat dabei das Bundesamt für Umwelt BAFU, dessen Aufgaben in den folgenden Bereichen mit unterschiedlichem zeitlichen Horizont liegen:

- Verbesserung der rechtlichen, strategischen und vollzugstechnischen Grundlagen auf nationaler Ebene
- Nationale Kooperation
- Internationale Kooperation
- Forschung & Entwicklung, Innovationsförderung
- Vorbildfunktion öffentliche Hand

Aufgrund der Dringlichkeit, Komplexität und zunehmenden Sichtbarkeit, aber auch der ökologischen und wirtschaftlichen Sensibilität des Themas ist davon auszugehen, dass der gesellschaftliche Diskurs zunehmend intensiver und möglicherweise auch kontroverser wird. Auch braucht es fundierte Risikoabschätzungen. Es ist also ratsam, diesen Diskurs koordiniert zu führen. Ein erster Schritt dazu ist das Verständnis der Verfahren und deren Bedeutung für das Erreichen der Klimaziele im Zusammenspiel mit den weiterhin prioritären Massnahmen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen. Denn eines sind die Verfahren zur Entnahme und **Speicherung von CO₂ auf keinen Fall: ein Freifahrtschein für ein «Weiter wie bisher»**, dazu sind sie in ihrer umweltverträglichen und auch wirtschaftlichen Anwendbarkeit zu limitiert.

²⁰ [CO₂-Abscheidung und Speicherung \(CCS\) und Negativemissionstechnologien \(NET\). Wie sie schrittweise zum langfristigen Klimaziel beitragen können; Bericht des Bundesrates vom 18.05.2022](#)



Prof. Dr. Luca Baldini
Sprecher des Wissenschaftlichen Beirats der aeesuisse
Co-Leiter des Institute for Building Technology and Process IBP an der ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften



Prof. Dr. Christophe Ballif
Direktor PV-Lab@EPFL und Sustainable Energy Center@CSEM



Prof. Dr. Massimiliano Capezali
Vorsitzender des Kompetenzzentrums für Energie der Hochschule für Wirtschaft und Ingenieurwissenschaften des Kantons Waadt (HEIG-VD)



Dr. Gianfranco Guidati
Stellvertretender Direktor des Energy Science Center der ETH Zürich



Prof. Dr. Andreas Häberle
Institutsleiter des SPF Institut für Solartechnik, Leiter der Abteilung EEU Erneuerbare Energien und Umwelttechnik der OST – Ostschweizer Fachhochschule



Prof. Dr. Martin Patel
Professor am Lehrstuhl für Energieeffizienz an der Universität Genf



Prof. Dr. Greta Patzke
Professorin am Departement für Chemie der Universität Zürich



Dr. François Vuille
Directeur de l'énergie du Canton de Vaud und ehemaliger Executive Director des Energy Center der EPFL

Der Wissenschaftliche Beirat der aeesuisse

Der Wissenschaftliche Beirat wirkt als Think Tank und Reflexionsgruppe für die politische und inhaltliche Arbeit der aeesuisse in sämtlichen Bereichen der Energie- und Klimapolitik. Im Beirat sind namhafte Akademikerinnen und Akademiker engagiert. Sie verfügen über internationale Reputation sowie ein nationales und internationales Netzwerk.

Der Wissenschaftliche Beirat hat drei Kernaufgaben:

- **Expertise:** Der Wissenschaftliche Beirat reflektiert aktuelle Entwicklungen und generiert Input bei der Erarbeitung und Klärung von Positionen und Inhalten.
- **Kommunikation:** Er beteiligt sich aktiv an der öffentlichen und politischen Meinungsbildung in Form von Fachartikeln, Auftritten an Veranstaltungen und Kontakten zu Politikern und Behörden.
- **Netzwerk:** Er pflegt und baut sein Netzwerk aus und unterstützt damit die positive Positionierung der aeesuisse in Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft.