Vergleich der Extraktion von CO_2 aus Industrieabgasen und anschließendem CCS, großflächiger In-situ-Karbonisierung und alternativer Ex-situ-Karbonisierung in Reaktorbehältern.

Dipl.-Geogr. Hans-Jürgen Münnig 10.05.2025

Zusammenfassung

Grundsätzlich ist eine CO_2-freie Energiegewinnung und Industrieproduktion im Hinblick auf den Klimaschutz wie auch aus ökologischen und Nachhaltigkeitsaspekten unbedingt vorzuziehen. Weil dabei erst kein Aufwand für die Abscheidung, den Transport und die Karbonisierung erforderlich wird, ist die CO_2-freie Energiegewinnung und Industrieproduktion auch wirtschaftlicher.

Dennoch wird eine Abscheidung und Bindung von CO_2 in wenigen chemischen Prozessen wie z.B. der Reduzierung von Kalziumkarbonat bei der Zementherstellung unvermeidlich sein, so dass eine In-situ-Karbonisierung notwendig wird. Diese ist gegenüber dem gegenwärtig favorisierten CCS und der „natürlichen“ in-situ-Karbonisierung zu bevorzugen, weil bei diesem Verfahren wesentliche Probleme wie z.B. Leckagen entfallen, das Verfahren eine deutlich bessere Energiebilanz und Nachhaltig vorweisen kann und obendrein unter Einbeziehung von wirtschaftlich nutzbaren Nebenprodukten offenkundig wirtschaftlich ist.

1 Einleitung

Carbon Capture an Storage (CCS) ist seit geraumer Zeit in der Diskussion, um „schwer vermeidbare“ CO_2-Emissionen in Kraftwerken und der Industrie aus dem Abgas zu extrahieren und in geeigneten Gesteinsschichten zu verpressen und dauerhaft einzulagern. Grundlegend ist aus der Sicht des Klimaschutzes festzustellen, dass bei verbreiteter Anwendung von CCS die Transformation der Energieerzeugung behindert wenn nicht zurückgeworfen wird, weil Treibhausgas-Emissionen fossiler Energieanwendungen durch CCS vermeintlich wieder ausgeglichen werden können. Die Konzentration auf tatsächlich (weitgehend) klimaneutrale Techniken verlöre damit an Bedeutung.

Gleichzeitig ist aber auch festzustellen, dass die Risiken von CCS noch nicht ausreichend erforscht sind, der Zeitraum einer festen Bindung des eingeleiteten CO_2 ebenso wenig ausreichend erforscht sind und selbst nach gegenwärtig vorliegenden Erkenntnissen allein die Lagerung, der Transport und die unterirdische Verpressung von CO_2 mit erheblichen Leckageverlusten verbunden ist. Zudem ist CCS aufgrund der Abscheidung (Capture) und des langen Transports sowie der Verpressung mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden, der – sofern die Energie nicht aus Erneuerbaren Energieanlagen stammt – selber ebenfalls u.U. beträchtliche Treibhausgasemissionen verursacht.

Doch wie erfolgt die CO_2-Bindung im Untergrund, und welche Gesteine sind dafür geeignet?

Sehr gut geeignet sind im Wesentlichen Feldspäte oder Plagioklase. Während Feldspäte sehr unterschiedliche chemische Zusammensetzungen haben werden Natrium- oder Calzium-Silikate als Plagioklase bezeichnet. Dabei entstehen Plagioklase in warmen Abkühlungsphasen magmatischer Schmelzen oberhalb von 1.300°C. Ein typisches Gestein dafür ist der Gabbro.

Die stöchiometrische Formel von Feldspaten ist

$$(Ba,Ca,Na,K,NH_4,Sr)(Al,Fe^{3+},B,Si)_4O_8$$

wobei die in Klammern gesetzten Elemente sich gegenseitig ersetzen können. Feldspate können also eine unterschiedliche Zusammensetzung haben und zeigen auch unterschiedliche Färbungen von klar durchscheinend über milchig weiß, graugelblich bis zu zartrosa. Der Name setzt sich zusammen aus „Feld“ und „Spat“, wobei der Namensteil Feld bereits etwas über die Häufigkeit aussagt: quasi auf jedem Feld oder Acker zu finden. „Spat“ dagegen steht für die gute, weitgehend „vollkommene“ Spaltbarkeit.

Alle Feldspäte (oder Feldspate) sind gesteinsbildend bei einem Vorkommen von rund 60% der in Gesteinen vorkommenden Mineralien.

Ein wichtiges Merkmal für die Entstehung von Feldspäten ist die Temperatur von 1.200°C bis 1.300°C. Das belegt, dass Feldspäte nicht oberflächennah gebildet werden sondern aus der Tiefe kommen aus Schmelzprozessen. Demzufolge sind sie besonders zahlreich und in großer Menge in magmatischen und Eruptivgesteinen vertreten. Dazu zählen vor allem:

- Basalt
- Monzonit
- Granit
- Rhyolith
- Serpentinit
- Olivin
- Wollastonit
- u.a.

Infolge von geologischen Prozessen kommen Feldspäte neben reinen Magmatiten und Eruptivgesteinen auch in Sandsteinen und anderen Sedimentgesteinen außer Kalksteinen – hier nur sehr selten – vor.

$2NaAlSi_3O_8(f)\ (Albit) + 2CO_2(g) + H_2O(l) \rightarrow Al_2(OH)_8Si_4O_{16}(s) + 2Na_2CO_3(aq)$

$2CaAl_2Si_2O_8(Feldspat) + 2H_2O + 2CO_2 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4(Kaolin) + 2H_4SiO_4\ (Silicinsäure) + 2CaCO_3$

Dabei können sowohl das Natrium- als auch das Calciumcarbonat ausflocken oder in wässriger Lösung vorkommen.

2 Vorkommen feldspathaltiger Gesteine in Deutschland

Basalt als eines der wichtigsten feldspatführenden Gesteine kommt ausschließlich in den Gebieten Deutschlands vor, in denen rezenter oder fossiler Vulkanismus vorhanden ist. Das sind im Wesentlichen:

- die Vulkaneifel (Rheinland-Pfalz),
- der Westerwald (Rheinland-Pfalz, Hessen, Nordrhein-Westfalen),

- der Vogelsberg (Hessen),
- die Rhön (Bayern, Hessen, Thüringen),
- der Hegau (Baden-Württemberg),
- die Schwäbische Alb (Baden-Württemberg),
- das Siebengebirge (Nordrhein-Westfalen),
- das Lausitzer Bergland (Sachsen),
- das Erzgebirge (Sachsen) und
- der Hohe Parkstein (Bayern).

Von besonderer Bedeutung ist aber auch Monzonit, ein plutonisches Gestein, mit folgender Verbreitung:

- der Harz (Sachsen-Anhalt),
- der Odenwald (Hessen, Baden-Württemberg, Bayern),
- der Schwarzwald (Baden-Württemberg) und
- das Sächsisches Granulitgebirge (Sachsen).

Granitvorkommen liegen:

- im Bayerischer Wald (Bayern),
- im Oberpfälzer Wald (Bayern),
- im Fichtelgebirge (Bayern),
- im Erzgebirge (Sachsen),
- im Harz (Sachsen-Anhalt, Niedersachsen, Thüringen) rund um das Brockenmassiv,
- im Odenwald (Hessen, Baden-Württemberg, Bayern),
- im Schwarzwald (Baden-Württemberg),
- im Thüringer Wald (Thüringen) und
- in der Lausitz (Sachsen, Brandenburg).

Zuletzt noch die Vorkommen von Rhyolith:

- Thüringer Wald (Thüringen),
- Sachsen,
- Sachsen-Anhalt nördlich von Halle,
- Saar-Nahe-Senke (Rheinland-Pfalz, Saarland) besonders am Königsstuhl, am Donnersberg und bei Bad Kreuznach,
- Schwarzwald (Baden-Württemberg),
- Flechtinger Höhenzug (Sachsen-Anhalt).

2.1 Was ist wichtig an diesen Lagerstätten?

Der wichtigste Faktor ist der Gehalt an Calcium- oder Natrium-reichen Mineralen, insbesondere Plagioklas-Feldspat (Anorthit) und Olivin. Je höher der Anteil dieser Minerale, desto mehr Calcium steht für die Bildung von Calcit zur Verfügung. Die Zeit, die benötigt wird, um kontinuierlich eingepresstes CO_2 in einer klüftigen Gesteinsschicht vollständig als Calcit zu binden, ist **äußerst variabel** und hängt von einer Vielzahl komplexer Faktoren ab wie z.B. Temperatur, Druck, Begleitminerale, etc. Dabei können höhere Temperaturen und höhere Drücke die Verwitterung von Feldspat und damit die Karbonisierung von CO_2 fördern.

Der wichtigste Faktor ist der Gehalt an Calcium- und Natrium-reichen Mineralen, insbesondere Plagioklas-Feldspat (Anorthit) und Olivin ist von besonderer Bedeutung. Je höher der Anteil dieser Minerale, desto mehr Calcium/Natrium steht für die Bildung von Calcit bzw. Natriumcarbonat zur Verfügung.

Verschiedene Minerale im Basalt zeigen zudem eine unterschiedliche Reaktivität gegenüber CO_2-haltigem Wasser. Olivin und vulkanisches Glas sind tendenziell reaktiver als Feldspäte. Magnesium und Eisen können zur Bildung anderer Karbonate wie Magnesit und Siderit führen, was die Calcitbildung beeinflussen kann.

Aber auch die Eigenschaften der Gesteinsschichten ist von großer Bedeutung. Ein stark geklüftetes Gestein mit hoher Permeabilität ermöglicht eine bessere Zirkulation des CO_2-reichen Fluids und somit einen schnelleren Kontakt mit den reaktiven Mineraloberflächen. Ebenso beschleunigt ein größerer reaktiver Oberflächenbereich (z.B. durch feine Klüfte und Poren) die Reaktion. Höhere Temperaturen und CO_2-Partialdrücke können die Reaktionsgeschwindigkeit erhöhen. Es gibt jedoch auch optimale Bereiche für die Karbonisierung.

Auch die Eigenschaften des eingepressten CO_2-Fluids wirken auf den Ablauf der Feldspatverwitterung. Eine höhere CO_2-Konzentration im Fluid führt zu einer höheren Konzentration an Kohlensäure und beschleunigt die Verwitterung. Diese führt in der Regel auch zu einem sinkenden pH-Wert (Versauerung). Ein saures Milieu fördert die Auflösung der Basaltminerale, während ein höherer pH-Wert die Ausfällung von Karbonaten begünstigen kann. Ebenso kann die Salinität des Fluids und der Reaktionsumgebung die Reaktionen beeinflussen.

Die chemischen Reaktionen der Mineralverwitterung und Karbonatbildung sind kinetisch kontrolliert, d.h. sie benötigen Zeit. Die Reaktionsgeschwindigkeiten hängen stark von den zuvor erläuterten Faktoren und der zeitlichen Veränderung dieser Faktoren ab.

2.2 Wie schnell läuft die Karbonisierung ab?

Experimente im Labormaßstab unter optimierten Bedingungen (hohe CO_2-Drücke, erhöhte Temperaturen, fein gemahlener Basalt) haben gezeigt, dass eine signifikante Karbonisierung innerhalb von Tagen bis Wochen erreicht werden kann.

In-situ-Mineralisierungen z.B. auf Island (Carbfix-Projekt) zeigten, dass das in basaltisches Gestein injizierte CO_2 innerhalb eines Zeitraums von zwei Jahren zu 95% überwiegend als Calcit gebunden wurde. In entsprechend geeigneten Formationen wie auf Island deutet dies auf verhältnismäßig schnelle Reaktionsgeschwindigkeiten hin.

Andere Pilotprojekte und Modellierungen zeigten jedoch deutliche geringere Umwandlungsraten von maximal wenigen Kilogramm CO_2 pro Kubikmeter Basalt hin. Die vollständige Karbonisierung des Porenraums könnte demnach **Jahrzehnte** dauern, abhängig von der Porosität und der Menge des eingepressten CO_2.Dem gegenüber steht der natürliche Verwitterungsprozess, der bei Basalt einen Zeitraum von mehreren Jahrtausenden bis zu Jahrmillionen beansprucht. Insofern ist die Injektion von CO_2 der Versuch die natürliche Verwitterung zu beschleunigen.

3 Welche Eignung für die dauerhafte Speicherung von CO_2 haben die gegenwärtig für CCS ausgewählten und ausgewiesenen Gebiete in der Nordsee?

Unter dem Meeresboden der Nordsee kommen keine nennenswerten Lagerstätten feldspathaltiger Gesteine vor. Jedoch gibt es dort zahlreiche bereits ausgebeutete Erdgasvorkommen, in deren Hohlräumen das über Pipelines und Gastankschiffe angelieferte CO_2 eingepresst werden soll bzw. bereits wird. Hinzu kommen mehrere poröse Schichten von Salzdomen, die sich ebenfalls sehr gut für die Einspeicherung von CO_2 eignen.

Es wird davon ausgegangen, dass die über den porösen Schichten, in die das Kohlendioxid injiziert wird, liegenden weitestgehend gasdichten Schichten, die im Wesentlichen aus Tonstein bestehen.

3.1 Welche Risiken gibt es?[1]

Auch eine durchgängige Tonsteinschicht kann sich im Laufe längerer Zeiträume verändern und klüftig werden. Durch die Klüfte kann das eingelagerte CO_2 zunächst in das darüber strömende Meerwasser gelangen und bei weiterem Aufstieg in die Atmosphäre. Ein weiterer Aspekt ist die Möglichkeit von Leckagen an undichten Stellen entlang Durchbohrung der Deckschichten.

Aber auch geologische Aspekte bilden ein nicht zu unterschätzendes Risiko. Denn die Nordsee bildet keine statische geologische Formation sondern ist ständig in Bewegung. Seit über 2,6 Mio. Jahren senkt sich das Nordseebecken stetig ab, während die angrenzen Landmassen sich zunehmend heben. Dies ist nur zum Teil auf die postglaziale Entlastung nach der zurückliegenden Eiszeit zurückzuführen. Zudem wurde jüngst festgestellt, dass die Absenkung des Nordseebeckens um ein Vielfaches höher ist, als bisher angenommen. Dabei konnten rund 75% der Absenkungsrate von rund 42 cm pro 1.000 Jahren anhand geologischer Prozesse erklärt werden. Doch die verbleibenden 25% müssen eine bisher noch nicht erforschte Ursache möglicherweise in der tieferen Erdkruste haben.[2]

Diese Bewegungen können unerwartet zu Spannungen in den Deckschichten führen und damit Risse herbeiführen.

4 Gibt es Alternativen zu CCS?

CCS ist nicht zwingend für die Karbonisierung von CO_2. Es gibt dazu zwei Alternativen:

1. die natürliche oder in-situ-Karbonisierung von atmosphärischem CO_2 an großflächig ausgebrachtem Gesteinsmehl.

   Dies besteht im Idealfall aus Basalt. Dazu wird Basaltgestein zu Gesteinsmehl gemahlen und großflächig auf Böden verteilt. Ackerböden scheiden dabei weitgehend aus, weil diese recht häufig bearbeitet werden und damit das als Reagens dienende Gesteinsmehl von der Oberfläche in den Unterboden eingearbeitet wird und der Kontakt zu dem in der Atmosphäre enthaltenen CO_2 abbricht.

1 https://www.greenpeace.de/publikationen/20250502-greenpeace-studie-ccs-risiken-nordsee.pdf
https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/CCS_NRW_summary.pdf

2 https://www.scinexx.de/news/geowissen/die-nordsee-wird-tiefer/

2. Die Ex-situ-Karbonisierung in Reaktionstanks.

   Hierzu werden ausreichend große Tanks unmittelbar am Kraftwerk oder auf dem Industriegelände installiert. Diese werden mit Gesteinsmehl oder einem Gesteinsmehl-Fluid gefüllt. Das an der Quelle der Emission aus dem Abgas extrahierte CO_2 wird unter definierten Bedingungen über die Gesteinsmehl-Oberfläche oder durch das Fluid geleitet, wobei das CO_2 im Gesteinsmehl als Karbonat gebunden wird. Ist das Gesteinsmehl gesättigt, wird nach einer definierten Zeitspanne das Gesteinsmehl bzw. das Fluid ausgetauscht.

5 Welche CO_2-Bilanz hat CCS im Vergleich zur „natürlichen“ in-situ-Karbonisierung und der Ex-situ-Karbonisierung?[3]

Unter dem Gesichtspunkt einer möglichst geringen CO_2-Bilanz für den Klimaschutz hängt die Beantwortung der Frage, ob CCS oder die natürliche Karbonisierung über gemahlenem Gestein effizienter ist, von den genauen Parametern und technologischen Entwicklungen ab. Betrachten wir beide Optionen im Detail:

a) CO_2-Extraktion aus Industrieabgasen mit anschließendem CCS (Carbon Capture and Storage):

- Vorteile:
  - Direkte Reduktion der Emissionen an der Quelle: Verhindert, dass große Mengen CO_2 überhaupt in die Atmosphäre gelangen.
  - Hohe Konzentration des CO_2-Stroms: Industrieabgase haben eine deutlich höhere CO_2-Konzentration als die Atmosphäre, was die Extraktion tendenziell energieeffizienter macht als Direct Air Capture (DAC).
  - Potenzial für großflächige Anwendung: Kann bei großen Emittenten wie Kraftwerken, Zementwerken etc. eingesetzt werden.
- Nachteile (bezüglich CO_2-Bilanz):
  - Hoher Energieaufwand für Extraktion: Die Abtrennung des CO_2 aus dem Abgasstrom ist ein energieintensiver Prozess. Der Energiebedarf kann je nach Technologie und CO_2-Konzentration variieren und einen signifikanten Teil der Energie des Kraftwerks oder der Industrieanlage verbrauchen, was indirekt zu weiteren CO_2-Emissionen führen kann, wenn die Energie nicht aus erneuerbaren Quellen stammt.
  - Energieaufwand für Kompression und Transport: Das abgeschiedene CO_2 muss komprimiert und über Pipelines oder andere Transportmittel zu den Speicherorten transportiert werden, was ebenfalls Energie benötigt und CO_2-Emissionen verursachen kann.
  - Energieaufwand für die Speicherung: Auch die Einpressung und die Überwachung der CO_2-Speicher erfordern Energie.
  - Potenzielle Leckagen: Obwohl Speicherstätten sorgfältig ausgewählt und überwacht werden, besteht ein Risiko von CO_2-Leckagen über lange Zeiträume.

3 https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Prognos_final.pdf
https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/1da17ad8-d826-4e30-806a-1836356e6dee/content

b) „Natürliche" Calcit-Bindung von CO_2 aus der Atmosphäre über gemahlenem feldspathaltigem Gestein (Enhanced Weathering):

- Vorteile (bezüglich CO_2-Bilanz):
  - Direkte CO_2-Entfernung aus der Atmosphäre: Wirkt dem bereits in der Atmosphäre befindlichen CO_2 entgegen.
  - Potenziell geringerer Energieaufwand für die CO_2-Bindung selbst: Die chemische Reaktion der Verwitterung und Karbonisierung erfolgt relativ "natürlich" mit CO_2 aus der Luft und Wasser.
  - Zusätzliche Vorteile für Böden: Die Ausbringung von Gesteinsmehl kann in einigen Fällen die Bodenqualität verbessern und Nährstoffe freisetzen, was positive Auswirkungen auf die Landwirtschaft haben könnte.
- Nachteile (bezüglich CO_2-Bilanz):
  - Hoher Energieaufwand für Abbau, Mahlen und Transport des Gesteins: Der Abbau großer Mengen Gestein, das feine Mahlen zur Erhöhung der reaktiven Oberfläche und der großflächige Transport des Gesteinsmehls sind sehr energieintensiv und können erhebliche CO_2-Emissionen verursachen, die die gebundene Menge teilweise oder sogar vollständig aufheben könnten. Die Effizienz hängt stark von der Entfernung der Abbaustätten zu den Ausbringungsorten und den Transportmitteln ab.
  - Langsame Reaktionsraten: Obwohl die Karbonisierung von Ca-reichen Feldspäten schneller ablaufen kann als bei anderen Silikaten, ist sie im Vergleich zur direkten Abscheidung und Speicherung immer noch ein relativ langsamer Prozess, insbesondere bei atmosphärischen CO_2-Konzentrationen. Die vollständige Umsetzung großer Mengen Gesteinsmehl kann Jahre oder Jahrzehnte dauern.
  - Große benötigte Mengen an Gestein: Um signifikante Mengen CO_2 zu binden, sind sehr große Mengen an Gesteinsmehl erforderlich, was logistische und ökologische Herausforderungen mit sich bringt (z.B. Landnutzung für Abbau und Ausbringung).
  - Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen Bindungsrate und Langzeitstabilität: Die Effizienz der CO_2-Bindung in Feldversuchen unter natürlichen Bedingungen ist noch Gegenstand intensiver Forschung. Es gibt Unsicherheiten bezüglich der langfristigen Stabilität der gebildeten Karbonate und möglicher Nebenreaktionen.

Effizienzbetrachtung unter dem Aspekt einer möglichst geringen CO_2-Bilanz:

Unter der Annahme, dass die Calcitbindung von CO_2 durch gemahlenes Gestein irgendwo zwischen dem Optimalwert (schnelle Umwandlung) und einem schlechteren Wert (sehr langsame Umwandlung) liegt, und die gesamte CO_2-Bilanz beider Ansätze berücksichtigt wird (inklusive Energieaufwand für Extraktion, Transport, Mahlen etc.), lässt sich ableiten, dass

- CCS aus Industrieabgasen potenziell eine bessere CO_2-Bilanz hat, wenn:
  - die CO_2-Extraktionstechnologien energieeffizient sind und der benötigte Strom überwiegend aus erneuerbaren Quellen stammt;

- die Transportwege zu den Speicherorten kurz sind oder energieeffiziente Transportmittel (z.B. Pipelines) genutzt werden;
- hohe CO_2-Abscheideraten erreicht werden (nahe 90% oder mehr);
- die langfristige Speicherung sicher ist und Leckagen vermieden werden.

- Die "natürliche" Calcit-Bindung über gemahlenem Gestein könnte eine bessere CO_2-Bilanz aufweisen, wenn
  - die benötigten Gesteinsmengen relativ gering sind, um signifikante CO_2-Mengen zu binden (was bei langsamen Reaktionsraten unwahrscheinlich ist);
  - der Energieaufwand für Abbau, Mahlen und vor allem Transport des Gesteinsmehls sehr gering gehalten werden kann (z.B. durch lokale Anwendung in der Nähe der Abbaustätten und Nutzung energieeffizienter Prozesse);
  - die CO_2-Bindungsrate in realen Umgebungen signifikant höher ist als derzeit angenommen bzw. nachgewiesen und die Langzeitstabilität der Karbonate gewährleistet ist.

Aktuelle Einschätzung und Forschungslage:

Die meisten aktuellen wissenschaftlichen Einschätzungen deuten darauf hin, dass CCS von großen Punktquellen (Industrie und Kraftwerke) in Kombination mit erneuerbaren Energien derzeit das größere Potenzial für eine effiziente und großflächige Reduktion von CO_2-Emissionen mit einer relativ guten CO_2-Bilanz bietet. Dies liegt daran, dass die direkte Vermeidung von Emissionen an der Quelle tendenziell effizienter ist, als CO_2 nachträglich aus der Atmosphäre zu entfernen, insbesondere wenn die Konzentration gering ist.

Enhanced Weathering (die Nutzung von gemahlenem Gestein zur CO_2-Bindung aus der Atmosphäre) ist ein vielversprechender Ansatz mit Potenzial für die Zukunft, insbesondere wenn:

- nachhaltigere und energieeffizientere Methoden für Abbau, Mahlen und Transport entwickelt werden;
- die CO_2-Bindungsraten in Feldversuchen optimiert und besser quantifiziert werden.
- Synergien mit der Landwirtschaft (z.B. Bodenverbesserung) genutzt werden können, um die Gesamtbilanz zu verbessern.

c) Ex-situ-Karbonisierung[4]

Die Ex-situ-Karbonisierung vereint die Vorzüge der zuvor genannten Techniken. Das zu bindende CO_2 wird in hoher Konzentration am Entstehungsort extrahiert, muss aber nicht weit transportiert werden, weil der Reaktionstank auf dem Gelände steht.

Durch die sehr große Reaktionsoberfläche des Gesteinsmehls ist der Kontakt des Gesteinsmehls mit CO_2 sehr gut. Die Reaktionsparameter (z.B. Druck, Temperatur, pH-Wert, Geschwindigkeit der Durchströmung, etc.) können optimiert und kontrolliert werden. Damit ergibt sich eine entsprechend höhere Reaktionsgeschwindigkeit.

Der Transportaufwand für das Gesteinsmehl verringert sich gegenüber der „natürlichen“ In-situ-Methode, weil das Gesteinsmehl nicht großflächig ausgebracht werden muss

4 https://cordis.europa.eu/article/id/202133-using-nanoscale-ophiolitic-rocks-to-capture-and-sequester-co2/de
https://www.rifs-potsdam.de/de/ergebnisse/publikationen/2022/separation-reaction-products-ex-situ-mineral-carbonation-and

sondern deutlich weniger Standorte zu beliefern sind. Gleichzeitig könnte die Abwärme des Kraftwerks oder der Industrieanlage zugunsten des Karbonisierungsreaktors genutzt werden. Der Energieaufwand würde dadurch begrenzt und die Energiebilanz verbessert.

Der Prozess der unterirdischen Verpressung entfällt. Das karbonisierte Gesteinsmehl könnte dagegen weiter verwertet werden:

- als Zuschlagstoff für Zement oder Beton
- zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft oder
- in anderen industriellen Anwendungen.

Das alles macht das In-situ-Verfahren im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Karbonisierungs-Techniken bei gleichzeitig verbesserter CO_2- und Energiebilanz deutlich wirtschaftlicher. Gleichzeitig wird die CO_2-Abscheidung nachhaltiger, weil keine endzulagernden Rückstände entstehen.

Dennoch gilt es auch bei diesem Verfahren noch einige Herausforderungen zu bewältigen:

- Energieaufwand für die Gasbewegung und Fluidmanagement: Das Durchleiten großer Mengen Abgas durch einen oder mehrere Reaktionstanks erfordert Energie für Ventilatoren und Pumpen (falls eine wässrige Suspension des Gesteinsmehls verwendet wird).
- Effizienz der CO_2-Absorption und -bindung: Es ist entscheidend, wie effizient das CO_2 aus dem Abgas in der wässrigen Phase gelöst und an das Gesteinsmehl gebunden werden kann. Die Kontaktzeit und die Oberfläche des Gesteinsmehls spielen hier eine wichtige Rolle.
- Reaktionskinetik unter realen Abgasbedingungen: Industrieabgase enthalten neben CO_2 auch andere Stoffe (z.B. SO_2, NO_x, Staubpartikel), die die Karbonisierungsreaktion beeinflussen oder zu unerwünschten Nebenprodukten führen könnten. Eine Vorbehandlung der Abgase wäre möglicherweise erforderlich, um das Abgas zu entschwefeln, über einen Katalysator No_x zu extrahieren und mit einem Feinstaubfilter zu behandeln.
- Benötigte Menge an Gesteinsmehl und Tankgröße: Um signifikante Mengen CO_2 zu binden, wären potenziell sehr große Mengen an Gesteinsmehl und entsprechend dimensionierte Reaktionstanks erforderlich, was erhebliche Investitionskosten verursachen könnte.
- Wasserbedarf und Abwasserbehandlung: Bei Verwendung einer wässrigen Suspension des Gesteinsmehls wäre ein signifikanter Wasserbedarf gegeben, und das Abwasser müsste möglicherweise aufbereitet werden.
- Langzeitstabilität des karbonatisierten Materials: Die Langzeitstabilität der gebundenen Karbonate muss gewährleistet sein, insbesondere wenn das Material weiterverwendet wird.
- Wirtschaftlichkeit: Die Gesamtwirtschaftlichkeit des Prozesses (Kosten für Gesteinsmehl, Energie, Anlagenbau, Betrieb etc.) muss im Vergleich zu anderen CCS-Technologien wettbewerbsfähig sein.

  Die Frage der Wirtschaftlichkeit könnte sich jedoch bei Nutzung vorhandener Infrastruktur auf die reinen Investitionskosten und die Beschaffungskosten für das Gesteinsmehl relativieren.

5.1 Gibt es zur Ex-situ-Karbonisierung Pilotanlagen oder industrielle Anwendungen?

Die Idee der CO_2-Mineralisierung in industriellen Abgasströmen wird bereits erforscht, und es gibt Pilotanlagen, die diese Technologie testen. In einigen Anlagen wird gegenwärtig die direkte Karbonisierung von CO_2 aus Rauchgas mit verschiedenen mineralischen Materialien testen. Ein bekanntes Beispiel ist die Nutzung von Flugasche in Fluidized-Bed-Reaktoren, um gleichzeitig CO_2, SO_2 und Quecksilber aus Rauchgas zu mineralisieren (wie in einigen der Suchergebnisse angedeutet). Auch der Einsatz von Magnesiumchlorid zur Mineralisierung von CO_2 in Rauchgas wird untersucht.

Ein vielversprechender Ansatz ist die Verwendung von basischen industriellen Reststoffen, die ohnehin entsorgt werden müssten, als reaktives Material für die CO_2-Bindung. Dies kann die Kosten senken und gleichzeitig ein Abfallproblem lösen.

Zudem wird an verschiedenen Standorten bei der In-situ-Karbonisierung an der Optimierung der Parameter für Temperatur, Druck, pH und Durchströmungsgeschwindigkeit gearbeitet.

Eine Auswahl von Pilotanlagen:

- Carbfix (Island): Obwohl primär auf In-situ-Mineralisierung fokussiert, hat Carbfix auch Technologien und Erkenntnisse entwickelt, die für In-situ-Anwendungen relevant sein könnten. Sie haben erfolgreich CO_2 in Basaltgestein umgewandelt.[5]
- CarbonCure Technologies (Kanada): Nutzt abgeschiedenes CO_2 zur Herstellung von kohlenstoffreduziertem Beton. Obwohl nicht direkt auf Gesteinsmehl basiert, zeigt es die kommerzielle Anwendbarkeit der CO_2-Mineralisierung im Baustoffsektor.
- Mineral Carbonation International (MCi) (Australien): Entwickelt Technologien zur In-situ-Mineralisierung von CO_2 mit industriellen Reststoffen und natürlichen Mineralien zur Herstellung von Baumaterialien und anderen Produkten. Sie betreiben Pilotanlagen und arbeiten an der Kommerzialisierung ihrer Technologie.
- Skyonic (USA): Hat eine Pilotanlage betrieben, die CO_2 aus einem Zementwerk abscheidet und zur Herstellung von Natronlauge, Salzsäure und Kalziumkarbonat nutzt. Dies ist ein Beispiel für die Kopplung von CO_2-Abscheidung und -Nutzung durch Mineralisierung.
- Universität Newcastle (UK) / O.C.O Technology: Arbeiten an der Karbonisierung von industriellen Abfällen wie Aschen zur Herstellung von Zuschlagstoffen für die Bauindustrie. Es gibt Pilotprojekte in Zusammenarbeit mit Kraftwerken.
- ETH Zürich (Schweiz) / Climeworks: Climeworks konzentriert sich zwar auf Direct Air Capture (DAC), aber ihre Expertise in der CO_2-Abscheidung und -Reaktion könnte auch für In-situ-Anwendungen in Industrieabgasen relevant sein.
- Viele Universitäten und Forschungsinstitute weltweit betreiben Pilotanlagen im Labormaßstab oder in kleinerem Feldmaßstab, die verschiedene Gesteinsmehle, industrielle Reststoffe und Reaktordesigns für die CO_2-Karbonisierung untersuchen.

5.2 Stand der Forschung

Zahlreiche Forschungsgruppen und Unternehmen weltweit arbeiten an verschiedenen Technologien zur beschleunigten mineralischen Karbonisierung von CO_2 aus industriellen

5 https://cordis.europa.eu/article/id/430309-co2-turned-into-stone-for-zero-carbon-emissions/de

Quellen. Dies umfasst die Optimierung von Reaktordesigns, die Auswahl reaktiver Gesteine oder industrieller Reststoffe (z.B. basische Schlacken aus der Stahlproduktion, Flugasche aus Kohlekraftwerken) und die Steuerung der Reaktionsbedingungen sowie der Wartung. Außerdem werden die Bedingungen im industriellen Langzeitbetrieb und die erforderlichen Wartungen erforscht.

Hier eine Auswahl von Forschungsprojekten unterschiedlicher Institute:

- CO2MIN[6] (Deutschland): Ein Forschungsprojekt, das die mineralische Sequestrierung von CO_2 in der Zementindustrie untersucht, einschließlich der Nutzung von verschiedenen Mineralien und der Optimierung von Prozessbedingungen.
- EU-geförderte Projekte: Es gab und gibt verschiedene EU-Forschungsprojekte (z.B. im Rahmen von Horizon 2020), die sich mit Carbon Capture and Utilization (CCU) beschäftigen, einschließlich der mineralischen Karbonisierung. Diese Projekte umfassen oft die Entwicklung und den Test von Pilotanlagen.
- Nationale Forschungsprogramme: Viele Länder fördern nationale Forschungsprogramme zur Entwicklung von CCS- und CCU-Technologien, die auch die In-situ-Mineralisierung einschließen.
- Wissenschaftliche Publikationen: Eine umfangreiche wissenschaftliche Literatur dokumentiert die Fortschritte in der Forschung zur mineralischen Karbonisierung, einschließlich Studien zur Reaktionskinetik verschiedener Minerale, zur Optimierung von Reaktordesigns und zur techno-ökonomischen Bewertung von Prozessen.

Folgende Fraunhofer- und Max-Planck-Institute arbeiten ebenfalls an Forschungen zu CCS, CCU und zur Ex-situ-Karbonisierung:

- Fraunhofer UMSICHT (Oberhausen): Ein sehr aktives Institut im Bereich des Carbon Managements.[7] UMSICHT forscht an der Umwandlung von CO_2 in hochwertige Produkte, einschließlich der Nutzung von CO_2 zur Herstellung von zementfreien Baustoffen durch die Karbonisierung von Stahlschlacken und der Produktion von Calciumcarbonat aus CO_2-reichen Prozessgasen und kalziumhaltigen Materialströmen. Sie betreiben auch Pilotanlagen im Bereich der Hochdrucktechnologie mit CO_2.
- Fraunhofer IMM (Mainz): Entwickelt innovative Reaktoren und Katalysatoren[8] für die Nutzung von CO_2, einschließlich photokatalytischer Verfahren zur Umwandlung von CO_2 in Chemikalien. Ihre Expertise im Bereich der Mikroverfahrenstechnik könnte für effiziente In-situ-Karbonisierungsreaktoren relevant sein.
- Fraunhofer IKTS (Dresden): Untersucht die Biomineralisierung[9] als Ansatz zur CO_2-Bindung in Baumaterialien. Sie entwickeln lebende Baumaterialien, die CO_2 aufnehmen und in Karbonate umwandeln können. Dies könnte auch für die Behandlung von Industrieabgasen in Bioreaktoren relevant sein.
- Fraunhofer IGB (Stuttgart): Verfolgt verschiedene technologische Ansätze zur Aktivierung von CO_2 und dessen Nutzung zur Synthese von Chemikalien, Kraftstoffen

6 https://www.ltt.rwth-aachen.de/cms/LTT/Forschung/Forschung-am-LTT/Energiesystemtechnik/Abgeschlossene-Projekte/~pdqq/CO2MIN/lidx/1/

7 https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/carbonmanagement.html

8 https://www.imm.fraunhofer.de/de/presse-publikationen/carboncat.html

9 https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/elektronik_mikrosystem_biomedizintechnik/bio_nanotechnologie/biologisierte_materialien_strukturen/in_situ_biomineralisierung_living_building_Materials.html

und Kunststoffen.[10] Obwohl der Fokus nicht ausschließlich auf der Karbonisierung liegt, sind die entwickelten Technologien und das Know-how in der CO_2-Reaktionstechnik relevant.

- Fraunhofer ISI (Karlsruhe): Untersucht die techno-ökonomischen und politischen Aspekte von Carbon Capture and Storage (CCS) und Direct Air Capture (DAC), was auch die Bewertung der In-situ-Karbonisierung im Vergleich zu anderen Optionen einschließt.
- Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion (MPI CEC) (Mülheim an der Ruhr): Beteiligt sich am Verbundprojekt Carbon2Chem®[11], das die Nutzung von Hüttengasen (die CO_2 enthalten) zur Herstellung von Chemikalien untersucht. Obwohl der Fokus hier primär auf der katalytischen Umwandlung liegt, sind die vorgelagerten Schritte der Gasreinigung und -konditionierung relevant für die Behandlung von Industrieabgasen im Hinblick auf die Karbonisierung.
- Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie (MPI-Bremen): Untersucht Mikroorganismen und Enzyme, die effizient CO_2 binden und umwandeln können. Die hier gewonnenen Erkenntnisse könnten potenziell für bioinspirierte Ansätze in der In-situ-Karbonisierung genutzt werden.
- Max-Planck-Institut für Biogeochemie (MPI-BGC) (Jena): Untersucht globale biogeochemische Kreisläufe, einschließlich des Kohlenstoffkreislaufs und der Wechselwirkungen zwischen Biosphäre, Atmosphäre und Geosphäre. Das grundlegende Verständnis der natürlichen Karbonisierungsprozesse ist relevant für die Entwicklung technischer Anwendungen.
- Max-Planck-Institut für Polymerforschung (MPI-P)[12] (Mainz): Hat in der Vergangenheit an mineralisch-organischen Hybridmaterialien geforscht, die von natürlichen Prozessen inspiriert sind. Dieses Know-how könnte für die Entwicklung neuartiger Materialien für die CO_2-Absorption und -Karbonisierung relevant sein.

6 Gibt es andere Alternativen außerhalb der geologischen Speicherung / Bindung?

Es gibt durchaus eine Vielzahl anderer Möglichkeiten, CO_2 zu binden oder umzuwandeln. Obendrein versprechen die meisten Verfahren und natürliche Methoden sehr viel geringere Risiken und eine deutlich höhere energetische und stoffliche Effizienz und Nachhaltigkeit. Welche Alternativen wäre dazu geeignet?

Zunächst einmal wären alle natürlichen CO_2-Senken zu nennen, als da wären:

- Gehölze, insbesondere Laubgehölze, besonders auch möglichst naturbelassene Wälder – z.B. Urwälder mit hoher stofflicher Umsetzung

10 https://www.igb.fraunhofer.de/de/ueber-uns/fokusthemen/co2-als-rohstoff-fuer-eine-nachhaltige-chemie.html
https://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2021/co2-als-rohstoff-fuer-kunststoffe-und-co.html

11 https://www.cec.mpg.de/de/projekte-und-foerderungen/carbon2chem-reg
https://www.max-wissen.de/download-page/?rel=wp-content/uploads/Techmax/Techmax35/tech-35-d-web.pdf&token=MTc0NzAwMzg0MA%3D%3D

12 https://mpimet.mpg.de/kommunikation/detailansicht-news/global-carbon-project-dem-menschengemachten-co2-auf-der-spur

- Moore, die mit wesentlich geringerem Flächenanspruch ein Vielfaches an CO_2 im Vergleich zu Wäldern speichern können. Leider sind sehr viele Moore (in Deutschland rund 98%) seit Jahren trockengelegt und werden überwiegend intensiv landwirtschaftlich genutzt. Sie emittieren dadurch Kohlendioxid und sollten wieder vernässt werden.
- Der gesamte biotische Lebensraum der Ozeane. Man spricht dabei auch von der marinen Kohlenstoffpumpe. Hierbei sind in erster Linie neben dem hohen CO_2-Lösungsvermögen des Wassers eine Vielzahl von Pflanzen und vor allem
    - Algen zu nennen. Durch ihre enormes Wachstum und dem damit verbundenen sehr hohen stofflichen Umsatz sind sie den meisten Landpflanzen deutlich überlegen.[13]
    - Auch Seegraswiesen zeigen ein auffallend schnelles Wachstum und eine sehr dichte Vegetation.[14] Auch sie vermögen sehr viel CO_2-in Biomasse umzusetzen und sind gleichsam von hoher Bedeutung für die Biodiversität.

Darüber hinaus gibt es biotechnische Lösungsansätze. An dieser Stelle seien vor allem zwei Technologien zu nennen:

- die hydrothermale Carbonisierung von Biomasse[15] und
- die mikrobielle Umsetzung von CO2[16] mit Strom.

Auf eine Vertiefung aller vorgestellten Techniken wird hier verzichtet, denn sie würden den Rahmen dieses Textes sprengen.

7 Fazit

Die Ex-situ-Karbonisierung kann unter bestimmten Umständen sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch sinnvoller sein könnte als herkömmliches CCS. Diese Auffassung wird von zahlreichen Forschenden und Unternehmen geteilt. Die potenziellen Vorteile hinsichtlich reduzierten Transportaufwands, erhöhter Sicherheit (keine langfristige geologische Speicherung mit Leckagerisiken), potenziell schnellerer Umsetzungsgeschwindigkeiten durch optimierte Bedingungen und der Möglichkeit nachhaltiger Produktnutzung sind gewichtig.

Die Ergebnisse der Forschung und des Betriebs der Pilotanlagen deuten darauf hin:

13 https://www.fona.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/230102_Braunalgen_big.php
https://biooekonomie.de/nachrichten/neues-aus-der-biooekonomie/mit-algenwaeldern-kohlenstoff-der-tiefsee-speichern
https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2023/01/ungewoehnliche-co2-speicher-mit-algenschleim-gegen-den-klimawandel

14 https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/meere/wattenmeer/34472.html
https://www.seegraswiesen.de/de/co2-speicher/
https://www.helmholtz-klima.de/aktuelles/fuer-seegraswiesen-koennten-die-auswirkungen-schwerwiegend-sein

15 https://dechema.de/dechema_media/diskussionco2-called_by-dechema-original_page-124930-original_site-dechema_eV-view_image-1.pdf

16 https://www.mpi-bremen.de/CO2-mit-Strom-binden-Ein-Mikroben-Enzym-inspiriert-die-Elektrochemie.html

- Die Machbarkeit der In-situ-Karbonisierung von CO_2 aus Industrieabgasen wurde in Pilotanlagen demonstriert.
- Die Reaktionsgeschwindigkeiten können durch die Wahl des reaktiven Materials, die Optimierung der Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck, pH-Wert) und die Verwendung von Katalysatoren oder Additiven signifikant gesteigert werden.
- Industrielle Reststoffe wie basische Schlacken und Aschen können effektive und kostengünstige Reaktionsmaterialien sein.
- Die Integration der Karbonisierung in bestehende industrielle Prozesse (z.B. Nutzung von Abwärme) kann die Energieeffizienz verbessern.
- Die Herstellung von Wertstoffen aus dem karbonatisierten Material (z.B. Baumaterialien) kann die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erhöhen.

Insbesondere die Forschung an Fraunhofer- und Max-Planck-Instituten hat bereits wichtige Beiträge zum Verständnis und zur Weiterentwicklung der In-situ-Karbonisierung geleistet. Dazu gehören:

- Entwicklung neuer Reaktormaterialien und -designs.
- Optimierung von Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck, pH-Wert).
- Untersuchung der Reaktivität verschiedener Gesteine und industrieller Reststoffe.
- Entwicklung von Verfahren zur Wertstoffgewinnung aus dem karbonisierten Material.
- Techno-ökonomische Analysen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit verschiedener CCU-Technologien.