

Capture

Transport

Storage

Carbon Storage

Carbon Capture and Storage (CCS) beschreibt eine Technologieoption zur Abscheidung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) an Kraftwerken oder Industrieanlagen und die nachfolgende Speicherung in tief liegenden geologischen Gesteinsschichten. Mit dem letztgenannten Schritt beschäftigen sich die folgenden Aufgaben.

Aufgaben:

- 1) Einzelarbeit: Lesen Sie sich Material M1-M3 sorgfältig durch. Unterstreichen Sie zentrale Inhalte.
- 2) Formulieren Sie zu M1-M3 mindestens fünf Fragen, auf die die Materialien eine Antwort geben. Versuchen Sie keine Fragen zu stellen, die allein mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden können.
- 3) Partnerarbeit: Stellen Sie sich abwechselnd ihre Fragen vor und beantworten Sie sie mit Hilfe der Materialien. Notieren Sie sich Unklarheiten zur späteren Besprechung im Plenum.
- 4) Führen Sie mit Material M4-M6 die Schülerexperimente (Versuchsteile A-C) durch. Dokumentieren Sie Ihre Beobachtungen und Auswertungen.
- 5) Gegen die Pläne einer Etablierung von CCS-Standorten in Brandenburg und Schleswig-Holstein entstandenen 2009 und 2010 vermehrt Bürgerproteste. Erörtern Sie mögliche Gründe, die protestierende Bürgerinnen und Bürger hervorbringen könnten.



Sprinteraufgabe: Diskutieren Sie, ob es sich bei CCS um eine Brückentechnologie oder eine Zukunftstechnologie handelt.

M1: Informationstext zu Carbon Storage

Am Ende der CCS-Technologieketten steht die Speicherung des CO₂ im tiefen geologischen Untergrund von etwa 1000 bis 4000 Metern. Geeignete Speichergesteine sind zum Beispiel ehemalige Öl- oder Gaslagerstätten, Kohleflöze¹ und Salzwasser führende Gesteinsschichten (siehe M2). Bei Öl- und Gaslagerstätten kann das Kohlenstoffdioxid zusätzlich genutzt werden, um das bisher nicht aus den Lagerstätten förderbare Erdöl oder Erdgas zu gewinnen, so genannte Enhanced Oil beziehungsweise Gas Recovery. Dabei wird das Kohlenstoffdioxid mit hohem Druck in das Erdreich verpresst, um die Rohstoffe zu gewinnen.

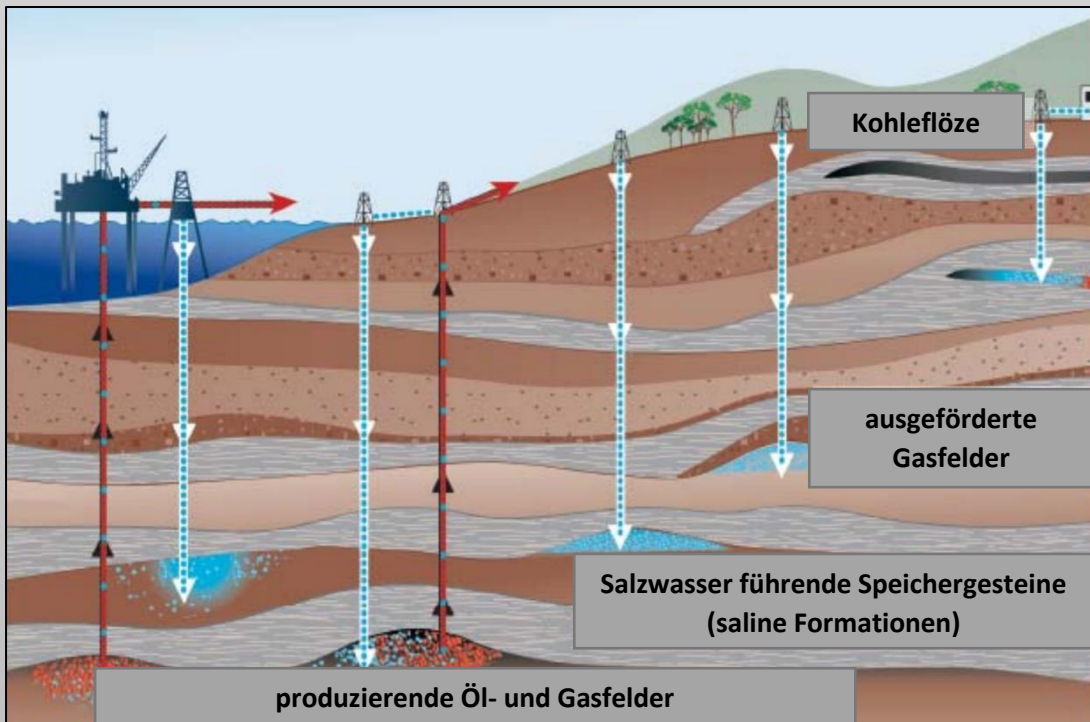
Die CCS-Technologie steht jedoch noch vor einigen Herausforderungen, z.B. bei der Abtrennung des Kohlenstoffdioxids verbleiben noch erhebliche Entwicklungsaufgaben hinsichtlich der Steigerung von Effizienz und Umweltverträglichkeit der entsprechenden Verfahren. In der jetzigen Erprobungsphase soll die technische, wirtschaftliche und umweltgerechte Machbarkeit der CCS-Technologien mit entsprechenden Pilotprojekten umfassend nachgewiesen werden.

Nach überwiegender Meinung von KlimawissenschaftlerInnen und anderen wissenschaftlichen ExpertInnen sind die CCS-Technologien neben dem verstärkten Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Steigerung der Energieeffizienz als weitere wichtige Klimaschutzsäule notwendig, um die CO₂-Emissionsminderungsziele von 85 % - 90 % bis zum Jahre 2050 in den Industrienationen zu erreichen. Die International Energy Agency² kommt in ihren jüngsten Energie- und Klimaschuttszenarien zum Schluss, dass die Anwendung der CCS-Technologien etwa 14% Prozent der global bis 2050 notwendigen CO₂-Emissionsreduzierungen erbringen kann.

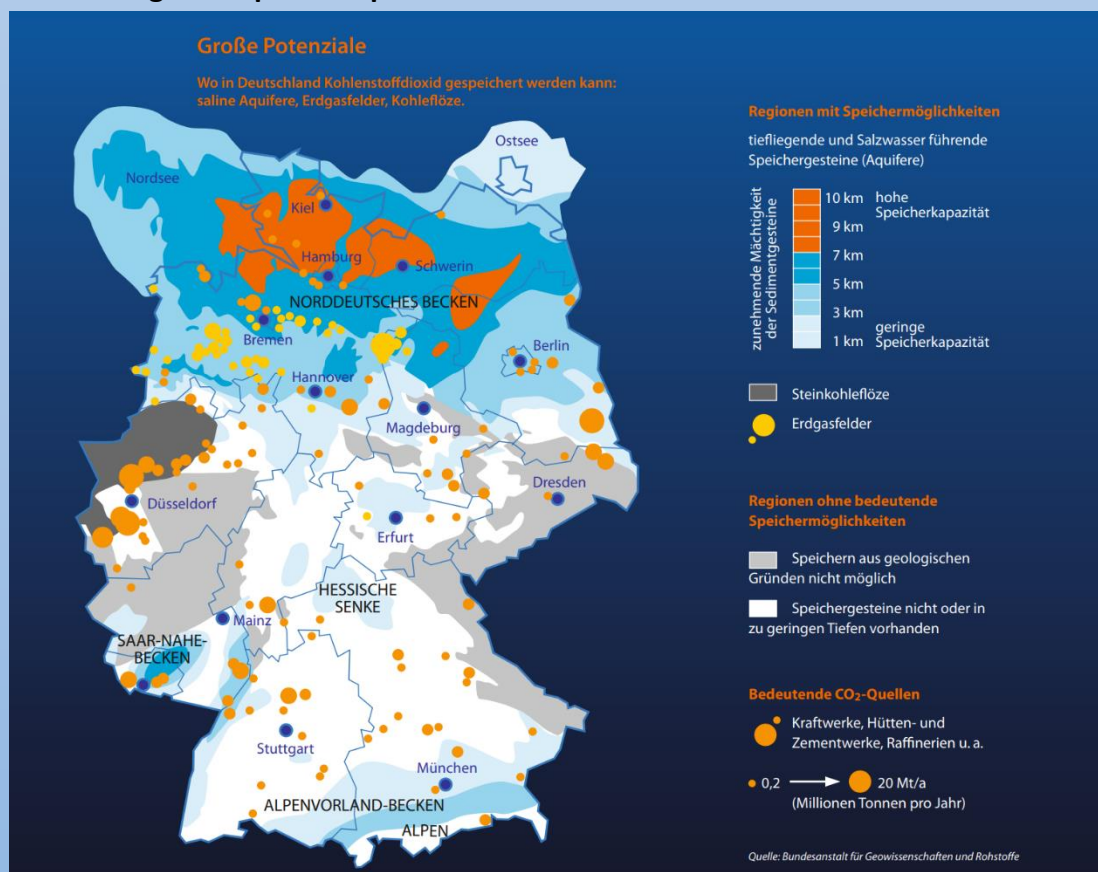
¹ **Kohleflöz:** eine Kohleschicht zwischen anderen Sedimenten bzw. Gesteinsschichten.

² **International Energy Agency (IEA):** die Internationale Energie Agentur ist eine Behörde mit 31 Mitgliedsstaaten, die sich u.a. mit der Analyse des globalen Energiesektors beschäftigt.

M2: Geologische Speicheroptionen



M3: Geologische Speicheroptionen in Deutschland



M4: Schülerexperiment Versuchsteil A - Modellversuch zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen



Geräte: Stativmaterial, 2 Kolbenprober, Reaktionsrohr, Porzellanschiffchen, 2 durchbohrte Stopfen, Parafilm, Waage, Spatel, 100 mL Plastikspritze mit Aufsatz; Petrischale

Chemikalien: Aktivkohle C (gepulvert), Kohlenstoffdioxid CO₂ (im Infusionsbeutel)

Versuchsaufbau:



Durchführung:

1. Legen Sie das Porzellanschiffchen in eine Petrischale und wiegen Sie 0,5 g Aktivkohle im Porzellanschiffchen ab. Verteilen Sie die abgewogene Aktivkohle möglichst großflächig in einem Porzellanschiffchen.
2. Bauen Sie die Apparatur auf, indem Sie die zwei Kolbenprober mit Stativmaterial befestigen (siehe Versuchsaufbau). Achten Sie darauf, dass die Skalierung der Kolben so platziert ist, dass Sie später Messwerte ablesen können. Schieben Sie das Porzellanschiffchen in das Reaktionsrohr. Verbinden Sie nun die Kolbenprober über die Stopfen mit dem Reaktionsrohr. Dichten Sie die Übergangsstellen abschließend mit Parafilm ab. Stellen Sie sicher, dass die Apparatur dicht ist.
3. Füllen Sie die Plastikspritze mit Hilfe des Infusionsbeutels mit 100 mL Kohlenstoffdioxid auf. Schließen Sie das Ventil der Spritze (siehe Abbildung). Nehmen Sie die nun gefüllte Spritze und verbinden Sie sie mit der Apparatur. Füllen Sie den linken Kolbenprober mit 100 mL Kohlenstoffdioxid, indem Sie die Plastikspritze vollständig entleeren. Notieren Sie die Volumina beider Kolbenprober.



4. Leiten Sie aus dem befüllten Kolbenprober langsam zunächst 20 mL CO₂ über die Aktivkohle, ohne diese zu verwirbeln. Warten Sie 30 Sekunden, bevor Sie erneut 20 mL CO₂ über die Aktivkohle strömen lassen. Wiederholen Sie diesen Vorgang, bis der Kolbenprober leer ist. Notieren Sie die Volumina der Kolbenprober.



5. Verschließen Sie den nun leeren Kolbenprober. Üben Sie anschließend sanften Druck (um ca. 5 – 10 mL) auf den Stempel des gefüllten Kolbenprobers aus. Halten Sie den Druck für ca. 10 Sekunden konstant. Notieren Sie die Volumina der Kolbenprober.

Beobachtung:

Notieren Sie Ihre Beobachtungen in der Tabelle.

Kolben- prober	Volumen zu Beginn des Versuchs in [mL] (Schritt 3)	Volumen nach Überleitung in [mL] (Schritt 4)	Volumen nach Druckausübung in [mL] (Schritt 5)
links			
rechts			

Auswertung:

- 1) Erläutern** Sie die Volumenveränderungen nach dem Überleiten über die Aktivkohle (Schritt 4). Nutzen Sie die Informationen des Steckbriefs Aktivkohle und beziehen Sie die Adsorptionseigenschaften der Aktivkohlenoberfläche in Ihre Schilderungen mit ein.

- 2)** Die Ausübung von Druck in Schritt 5 simuliert die Hochdruckverpressung von CO₂ unter der Erde. **Erläutern** Sie, welchen Einfluss die Druckerhöhung auf das Volumen des CO₂ hat.

- 3) Beurteilen** Sie das Potential der geologischen Speicherung von CO₂ in Kohleflözen anhand Ihrer Versuchsergebnisse und dem Steckbrief Kohleflöze.

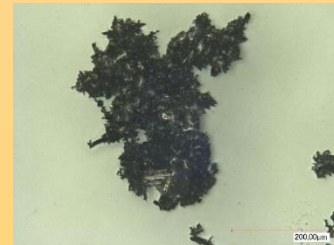
Steckbrief Aktivkohle

Aktivkohle besteht zu über 90 % aus Kohlenstoff. Sie hat eine hochporöse Struktur, die ähnlich wie bei einem Schwamm strukturiert ist. Dadurch entsteht eine sehr große Oberfläche, die pro Gramm Aktivkohle bis zu 2000 m² groß sein kann. Zwei Gramm Aktivkohle hätten dann in etwa eine Oberfläche, die der Fläche eines kleinen Fußballfeldes entspräche. Aktivkohle ist in Form von Pulver, Granulat oder Pellets oder auf Gewebe aufgebracht verfügbar.

Das Haupteinsatzgebiet von Aktivkohle ist die Verwendung als Adsorptionsmittel. An der Oberfläche können verschiedenste Stoffe, z.B. Farb-, Geschmacks- oder Geruchsstoffe aus Flüssigkeiten oder Gasen haften, d.h. von der Aktivkohle adsorbiert werden. Umgekehrt ist es auch möglich, Aktivkohle durch Erhitzen zu reaktivieren, wobei die adsorbierten Stoffe wieder freigesetzt werden. Aktivkohle wird u.a. in der Wasseraufbereitung, als Luftfilter oder in der Automobilindustrie und Medizin eingesetzt.



Aktivkohle in Pulverform



Aktivkohle unter dem Mikroskop

Steckbrief Kohleflöze

Dieses Modellexperiment zeigt das Potenzial der geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid unter der Erde, z.B. in Kohleflözen. Ein Kohleflöz ist eine dunkelbraune oder schwarz gebänderte Kohlelagerstätte, die in Gesteinsschichten sichtbar ist.

Es ist möglich, Kohlenstoffdioxid durch den Prozess der Adsorption an Kohle zu binden. Dies ist eine von vielen Optionen für eine Kohlenstoffspeichertechnologie, eine Methode, um die Auswirkungen der globalen Erwärmung durch Abscheidung und dauerhafte Speicherung von CO₂ zu begrenzen.

Allerdings gibt es in Deutschland nur sehr wenige Standorte mit Kohleflözen, die für eine solche Speicherung geeignet sind, so dass deren Nutzung als potenzielle Lagerstätte von Kohlenstoffdioxid nicht favorisiert wird. Neben Kohleflözen gibt es auch Bestrebungen, gasförmiges Kohlenstoffdioxid in ehemaligen Öl- und Gasvorkommen oder salzwasserführenden Gesteinsschichten zu speichern, die wesentlich häufiger vorkommen (siehe auch M4).



Kohleflöz (mittig) zwischen anderen Gesteinsschichten

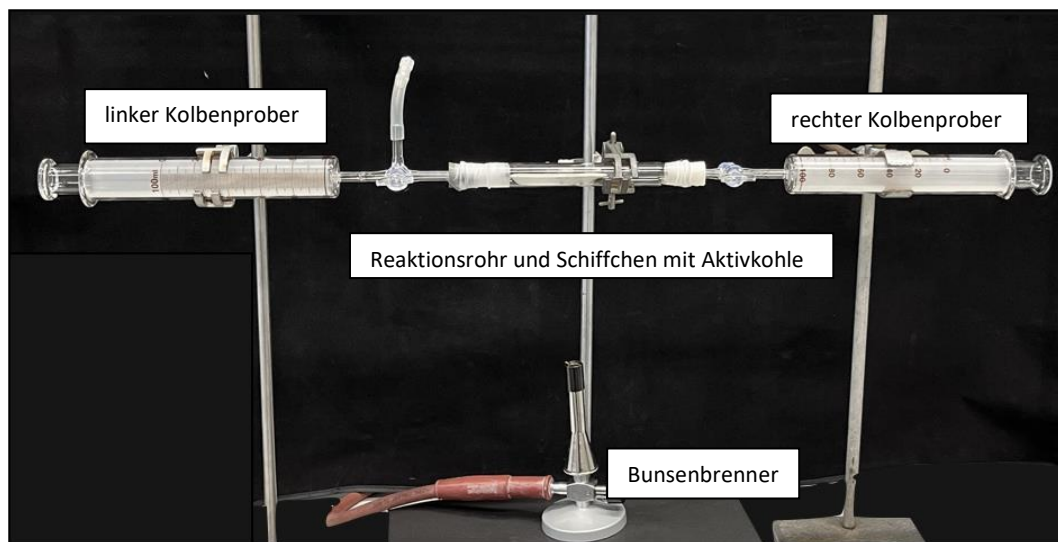
M5: Schülerexperiment Versuchsteil B – Desorption von Kohlenstoffdioxid



Geräte: Stativmaterial, 2 Kolbenprober, Reaktionsrohr, Porzellanschiffchen, 2 durchbohrte Stopfen, Bunsenbrenner, Streichhölzer

Chemikalien: Aktivkohle C (gepulvert)

Versuchsaufbau:



Versuchsdurchführung:

1. Verschließen Sie das Ventil des rechten Kolbenprobers. Öffnen Sie das Ventil des linken Kolbenprobers.
2. Stellen Sie den Bunsenbrenner unter das Reaktionsrohr. Platzieren Sie den Brenner so, dass er direkt unter dem Porzellanschiffchen steht.
3. Erhitzen Sie das Schiffchen mit Hilfe eines Bunsenbrenners für 2-3 Minuten. Notieren Sie die Volumina der Kolbenprober.
4. Lassen Sie die Apparatur 15 Minuten abkühlen. Lesen Sie die Messwerte an den Kolbenprobern ab.

Beobachtung:

Notieren Sie Ihre Beobachtungen in der Tabelle.

Kolben- prober	Volumen nach der Druckausübung in [mL] (siehe Modellversuch)	Volumen nach dem Erhitzen in [mL]	Volumen nach dem Abkühlungsprozess in [mL]
links			
rechts			

Auswertung:

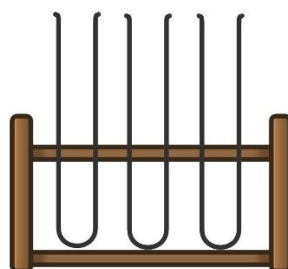
1. **Erläutern** Sie den Prozess der Desorption mit Hilfe Ihrer Beobachtungen. Nutzen Sie auch den Steckbrief zur Aktivkohle aus dem ersten Versuchsteil.
2. **Beschreiben** Sie die Auswirkungen einer potenziellen Desorption für die geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen.

M5: Schülerexperiment Versuchsteil C – Nachweis von Kohlenstoffdioxid

Geräte: Schnappdeckelglas mit Deckel und Dreiwegehahn, Parafilm, Waage, Spatel, 100 mL Plastikspritze mit Zweiwegehahn, Reagenzglasständer, 3 Reagenzgläser, 3 Reagenzglasstopfen, Pipette, Folienstift

Chemikalien: Aktivkohle C (gekörnt), Kohlenstoffdioxid CO₂ (im Infusionsbeutel), „Kalkwasser“ (Calciumhydroxid-Lösung, Ca(OH)₂(aq))

Skizze: Beschriften Sie die Skizze mit Hilfe der Schilderungen aus der Durchführung.



Durchführung:

- Nummerieren Sie drei Reagenzgläser mit den römischen Zahlen I-III und geben Sie jeweils 3 mL Kalkwasser hinzu.
- Entnehmen Sie 100 mL Kohlenstoffdioxidgas mit einer Plastikspritze aus dem Infusionsbeutel.
- Entleeren Sie die Spritze vollständig in Reagenzglas I. Verschließen Sie das Reagenzglas mit einem Stopfen und schütteln Sie.
- Wiegen Sie 0,25 g Aktivkohle ab und füllen Sie diese in Reagenzglas II. Notieren Sie Ihre Beobachtungen.
- Wiegen Sie erneut 0,25 g Aktivkohle ab und geben Sie diese in ein Schnappdeckelglas.
- Entnehmen Sie erneut 100 mL Kohlenstoffdioxidgas mit einer Plastikspritze aus dem Infusionsbeutel.
- Entleeren Sie die Spritze vollständig in das Schnappdeckelglas. Verschließen Sie das Schnappdeckelglas mit einem Deckel.
- Schütteln Sie das Schnappdeckelglas für eine Minute.
- Geben Sie den Inhalt des Schnappdeckelglases mit einem Spatel in Reagenzglas III und verschließen Sie es mit einem Stopfen.
- Schütteln Sie Reagenzglas III und notieren Ihre Beobachtungen.

Beobachtung:

Reagenzglas	I) Kalkwasser und Kohlenstoffdioxid	II) Kalkwasser und Aktivkohle	III) Kalkwasser und Aktivkohle (nach Vorbehandlung mit Kohlenstoffdioxid)
Beobachtung			



Auswertung:

1. Vergleichen Sie die Beobachtungen in den Reagenzgläsern I-III und **erläutern** Sie den Nachweis mit Kalkwasserlösung.

2. Stellen Sie eine passende Reaktionsgleichung auf.

„Kalkwasser“ + Kohlenstoffdioxid → Calciumcarbonat + Wasser

_____ + _____ → _____ + _____



Calciumcarbonat
hat die Formel
CaCO₃

3. Fassen Sie die Haupteigenschaften aller drei Versuchsteile A-C in der Tabelle **zusammen**.

Versuche	Versuchsteil A	Versuchsteil B	Versuchsteil C
	Modellversuch zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen	Desorption von Kohlenstoffdioxid	Nachweis von Kohlenstoffdioxid
Haupteigenheit			

4. Diskutieren Sie die Grenzen der Modellversuche zur Visualisierung der Adsorptionsprozesse in Kohleflözen.



Quellen:

M1

gekürzt und angepasst nach: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Artikel „Die weitere Entwicklung von CCS Technologien“ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html> (letzter Zugriff 28.01.26).

M3

Dahmke, Andreas. Institut für Geowissenschaften der Universität Kiel. Folie 15.
https://www.schleswig-flensburg.de/media/custom/146_4295_1.PDF?1256574029 (letzter Zugriff 27.01.21).

M3

Zeitbild Wissen: Naturwissenschaft und Technik im Unterricht 2011 „Klimaschutz und CCS. Abtrennung und Speicherung von CO₂“ S.21, https://www.zeitbild.de/wp-content/uploads/2009/08/CCS_Brosch_2011Web.pdf (letzter Zugriff 28.01.26)

M4

Versuchsdurchführung adaptiert nach: Emden, Markus. CO₂-Sequestrierung – ein Modellexperiment zu Gegenmaßnahmen zum Klimawandel. In Unterricht Chemie 171/2019. <https://www.friedrich-verlag.de/chemie/gesellschaft-nachhaltigkeit/co2-sequenzierung-ein-modellexperiment-zu-gegenmassnahmen-zum-klimawandel-3299> (letzter Zugriff 28.01.26).

Versuchsteil C Versuchsaufbau gezeichnet mit Chemix.org

Steckbrief Kohleflöz

Foto Kohleflöz: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/89/Coal_seam.jpg

Definition Kohleflöz: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Coal_seam#cite_note-1



Erwartungshorizont:

Infotext: Carbon Storage (CCS)

1. Individuelle SuS-Lösung

2. Exemplarische Fragenstellungen könnten sein:

zu M1: *Vor welchen Herausforderungen steht die CCS-Technologie?*

Laut des Artikels steht die CCS-Technologie vor Herausforderungen wie z. B. der Entwicklungs- und Forschungsbedarf bezüglich Effektivität und Umweltverträglichkeit der Technologie und die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Pilotprojekte.)

zu M2: *Welche geologischen Speicheroptionen werden in der Abbildung gezeigt?*

Die Abbildung zeigt die Speicherung in produzierenden Öl- und Gasfeldern, salinen Formationen, ausgeförderten Gasfeldern und Kohleflözen.)

zu M3: *Welche Regionen in Deutschland weisen ein hohes Speicherpotential auf?*

Mit Bezug auf die Abbildung weisen besonders Regionen im Norden Deutschlands eine hohe Speicherkapazität in tiefliegenden und Salzwasser führenden Speichergesteinen auf. Weiterhin sind im Raum Nordrhein-Westfalen Kohleflöze als Speicher vorhanden. Die größten Erdgasfelder finden sich NRW und Brandenburg.

3. Individuelle SuS-Lösung z.B. mit Fragestellungen aus 2.

4. Schülerexperimente – Modellversuch A-C

5. Mögliche Gründe/Motive protestierender Bürgerinnen und Bürger:

- Gesundheitsgefährdung durch Leckagen
- Wut auf Energieversorger, deren Abfälle nun an diesen Standorten gelagert werden
- Unsicherheit über die Dauer der geologischen Speicherung
- Angst vor einer möglichen Enteignung von eigenem Grund und Boden
- Angst vor einer möglichen Abwertung und Umweltschädigung der Region
- Ängste um eine mögliche Verunreinigung des Trinkwassers
- Unwirtschaftlichkeit und hohe Kosten der Technologie
- Besetzung von Speicherplätzen durch CCS, die für andere Anwendungen genutzt werden soll z.B. Druckluftspeicher

Sprinter-Aufgabe: Die SuS diskutieren, ob es sich bei CCS um eine Brückentechnologie oder eine Zukunftstechnologie handelt.

Argumente, die für CCS als Brückentechnologie sprechen wären z.B.

- CCS kann einen Beitrag zur Reduktion der Emissionen leisten, um Reduktionsziele bis 2050 zu erreichen
- die Abscheidung der Emissionen kann z.B. an bereits bestehenden Stein- und Braunkohlekraftwerken vorgenommen werden
- CCS kann bei der geologischen Nutzung in Öl- und Gaslagerstätten gleichzeitig zur Förderung von Erdöl und Erdgas genutzt werden (EOR-Technologie)

Argumente, die gegen CCS als Zukunftstechnologie sprechen wären z.B.

- die Abscheidung von CO₂ ist eine sehr energieintensive, teure und technologisch noch nicht vollständig erschlossene Technologie
- die Machbarkeit und Funktionalität z.B. hinsichtlich Umweltverträglichkeit werden noch in Pilotprojekten erforscht
- die Kompression des Gases und der Transport zur Lagerstätte benötigen eine Infrastruktur, die zusätzliche Emissionen verursachen kann
- die Dauer der Speicherung hängt sehr stark von der Lagerstätte ab (Schätzungen zufolge kommen z.B. mit dem geförderten Erdöl ca. 30% des EOR-CO₂s wieder an die Oberfläche)

M4: Schülerexperiment Versuchsteil A - Modellversuch zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen

Zusatzinformationen für Lehrkräfte: Damit die Versuche eine hohe Gelingwahrscheinlichkeit haben, sollten die Lernenden vor Beginn der Versuchsdurchführung in die Handhabung von Kolbenprobern und Parafilm eingeführt werden. Nur wenn die Apparatur mit Parafilm abgedichtet und alle Hähne geschlossen sind, können adäquate Messwerte erreicht werden. Wenn der Versuch als Schülerexperiment durchgeführt wird, sollte außerdem vor jedem Durchgang die Dichtigkeit und Funktionalität der Apparatur von der Lehrperson überprüft werden. Die Versuchsteile A und B können auch als Demonstrationsexperiment durchgeführt werden. Beispielhaft wird dies in deutsch- und englischsprachigen Versuchsvideo umgesetzt, die online zur Verfügung stehen <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/digitale-medien/lehr-/lernvideos-zu-versuchen-aus-unserer-fachdidaktischen-forschung/bne-bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/default-title/>.

Diese exemplarischen Messwerte könnten beobachtet werden:

Kolben- prober	Volumen zu Beginn des Versuchs in [mL] (Schritt 2)	Volumen nach Überleitung in [mL] (Schritt 3)	Volumen nach Druckausübung in [mL] (Schritt 4)
links	100	0	0
rechts	0	83	78

Aufgabe 1. Erläutern Sie die Volumenveränderungen nach dem Überleiten über die Aktivkohle (Schritt 4). Nutzen Sie die Informationen des Steckbriefs Aktivkohle und beziehen Sie die Adsorptionseigenschaften der Aktivkohlenoberfläche in Ihre Schilderungen mit ein.

Die Volumenveränderungen nach dem Überleiten über die Aktivkohle (Schritt 2 zu Schritt 3) können mit Hilfe der Adsorptionseigenschaften der Aktivkohlenoberfläche erläutert werden.

Das Kohlenstoffdioxid haftet an der Oberfläche der Aktivkohle und reichert sich daran an (Adsorption). Schon nach der einfachen Überleitung in Schritt 3 kann so eine Abnahme der Gasvolumina um 36,5% beobachtet werden.

Aufgabe 2. Die Ausübung von Druck in Schritt 5 simuliert die Hochdruckverpressung von CO₂ unter der Erde. Erläutern Sie, welchen Einfluss die Druckerhöhung auf das Volumen des CO₂ hat.

Die Druckerhöhung in Schritt 4 beeinflusst das Volumen von CO₂ noch einmal deutlich. Die Adsorptionsrate kann auf 43% gesteigert werden. Die Druckausübung simuliert die

Hochdruckverpressung von Kohlenstoffdioxid in unterirdischen Kohleflözen. Durch den erhöhten Druck kann mehr Kohlenstoffdioxid tiefer in die porösen Strukturen der Aktivkohle (Porenraum, Risse und Klüfte) eindringen und dort adsorbiert werden als in Schritt 3.

Aufgabe 3. Beurteilen Sie das Potential der geologischen Speicherung von CO₂ in Kohleflözen anhand Ihrer Versuchsergebnisse und dem Steckbrief Kohleflöze.

Der Vorteil der geologischen Speicherung von CO₂ in Kohleflözen ist, dass das Kohlenstoffdioxid an die Kohlevorkommen adsorbiert und so festgebunden werden kann. Dieser Prozess konnte durch den Modellversuch visualisiert werden. In Deutschland kommen diese Flöze nur an sehr wenigen Standorten, mit geringer Permeabilität und in hohen Tiefen von 1500 m vor, weshalb eine Nutzung der Kohleflöze zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid nicht forciert wird. Neben sorptiven Speichern wie den Kohleflözen, gibt es auch Bestrebungen, gasförmiges Kohlenstoffdioxid in Porenspeichern wie salinen Aquiferen oder ehemaligen Erdöl- und Erdgaslagerstätten zu speichern. Letztere werden auf Grund ihrer Erschließung und vorhandenen Infrastruktur für Speichervorhaben bevorzugt.

M5: Schülerexperiment Versuchsteil B – Desorption von Kohlenstoffdioxid

Beobachtungen:

Diese exemplarischen Messwerte könnten beobachtet werden:

Kolben- prober	Volumen nach der Druckausübung in [mL] (siehe Modellversuch)	Volumen nach dem Erhitzen in [mL]	Volumen nach dem Abkühlungsprozess in [mL]
links	0	22	22
rechts	78	78	78

Auswertung:

- Erläutern** Sie den Prozess der Desorption mit Hilfe Ihrer Beobachtungen. Nutzen Sie auch den Steckbrief zur Aktivkohle aus dem ersten Versuchsteil.

Durch Erwärmung erfolgt eine Desorption der Gasmoleküle von der Oberfläche der Aktivkohle. Dies ist auch ein Phänomen, welches bei Forschungsvorhaben zur Speicherung in Kohleflözen untersucht wird. Die Adsorptionskapazität wird durch die Erwärmung vermindert. Ab Temperaturen von 300°C ist das adsorbierte Gas fast vollständig desorbiert. Dies lässt sich auch an den entstehenden Volumina der Kolbenprober beobachten. Nach dem Abkühlen liegen in der Apparatur insgesamt wieder 100 mL Kohlenstoffdioxid vor, die zu Beginn von Versuchsteil A hineingegeben wurden.

- Beschreiben** Sie die Auswirkungen einer potenziellen Desorption für die geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen.

Der Vorteil der geologischen Speicherung von CO₂ in Kohleflözen ist, dass das Kohlenstoffdioxid an die Kohlevorkommen adsorbiert und so fest gebunden werden kann. Dieser Prozess kann durch den Modellversuch A vereinfacht visualisiert werden. Als Modellschubstanz für Kohleflöze wird Aktivkohle verwendet. Die Verpressung von Kohlenstoffdioxid unter Druck wird mit Hilfe der Kolbenprober verdeutlicht. Dass der Prozess der Adsorption durch Erwärmung vermindert bzw. rückgängig gemacht werden kann, wird in Versuchsteil B gezeigt.

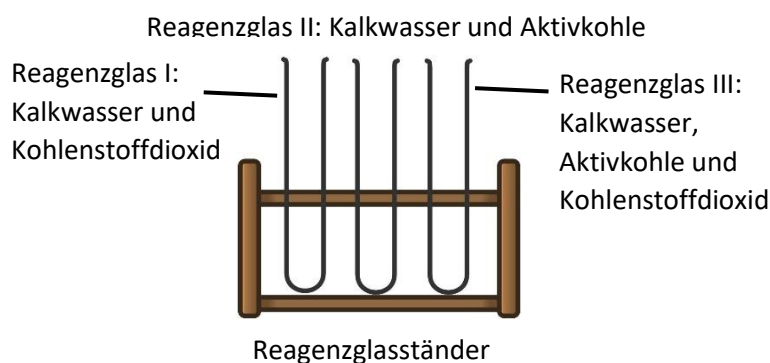
Die Vorgänge der Speicherung werden im Modellversuch stark didaktisch reduziert. In der industriellen Anwendung gibt es andere Reaktionsbedingungen und einige Hürden für die Umsetzung der geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflöze. Damit diese Speicherform erfolgreich angewendet werden kann, müssen die Kohleflöze über eine gewisse Durchlässigkeit (Permeabilität) verfügen. Kommt es zu geringen Durchlässigkeiten, wird der Transport von Kohlenstoffdioxid und die anschließende Adsorption beeinträchtigt bzw. verhindert.

Für den Einsatz als Demoversuch steht der Versuch auch als englisch- und deutschsprachiges Video zur Verfügung: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/digitale-medien/lehr-/lernvideos-zu-versuchen-aus-unserer-fachdidaktischen-forschung/bne-bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/default-title/> (letzter Zugriff 19.01.26).

M6: Schülerexperiment Versuchsteil C – Nachweis von Kohlenstoffdioxid

Zusatzinformationen für Lehrkräfte: In diesem Versuch wurde Aktivkohlegranulat (~ 3 mm, dampfaktiviert, Firma Roth, Produktnummer 0988) verwendet. Andere Aktivkohlechargen können zu weniger eindeutigen Beobachtungen führen. Bei einigen gekörnten Aktivkohle-Sorten tritt bei der Zugabe von Kalkwasser eine Gasentwicklung auf. Dies ist auf Lufteinschlüsse in der Aktivkohle zurückzuführen und hat keinen Einfluss auf die Nachweisreaktion. Der Versuch ist auch unter Verwendung einer Gasflasche durchführbar, wenn keine Infusionsbeutel vorhanden sein sollten.

Skizze: Beschriften Sie die Skizze mit Hilfe der Schilderungen aus der Durchführung.



Beobachtung:

Reagenzglas	I) Kalkwasser und Kohlenstoffdioxid	II) Kalkwasser und Aktivkohle	III) Kalkwasser und Aktivkohle (nach Vorbehandlung mit Kohlenstoffdioxid)
Beobachtung	milchig, weiße Trübung	keine Veränderung	milchig, weiße Trübung

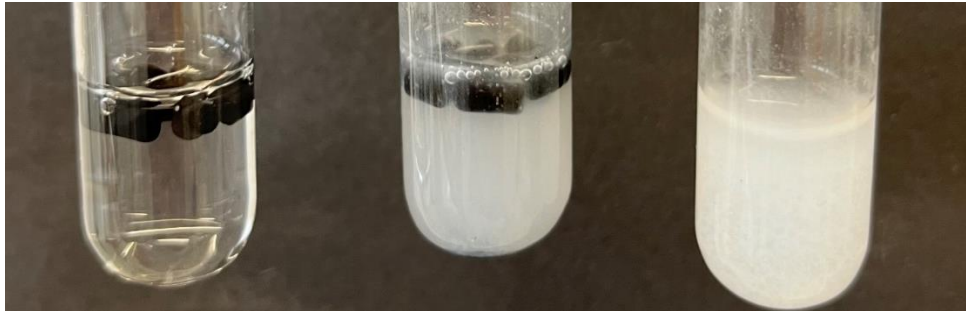


Abbildung (von links nach rechts). Versuchsbeobachtungen in Reagenzglas I-III

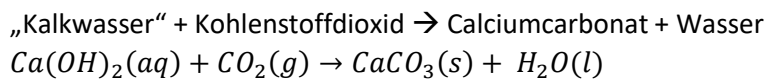
Auswertung:

1. Vergleichen Sie die Beobachtungen in den Reagenzgläsern I-III und **erläutern** Sie den Nachweis mit Kalkwasserlösung.

Reagenzglas III fungiert als positive Vergleichsprobe. Ein Teil des Kohlenstoffdioxids aus Reagenzglas II kann an der großen Oberfläche der Aktivkohle adsorbieren und teilweise wieder desorbieren, der Nachweis ist folglich ebenfalls positiv. Da in Reagenzglas I kein Kohlenstoffdioxid vorliegt, ist der Nachweis hier negativ und die Lösung bleibt farblos und klar.

Kalkwasser besteht aus in Wasser gelöstem Calciumhydroxid. Die Kalkwasserprobe ist eine Nachweisreaktion für Kohlenstoffdioxid. Sie fällt positiv aus, wenn eine Trübung sichtbar ist. Beim Einleiten von Kohlenstoffdioxid in Kalkwasser entstehen für die Trübung verantwortliches festes Calciumcarbonat und Wasser.

2. Stellen Sie eine passende Reaktionsgleichung auf.



3. Fassen Sie die Haupteckenkenntnisse aller drei Versuchsteile A-C in der Tabelle zusammen.

Versuche	Versuchsteil A	Versuchsteil B	Versuchsteil C
	Modellversuch zur Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen	Desorption von Kohlenstoffdioxid	Nachweis von Kohlenstoffdioxid
Haupteckenkenntnis	Der Vorteil der geologischen Speicherung von CO ₂ in Kohleflözen ist, dass das Kohlenstoffdioxid an die Kohlevorkommen adsorbiert und so fest gebunden werden kann. Dieser Prozess kann durch den Modellversuch A vereinfacht visualisiert werden. Als Modellschubstanz für Kohleflöze wird Aktivkohle verwendet. Die Verpressung von Kohlenstoffdioxid unter Druck wird mit Hilfe der Kolbenprober verdeutlicht.	Dass der Prozess der Adsorption durch Erwärmung vermindert bzw. rückgängig gemacht werden kann, wird in Versuchsteil B gezeigt.	Mit diesem einfachen Hand-Experiment kann man zeigen, dass Kohlenstoffdioxid von Aktivkohle adsorbiert (und desorbiert) werden kann. Aktivkohle fungiert hierbei als Modellschubstanz für Kohleflöze.

4. Diskutieren Sie die Grenzen der Modellversuche zur Visualisierung der Adsorptionsprozesse in Kohleflözen.

Erwähnte Aspekte könnten sein, z.B.

- Modellschubstanz Aktivkohle statt Stoffgemisch Braun- oder Steinkohle im Kohleflöz
- Bei geologischer Speicherung herrschen andere Druck- und Temperaturbedingungen in mind. 800 m Tiefe
- Speicherung findet nicht in „geschlossenen bzw. dichten System“ statt; Leckagen durch Risse möglich
- Kohlenstoffdioxid wird z.T. flüssigen Zustand verpresst und liegt in Lagerstätte im überkritischen Zustand vor