

Carbon Capture and Storage (CCS)

Kohlenstoffdioxid ist ein Treibhausgas, das sich in den letzten Jahrzehnten durch anthropogene Einflüsse wie z.B. durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern und die damit verbundenen Emissionen zunehmend in der Atmosphäre angereichert hat. Ein Ansatz, um diese Emissionen z.B. von Kohlekraftwerken zu reduzieren, ist *Carbon Capture and Storage*. Ziel dieser Technologie ist es, Kohlenstoffdioxid in unterirdischen Lagerstätten z.B. im Meeresuntergrund, in ehemaligen Erdöllagerstätten oder Kohleflözen zu speichern.

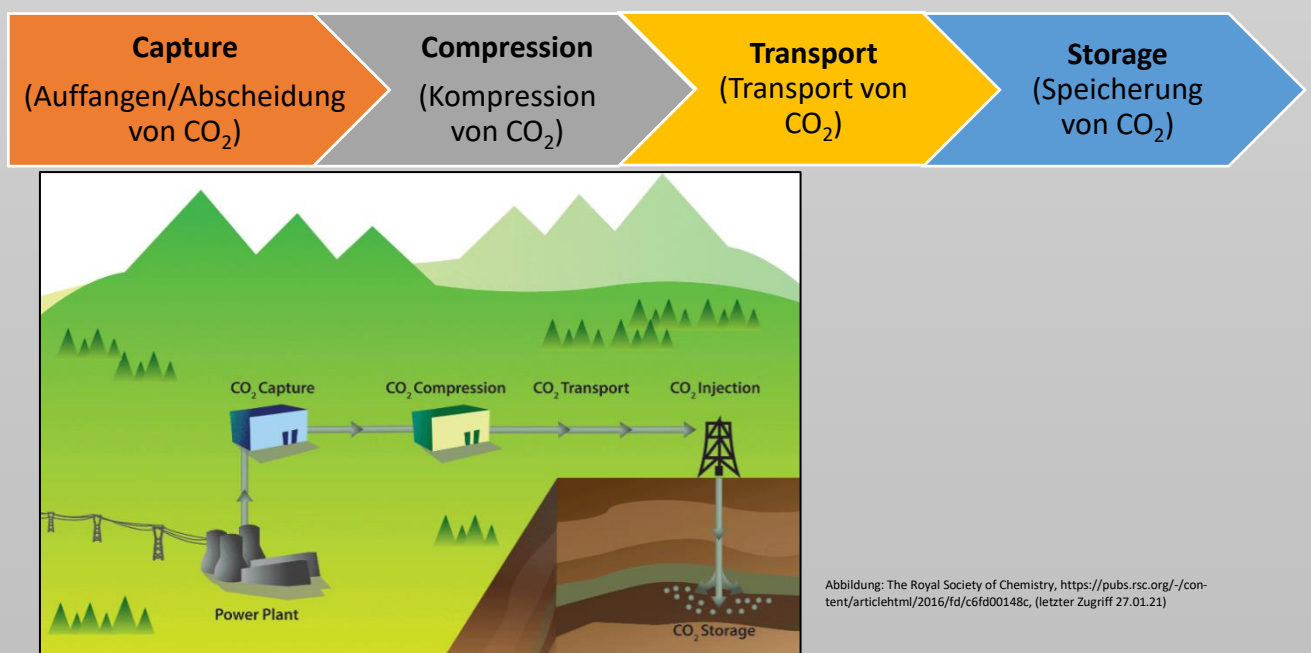
Aufgaben:

- 1) Einzelarbeit:** Lesen Sie sich Material M1-M4 sorgfältig durch. Unterstreichen Sie wichtige Inhalte.
- 2)** Formulieren Sie zu M1-M4 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 M5-M7 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. Nennen 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: Die vereinfachte Prozesskette von Carbon Capture and Storage



M2: Informationstext zu CCS

CCS steht für *Carbon Capture and Storage*, das heißt die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) an Kraftwerken oder Industrieanlagen und die nachfolgende Speicherung in tief liegenden geologischen Gesteinsschichten.

5 Grundsätzlich gibt es bei den Kraftwerken verschiedene Wege, die Abgabe von CO₂ in die Atmosphäre zu verringern: Man kann Festbrennstoffe - etwa Stein- oder Braunkohle - vergasen und dabei das CO₂ im Zuge des Vergasungsprozesses abtrennen. Die Kohle wird dabei nicht wie im herkömmlichen Dampferzeuger verfeuert, sondern zunächst in einem Vergaser in ein Brenngas umgewandelt. Das unter Druck stehende Gas wird anschließend gereinigt und von CO₂ befreit. Übrig bleibt fast ausschließlich Wasserstoff. Erst dieser wird dann in einer Gasturbine verbrannt. Der entsprechende Prozess wird als Pre-Combustion bezeichnet.

Ebenfalls zur CO₂-Abscheidung geeignet ist der so genannte Oxyfuel-Prozess: Dabei werden fossile Brennstoffe mit reinem Sauerstoff verbrannt und das entstehende CO₂ danach abgetrennt.

15 Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Kohlenstoffdioxid am Ende des konventionellen Verbrennungsprozesses abzuscheiden. Dieses als Post-Combustion bezeichnete Verfahren basiert auf nachgeschalteten Rauchgaswäschen¹, bei denen zum Beispiel Amine oder Aminosäuresalze als Wasch- beziehungsweise Lösemittel zum Einsatz kommen. Mit den drei Abscheideverfahren lassen sich CO₂-Minderungen in den Abgasen der Kraftwerke von 80 % - 98 % Prozent erreichen.

20 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, Kohleflöze² und Salzwasser führende Gesteinsschichten (siehe M3). 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.

25 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.

30 Nach überwiegender Meinung von Klimawissenschaftler*innen 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 Agency³ kommt in ihren jüngsten Energie- und Klimaschutzszenarien zum Schluss, dass die Anwendung der CCS-Technologien etwa 14% Prozent der global bis 2050 notwendigen CO₂-Emissionsreduzierungen erbringen kann.

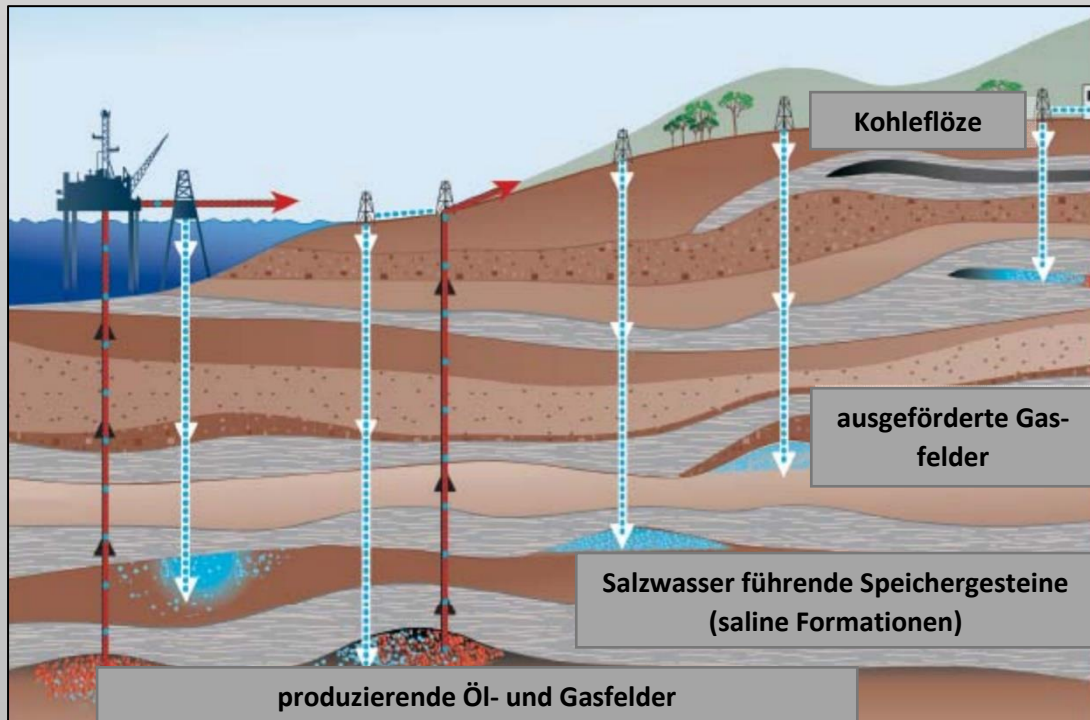
40 Quelle (gekürzt und angepasst nach): Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Artikel „Die weitere Entwicklung von CCS Technologien“ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html> (letzter Zugriff 28.01.26).

¹ **Rauchgaswäschen:** Rauchgasreinigung zur Entfernung von Schadstoffen. Unter Rauchgas versteht man gasförmige Verbrennungsprodukte, die bei der technischen Verbrennung von Brennstoffen wie z.B. Kohle entstehen.

² **Kohleflöz:** eine Kohleschicht zwischen anderen Sedimenten bzw. Gesteinsschichten.

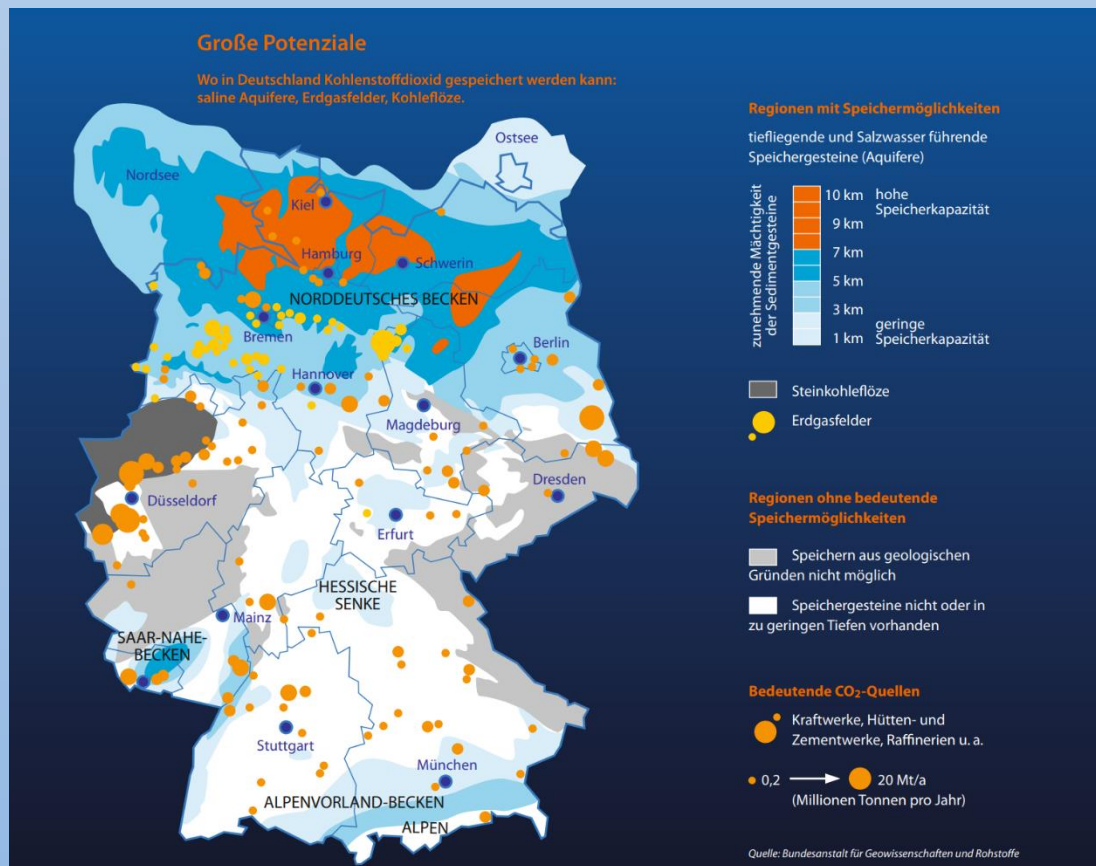
³ **International Energy Agency (IEA):** die Internationale Energie Agentur ist eine Behörde mit 31 Mitgliedsstaaten, die sich u.a. mit der Analyse des globalen Energiesektors beschäftigt.

M3: Geologische Speicheroptionen (Storage)



Quelle Abbildung: adaptiert nach 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)

M4: Geologische Speicheroptionen in Deutschland



Quelle: 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)

M5: 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

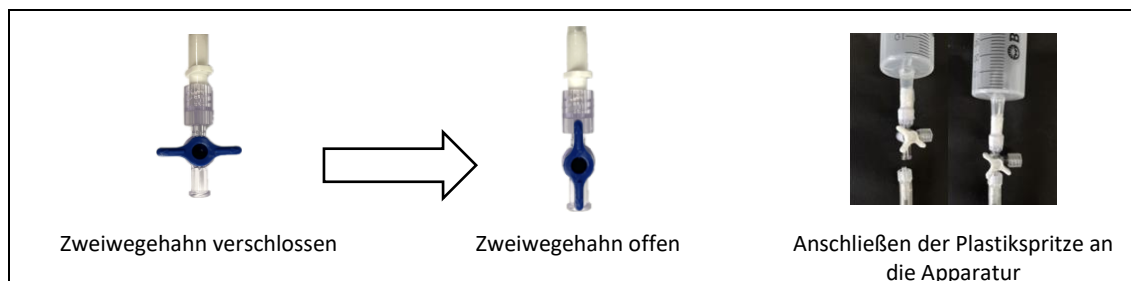
Chemikalien: Aktivkohle C (gepulvert), Kohlenstoffdioxid CO₂ (im Infusionsbeutel)

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.

Kolbenprober	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

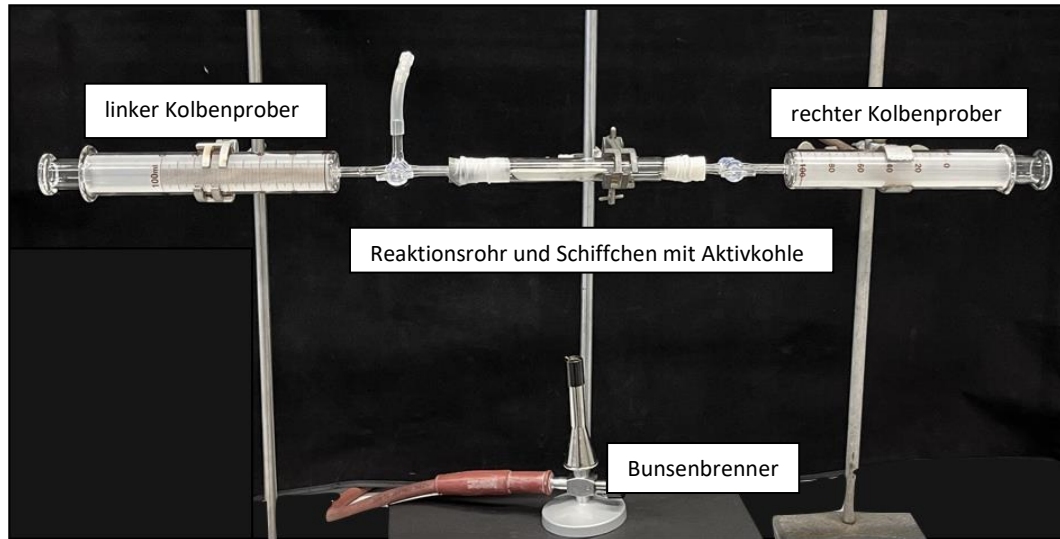
M6: Schülerexperiment Versuchsteil B – Desorption von Kohlenstoffdioxid



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.
5. Lesen Sie die Messwerte an den Kolbenprobern ab.

Beobachtung:

Notieren Sie Ihre Beobachtungen in der Tabelle.

Kolbenprober	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.

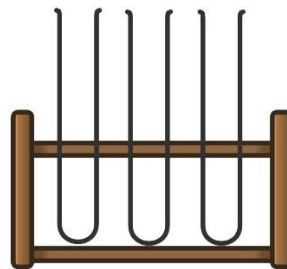
M5: Schülerexperiment Versuchsteil C – Nachweis von Kohlenstoffdioxid



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 Hauptkenntnisse 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
Hauptkenntnis			

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

Quellen:

M1

The Royal Society of Chemistry.

<https://pubs.rsc.org/-/content/articlehtml/2016/fd/c6fd00148c>, (letzter Zugriff 27.01.21)

M2

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).

M4

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)

M5

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