

Direct Air Capture (DAC) – Eine Zukunftstechnologie?

Momentan werden viele Forschungsansätze verfolgt, anhand derer durch gezielte Eingriffe in das Klima, auch „Carbon Dioxide Removal (CDR)“-Maßnahmen genannt, Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre entfernt werden soll. Ein Beispiel ist *Direct Air Capture*, wobei chemisch Kohlenstoffdioxid aus der Luft gefiltert werden soll. Was steckt hinter dieser Idee und kann sie einen Beitrag zum Klimaschutz leisten?

Aufgabe 1: Die Firma Climeworks und ihr Produkt



- a) Schauen Sie sich den Imagefilm der Firma Climeworks an. Nutzen Sie dafür den QR Code links.

b) Beantworten Sie folgende Fragen zum Video:

- 1) Welche Technologie will das Unternehmen einsetzen, um den Klimawandel zu stoppen?
- 2) Welches Ziel hat sich das Unternehmen bis 2025 gesetzt?

c) Diskutieren Sie, ob Sie auf Grundlage dieses Imagefilms in das Projekt investieren würden.

d) Nennen Sie fachliche Fragen, die offen bleiben.

Aufgabe 2: Die Zukunftsfähigkeit der Direct Air Capture Technologie

a) Lesen Sie den Informationstext (M1) zur *Direct Air Capture* Technologie und nehmen Sie während der Lektüre Markierungen am Textrand vor:

- (...) das war mir bereits bekannt
- ! wichtige Textaussage
- ?? vorerst unklare Textstelle
- ? dazu möchte ich eine Frage stellen.

b) Besprechen Sie den Text in Partner- bzw. Gruppenarbeit. Achten Sie besonders darauf, die Textinhalte mit (?) und (??)-Symbolen anzusprechen und ggf. zu klären.

c) Diskutieren Sie die Zukunftsfähigkeit und den Beitrag, den die DAC-Technologie zum Klimaschutz leisten kann. Beziehen Sie auch Ihr Wissen zu den *Möglichkeiten der CO₂-Speicherung* mit ein.

d) Nennen Sie Aspekte, die man bei der Kalkulation der Ökobilanz dieses Verfahrens beachten sollte.

e) Diskutieren Sie, inwieweit Zukunftstechnologien wie DAC einen Beitrag für die Lebensbedingungen kommender Generationen leisten können.

M1: Informationstext Direct Air Capture

Direct Air Capture (DAC) steht für die direkte Luftabscheidung und ist eine energieintensive Technologie. Die aktuelle Technik verwendet große Ventilatoren, welche die Umgebungsluft durch einen Filter bewegen und das darin enthaltene Kohlenstoffdioxid mit einem chemischen Sorptionsmittel (z.B. Natriumhydroxid) binden (siehe Abb.1).

Um jährlich eine Megatonne CO₂ mit einem Natriumhydroxid-basierten Verfahren aus der Luft zu filtern, schätzen Wissenschaftler, dass für aktuell diskutierte Designs der Luftfilteranlagen eine Landfläche von ca. 1,5 km² benötigt würde. Entsprechend würde für die jährliche Aufnahme von zehn Gigatonnen CO₂ eine Fläche von ca. 122 x 122 km benötigt.

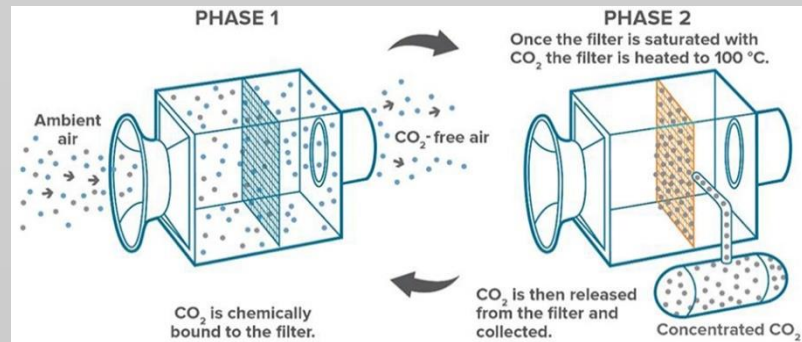


Abb. 1: Visualisierung des *Direct Air Capture* Prozesses.

Allerdings berücksichtigt diese Übersichtsrechnung nicht, dass zusätzliche Fläche und Infrastruktur für die Bereitstellung der elektrischen und thermischen Energie, sowie von Wasser und für den Abtransport des gebundenen Kohlenstoffdioxids benötigt wird.

Kohlenstoffdioxid zählt zu den Spurengasen. Sein Anteil an einem bestimmten Raumvolumen Luft beträgt ca. 0,04 %. Dies stellt eine große Herausforderung für *DAC*-Technologien dar, mit der dieser geringe Anteil aus der Luft herausgefiltert werden soll. Entsprechend wird *Direct Air Capture* hinsichtlich der Effektivität nie vergleichbar mit *Carbon Capture and Storage (CCS)* in Kraftwerken sein.

DAC ist eine kommerzielle Technologie. Das Schweizer Unternehmen „Climeworks“ beansprucht für sich, in Zürich die „erste kommerzielle Anlage zur Abtrennung von CO₂ aus der Luft“ gebaut zu haben (siehe Abb.2). Diese 23 Millionen US-Dollar teure Anlage liefert jährlich 900 Tonnen CO₂ an ein nahegelegenes Treibhaus, um den Gemüseanbau zu unterstützen. Man hat sich mit der isländischen Firma „Reykjavik Energy“ zusammenschlossen, um nach eigenen Angaben, eine Luftaufbereitungsanlage mit einer Kapazität von 4.000 Tonnen CO₂ pro Jahr zu betreiben und CO₂ in Basaltformationen zu injizieren. „Reykjavik Energy“, insbesondere die dazu gehörige Geothermieanlage in Hellisheidi, stand im Mittelpunkt großer Umweltproteste in Island, da in einer der letzten verbleibenden Wildnisregionen Europas schwerste Schäden durch geänderte Flächennutzung verursacht wurden.



Abb. 2: Climeworks Filteranlage in der Schweiz.


Um einen signifikanten Einfluss auf die globalen CO₂-Konzentrationen zu haben, müsste *DAC* im großen Umfang eingeführt werden, was viele Fragen über den Energiebedarf, den Wasserverbrauch und die Auswirkungen der verwendeten chemischen Sorptionsmittel wie z.B. Natriumhydroxid aufwirft. Eine Modellrechnung, die sich mit den Auswirkungen von *DAC* auf die Bemühungen zur Klimastabilisierung befasst, prognostiziert, dass *DAC* den Zeitpunkt der Emissionsreduktionen verschieben und eine längere Ölnutzung ermöglichen würde, was sich positiv auf die energieexportierenden Länder auswirken würde.

Quelle (didaktisch aufbereitet und gekürzt nach): Rickels, W.; Klepper, G (et.al) (2011): Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung. S.53, 54. und Hüttmann, Matthias: Geoengineering-Technologien: 1. Direct Air Capture. Präsidium der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) <https://www.dgs.de/news/en-detail/210619-geoengineering-technologien-1-direct-air-capture-dac/> (letzter Zugriff 01.02.21). Abbildung 1: Visualisierung des Direct Air Capture Prozesses (Abscheidung von CO₂ an einem mit Adsorptionsmittel getränkten Filter) https://www.frontiersin.org/files/Articles/469555/fc1im-01-00010-HTML-r1/image_m/fc1im-01-00010-g002.jpg (letzter Zugriff 28.01.2021) Abbildung 2: Bild der Climeworks Filteranlage in der Schweiz https://io.wp.com/news.today/wp-content/uploads/2018/06/2018-06-07T162011Z_1_LYNXPPEES61GT_RTROPTP_3_CLIMATECHANGE-GEOENGINEERING.jpg (letzter Zugriff 28.01.2021)

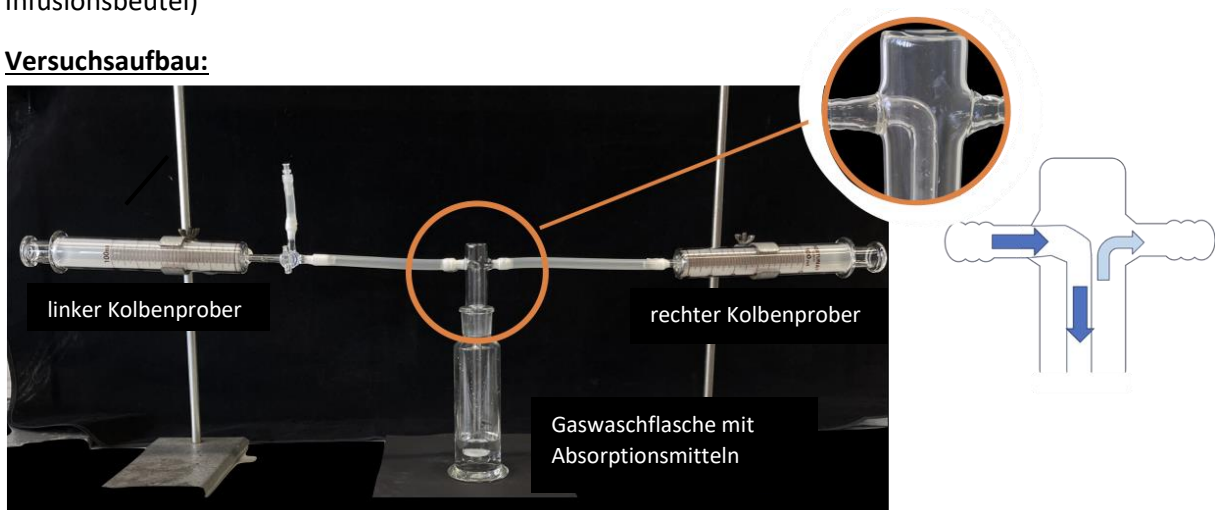
M2: Schülerexperiment – Absorptionsraten von Kohlenstoffdioxid mit alkalischen Lösungsmitteln



Geräte: Stativmaterial, 2 Kolbenprober, Schlauchstücke, Parafilm, Gaswaschflasche, PE-Beutel mit Dreivegehahn, Pipette, 100 mL Messzylinder

Chemikalien: Natriumhydroxid-Lösung 5% , Natriumcarbonat-Lösung 5%, Kohlenstoffdioxid (im Infusionsbeutel)

Versuchsaufbau:



Durchführung:

Messreihe A: verschiedene Absorptionsmittel mit reinem Kohlenstoffdioxidgas

1. Füllen Sie die Gaswaschflasche mit 50 mL der Natriumhydroxid-Lösung.
2. Füllen Sie den linken Kolbenprober mit 100 mL Kohlenstoffdioxid aus dem Infusionsbeutel. Verschließen Sie den Kolbenprober.
3. Vervollständigen Sie die Apparatur, 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. Verbinden Sie nun die Kolbenprober über die Schlauchstücke mit der Gaswaschflasche. Dichten Sie die Übergangsstellen abschließend mit Parafilm ab. Stellen Sie sicher, dass die Apparatur dicht ist.
4. Leiten Sie 20 mL des Gases mit Hilfe des linken Kolbenprobers *langsam* durch das Absorptionsmittel in der Gaswaschflasche. Warten Sie 10 Sekunden und leiten Sie dann erneut 20 mL des Gases durch das Absorptionsmittel. Wiederholen Sie dies, bis der linke Kolbenprober vollständig entleert ist.
5. Lesen Sie das Gasvolumen am rechten Kolbenprober ab und notieren Sie Ihre Messwerte in der Beobachtungstabelle.
6. Entsorgen Sie das Absorptionsmittel im bereitgestellten Abfallgefäß.
7. Reinigen Sie die Gaswaschflasche und entleeren Sie beide Kolbenprober.
8. Wiederholen Sie den Versuch mit 50 mL Natriumcarbonat-Lösung.



Messreihe B: verschiedene Absorptionsmittel mit Umgebungsluft

1. Ziehen Sie den linken Kolbenprober mit 100 mL Umgebungsluft auf. Verschließen Sie den Kolbenprober und verbinden Sie ihn mit dem Versuchsaufbau.
2. Stellen Sie sicher, dass die Apparatur dicht ist. Nutzen Sie Parafilm, um Öffnungen abzudichten.
3. Öffnen Sie den Kolbenprober und leiten Sie das Gas durch das jeweilige Lösungsmittel, indem Sie wie in Messreihe A verfahren. Notieren Sie ihre Beobachtungen.

Beobachtung:

	Lösungsmittel: Natriumhydroxid-Lösung	Lösungsmittel: Natriumcarbonat-Lösung
Messreihen	Volumen im Kolbenprober in [mL]	Volumen im Kolbenprober in [mL]
A reines CO ₂		
B Umgebungsluft		

Auswertung:

- 1.** Vergleichen Sie die Messreihen A und B und erläutern Sie die unterschiedlichen Messwerte. Recherchieren Sie dazu die Anteile von Kohlenstoffdioxid in der Umgebungsluft.

- 2.** Erörtern Sie, welches der im Versuch getesteten Lösungsmittel sich besser für die Absorption von Kohlenstoffdioxid eignet und begründen Sie ausführlich.

- 3.** Im Direct Air Capture (DAC) Verfahren wird Kohlenstoffdioxid direkt aus der Umgebungsluft entnommen. Nutzen Sie Ihre Beobachtungen aus dem Experiment und erläutern Sie potenzielle Hürden für die industrielle Umsetzung des DAC-Verfahrens.



Sprinter: Stellen Sie sich vor, neben einem *DAC*-Standort befindet sich eine Anlage zur Brennung von Kalk. Erläutern Sie welche Reaktionsprodukte bei dem Prozess entstehen und welche sich als Absorptionsmittel in der *DAC*-Anlage eignen würden.

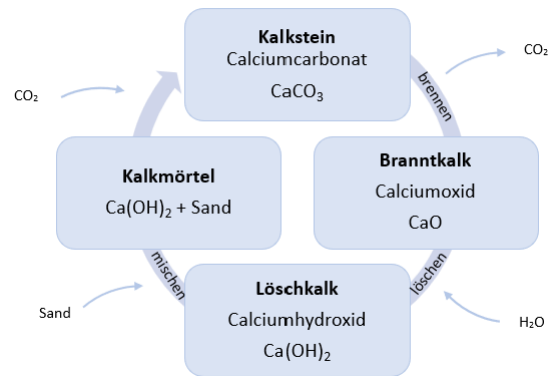


Abb 3. Technischer Kalkkreislauf.

M3: Post-Combustion Capture

Post-Combustion Capture ist der erste Schritt des *Carbon Capture and Storage* Prozesses. Bei diesem Abscheidungsprozess wird ein kohlenstoffbasierter Brennstoff wie z.B. Kohle in der Luft verbrannt. Dabei entsteht Rauchgas, welches 5-15% CO₂ enthält. Um reines Kohlendioxidgas aus dem Rauchgas zu gewinnen, wird das Rauchgasgemisch in einem Absorptionsprozess mit Chemikalien wie Natriumhydroxidlösung (NaOH (aq)) behandelt.

Der Prozess beruht auf dem Phänomen der Absorption und Desorption.

Sie können ihn sich wie einen Zug vorstellen, der das Kohlendioxid als Passagiers aufammelt und am Ende der Fahrt abgibt. Die Absorption erfolgt bei niedrigen Temperaturen von etwa 50 °C und ist ein exothermer Prozess (siehe Abbildung unten). Das Kohlendioxidgas bindet an die Absorptionsmittel, genau wie ein Passagier, der in einen Zug steigt.

Anschließend wird das Gemisch auf 70-100 °C erhitzt und der Desorptionsprozess findet statt. Bei dieser endothermen Reaktion kann Kohlendioxid von der Natriumhydroxidlösung getrennt werden und reines Kohlendioxidgas wird freigesetzt, wie ein Passagier, der aus einem Zug aussteigt. Außerdem wird die Absorptionsflüssigkeit (NaOH (aq)) regeneriert und kann erneut für den Prozess eingesetzt werden.

Wussten Sie schon ... ?

1. Mit der Technologie können bestehende Kohlekraftwerke nachgerüstet werden.
2. Das Verfahren hat einen hohen Energiebedarf und hohe Kosten.
3. Die Abscheideeffizienz beträgt 90-95%.
4. Die Technologie ermöglicht die Reduktion von schwer vermeidbaren Emissionen und die Integration von erneuerbaren Energien.
5. Post-Combustion Capture könnte den verlängerten Einsatz von fossilen Energieträgern ermöglichen.

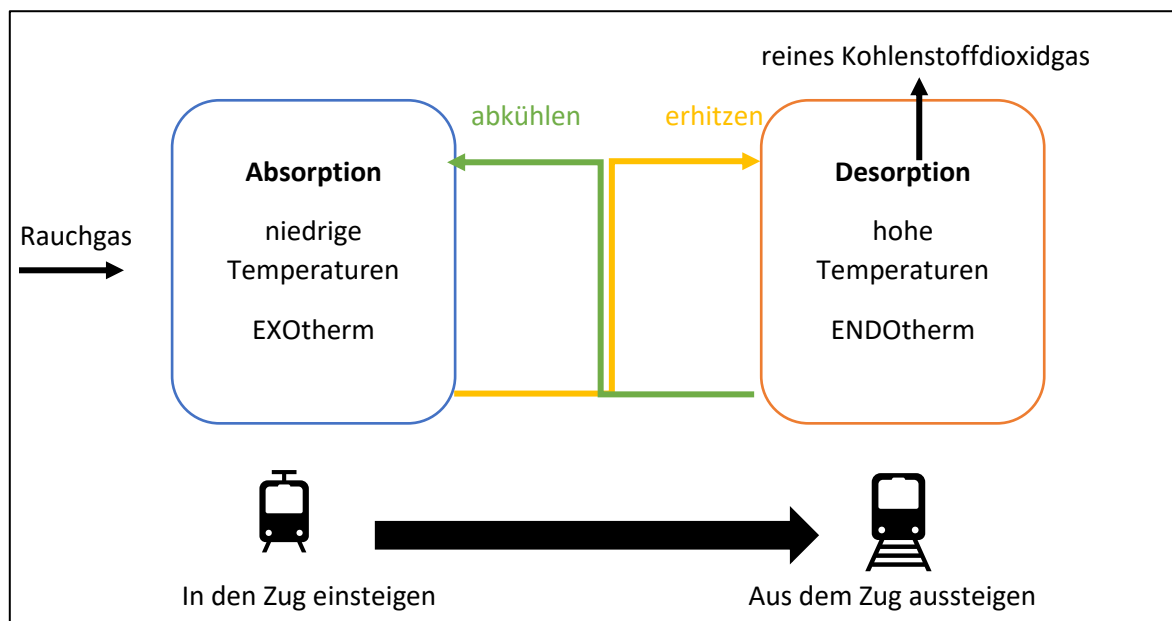


Abbildung. Vereinfachte Darstellung des Post-Combustion Prozesses.

Aufgaben:

1. Einzelarbeit: Erschließen Sie sich die Bedeutung der unterstrichenen Begriffe im Text. Wenn Sie sich unsicher sind, recherchieren Sie in Ihrem Lehrbuch oder im Internet.
2. Partnerarbeit: Erläutern Sie sich gegenseitig den Prozess der Absorption und Desorption im *Post Combustion Capture* Verfahren in eigenen Worten.

M4: Schülerexperiment – Modellversuch zur Absorption von Kohlenstoffdioxid



Geräte:

zwei Plastikflaschen
10 mL Messzylinder

Chemikalien:

Kohlenstoffdioxidgas im Gasbeutel, CO₂(g)
Natriumhydroxid-Lösung, NaOH(aq), c = 2 mol/L



Raum für Notizen:

Versuchsaufbau:

Beschriften Sie den Versuchsaufbau mit den passenden Begriffen:



- 1) Gasbeutel mit CO₂(g)
- 2) leere Plastikflaschen
- 3) Messzylinder
- 4) Natriumhydroxid-Lösung

Versuchsdurchführung:

1. Nutzen Sie den Messzylinder und füllen Sie 10 mL Natriumhydroxid-Lösung in jede Plastikflasche. Verschließen Sie eine der Plastikflaschen.
2. Verwenden Sie den Gasbeutel und füllen Sie die zweite Plastikflasche vorsichtig mit Kohlenstoffdioxidgas. Schließen Sie anschließend zügig den Deckel.
3. Stellen Sie sicher, dass beide Flaschen verschlossen sind. Schütteln Sie beide Flaschen für 30 Sekunden.

→ Entsorgen Sie die Natriumhydroxid-Lösung in einem Entsorgungsgefäß.

Beobachtung:

Füllen Sie die Tabelle aus und halten Sie darin Ihre Beobachtungen fest.

Zu Beginn	Während	Nach dem Experiment
Flasche 1 mit Luft		
Flasche 2 mit Kohlenstoffdioxid	Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen, wenn Sie die Flasche berühren.	

Formulierungshilfen:

- etwas zieht sich zusammen/ dehnt sich aus
- eine Substanz ist farblos/hat die Farbe...
- der Aggregatzustand der eingesetzten Stoffe...
- die Flaschen kühlen ab/ erwärmen sich/bleiben unverändert

Auswertung:

1. Ermitteln Sie, wie sich der Inhalt beider Flaschen unterscheidet.
2. Erläutern Sie den Prozess der Absorption.
3. Beschreiben Sie, wie der Prozess der Absorption in diesem Modellexperiment abläuft.
4. Erklären Sie, wie man sich den Absorptionsprozess industriell zu Nutze macht. Beziehen Sie auch Ihr Wissen aus dem Infotext zu *Post Combustion Capture* mit ein.

.....

.....

.....

.....

.....



Sprinteraufgabe: Im industriellen Post-Combustion Prozess wird das Absorptionsmittel durch Desorption zurückgewonnen. Überlegen Sie, wie man experimentell vorgehen müsste, um den Prozess der Desorption auch in diesem Modellexperiment zu zeigen.

.....

.....



Wenn Sie Hilfe bei der Bearbeitung benötigen, nutzen Sie die gestufte Hilfefkarte.



Gestufte Hilfekarte

↓ hier knicken

hier knicken
 →

Hilfekarte	Lösungsansatz
<p>1 Wie unterscheidet sich der Inhalt der beiden Flaschen?</p>	<p>Die Kohlenstoffdioxidkonzentration und das Absorptionspotential _____ sich in den beiden Flaschen.</p> <p>Die Flasche, die mit Luft gefüllt ist, enthält nur _____ % Kohlenstoffdioxid, während die andere _____ % Kohlenstoffdioxid enthält.</p>
<p>2 Erläutern Sie den Absorptionsprozess.</p>	<p>Als (Gas)absorption bezeichnet man einen Prozess, bei dem eine oder mehrere Komponenten aus seiner Gasmischung _____ werden. Die Komponenten können durch flüssige Substanzen aufgenommen/gebunden werden.</p>
<p>3 Beschreiben Sie, wie der Prozess der Absorption in unserem Modellexperiment abläuft.</p>	<p>NaOH(aq) absorbiert Kohlenstoffdioxid, Luft jedoch nicht. Das Absorbens reagiert bei Kontakt mit CO₂(g) zu _____ .</p> <p style="text-align: center;">Absorption $\text{CO}_2(\text{g}/\text{aq}) + 2\text{NaOH}(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-}(\text{aq}) + 2\text{Na}^+(\text{aq})$ Desorption</p> <p>Auf der Teilchenebene werden die Kohlenstoffdioxid-Moleküle vom flüssigen Absorptionsmittel aufgenommen. Es sind nun weniger Moleküle in der Gasphase der Flasche. Der Druck, den die Moleküle auf die Flaschenwand ausüben, ist nun _____ als der Druck der Moleküle von der Außenseite der Flasche.</p> <p>Im Experiment beobachten wir, dass sich die Flasche mit Kohlenstoffdioxid _____. Der Prozess läuft als eine _____therme Reaktion ab und generiert Wärmeenergie.</p>
<p>4 Erklären Sie, wie man sich den Absorptionsprozess industriell zu Nutze macht. Beziehen Sie auch Ihr Wissen aus dem Infotext mit ein.</p>	<p>Der Prozess der Absorption mit chemischen Lösungsmitteln ist Teil des _____ - Verfahrens. Mit Hilfe der Absorptionsmittel kann reines Kohlenstoffdioxid aus Gasgemischen, die bei industriellen Verbrennungen entstehen, entfernt werden.</p> <p>In unserem Experiment wird _____ als Absorptionsmittel verwendet, welches mit Kohlenstoffdioxid zu Natriumcarbonat reagiert.</p> <p>Nach dem Auffangen des reinen Kohlenstoffdioxidgases, kann dieses in geologischen Erdschichten gespeichert oder von chlorophyllhaltigen Pflanzen wie Algen oder _____ aufgenommen werden.</p>

Quellen:

Aufgabe 1 - Imagefilm Climeworks

Video verfügbar auf YouTube, alternativ weitere Videos vom Climeworks_official - Channel

https://www.youtube.com/watch?v=Q_hw2XhkqLY

Aufgabe 2 - Informationstext Direct Air Capture

didaktisch aufbereitet und gekürzt nach:

Rickels, W.; Klepper, G (et.al) (2011): *Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering*. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung. S.53, 54.

Hüttmann, Matthias: *Geoengineering-Technologien: 1. Direct Air Capture*. Präsidium der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) <https://www.dgs.de/news/en-detail/210619-geoengineering-technologien-1-direct-air-capture-dac/> (letzter Zugriff 01.02.21).

Abbildung 1: Visualisierung des Direct Air Capture Prozesses (Abscheidung von CO₂ an einem mit Adsorptionsmittel getränkten Filter) https://www.frontiersin.org/files/Articles/469555/fclim-01-00010-HTML-r1/image_m/fclim-01-00010-g002.jpg (letzter Zugriff 28.01.2021)

Abbildung 2: Bild der Climeworks Filteranlage in der Schweiz https://i0.wp.com/omgnews.today/wp-content/uploads/2018/06/2018-06-07T162011Z_1_LYNXPPEE561GT_RTROPTP_3_CLIMATECHANGE-GEOENGINEERING.jpg (letzter Zugriff 28.01.2021)

Schülerexperiment – Absorptionsraten von Kohlenstoffdioxid mit alkalischen Lösungsmitteln

Versuchsdurchführung angepasst und erweitert: D. Hack, D. Hauschild. Sequestrierung von CO₂. Eine lernerorientierte Unterrichtseinheit für die Sekundarstufe I. In *Praxis der Naturwissenschaften* 5/60, 2011, S.3.

Post-Combustion Capture

Inhalte der Abbildung abgewandelt nach Asherman, F., Cabot, G., Crua, C., Estel, L., Gagnepain, C., Lecerf, T., ... & Vige, M. (2015). Designing and Demonstrating a Master Student Project To Explore Carbon Dioxide Capture Technology. *Journal of Chemical Education*, 93(4), 633-638. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00073> (S.635).

Schülerexperiment – Modellversuch zur Absorption von Kohlenstoffdioxid

Entnommen aus Asherman, F., Cabot, G., Crua, C., Estel, L., Gagnepain, C., Lecerf, T., ... & Vige, M. (2015). Designing and Demonstrating a Master Student Project To Explore Carbon Dioxide Capture Technology. *Journal of Chemical Education*, 93(4), 633-638. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00073> (S.626).