



Capture

Transport

Storage

Gedankenexperiment – Leck einer CO₂-Pipeline beim Transport

Der Transport des aufgefangenen Kohlenstoffdioxids ist innerhalb der *Carbon Capture and Storage* Prozesskette von besonderer Bedeutung. Er bildet das Bindeglied zwischen den Emittenten und der Lagerstätte. Je nach Verfügbarkeit der Infrastruktur in der Nähe der Capture-Anlage kann der Weitertransport z.B. per Pipeline an Land (Onshore) erfolgen. Eine Pipeline ist eine Rohr- bzw. Fernleitung für Gase oder Flüssigkeiten, die einen Transport über weite Strecken ermöglicht. Kohlenstoffdioxid wird meist im überkritischen Zustand durch die Pipelines transportiert.

1. Fragestellung:

Was passiert, wenn während des Onshore Transports von CO₂ in der Pipeline eine Leckage auftritt?

Formulieren Sie passende Hypothesen für die Fragestellung.

Sollten Sie Schwierigkeiten bei der Formulierung haben, denken Sie z.B. über die Auswirkungen auf die Umwelt und Lebewesen oder sich ändernde Reaktionsbedingungen wie Temperatur, Druck und Aggregatzustände nach.

2. Hypothesen:

a)

b)

c)

3. Überprüfung der Hypothesen:

Führen Sie eine vertiefte Recherche durch, um Ihre Hypothesen zu überprüfen. Nutzen Sie die zur Verfügung gestellten Materialien M1-4.

M1: Stoffsteckbrief Kohlenstoffdioxid



Kohlenstoffdioxid ist ein geruchloses, farbloses, nicht brennbares Gas

- **Verhältnisformel:** CO₂
- **Molmasse:** 44,01 g/mol
- **Dichte unter Standardbedingungen:** 1,977 kg/m³
- **Sublimationstemperatur:** -78,5 °C
- **Tripelpunkt:** Temperatur: -56,6 °C, Druck: 5,19 bar
- **Kritischer Punkt:** Temperatur: 31,0 °C, Druck: 73,83 bar, Dichte: 0,468 g/cm³
- **Andere Aggregatzustände:** fest (Trockeneis), flüssig (Kohlenstoffdioxid tiefkalt,verflüssigt)
- **Vorkommen:** natürlicher Kohlenstoffkreislauf, Raumluft enthält 0,038% Kohlenstoffdioxid
- **Entstehung:** Bei Verbrennungsprozessen (z.B. fossiler Energieträger), Atmungs- und Gärprozesse, Rodung, biologischer Abbau
- **Nachweis:** Kalkwasserprobe
- **Reaktionen:** z.B. gut löslich in Wasser, reagiert zu Kohlensäure
 $\text{H}_2\text{CO}_3 (\text{l}) \rightarrow \text{CO}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l})$
- **Toxizität:** gesundheitlich unbedenklich (ab einem Volumenanteil von 8% in der Luft können Menschen betäubt werden)

M2: Phasendiagramm Kohlenstoffdioxid

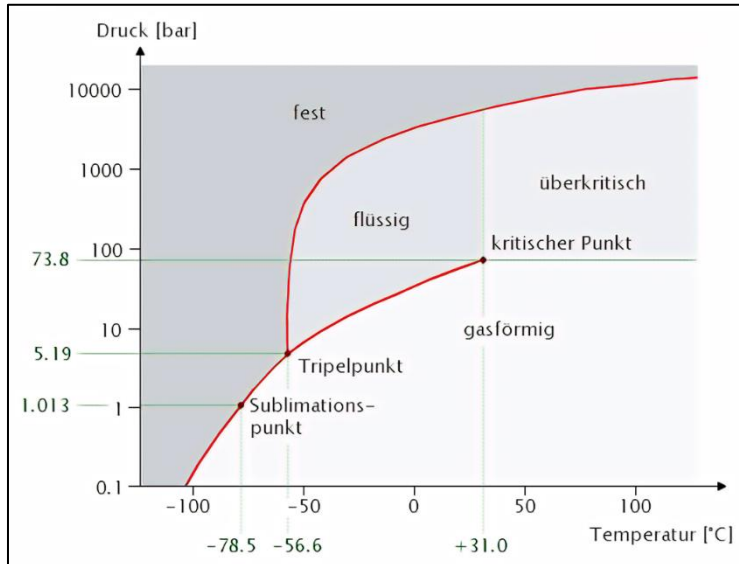


Diagramme beschreiben

- Das Diagramm gibt Auskunft über/thematisiert/gibt Informationen über...
- ...wurde erstellt/herausgegeben von.../entnommen
- Die x-Achse zeigt..., die y-Achse zeigt
- Die farbigen Abschnitte zeigen..., repräsentieren...
- Der Tripelpunkt wird erreicht, wenn...
- Der kritische Punkt wird erreicht, wenn...

Diagramme interpretieren

- Es scheint.../Ich glaube.../Ich denke.../Wahrscheinlich...
- Aus dem Kurvenverlauf des Phasendiagramms kann man ableiten, das...
- Ich habe den Eindruck, dass...

M3: Transportbedingungen einer CCS Pipeline

Der Vorteil des Transports per Pipeline liegt darin, dass man große Mengen Kohlenstoffdioxid über große Distanzen direkt zu den Lagerstätten transportieren kann. Damit das Gas in der Pipeline diese erreicht, muss es jedoch vorher komprimiert werden. Die Verdichtung führt dazu, dass Kohlenstoffdioxid im überkritischen Zustand¹ (→ siehe M2) vorliegt und so ein geringeres Volumen einnimmt. Dies erleichtert den Transport, ist jedoch sehr energieintensiv. Darüber hinaus muss während des Transports ein Druck von mindestens 80-100 bar und eine Temperatur von mindestens 31°C in der Pipeline herrschen, um den überkritischen Zustand aufrecht zu erhalten.

Je nach Emissionsquelle und Abscheidetechnologie kann der zu transportierende Gasstrom zusätzlich Verunreinigungen wie z.B. Stickoxide und Kohlenstoffmonoxid enthalten. Ist dies der Fall, müssen die Temperatur- und Druckbedingungen in der Pipeline daran angepasst werden. Verunreinigungen im Gasstrom wie z.B. Schwefelwasserstoff oder Schwefeloxide können außerdem zu Korrosionserscheinungen an der Pipeline führen.

Bisher gibt es noch nicht genügend Daten, um die Sicherheit eines solchen Transports umfassend einzuschätzen. Im Vergleich zu Erdgas- oder Erdölpipelines ist der Einsatz von CO₂ vorteilhaft, da die Verbindung keine explosiven oder entflammbaren Gemische mit der Luft bildet. Verunreinigungen im Gasstrom könnten jedoch bei einem Leck eine potenzielle Gefahr für die menschliche Gesundheit und die beteiligten Ökosysteme bilden. Ein weiteres Gefahrenpotential birgt der Transport von überkritischem CO₂ (→ siehe M4).

Der Pipeline-Transport an Land gilt als realistischste, konstanteste und ökonomischste Option für die erfolgreiche Realisierung der CCS-Technologie, auch weil dafür alte Erdgas/Erdöl-Pipeline-Infrastruktur umgerüstet und genutzt werden kann. Dennoch ist weitere Forschungsarbeit nötig, um die optimalen Bedingungen für einen sicheren Transport zu bestimmen. Darüber hinaus hängt es von lokalen politischen Entscheidungen und Regularien, sowie der Zustimmung der ansässigen Bevölkerung ab, in welchem Umfang sich solche Projekte zukünftig umsetzen lassen.



Abbildung: Gaspipelines für den Kohlenstoffdioxid-Transport in Australien.

¹ Überkritischer Zustand: Zustand, bei dem sich bei einem Stoff die Aggregatzustände „flüssig“ und „gasförmig“ angleichen und die Unterschiede nicht mehr existieren, vereinfacht gesagt ein Zustand zwischen „flüssig“ und „gasförmig“ (→ vgl. M2 Phasendiagramm Kohlenstoffdioxid).

M4: Video eines Pipeline-Lecks beim Transport von überkritischem CO₂

Aufgabe: Schauen Sie sich das Video an.

Erklärung zum Video: Kommt es zu einem Riss in einer solchen Pipeline auf dem Land, dann breitet sich das überkritische Kohlenstoffdioxid schlagartig in der Umgebung aus und verlässt je nach Größe des Risses mit hoher Geschwindigkeit die Pipeline.

Dabei kommt es aufgrund des vergleichsweise niedrigen Drucks in der Umgebung zur Expansion des CO₂ und es folgt die Änderung des Aggregatzustands zu gasförmig oder fest. Es bildet sich eine weiße Wolke, welche bis zu 250 m aufsteigen kann. Die Wolke besteht aus gasförmigem CO₂ und feinen Stücken Trockeneis. Aus der Expansion folgt die Bildung einer Schockwelle. Das jetzt gasförmige bzw. zum Teil feste CO₂ verbreitet sich mit der Zeit in alle Richtungen, sinkt aber aufgrund der höheren Dichte im Vergleich zur Umgebungsluft zu Boden.

Je nach Gegebenheiten kann es zu Ansammlungen von CO₂-Gas in niedrig liegenden Geländen kommen, in denen Lebewesen nach kurzer Zeit aufgrund des kaum vorhandenen Sauerstoffs ersticken. Nach einiger Zeit wird das CO₂ durch die Vermischung mit der Umgebungsluft auf ungefährliche Konzentrationen verdünnt und verteilt sich mit der Zeit immer weiter im Gelände.

Die Temperatur in unmittelbarer Nähe des Pipelinerisses sinkt aufgrund des Joule-Thomson-Effekts² auf bis zu -80 °C ab. Durch die so entstandene niedrige Temperatur, kann zusätzlich das Material, aus dem die Pipeline gefertigt ist, spröde werden und so den Riss vergrößern.



4. Analyse und Interpretation der Erkenntnisse:

- Fassen Sie die Daten, die Sie gefunden haben, auf einem Lernplakat (siehe unten) zusammen.
- Nutzen Sie ein geeignetes Modell (z.B. das Teilchenmodell), um die Vorgänge innerhalb und außerhalb der Pipeline
 - unter Normalbedingungen und
 - im Falle eines Pipelinelecks darzustellen.

Lernplakat – Leck einer CO₂-Pipeline beim Transport

Transportbedingungen

Darstellung auf Teilchenebene

² Joule-Tompson Effekt: Eine Expansion eines realen Gases führt ohne äußere Arbeitsleistung zu einer Temperaturänderung. Durch ein Leck in der Pipeline wird aus einem geschlossenen System ein offenes System. In der Pipeline nimmt der Druck auf das System schlagartig ab und das Gas nimmt mehr Volumen ein und expandiert. Das System verändert sich zu einer gasförmigen und später festen Phase, was mit einer schlagartigen Temperatursenkung einhergeht (→ Vgl. M2 Phasendiagramm Kohlenstoffdioxid).



5. Rückbezug zu den aufgestellten Hypothesen:

- Beurteilen Sie mit Hilfe Ihrer erworbenen Kenntnisse, welche Ihrer Hypothesen zutreffend sind und welche sich als falsch herausgestellt haben.

- Nehmen Sie Stellung zu der Anfangsfrage „Was passiert, wenn während des Onshore Transports von CO₂ in der Pipeline eine Leckage auftritt?“ und begründen Sie Ihre Entscheidung ausführlich.

- Bewerten Sie die folgende Aussage mit Hilfe Ihrer gewonnenen Kenntnisse: „Der Transport von Kohlenstoffdioxid in Pipelines ist zu gefährlich.“



Sprinter-Aufgabe: Beurteilen Sie mögliche Konsequenzen eines Lecks, wenn sich die Pipeline Offshore im Ozean befinden würde.

Lösungsansatz für die Sprinter-Aufgabe: Kommt es bei Pipelines im Ozean ebenfalls zu einem Leck, bildet sich aufgrund des vorhandenen Wassers Kohlensäure aus. Dadurch verlagert sich der pH-Wert in der direkten Nähe des Lecks temporär in den sauren Bereich, was ebenfalls einen Einfluss auf die Ökosysteme im Wasser hat. Diese Änderung ist allerdings nur von kurzer Dauer und abhängig von den vorhandenen Strömungen, welche für die Verteilung des Wassers sorgen.



Quellen:

M2: Phasendiagramm

Phasendiagramm:

https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Carbon_dioxide_phase_diagrams#/media/File:Carbon_dioxide_pressure-temperature_phase_diagram_deutsch.png. (Letzter Zugriff 13.09.22).

M3: Transportbedingungen Pipeline

Abbildung: CO₂ Pipeline Design - an Australian perspective - Global CCS Institute (20.10.22)

M4: Video

Video: dnvgl.com; dense phase CO₂ pipe rupture

Erklärttext: umformuliert und gekürzt nach A. Otte (Masterthesis) digitaler Lernbegleiter Gedankenexperiment, S.6.

Erwartungshorizont:

Hier sind individuelle Antworten der SuS möglich, z.B.:

Was passiert, wenn während des Onshore Transports von CO₂ in der Pipeline eine Leckage auftritt?

Mögliche Hypothesen

- a) Gas tritt in die unmittelbare Umgebung aus. Da Kohlenstoffdioxid nicht giftig ist, sollte sich das Gas schnell mit der Umgebungsluft vermischen.
- b) Fehlvorstellungen! Gas tritt in die unmittelbare Umgebung aus und entzündet sich/sorgt für Explosion der Pipeline.
- c) Gas tritt in die unmittelbare Umgebung aus und „vergiftet“/erstickt umgebende Lebewesen/Ökosysteme.
- d) Gas tritt aus und erwärmt sich durch die Umgebungsluft. Es breitet sich schnell aus.
- e) Gas tritt aus und kühlt ab, da in der Pipeline ein höherer Druck als außerhalb herrscht. Dies führt auch zu einer Änderung der Aggregatzustände.

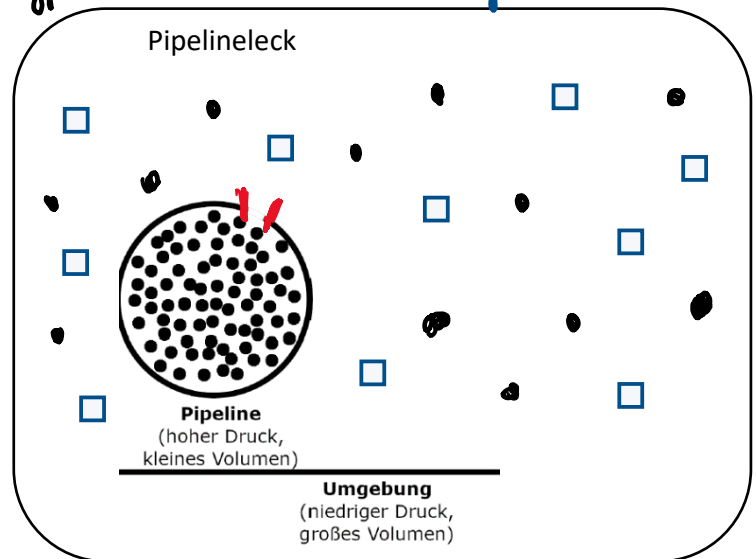
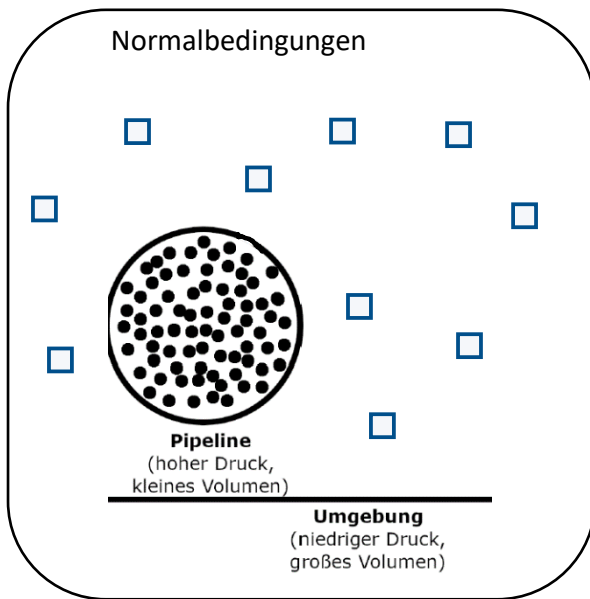
Lernplakat

Transportbedingungen

- Druck von mindestens 80-100 bar, überkritischer Zustand
- Reines Gas ist nicht entflammbar oder explosiv, in geringen Konzentrationen gesundheitlich unbedenklich
- Verunreinigungen im Gasstrom z.B. Stickoxide, Kohlenstoffmonoxid, Schwefelwasserstoff oder Schwefeloxide können Korrosionserscheinungen an der Pipeline bzw. Auswirkungen auf Umwelt/Gesundheit verursachen
- Wie sicher und unter welchen Bedingungen der Transport sicher ist, wird noch erforscht

Darstellung auf Teilchenebene

• Kohlenstoffdioxid Teilchen □ Luftteilchen



Grundzeichnung im TM übernommen und ergänzt nach A. Otte
digitaler Lernbegleiter Gedankenexperiment, S.5.

Was passiert, wenn während des Onshore-Transports von CO₂ in der Pipeline eine Leckage auftritt?

- Bei einem Leck beim Transport von überkritischem Kohlenstoffdioxid, breitet sich dieses schlagartig in der Umgebung aus
- Niedriger Umgebungsdruck führt zu Änderung des Aggregatzustands des Kohlenstoffdioxids zu gasförmig bzw. fest (Trockeneis)
- Expansion mit Schockwelle
- Wolke breitet sich aus, sinkt auf Grund von höherer Dichte zu Boden (→ temporäre Erstickungsgefahren)
- Joule-Thompson Effekt: Absinken der Temperatur auf -80°C, weitere Risse im Pipelinematerial

Bewerten Sie folgende Aussage mit Hilfe Ihrer gewonnenen Kenntnisse: „Der Transport von Kohlenstoffdioxid in Pipelines ist zu gefährlich.“

Hier sind individuelle Antworten der SuS möglich, z.B.:

Bei dem Bau einer Pipeline gibt es keinen Raum für Fehler, egal für welchen Stoff diese konstruiert wird. Aber die Gefahren für den Transport von CO₂ in Pipelines sind im Vergleich von z.B. brennbaren Stoffen wie Methan doch relativ gering. Dennoch hat die Sicherheit eine sehr hohe Priorität und es sollte das Risiko für die Entstehung eines Lecks so gering wie möglich gehalten werden.

EHZ übernommen und geringfügig umformuliert nach A. Otte (Masterthesis) digitaler Lernbegleiter Gedankenexperiment, S.8.