

I. Modellversuch zur Kohlenstoffdioxid-Speicherung mittels CCS

Zeitbedarf: ca. 15 Minuten

Kompetenzen:

S: Beschreiben der Fähigkeit von Aktivkohle, Gase zu speichern

E: Übertragen der Erkenntnisse aus dem Modellexperiment auf die Realität

Anwenden des Wissens über fachgemäße Arbeitsweise bei der Durchführung des Experiments

B: Beurteilen der Grenzen der unterirdischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid

K: adressatengerechtes **Darstellen** der Ergebnisse unter der Verwendung von Fachsprache

Hintergrund: Um den steigenden Kohlenstoffdioxid-Emissionen entgegenzuwirken, kann das Kohlenstoffdioxid beispielsweise in unterirdischen Kohleflözen gespeichert werden. Aktivkohle besteht überwiegend aus Kohlenstoff (meist >90%) mit sehr vielen Poren. Diese sind wie bei einem Schwamm miteinander verbunden. Die innere Oberfläche eines Gramms Aktivkohle entspricht ungefähr der Fläche eines Fußballfeldes. In den Poren können Kohlenstoffdioxid-Moleküle eingelagert werden.

Neugier: Kohlenstoffdioxid einfach unterirdisch speichern und dann ist es weg?

Ziel: Beurteilung des Potentials der geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid mittels CCS

Material:

- Glasrohr (d(innen)=15 mm, l=120 mm)
- 2 Gummi-Stopfen (d(oben)=18 mm)
- Watte
- 2 Kanülen (l=40 mm)
- 2 Spritzen (20 mL)
- Pulvertrichter (d(unten)=15 mm)
- Gasbeutel (500-1500 mL)

Chemikalien:

- **Kohlenstoffdioxid** (g)
CAS-Nr.: 124-38-9
- **Aktivkohle** (gekörnt)
CAS-Nr.: 7440-44-0



H280
P403

Vorbereitung:

1. Verschließe eine Seite des Glasrohres mit einem Stück Watte und fülle es mithilfe eines Trichters mit der gekörnten Aktivkohle.
2. Verschließe nun auch die andere Seite mit Watte und setze die beiden Stopfen auf die Enden des Glasrohres.
3. Stoße vorsichtig in jeden Gummistopfen jeweils eine Kanüle, sodass die Spitze durch die Watte in die Aktivkohle ragt.

**Durchführung:**

1. Befülle einen Gasbeutel mit Kohlenstoffdioxid.
2. Stecke eine leere Spritze (20 mL) auf eine der beiden Kanülen auf.
3. Fülle in die zweite Spritze 20 mL Kohlenstoffdioxid aus dem Gasbeutel.
4. Setze die Spritze mit dem Kohlenstoffdioxid zügig auf die zweite Kanüle.
5. Drücke das Gas langsam durch das Reaktionsrohr. Das Kohlenstoffdioxid wird über die Aktivkohle geleitet und in der anderen Spritze aufgefangen.

HINWEIS: Ziehe den Stempel der leeren Spritze leicht an, falls die Spritze schwergängig ist.

6. Leite das Kohlenstoffdioxid so lange über die Aktivkohle hin und her, bis keine Volumenkontraktion mehr zu erkennen ist, d.h. bis das Gasvolumen in den Spritzen gleichbleibt.

Beobachtung: Nach 1–2-maligem Überleiten ist eine Volumenkontraktion auf 10 mL feststellbar. Bei weiterer Wiederholung bleibt das Volumen konstant.

Deutung: In den Poren von Aktivkohle kann Kohlenstoffdioxid gespeichert werden, jedoch nur eine begrenzte Menge.

Entsorgung: Das Glasrohr mit Kanülen und Stopfen kann nach circa 30 min Luftkontakt wiederverwendet werden.

Diskussion: Zur Diskussion könnte die folgende Aufgabenstellung bearbeitet werden:

Beurteile das Potential der geologischen Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Kohleflözen anhand deiner Versuchs- und Recherche-Ergebnisse bezüglich seiner Nachhaltigkeit.

Vertiefung: Als Vertiefung kann beispielsweise eine der folgenden Aufgaben bearbeitet werden:

Bereich **Geografie:**

Recherchiere im Internet, welche Regionen in Deutschland geeignet sind, um Kohlenstoffdioxid mittels CCS zu speichern. Stelle deine Ergebnisse in einer Deutschland-Karte dar.

Bereich **Mathematik:**

Bestimme, in wie vielen Jahren die Speicherkapazität in Deutschland erschöpft ist, wenn so viele Kohlenstoffdioxid-Emissionen wie möglich durch CCS ausgeglichen werden soll. Triff hierfür geeignete Annahmen.

Empfehlung für weitere Versuche: Um zu untersuchen, wie Wasserstoff CO₂-neutral hergestellt werden kann, könnte der Versuch „Käufliche Brennstoffzelle“ angeschlossen werden.

Quelle: In Anlehnung an [1].

II. Käufliche Brennstoffzellen

Zeitbedarf: ca. 30 Minuten

Kompetenzen:

S: Erklären der Funktionsweise einer Brennstoffzelle

Beschreiben der stattfindenden Energieumwandlungen

E: Dokumentieren der Versuchsergebnisse

B: Vergleichen der verschiedenen Herstellungsarten von Wasserstoff

K: adressatengerechtes **Darstellen** der Ergebnisse unter der Verwendung von Fachsprache

Hintergrund: Eine Brennstoffzelle kann zum einen genutzt werden, um Wasserstoff zu erzeugen. Dafür wird Wasser durch elektrische Energie elektrolysiert. Entscheidend für die Nachhaltigkeit der Herstellung durch dieses Verfahren ist, wie der hierfür genutzte elektrische Strom erzeugt wurde. Wasserstoff kann dann CO₂-neutral produziert werden, wenn regenerative Stromquellen wie z.B. Solarenergie genutzt werden. Problematisch an Solar- und Windenergie ist, dass die Sonne nicht immer scheint und der Wind nur unregelmäßig weht. Brennstoffzellen können diesen Problemen entgegenwirken: Sonnenenergie kann an sonnenreichen Tagen in Form von Wasserstoff gespeichert werden, wenn sie im Überfluss vorhanden ist, um sie bei Bedarf zur Verfügung zu stellen. Angewendet werden Brennstoffzellen nicht nur zur Energiespeicherung. Sie können chemische Energie in elektrische Energie umwandeln und erzeugen so Strom, mit dem beispielsweise ein Elektromotor angetrieben werden kann. Genutzt wird dies unter anderem beim Antrieb von Fahrzeugen.

Neugier: Energie aus Wasser erzeugen.

Ziel: Betreiben einer Brennstoffzelle und mit verschiedenen Energiequellen elektrolysieren.

Material:

- Brennstoffzelle (siehe Foto nach Deutung 1)
- 5 Experimentierkabel (3 rote und 2 blaue oder schwarze)
- Solarmodul
- 2 Multimeter
- Solarmotor (Anlaufspannung ca. 0,4-0,6V, Anlaufstrom ca. 40mA)
- Netzgerät
- Lichtquelle (z.B. AURUM Halogenstrahler AEC-3016H, 220-24)

Chemikalien:

- **Wasser** (destilliert)
-

Vorbereitung:

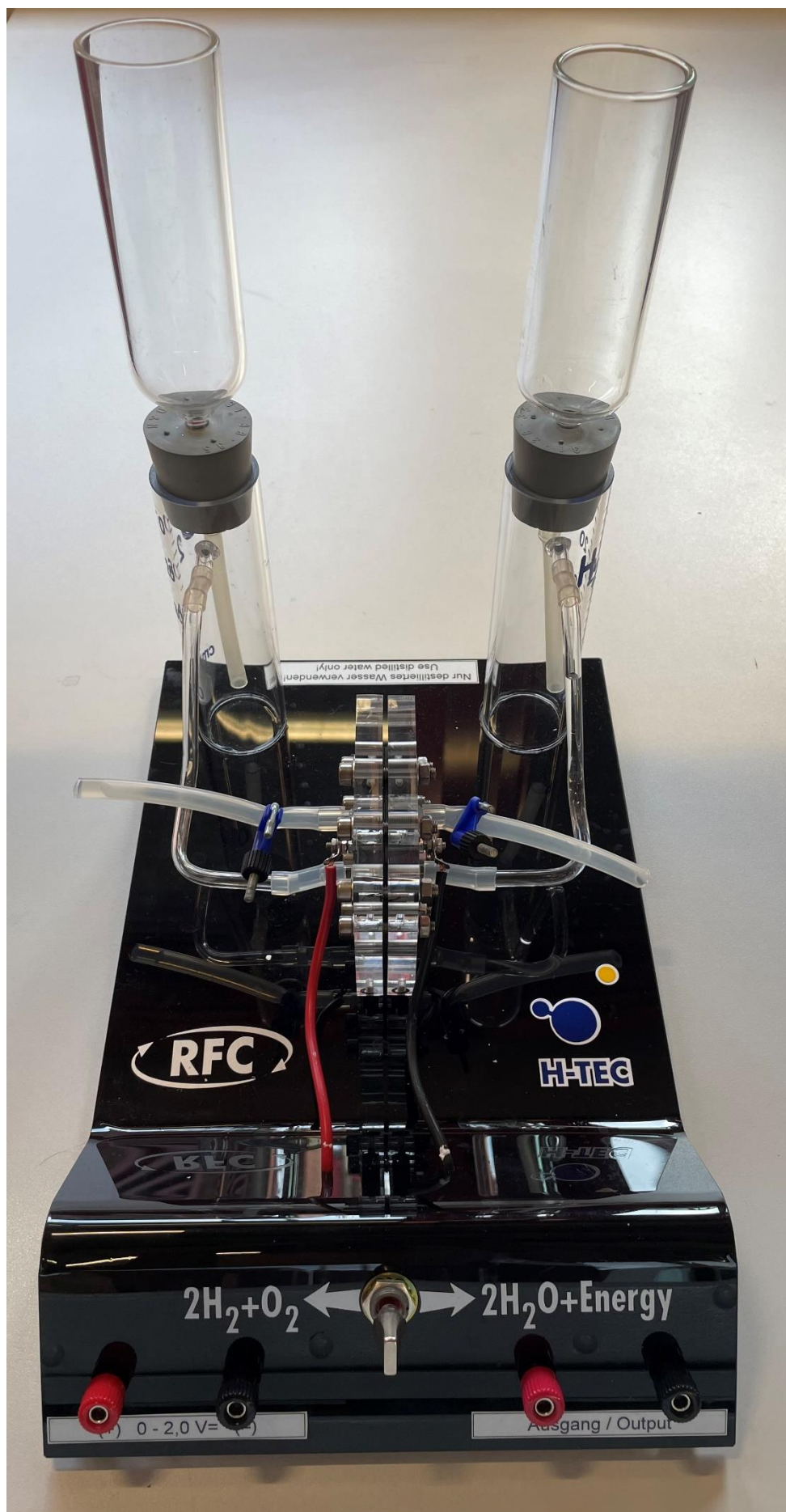
1. Setze die Ausgleichsbehälter auf die Speicherröhren auf.
2. Öffne die Schlauchklemmen an den oberen Anschlüssen der Brennstoffzelle.
3. Befülle die Ausgleichsbehälter der Brennstoffzelle so lange mit destilliertem Wasser, bis aus den oberen Schläuchen Wasser austritt.
4. Verschließe die Klemmen, wenn die Ausgleichsbehälter leer sind.

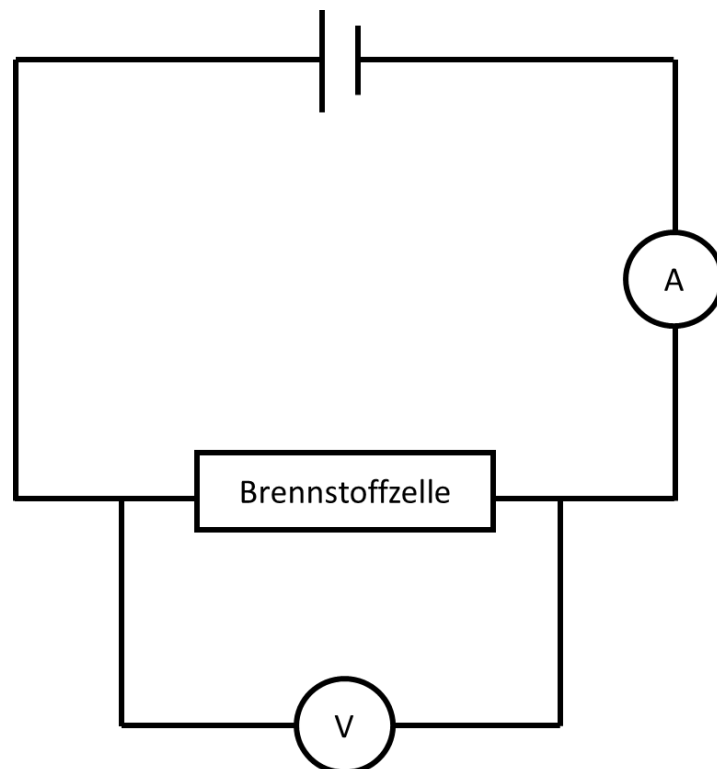
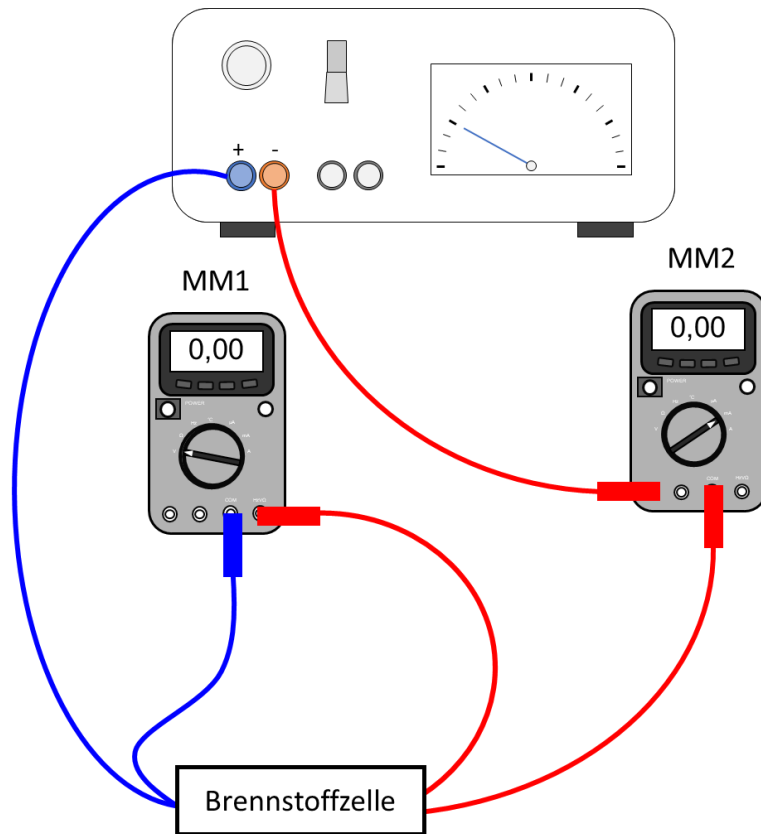
Durchführung 1: (Betrieb mit Spannungsquelle)

1. Verbinde Spannungsquelle, Multimeter und Brennstoffzelle mit dem Experimentierkabeln wie in der Skizze gezeigt. Multimeter 1 (MM1) wird als Voltmeter zum Messen der Spannung und Multimeter 2 (MM2) als Amperemeter zum Messen der Stromstärke genutzt.
2. Lege eine Spannung von ca. 1,8V an und elektrolysiere 60 Sekunden lang.
HINWEIS: Achte darauf, dass der Kippschalter auf „H₂+O₂“ steht. Lege auf keinen Fall mehr als 2V an.
3. Tausche die Spannungsquelle durch den Solarmotor aus.
4. Stelle den Kippschalter auf „H₂O+Energy“ und miss die Zeit, die sich der Solarmotor dreht. Notiere zudem jede Minute Stromstärke und Spannung.

Beobachtung 1: Während der Elektrolyse ist eine Gasentwicklung zu beobachten. Es bildet sich das doppelte Volumen an Wasserstoff im Vergleich zu Sauerstoff. Der Solarmotor dreht sich ein paar Minuten, bis einer der Gasspeicher leer ist (möglicherweise ist der Wasserstoffspeicher vor dem Sauerstoffspeicher leer, da etwas Wasserstoff entweicht).

Deutung 1: Bei der Zufuhr von elektrischem Strom über das Netzgerät wird das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten: $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$. Die Reaktion ist endergonisch, weshalb Energie zugeführt werden muss. Es wird elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt. Die Reaktion ist reversibel. Wird der Kippschalter umgelegt, wird die Reaktion umgekehrt: $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$. Diese Reaktion ist exergonisch. Die freiwerdende Energie kann verwendet werden, um den Solarmotor anzutreiben. Es wird chemische Energie in elektrische Energie und am Solarmotor in mechanische Energie umgewandelt.





Durchführung 2: (Betrieb mit Solarmodul)

1. Tausche im Aufbau das Netzgerät durch das Solarmodul aus.
2. Bestrahle das Solarmodul mit Sonnenlicht oder durch eine geeignete Lampe und elektrolysiere etwa eine Minute.
HINWEIS: Achte darauf, dass der Kippschalter auf „H₂+O₂“ steht.
3. Tausche das Solarmodul durch den Solarmotor aus.
4. Stelle den Kippschalter auf „H₂O+Energy“ und beobachte den Solarmotor.

Beobachtung 2: Das Solarmodul treibt ebenfalls die Elektrolyse an. Es können dieselben Beobachtungen wie bei Durchführung 1 gemacht werden.

Deutung 2: Die Deutung erfolgt ebenfalls analog zu Durchführung 1 mit dem Unterschied, dass bei der Elektrolyse Lichtenergie in elektrische Energie umgewandelt wird. Diese wird dann genutzt, um die endergonische Reaktion anzutreiben und somit letztlich in chemische Energie umgewandelt.

Entsorgung: Das verwendete Wasser kann im Ausguss entsorgt werden.

Diskussion: Diskutiert werden können je nach Schwerpunktsetzung oder Interesse beispielsweise die Energieumwandlungen, die Herstellung von Wasserstoff oder der Antrieb von Fahrzeugen. Mögliche Aufgabenstellungen lauten wie folgt:

Energieumwandlungen:

Stelle die Energieumwandlungen in Durchführung 1 und 2 in einer Concept-Map graphisch dar.

Herstellung von Wasserstoff:

Falls noch nicht geschehen, informiere dich im Internet über die Farben von Wasserstoff.

Ordne dem bei Durchführung 1 und 2 hergestellten Wasserstoff jeweils eine Farbe zu.

Nutzung von Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik:

Beim Antrieb von Wasserstoffautos wird mit einer Brennstoffzelle ein Elektromotor angetrieben. Nenne je mindestens einen Vor- und einen Nachteil von Wasserstoffautos gegenüber:

- 1) Herkömmlichen Benzin-Verbrennern
- 2) Elektroautos

Du kannst zur Bearbeitung dieser Aufgabe Internetquellen nutzen.

Vertiefung: Als Vertiefung kann die folgende Aufgabe bearbeitet werden:

Bereich **Mathematik** / **Physik**:

Nutze deine Messwerte aus Durchführung 1, um den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle näherungsweise zu bestimmen.

Nimm Stellung zur folgenden These: Je schlechter der Wirkungsgrad, desto weniger nachhaltig ist das Verfahren.

Vergleiche eure Ergebnisse mit einer Gruppe, die diese Aufgabe ebenfalls bearbeitet hat.

Empfehlung für weiterführende Versuche: Um das Wissen über Brennstoffzellen zu vertiefen, könnte der Versuch „Modellversuch zur Brennstoffzelle“ abgeschlossen werden.

Um Wasserstoff herzustellen, ist eine Biogasanlage eine Alternative zur Elektrolyse von Wasser, weshalb Versuch „Wasserstoff aus Zuckerrüben“ im Anschluss geeignet wäre.

Bei der Herstellung von „blauem“ Wasserstoff wird dieser durch die Umsetzung von Methan mit Wasser gewonnen, wobei jedoch Kohlenstoffdioxid entsteht, worauf die Lernenden im Zuge der Diskussion gestoßen sein sollten. Dieses wird dann mithilfe des CCS-Verfahrens in Kohleflözen gespeichert und so nicht in die Atmosphäre abgegeben. Der Versuch „Modellversuch zur Kohlenstoffdioxid-Speicherung mittels CCS“ vertieft dieses Verfahren in einem Modellversuch und könnte deshalb nachfolgend bearbeitet werden.

Anschließend könnte auch der Versuch „Speichern von Wasserstoff“, welcher die Probleme bei der Speicherung von Wasserstoff thematisiert, durchgeführt werden.

Eine interessante Alternative zu Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen sind mikrobielle Brennstoffzellen. Der Versuch „Mikrobielle Brennstoffzellen“ eignet sich deshalb ebenfalls in der Folge.

Quelle: Didaktik der Chemie, Universität Bayreuth.

III. Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle

Zeitbedarf: 15 Minuten

Kompetenzen:

S: Beschreiben der Funktionsweise einer Brennstoffzelle

E: Übertragen der Erkenntnisse aus dem Modellexperiment auf die Realität

Anwenden des Wissens über fachgemäße Arbeitsweise bei der Durchführung des Experiments

B: Vergleichen des Modellexperiments mit einer realen PEM-Brennstoffzelle

K: Beschreiben von mindestens zwei Anwendungsbereichen für Brennstoffzellen

Neugier: Eine Brennstoffzelle selber bauen.

Ziel: Bau und Inbetriebnahme einer Brennstoffzelle mit einfachen Mitteln als Modellexperiment

Material:

- 2 Krokodilklemmen (rot und blau oder schwarz)
- 4 Experimentierkabel (2 rote und 2 blaue oder schwarze)
- Becherglas (100 mL)
- Blockbatterie (9V)
- 2 Rasierscherfolien
- Schere oder Cuttermesser
- Verbraucher z.B. Solarmotor von Lemo-Solar (Anlaufstrom ~2mA)
- Pappe (Länge: ca. 100 mm, Breite: ca. 100 mm)
- Stativ
- 2 Klemmen
- 2 Muffen
- Multimeter

Chemikalien:

- **Natronlauge**
c=0,5 mol/L
CAS-Nr.: 1310-73-2



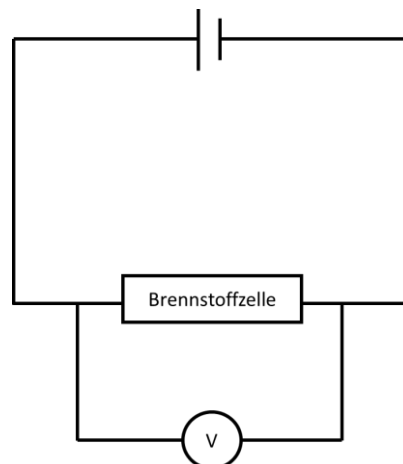
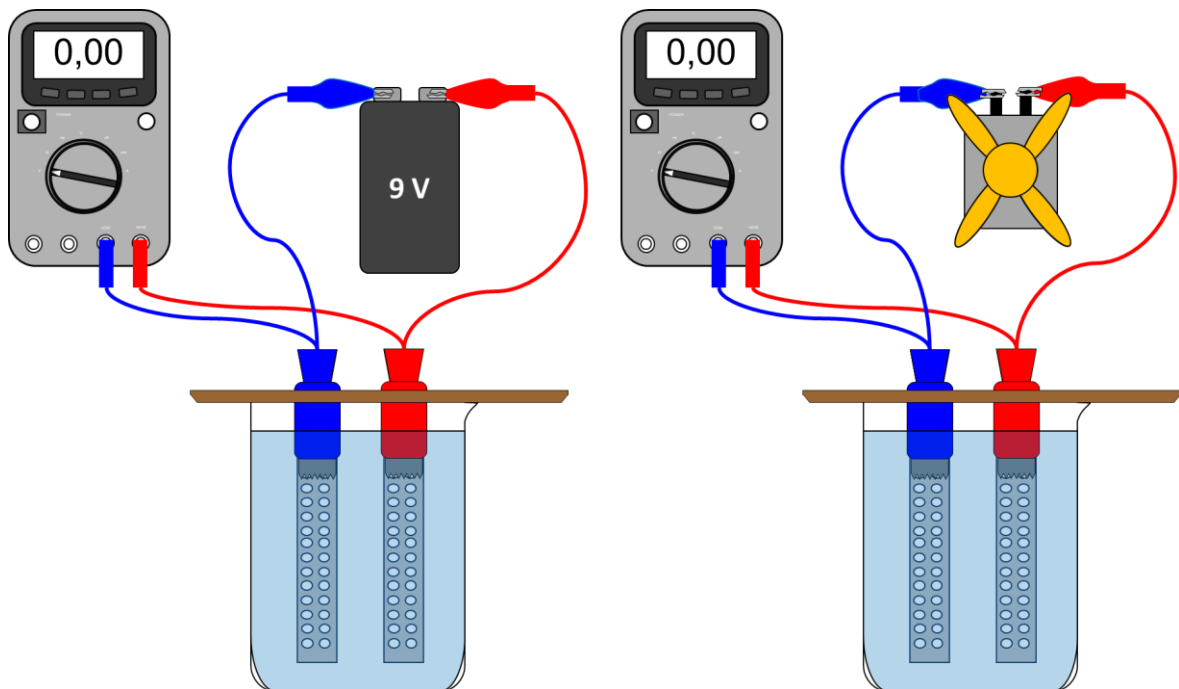
H290, H314

P280, P308+P310, P303+P361+P353, P305+P351+P338

Durchführung:

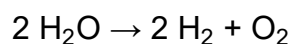
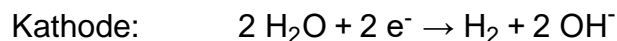
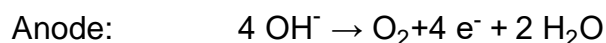
1. Schneide mit der Schere oder dem Messer aus der Pappe einen Kreis aus, sodass damit das Becherglas abgedeckt werden kann. Schneide in die Pappe zwei Löcher, sodass die Krokodilklemmen hindurch passen.
2. Gib etwa 70 mL Natronlauge in das Becherglas.

3. Rolle die Rasierscherfolien jeweils auf und fixiere sie mit den Krokodilklemmen.
4. Stecke die Enden der Krokodilklemmen in die Löcher der Pappe und verbinde jeweils ein farbig passendes Kabel mit einer Krokodilklemme.
5. Lege die Pappe auf das Becherglas, sodass die Elektroden in die Lösung eintauchen und sich nicht berühren.
6. Fixiere den Aufbau mit dem Stativmaterial. Klammere dazu das Becherglas und die Pappe.
7. Verbinde mithilfe der 2 weiteren Experimentierkabel die Apparatur mit Batterie und Multimeter wie in der linken Seite der Skizze gezeigt. Das Multimeter wird als Voltmeter genutzt.
8. Elektrolysiere etwa 60 Sekunden.
9. Tausche die Batterie durch den Verbraucher aus, wie in der rechten Seite der Skizze gezeigt. Beobachte die Spannung und den Verbraucher.

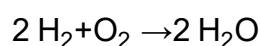
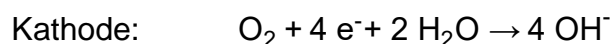
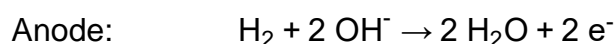


Beobachtung: Während der Elektrolyse ist eine Gasbildung an den Rasierscherfolien zu beobachten. Die Gasbläschen bleiben fast vollständig an der Folie haften. Der Verbraucher kann einige Minuten betrieben werden. Die Gasblasen werden dabei weniger und die Spannung fällt von knapp über 1V allmählich ab.

Deutung: Bei der Elektrolyse läuft die folgende Redoxreaktion ab:



Bei Antrieb des Verbrauchers läuft die folgende Redoxreaktion ab:



Die Lösung muss elektrisch leitend sein, weshalb kein destilliertes Wasser verwendet werden kann sondern Natronlauge. Die Rasierscherfolien dienen als Elektroden. Die Gasblasen bleiben an den Folien haften, sodass der Antrieb eines Verbrauchers möglich ist. Je weniger Gasblasen sich an den Folien befinden, desto kleiner ist die messbare Spannung. Wenn die Spannung unter einen bestimmten Wert fällt, genügt Sie nicht mehr, um den Verbraucher anzutreiben.

Entsorgung: Die Lösung kann nach Neutralisation im Ausguss entsorgt werden. Die Folien können nach Abspülen unter klarem Wasser wiederverwendet werden.

Diskussion: Zur Diskussion könnte die folgende Aufgabenstellung bearbeitet werden:

Beschreibe mindestens zwei Anwendungsgebiete für Brennstoffzellen. Ergänze deine Ideen durch die deiner Gruppenmitglieder.

Vertiefung: Als Vertiefung kann die folgende Aufgabe bearbeitet werden:

Bereich **Chemie:**

Vergleiche den Modellversuch mit Brennstoffzellen in der technischen Realität, indem du die nachfolgende Tabelle ausfüllst:

(Bei der Lernendenversion ist entsprechend die dritte Zeile leer)

Kriterium	Technische Brennstoffzelle	Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle
Brennstoff	Wasserstoff, H ₂ (g)	Wasserstoff, H ₂ (g)
Oxidationsmittel	Sauerstoff, O ₂ (g)	Sauerstoff, O ₂ (g)
Reaktionsgleichung	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{H}_2\text{O}$	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{H}_2\text{O}$
Elektrolyt	Kalilauge	Natronlauge
Elektroden	Raney-Nickel auf Nickel	Platinierte Nickelnetze
Katalysator	Raney-Nickel	Platin
Membran	oft Nafion	Keine
Bereitstellung der Edukte	Kontinuierliche Zufuhr	Gewinnung durch vorherige Elektrolyse im Gefäß
Ableitung der Produkte	Kontinuierlich	Keine
Erreichte Spannung	1,2 V	1 V

Empfehlung für weiterführende Versuche: Um das Wissen über Brennstoffzellen zu vertiefen, könnte der Versuch „Käufliche Brennstoffzellen“ angeschlossen werden. Es wird ein zusätzlicher Fokus auf die Herstellung von Wasserstoff gelegt.

Brennstoffzellen werden unter anderem verwendet, um Wasserstoff herzustellen. Eine Biogasanlage ist eine Alternative zur Elektrolyse von Wasser, weshalb der Versuch „Wasserstoff aus Zuckerrüben“ im Anschluss geeignet wäre.

Eine interessante Alternative zu Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen sind mikrobielle Brennstoffzellen. Der Versuch „Mikrobielle Brennstoffzellen“ eignet sich deshalb ebenfalls in der Folge.

Anschließen könnte sich auch Versuch zur Speicherung von Wasserstoff, welcher die Probleme thematisiert.

Quelle: In Anlehnung an [2].

Bezug der Rasierscherfolien: Folien für Elektrorasierer z.B. von der Firma Braun (Diese eignen sich gut, da sie aus platinierter Nickel bestehen. Sie können online bestellt oder im Drogeriemarkt für etwa 10€ pro Folie gekauft werden. Alternativ können auch Bleistiftminen verwendet werden. Die Folien funktionieren jedoch insbesondere zum Betreiben eines Verbrauchers besser, da das Gas sehr gut an der Oberfläche haftet.)

Solarmotor: 16 Ø x 24 mm (<https://lemo-solar.de/produkt/glockenanker-solar-motor-fuer-solarcup-automodelle-art-nr-s1624e6/>)

IV. Brennstoffzelle mit minimalem Aufwand

Zeitbedarf: 15 Minuten

Kompetenzen:

S: Beschreiben der Funktionsweise einer Brennstoffzelle

E: Übertragen der Erkenntnisse aus dem Modellexperiment auf die Realität

Anwenden des Wissens über fachgemäße Arbeitsweise bei der Durchführung des Experiments

B: Vergleichen des Modellexperiments mit einer realen PEM-Brennstoffzelle

K: Erläutern von mindestens zwei Anwendungsbereichen für Brennstoffzellen

Neugier: Eine Brennstoffzelle selber bauen.

Ziel: Bau und Inbetriebnahme einer Brennstoffzelle mit einfachen Mitteln als Modellexperiment

Material:

- Kristallisierschale (d=75 mm)
- 4 Krokodilklemmen (2 rote und 2 blaue oder schwarze)
- 4 Experimentierkabel (2 rote und 2 blaue oder schwarze)
- Multimeter
- Blockbatterie (9V)
- Spülmittel
- Glasstab
- Verbraucher z.B. Solarmotor von Lemo-Solar (Anlaufstrom ~2mA)
- Moosgummi (optional)

Chemikalien:

- **Natronlauge**
c=0,5 mol/L
CAS-Nr.: 1310-73-2
- Eisenwolle (z.B. Firma Mauer 297.070.00)



H290, H314
P280, P308+P310, P303+P361+P353,
P305+P351+P338

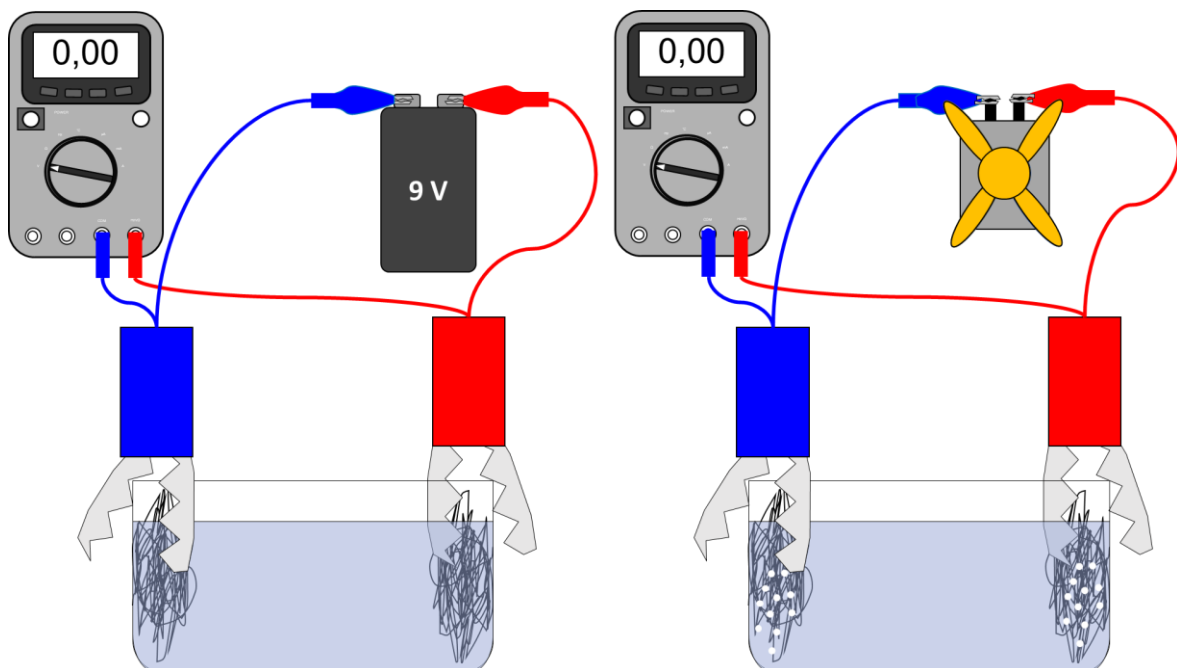
Hinweis: Je feiner die benutzte Eisenwolle ist, desto besser klappt der Versuch, da sich die Gasblasen dann besser im Geflecht fangen können.

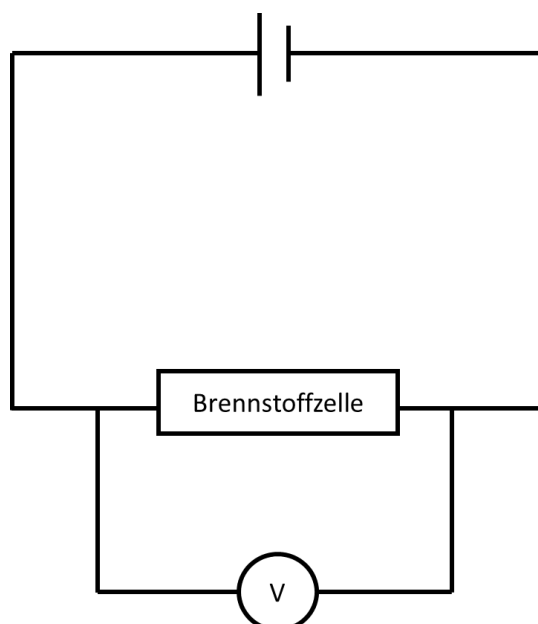
Durchführung:

1. Forme aus der Eisenwolle 2 etwa 8 cm lange wurstähnliche Geflechte.
2. Verbinde je eine rote und eine blaue oder schwarze Krokodilklemme mit einem Experimentierkabel in derselben Farbe.
3. Fixiere die Geflechte aus Eisenwolle mithilfe von einer roten und einer schwarzen oder blauen Krokodilklemme möglichst weit unten in der Kristallisierschale auf gegenüberliegenden Seiten.

HINWEIS: Die Geflechte sollten sich nicht berühren. Um dies sicherzustellen kann ein Stück Moosgummi dazwischen angebracht werden.

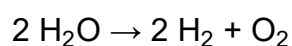
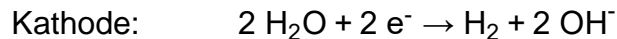
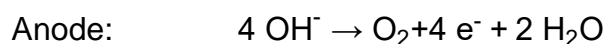
4. Fülle die Kristallisierschale so hoch mit Natronlauge, dass die Eisenwolle größtenteils bedeckt ist.
5. Gib 2-3 Tropfen Spülmittel hinzu und verrühre es mit dem Glasstab.
6. Nutze das Multimeter als Voltmeter, um die Spannung zu messen. Verbinde es dazu über die Experimentierkabel mit den Elektroden wie in der Skizze gezeigt.
7. SchlieÙe über das zweite Paar Krokodilklemmen und Experimentierkabel die Elektroden an die Blockbatterie wie in der Skizze links gezeigt an und elektrolysiere etwa 3 Minuten.
8. Tausche die Batterie durch den Verbraucher aus, wie in der Skizze rechts gezeigt. Beobachte die Spannung und den Verbraucher.



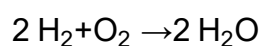
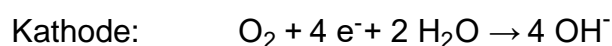
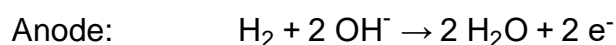


Beobachtung: Während der Elektrolyse ist eine Gasbildung an der Eisenwolle zu beobachten. Ein Teil der Gasbläschen bleibt in dem Geflecht der Eisenwolle haften. Der Verbraucher kann kurz betrieben werden. Die Gasblasen werden dabei verbraucht. Die Spannung fällt von knapp über 1V kontinuierlich ab.

Deutung: Bei der Elektrolyse läuft die folgende Redoxreaktion ab:



Bei Antrieb des Verbrauchers läuft die folgende Redoxreaktion ab:



Der Elektrolyt muss leitend sein, weshalb kein destilliertes Wasser, sondern Natronlauge verwendet wird. Das Spülmittel sorgt für einen besseren Halt der Gasblasen im Geflecht der Eisenwolle. Je weniger Gasblasen sich in dem Geflecht befinden, desto kleiner ist die messbare Spannung. Wenn die Spannung unter einen bestimmten Wert fällt, genügt sie nicht mehr, um den Verbraucher anzutreiben.

Entsorgung: Die Lösung kann nach Neutralisation im Ausguss und die Eisenwolle nach Abspülen mit Wasser im Hausmüll entsorgt werden.

Diskussion: Zur Diskussion könnte die folgende Aufgabenstellung bearbeitet werden:

Beschreibe mindestens zwei Anwendungsgebiete für Brennstoffzellen. Ergänze deine Ideen durch die deiner Gruppenmitglieder.

Vertiefung: Als Vertiefung kann die folgende Aufgabe bearbeitet werden:

Bereich **Chemie:**

Vergleiche den Modellversuch mit Brennstoffzellen in der technischen Realität, indem du die nachfolgende Tabelle ausfüllst:

(Bei der Lernendenversion ist entsprechend die dritte Zeile leer)

Kriterium	Technische Brennstoffzelle	Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle
Brennstoff	Wasserstoff, H ₂ (g)	Wasserstoff, H ₂ (g)
Oxidationsmittel	Sauerstoff, O ₂ (g)	Sauerstoff, O ₂ (g)
Reaktionsgleichung	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{H}_2\text{O}$	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{H}_2\text{O}$
Elektrolyt	Kalilauge	Natronlauge
Elektroden	Raney-Nickel auf Nickel	Eisenwolle
Katalysator	Raney-Nickel	Kein zusätzlicher Katalysator
Membran	oft Nafion	Moosgummi (optional)
Bereitstellung der Edukte	Kontinuierliche Zufuhr	Gewinnung durch vorherige Elektrolyse im Gefäß
Ableitung der Produkte	Kontinuierlich	Keine
Erreichte Spannung	1,2 V	1 V

Empfehlung für weiterführende Versuche: Um das Wissen über Brennstoffzellen zu vertiefen, könnte der Versuch „Käufliche Brennstoffzellen“ angeschlossen werden. Es wird ein zusätzlicher Fokus auf die Herstellung von Wasserstoff gelegt.

Brennstoffzellen werden unter anderem verwendet, um Wasserstoff herzustellen. Eine Biogasanlage ist eine Alternative zur Elektrolyse von Wasser, weshalb der Versuch „Wasserstoff aus Zuckerrüben“ im Anschluss geeignet wäre.

Eine interessante Alternative zu Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen sind mikrobielle Brennstoffzellen. Der Versuch „Mikrobielle Brennstoffzellen“ eignet sich deshalb ebenfalls in der Folge.

Anschließen könnte sich auch Versuch zur Speicherung von Wasserstoff, welcher die Probleme thematisiert.

Quelle: In Anlehnung an [2] und [3] (S. 13-9), Solarmotor: 16 Ø x 24 mm (<https://lemo-solar.de/produkt/glockenanker-solarmotor-fuer-solarcup-automodelle-art-nr-s1624e6/>)

V. Wasserstoff aus Zuckerrüben

Zeitbedarf: Vorbereitung: ca. 15 Min, Reaktionsdauer 2-3 Tage

Kompetenzen:

S: Beschreiben der Funktionsweise einer Biogasanalage

E: Übertragen der Erkenntnisse aus dem Modellexperiment auf die Realität

Anwenden des Wissens über fachgemäße Arbeitsweise bei der Durchführung des Experiments

Anwenden der Recherche-Ergebnisse bezüglich der Herstellung von Wasserstoff

B: Bewerten des Potentials der Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse bezüglich seiner Nachhaltigkeit

Hintergrund: Beim anaeroben Abbau von zucker- oder stärkehaltigen Naturstoffen entstehen über mehre Abbauschritte letztlich Kohlenstoffdioxid, Methan, Wasserstoff und Wasser. Besonders der auf diese Weise gewonnene Biowasserstoff stellt auf der Suche nach erneuerbaren Energiequellen einen interessanten Forschungsgegenstand dar. Vielversprechende Ansätze zeigen, dass mithilfe von Bakterien nicht nur Maisstärke, Essensabfälle oder Abwässer, sondern sogar Klärschlamm für die Wasserstoffherzeugung genutzt werden können. Der hier beschriebene Versuch beruht auf der Umsetzung der Biomasse durch thermoanaerobe Bakterien aus Blumenerde.

Neugier: Bildung von Kohlenstoffdioxid durch Mikroorganismen ja, aber Wasserstoff?

Ziel: Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse mithilfe von Mikroorganismen

Material:

- Erlenmeyerkolben, enghals (500 mL)
 - Becherglas (500 mL)
 - Stopfen mit Bohrung (d(oben)=38 mm, d(Bohrung)=7 mm)
 - Glasrohr (l=80 mm, d(außen)=7 mm)
 - Schlauchstück (d(innen)=7 mm, l=100-150 mm)
 - Spritze (60 mL)
 - Drei-Wege-Hahn (medizinisch)
 - Reagenzglas (d=18 mm, l=180 mm)
 - Feuerzeug
 - Pulvertrichter (d(unten)=25 mm)
 - Wasserkocher oder Heizplatte
 - Thermometer T~100°C
 - Becherglas 500mL
 - Waage 0,0g
 - Stativ
 - Muffe und Klemme
-

Chemikalien:

- Blumenerde (frisch, feucht)
- Dolomit-Gartenkalk/ kohlensaurer Magnesiumkalk (35% Magnesiumcarbonat, 65% Calciumcarbonat)
- Wasser
- Zuckerrübenschnitzel, gepresst
- Silikonöl (für Spritze)

Durchführung:

1. Erhitze 400 mL Wasser in dem 500 mL Becherglas auf 80°C.
2. Wiege etwa 30g getrocknete Zuckerrübenschnitzel ab und gib sie zusammen mit dem etwa 80°C warmen Wasser in den 500 mL Erlenmeyerkolben. Lass die gepressten Zuckerrübenschnitzel zunächst etwa 5-10 Minuten quellen.
3. In der Zwischenzeit kannst du die Apparatur wie in der Abbildung gezeigt aufbauen:
 - a. Befeuchte die Bohrung des Stopfens mit Wasser und stecke das Glasrohr durch den durchbohrten Stopfen.
 - b. Schiebe den Schlauch auf das Glasrohr.
 - c. Auf die andere Seite des Schlauches steckst du den Drei-Wege-Hahn.
 - d. Schließ an den Drei-Wege-Hahn die Spritze an.

HINWEIS: Die Spritze sollte möglichst leichtgängig sein. Falls nicht, öle den Stempel mit einem Tropfen Silikonöl. Prüfe zudem die Apparatur auf Dichtheit, indem du mit deinem Daumen das Loch am Stopfen verschließt und versuchst die Spritze aufzuziehen. Ist die Apparatur dicht, sollte ein Unterdruck entstehen und der Stempel schiebt sich von selbst wieder in die Spritze.

- e. Spanne die Spritze so in ein Stativ ein, dass du später den Stopfen auf den Erlenmeyerkolben aufsetzen kannst.

Fülle mithilfe des Trichters circa 30g Blumenerde und circa 30g Kalk in den Erlenmeyerkolben.

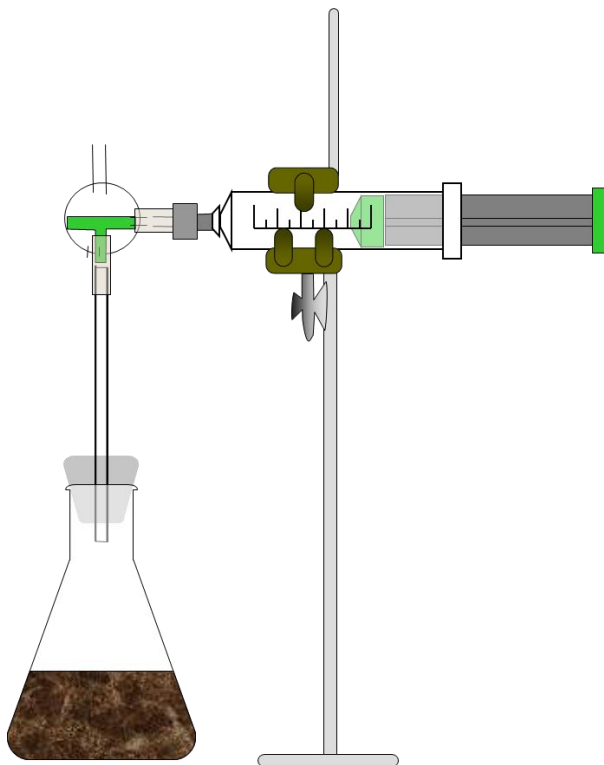
4. Baue den Kolben in die Apparatur ein, indem du ihn mit dem durchbohrten Stopfen verschließt. Der Stopfen muss recht kräftig auf den Kolben gedrückt werden, damit die Anlage so gut wie möglich luftdicht verschlossen ist.
5. Die Apparatur muss nun 2-3 Tage stehen.

HINWEIS: Es kann nützlich sein, den Stempel der Spritze ab und zu leicht zu bewegen, um den Reibungswiderstand zu überwinden.

6. Nach circa 24 h haben sich 30-60 mL Gas in der Spritze gesammelt. Dieses Gas wird verworfen, da es noch zu viel Stickstoff enthält.

HINWEIS: Verschließe die Anlage über den Drei-Wege-Hahn, bevor du die Spritze abnimmst!

7. Nach circa 36-48 h haben sich erneut 30-60 mL Gas in der Spritze gesammelt. Führe mit dem Gas eine Knallgasprobe durch.



Beobachtung: In der Spritze sammelt sich ein farbloses Gas. Die Knallgasprobe ist positiv.

Deutung: Die positive Knallgasprobe zeigt Wasserstoff an. Es lässt sich demnach darauf schließen, dass beim anaeroben Abbau der Zuckerrübenschnitzel durch die Mikroorganismen aus der Blumenerde Wasserstoff entsteht.

Entsorgung: Ausguss und Hausmüll

Diskussion: Zur Diskussion könnten die folgenden Aufgabenstellungen bearbeitet werden:

Falls noch nicht geschehen, informiere dich im Internet über die Farben von Wasserstoff. Ordne dem in diesem Versuch hergestellten Wasserstoff eine Farbe zu.

Bewerte das Potential der Erzeugung von Wasserstoff mithilfe von Biomasse anhand deiner Versuchs- und Recherche-Ergebnisse bezüglich seiner Nachhaltigkeit.

Vertiefung: Als Vertiefung kann eine der folgenden Aufgaben bearbeitet werden:

Bereich **Mathematik** / **Chemie**:

Bestimme, wie viel Kilogramm Biomasse benötigt werden, um eine solche Menge Wasserstoff zu erzeugen, dass eine Energiemenge von $E=1\text{TWh}$ zur Verfügung steht. Du kannst annehmen, dass aus 7,5kg Biomasse 1kg Wasserstoff gewonnen werden kann.

Bereich **Biologie**:

Recherchiere die Funktionsweise einer Biogasanlage. Nenne die Gase, welche letztlich entstehen. Stelle eine Hypothese auf, warum in dem hier durchgeführten Versuch Wasserstoff entstanden ist.

Empfehlung für weiterführende Versuche: Der konventionelle Weg Wasserstoff herzustellen sind Brennstoffzellen. Der Versuch „Brennstoffzelle Modellversuch“ thematisiert einen Modellversuch zur Brennstoffzelle. Der Versuch „Kaufliche Brennstoffzelle“ thematisiert ebenfalls die Herstellung von Wasserstoff mittels Brennstoffzellen mit Blick auf die Nachhaltigkeit dieser Methode sowie die Nutzung zum Antrieb von Fahrzeugen. Beide eignen sich als Anschlussversuche.

Ein alternativer Energieträger, der ebenfalls in Biogasanlagen gewonnen werden kann, ist Methan. Anschließen könnte sich deshalb auch der „Energieträger im Vergleich“, welcher die Energieträger Wasserstoff und Methan miteinander vergleicht.

Der entstandene Wasserstoff muss irgendwie gespeichert werden. Hier ergeben sich eine Reihe von Problemen, welche in Versuch „Speicherung von Wasserstoff“ genauer untersucht werden können.

Quelle: In Anlehnung an [4]

Bezug der Zuckerrübenschnitzel: z.B. Südzucker Rübenmelasse-Schnitzel pelletiert, erhältlich online oder bei Tierfutter-Bedarfshandel.

Bezug des Gartenkalks: online oder aus dem Baumarkt.

VI. Speichern von Wasserstoff

Zeitbedarf: Vorbereitung: ca. 5 Minuten, Wartezeit: ca. 15 Minuten

Kompetenzen:

E: Übertragen der Erkenntnisse aus dem Modellexperiment auf die Realität

Anwenden des Wissens über die Moleküle Methan und Wasserstoff zur Erklärung des beobachteten Phänomens

B: Diskussion der Probleme bei der Speicherung von Wasserstoff

Information: Wasserstoffmoleküle sind extrem klein. Entsprechend schwierig ist es, sie einzusperren. Wasserstoff kann sogar durch Stahl diffundieren. In der Folge verringert sich der Kohlenstoffgehalt, sodass sich die Eigenschaften des Stahls verändern und er weniger fest ist. Durch sogenannte Wasserstoff-Ver sprödungen kam es schon zu einer Reihe von Unfällen. Auch Risse in Transportleitungen aus Stahl oder in Wasserstofftanks sind aufgrund der Wirkung von Wasserstoff nicht selten. Die Wasserstofftechnologie wird von vielen Experten als aussichtsreich eingeschätzt, um die Energieproblematik zu lösen. Jetzt ist die Forschung gefragt, geeignete Materialien für die Speicherung zu entwickeln und zu erproben.

Neugier: Warum kann Wasserstoff nicht eingesperrt werden?

Ziel: Demonstrieren, dass Wasserstoff nicht so leicht gespeichert werden kann wie beispielsweise Methan

Material:

- 2 Luftballons
- Filzstift

Chemikalien:

- **Erdgas** (>80% Methan) (g)
CAS-Nr.: 74-82-8



H220, H280
P210, P377, P381, P403

- **Wasserstoff** (g)
CAS-Nr.: 1333-74-0



H220, H280
P210, P377, P381, P403

Durchführung:

1. Beschrifte die Ballons mit einem Filzstift mit den Begriffen „Wasserstoff“ und „Methan“.
2. Befülle je einen Luftballon mit Erdgas und einen Luftballon mit Wasserstoff, sodass sie ungefähr einen Durchmesser von 10 cm besitzen und knotet sie gut zu.
3. Lass die Ballons etwa 15 Minuten liegen.

Beobachtung: Der Ballon mit Erdgas verliert kaum an Volumen, der Ballon mit Wasserstoff ist fast leer.

Deutung: Wasserstoff-Moleküle sind sehr klein und entweichen deshalb aus dem Ballon, was bei Erdgas nicht der Fall ist. Erdgas besteht vor allem aus Methan. Ein Methan-Molekül nimmt mehr als das doppelte Volumen eines Wasserstoff-Moleküls ein.

Entsorgung: Hausmüll

Diskussion: Zur Diskussion könnten die folgenden Aufgabenstellungen bearbeitet werden:

Erkläre anhand der Eigenschaften von Wasserstoff und Methan, weshalb Wasserstoff-Moleküle im Vergleich zu Methan so leicht aus dem Ballon entweichen können.

Ergänzung: Die Probleme bei der Wasserstofftechnologie liegen nicht nur darin, dass der Wasserstoff entweicht und so nur schwierig über Pipelines transportiert werden kann, sondern auch in seiner Explosivität, welche auf die Reaktionsfreudigkeit mit Sauerstoff zurückzuführen ist. Im Lehrendenversuch „Knalldose“ kann dies für eine Gruppe von Lernenden demonstriert werden.

Empfehlung für weiterführende Versuche: Das Problem der Speicherung von Wasserstoff kann umgangen werden, indem man Wasserstoff zu Methan reagieren lässt und dieses dann gespeichert wird. Für den Transport von Methan können bestehende Leitungen genutzt werden. In Versuch „Methanisierung“ können die Lernenden die Umsetzung von Wasserstoff zu Methan untersuchen, weshalb sich dieser Versuch als Anschluss eignet.

Denkbar ist auch, ganz auf Wasserstoff zu verzichten. Es gibt eine Reihe von Brennstoffzellen, die mit einem alternativen Brennstoff elektrische Energie erzeugen. Ein Beispiel kann in Versuch „Mikrobielle Brennstoffzellen“ erforscht werden.

Quelle: Didaktik der Chemie, Universität Bayreuth.

Knalldose

Zeitbedarf: ca. 10 Minuten

Kompetenzen:

E: Übertragen der Erkenntnisse aus dem Modellexperiment auf die Realität

B: Diskutieren der Probleme bei der Speicherung von Wasserstoff


Neugier: Explosion!

Ziel: Demonstration der Explosivität eines Wasserstoff-Luft-Gemisches

Material:

- Konservendose (d=100-150 mm) mit Loch im Boden (d=3 mm)
- Schaschlikspieß aus Holz
- langes Feuerzeug

Chemikalien:

- **Wasserstoff** (g)
CAS-Nr.: 1333-74-0

H220, H280
P210, P377, P381, P403
- **Natriumchlorid-Lösung**, beliebiger Konzentration

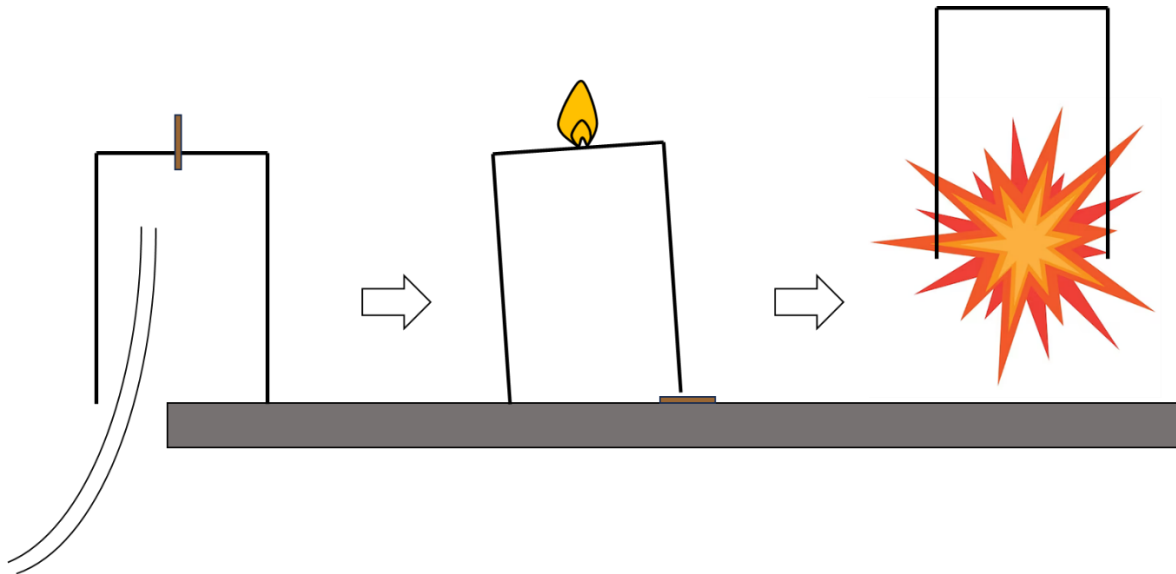
Durchführung:

1. Stelle die Konservendose mit dem durchbohrten Boden nach oben auf den Tisch. Benetze das Loch mit Natriumchlorid-Lösung.
2. Das Loch wird durch Einstecken der Spitze des Schaschlikspießes verschlossen.
3. Befülle die Dose mit Wasserstoff aus der Druckgasflasche. Du kannst die Dose dafür zum Beispiel an der Tischkante platzieren.

HINWEIS: Dass die Dose vollständig befüllt ist, lässt sich am Geräusch oder dem kalt ausströmenden Wasserstoff erkennen.

4. Entferne die Gasflasche aus dem Gefahrenbereich.
5. Entferne den Schaschlikspieß und lege ihn unter die Dose, sodass sie leicht schräg steht und Luft nachströmen kann.
6. Zünde zügig den ausströmenden Wasserstoff an.

HINWEIS: Aufgrund der Natriumchlorid-Lösung ist die sonst farblose Wasserstoffflamme erkennbar.



Beobachtung: Die Flamme ist orange. Nach kurzer Zeit explodiert das Gasgemisch mit lautem Knall und die Dose wird in die Höhe geschleudert.

Deutung: Das Experiment ist eine effektvolle Präsentation der Knallgasreaktion. Zu Beginn des Experiments strömt der Wasserstoff oben aus der Dose. Von unten strömt so lange Luft nach, bis die obere Explosionsgrenze erreicht ist (etwa 75%).

Reaktionsgleichung der ablaufenden Reaktion: $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Entsorgung: Die Dose kann wiederverwendet werden.

Quelle: In Anlehnung an [3] (S. 07-1)

VII. Methanisierung

Zeitbedarf: ca. 30 Minuten

Kompetenzen:

S: Formulieren der Reaktionsgleichung für die Umsetzung von Wasserstoff zu Methan

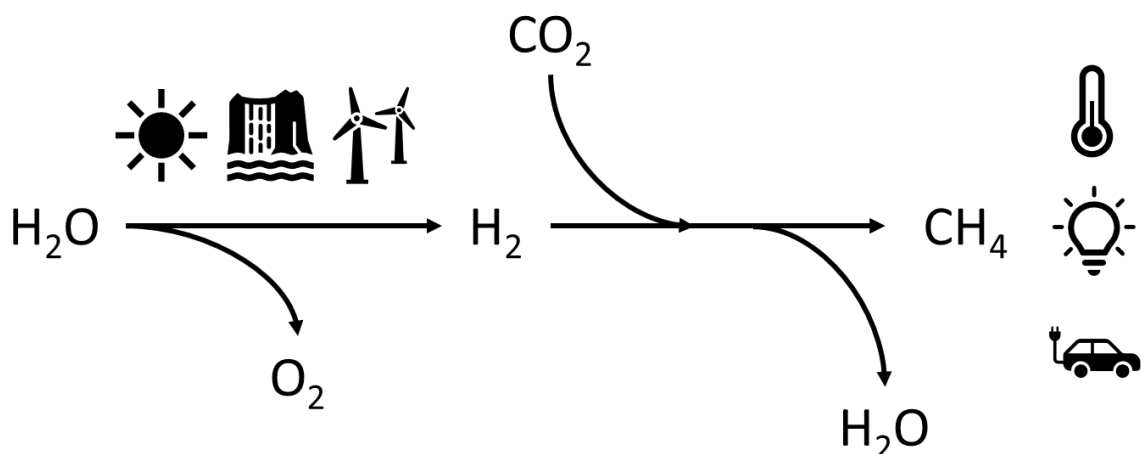
Beschreiben der Reaktionsbedingungen für die Umsetzung von Wasserstoff zu Methan

Erklären des Power-to-Gas Konzepts

E: Anwenden des Wissens über fachgemäße Arbeitsweise bei der Durchführung des Experiments

B: Bewerten des Power-to-Gas-Konzepts bezüglich seiner Nachhaltigkeit

Hintergrund: Die Methanisierung spielt eine entscheidende Rolle im sogenannten „Power-to-Gas“-Konzept. Regenerative Energieformen wie Sonnen- und Windenergie oder Wasserkraft können genutzt werden, um mithilfe von Elektrolyse Wasserstoff aus Wasser zu gewinnen. Dieser kann als Wärmequelle genutzt oder wieder in Brennstoffzellen eingesetzt werden, und zwar unabhängig vom Wetter oder den geologischen Bedingungen. Problematisch ist hingegen, dass Wasserstoff ein sehr flüchtiges Gas ist, das selbst in Stahl diffundiert und so in Rohrleitungen und Speichern Versprödungen hervorrufen kann. Zur Speicherung sind besondere Druckbehälter nötig, welche z.B. mittels Plasmabearbeitung zusätzlich verdichtet werden. Der regenerativ gewonnene Wasserstoff kann jedoch in einem weiteren Schritt unter speziellen Reaktionsbedingungen mit Kohlenstoffdioxid zu Methan umgesetzt werden. Dieses kann direkt in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden.






Neugier: Wasserstoff kann nur schwierig gespeichert werden. Mit dem Speichern von Methan hätten wir Erfahrung.

Ziel: Durchführung der Reaktion von Wasserstoff mit Kohlenstoffdioxid zu Methan

Material:

- 2 Spritzen (100 mL)
- 2 Drei-Wege-Hähne (medizinisch)
- Katalysatoreinheit (Selbstbau (siehe Ergänzung) oder Nickel-Zeolith-Katalysatoreinheit)
- 2 Krokodilklemmen (rot und blau oder schwarz)
- 3 Experimentierkabel
- Multimeter
- 4 Stative
- 4 Klemmen und 4 Muffen
- 3 Gasbeutel (500-1500 mL)
- Feuerzeug
- Kanüle (l=40 mm)
- Netzgerät

Chemikalien:

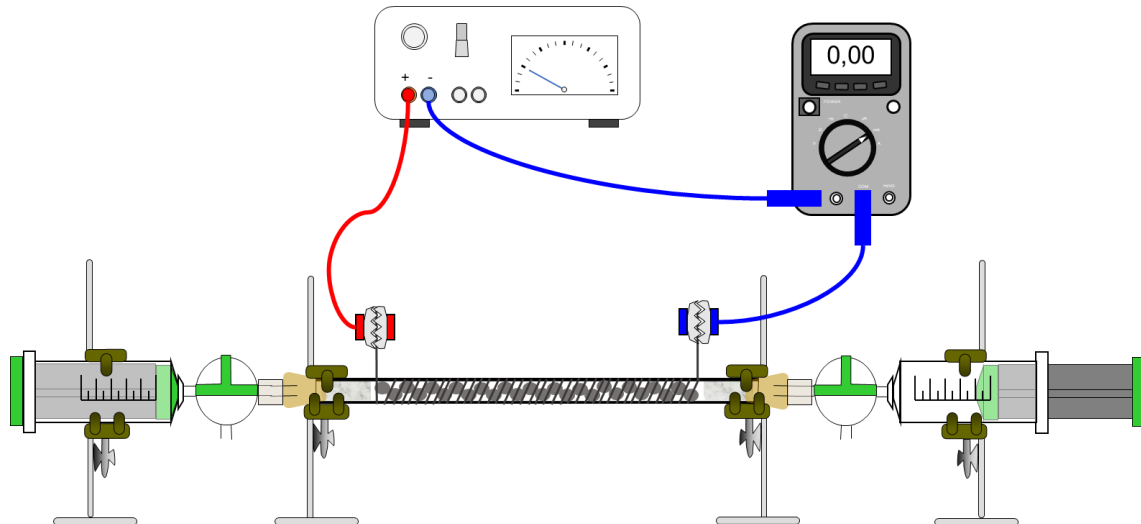
- **Kohlenstoffdioxid** (g)
CAS-Nr.: 124-38-9

H280
P403
- **Erdgas** (>80% Methan) (g)
CAS-Nr.: 74-82-8

H220, H280
P210, P377, P381, P403
- **Silikonöl** (für Spritze)
- **Wasserstoff** (g)
CAS-Nr.: 1333-74-0

H220, H280
P210, P377, P381, P403

Vorbereitung:

1. Spüle die Katalysatoreinheit falls noch nicht geschehen mit Wasserstoff, um den Katalysator zu aktivieren.
2. Befülle je einen Gasbeutel mit Kohlenstoffdioxid und einen Gasbeutel mit Wasserstoff. Beschrifte die Beutel, um eine Verwechslung zu verhindern.
3. Der Nachweis des Produktes Methan erfolgt qualitativ durch Verbrennung. Es empfiehlt sich, bereits vor der Durchführung Methan zu verbrennen, um einen Vergleich zu haben. Fülle dafür etwa 30 mL Methan in eine Spritze und setze eine Kanüle auf. Drücke das Gas langsam aus der Spritze und zünde es mit dem Feuerzeug an.

Durchführung:

1. Setze auf jeder Seite einen Drei-Wege-Hahn auf die Katalysatoreinheit.
2. Spanne die Katalysatoreinheit wie in der Skizze gezeigt in zwei Stative ein.
3. Hänge die Krokodilklemmen an den Widerstandsdraht, welcher um die Katalysatoreinheit gewickelt ist und verbinde sie mithilfe der Experimentierkabel mit dem Netzgerät und dem Multimeter wie in der Skizze. Das Multimeter wird als Ampèremeter genutzt, um die Stromstärke zu überwachen.
4. Fixiere eine der 100 mL Spritzen wie in der Skizze gezeigt an einem der Drei-Wege-Hähne.



HINWEIS: Die Spritzen sollten möglichst leichtgängig sein. Falls nicht, öle den Stempel mit einem Tropfen Silikonöl. Prüfe zudem die Apparatur auf Dichtheit, indem du den Drei-Wege-Hahn ohne Spritze verschließt und versuchst, die Spritze aufzuziehen. Ist die Apparatur dicht, sollte ein Unterdruck entstehen und sich der Stempel von selbst wieder in die Spritze schieben.

5. Fülle die zweite 100 mL Spritze mit 20 mL Kohlenstoffdioxid und 80 mL Wasserstoff. Fixiere sie mithilfe eines Stativs an dem anderen Drei-Wege-Hahn. Stelle den Hahn so, dass die Spritze verschlossen ist.
6. **Selbstbau-Katalysatoreinheit:** Stelle am Netzgerät die im Vorversuch ermittelte Spannung (etwa 20-25V, siehe Ergänzung) ein, um die Katalysatoreinheit aufzuheizen. Nach etwa 5 min sind unter 500°C erreicht.

Nickel-Zeolith-Katalysatoreinheit: Stelle am Netzgerät eine Spannung von etwa 15V ein, sodass eine Stromstärke von 1,8-2A messbar ist und heize die Katalysatoreinheit 5 Minuten lang auf. Es werden 350-390°C erreicht.

HINWEIS: Überwache mit dem Multimeter die Stromstärke. Sie darf nicht über den Maximalwert des Netzgerätes steigen (in der Regel 12 A), sonst spricht die Sicherung an.

7. Ist das Reaktionsrohr aufgeheizt, kann das Gasgemisch langsam (etwa 2-3 mL pro Sekunde) über den Katalysator in die zweite Spritze geleitet werden.

HINWEIS: Eventuell ist es nützlich den Stempel der gegenüberliegenden Spritze leicht anzuziehen, um den ersten Reibungswiderstand zu überwinden.

8. Drücke das Gas 10–20-mal langsam hin und her, bis keine Volumenänderung mehr zu erkennen ist. (die Reaktionszeit sollte insgesamt 10-15 Minuten sein)
9. Verschließe die Spritze, in der sich das Produkt befindet, über den Hahn und nimm die Spritze ab.
10. Setze eine Kanüle auf die Spritze. Drücke das Gas langsam aus der Spritze und zünde es mit dem Feuerzeug an.

Beobachtung: Es ist eine Volumenkontraktion auf etwa 30 mL zu erkennen (ideal: 20 mL). In den Drei-Wege-Hähnen und den Schlauchstücken sind bei genauem Hinsehen Wassertropfen zu erkennen.

Das Gas brennt mit blauer Flamme ab.

Deutung: Es läuft die folgende Reaktion ab: $4 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$.

Es wird ein Katalysator genutzt, um die Aktivierungsenergie herabzusetzen. Die Reaktion ist stark exotherm. Nach dem Prinzip des kleinsten Zwangs sollte deshalb eine niedrige Temperatur die Reaktion begünstigen, jedoch wird die hohe Temperatur benötigt, um den Katalysator zu aktivieren.

Bei der Reaktion werden aus 5 Gasteilchen 1 Gasteilchen, weshalb sich das Gasvolumen im Idealfall von 100 mL auf 20 mL verringern sollte. Eine hundertprozentige Ausbeute kann auch in der Praxis nicht erreicht werden. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass auch ein Teil des Gases entweicht, da es kaum möglich ist, die Apparatur vollständig abzudichten. Ein qualitativer Nachweis, dass die Reaktion stattgefunden hat, lässt sich jedoch durch das Abbrennen des Produkts mit blauer Flamme erbringen. Einen weiteren Hinweis auf die erfolgreiche Umsetzung geben die Wassertropfen in den Schlauchstücken oder den Drei-Wege-Hähnen.

Entsorgung: Die Katalysatoreinheit kann nach Spülen mit Wasserstoff aus der Gasflasche wiederverwendet werden.

Diskussion: Zur Diskussion könnte die folgende Aufgabenstellung bearbeitet werden:

Bewerte das Potential des „Power-to-Gas“-Konzepts hinsichtlich seiner Nachhaltigkeit.

Empfehlung für weiterführende Versuche: Gut geeignet ist in der Folge der Versuch „Energieträger im Vergleich“, da er die Energieträger Wasserstoff und Methan gegenüberstellt.

Bei der Verbrennung von Methan beispielsweise zum Heizen wird Kohlenstoffdioxid frei. Dieses ist als Treibhausgas bekannt. Um die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre zu verringern, kann dieses unterirdisch in Kohleflözen gespeichert werden. Auf diese Weise lassen sich auch Verbindungen zum Versuch „Modellversuch zur Kohlenstoffdioxid-Speicherung mittels CCS“ herstellen.

Quelle: In Anlehnung an [5], [6] und [7].

Bezug der Nickel-Zeolith Katalysatoreinheit über VSN-Shop für 44€ (<https://www.vsn-shop.ch/produkte/power-to-gas/>, 16.08.23). Mit dieser verkürzt sich die Reaktionszeit um etwa 10 Minuten. Das Ergebnis ist in beiden Fällen zufriedenstellend. Für den Selbstbau der Katalysatoreinheit siehe Ergänzung.

Methan kann als Erdgas meist einfach aus dem entsprechenden Anschluss entnommen werden. Die Zusammensetzung kann beim lokalen Anbieter erfragt werden

Ergänzung zum Versuch Methanisierung: Selbstbau der Katalysatoreinheit

Zeitbedarf: ca. 40 Minuten

Ziel: Bau einer Katalysatoreinheit für den Versuch „Methanisierung“

Material:

- Glasrohr (l=25 mm, d(außen)=8 mm, d(innen)=6 mm)
- Thermometer (T > 500°C) z.B. ALL-CHEM-MISST mit Ni-Cr-Ni Typ K Fühler
- Flüssigkeitstrichter (d(unten)=6 mm)
- Widerstandsdraht z.B. 0,7 Ω/m
- Netzgerät
- 3 Experimentierkabel
- 2 Krokodilklemmen (rot und blau oder schwarz)
- Multimeter
- 1 Stativ
- 3 Muffen und 3 Klemmen
- Waage 0,0g
- 2 durchbohrte Silikonstopfen (d(oben)=22 mm, d(Bohrung)=6 mm)
- 2 Schlauchstücke (l=30-40 mm, d(außen)=6 mm)
- Glasrohr (l=15-20 mm, d(innen)=12-15 mm) (optional)

Chemikalien:

- Glaswolle
- **Pd/Pt-Katalysator Perlen** (Pd/ Pt auf Al₂O₃, 2,4-4 mm)

Vorversuch:

1. Wickle den Draht um das dünnere Glasrohr. Zum Rand des Glasrohrs sollten etwa 3 cm Platz gelassen werden. Zudem sollten die Enden des Drahts etwa 2-3 cm überstehen, damit die Krokodilklemmen später angeschlossen werden können.

HINWEIS: Der Draht sollte auf eine solche Länge geschnitten werden, dass er mindestens einen Widerstand von $R=2\Omega$ aufweist. Das ist wichtig, damit die Stromstärke nicht den Maximalwert des Netzgerätes übersteigt.

2. Spanne das Reaktionsrohr senkrecht in ein Stativ mit 2 Klemmen und 2 Muffen ein.
 3. Spanne den Temperaturfühler mit einer Klemme und einer Muffe in das Stativ so ein, dass er von oben in das Glasrohr ragt.
 4. Verbinde den Widerstandsdraht über die Krokodilklemmen und die Experimentierkabel mit dem Netzgerät und klemme das Multimeter als Amperemeter dazwischen, um die Stromstärke zu überwachen.
-

5. Stelle am Netzgerät die Spannung in 5er Schritten nach oben und miss jeweils die Temperatur und die Stromstärke. Notiere die Einstellungen, die eine Temperatur von etwa 500°C ergeben.

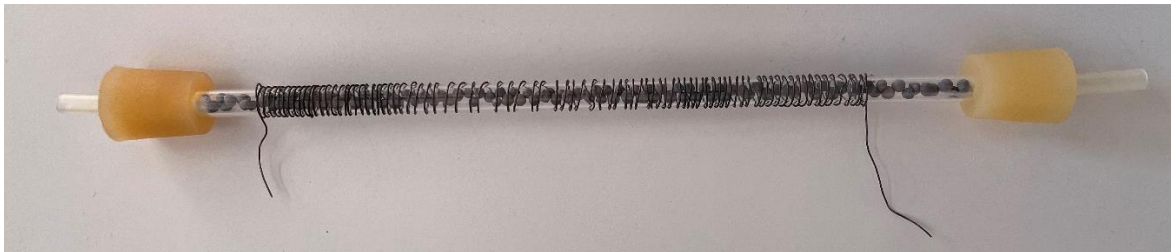
HINWEIS: Für die Reaktion ist eine Temperatur von etwa 500 °C erforderlich. Sollte diese trotz maximaler Spannung am Netzgerät nicht erreicht werden, könnte ein Widerstandsdraht mit kleinerem Widerstand gewählt werden.

Durchführung:

1. Verschließe das mit Draht umwickelte Glasrohr einseitig mit Glaswolle.
2. Wiege etwa 2g Katalysatorperlen ab und fülle sie mithilfe des Trichters in das Glasrohr ein.
3. Verschließe nun auch die andere Seite mit Glaswolle.



4. Stecke die beiden Schlauchstücke jeweils in das breite Ende eines Silikonstopfens und setze diese links und rechts auf das Glasrohr der Katalysatoreinheit, indem du das Glasrohr in die Bohrung auf der schmalen Seite des Stopfens schiebst.



5. Zum Schutz könnte die Katalysatoreinheit in ein zweites, dickeres Glasrohr geschoben werden. Es wird die Gefahr verringert, dass Lernende den heißen Draht beim Experimentieren berühren.
6. Bevor die Katalysatoreinheit eingesetzt werden kann, muss sie 2-5 Minuten mit Wasserstoff gespült werden.

Quelle: In Anlehnung an [7].

VIII. Energieträger im Vergleich

Zeitbedarf: ca. 40 Minuten

Kompetenzen:

S: Formulieren der Reaktionsgleichung für die Verbrennung von Methan und Wasserstoff

E: Dokumentieren und **Auswertung** der Versuchsergebnisse

B: Vergleichen der Energieträger Wasserstoff und Methan

K: Erläutern der eigenen Position mithilfe von Fachsprache



Neugier: Steckt in Wasserstoff oder in Methan mehr Energie?

Ziel: Vergleich der massen- und volumenbezogenen Energiedichte von Wasserstoff und Methan durch Erhitzen von Wasser

Material:

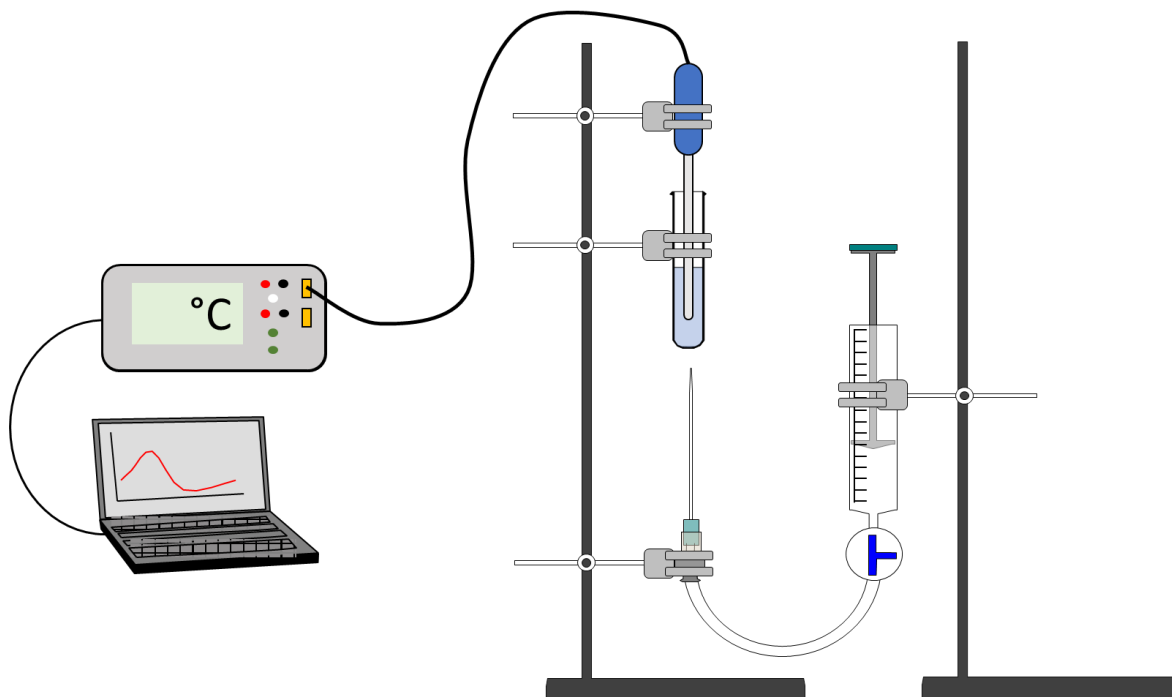
- Temperaturfühler/ Thermometer
T~100°C
- Hardware zum Aufzeichnen einer Temperaturkurve z.B. ALL-CHEM-MISST und Laptop mit entsprechender Software (optional)
- 4 kleine Reagenzgläser
(l=100 mm, d=14 mm)
- 2 Spritzen (100 mL)
- Drei-Wege-Hahn (medizinisch)
- Schlauchstück (l=20-25 mm, d(außen)=6 mm)
- Kanüle (l=40 mm)
- 2 Stative
- 4 Klemmen und 4 Muffen
- Feuerzeug
- Messpipette (1 mL)
- 2 Gasbeutel (500-1500 mL)
- Uhrglas

Chemikalien

- **Erdgas** (>80% Methan) (g)
CAS-Nr.: 74-82-8

H220, H280
P210, P377, P381, P403
- **Wasserstoff** (g)
CAS-Nr.: 1333-74-0

H220, H280
P210, P377, P381, P403
- **Natriumchlorid** (s)
- Wasser

Vorbereitung:

1. Bereite die Software zum Aufzeichnen einer Temperaturkurve vor.
2. Befülle einen Gasbeutel mit Wasserstoff. Befülle den zweiten Gasbeutel mit Erdgas aus dem Gashahn. Beschrifte die Beutel am besten, um Verwechslungen zu vermeiden.
3. Setze Spritze, Kanüle und Schlauch mithilfe des Hahns zusammen und spanne sie wie in der Abbildung gezeigt in die Stative ein.



Vorversuch 1: Fülle über den Drei-Wege-Hahn 100 mL Methan in die Spritze ein. Drücke das Gas langsam (etwa 2 mL pro Sekunde) aus der Spritze und zünde es mit dem Feuerzeug an der Kanülen-Spitze an. Es sollte eine blaue Flamme erkennbar sein.

Durchführung 1.1: (100 mL Methan)

1. Spanne das Reagenzglas in das Stativ knapp über die Spitze der Kanüle ein.
2. Befülle das Reagenzglas mithilfe der Messpipette mit 1 mL Wasser.
3. Spanne den Temperaturfühler wie in der Abbildung gezeigt ein, schließe ihn an das Gerät an und starte die Software.
4. Fülle über den Drei-Wege-Hahn 100 mL Methan in die Spritze und verschließe sie anschließend mithilfe des Hahns.
5. Starte die Aufzeichnung bzw. notiere die Anfangstemperatur.
6. Öffne den Hahn an der Spritze und drücke das Gas langsam (etwa 2 mL pro Sekunde) aus der Spritze. Zünde es mit dem Feuerzeug an der Kanülen-Spitze an.
7. Stoppe die Aufzeichnung bzw. notiere die Endtemperatur.

Beobachtung 1.1: Die Verbrennung wird etwa 40s dauern. Es ist eine Temperaturerhöhung von etwa 35°C erkennbar.

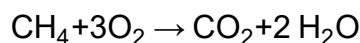
Durchführung 1.2: (0,0176g Methan)

1. Spanne ein **neues** Reagenzglas in das Stativ knapp über die Spitze der Kanüle ein.
2. Befülle das Reagenzglas mithilfe der Messpipette mit 1 mL Wasser.
3. Spanne den Temperaturfühler wie in der Abbildung gezeigt ein und schließe ihn an das Gerät an.

4. Fülle über den Drei-Wege-Hahn 25 mL Methan in die Spritze und verschließe sie anschließend mithilfe des Hahns.
5. Starte die Aufzeichnung bzw. notiere die Anfangstemperatur.
6. Öffne den Hahn an der Spritze und drücke das Gas langsam (etwa 2 mL pro Sekunde) aus der Spritze. Zünde es mit dem Feuerzeug an der Kanülen-Spitze an.
7. Stoppe die Aufzeichnung bzw. notiere die Endtemperatur.

Beobachtung 1.2: Die Verbrennung wird etwa 15s dauern. Es ist eine Temperaturerhöhung von etwa 10°C erkennbar.

Deutung 1: Bei der Verbrennung von Methan wird Energie in Form von Wärme frei, welche zuerst das Reagenzglas und dann das Wasser im Reagenzglas erwärmt. Die Reaktionsgleichung für die Verbrennung lautet:



Vorversuch 2: Die Wasserstoff-Flamme ist unter den vorliegenden Bedingungen farblos. Um die Flamme zu färben, feuchte die Kanüle an und tauche sie in etwas Natriumchlorid auf einem Uhrglas. Spanne die Kanüle wieder ein. Fülle über den Drei-Wege-Hahn 100 mL Wasserstoff in die Spritze. Drücke das Gas langsam (etwa 2 mL pro Sekunde) aus der Spritze und zünde es mit dem Feuerzeug an der Kanülen-Spitze an. Es sollte ein oranges Glühen an der Spitze der Kanüle erkennbar sein.

Durchführung 2.1: (100 mL Wasserstoff)

1. Spanne ein **neues** Reagenzglas in das Stativ knapp über die Spitze der Kanüle ein.
2. Befülle das Reagenzglas mithilfe der Messpipette mit 1 mL Wasser.
3. Spanne den Temperaturfühler wie in der Abbildung gezeigt ein und schließe ihn an das Gerät an.
4. Feuchte die Kanüle an und tauche sie in etwas Natriumchlorid auf einem Uhrglas. Spanne die Kanüle wieder ein.
5. Fülle über den Drei-Wege-Hahn 100 mL Wasserstoff in die Spritze und verschließe sie anschließend mithilfe des Hahns.
6. Starte die Aufzeichnung bzw. notiere die Anfangstemperatur.
7. Öffne den Hahn an der Spritze und drücke das Gas langsam (etwa 2 mL pro Sekunde) aus der Spritze. Zünde es mit dem Feuerzeug an der Kanülen-Spitze an.
8. Stoppe die Aufzeichnung bzw. notiere die Endtemperatur.

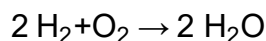
Beobachtung 2.1: Die Verbrennung sollte 40s dauern. Es ist eine Temperaturerhöhung von etwa 5°C erkennbar.

Durchführung 2.2: (0,0176g Wasserstoff)

1. Spanne ein **neues** Reagenzglas in das Stativ knapp über die Spitze der Kanüle ein.
2. Befülle das Reagenzglas mithilfe der Messpipette mit 1 mL Wasser.
3. Spanne den Temperaturfühler wie in der Abbildung gezeigt ein und schließe ihn an das Gerät an.
4. Feuchte die Kanüle an und tauche sie in etwas Natriumchlorid auf einem Uhrglas. Spanne die Kanüle wieder ein.
5. Fülle über den Drei-Wege-Hahn 100 mL Wasserstoff in die Spritze und verschließe sie anschließend mithilfe des Hahns. Fülle die zweite Spritze ebenfalls mit 100 mL Wasserstoff und hänge sie an den Drei-Wege-Hahn.
6. Starte die Aufzeichnung bzw. notiere die Anfangstemperatur.
7. Öffne den Hahn an der Spritze und drücke das Gas aus den beiden Spritzen nacheinander langsam (etwa 2 mL pro Sekunde) aus der Spritze. Zünde es mit dem Feuerzeug an der Kanülen-Spitze an.
8. Stoppe die Aufzeichnung bzw. notiere die Endtemperatur.

Beobachtung 2.2: Die Verbrennung wird etwa 80 s dauern. Es ist eine Temperaturerhöhung von etwa 20°C erkennbar.

Deutung 2: Bei der Verbrennung von Wasserstoff wird Energie in Form von Wärme frei, welche zuerst das Reagenzglas und dann das Wasser im Reagenzglas erwärmt. Die Reaktionsgleichung für die Verbrennung lautet:



Entsorgung: Das Wasser kann im Ausguss entsorgt werden.

Auswertung: Ermittle den Temperaturanstieg des Wassers in den Durchführungen 1.1, 1.2, 2.1 und 2.2. Trage die Temperaturdifferenz ΔT in die Tabelle ein:

	ΔT (100 mL)	ΔT (0,0176g)
Methan	38,2°C	11,0°C
Wasserstoff	4,0°C	17,8°C

Schließe mithilfe deiner Ergebnisse auf die relativen Energiedichten:

- Die größere volumenbezogene Energiedichte hat: Methan
- Die größere massenbezogene Energiedichte hat: Wasserstoff

Diskussion: Zur Diskussion könnte die folgende Aufgabenstellung bearbeitet werden:

Nimm mithilfe deiner Versuchsergebnisse Stellung zur folgenden These: „Wasserstoff ist der bessere Energieträger als Erdgas.“ Sammle Argumente für deine Position und tausche dich im Anschluss mit mindestens einem anderen Lernenden aus, der die Aufgabe ebenfalls bearbeitet hat.

Vertiefung: Als Vertiefung kann die folgende Aufgabe bearbeitet werden:

Bereich **Physik** / **Chemie**:

In der Literatur finden sich die folgenden Werte:

Standard-Verbrennungsenthalpien:

$$\Delta_{\text{R}}H^{\circ}(\text{Methan})=-890\text{kJ/mol}$$

$$\Delta_{\text{R}}H^{\circ}(\text{Wasserstoff})=-286\text{ kJ/mol.}$$

Spezifische Wärmekapazität:

$$c(\text{H}_2\text{O}(\text{g}))=4,18\text{J}(\text{gK})$$

Berechne, welche Temperaturdifferenz sich hieraus für die folgenden Verbrennungen theoretisch ergeben würde:

- a) 100 mL Methan
- b) 25 mL Methan
- c) 100 mL Wasserstoff
- d) 200 mL Wasserstoff

Nenne mindestens zwei Ursachen für das Abweichen der theoretischen Berechnungen von den experimentell ermittelten Daten.

Beschreibe mindestens eine Möglichkeit, wie der beschriebene Versuchsaufbau verändert werden könnte, um die Genauigkeit zu verbessern.

Empfehlung für weiterführende Versuche: Ein Vorteil von Methan gegenüber Wasserstoff ist, dass Methan leichter handhabbar ist. Genauer erforschen können die Lernenden das in Versuch „Speichern von Wasserstoff“, weshalb dieser folgen könnte.

Auch die Umsetzung von Wasserstoff zu Methan eignet sich als weiterführender Versuch. (siehe „Methanisierung“)

Quelle: In Anlehnung an [8].

Methan kann als Erdgas meist einfach aus dem entsprechenden Anschluss entnommen werden. Die Zusammensetzung kann beim lokalen Anbieter erfragt werden

IX. Mikrobielle Brennstoffzellen

Zeitbedarf: ca. 25 Minuten

Kompetenzen:

S: Formulieren der Reaktionsgleichung für die Redoxreaktion einer Hefe-Brennstoffzelle

E: Dokumentieren und **Auswerten** der Versuchsergebnisse

B: Bewerten des Potentials von mikrobiellen Brennstoffzellen bezogen auf ihre Nachhaltigkeit

Vergleichen von mikrobiellen Brennstoffzellen mit der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle

K: adressatengerechtes Darstellen der eigenen Argumente

Hintergrund: In mikrobiellen Brennstoffzellen (MBZ) werden organische Substrate an der Anode oxidiert. Mikroorganismen fungieren dabei als Biokatalysatoren. Die freiwerdenden Elektronen werden über einen externen Stromkreis von der Anode zur Kathode geführt, wo sie ein Oxidationsmittel reduzieren und so elektrischen Strom generieren. Derzeit wird beispielsweise daran geforscht, mikrobielle Brennstoffzellen bei der Abwassereinigung einzusetzen, um gleichzeitig mit der Aufbereitung elektrischen Strom zu gewinnen. Hefe-Brennstoffzellen wie in diesem Versuch können beispielsweise verwendet werden, um aus dem Blut des Menschen elektrischen Strom zu gewinnen, welcher dann Implantate oder miniaturisierte Medizingeräte antreibt.

Streng genommen ist der Begriff „mikrobiell“ für die im Folgenden beschriebene Zelle nicht korrekt, da es sich bei Hefen nicht um Mikroben handelt. Hier wird er dennoch verwendet, da es in der Literatur (z.B. [2]) so üblich ist und das Einführen eines neuen Begriffes nicht sinnvoll erscheint.

Neugier: Ein Kraftwerk aus Hefe?

Ziel: Bau einer Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau

Material:

- 2 Krokodilklemmen (rot und blau oder schwarz)
- 2 Experimentierkabel (rot und blau oder schwarz)
- 2 Eisennägel (l=55 mm)
- 2 Bechergläser (25 mL)
- 2 Stative
- 2 Muffen und 2 Klemmen
- Papierhandtuch oder Küchenrolle
- Multimeter
- Waage 0,0g
- Messzylinder (25 mL)
- Glasstab

Chemikalien:

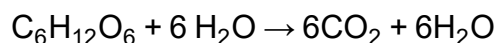
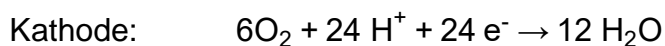
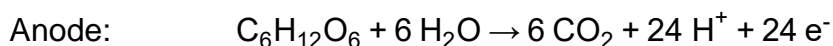
- Trockenhefe
 - **Wasser** (destilliert)
 - **Glucose**
-

T in s	630	660	690	720	750	780	810	840	870	900
U in mV										

Beobachtung: Die Spannung steigt knapp über 500mV an und ist dann relativ stabil.

Entsorgung: Die Lösungen können in den Abfluss entsorgt werden.

Deutung: An der Anode (Eisennagel in Becherglas 2) wird durch die Hefen Glucose zu Kohlenstoffdioxid abgebaut. So entsteht ein elektrochemisches Potential, welches mithilfe des Voltmeters gemessen werden kann. Die Reaktionsgleichungen lauten wie folgt:



Diskussion: Zur Diskussion könnten die folgenden Aufgabenstellungen bearbeitet werden:

Nenne je zwei Vor- und Nachteile von mikrobiellen Brennstoffzellen gegenüber der Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle. Tausche dich danach mit mindestens einem anderen Lernenden aus, der die Aufgabe ebenfalls bearbeitet hat.

Bewerte das Potential von mikrobiellen Brennstoffzellen anhand deiner Versuchs- und Recherche-Ergebnisse bezüglich ihrer Nachhaltigkeit.

Empfehlung für weiterführende Versuche: Bei der Umsetzung von Glucose durch Hefe entsteht Kohlenstoffdioxid, welches als Treibhausgas bekannt ist. Eine Möglichkeit dieses zum Teil aus der Atmosphäre zu entfernen, ist die Speicherung in Kohleflözen. In der Folge eignet sich deshalb der Versuch „Modellversuch zur Kohlenstoffdioxid-Speicherung mittels CCS“.

Quelle: In Anlehnung an [2].

X. Quellen

- [1] E. Kiesling, „Klimewirksamkeit von CO₂ und Ansätze zur Emissionsreduktion, Modul 4: Möglichkeiten der CO₂-Speicherung,“ 2021. [Online]. Available: https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiedidaktik/files/material/CCS/Modul_4.pdf. [Zugriff am 21 Juli 2023].
 - [2] R. Grandrath, „Von der alkalischen über die alkoholische zu biologischen Brennstoffzellen: Lowcost Experimente für den Einsatz im Chemieunterricht,“ 10 Dezember 2021. [Online]. Available: https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiedidaktik/files/mitarbeiter/Rebecca_Grandrath/2021_12_10_FCLehrerFobi. [Zugriff am 3 August 2023].
 - [3] Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung, *Chemie? - Aber Sicher! Experimente kennen und können*, 475 Hrsg., Dillingen, 2021.
 - [4] F. Kappenberg, „Energie aus Zuckerrüben. Herstellung von Wasserstoff und Nachweis durch Gaschromatografie,“ *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, pp. 38-42, 2017.
 - [5] I. Rubner, T. Grofe und M. Oetken, „"Power to Gas" - ein Baustein zur schulpraktischen Umsetzung der Energiewende,“ *CHEMKON*, Nr. 1, pp. 7-12, 2017.
 - [6] H. Duetsch, „VSN-Shop,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.vsn-shop.ch/app/download/11322871721/Power-to-Gas.pdf?t=1568557697>. [Zugriff am 16 August 2023].
 - [7] F. Rex und P. Menzel, „Methan aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid,“ *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, Nr. 1, pp. 44-49, 2015.
 - [8] T. Grofe und I. Rubner, „Die Energieträger Wasserstoff, Erdgas und Autogas im Vergleich,“ *CHEMKON*, Nr. 8, pp. 317-323, 2018.
-