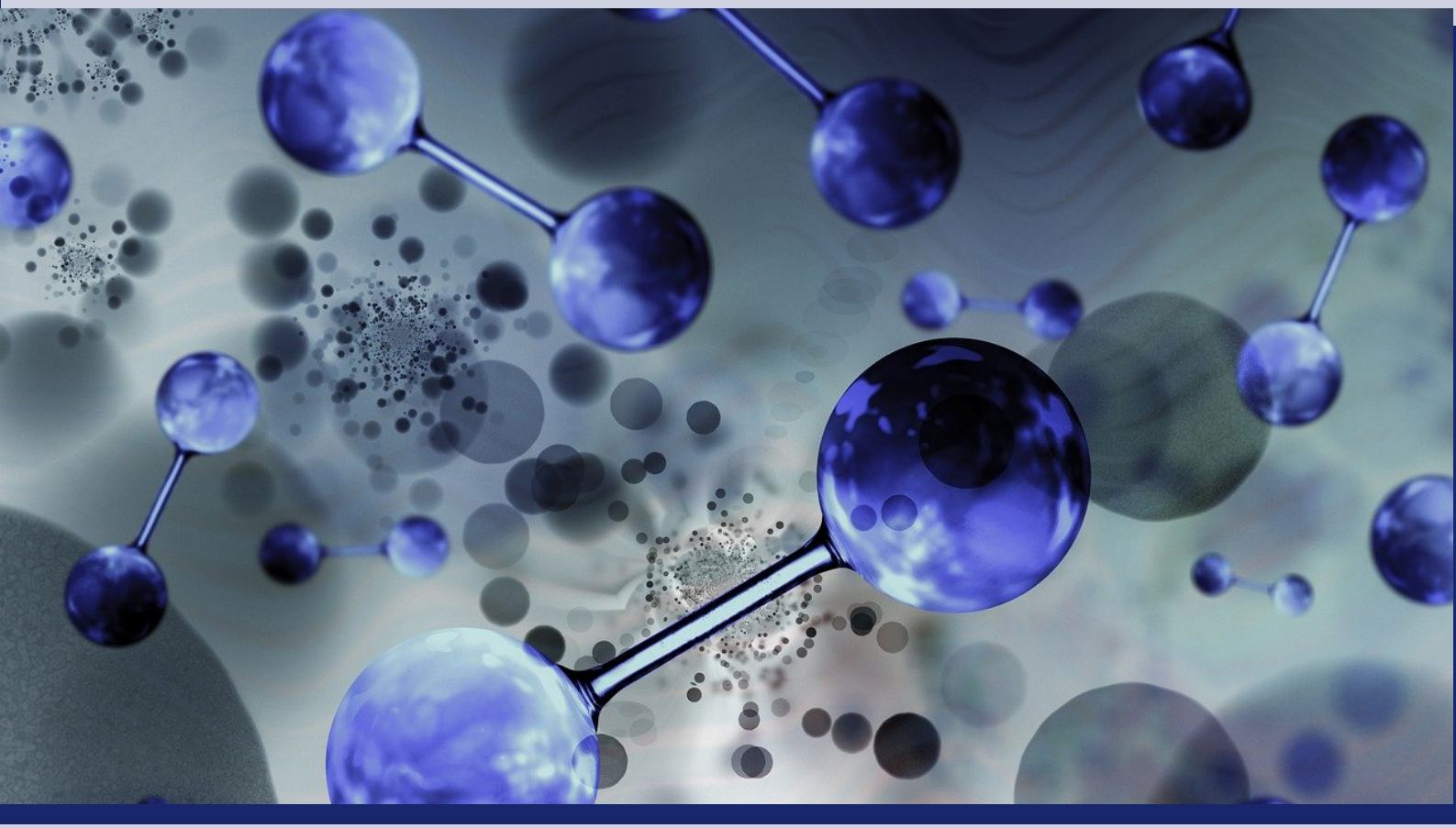
BEXPERIMENT

HYDROGEN H_2

Zukunftstechnologien zum Selbermachen

Low-cost Elektrolysezellen und Brennstoffzellen



Prof. Dr. Amitabh Banerji, Vivien Meggyes, Constantin Egerer

Universität Potsdam, Didaktik der Chemie

up TRANSFER GmbH

Universität Potsdam

Impressum

AG Banerji
Professur für Didaktik der Chemie
Universität Potsdam
Karl-Liebknecht-Str. 24-25
14476 Potsdam

Kontakt

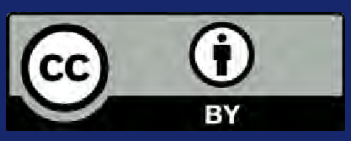
E-Mail: **info@boxperiment.de**

Website: **boxperiment.de**
banerji-lab.com

Design und Umsetzung:

Maxim Lüttich &
Amitabh Banerji

Copyright



CC 4.0, by Ag Banerji

Inhaltsverzeichnis

Teil 1: Elektrolyse von Wasser

Theoretischer Hintergrund (Zeitschriften Artikel)

Anleitung zum Experiment

Exemplarische Schülermaterialien

Notizen

Teil 2: Brennstoffzelle

Anleitung zum Experiment

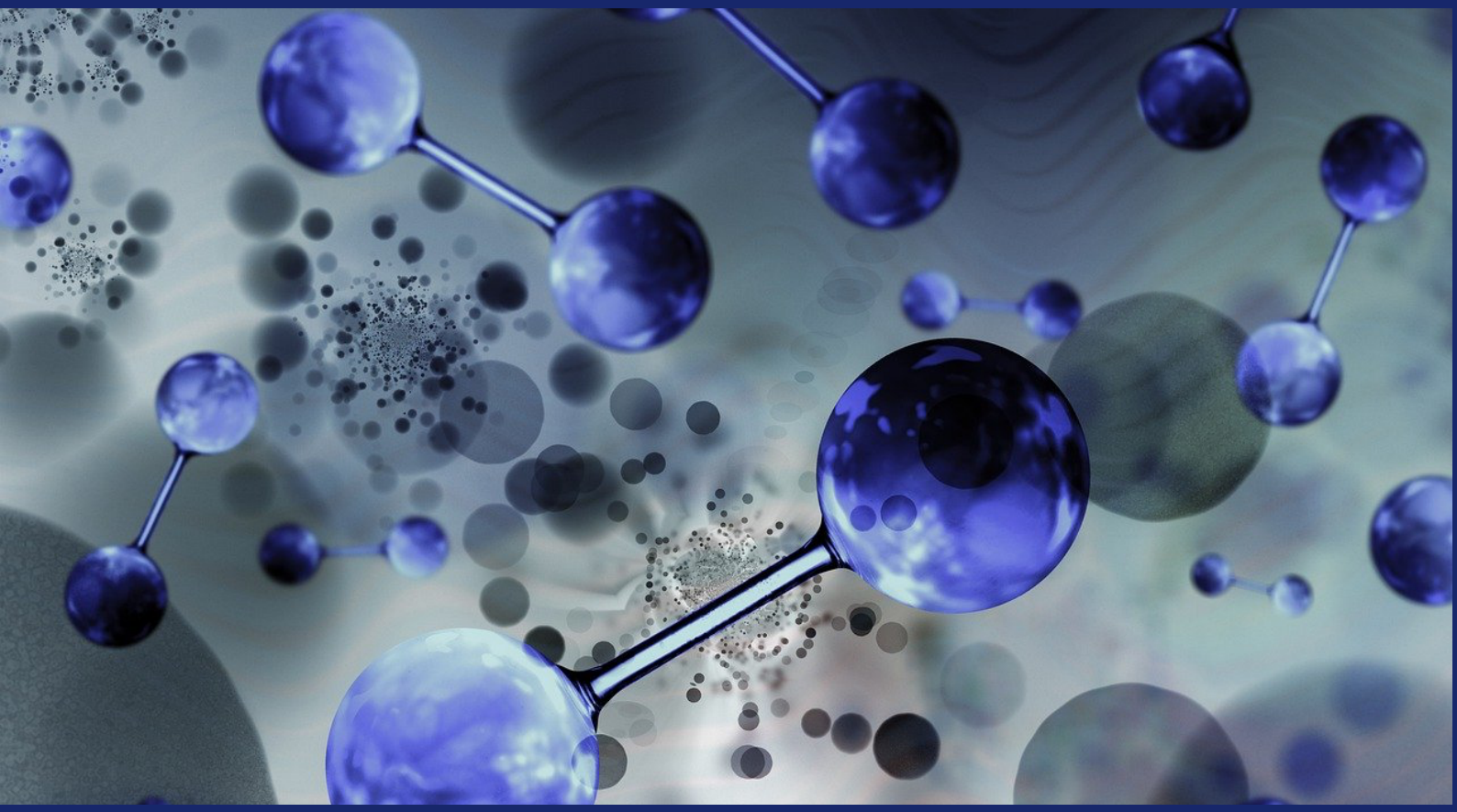
Exemplarische Schülermaterialien

Notizen

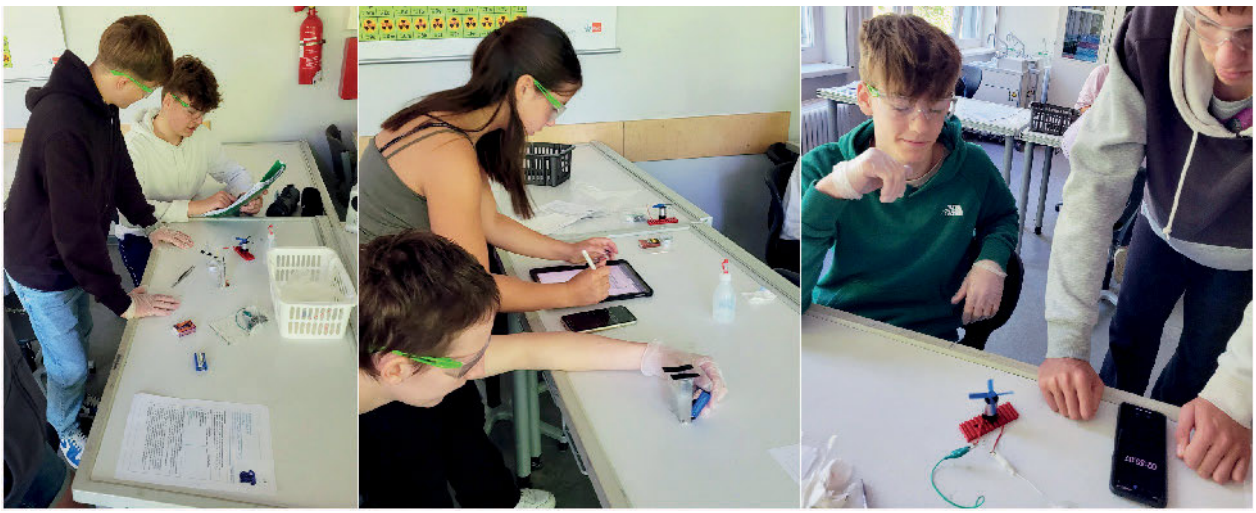
Weitere Informationen und Materialien

Teil 1

Elektrolyse von Wasser



Check for updates



Schüler:innen experimentieren mit elektrochemischen Zellen in einer Tic-Tac-Box; links bauen sie die Elektrolysezelle zusammen, in der Mitte elektrolysieren sie Wasser, und rechts messen sie, wie lange der Propellermotor mit einer geladenen Brennstoffzelle läuft.

Chemiedidaktik

Wasserstofftechnik in der Plastikbox

Aus Alltagsmaterialien können Schüler:innen eine Mini-Zelle zur Wasserelektrolyse und eine Brennstoffzelle selbst bauen und so deren Prinzipien kennen lernen. Solche und weitere Experimente entwickeln Wissenschaftler:innen im Projekt „TeachH_2 Tomorrow: low-cost Wasserstofftechnologien“.

Für den Klimaschutz und eine sichere Energieversorgung muss sich Deutschland unabhängig von fossilen Brennstoffen machen“, schreibt die Bundesregierung auf ihrer Website zur Nationalen Wasserstoffstrategie. Und weiter: „Wasserstoff als Ersatz für Erdgas, Öl und Kohle spielt dabei eine entscheidende Rolle. Die Bundesregierung fördert die Zukunftstechnologie im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie.”[1)]

Wasserstoff unterstützt bereits heute an bestimmten Stellen die Dekarbonisierung, zum Beispiel als Reduktionsmittel für die Metallindustrie, als Rohstoff für Chemie- und Raffinerieprodukte sowie als Kraftstoff für Fahrzeuge.[2)]

Noch bietet Wasserstoff keine optimale Lösung, da heute mehr als 95 Prozent der Produktion dieses Energieträgers mit der Verwendung fossiler Energiequellen einhergeht, und Wasserstoff mit Hilfe fossiler Brennstoffe gespeichert und transportiert wird.[3)] Dennoch richten sich die globalen Finanzmärkte darauf aus, in Techniken mit Wasserstoff zu investieren, da Solaranlagen und Windparks sowie eine Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut werden. Die Zahl der Wasserstofftankstellen hat sich in Deutschland in den letzten fünf Jahren fast verdoppelt.[4)] Europaweit gibt es inzwischen 254 Wasserstofftankstellen.[5)] Eine Studie zu internationalen Wasserstoffstrategien (in Kooperation mit dem Weltenergierat vom September 2020) prognostiziert für das Jahr 2050 einen weltweiten Wasserstoffbedarf von 9000 TWh oder 270 Millionen Tonnen Wasserstoff.[6)] China allein will im Jahr 2030 mindestens 35 Millionen Tonnen grünen Wasserstoff erzeugen.[7)]

Wasserstoffantriebe sind vor allem für LKW und Flugzeuge in der Diskussion, da batterieelektrische Antriebe dafür zu schwer und zu teuer sind.[8)] Neben der Brennstoffzelle werden Wasserstoff-Verbrennungsmotoren in Betracht gezogen. ▶

Diesen Beitrag haben **Vivien Meggyes** und **Amitabh Banerji** verfasst. Meggyes hat Chemie und Sport an der FU Berlin studiert und ist seit 2011 Lehrerin am Wald-Gymnasium Berlin. Seit 2020 promoviert sie zusätzlich bei Banerji und konzipiert Unterricht zu Themen der Energiewende. Amitabh Banerji ist Professor für Didaktik der Chemie an der Universität Potsdam. Er studierte Chemie und Informatik für das Lehramt promovierte nach dem Referendariat an der Universität Wuppertal. Von 2014 bis 2019 war er Juniorprofessor für Chemiedidaktik an der Universität zu Köln. Ein Arbeitsschwerpunkt ist die Digitalisierung in der Lehre der Naturwissenschaften.





Wasserstoff im Chemieunterricht

Für die Erfüllung des Pariser Abkommens zum Klimaschutz gilt es als unerlässlich, auf erneuerbare Energien und auf die Energiespeicherung in Form von Wasserstoff zurückzugreifen. Da wir außerdem seit dem Angriffskrieg auf die Ukraine über immer weniger fossile Brennstoffe verfügen, gewinnt Wasserstoff als Energieträger an Bedeutung. Es ist also im Sinne einer Grundbildung in Demokratie, dass wir solche Themen im Schulunterricht behandeln.

Wasserstoff ist Bestandteil des Curriculums, und es existieren zahlreiche Schulexperimente zu diesem Thema. Während der Coronapandemie waren Lehrkräfte jedoch gezwungen, auch das Thema Wasserstoff fernab von einem chemischen Schullabor zu unterrichten. Daher haben wir im Jahr 2020 innerhalb des Projekts Lab@Home[9] Schülerexperimente zu verschiedenen Themen entwickelt, die Jugendliche in der heimischen Küche durchführen können.

Zum Thema Wasserstoff entwickelten wir einen Low-cost-Elektrolyseur in einer Tic-Tac-Dose, den wir später zu einer Low-cost-Brennstoffzelle erweitert haben. Beide Zellen und die dahinterstehenden Konzepte stellen wir hier vor.

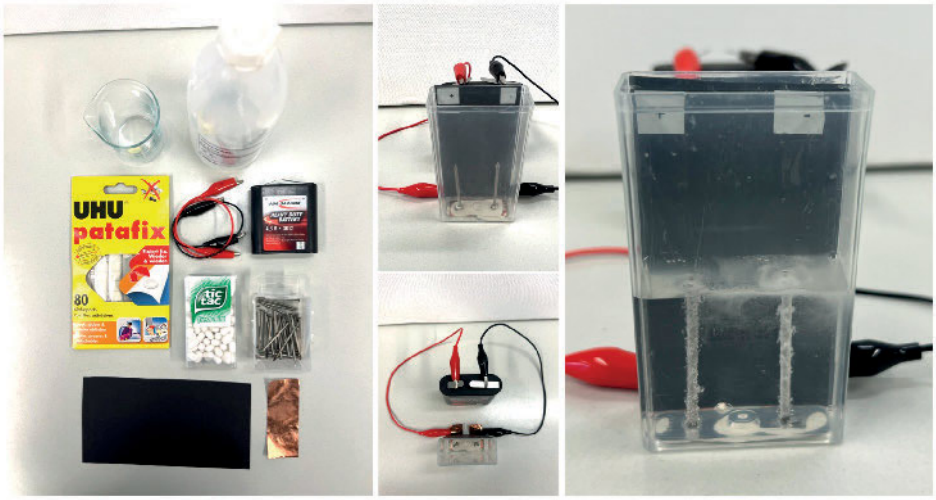


Abb. 1. Die Tic-Tac-Elektrolysezelle; links das Material, Mitte: fertige Tic-Tac-Elektrolysezelle von vorne und von oben; rechts: mit Elektrolytlösung in Betrieb mit einer Spannung von 4,5 V.

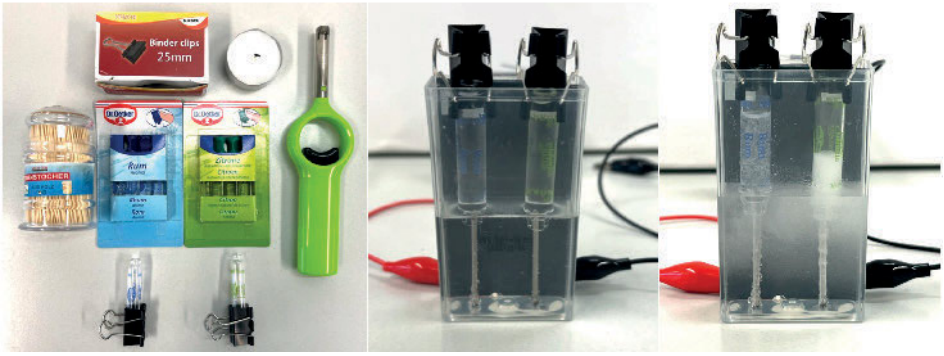


Abb. 2. Links: Material für den Nachweis der Reaktionsgase in der Tic-Tac-Elektrolysezelle (links). Mitte: Pneumatische Vorrichtung zum Auffangen der Reaktionsgase in Glasröhrchen (Backaromafläschchen); rechts: Füllstand der beiden Fläschchen nach etwa einer Minute Elektrolyse mit einem Volumenverhältnis von Sauerstoff zu Wasserstoff von 1:2.

Grundlagen: Elektrochemie

Die Erschließung der Wasserstofftechnologien lässt sich in zwei Grundbausteine unterteilen:

- die Gewinnung des Wasserstoffs (zum Beispiel durch Elektrolyse) und
- die elektrochemische Umsetzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle (auch als kalte Verbrennung bezeichnet).

Da Wasserstoff in elementarer Form auf der Erde nur in Spuren vorkommt, muss dieser aus einer chemischen Verbindung gewonnen werden, also etwa durch die Elektrolyse von Wasser:

$$2\,H_2O\,(l) \rightarrow 2\,H_2\,(g) + O_2\,(g)$$

$$\Delta H = +286\ kJ{\cdot}mol^{-1}$$

Da bei der Wasserelektrolyse elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt wird und dabei Reaktionsgase entstehen, entspricht sie der Energiespeicherung im Sinne von „Power to Gas". Bei reversiblen Brennstoffzellen entspricht die Erzeugung und Speicherung der Gase dem Ladevorgang.

Je nachdem, aus welchen Quellen die elektrische Energie stammt, ist die Elektrolyse mehr oder weniger nachhaltig. So spricht man von „grünem Wasserstoff",[10] wenn zum Beispiel Photovoltaik oder Windkraft den Strom für die Elektrolyse liefern.[11]

Wasser lässt sich auch photokatalytisch in seine Elemente zerlegen – zu diesem Thema gibt es ebenfalls fachdidaktische Konzepte.[12]

Um die in Wasserstoff gespeicherte chemische Energie nutzbar zu machen, kann dieser verbrannt werden, zum Beispiel in einem Verbrennungsmotor, und die Verbrennungswärme kann genutzt werden. Einen höheren Wirkungsgrad hat die Brennstoffzelle, die aus der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie erzeugt.

Je nach Anwendung sind unterschiedliche Materialien für Elektroden,[13] Membranen,[14] Elektrolyte,[15–16] Katalysatoren[17] und anderes zu entwickeln und auszuwählen.

18680054, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nadc.20234134091 by Universitaetsbibliothek, Wiley Online Library on [12/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

1868078x, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nadc.20233413091 by Universitaetsbibliothek, Wiley Online Library on [12/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

Das Versuchsrepertoire erweitern

Wasserstofftechnologien haben mehrere Fachdidaktiken für den naturwissenschaftlichen Unterricht erschlossen; Beispiele sind:

- die Methanisierung, Power-to-Gas,[18)]
- ein Modellversuch zur Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle,[19)]
- Eine „No-cost-Brennstoffzelle".[20)]

Mit diesem Beitrag möchten wir das didaktische Repertoire durch ein kostengünstiges, schülerorientiertes Experimentierset erweitern, mit dem sich Wasserstofftechnologien niederschwellig in den Unterricht einbinden lassen. Die ausführlichen Beschreibungen stehen auf der Projektwebseite[21)] von TeacH$_2$ Tomorrow (siehe QR-Code).

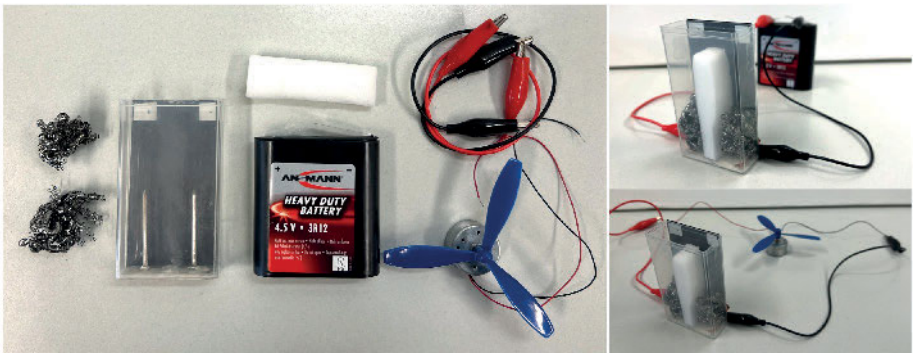


Abb. 3. Erweiterung der Tic-Tac-Elektrolysezelle zu einer aufladbaren Brennstoffzelle; links: Material; rechts Aufbau der Brennstoffzelle im Ladezustand (oben, hier der Übersicht halber ohne Elektrolytlösung) und im Entladezustand (unten, ohne Elektrolytlösung).

Elektrolyse in der Tic-Tac-Dose

In Anlehnung an Oetken et al.[22–23)] verwendet unsere Elektrolysezelle eine Tic-Tac-Dose als Reaktionskammer, in die zwei Edelstahlnägel als Elektroden von unten eingesteckt und mit Klebemasse (zum Beispiel Patafix) abgedichtet werden (Abbildung 1). Zwei Streifen Kupferfolie fungieren als Kontakte zu den Elektroden. Als Elektrolytlösung dient 1-molare Natronlauge und als Spannungsquelle eine Batterie (zum Beispiel mit 4,5 V). Die Membran entfällt aus didaktischen Gründen, da das Experiment ohne sie einfacher und übersichtlicher ist. Ein Video des Bauvorgangs im Detail ist auf der Projektwebseite abrufbar.[21)]

Die Reaktionsgase werden in Backaromafläschchen aufgefangen, die zunächst mit Elektrolytlösung gefüllt sind (Abbildung 2). Aufgrund der kleinen Öffnung der Fläschchen und der Oberflächenspannung des Wassers läuft die Lösung nicht aus und die Fläschchen lassen sich in Ruhe über die Elektroden stülpen. Zwei Foldbackklammern fixieren die Fläschchen.

Die aufgefangenen Gase lassen sich mit der Knallgasprobe an einem Teelicht und der Glimmspanprobe mit einem Zahnstocher nachweisen. Videos hierzu stehen ebenfalls auf der Projektwebseite.[21)]

Umbau zur Brennstoffzelle

Die Elektrolysezelle in der Tic-Tac-Dose lässt sich mit wenigen Handgriffen zu einer Modell-Brennstoffzelle umfunktionieren. Hierzu wird mit einer Pinzette ein Stück Spülschwamm oder Schmutzradierer als Membran zwischen beiden Nägeln platziert (Abbildung 3). Die Membran trennt beide Teilzellen und verhindert Kurzschlüsse. Dann werden zwei kleine Stücke eines Edelstahlschwamms (Topfreiniger) über beide Nägel gestülpt. Diese vergrößern die Oberfläche der Elektroden, zudem speichern die Zwischenräume der Schwämme die entstehenden Gasbläschen während des Ladevorgangs. Dadurch stehen die Gase in den Elektroden für den Betrieb der Brennstoffzelle (Entladung) zur Verfügung.

Die Tic-Tac-Brennstoffzelle erreicht eine Leerlaufspannung von etwa 1,4 V und Stromstärken von zirka 25 mA. Schließt man einen kleinen Elektromotor (zum Beispiel Modell RF300CAS von sol-expert-group.de) als Verbraucher an, lassen sich stabile Klemmwerte von zirka 600 mV und 10 mA erreichen.

Mit dem Elektromotor lässt sich die Rückverstromung zeigen und so die Elektromobilität verbildlichen. Auch für die Brennstoffzelle steht ein Video auf der Projektwebseite.[21)]

Die Tic-Tac-Brennstoffzelle kann auch über eine Solarzelle geladen werden. Dies sensibilisiert die Schü-

LEBENSWERKE IN DER CHEMIE
ausgezeichnet von der stiftung buchkunst · eines der schönsten deutschen bücher
Ausgezeichnete Buchreihe
NEU 2023:
Franz Effenberger, Gerhard Ertl (Engl. ed.) und Horst Kessler
twitter.com/livesinchem
HIER BESTELLEN:
l-i-c.org/order
GDCh FACHGRUPPE GESCHICHTE DER CHEMIE
L-I-C.ORG

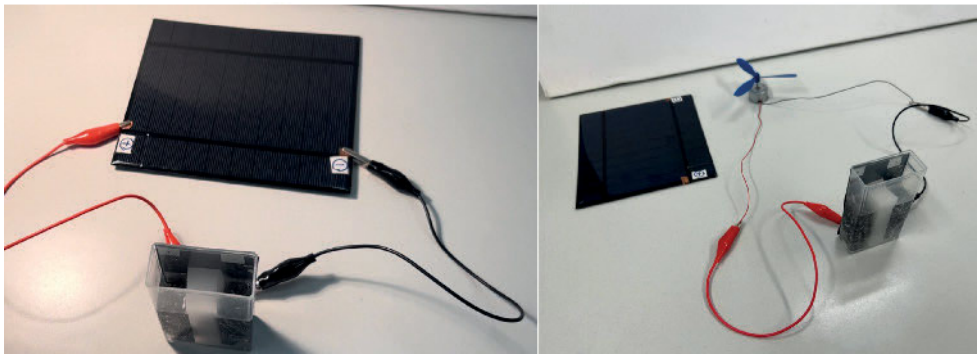


Abb. 4. Aufladen der Brennstoffzelle mit einer Solarzelle (U = 6 V) und Bestrahlung mit einem 150-Watt-Halogenstrahler (links). Entladen der Brennstoffzelle durch Betrieb mit einem Propellermotor (rechts).

ler:innen für die Problematik der Stromerzeugung. Abbildung 4 zeigt den Lade- und Entladeprozess unserer Solar-betriebenen Tic-Tac-Brennstoffzelle. Ein Video hierzu ist auf der Projektwebseite abrufbar.[21)]

Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Wasserstoff-Experimentierset kommt mit Haushaltsmaterialien aus und lässt sich einfach und schnell zusammenbauen. Die Elektrolysekammer lässt sich dann mit wenigen Handgriffen in eine Brennstoffzelle umbauen, ohne das System zu wechseln. Dies fördert das Verständnis bei den Schüler:innen, und sie behalten die Übersicht.

Insgesamt entsprechen die Experimente dem modernen Verständnis von Experimentalunterricht im Sinne der Low-Prinzipien: Sie sind preiswert (low cost), risikoarm (low risk), der Aufbau ist klein (low scale), die Experimente gehen schnell (low time) und brauchen keine aufwendige Technik (low tech). Wie die Pilotversuche mit einer 10. Klasse am Wald-Gymnasium Berlin (Foto Seite 15) gezeigt haben, sind die Experimente schülergerecht, liefern reproduzierbare Ergebnisse und motivieren die Lernenden.

Im TeachH_2-Tomorrow-Projekt arbeiten wir nun an einer Unterrichtsreihe, die mit den Experimenten die Energiewende in den Mittelpunkt rückt und eine thematische Brücke für den Übergang von der Sekundarstufe I in die Oberstufe bildet. Die Reihe wird aktuell implementiert und evaluiert.

Zudem ist geplant, Lehrkräfte fortzubilden und das Experimentierset über unsere Plattform boxperiment.de anzubieten. Der geplante Experimentierkoffer soll neben den Experimentiermaterialien Begleitmaterialien wie Arbeitsblätter und Anleitungen enthalten. Updates und Termine für Fortbildungen erscheinen auf der Projektwebseite.[21)] ■

Wir danken dem Verband der Chemischen Industrie (VCI, Nordost) für die Förderung von Lehrkräftefortbildungen zu TeachH_2 Tomorrow sowie dem Wald-Gymnasium Berlin für die Unterstützung der Pilotierungen.

Ein Schema der Vorgänge bei der elektrolytischen Wasserspaltung und in einer Brennstoffzelle gibt es als Supporting Information in der Online-Version des Artikels unter gdch.de/doi/10.1002/nadc.20234134091

AUF EINEN BLICK

Wasserstoff als Energieträger ist vor dem Hintergrund von Klimakrise, Klimaschutz und Versorgungssicherheit ein Thema für den Schulunterricht.

Eine Elektrolysezelle für die Wasserspaltung können Schüler:innn aus einer Tic-Tac-Dose aufbauen und zu einer wiederaufladbaren Brennstoffzelle erweitern.

Beim Experimentieren entstehen Sauerstoff und Wasserstoff in Mengen, die sich zwar durch Knallgasreaktion und Glimmspanprobe nachweisen lassen, aber so klein sind, dass kaum Gefahr von ihnen ausgeht.

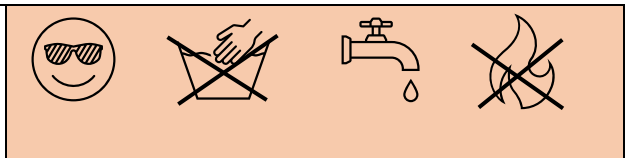
1) *bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/wasserstoff-technologie-1732248 (Stand 3.2022)*
2) *F. Ausfelder, A. Förster,* Nachr. Chem. *2022, 70(9), 48–29*
3) *E. Taibi, R. Miranda (IRENA), W, Vanhoudt, T. Winkel, J.-C. Lanoix, F. Barth,* Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition, Hinicio *2018, 13*
4) *de.statista.com/statistik/daten/studie/820836/umfrage/anzahl-der-wasserstoff-tankstellen-in-deutschland/; (Stand 3.2023*
5) *Ecemento.de, https://ecomento.de/2023/02/07/weltweit-130-neue-wasserstoff-tankstellen-im-jahr-2022-karten/ (Stand 3.2023)*
6) *U. Albrecht, U. Bünger, J. Michalski, T. Raksha, R. Wurster, J. Zerhusen,* Deutschland e.V. Executive Summary *September 2020, 4*
7) *R. Schmid, X. Xiong,* Nachr. Chem. *2022, 70(11), 38*
8) *energie-experten.ch/de/mobilitaet/detail/welche-rolle-spielt-wasserstoff-in-der-mobilitaet-der-zukunft.html (Stand 3.2023)*
9) *banerji-lab.com/labhome/ (Stand 3.2023)*
10) *bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html (Stand 3.2023)*
11) *umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluessel-im-kuenftigen-energiesystem#Rolle (Stand 3.2023)*
12) *R. Krämer, M. Tausch, Chemkon 2022, 29(S1), 345–348*
13) *wasserstoff-leitprojekte.de/grundlagenforschung/brennstoffzellen (Stand 3.2023)*
14) *J. Thomann, L. Edenhofer, L. Hank et al., HYPAT Working Paper 01/2022. Fraunhofer ISI, Karlsruhe 2022*
15) *K. Zehbe, A. Lange, A. Taubert, ACS Energy Fuels 2019, 33, 12, 12885–12893*
16) *Z. Wojnarowska, A. Lange, A. Taubert, M.Paluch,* ACS Applied Materials & Interfaces *2021,* 13*(26), 30614–30624*
17) *iap.fraunhofer.de/de/Pressemitteilungen/2021/neue-katalysatoren-fuer-brennstoffzellen-effizient-und-mit-konstant-hoher-qualitaet.html (Stand 3.2023)*
18) *I. Rubner, T. Grofe, M. Oetken,* CHEMKON *2017,* 24*(1), 7–12*
19) *C. Pöhle, I. Rubner, M. Oetken, W. Jansen,* Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule *2015,* 64*(8), 19–21*
20) *M. Tausch, C. Bohrmann-Linde, M. Seesing,* Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule *2002,* 51*(6), 43–44*
21) *banerji-lab.com/teach2-tomorrow/ (Stand 3.2023)*
22) *M. Hasselmann, M. Oetken,* Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule *2013,* 62*(5), 19–24*
23) *D. Lücke, M. Oetken,* CHEMKON *2022,* 29*(1), 36–40*

18680054, 2023, 6, Downloaded from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nadc.20234134091 by Universitaetsbibliothek, Wiley Online Library on [12/06/2023]. See the Terms and Conditions (https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions) on Wiley Online Library for rules of use; OA articles are governed by the applicable Creative Commons License

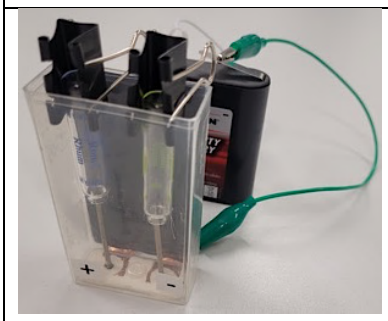
Elektrolyse in der TicTac-Dose

SICHERHEITSHINWEISE:

Schutzbrille und Schutzhandschuhe tragen!
Achtung: Natronlauge ätzend!
Bei Hautkontakt mit viel Wasser abwaschen!
Kein offenes Feuer in der Nähe der Geräte!



1. Durchführung der Elektrolyse



Vor dem Experiment: Steht die Zelle fest auf dem Tisch?

Durchführung:

- Befülle die TicTac-Dose bis zur Markierung und die beiden Aromafläschchen vollständig mit Natronlauge.
- Setze die Aromafläschchen so wie im Bild gezeigt auf die Nägel.
- Schließe die Batterie an die Zelle (am Kupferkontakt) an. Achte auf die korrekte Polung.
- Starte gleichzeitig die Stoppuhr zum Messen der Zeit!



Während des Experiments:
Notiere die Zeit, die jedes Fläschchen benötigt, um vollständig mit Gas befüllt zu werden. Beobachte!

Beobachtung:

Zeit am Pluspol: _____ **Zeit am Minuspol:** _____

2. Nachweise des Reaktionsgases am Minuspol



Vor dem Experiment:
Entferne kopfüber das vollständig mit Gas befüllte Aromafläschchen aus der Zelle und streife den Flüssigkeitsfilm mit Hilfe des Q-Tips ab!



Achtung: Finger weg von der Flamme!

<u>Knallgasprobe:</u>
Führe das Aromafläschchen von oben schräg an das entzündete Teelicht heran wie auf dem Bild gezeigt!

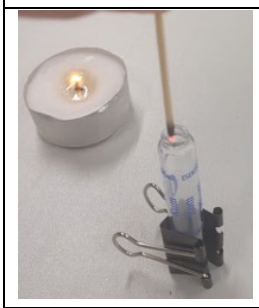
Beobachtung:

_____

3. Nachweis des Reaktionsgases am Pluspol



Vor dem Experiment:
Entferne kopfüber das vollständig mit Gas befüllte Aromafläschchen aus der Zelle und streife den Flüssigkeitsfilm mit Hilfe des Q-Tips ab! Halte nun die Öffnung zu und stelle das Fläschchen auf den Tisch.



<u>Glimmspanprobe:</u>
Entzünde den Zahnstocher am Teelicht und puste ihn aus, sodass er noch glimmt. Führe den glimmenden Stab ruhig und gerade in das Fläschchen!

Beobachtung:

_____

Aufgabe 1) Vervollständige den Lückentext zur Elektrolyse:

Bei der Elektrolyse wird Wasser in seine Elemente _____ und _____ gespalten. Hierbei wird elektrische Energie über die Batterie zugeführt und in _____ Energie umgewandelt.

Aufgabe 2) Formuliere die Wortgleichung für die Elektrolyse:

_____ ⟶ _____ ✚ _____

Energiebilanz der Reaktion:

Der Ausgangsstoff (Edukt) Wasser hat verhältnismäßig wenig chemische Energie in sich gespeichert. Daher ist Wasser für uns kein Energieträger. Die Produkte Wasserstoff und Sauerstoff hingegen haben viel chemische Energie gespeichert. Wasserstoff wird daher als Energieträger bezeichnet. Sauerstoff wird als Reaktionspartner benötigt, um die chemische Energie freizusetzen.

Aufgabe 3) Vervollständige das Energiediagramm für die Elektrolyse:



Hinweis: Zeichne das Energiediagramm so, dass links das Edukt Wasser steht und rechts die Produkte Wasserstoff und Sauerstoff.

Merke: Bei der Knallgasprobe verläuft die Reaktion umgekehrt ab: Wasserstoff und Sauerstoff reagieren zu Wasser. Die chemische Energie wird hier wieder umgewandelt und in Form von Bewegungsenergie, Lichtenergie und Wärmeenergie freigesetzt.

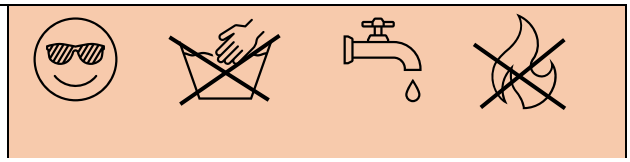
Das Energie-Glossar:

Wärmeenergie (auch thermische Energie) ist uns aus dem Alltag bekannt. Wir nutzen Sie z.B. zum Kochen und Heizen.
Bewegungsenergie (auch kinetische Energie) kennen wir ebenfalls aus dem Alltag, wenn wir z.B. uns selbst bewegen und damit Arbeit verrichten oder wenn z.B. ein Stein den Berg herabrollt.
Lageenergie (auch potenzielle Energie) hat ein Objekt, wenn es weiter oben gelegen ist und somit beim Herunterfallen seine Energie in Form von Bewegungsenergie abgibt.
Chemische Energie ist in verschiedenen Stoffen enthalten. Brennstoffe haben viel chemische Energie in sich gespeichert.
Lichtenergie ist uns vor allem von der Sonne bekannt. Das Sonnenlicht kann z.B. mithilfe von Solarzellen umweltfreundlich in elektrische Energie umgewandelt werden.
Elektrische Energie ist sehr nützlich für uns Menschen, da sie über Leitungen transportiert und sehr effizient in fast alle anderen Energieformen umgewandelt werden kann.

Zusatzexperiment Elektrolyse

SICHERHEITSHINWEISE:

Schutzbrille und Schutzhandschuhe tragen!
Achtung: Natronlauge ätzend!
Bei Hautkontakt mit viel Wasser abwaschen!
Kein offenes Feuer in der Nähe der Geräte!



Wer erzeugt den lautesten Knall?

Aufgabe:
Du konntest sicherlich beobachten, dass die Knallgasprobe mit dem Wasserstoff befüllten Aromafläschchen einen dumpfen „Ploppton“ zeigte. Dies liegt daran, dass zu wenig Sauerstoff zugegen war, um einen Knall zu erzeugen. Überlege Dir eine Variation des Experimentes mit denselben Materialien, um einen lauteren Knall bei der Knallgasprobe zu erzeugen.

Tipp: Schaue Dir hierzu die Reaktionsgleichung der Verbrennung von Wasserstoff an.

$$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g)$$

Skizziere deine Idee

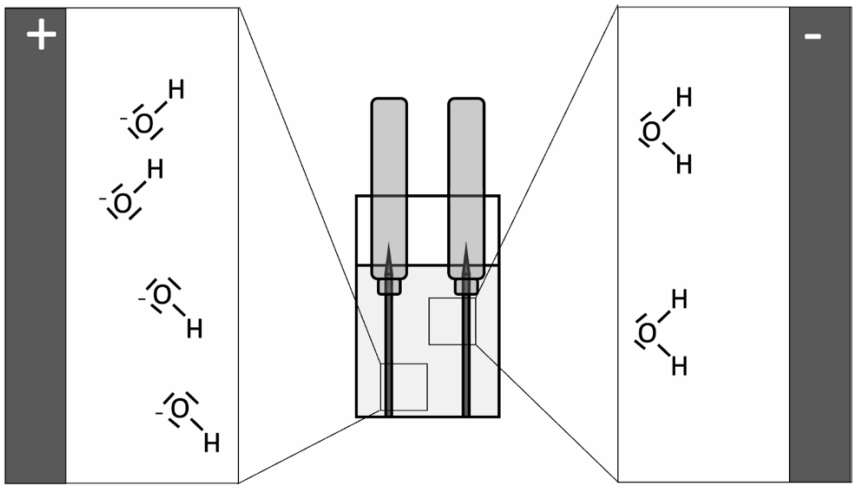
Hast Du eine Idee? Dann zeichne dein Vorgehen mit Hilfe einer Skizze vom experimentellen Aufbau:
Hinweis: Falls Du keine Idee hast, kannst Du von der Lehrkraft eine Hilfekarte bekommen.

Beobachtung:

Auswertung:

Elektrolyse in der TicTac-Dose

Zusatzaufgabe: Reaktionsgleichungen der Redoxreaktionen in der Elektrolysezelle



Animation der Elektrolyse auf der Teilchenebene

Aufgabe 1)
Scanne den QR-Code und schaue Dir gemeinsam mit deiner Gruppe die Animation auf der Teilchenebene an. Kläre Fragen mit deinen Mitschülern oder dem Betreuer.

Aufgabe 2)
Vervollständige nun mithilfe der Teilchenanimation die Teilgleichungen für die **Reduktion** (am Minuspol), die **Oxidation** (am Pluspol) sowie die **Gesamtreaktion**. *Hinweis: Lasse die Aggregatzustände bei den Teilgleichungen weg. Für die Gesamtgleichung sollten die Aggregatzustände jedoch mit notiert werden.*

Teilgleichung Reduktion:

Teilgleichung Oxidation:

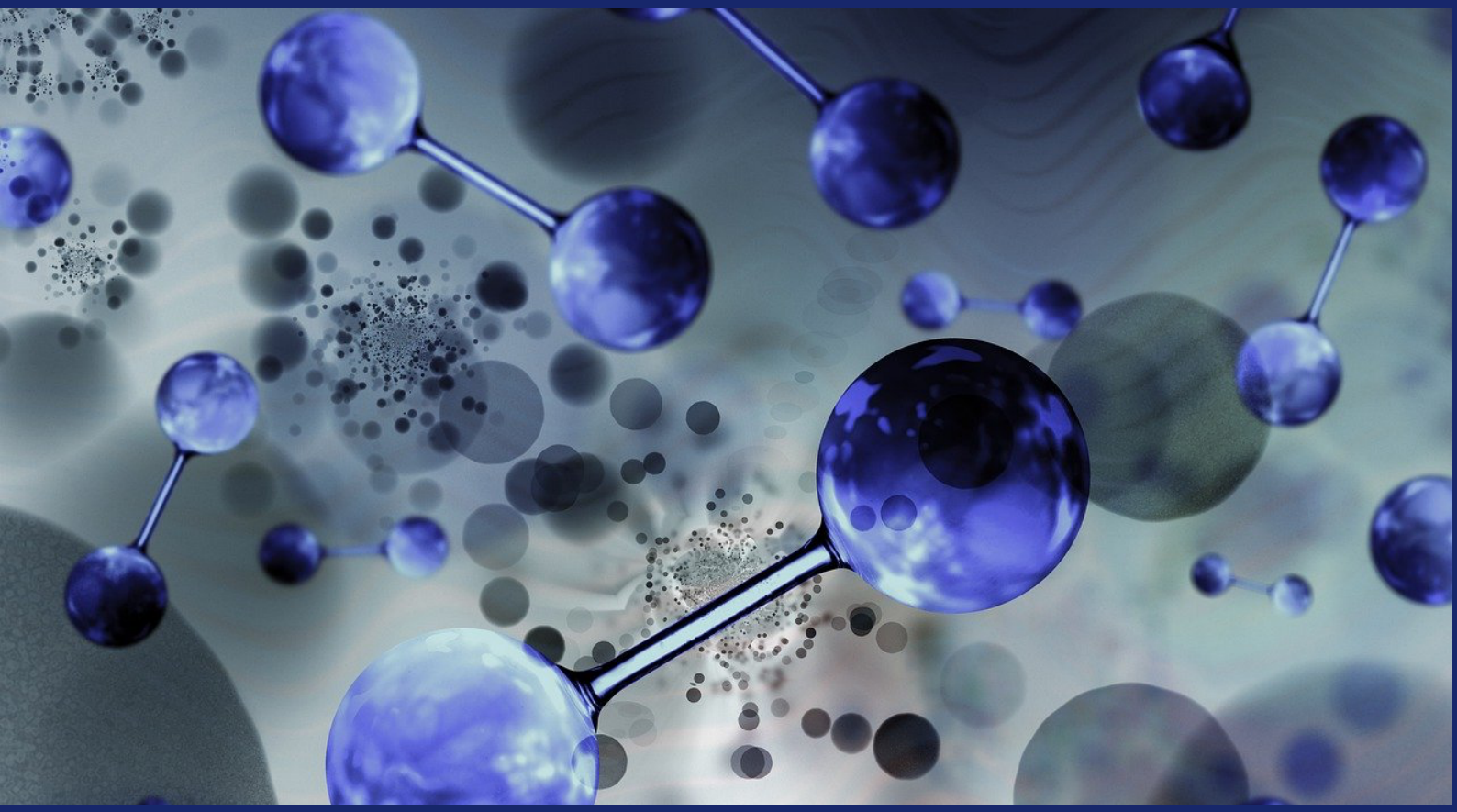
Gesamtgleichung:

Notizen



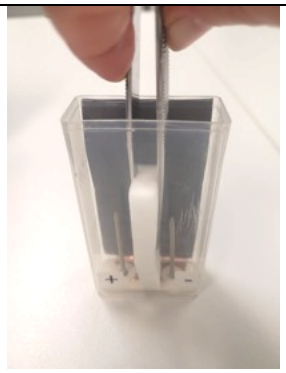
Teil 2

Brennstoffzelle



Brennstoffzelle in der TicTac-Dose

1. Umbau der Tic-Tac-Zelle zu einer Brennstoffzelle



Vor dem Experiment:
Sicherheitshinweise: Natronlauge darf weder auf Haut, Augen noch auf den Motor und Kabel gelangen!

Umbau:
Entleere die Tic-Tac-Zelle als erstes. Führe nun mit Hilfe einer Pinzette die Trennwand (Schwammstück) zwischen beide Nägel ganz bis zum Boden der Zelle, sodass diese die Zelle in zwei Hälften trennt! Die Trennwand sollte am Boden der Zelle aufliegen wie im Foto gezeigt.

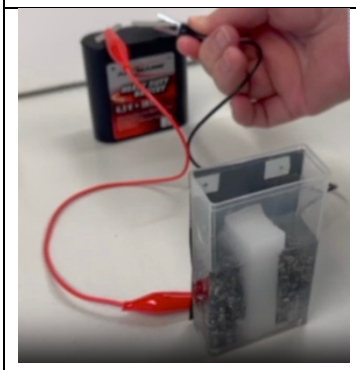


Stülpe nun die beiden Stückchen Edelstahlwolle über die Nägel mit Hilfe der Pinzette (siehe Foto), sodass diese um die Nägel herum sind, aber das jeweils andere Stück Edelstahlwolle nicht berühren. Befülle nun die Zelle mit der Natronlauge, so dass beide Stücke Edelstahlwolle mit der Flüssigkeit bedeckt sind.

Fertig ist die Brennstoffzelle!

Bereite nun den Timer vor, um die Zelle eine Minute lang zu laden!

2. Laden der Brennstoffzelle nach dem Prinzip der Elektrolyse

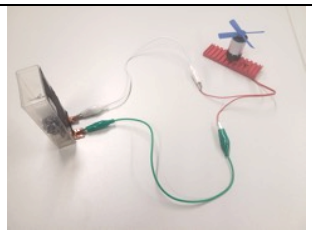


Durchführung:
Klemme nun die Batterie an, um die Brennstoffzelle zu laden und starte den Timer. Lade die Brennstoffzelle eine Minute lang und beobachte. Klemme nach einer Minute die Batterie wieder ab.

Beobachtung an der Edelstahlwolle:

Pluspol	Minuspol

3. Anschließen eines Motors und Entladen der Brennstoffzelle



Durchführung:
Miss die Zeit ab dem Anschließen des kleinen Motors (als Verbraucher) an die Brennstoffzelle!
Wie lange dreht sich der Propeller?

Zeit:_____

4. Laden der Brennstoffzelle mit der Solarzelle für „Grünen Wasserstoff“

Wiederhole die Schritte 2 und 3, nur verwende diesmal statt der Batterie eine nachhaltige Energiequelle wie Lichtenergie oder Windenergie. Weitere Hinweise hierzu findest Du im Zusatzexperiment.

Aufgabe 1) Auswertung des Ladevorgangs: Das Power-to-Gas-Prinzip

Begriffe: chemische Energie, elektrische Energie



Beim Laden der Brennstoffzelle greifen wir auf die Elektrolyse zurück. Wir ersetzen die Batterie im Schritt 4. durch eine nachhaltige Energiequelle: die Elektrolyse wird hier mit Hilfe von sog. ***grünen Strom*** aus erneuerbaren Energien (z.B. Sonnenlicht) betrieben. Die Lichtenergie der Sonne (bzw. einer Lampe) wird durch die Solarzelle erst in _____ _____ und dann mit Hilfe der entstehenden Reaktionsgase als _____ _____ gespeichert.

Dieses Prinzip heißt ***Power-to-Gas*** (power-engl. für Strom). Überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energiequellen kann so in Form von Wasserstoffgas gespeichert werden. Die entstandenen Gase werden bei unserem Experiment aufgefangen und in den Drähten der Edelstahlwolle eingelagert.

Aufgabe 2) Auswertung des Anschließens des Motors: Die kalte Verbrennung

Begriffe: Wärme, Motor, elektrischer Energie, Bewegungsenergie

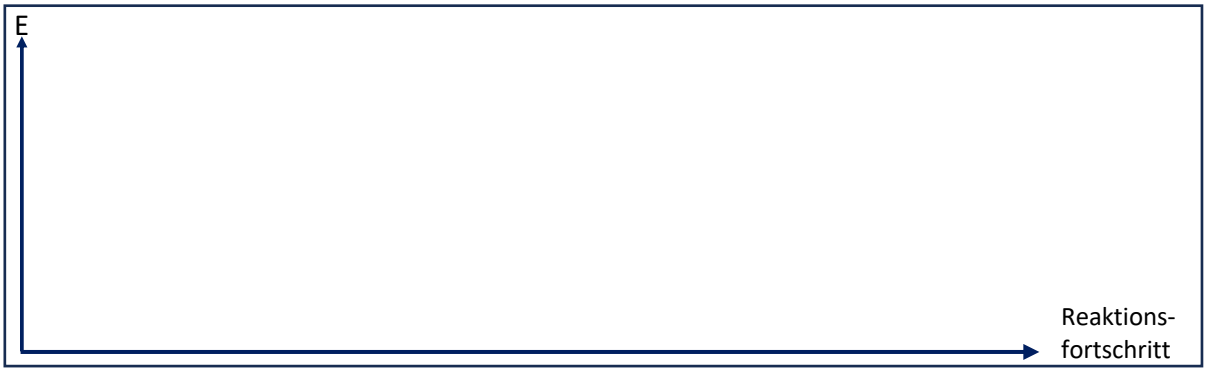


Im Schritt 3 kehren wir den Prozess um und gewinnen aus den Reaktionsgasen, welche sich in der Edelstahlwolle befinden, wieder Wasser - unter Abgabe von _____ _____. Dies wird auch als sog. kalte Verbrennung bezeichnet, da die Energie als elektrischer Strom, statt _____ freigesetzt wird. Dieser betreibt in unserem Fall den _____ und wird dabei in _____ umgewandelt.

Aufgabe 3) Formuliere die Wortgleichung für die Brennstoffzelle:

_____ + _____ ⟶ _____

Aufgabe 4) Vervollständige das Energiediagramm für die Brennstoffzelle:

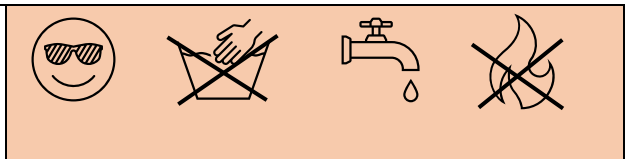


Hinweis: Zeichne das Energiediagramm so, dass links die Edukte Wasserstoff und Sauerstoff stehen und rechts das Produkt Wasser.

Zusatzexperiment Brennstoffzelle

SICHERHEITSHINWEISE:

Schutzbrille und Schutzhandschuhe tragen!
Achtung: Natronlauge ätzend!
Bei Hautkontakt mit viel Wasser abwaschen!
Kein offenes Feuer in der Nähe der Geräte!



Wie erzeugt man grünen Wasserstoff?

Aufgabe:
Du hast bislang die Brennstoffzelle mit einer Batterie aufgeladen. Die Batterie ist keine nachhaltige Energiequelle, da Sie viele Ressourcen kostet und nach Gebrauch aufwendig entsorgt werden muss. Sie steht in unserem Experiment sinnbildlich für ein Kraftwerk, das auf fossile Energieträger (z.B. Kohle, Erdgas) basiert. Um „grünen Wasserstoff“ zu synthetisieren, muss die Elektrolyse (= Ladevorgang) mit erneuerbaren Energiequellen (z.B. Windenergie und Solarenergie) betrieben werden. Überlege Dir hierzu eine Variation vom Experiment.

Tipp: Du benötigst zusätzliches Material, das Du bei der Lehrkraft erhältst.

Skizziere deine Idee

Hast Du eine Idee? Dann zeichne dein Vorgehen mit Hilfe einer Skizze vom experimentellen Aufbau:
Hinweis: Falls Du keine Idee hast, kannst Du von der Lehrkraft eine Hilfekarte bekommen.

Beobachtung:

Auswertung:

Lösung zum Zusatzexperiment „Grüner Wasserstoff“:
Du musst die Batterie durch eine der folgenden erneuerbaren Energiequellen ersetzen:

1) **Solarenergie:**
   Klemme eine Solarzelle mit der korrekten Polung (Minuspol an Minuspol und Pluspol an Pluspol) an die Brennstoffzelle an. Leg die Solarzelle so vor dich, dass die Vorderseite zu sehen ist. Bestrahle die Solarzelle mit der Taschenlampenfunktion eueres Handys oder einer starken Taschenlampe. Beobachtet ganz genau, ob Du eine Gasentwicklung an den Elektroden sehen kannst. Lade die Brennstoffzelle mit Solarenergie für 1 Minute und miss die Zeit, wie lange sich der Motor anschließend dreht: _____.
   Tipp: Wenn die Sonne scheint, versuche die Solarzelle in das Sonnenlicht zu halten.

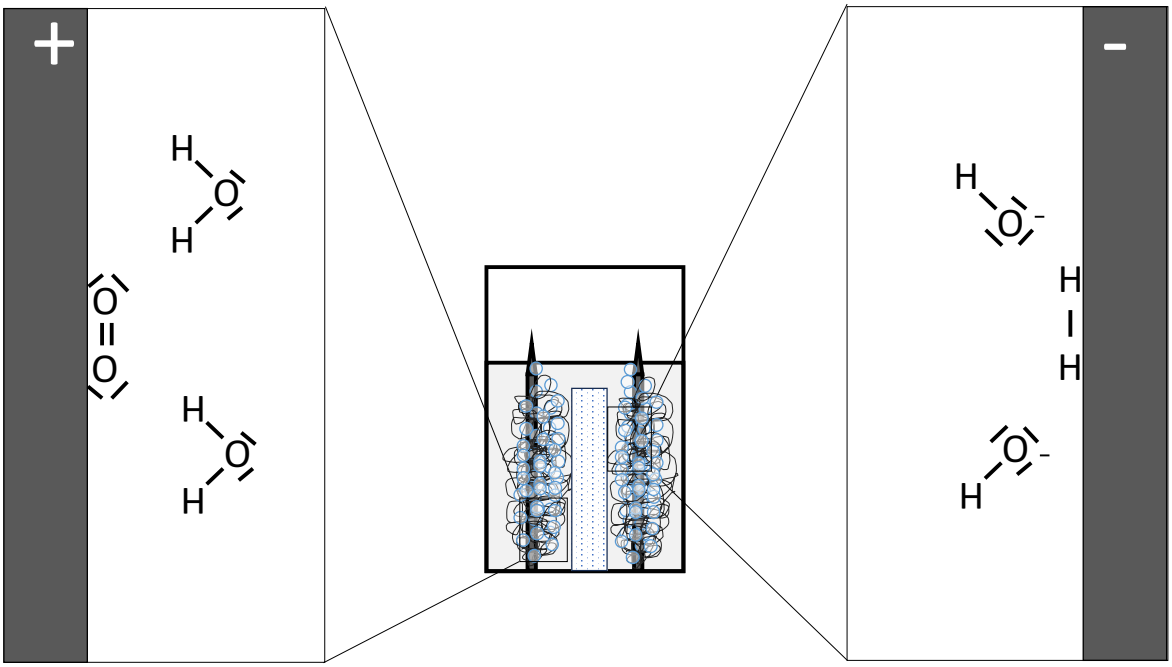
2) **Windenergie:**
   Der Propellermotor lässt sich auch als Windturbine betreiben. Verwende hierfür einen Föhn, um den Wind zu simulieren. Du musst dabei den Föhn ganz nah an den Motor halten, damit dieser sich sehr schnell dreht. Beobachtet ganz genau, ob Du eine Gasentwicklung an den Elektroden sehen kannst. Lade die Brennstoffzelle mit Windenergie für 1 Minute und klemm den Motor ab. Warte 10 Sekunden und schließe den Motor wieder an und miss die Zeit, wie lange sich dieser dreht: _____.

Lösung zum Zusatzexperiment „lautester Knall“:
Wasserstoff und Sauerstoff reagieren im Verhältnis 2:1. Um einen möglichst lauten Knall zu erzeugen, sollte ein Gemisch von $^2/_3$ Wasserstoff und $^1/_3$ Sauerstoff vorliegen. Dies erreichst Du auf zwei Wegen.

1) Die Luft enthält ca. 21% Sauerstoff. Wenn Du das Aromafläschchen vor Beginn der Elektrolyse nur zu $^1/_4$ mit der Elektrolytlösung befüllst, hast Du ca. 75% des Gasraumes mit Luft befüllt. Somit hast Du zu Beginn ca. 0,21 * 75% = 15,75% Sauerstoff vorhanden. Befüllst Du nun die restlichen 25% mit Wasserstoff, so hast Du annähernd ein 2:1 Verhältnis erreicht.
2) Noch genauer erreichst Du das 2:1 Verhältnis wie folgt. Befülle ein Aromafläschchen vollständig mit Elektrolytlösung. Starte die Elektrolyse und befülle das Aromafläschchen zu $^2/_3$ mit Wasserstoff. Wechsele nun die Elektrode und befülle das restliche Drittel mit Sauerstoff. Noch genauer kannst Du arbeiten wenn Du vorher mit einem Lineal Markierungen für die Füllstände setzt.

Brennstoffzelle in der TicTac-Dose

Zusatzaufgabe: Reaktionsgleichungen der Redoxreaktionen in der Brennstoffzelle



In der Brennstoffzelle laufen die Reaktionen der Elektrolyse in umgekehrter Richtung ab. Die Abbildung oben zeigt die Ausgangssituation vor der Entladung der Brennstoffzelle.

Aufgabe 1)
Notiere die Redoxreaktionen für die **Reduktion**, die **Oxidation** sowie die **Gesamtreaktion** für die Prozesse in der Brennstoffzelle. *Hinweis: Lasse die Aggregatzustände bei den Teilgleichungen weg. Für die Gesamtgleichung sollten die Aggregatzustände jedoch mit notiert werden.*

Teilgleichung Reduktion:

Teilgleichung Oxidation:

Gesamtgleichung:

Notizen

Die Pringles-Bombe (Demo)



Geräte:
- Große Pringles-Dose
- Stabfeuerzeug
- Kugel aus Alufolie
- Reagenzglas + Ständer
- Spritze (50 mL) mit langer Kanüle

Chemikalien:
- Aceton
- Barytwasser

Sicherheitshinweis:
Es ist darauf zu achten, dass keine brennbaren Stoffe in der Nähe stehen. Feuerlöscher bereithalten. Abstand einhalten beim Entzünden des Aceton-Luft-Gemisches.

Durchführung:
- In die Pringles-Dose wird im unteren Drittel ein Loch gestanzt.
- Die Alu-Kugel wird mit 8 Tropfen Aceton beträufelt und in die Dose gegeben.
- Die Dose wird verschlossen und für 30 Sek. (Zeit messen!) kräftig geschüttelt.
- Die Dose wird auf eine feste Unterlage gestellt und der Holzstab wird entzündet.
- Das Stabfeuerzeug wird an das Loch der Dose gehalten. (ACHTUNG!)
- Der Deckel wird sofort wieder aufgesetzt und mit der Spritze der Gasraum der Dose entnommen.
- 2 fingerbreit Barytwasser wird in das Rgl. gefüllt und der Inhalt der Spritze wird in das Barytwasser geleitet.
- Beobachtung & Auswertung: Es ist eine weißliche Trübung zu erkennen: positiver CO_2-Nachweis.

Die Pringles-Bombe mit H_2 (Demo)



Geräte:
- **Kleine** Pringles-Dose
- Langes Stabfeuerzeug
- Reagenzglas + Ständer
- Spritze (50 mL) mit langer Kanüle

Chemikalien:
- Wasserstoff aus der Flasche
- Barytwasser

Sicherheitshinweis:
Es ist darauf zu achten, dass keine brennbaren Stoffe in der Nähe stehen. Feuerlöscher bereithalten. Abstand einhalten beim Entzünden des Wasserstoff-Luft-Gemisches.

Durchführung:
- In die Pringles-Dose wird im unteren Drittel ein Loch gestanzt.
- Die Dose wird mit wenig Wasserstoff gefüllt.
- Das Stabfeuerzeug wird an das Loch der Dose gehalten. (ACHTUNG!)
- Der Deckel wird sofort wieder aufgesetzt und mit der Spritze der Gasraum der Dose entnommen.
- 2 fingerbreit Barytwasser wird in das Rgl. gefüllt und der Inhalt der Spritze wird in das Barytwasser geleitet.
- Beobachtung & Auswertung: Es ist keine Trübung zu erkennen: negativer CO_2-Nachweis.