

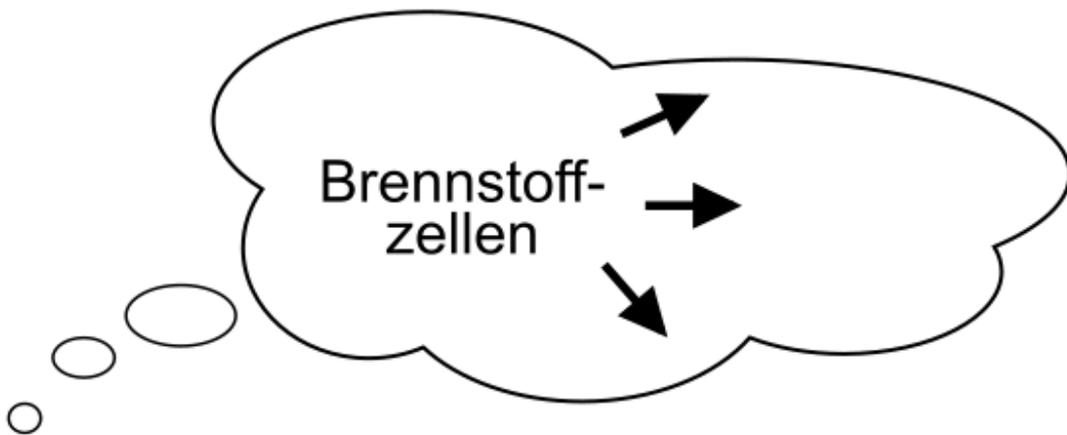


DIDAKTIK  
DER  
CHEMIE



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

Von alkalischen über alkoholische zu  
biologischen Brennstoffzellen:  
Lowcost Experimente für den Einsatz im  
Chemieunterricht



10. Dezember 2021

## *Liebe Teilnehmende,*

der Workshop zu Brennstoffzellen im Chemieunterricht soll Ihnen einen Einblick in die Vielfalt schulgeeigneter Brennstoffzellensysteme geben und hands-on Schülerexperimente mit kostengünstigen Materialien zu den gewählten Systemen vorstellen. Im Workshop selbst erhalten Sie die Möglichkeit, die Versuche unter Betreuung durchzuführen und Rückfragen zu stellen.

Um Sie bei der Integration dieser Versuche in Ihren Unterricht zu unterstützen, wurden diese Kursunterlagen erarbeitet: Neben Anknüpfungspunkten der Versuche im Schulunterricht beinhalten sie theoretische Hintergrundinformationen, Experimentiervorschriften und Gefährdungsbeurteilungen.

Zusätzlich zu diesen analogen Materialien wurden und werden digitale Medien - etwa Videos und E-Books - zu diesen und verwandten Themen erstellt. Diese finden Sie stets in der aktuellen Fassung zum kostenfreien Download auf der Website der Didaktik der Chemie Wuppertal.

<https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/index.php?id=4859&L=0>

Damit die vorgestellten Experimente und Materialien stets verbessert werden können, sind wir an Ihrer Rückmeldung interessiert: Zögern Sie bitte nicht, konstruktives Feedback an **grandrath@uni-wuppertal.de** zu senden.

*Wir freuen uns auf einen Austausch und wünschen viel Spaß an dem Workshop!*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die Bedeutung von Brennstoffzellen</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Anknüpfungspunkte im Chemieunterricht</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Alkalische Brennstoffzelle</b>	<b>4</b>
3.1	Hintergrundwissen zur Alkalischen Brennstoffzelle . . . . .	4
3.2	V: Modellversuch zur Alkalischen Brennstoffzelle . . . . .	6
3.3	V: Modellversuch zu Brennstoffzellen mit Alltagschemikalien . . . . .	8
3.4	Vergleich zwischen dem Modellversuch zur AFC und der technischen Realität	10
<b>4</b>	<b>Alkoholische Brennstoffzelle</b>	<b>11</b>
4.1	Hintergrundwissen zur Alkoholischen Brennstoffzelle . . . . .	11
4.2	V: Modellversuch zur Direkt-Alkoholischen Brennstoffzelle . . . . .	12
4.3	Vergleich zwischen dem Modellversuch zur DAFC und der technischen Realität	14
<b>5</b>	<b>Mikrobielle Brennstoffzellen</b>	<b>15</b>
5.1	Hintergrundwissen zu mikrobiellen Brennstoffzellen . . . . .	15
5.2	V: Redoxaktivität von Bäckerhefe <i>Saccharomyces cerevisiae</i> . . . . .	17
5.3	V: Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau . . . . .	20
5.4	V: Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau . . . . .	23
5.5	Vergleich zwischen dem Modellversuch zur MFC und der technischen Realität	26
<b>6</b>	<b>Enzymatische Brennstoffzellen</b>	<b>27</b>
6.1	Hintergrundwissen zu enzymatischen Brennstoffzellen . . . . .	27
6.2	V: Enzymatische Brennstoffzelle auf Filterpapierbasis mit Lactase/Lactose- System . . . . .	29
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>32</b>
<b>8</b>	<b>Gefährdungsbeurteilungen</b>	<b>34</b>

# 1 Die Bedeutung von Brennstoffzellen

Der Energiebedarf der Menschheit steigt stetig an. So nahm der Weltenergieverbrauch im Jahr 2018 um 2,8% verglichen mit dem Vorjahr zu. Die Energieversorgung von Privatunternehmen und Wirtschaftszweigen ist hauptsächlich auf die fossilen Energieträger Erdöl und Erdgas angewiesen. Doch die Vorkommen dieser wichtigen Rohstoffe verknappen sich bereits und werden in nicht allzu entfernter Zukunft erschöpft sein. Beispielsweise reichen bei gleichbleibender Nutzungsrate die Vorräte Europas an Erdöl nur für weitere 11 Jahre, die an Erdgas für etwa 16 Jahre (BP 2019)! Eine **Energiewende** - weg von fossilen Energieträgern hin zu regenerativen Energieträgern - ist unausweichlich (Quaschnig 2018). Besonders in Regionen mit knappen Vorkommen an fossilen Energieträgern ist die Energiewende eine drängende Aufgabe. In Europa war die Nutzungsrate erneuerbarer Energien im Jahr 2018 verglichen mit dem Vorjahr immerhin um 6,1% erhöht. Zu den erneuerbaren Energien werden hier Windenergie, Solarenergie, Geothermie sowie die Verwertung von Biomasse und Abfällen gezählt.

Regenerative Energieform	Anstieg der Nutzung [%]
Windenergie	5,2
Solarenergie	11,7
Andere Formen	4,5

Tabelle 1.1: Anstieg der Nutzung regenerativer Energieformen in Europa im Jahr 2018

Da insbesondere der globale Bedarf an Elektrizität mit zunehmender Digitalisierung verschiedener Lebensbereiche steigt, steht insbesondere die Bereitstellung elektrischer Energie im Fokus aktueller Forschungsvorhaben. Ein möglicher Lösungsansatz besteht in Gaskraftanlagen und **Brennstoffzellen**, in denen zumeist unter Freisetzung elektrischer Energie mit geringer Wärmeentwicklung aus Wasserstoff und Sauerstoff das unkritische Abfallprodukt Wasser entsteht. Da Wasserstoff in der Natur praktisch nicht als Reinstoff vorkommt, muss er zum Betrieb von Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen energetisch und technisch aufwendig hergestellt werden. Zur CO<sub>2</sub>-neutralen Gewinnung von Wasserstoff und anderen Gasen lassen sich Wind- und Solarenergie nutzen. Werden regenerative Energieformen zur Gewinnung von Wasserstoff genutzt, spricht man von *Power-to-Gas*. Die Energieformen werden umgewandelt, sodass schließlich chemische Energie im Wasserstoffgas gespeichert ist. Am Beispiel der Solarenergie lässt sich vereinfacht formulieren:



Da bislang weder Transportpipelines noch große Wasserstofftanks installiert sind, ist die flächendeckende Nutzung von Wasserstoff schwierig (Quaschnig 2018).

Wasserstoffgas besteht zwar durch seine enorme Energiedichte, dennoch existieren grundsätzlich eine Vielzahl weiterer Brennstoffe, die in Brennstoffzellensystemen genutzt werden können. Jede Zellreaktion mit ausreichend negativer freier Enthalpie (freiwillige Reaktion) eignet sich zur Verwendung in Brennstoffzellensystemen (Kurzweil und Schmid 2016). Man unterscheidet zunächst zwischen Hoch- und Niedertemperatursystemen, vgl. Abbildung 1.1.

Da durchaus auch ganz andere Brennstoffe als Wasserstoff verwendet werden - etwa die

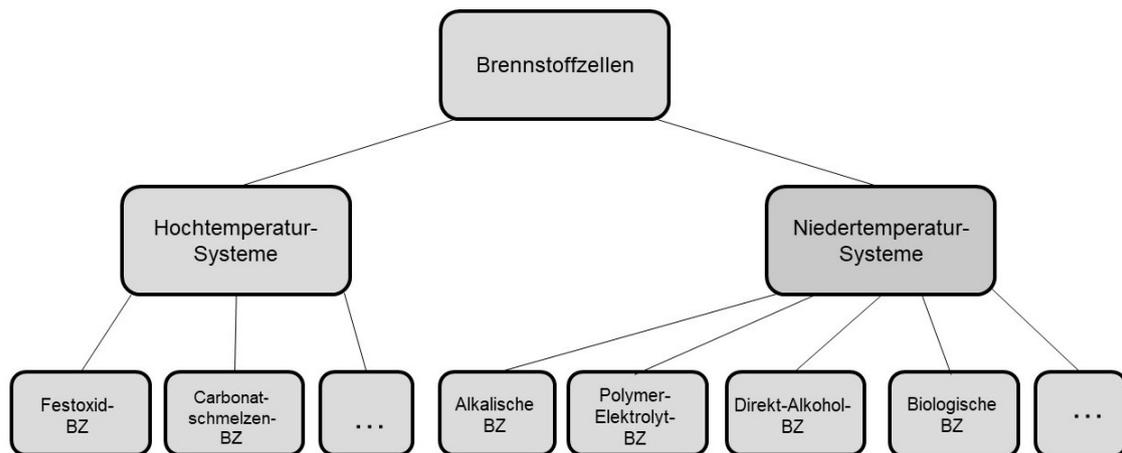


Abbildung 1.1: Einige Unterkategorien von Brennstoffzellensystemen. Eigene Darstellung.

Glucose oder organische Abfälle in biologischen Brennstoffzellen - ist auch die Umschiffung der Wasserstoffproblematik möglich <sup>1</sup>.

*Die drängende Energiewende, erneuerbare Energieformen und Nachhaltigkeit sind folglich eng mit Brennstoffzellensystemen verknüpft.*

<sup>1</sup>In den nachfolgenden Kapiteln werden jeweils die Brennstoffzellensysteme kurz hinsichtlich Funktionsweise, Bestandteilen und Anwendungsspektren charakterisiert.

## 2 Anknüpfungspunkte im Chemieunterricht

Brennstoffzellen als solche sind bundesweit in allen Lehrplänen für Chemie in der Sekundarstufe II an Gymnasien verankert. Ist festgelegt, welcher Brennstoffzelltyp anzusprechen ist, handelt es sich um die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle, nur in einem Fall ist die Methanol-Brennstoffzelle aufgeführt (Bremen). Dabei ist die Vielfalt an Brennstoffzellen deutlich größer (vgl. vorheriges Kapitel). Insbesondere Niedertemperaturbrennstoffzellsysteme sind grundsätzlich für die experimentelle Integration in den Schulunterricht geeignet. Als mögliche fachliche Anknüpfungspunkte im Chemieunterricht für Brennstoffzellen allgemein können die Themenbereiche

Elektrochemie → Galvanische Elemente → Brennstoffzellen

beziehungsweise auch der Bereich der *Katalyse* gewählt werden. Auch anhand des verwendeten Brennstoffes kann Anschluss an die Lehrpläne geknüpft werden, beispielsweise kann die Methanol-Brennstoffzelle im Bereich der *Alkohole* und die Hefe-Brennstoffzelle im Bereich der *Kohlenhydrate* besprochen werden.

Auch die fächerübergreifende Leitlinie ***Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)*** hält verstärkt Einzug in den Unterricht (Die Bundesregierung 2016; Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen 2019). Anhand der Durchführung und Diskussion verschiedener Experimente zu Brennstoffzellsystemen kann neben der Power-to-Gas-Thematik auch die ökologische Sinnhaftigkeit der jeweiligen Systeme durch Abgleich von Edukten, Produkten und Wirkungsgraden erörtert werden.

## 3 Alkalische Brennstoffzelle

### 3.1 Hintergrundwissen zur Alkalischen Brennstoffzelle

Die Alkalische Brennstoffzelle (AFC) ist eine Niedertemperaturbrennstoffzelle, in der als Elektrolyt eine wässrige Lauge verwendet wird. Zumeist wird die AFC bei einer Temperatur zwischen 20-90 °C mit Kalilauge,  $w = 30\%$ , betrieben. Der Ladungsträger ist das Hydroxidion,  $\text{OH}^-$ . Als Brennstoff wird Wasserstoff,  $\text{H}_2$ , als Oxidationsmittel Sauerstoff,  $\text{O}_2$  zugeführt. Die Gase diffundieren durch die Gasdiffusionselektroden in den Elektrolyten, wo die „gezähmte Knallgasreaktion“ stattfindet:

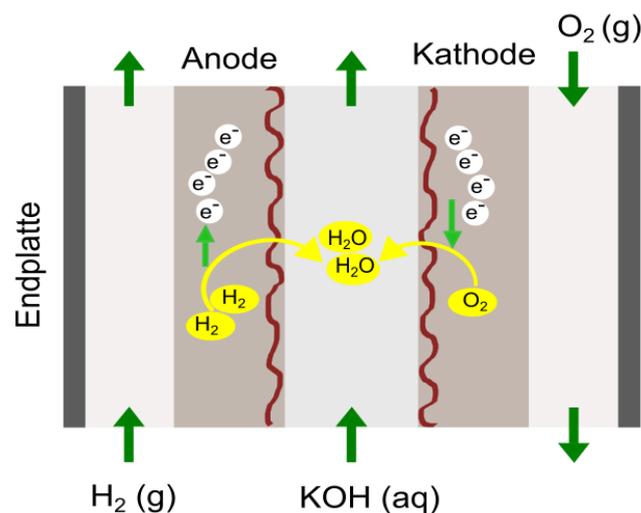
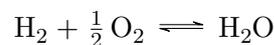
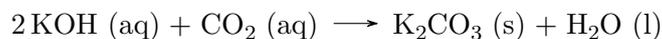


Abbildung 3.1: Prinzipieller Aufbau einer AFC

Ein ständiger Zufluss der Edukte und Abfluss der Produkte ist zu gewährleisten, vgl. Abb. 3.1. Der Zellrahmen einer AFC besteht meist aus Kunststoff, die Gasdiffusionselektroden aus mit Raney-Nickel beschichtetem Nickel. Unter *Raney-Nickel* versteht man einen festen, feinkörnigen Katalysator aus einer Aluminium-Nickel-Legierung. Obwohl die Zellspannung

technischer AFC kleiner als 1 V ist, liefert die AFC im Reingasbetrieb mit 60-70 % den höchsten Wirkungsgrad aller Brennstoffzellensysteme, im Betrieb mit Luft ist die PEM-FC-Technik überlegen. Das in der Umgebungsluft vorkommende Kohlenstoffdioxid,  $\text{CO}_2$ , reagiert mit der Kalilauge, KOH, zu Wasser,  $\text{H}_2\text{O}$ , und Kaliumcarbonat,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ .



Das Kaliumcarbonat setzt die Gasdiffusionselektroden zu, sodass es zum Leistungsabfall der AFC kommt.

Aufgrund des hohen Wirkungsgrades bei niedriger Arbeitstemperatur, der kostengünstigen Katalysatoren und der schnellen Sauerstoffreduktion im alkalischen Elektrolyten finden die 1902 erstmals erwähnten AFC dennoch vielfältige Anwendungsbereiche (Kurzweil und Schmid 2016):

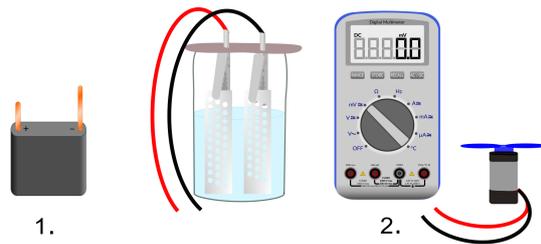
- **Raumfahrt:** In der Raumfahrt ist insbesondere die geringe Masse wichtig, der finanzielle Aufwand ist von geringerer Bedeutung. So werden seit den 1950er Jahren Brennstoffzellen für den Einsatz in der Raumfahrt genutzt und optimiert. Die bemannten Mondflüge der APOLLO-Mission in den Jahren 1960-65 führten beispielsweise 3 AFC-Stacks aus je 31 Einzelzellen mit sich, die inklusive Tanks 810 kg wogen. Sie erbrachten 500 kWh. Für die selbige Leistung hätte es 10-12 t Bleibatterien oder 4 t Silber-Zink-Leichtakkumulatoren gebraucht.
- **U-Boote:** Brennstoffzellenantriebe für Fahrzeuge und U-Boote sind militärisch interessant, da ihr Betrieb nicht mit Wärmeentwicklung verbunden und somit für die IR-Detektion der Gegner unsichtbar sind.
- **Kleinanlagen mit 5-150 kW:** Es werden kommerziell autarke Systeme mit „EloFlux“ bestehend aus Elektrolyseur und Brennstoffzelle vertrieben, die der Hausenergieversorgung dienen.

### 3.2 V: Modellversuch zur Alkalischen Brennstoffzelle

**nach:** Michael W. Tausch, Claudia Bohrmann und Michael Seesing (2002). „Eine no-cost Brennstoffzelle“. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 51.6, S. 43–44.

#### Materialien:

- 2 Krokodilklemmen und 2 Kabel
- 2 Rasierscherfolien / Bleistiftminen
- 100 mL-Becherglas
- Pappe / Styropor
- Batterie
- Digitalmultimeter
- kleiner Verbraucher
- Stativmaterial



#### Chemikalien:

- Kalilauge, KOH (aq),  $c = 0,5 \text{ mol/L}$

#### Durchführung 1:

- Geben Sie Kalilauge in das Becherglas.
- Rollen Sie die Rasierscherfolien jeweils auf und fixieren Sie diese mit jeweils einer Krokodilklemme./ Schritt entfällt bei der Verwendung von Bleistiftminen.
- Stecken Sie die Enden der Krokodilklemmen durch die Löcher in der Pappe und verbinden Sie die Krokodilklemmen jeweils mit einem Kabel.
- Klammern Sie die Pappe mithilfe des Stativmaterials, sodass der Aufbau gegen Umfallen gesichert ist.
- Elektrolysieren Sie etwa 60 Sekunden mithilfe der Batterie. Beobachten Sie dabei insbesondere die Rasierscherfolien.

#### Beobachtung 1:

**Durchführung 2:**

- a) Messen Sie die Zellspannung in mV mithilfe des Digitalmultimeters oder schließen Sie den Propeller an. Beobachten Sie außer dem Verbraucher auch die Rasierscherfolien / Bleistiftminen.

**Beobachtung 2:****Auswertung:**

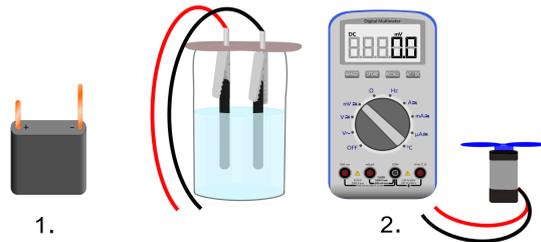
1. Begründen Sie die Notwendigkeit der Elektrolyse für den Betrieb der Brennstoffzelle.
2. Formulieren Sie die Teilgleichungen für die Anoden- und Kathodenreaktion während der Elektrolyse. Kennzeichnen Sie, was beim Betrieb der Brennstoffzelle abläuft.
3. Stellen Sie eine begründete Hypothese auf, welche Nebenreaktion in der Kalilauge abläuft, wenn neben dem Sauerstoff Kohlenstoffdioxid vorliegt.
4. Recherchieren Sie, aus welchen Rohstoffen Wasserstoff großtechnisch gewonnen wird.

**Notizen zur Auswertung:**

### 3.3 V: Modellversuch zu Brennstoffzellen mit Alltagschemikalien

#### Materialien:

- 2 Krokodilklemmen und 2 Kabel
- 2 Graphitstäbe (Bleistiftminen)
- 100 mL-Becherglas
- Pappe / Styropor
- regulierbares Netzgerät
- Digitalmultimeter
- kleiner Verbraucher
- Stativmaterial



#### Chemikalien:

- dest. Wasser,  $\text{H}_2\text{O}$  (l)
- Natron,  $\text{NaHCO}_3$  (s)

#### Durchführung 1:

- a) Geben Sie etwa 40 mL dest. Wasser und einen Natron in das Becherglas.
- b) Fixieren Sie die Graphitstäbe mit jeweils einer Krokodilklemme.
- c) Stecken Sie die Enden der Krokodilklemmen durch die Löcher in der Pappe und verbinden Sie die Krokodilklemmen jeweils mit einem Kabel.
- d) Klammern Sie die Pappe mithilfe des Stativmaterials, sodass der Aufbau gegen Umfallen gesichert ist.
- e) Elektrolysieren Sie etwa 60 Sekunden mithilfe des Netzgerätes. Beobachten Sie dabei insbesondere die Graphitstäbe.

#### Beobachtung 1:

**Durchführung 2:**

- a) Messen Sie die Zellspannung in mV mithilfe des Digitalmultimeters oder schließen Sie den Propeller an. Beobachten Sie außer dem Verbraucher auch die Graphitstäbe.

**Beobachtung 2:****Auswertung:**

1. Beschreiben Sie die Funktion der Zugabe von Natron zu dem destillierten Wasser.
2. Erläutern Sie, welche unerwünschte Nebenreaktion bei der Elektrolyse von Kochsalz-Lösung mit einer höheren Spannung einsetzt.

**Notizen zur Auswertung:**

### 3.4 Vergleich zwischen dem Modellversuch zur AFC und der technischen Realität

Ein Modellversuch kann vieles leisten, aber eben doch nicht alles. Aus Kostengründen, Gründen der niedrigen Gefährdung von Lernenden, aber auch der Sichtbarkeit und Eindeutigkeit von Beobachtungen, ist der Modellversuch weniger komplex, als in der Technik umgesetzte Brennstoffzellen. Dies ist nachfolgend anhand einiger Kriterien dargelegt:

Kriterium	Modellversuch zur AFC	Technische AFC
<b>Brennstoff</b>	Wasserstoff, H <sub>2</sub> (g)	Wasserstoff, H <sub>2</sub> (g)
<b>Oxidationsmittel</b>	(reiner) Sauerstoff, O <sub>2</sub> (g)	(reiner) Sauerstoff, O <sub>2</sub> (g)
<b>Ablaufende Reaktion</b>	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$
<b>Elektrolyt</b>	Kalilauge, KOH (aq)	Kalilauge, KOH (aq)
<b>Elektroden</b>	Platinierte Nickelnetze (Scherfolien)	Raney-Nickel auf Nickel
<b>Katalysator</b>	Platin	Raney-Nickel
<b>Membran</b>	keine	oft Nafion®
<b>Bereitstellung von Edukten</b>	Gewinnung durch Elektrolyse in dem Gefäß	kontinuierliche Zufuhr
<b>Ableitung von Produkten</b>	keine	kontinuierlich
<b>erreichte Spannung</b>	1,2 V	<1 V

## 4 Alkoholische Brennstoffzelle

### 4.1 Hintergrundwissen zur Alkoholischen Brennstoffzelle

In Alkoholischen Brennstoffzellen werden Methanol und andere Alkohole als Brennstoffe eingesetzt. Bei diesem seit den 1950er Jahren verfolgten Ansatz unterscheidet man zwischen

**Direkten-Brennstoffzellen:** Die chemische Energie des Brenngutes wird direkt in elektrische Energie überführt. Handelt es sich bei dem Brenngut um einen Alkohol, spricht man von Direkt-Alkoholischen-Brennstoffzellen (DAFC).

**Indirekten Brennstoffzellen:** In einem vorausgehenden Katalyseschritt wird Wasserstoff aus einem Rohstoff - etwa Alkohol, Ammoniak oder Cyclohexan - gewonnen und anschließend in der Brennstoffzelle umgesetzt.

Häufig kommt Methanol in DAFC zum Einsatz, da es der elektrochemisch aktivste organische Stoff ist - wenn auch tausendmal inaktiver als Wasserstoff. Die Betriebstemperatur liegt bei 85 °C. Da in der anodischen Reaktion Wasser verbraucht wird, kommt als Brennstoff eine 1-2 molare Methanol-Wasser-Mischung beziehungsweise ein Dampf aus Methanol und Wasser zum Einsatz. Luftsauerstoff stellt das Oxidationsmittel dar.



Der elektrische Wirkungsgrad beträgt etwa 20-30 %. Die DMFC wird zur Energieversorgung von Kleinanlagen und für kleinere Antriebe, etwa von Rasenmähern, genutzt. Ein großer, spezifischer Vorteil besteht darin, dass das Methanol-Wasser-Gemisch ohne Reformierung in eine Polymer-Elektrolyt-Membran-Zellen eingebracht werden kann. Dadurch, dass Methanol durch Diffusion und Osmose vom Anoden- in den Kathodenraum übertritt, entsteht ein Sauerstoff-Mischpotential und die Zelleistung sinkt (Kurzweil und Schmid 2016).

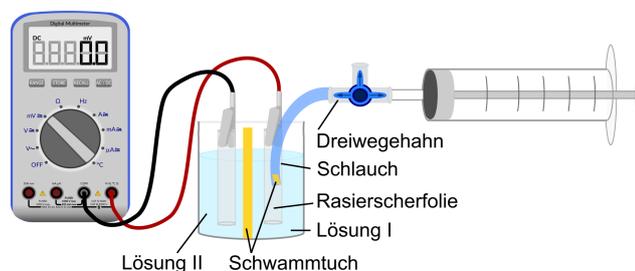
Dieser auch als „Crossover“ bezeichnete Diffusionseffekt ist bei Ethanol deutlich geringer ausgeprägt (Sahu und Basu 2014). Obwohl Ethanol elektrochemisch weniger aktiv als Methanol ist, ist es deutlich weniger gefährlich und somit eher schulgeeignet.

## 4.2 V: Modellversuch zur Direkt-Alkoholischen Brennstoffzelle

**nach:** Rebecca Grandrath und Claudia Bohrmann-Linde (2019b). „Teaching Sustainability in the Chemistry Classroom: Exploring Fuel Cells in Simple Hands-on Experiments with Hydrogen, Sugar and Alcohol“. In: *World journal of chemical education* 7.2, S. 172–178.

### Materialien:

- 2 Krokodilklemmen
- 2 Kabel
- 2 Rasierscherfolien
- Filmdose / kleines Plastikgefäß
- Schwammtuch
- Gaseinleitungsschlauch
- Dreiwegehahn
- Spritze / Kolbenprober
- Digitalmultimeter
- kleiner Verbraucher
- Stativmaterial



### Chemikalien:

- Ethanol,  $C_2H_5OH$  (l)
- Natron-Lösung,  $NaHCO_3$  (aq),  
 $c = 0.15 \text{ mol/L}$

### Durchführung:

- Kleben Sie in eine leere Filmdose mit einer Heißklebepistole ein Stück Schwammtuch, sodass die Dose in zwei etwa gleichgroße Räume aufgeteilt ist.
- Rollen Sie zwei Rasierscherfolien auf und fixieren Sie diese jeweils mit einer Krokodilklemme.
- Schieben Sie in eine der gerollten Rasierscherfolien einen Gaseinleitungsschlauch, in dessen Ende Sie wiederum ein kleines Stück Schwammtuch stecken.
- Befestigen Sie die Spritze mithilfe des Stativmaterials waagrecht etwas höher als der Rand des Gefäßes ist.
- Füllen Sie die eine Hälfte der Filmdose mit Natron-Lösung (Lösung 1); die andere

mit einer Mischung aus gleichen Teilen Natron-Lösung und Ethanol (Lösung 2).

- f) Tauchen Sie in die Natron-Lauge die Scherfolie mit dem Gaseinleitungsschlauch, in die alkalische Ethanol-Lösung die andere Rasierscherfolie.
- g) Verbinden Sie beide Elektroden über das Digitalmultimeter.
- h) Leiten Sie mit der Spritze Luft ein.
- j) Lesen Sie die Spannung am Digitalmultimeter ab.

**Beobachtung:**

**Auswertung:**

1. Begründen Sie den Anstieg der Zellspannung bei Einleiten von Luft.
2. Formulieren Sie die Gleichungen der ablaufenden Reaktionen.

**Notizen zur Auswertung:**

### 4.3 Vergleich zwischen dem Modellversuch zur DAFC und der technischen Realität

Besonderheiten stellen hier die Substitution von Methanol durch Ethanol sowie Natriumhydroxid-Lösung durch Natron-Lösung dar. Weitere Vergleiche sind nachfolgend dargelegt:

Kriterium	Modellversuch zur DAFC	Technische DAFC
<b>Brennstoff</b>	Methanol, CH <sub>3</sub> OH (g) Wasser, H <sub>2</sub> O (l)	Ethanol, CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH (g) Wasser, H <sub>2</sub> O (l)
<b>Oxidationsmittel</b>	(Luft-)Sauerstoff, O <sub>2</sub> (g)	(Luft-)Sauerstoff, O <sub>2</sub> (g)
<b>Ablaufende Reaktion</b>	$\text{CH}_3\text{OH} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$
<b>Elektrolyt</b>	Natron-Lösung, NaHCO <sub>3</sub> (aq)	Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)
<b>Elektroden</b>	Platinierte Nickelnetze (Scherfolien)	Edelmetalle auf Aktivkohle
<b>Katalysator</b>	Platin	Edelmetalle
<b>Membran</b>	Schwammtuch	oft Nafion®
<b>Bereitstellung von Edukten</b>	Vorlegen, bzw. einmalige Zufuhr	kontinuierliche Zufuhr
<b>Ableitung von Produkten</b>	keine	kontinuierlich
<b>erreichte Spannung</b>	0,4 V	0,5 V

## 5 Mikrobielle Brennstoffzellen

### 5.1 Hintergrundwissen zu mikrobiellen Brennstoffzellen

Die *mikrobiellen Brennstoffzellen* (MFC) stellen neben den enzymatischen Brennstoffzellen (EFC) eine Untergruppe der biologischen Brennstoffzellen dar. In MFC werden Mikroorganismen als Biokatalysatoren zur Oxidation organischen Substrats an der Anode eingesetzt (vgl. Abb. 5.1). Die Funktionsweise ist ansonsten identisch zu anderen Brennstoffzelltypen:

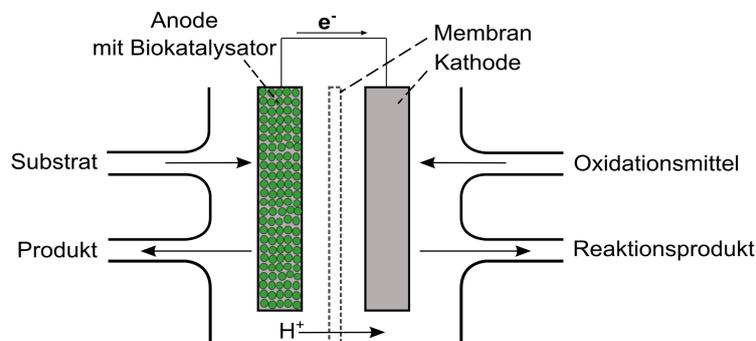


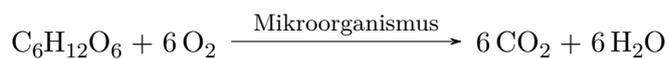
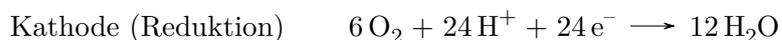
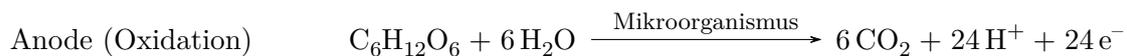
Abbildung 5.1: Prinzipieller Aufbau einer MFC

Die freiwerdenden Elektronen werden auf die Anode übertragen und in einem externen Stromkreis genutzt, bevor sie schließlich an der Kathode ein Oxidationsmittel reduzieren. Anoden- und Kathodenraum sind über eine Membran getrennt. Ein Zufluss von Edukten und Ablauf von Produkten ist zu gewährleisten.

Im Jahr 1911 wurde erstmals von dem Prof. Michael C. Potter das Phänomen beschrieben, dass mithilfe von Mikroorganismen elektrische Spannungen und Ströme generiert werden können (Potter 1911). Erst in den 1960er Jahren wurde die Entwicklung der MFC vorangetrieben, da für die Raumfahrt Brennstoffzellen entwickelt werden sollten, die komplexe Matrices - wie etwa menschliche Ausscheidungen - zur Stromgewinnung nutzen könnten. Derzeit bildet das Interesse, MFC zur Abwasseraufbereitung bei gleichzeitiger Energiegewinnung effizient(er) nutzbar zu machen, den Eckpfeiler und die Triebkraft für Forschungsvorhaben. Mithilfe von MFC ist es auch möglich, Schwermetalle aus Abwässern zu entfernen und Wasserstoff in nennenswerter Menge herzustellen (Kumar u. a. 2018). Aus der Vielfalt an Mikroorganismen und möglichen Substraten resultiert eine nicht bezifferbare große Anzahl an MFC-Systemen. Je nach Mikroorganismus findet zwischen Mikroorganismus und Elektrode ein direkter Elektronentransfer, ein Elektronentransfer über zelleigene Nanodrähte oder ein mediierter Transfer über zelleigene (endogene) Redoxmediatoren statt.

Teilweise kann die Zelleistung durch Zugabe synthetischer (exogene) Mediatoren gesteigert werden (Schröder und Harnisch 2011).

Im didaktischen Kontext wurden einige wenige Vorschläge zur experimentellen Erschließung mikrobieller Brennstoffzellen veröffentlicht. Dabei wurde mit *Escherichia coli* (Bennetto 1990) beziehungsweise der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* als Biokatalysatoren gearbeitet (Orth und Wenck 2001; Silveira, Ikegaki und Schneedorf 2017). Unter Sicherheitsaspekten ist die Bäckerhefe für den Einsatz in der Schule geeigneter. Der einzellige Pils verstoffwechselt Kohlenhydrate, sodass für eine Hefe-Brennstoffzelle stark vereinfacht die nachfolgenden Gleichungen angenommen werden können:



## 5.2 V: Redoxaktivität von Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*

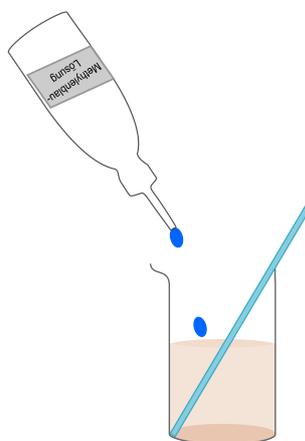
**nach:** Rebecca Grandrath und Claudia Bohrmann-Linde (2021a). „Eine Lehrkräfte-Fortbildung im Portrait: Lowcost Experimente zu verschiedenen Brennstoffzelltypen für den Einsatz im Chemieunterricht.“ In: *CHEMKON*, zur Publikation angenommen. DOI: 10.1002/ckon.202100043.

### Materialien:

- 25 mL Becherglas
- Glasstab
- Uhrglas
- Filterpapier
- Spatel
- Heizplatte

### Chemikalien:

- Trockenhefe *Saccharomyces cerevisiae*
- dest. Wasser, H<sub>2</sub>O (l)
- Glucose, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> (s)
- Methylenblau-Lösung, C<sub>16</sub>H<sub>18</sub>ClN<sub>3</sub>S (aq)



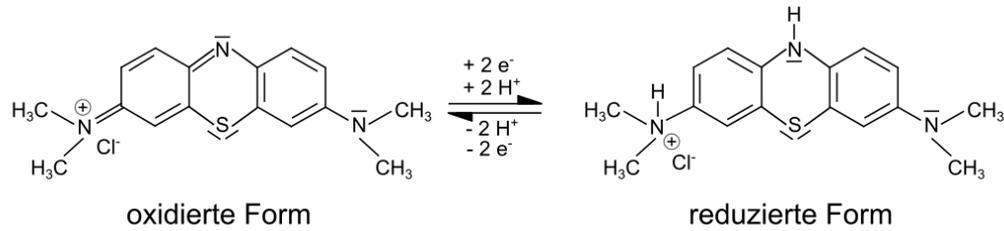
### Durchführung:

- Erstellen Sie unter kontinuierlichem Rühren eine Suspension aus 15 mL dest. Wasser und 1 g Bäckerhefe.
- Geben Sie unter kontinuierlichem Rühren 2 g Glucose zu der Suspension.
- Versetzen Sie die Suspension mit 2-3 Tropfen der Methylenblau-Lösung und fotografieren Sie die Farbgebung der Suspension.
- Nehmen Sie die Zeit bis zu einer einsetzenden Farbveränderung.
- Wiederholen Sie den Versuch auf einer 30 °C warmen Heizplatte.

**Beobachtung:**

**Auswertung:**

1. In dem Versuch wird Methylenblau durch Reduktion in die Leukoform überführt.



Stellen Sie eine begründete Hypothese zur Herkunft der Elektronen auf.

2. Geben Sie unter Berücksichtigung Ihrer Versuchsergebnisse an, in welchem Temperaturbereich die Stoffwechselaktivität der Bäckerhefe höher ist.

**Notizen zur Auswertung:**

### 5.3 V: Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau

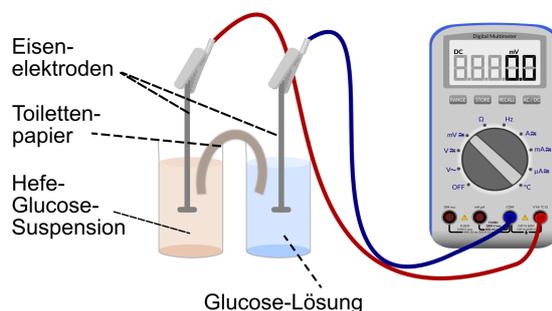
**nach:** Rebecca Grandrath und Claudia Bohrmann-Linde (2019a). *E hoch drei - Energie experimentell erleben: - Bericht zum Einsatz eines Schülerprogrammes -: Posterbeitrag zur GDCh-Tagung*. Aachen.

#### Materialien:

- Krokodilklemmen und Kabel
- Elektroden (Eisenbleche / Nägel)
- Stativmaterial
- 2 x 25 mL Becherglas
- Toilettenpapier
- Digitalmultimeter

#### Chemikalien:

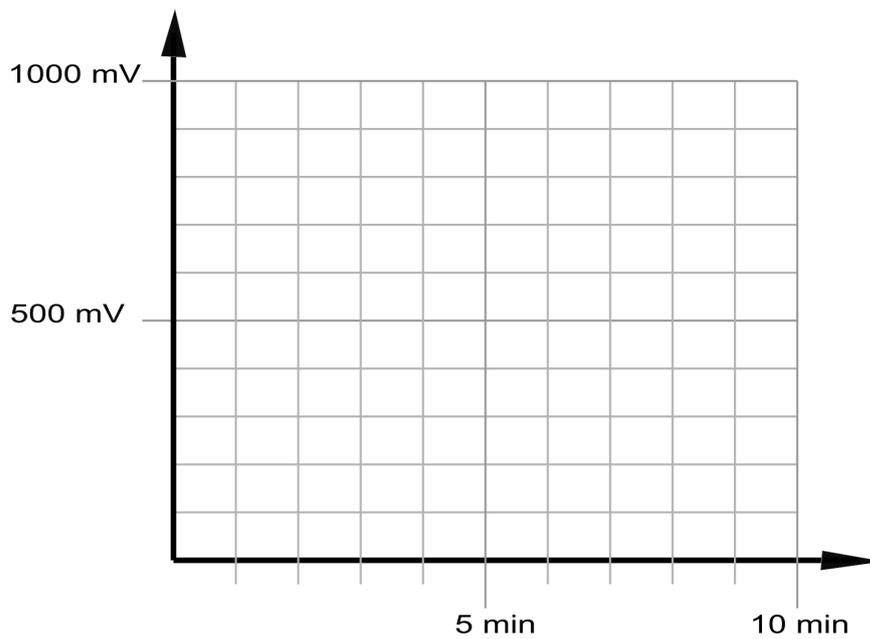
- Trockenhefe *Saccharomyces cerevisiae*
- dest. Wasser, H<sub>2</sub>O (l)
- Glucose, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> (s)
- Glucose-Lösung mit w = 10 %



#### Durchführung:

- Rollen Sie ein Blatt Toilettenpapier der Länge nach auf und verdrillen Sie es leicht.
- Legen Sie in einem 25 mL-Becherglas 25 mL der Glucose-Lösung vor.
- Wiegen Sie im anderen 25 mL-Becherglas 1,5 g Trockenhefe ein und versetzen Sie diese unter kontinuierlichem Rühren mit 25 mL dest. Wasser.
- Fixieren Sie die Elektroden mithilfe des Stativmaterials und stellen Sie die gefüllten Bechergläser gemäß der Abbildung bereit.
- Bringen Sie in die Hefe-Suspension 2,5 g Glucose unter Rühren ein.
- Verbinden Sie die Bechergläser mithilfe des gerollten Toilettenpapiers.
- Messen Sie die Zellspannung in mV mithilfe des Digitalmultimeters und notieren Sie diese über einen Zeitraum von zehn Minuten im angefügten Koordinatensystem.

**Beobachtung:**



**Auswertung:**

1. Stellen Sie eine begründete Vermutung auf, wodurch sich die Spannung der Hefe-Brennstoffzelle ergibt.
2. Formulieren Sie die an Anode bzw. Kathode ablaufenden Reaktionen unter der Annahme, dass die Glucose vollständig oxidiert wird.

**Notizen zur Auswertung:**

## 5.4 V: Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau

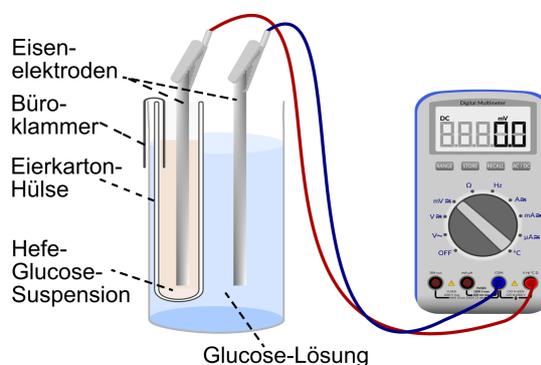
**nach:** Rebecca Grandrath und Claudia Bohrmann-Linde (2019a). *E hoch drei - Energie experimentell erleben: - Bericht zum Einsatz eines Schülerprogrammes -: Posterbeitrag zur GDCh-Tagung*. Aachen.

### Materialien:

- Eierkarton-Hülse
- Krokodilklemmen und Kabel
- Elektroden (Eisenbleche / Nägel)
- Stativmaterial
- 2 x 25 mL Becherglas
- 100 mL Becherglas
- Große Büroklammer
- Digitalmultimeter

### Chemikalien:

- Trockenhefe *Saccharomyces cerevisiae*
- dest. Wasser,  $H_2O$  (l)
- Glucose,  $C_6H_{12}O_6$  (s)
- Glucose-Lösung mit  $w = 10\%$
- Saccharose,  $C_{12}H_{22}O_{11}$  (s)
- Saccharose-Lösung mit  $w = 10\%$

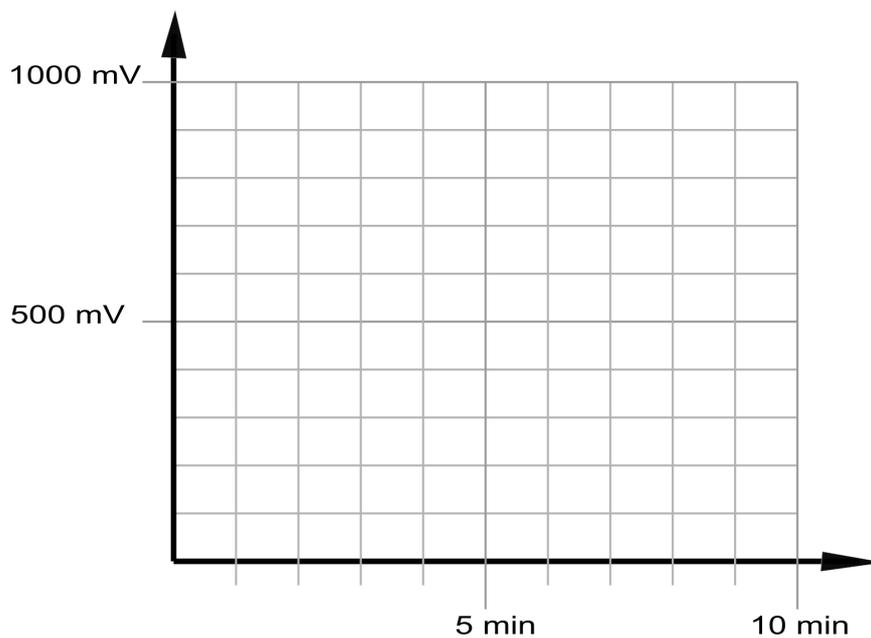


### Durchführung:

- Befestigen Sie die Eierkarton-Hülse mit der Öffnung nach oben mithilfe der Büroklammer am Rand des 100 mL-Becherglases.
- Bauen Sie die Anordnung gemäß der Abbildung zunächst trocken auf.
- Fixieren Sie die Elektroden mithilfe von Stativmaterial.
- Achten Sie beim Anbringen der Elektroden darauf, dass diese weder mit der Eierkarton-Hülse noch mit der Büroklammer Kontakt haben.
- Geben Sie unter kontinuierlichem Rühren mit dem Glasstab zu der 1,5 g Hefe im 25 mL-Becherglas 25 mL destilliertes Wasser, bis keine Klumpen mehr sichtbar sind.
- Lösen Sie 2,5 g Glucose unter Rühren mit dem Glasstab in der Hefe-Suspension.

- g) Überführen Sie die Suspension in die Eierkarton-Hülse und zeitgleich die Glucose-Lösung in den Bereich außerhalb.
- h) Messen Sie die Zellspannung in mV mithilfe des Digitalmultimeters und notieren Sie diese über einen Zeitraum von zehn Minuten im angefügten Koordinatensystem.
- i) Wiederholen Sie den Versuch unter Verwendung von Saccharose und Saccharose-Lösung.

**Beobachtung:**



**Auswertung:**

1. Geben Sie anhand Ihrer Messdaten an, welches Substrat die Bäckerhefe bevorzugt verstoffwechselt.
2. Stellen Sie eine Hypothese für die Ursache dieser Substrat-Präferenz auf.
3. Deuten Sie Ihre Messdaten hinsichtlich der Frage, unter welchen Voraussetzungen die Zellspannung abfallen wird.

**Notizen zur Auswertung:**

## 5.5 Vergleich zwischen dem Modellversuch zur MFC und der technischen Realität

Der kriteriengeleitete Vergleich bezieht sich auf den 1-Topf-Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle als Modellversuch und einen Übersichtsartikel zu MFC der Technik (Santoro u. a. 2017), in dem die häufigst genutzten Varianten dargestellt sind.

Kriterium	Modellversuch zur MFC	Technische MFC
<b>Brennstoff</b>	Glucose, $C_6H_{12}O_6$ (s)	organisches Substrat allg.
<b>Oxidationsmittel</b>	(Luft-)Sauerstoff, $O_2$ (g)	(Luft-)Sauerstoff, $O_2$ (g)
<b>Ablaufende Reaktion</b>	$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{Mikroorganismus}} 6 CO_2 + 6 H_2O$	durch Mikroorganismen katalysierte Oxidation allg.
<b>Elektrolyt</b>	Glucose-Lösung, $C_6H_{12}O_6$ (aq)	nicht definiert
<b>Elektroden</b>	Eisennägel	Kohlenstoff oder Metalle
<b>Katalysator</b>	Bäckerhefe	Biofilme aus versch. Mikroorganismen
<b>Membran</b>	Eierkarton	oft Nafion ®
<b>Bereitstellung von Edukten</b>	Vorlegen	kontinuierliche Zufuhr
<b>Ableitung von Produkten</b>	keine	kontinuierlich
<b>erreichte Spannung</b>	0,8 V	0,5 V

## 6 Enzymatische Brennstoffzellen

### 6.1 Hintergrundwissen zu enzymatischen Brennstoffzellen

Enzymatischen Brennstoffzellen (EFC) bilden neben den mikrobiellen die zweite Unterkategorie der biologischen Brennstoffzellen. Es handelt sich um bioelektrische Aufbauten, in denen Enzyme als Biokatalysator zur Umwandlung von chemischer in elektrische Energie genutzt werden. Meist kommen sowohl an Anode als auch Kathode Enzyme zum Einsatz. Die Anzahl an EFC-Systemen ist begründet durch die Vielfalt möglicher Enzym-Substrat-Kombinationen nicht bezifferbar (Rasmussen, Abdellaoui und Minteer 2016).

Seitdem das EFC-Prinzip 1964 entdeckt wurde (Yahiro, Lee und Kimble 1964), wird intensiv an der Optimierung der Systeme zum Einsatz in zwei Hauptgebieten geforscht: Sowohl die Verwendung als mobile Energieversorger als auch im medizinischen Bereich als autarke Biosensoren zur Anwendung in lebenden Organismen stehen im Fokus aktueller Forschung. Nachdem eine enzymatische Brennstoffzelle in einer Weintraube implantiert und betrieben werden konnte, wurden diese autarken Biosensoren auch in Kakerlaken, Ratten, Schlangen, Venusmuscheln und Hummern eingesetzt und erforscht. Ziel ist es, dass diese autarken Sensoren Aufschluss über Vitalwerte, etwa den Blutzucker geben können oder andersherum der Blutzucker zur Generierung von elektrischer Energie zum Betrieb von medizinischen Geräten wie Herzschrittmachern genutzt werden kann. Neben diesen invasiven Implantaten werden auch Sensoren auch Kontaktlinsen beziehungsweise Pflastern entwickelt (Rasmussen, Abdellaoui und Minteer 2016).

Eine interessante Variation sind sogenannte Lab-on-a-chip-Aufbauten: Auf einer (Kunststoff-)Karte geringer Fläche werden Sensoren verankert und beispielsweise mit selektiv reaktiven Farbstoffen oder molekularen Schaltern gekoppelt, sodass allein damit Diagnostik möglich ist. Für den Einsatz in Entwicklungsländern mit unzureichender medizinischer Infrastruktur wurde beispielsweise eine auf 3D-Origamipapier aufgebrachte enzymatische Brennstoffzelle zur Überwachung des Glucose-Gehaltes von Blut entwickelt. Die Zellspannung wird mithilfe eines einfachen Multimeters bestimmt. Da die Zellspannung abhängig von der Glucose-Konzentration ist, kann so beispielsweise der Blutzuckergehalt von Diabetespatienten ermittelt werden. Dabei kommen die Enzyme Glucoseoxidase (Anode) und Laccase (Kathode) zum Einsatz, sodass die folgenden Reaktionen katalysiert werden (Fischer, Fraiwan und Choi 2016):

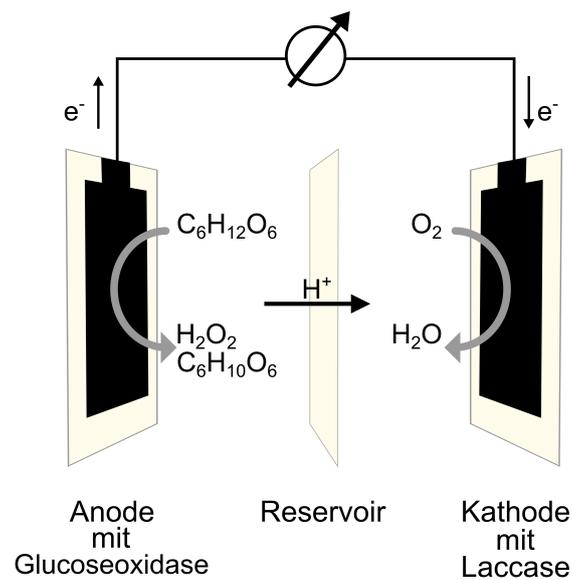
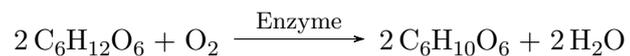
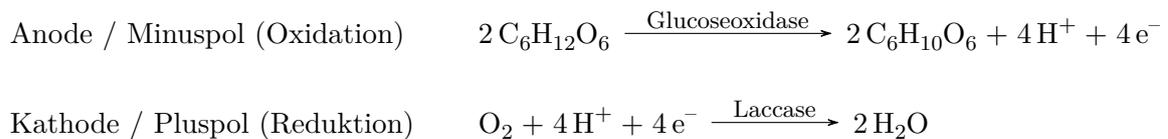


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer EFC. Adaptiert nach (Fischer, Fraiwan und Choi 2016).



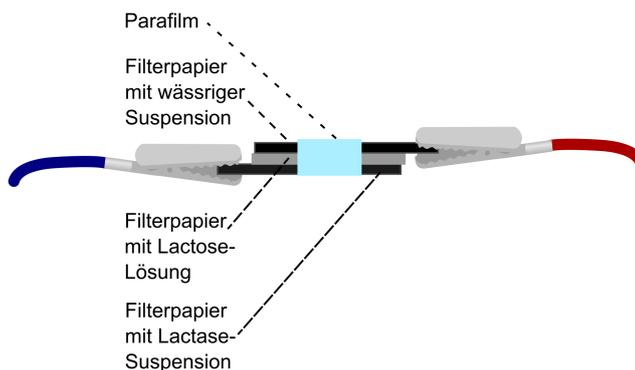
Laccasen katalysieren oxidative Kopplungsreaktionen. Diese laufen in drei Teilschritten ab: Im ersten Schritt wird das Enzym vom Substrat - gewöhnlich ein Aromat - reduziert. Es kommt zu einem internen Elektronentransfer im Enzym. Im zweiten Teilschritt wird molekularer Sauerstoff am aktiven Zentrum der Laccase zu Wasser reduziert. Das Substrat verlässt das Enzym schließlich als kationisches Radikal, das Kupplungs- oder Polymerisationsreaktionen eingehen kann (Böttcher o. D.). Die beschriebene Kathodengleichung stellt somit nur eine Nebenreaktion dar (Morozova u. a. 2007). Welche Substanz in dem vorgestellten und nachfolgend vermessenen Aufbau als eigentliches Substrat wirkt, wird in der Literatur nicht benannt (Fischer, Fraiwan und Choi 2016; Ge, Schirhagl und Zare 2011).

## 6.2 V: Enzymatische Brennstoffzelle auf Filterpapierbasis mit Lactase/Lactose-System

**nach:** Rebecca Grandrath und Claudia Bohrmann-Linde (2021b). „Mit Lactase zum elektrischen Strom – enzymatische Brennstoffzellen auf Filterpapierbasis für den Chemieunterricht“. In: *CHEMKON*, zur Publikation angenommen.

### Materialien:

- Mörser und Pistill
- Filterpapier
- Parafilm
- Tropfpipette
- 3 Petrischalen
- Bechergläser
- 2 Schnappdeckelgläser (mit Deckel)
- Pinzette
- Kabel
- Krokodilklemmen
- Haarklemme
- DMM / Cassy und Laptop



### Chemikalien:

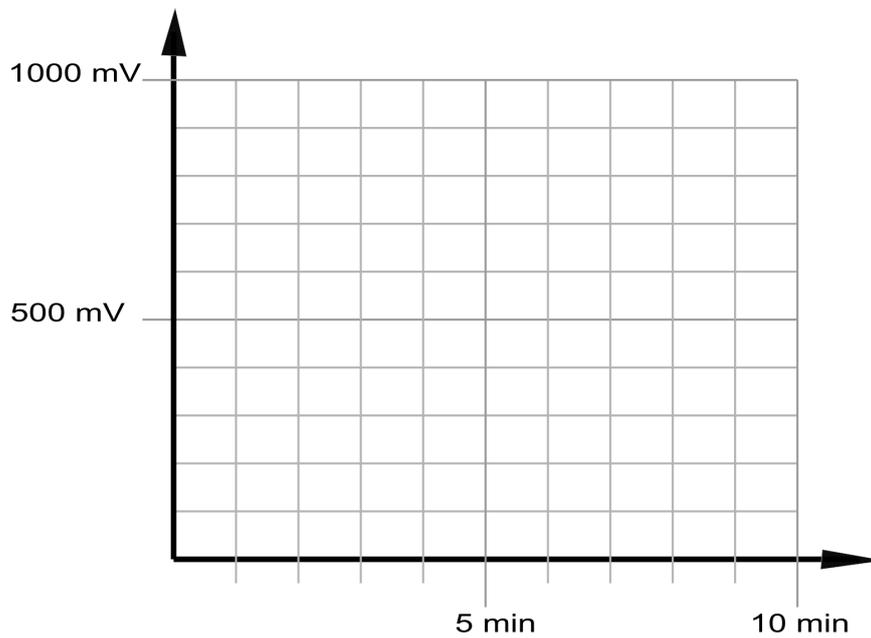
- Natriumlaurylsulfat,  
 $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$  (s)
- Aktivkohle, C (s)
- Lactase-Tabletten
- Lactose-Lösung mit  $w=1\%$ ,  
 $(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11})_n$  (aq)
- dest. Wasser,  $\text{H}_2\text{O}$  (l)

### Durchführung:

- *Vorbereitung der Komponenten*
- a) Mörsern Sie eine Lactase-Tablette.

- b) Schneiden Sie pro geplanter Brennstoffzelle drei 2x2 cm große Quadrate aus Filterpapier aus (die folgenden Mengenangaben beziehen sich auf drei Brennstoffzellen).
- c) Erstellen Sie in einem Schnappdeckelglas eine Suspension aus 1,5 mL dest. Wasser, 30 mg Aktivkohle und 15 mg Natriumlaurylsulfat.
- d) Erstellen Sie im anderen Schnappdeckelglas eine Suspension aus 1,5 mL dest. Wasser, 30 mg Aktivkohle, 15 mg Natriumlaurylsulfat und 300 mg Lactase-Tablette.
- e) Legen Sie jeweils drei Filterpapierquadrate in zwei Petrischalen. Versetzen Sie die drei Filterpapiere in der einen Schale mit jeweils 0,5 mL der Lactase-Suspension beziehungsweise in der anderen Schale mit 0,5 mL der wässrigen Suspension.
- f) Lassen Sie die Elektroden 10 min ruhen.
- g) Tränken Sie ein bislang unbehandeltes Stück Filterpapier für 5 Minuten in der Lactose-Lösung.
- h) Schneiden Sie einen Streifen Parafilm (etwa 1x5 cm) pro geplanter Brennstoffzelle zurecht
- *Aufbau der Brennstoffzelle*
- i) Stapeln Sie mithilfe der Pinzette die Komponenten der Brennstoffzelle mit etwas Versatz zueinander auf den Parafilm-Streifen (vgl. Abbildung): Parafilm, Filterpapier mit Lactase, Lactose-getränktes Filterpapier, Filterpapier mit wässriger Suspension. Stellen Sie sicher, dass die Enzyme und die Aktivkohle-Beschichtung dem Lactose-Reservoir zugewandt sind.
- j) Fixieren Sie den Aufbau durch Umklappen des Parafilm-Streifens mithilfe der Haarklemme.
- *Betrieb der Brennstoffzelle*
- k) Klammern Sie die Krokodilklemmen an den überstehenden Teil der Elektroden.
- l) Legen Sie die fertige Brennstoffzelle auf die umgekehrte dritte Petrischale, die glatte und etwas erhöhte Unterlage dient der Stabilisierung der Kontaktfläche.
- m) Messen Sie die Zellspannung mithilfe des Multimeters und notieren Sie diese im Koordinatensystem.

**Beobachtung:**

**Auswertung:**

1. Stellen Sie eine Hypothese auf, welche Besonderheit *enzymatische Brennstoffzellen* gegenüber *mikrobiellen* hinsichtlich des Substrates haben.

**Notizen zur Auswertung:**

## 7 Literatur

- Bennetto, H. P. (1990). „Electricity generation by microorganisms“. In: *Biotechnology Education* 1.4, S. 163–168.
- Böttcher, Dominique (o. D.). „Laccasen: RD-12-00041 (2008)“. In: *Römpp [Online]*. Hrsg. von F. Böckler u. a. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- BP (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. London.
- Die Bundesregierung, Hrsg. (2016). *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Neuauflage 2016*. Berlin.
- Fischer, Christopher, Arwa Fraiwan und Seokheun Choi (2016). „A 3D paper-based enzymatic fuel cell for self-powered, low-cost glucose monitoring“. In: *Biosensors & bioelectronics* 79, S. 193–197. DOI: 10.1016/j.bios.2015.12.020.
- Ge, Jun, Romana Schirhagl und Richard N. Zare (2011). „Glucose-Driven Fuel Cell Constructed from Enzymes and Filter Paper“. In: *Journal of Chemical Education* 88.9, S. 1283–1286. DOI: 10.1021/ed100967j.
- Grandrath, Rebecca und Claudia Bohrmann-Linde (2019a). *E hoch drei - Energie experimentell erleben: - Bericht zum Einsatz eines Schülerprogrammes -: Posterbeitrag zur GDCh-Tagung*. Aachen.
- (2019b). „Teaching Sustainability in the Chemistry Classroom: Exploring Fuel Cells in Simple Hands-on Experiments with Hydrogen, Sugar and Alcohol“. In: *World journal of chemical education* 7.2, S. 172–178.
- (2021a). „Eine Lehrkräfte-Fortbildung im Portrait: Lowcost Experimente zu verschiedenen Brennstoffzelltypen für den Einsatz im Chemieunterricht.“ In: *CHEMKON*, zur Publikation angenommen. DOI: 10.1002/ckon.202100043.
- (2021b). „Mit Lactase zum elektrischen Strom – enzymatische Brennstoffzellen auf Filterpapierbasis für den Chemieunterricht“. In: *CHEMKON*, zur Publikation angenommen.
- Kumar, Ravinder u. a. (2018). „Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology: A review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances“. In: *International Journal of Energy Research* 42.2, S. 369–394. DOI: 10.1002/er.3780.
- Kurzweil, Peter und Ottmar Schmid (2016). *Brennstoffzellentechnik: Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung*. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2019). *Leitlinie für Bildung nachhaltige Entwicklung: Schule in NRW Nr.: 9052*. Düsseldorf.
- Morozova, O. V. u. a. (2007). „Blue Laccases“. In: *Biochemistry (Moscow)* 72.10, S. 1396–1412.

- Orth, Jean Marc und Helmut Wenck (2001). „Biochemische Brennstoffzellen im schulchemischen Experiment“. In: *CHEMKON* 8.3, S. 138–142. DOI: 10.1002/ckon.20010080305.
- Potter, Michael Cresse (1911). „Electrical Effects Accompanying the Decomposition of Organic Compounds“. In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 84.571, S. 260–276. DOI: 10.1098/rspb.1911.0073.
- Quaschnig, Volker (2018). *Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe – Techniken und Planung – Ökonomie und Ökologie – Energiewende*. 4. Aufl. München: Hanser.
- Rasmussen, Michelle, Sofiene Abdellaoui und Shelley D. Minter (2016). „Enzymatic biofuel cells: 30 years of critical advancements“. In: *Biosensors & bioelectronics* 76, S. 91–102. DOI: 10.1016/j.bios.2015.06.029.
- Sahu, O. P. und S. Basu (2014). „Direct Alcohol Alkaline Fuel Cell as Future Prospectus“. In: *Advanced Energy: An International Journal (AEIJ)* 1.1, S. 43–52.
- Santoro, Carlo u. a. (2017). „Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review“. In: *Journal of power sources* 356, S. 225–244.
- Schröder, Uwe und Falk Harnisch (2011). „Eine Technologie im Aufbruch: Mikrobielle Brennstoffzellen und ihr Weg in die Anwendung“. In: *LABORPRAXIS*, S. 20–22.
- Silveira, Gustavo, Masaharu Ikegaki und José Maurício Schneedorf (2017). „A low-cost yeast-based biofuel cell: An educational green approach“. In: *Green Chemistry Letters and Reviews* 10.1, S. 32–41. DOI: 10.1080/17518253.2016.1278280.
- Tausch, Michael W., Claudia Bohrmann und Michael Seesing (2002). „Eine no-cost Brennstoffzelle“. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 51.6, S. 43–44.
- Yahiro, A. T., S. M. Lee und D. O. Kimble (1964). „Bioelectrochemistry: I. ENZYME UTILIZING BIO-FUEL CELL STUDIES“. In: *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Specialized Section on Biophysical Subjects* 88.2, S. 375–383. DOI: 10.1016/0926-6577(64)90192-5.

## 8 Gefährdungsbeurteilungen

Nachfolgend finden Sie die Gefährdungsbeurteilungen zu den Versuchen des Workshops in der entsprechenden Reihenfolge.

Diese wurden mithilfe von DEGINTU<sup>1</sup> gewissenhaft erstellt. Möglich war dies nur unter Angabe des fiktiven Raums „Seminarlabor“, der alle sicherheitsrelevanten Kriterien erfüllt. Prüfen Sie vor einem Einsatz der Versuche daher, ob Ihr schulischer Chemieraum diese Anforderungen ebenfalls erfüllt, und, informieren Sie sich selbst ergänzend über mögliche Gefahren.

Der Inhalt dieses Skripts wurde gewissenhaft erarbeitet. Trotzdem übernehmen wir für den Inhalt, die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie eventuelle Tipp-/Druckfehler keine Haftung.

---

<sup>1</sup> siehe auch: <https://degintu.dguv.de/>

# Modellversuch zur Alkalischen Brennstoffzelle

Versuchs-Kategorie: **Elektrochemie**

Schülerversuch für alle Jahrgangsstufen

**Geräte**

- 2 Krokodilklemmen und 2 Kabel
- 2 Rasierscherfolien / Bleistiftminen
- 100 mL-Becherglas und Pappe
- Batterie
- Digitalmultimeter
- kleiner Verbraucher
- Stativmaterial



Ggf. unten stehende Erläuterungen zu den Piktogrammen beachten.

**Versuchsdurchführung**

**Durchführung I:**

- Geben Sie Kalilauge in das Becherglas.
- Rollen Sie die Rasierscherfolien jeweils auf und fixieren Sie diese mit jeweils einer Krokodilklemme./ Schritt entfällt bei der Verwendung von Bleistiftminen.
- Stecken Sie die Enden der Krokodilklemmen durch die Löcher in der Pappe und verbinden Sie die Krokodilklemmen jeweils mit einem Kabel.
- Klammern Sie die Pappe mithilfe des Stativmaterials, sodass der Aufbau gegen Umfallen gesichert ist.
- Elektrolysieren Sie etwa 60 Sekunden mithilfe der Batterie. Beobachten Sie dabei insbesondere die Rasierscherfolien.

**Durchführung II:**

- Messen Sie die Zellspannung in mV mithilfe des Digitalmultimeters oder schließen Sie den Propeller an. Beobachten Sie außer dem Verbraucher auch die Rasierscherfolien / Bleistiftminen.

**Gefährdungen durch:**

Stoffliche Eigenschaften	vorhanden	weitere Gefährdungen
KMR-Stoff 1A/1B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> weitere Gefahren und Hinweise <hr/>
durch Einatmen	<input type="checkbox"/>	
durch Hautkontakt	<input checked="" type="checkbox"/>	
durch Augenkontakt	<input checked="" type="checkbox"/>	
Brandgefahr	<input type="checkbox"/>	
Explosionsgefahr	<input type="checkbox"/>	
weitere Gefahren	<input type="checkbox"/>	

**Schutzmaßnahmen**

Bau-, Ausrüstung, Einrichtung und organisatorische Maßnahme vgl. RiSU III – 2.4.4 und III – 2.4.5 <input checked="" type="checkbox"/>	 Schutzbrille <input checked="" type="checkbox"/>	 Schutzhandschuhe <input type="checkbox"/>	 Abzug <input type="checkbox"/>	 Lüftungsmaßnahmen <input type="checkbox"/>	 geschlossenes System <input type="checkbox"/>	 Brandschutzmaßnahmen <input type="checkbox"/>	<b>Weitere Schutzmaßnahmen</b> <hr/>
--	---	--	---------------------------------------	---	--	--	---

Chemikalien							
Stoffbezeichnung	Anmerkung	Signalwort	Piktogramm	H-Satz	P-Satz	Tätigkeit.	Typ
Kalilauge 1N -		GEFAHR					Edukt

### Sicherheitshinweise

### Persönliche Schutzausrüstung

Eine **Gestellschutzbrille** ist zu tragen.

### Verhalten im Gefahrenfall

*Keine besonderen über die allgemeinen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr hinausgehenden Maßnahmen nötig.*

### Entsorgung

Falls vorhanden in Laugen-Abfall geben, ansonsten neutralisieren.

### Substitution

Substitution von Gefahrstoffen, Verwendungsformen und -verfahren wurde geprüft. Der Versuch ist zur Vermittlung wesentlicher Lerninhalte nicht verzichtbar und kann unter Einhaltung der in der Versuchsvorschrift genannten Einschränkungen und mit den dort genannten Schutzmaßnahmen durchgeführt werden. Gefährliche Stoffeigenschaften oder andere Gefährdungen, die eine Durchführung durch Schüler/innen oder Lehrkräfte grundsätzlich ausschließen würden, sind nicht bekannt. Die Stoffliste DGUV Information 213-098 in degintu.dguv.de wurde berücksichtigt.

### Literatur

keine Angaben

### Versuch wird im folgendem Raum durchgeführt:

**Seminarlabor**

### Weitere Anmerkungen zum Versuch

*keine Angaben*

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Erstellt am 02.09.2019 17:48, für  
Bergische Universität Wuppertal;  
Chemiedidaktik, Wuppertal

# Modellversuch zu Brennstoffzellen mit Alltagschemikalien

Versuchs-Kategorie: **Elektrochemie**

Schülerversuch für alle Jahrgangsstufen

**Geräte**

**Materialien:**

- 2 Krokodilklemmen und 2 Kabel
- 2 Graphitstäbe (Bleistiftminen)
- 100 mL-Becherglas und Pappe
- Batterie
- Digitalmultimeter
- kleiner Verbraucher
- Stativmaterial

**Chemikalien:**

- dest. Wasser, H<sub>2</sub>O (l)
- Kochsalz, NaCl (s)
- Backpulver



Ggf. unten stehende Erläuterungen zu den Piktogrammen beachten.

**Versuchsdurchführung**

**Durchführung I:**

- Geben Sie etwa 80mL Wasser und einen TL Kochsalz / Backpulver in das Becherglas.
- Fixieren Sie die Graphitstäbe mit jeweils einer Krokodilklemme.
- Stecken Sie die Enden der Krokodilklemmen durch die Löcher in der Pappe und verbinden Sie die Krokodilklemmen jeweils mit einem Kabel.
- Klammern Sie die Pappe mithilfe des Stativmaterials, sodass der Aufbau gegen Umfallen gesichert ist.
- Elektrolysieren Sie etwa 60 Sekunden mithilfe der Batterie. Beobachten Sie dabei insbesondere die Graphitstäbe.

**Durchführung II:**

- Messen Sie die Zellspannung in mV mithilfe des Digitalmultimeters oder schließen Sie den Propeller an. Beobachten Sie außer dem Verbraucher auch die Graphitstäbe.

**Gefährdungen durch:**

Stoffliche Eigenschaften	vorhanden	weitere Gefährdungen
KMR-Stoff 1A/1B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> weitere Gefahren und Hinweise
durch Einatmen	<input type="checkbox"/>	
durch Hautkontakt	<input type="checkbox"/>	
durch Augenkontakt	<input checked="" type="checkbox"/>	
Brandgefahr	<input type="checkbox"/>	
Explosionsgefahr	<input type="checkbox"/>	
weitere Gefahren	<input type="checkbox"/>	

**Schutzmaßnahmen**

Bau-, Ausrüstung, Einrichtung und organisatorische Maßnahme vgl. RiSU III – 2.4.4 und III – 2.4.5	Schutzbrille	Schutzhandschuhe	Abzug	Lüftungsmaßnahmen	geschlossenes System	Brandschutzmaßnahmen	Weitere Schutzmaßnahmen
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					

Chemikalien							
Stoffbezeichnung	Anmerkung	Signalwort	Piktogramm	H-Satz	P-Satz	Tätigkeit.	Typ

**i Sicherheitshinweise**

**Persönliche Schutzausrüstung**

 Eine **Gestellschutzbrille** ist zu tragen.

**Verhalten im Gefahrenfall**

*Keine besonderen über die allgemeinen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr hinausgehenden Maßnahmen nötig.*

**♻️ Entsorgung**

Abfluss.

**⇄ Substitution**

Es ist keine weitere Prüfung erforderlich, da keine Gefahrstoffe für das Experiment verwendet werden oder entstehen.

**Literatur**

keine Angaben

Versuch wird im folgendem Raum durchgeführt:

**Seminarlabor**

**💬 Weitere Anmerkungen zum Versuch**

*keine Angaben*

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Erstellt am 02.09.2019 17:58, für  
Bergische Universität Wuppertal;  
Chemiedidaktik, Wuppertal

# Modellversuch zur Direkt-Alkoholischen Brennstoffzelle

Versuchs-Kategorie: **Elektrochemie**

Schülerversuch ab Jahrgangsstufe 5

**Geräte**

**Materialien:**

- 2 Krokodilklemmen und 2 Kabel
- 2 Rasierscherfolien
- Filmdose / kleines Plastikgefäß
- Schwammtuch
- Gaseinleitungsschlauch
- Spritze / Kolbenprober
- Digitalmultimeter
- kleiner Verbraucher
- Stativmaterial



Ggf. unten stehende Erläuterungen zu den Piktogrammen beachten.

**Versuchsdurchführung**

**Durchführung:**

- Kleben Sie in eine leere Filmdose mit einer Heißklebepistole ein Stück Schwammtuch, sodass die Dose in zwei etwa gleichgroße Räume aufgeteilt ist.
- Rollen Sie zwei Rasierscherblätter auf und fixieren Sie diese jeweils mit einer Krokodilklemme.
- Schieben Sie in eines der gerollten Rasierscherblätter einen Gaseinleitungsschlauch, in dessen Ende Sie wiederum ein kleines Stück Schwammtuch stecken.
- Befestigen Sie die Spritze mithilfe des Stativmaterials waagrecht etwas höher als der Rand des Gefäßes ist.
- Füllen Sie die eine Hälfte der Filmdose mit Kalilauge,  $c = 0,5 \text{ mol/L}$  (Lösung 1); die andere mit einer Mischung aus gleichen Teilen Kalilauge und Ethanol (Lösung 2).
- Tauchen Sie in die Kalilauge das Scherblatt mit dem Gaseinleitungsschlauch, in die alkalische Ethanol-Lösung das andere Rasierscherblatt.
- Verbinden Sie beide Elektroden über das Digitalmultimeter.
- Leiten Sie mit der Spitze Luft ein.
- Lesen Sie die Spannung am Digitalmultimeter ab.

**Gefährdungen durch:**

Stoffliche Eigenschaften	vorhanden	weitere Gefährdungen
KMR-Stoff 1A/1B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> weitere Gefahren und Hinweise <hr/>
durch Einatmen	<input type="checkbox"/>	
durch Hautkontakt	<input checked="" type="checkbox"/>	
durch Augenkontakt	<input checked="" type="checkbox"/>	
Brandgefahr	<input checked="" type="checkbox"/>	
Explosionsgefahr	<input type="checkbox"/>	
weitere Gefahren	<input type="checkbox"/>	

**Schutzmaßnahmen**

Bau-, Ausrüstung, Einrichtung und organisatorische Maßnahme vgl. RiSU III – 2.4.4 und III – 2.4.5	Schutzbrille	Schutzhandschuhe	Abzug	Lüftungsmaßnahmen	geschlossenes System	Brandschutzmaßnahmen	Weitere Schutzmaßnahmen
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<hr/>				

Chemikalien							
Stoffbezeichnung	Anmerkung	Signalwort	Piktogramm	H-Satz	P-Satz	Tätigkeit	Typ
Ethanol - 10420		GEFAHR		H225 H319	P210 P240 P403+P233 P305+P351+P338	S4K	Edukt
Kalilauge 1N -		GEFAHR				+	Edukt

### Sicherheitshinweise

### Persönliche Schutzausrüstung

Eine **Gestellschutzbrille** ist zu tragen.

### Verhalten im Gefahrenfall

*Keine besonderen über die allgemeinen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr hinausgehenden Maßnahmen nötig.*

### Entsorgung

Behälter für Laugenabfälle.

### Substitution

Substitution von Gefahrstoffen, Verwendungsformen und -verfahren wurde geprüft. Der Versuch ist zur Vermittlung wesentlicher Lerninhalte nicht verzichtbar und kann unter Einhaltung der in der Versuchsvorschrift genannten Einschränkungen und mit den dort genannten Schutzmaßnahmen durchgeführt werden. Gefährliche Stoffeigenschaften oder andere Gefährdungen, die eine Durchführung durch Schüler/innen oder Lehrkräfte grundsätzlich ausschließen würden, sind nicht bekannt. Die Stoffliste DGUV Information 213-098 in degintu.dguv.de wurde berücksichtigt.

**Anmerkungen zur Substitution**

dieser Versuch unter Verwendung von Ethanol ist der Alternativversuch zur DMFC mit Methanol.

### Literatur

keine Angaben

### Versuch wird im folgendem Raum durchgeführt:

**Seminarlabor**

### Weitere Anmerkungen zum Versuch

*keine Angaben*

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Erstellt am 02.09.2019 18:13, für  
Bergische Universität Wuppertal;  
Chemiedidaktik, Wuppertal

# Redox-Aktivität von Bäckerhefe

Versuchs-Kategorie: **Elektrochemie**

Schülerversuch für alle Jahrgangsstufen

**Geräte**

**Materialien:**

- 25mL Becherglas
- Glasstab
- Uhrglas
- Filterpapier
- Spatel
- Heizplatte

**Chemikalien:**

- Trockenhefe *Saccharomyces cerevisiae*
- dest. Wasser, H<sub>2</sub>O (l)
- Glucose, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> (s)



Ggf. unten stehende Erläuterungen zu den Piktogrammen beachten.

**Versuchsdurchführung**

**Durchführung:**

- Erstellen Sie unter kontinuierlichem Rühren eine Suspension aus 15mL dest. Wasser und 1 g Bäckerhefe.
- Geben Sie unter kontinuierlichem Rühren 2 g Glucose zu der Suspension.
- Versetzen Sie die Suspension mit 2-3 Tropfen der Metylenblau-Lösung und fotografieren Sie die Farbgebung der Suspension.
- Nehmen Sie die Zeit bis zu einer einsetzenden Farbveränderung.
- Wiederholen Sie den Versuch auf einer 30 °C warmen Heizplatte.

**Gefährdungen durch:**

Stoffliche Eigenschaften	vorhanden	weitere Gefährdungen
KMR-Stoff 1A/1B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> weitere Gefahren und Hinweise
durch Einatmen	<input type="checkbox"/>	
durch Hautkontakt	<input type="checkbox"/>	
durch Augenkontakt	<input type="checkbox"/>	
Brandgefahr	<input type="checkbox"/>	
Explosionsgefahr	<input type="checkbox"/>	
weitere Gefahren	<input type="checkbox"/>	

**Schutzmaßnahmen**

Bau-, Ausrüstung, Einrichtung und organisatorische Maßnahme vgl. RiSU III – 2.4.4 und III – 2.4.5	Schutzbrille	Schutzhandschuhe	Abzug	Lüftungsmaßnahmen	geschlossenes System	Brandschutzmaßnahmen	Weitere Schutzmaßnahmen
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					

Chemikalien							
Stoffbezeichnung	Anmerkung	Signalwort	Piktogramm	H-Satz	P-Satz	Tätigkeit.	Typ
Methylenblau - 100299		ACHTUNG		H302	P301+P312+P330	+	Edukt

### Sicherheitshinweise

**Persönliche Schutzausrüstung**

 Eine **Gestellschutzbrille** ist zu tragen.

**Verhalten im Gefahrenfall**

*Keine besonderen über die allgemeinen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr hinausgehenden Maßnahmen nötig.*

** Entsorgung**

Freisetzung des Methylenblaus in die Umwelt vermeiden, daher wässrigen Abfall in geeignetem Behälter zur Entsorgung sammeln.

** Substitution**

Substitution von Gefahrstoffen, Verwendungsformen und -verfahren wurde geprüft. Der Versuch ist zur Vermittlung wesentlicher Lerninhalte nicht verzichtbar und kann unter Einhaltung der in der Versuchsvorschrift genannten Einschränkungen und mit den dort genannten Schutzmaßnahmen durchgeführt werden. Gefährliche Stoffeigenschaften oder andere Gefährdungen, die eine Durchführung durch Schüler/innen oder Lehrkräfte grundsätzlich ausschließen würden, sind nicht bekannt. Die Stoffliste DGUV Information 213-098 in degintu.dguv.de wurde berücksichtigt.

**Literatur**

keine Angaben

**Versuch wird im folgendem Raum durchgeführt:**

**Seminarlabor**

** Weitere Anmerkungen zum Versuch**

*keine Angaben*

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Erstellt am 02.09.2019 18:31, für  
Bergische Universität Wuppertal;  
Chemiedidaktik, Wuppertal

# Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau

Versuchs-Kategorie: **Elektrochemie**

Schülerversuch für alle Jahrgangsstufen

**Geräte**

**Materialien:**

- Krokodilklemmen und Kabel
- Elektroden (Eisenbleche / Nägel)
- Stativmaterial
- 2 x 25mL Becherglas
- 50mL Becherglas
- Toilettenpapier
- Digitalmultimeter

**Chemikalien:**

- Trockenhefe *Saccharomyces cerevisiae*
- dest. Wasser, H<sub>2</sub>O (l)
- Glucose, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> (s)



Ggf. unten stehende Erläuterungen zu den Piktogrammen beachten.

**Versuchsdurchführung**

a) Erstellen Sie 50mL einer Glucose-Lösung mit w = 10 %.

b) Legen Sie in einem 25 mL-Becherglas 25mL der Glucose-Lösung vor.

c) Wiegen Sie im anderen 25 mL-Becherglas 1,5 g Trockenhefe ein und versetzen Sie diese unter kontinuierlichem Rühren mit 25mL dest. Wasser.

d) Ist eine Suspension entstanden, bringen Sie 2,5 g Glucose unter Rühren ein.

e) Bauen Sie nun die Hefe-Brennstoffzelle gemäß der Abbildung auf.

f) Messen Sie die Zellspannung in mV mithilfe des Digitalmultimeters und notieren Sie diese über einen Zeitraum von zehn Minuten im angefügten Koordinatensystem.

**Gefährdungen durch:**

Stoffliche Eigenschaften	vorhanden	weitere Gefährdungen
KMR-Stoff 1A/1B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> weitere Gefahren und Hinweise <hr/>
durch Einatmen	<input type="checkbox"/>	
durch Hautkontakt	<input type="checkbox"/>	
durch Augenkontakt	<input type="checkbox"/>	
Brandgefahr	<input type="checkbox"/>	
Explosionsgefahr	<input type="checkbox"/>	
weitere Gefahren	<input type="checkbox"/>	

**Schutzmaßnahmen**

Bau-, Ausrüstung, Einrichtung und organisatorische Maßnahme vgl. RiSU III – 2.4.4 und III – 2.4.5							<b>Weitere Schutzmaßnahmen</b> <hr/>
	Schutzbrille	Schutzhandschuhe	Abzug	Lüftungsmaßnahmen	geschlossenes System	Brandschutzmaßnahmen	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					

Chemikalien							
Stoffbezeichnung	Anmerkung	Signalwort	Piktogramm	H-Satz	P-Satz	Tätigkeit.	Typ

**i Sicherheitshinweise**

**Persönliche Schutzausrüstung**

 Eine **Gestellschutzbrille** ist zu tragen.

**Verhalten im Gefahrenfall**

*Keine besonderen über die allgemeinen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr hinausgehenden Maßnahmen nötig.*

**♻️ Entsorgung**

Abfluss.

**⇄ Substitution**

Es ist keine weitere Prüfung erforderlich, da keine Gefahrstoffe für das Experiment verwendet werden oder entstehen.

**Literatur**

keine Angaben

Versuch wird im folgendem Raum durchgeführt:

**Seminarlabor**

**💬 Weitere Anmerkungen zum Versuch**

*keine Angaben*

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Erstellt am 03.09.2019 10:00, für  
Bergische Universität Wuppertal;  
Chemiedidaktik, Wuppertal

# Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau

Versuchs-Kategorie: **Elektrochemie**

Schülerversuch für alle Jahrgangsstufen

**Geräte**

**Materialien:**

- Eierkarton-Hülse
- Krokodilklemmen und Kabel
- Elektroden (Eisenbleche / Nägel)
- Stativmaterial
- 2 x 25mL Becherglas
- 100mL Becherglas
- Große Büroklammer
- Digitalmultimeter

**Chemikalien:**

- Trockenhefe *Saccharomyces cerevisiae*
- dest. Wasser, H<sub>2</sub>O (l)
- Glucose, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> (s)
- Saccharose, C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub> (s)



Ggf. unten stehende Erläuterungen zu den Piktogrammen beachten.

**Versuchsdurchführung**

- Befestigen Sie die Eierkarton-Hülse mit der Öffnung nach oben mithilfe der Büroklammer am Rand des 100 mL-Becherglases.
- Bauen Sie die Anordnung gemäß der Abbildung zunächst trocken auf.
- Fixieren Sie die Elektroden mithilfe von Stativmaterial.
- Achten Sie beim Anbringen der Elektroden darauf, dass diese weder mit der Eierkarton-Hülse noch mit der Büroklammer Kontakt haben.
- Geben Sie unter kontinuierlichem Rühren mit dem Glasstab zu der 1,5 g Hefe im 25 mL-Becherglas 25mL destilliertes Wasser, bis keine Klumpen mehr sichtbar sind.
- Lösen Sie 2,5 g Glucose unter Rühren mit dem Glasstab in der Hefe-Suspension.
- Überführen Sie die Suspension in die Eierkarton-Hülse und zeitgleich die Glucose-Lösung in den Bereich außerhalb.
- Messen Sie die Zellspannung in mV mithilfe des Digitalmultimeters und notieren Sie diese über einen Zeitraum von zehn Minuten im angefügten Koordinatensystem.
- Wiederholen Sie den Versuch unter Verwendung von Saccharose und Saccharose-Lösung.

**Gefährdungen durch:**

Stoffliche Eigenschaften	vorhanden	weitere Gefährdungen
KMR-Stoff 1A/1B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <b>weitere Gefahren und Hinweise</b> <hr/>
durch Einatmen	<input type="checkbox"/>	
durch Hautkontakt	<input type="checkbox"/>	
durch Augenkontakt	<input type="checkbox"/>	
Brandgefahr	<input type="checkbox"/>	
Explosionsgefahr	<input type="checkbox"/>	
weitere Gefahren	<input type="checkbox"/>	

Schutzmaßnahmen						
Bau-, Ausrüstung, Einrichtung und organisatorische Maßnahme vgl. RiSU III – 2.4.4 und III – 2.4.5						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
						<b>Weitere Schutzmaßnahmen</b> <input type="text"/>

Chemikalien							
Stoffbezeichnung	Anmerkung	Signalwort	Piktogramm	H-Satz	P-Satz	Tätigkeit	Typ

**Sicherheitshinweise**

**Persönliche Schutzausrüstung**

 Eine Gestellschutzbrille ist zu tragen.

**Verhalten im Gefahrenfall**

*Keine besonderen über die allgemeinen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr hinausgehenden Maßnahmen nötig.*

**Entsorgung**

Abfluss.

**Substitution**

Es ist keine weitere Prüfung erforderlich, da keine Gefahrstoffe für das Experiment verwendet werden oder entstehen.

**Literatur**

keine Angaben

Versuch wird im folgendem Raum durchgeführt:

**Seminarlabor**

**Weitere Anmerkungen zum Versuch**

*keine Angaben*

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Erstellt am 03.09.2019 10:23, für Bergische Universität Wuppertal; Chemiedidaktik, Wuppertal

# Enzymatische Brennstoffzelle auf Filterpapierbasis mit Lactase/Lactose

Versuchs-Kategorie: **Elektrochemie**

Schülerversuch ab Jahrgangsstufe 5

**Geräte**

**Materialien:**

- Mörser und Pistill
- Filterpapier
- Parafilm
- Tropfpipette
- 3 Petrischalen
- Bechergläser
- 2 Schnappdeckelgläser (mit Deckel)
- Pinzette
- Kabel
- Krokodilklemmen
- Foldbackklammern
- DMM / Cassy und Laptop

**Chemikalien:**

- Aktivkohle, C (s)
- Lactase-Tabletten
- Lactose-Lösung mit w=1%, (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>)n (aq)
- dest. Wasser, H<sub>2</sub>O (l)



Ggf. unten stehende Erläuterungen zu den Piktogrammen beachten.

## Versuchsdurchführung

**Gefährdungen durch:**

Stoffliche Eigenschaften	vorhanden	weitere Gefährdungen
KMR-Stoff 1A/1B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> weitere Gefahren und Hinweise
durch Einatmen	<input checked="" type="checkbox"/>	
durch Hautkontakt	<input checked="" type="checkbox"/>	
durch Augenkontakt	<input checked="" type="checkbox"/>	
Brandgefahr	<input checked="" type="checkbox"/>	
Explosionsgefahr	<input checked="" type="checkbox"/>	
weitere Gefahren	<input type="checkbox"/>	

**Schutzmaßnahmen**

Bau-, Ausrüstung, Einrichtung und organisatorische Maßnahme vgl. RiSU III – 2.4.4 und III – 2.4.5	Schutzbrille	Schutzhandschuhe	Abzug	Lüftungsmaßnahmen	geschlossenes System	Brandschutzmaßnahmen	Weitere Schutzmaßnahmen
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					

Chemikalien							
Stoffbezeichnung	Anmerkung	Signalwort	Piktogramm	H-Satz	P-Satz	Tätigkeit	Typ
Natriumdodecylsulfat - 20800		GEFAHR		H228 H315 H318 H335 H412 H302+H332	P210 P261 P280 P370+P378 P301+P312+P330 P305+P351+P338+P310		Additiv

### Sicherheitshinweise

**Persönliche Schutzausrüstung**

Eine **Gestellschutzbrille** ist zu tragen.

**Verhalten im Gefahrenfall**

*Keine besonderen über die allgemeinen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr hinausgehenden Maßnahmen nötig.*

**Entsorgung**

Feststoffabfall.

**Substitution**

Substitution von Gefahrstoffen, Verwendungsformen und -verfahren wurde geprüft. Der Versuch ist zur Vermittlung wesentlicher Lerninhalte nicht verzichtbar und kann unter Einhaltung der in der Versuchsvorschrift genannten Einschränkungen und mit den dort genannten Schutzmaßnahmen durchgeführt werden. Gefährliche Stoffeigenschaften oder andere Gefährdungen, die eine Durchführung durch Schüler/innen oder Lehrkräfte grundsätzlich ausschließen würden, sind nicht bekannt. Die Stoffliste DGUV Information 213-098 in degintu.dguv.de wurde berücksichtigt.

**Literatur**

keine Angaben

Versuch wird im folgendem Raum durchgeführt:

**Seminarlabor**

**Weitere Anmerkungen zum Versuch**

*keine Angaben*

Datum: \_\_\_\_\_

Unterschrift: \_\_\_\_\_

Erstellt am 03.09.2019 13:32, für  
Bergische Universität Wuppertal;  
Chemiedidaktik, Wuppertal