

# Bau und Funktion einer mikrobiologischen Brennstoffzelle

Didaktische Analyse von StR Johannes Almer und OStR Thomas Gerl

## Sachanalyse

Brennstoffzellen stellen mobile Energieversorgungssysteme dar, die durch kontinuierliche Zufuhr eines Brennstoffes und eines Oxidationsmittels elektrische Energie erzeugen können.<sup>1</sup> Im Gegensatz zu der im Sprachgebrauch meistens gemeinten Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle erfolgt bei der mikrobiologischen Brennstoffzelle der Energieumwandlungsprozess mit Hilfe des aeroben Stoffwechsels von Hefepilzen (*Saccharomyces cerevisiae*).

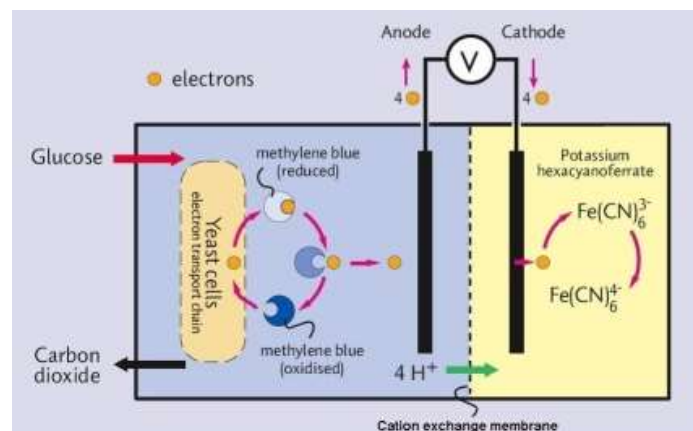


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer mikrobiologischen Brennstoffzelle<sup>2</sup>

Dabei bauen die Hefepilze an der Anode durch Glykolyse, oxidative Decarboxylierung und Zitronensäure-Zyklus Glucose zu  $\text{CO}_2$  und Reduktionsäquivalenten in Form von  $\text{NADH}_2$  bzw.  $\text{FADH}_2$  ab. Über die gekoppelten Redoxreaktionen in der Atmungskette (s. Abbildung 2) werden Reduktionsäquivalente regeneriert, in dem diese Elektronen über eine Redoxkette auf den Endakzeptor Sauerstoff übertragen und dabei ATP durch chemioosmotische Vorgänge erzeugen.

<sup>1</sup> verändert nach: <http://de.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzelle>

<sup>2</sup> <http://www.scienceinschool.org/2010/issue14/fuelcell>

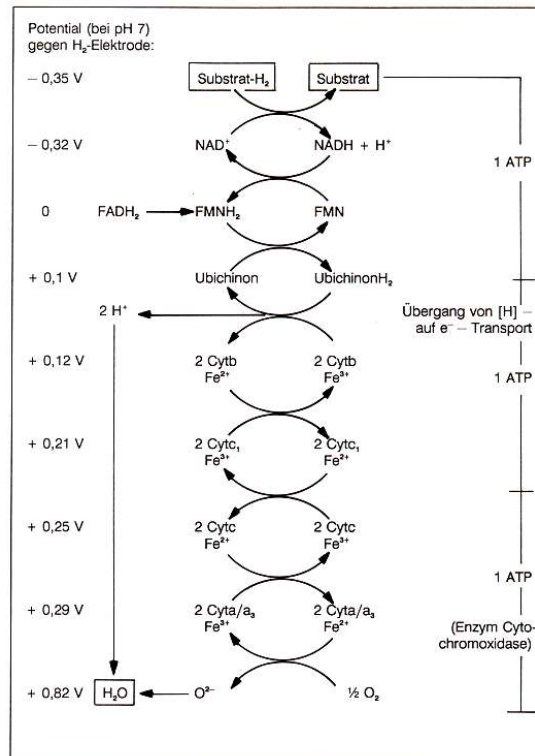
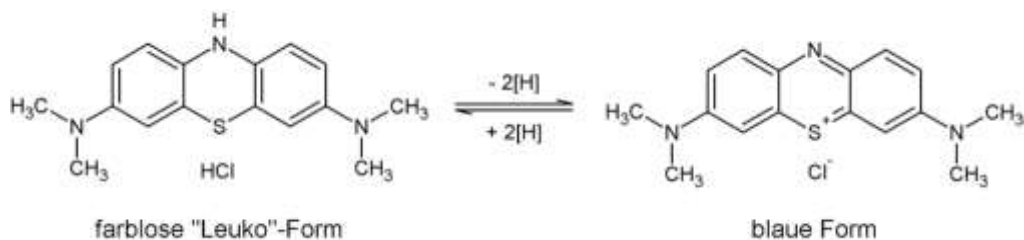


Abbildung 2: Schematischer Ablauf der Atmungskette<sup>3</sup>

Im Fall der mikrobiologischen Brennstoffzelle wird in die Redoxreihe der Atmungskette eingegriffen, in dem man den Redoxindikator Methyleneblau zu den Hefepilzen gibt. Biomembranen sind für diese Substanz weitgehend permeabel, so dass dieser Stoff in die Mitochondrien der Hefepilze diffundiert. Mit einem Redoxpotenzial von ca. 0,01V bei pH=7<sup>4</sup> konkurriert die oxidierte Form des Methyleneblaus mit dem FMNH<sub>2</sub>-Redoxsystems aus der Atmungskette um die Elektronen aus den Reduktions-äquivalenten NADH<sub>2</sub> bzw. FADH<sub>2</sub>.

Dabei wird das Methyleneblau durch zwei Elektronen zu seiner farblosen Leukoform reduziert<sup>5</sup>:

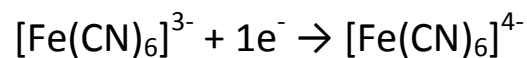


<sup>3</sup> <http://www.chemieunterricht.de/dc2/ws-bclm/abb36.htm>

<sup>4</sup> <http://www.omikron-online.de/cyberchem/cheminfo/0379-lex.htm>

<sup>5</sup> [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d8/Methyleneblau\\_Redox.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d8/Methyleneblau_Redox.png)

Dieser Vorgang lässt sich durch eine rasche Entfärbung der Lösung beobachten. Die reduzierte Leukoform diffundiert dann aus den Zellen heraus, zu einem Carbonvlies, das in die methylenblauhaltige Hefesuspension eintaucht. Dort gibt Leukomethylenblau die Elektronen an das Carbonvlies ab und wird wieder oxidiert. Über die elektrisch leitende Verbindung wandern die Elektronen zu einem zweiten Carbonvlies, das in die Kathoden-Halbzelle taucht. Die Elektronen reduzieren dort Hexacyanoferrat(III)-Ionen zu Hexacyanoferrat(II)-Ionen gemäß:



Der Ladungsausgleich zwischen den Halbzellen erfolgt durch Protonen, die durch eine Protonenaustauschmembran von der Anoden-Halbzelle zur Kathoden-Halbzelle wandern.

In der vorliegenden Unterrichtssequenz wurden die oben beschriebenen, z. T. sehr komplexen Zusammenhänge didaktisch stark reduziert, um den Schülerinnen und Schülern aus der Jahrgangsstufe 8 dennoch das Grundprinzip der Energieumwandlung in lebenden Systemen und ihre technische Nutzbarmachung anschaulich vermitteln zu können. Eine Beschreibung dieser Elementarisierungsprozesse findet sich im Kapitel *Unterrichtssequenz* dieser didaktischen Analyse.

## Didaktische Analyse

### Lehrplanbezug

Da die Unterrichtseinheit in der Jahrgangsstufe 8 in Physik und Biologie fächerübergreifend unterrichtet wird, finden sich folgende Bezüge im Lehrplan für das bayerische Gymnasium:

#### Physik (Grundwissenskatalog):

- Sie kennen das Erhaltungsprinzip als Grundidee des Energiekonzepts und können damit einfache Probleme auch quantitativ lösen.
- Sie wissen, dass es verschiedene, ineinander umwandelbare Energiearten gibt und dass Arbeit und Wärme Formen übertragener Energie sind.
- Sie können die Größen Spannung, Stromstärke, Widerstand und elektrische Energie auf einfache Beispiele aus der Technik anwenden.
- Sie haben einen Überblick über Energieversorgungssysteme und deren Auswirkung auf die Umwelt.

#### Biologie:

- Ernährungsformen und Stoffwechseltypen im evolutionären und ökologischen Zusammenhang: heterotroph, autotroph, anaerob, aerob



## Lernziele

Die geplante Unterrichtseinheit verfolgt folgende Lernziele.

### Projektbezogene Lernziele

Bezugnahme auf allgemeine Lernziele, die im Rahmen des Mission2Mars Projektes erreicht werden sollen und in der Einleitung der Dokumentation aufgeführt wurden.

Die Schüler sollen ...

- ihre Fertigkeiten Experimente sauber zu dokumentieren weiter verbessern.
- Experimente zu einem vorformulierten Forschungsauftrag frei entwickeln und durchführen können.
- für naturwissenschaftlich-technologische Fragestellungen bei Jugendlichen begeistert werden.

Zusätzlich sollte durch die Entwicklung neuer Unterrichtsmaterialien zu einem herausforderten Thema auch die Lehrermotivation erhöht werden.

### Fachspezifische Lernziele

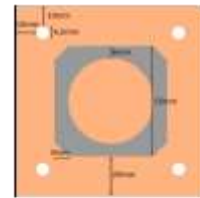
Die Schüler sollen ...

- ... den Aufbau eines funktionsfähigen Brennstoffzellegehäuses so analysieren können, dass sie dieses Gehäuse ohne weitere Anleitung nachbauen können.
- ... die mikrobiologische Brennstoffzelle nach einer Anleitung in einen Stromkreis einbauen können und dabei beobachten, wie ein Kondensator durch die Aktivität der Brennstoffzelle geladen wird.
- ... durch die Beobachtung eines laufenden Elektromotors erkennen, dass bei der MiBiZ dem aeroben Stoffwechsel der Hefepilze Energie entzogen wird.
- ... mit Hilfe einfacher schematischer Skizzen die Bedeutung von Methyleneblau bei diesem Experiment modellhaft verstehen.
- ... moderne Bauteile wie Kondensatoren im Einsatz kennenlernen.
- ... einen geschlossenen Stromkreis bauen und den Einsatz von Voltmeter kennenlernen.
- ... Grundbegriffe des elektrischen Schaltkreises kennenlernen (Polung, Pluspol, ...).
- ... regenerative Energien und deren Probleme anhand einer Übung erfahren.

## Materialbedarf

### Bauteile für die Brennstoffzellenkammer (Gehäuse)<sup>6</sup>:

2 Versuchskammern aus Plexiglasteilen<sup>7</sup> (s. Abbildung 3),  
 4 Senkschlitzschrauben, 8 Flügelmütter, 8 Beilagscheiben, 2 Abdeckplatten,  
 1 kationenpermeable Membran,  
 2 innen abgeschliffenen Foldbackklammern, 2 Carbonvliese



### Bauteile für den äußeren Stromkreis:

2 Krokodklemmen, 1 GreenCap 3F Kondensator, 1 Solarmotor,  
 4 Experimentierkabel, Multimeter inklusive Kabel

### Chemikalien:

Hefesuspension mit Bäckerhefe, Phosphatpuffer pH=7  
 (fertig zu kaufen),

Methylenblau-Lösung (10mM fertig zu kaufen),

Glucose-Lösung

(1M, d. h. 18g Feststoff in 100mL Phosphatpuffer pH=7 lösen),

Kaliumhexacyanoferrat(III)-Lösung

(0,02mM, d. h. 0,538g Feststoff in 100mL Phosphatpuffer pH=7 lösen) evtl. Joghurtbakteriensuspension

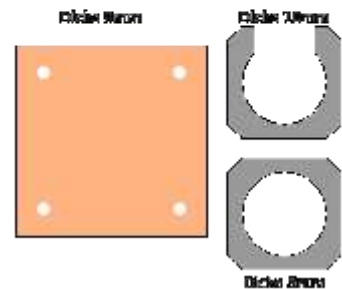


Abbildung 3: Plexiglas-Bauteile der Brennstoffzellenkammer (Vorlage für den Acryl-Betrieb)

### Werkzeug:

Schlitzschraubenzieher, Isolierband für Foldbackklammern, evtl. Schmirgelpapier für verrostete Foldbackklammern



Abbildung 4: Auf Holzplatten montierte Elektromotoren RF300C inklusive Anschlussstecker.



Abbildung 5: Materialbedarf einer Gruppe für das Brennstoffzellen-Gehäuse

<sup>6</sup> Auf Grund der zahlreichen benötigten Materialien wäre es sehr hilfreich, wenn sich alle Bauteile als Versuchssets zusammenstellen ließen, die man dann käuflich erwerben kann.

<sup>7</sup> Die Bauteile der Versuchskammer wurden bei einer Firma zur Acrylglassherstellung nach eigener Vorlage in Auftrag gegeben.

Um die Kosten niedrig und das Handling für Schüler zu erleichtern zu halten, wurden sowohl die 3F GreenCaps als auch die Solarmotoren RF300C selber auf Halterungen fixiert und mit Kontakten versehen (s. Abbildung 4).

Die oben angegebenen Materialien sind für eine Schülergruppe (Abbildung 5) ausgelegt, wobei in den durchgeführten kleinen Gruppen mit 2 Schülern bewährt haben. Das Material wurde an 2 Ausgabestationen bereitgestellt, so dass die Schüler schnell und ohne Drängeln die Versuchskammern bauen können.

### Vorbereitende Arbeiten

Da das Laden der Kondensatoren sehr lange dauert (ca. 0,5V/min.), man aber für einen ausreichend langen Betrieb des Elektromotors einen derartig hochkapazitiven Kondensator benötigt, wurden diese auf 350mV vorgeladen. Dazu bietet sich eine Parallelschaltung an, wobei der Kontaktwiderstand nicht zu vernachlässigen ist, so dass man das Spannungsgerät möglichst an verschiedenen Positionen der Parallelschaltung anbringen sollte für eine zügige Ladung.

Die Hefesuspension sollte möglichst eine Stunde vor der Unterrichtseinheit hergestellt werden, damit sich die Hefepilze an die entsprechenden Bedingungen anpassen können.

### Komplette Übersicht in chronologischer Reihenfolge:

1. Kondensator vorladen auf ca. 350mV
2. Chemikalien ansetzen und in die beiden Flaschen geben

#### *Flüssigkeit 1:*

Eine Packung Trockenhefe in 100mL 0,1M Phosphatpuffer (pH=7,0) für ca. 12h suspendieren. Ca. 1h vor Versuchsbeginn 5mL einer 1M Glucose-Lösung (18g Glucose in 100mL Phosphatpuffer auflösen) und 5mL einer 10mM Methylenblau-Lösung zugeben.

#### *Flüssigkeit 2:*

100 mL Kaliumhexacyanoferrat(III)-Lösung (0,6g Kaliumhexacyanoferrat(III)-in 100mL Phosphatpuffer auflösen ) der Konzentration 0,02 mol/L herstellen

3. Kationenaustauschmembran über Nacht in Wasser aktivieren
4. Vorführräumen aufbauen
5. Arbeitsblätter kopieren
6. Bauteile herrichten
7. PC mit Beamer für Video- und Powerpoint-Präsentation bereit stellen

# Unterrichtssequenz

**Zeitbedarf:** 1 Doppelstunde

**Organisationsform:** Teamteaching mit einem Biologie- und einem Physiklehrer

Im Vorfeld der hier vorgestellten Unterrichtseinheit wurden mit den Schülerinnen und Schülern im Biologieunterricht grundsätzliche Stoffwechselltypen in einem klassischen Unterrichtsverfahren erarbeitet, so dass die Begriffe aerober Abbau und Heterotrophie eingeführt sind und die Bedeutung des abbauenden Stoffwechsels als Energiequelle für lebende Zellen klar ist.

In der hier vorgestellten Unterrichtseinheit soll diese Grundidee des Stoffwechsels dahingehend erweitert werden, dass der Energieumwandlungsprozess des Stoffwechsels nun so modifiziert werden könnte, dass die freiwerdende Energie technisch nutzbar wird. In einer etwas anschaulicheren Sprache könnte man davon sprechen, dass ein Ziel der Unterrichtseinheit ist die Energieversorgung der Hefepilze so "anzuzapfen", dass daraus ein elektrisches Energieversorgungssystem entsteht mit dem sich ein Elektromotor betreiben lässt.

Als motivatorischen Einstieg haben wir ein Szenario entwickelt bei der die Schülerinnen und Schüler in der Entwicklungsabteilung eines Mission2-Mars-Teams sitzen und von ihrem (etwas ungehaltenen) Chef per Video-Botschaft (*Brennstoffzelle.mp4*) den Auftrag erhalten eine von einem "Konkurrenzunternehmen" bereits entwickelte, durch wirre Zufälle in unsere Hände gefallene mikrobiologische Brennstoffzelle nachzubauen und wenn möglich zu verbessern. Diese dramaturgische Gestaltung hat den Vorteil, dass die Schülergruppe sich als Team versteht, das gemeinsam etwas für einen externen Auftraggeber leisten muss. Die unterrichtenden Lehrkräfte schlüpfen dann in die Rolle von "Teamleitern", die in diesem Szenario nicht Auftraggeber und Beurteilender sind, sondern Ansprechpartner und Hilfe, um gemeinsame Ziele zu erreichen, d. h. den externen Auftrag auszuführen.

Im Anschluss an die kurze motivatorische Hinführung mit einer Videosequenz wiederholt der Biologielehrer in einem Lehrervortrag noch einmal die Grundzüge des Stoffwechsels. Dabei wird auf eine Vorstellung der bei diesen Vorgängen ablaufenden Redoxreaktionen weitestgehend verzichtet. Die

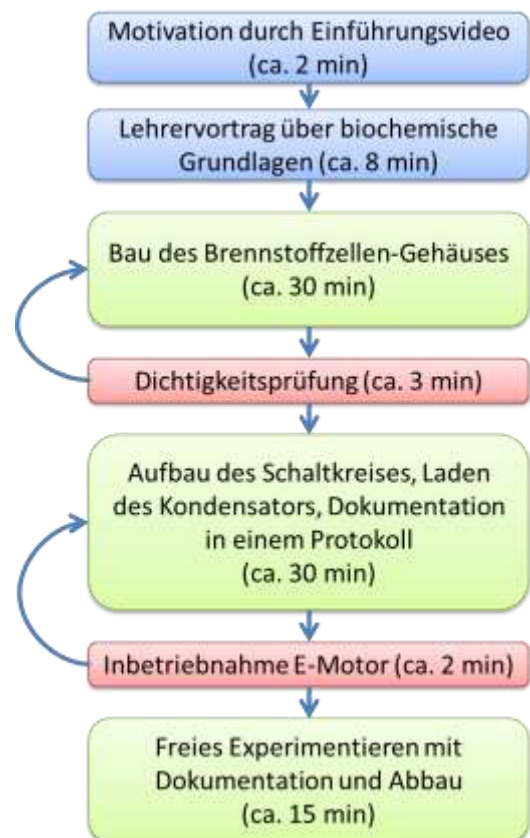


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Unterrichtsablaufs



Quintessenz dieser instruktiven Phase ist dabei den Schülerinnen und Schülern wieder vor Augen zu führen, dass die “Stoffwechselenergie” der Hefepilze letztlich aus der Umwandlung energiereicher Nahrung (Glucose und Sauerstoff) zu energiearmen Kohlenstoffdioxid und Wasser stammt. Dabei werden die Vorgänge innerhalb der Zelle als Blackbox betrachtet und die freiwerdende Energie in anschaulicher Weise als “Sterne” dargestellt (s. Brennstoffzelle.pptx Folie 3).

Dieses bereits aus den Vorstunden bekannte Wissen wird im Anschluss erweitert, in dem das Ziel die Stoffwechselenergie in elektrische Energie umzuwandeln, den Schülerinnen und Schülern dargebracht wird. Im Rahmen der didaktischen Reduktion wird die Funktion des Methylenblaus als Transportsystem vorgestellt, das - stark vereinfacht ausgedrückt - “Energie” aus der Zelle heraus transportieren und in einen Stromkreis einspeisen kann. Als Metapher für dieses Transportsystems wird dabei ein LKW verwendet, der durch die Zelle fährt und “Energie-Sterne” aufladen und an einem Carbonvlies wieder abladen kann (s. Brennstoffzelle.pptx Folie 4).

Im Anschluss erfolgt eine intensive, freie Arbeitsphase in der die Schülergruppen die Brennstoffzellengehäuse bauen. Zur Qualitätskontrolle ihres Aufbaus müssen die Arbeitsgruppen mit ihren fertigen Gehäusen zum Teamleiter (=Lehrkraft) gehen, der mit Wasser eine Dichtigkeitsprüfung des Gehäuses durchführt. Ist das Gehäuse nicht dicht, muss die Arbeitsgruppe ihren Aufbau optimieren, ist das Gehäuse dicht, erhält sie von ihrem Teamleiter die weiteren Vorgehensschritte als Arbeitsblatt (s. AB\_Brennstoffzelle\_fertig.pdf) ausgeteilt.



Abbildung 7: Das Carbonvlies muss die Kammer möglichst vollständig ausfüllen. Die kationenpermeable Membran darf gerne etwas größer sein für eine hohe Dichtigkeit.

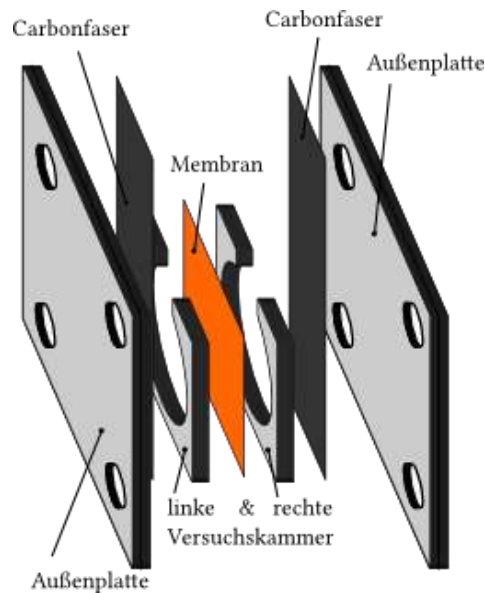


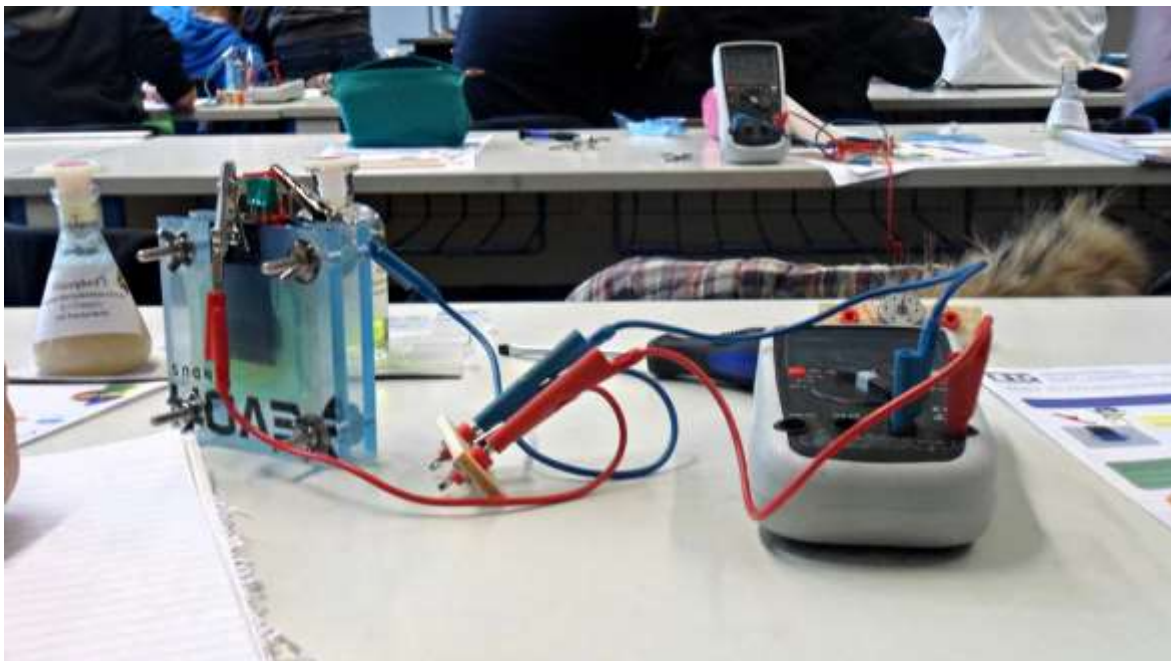
Abbildung 8: Explosionszeichnung der Versuchskammer



Dabei werden die dichten Gehäuse von den Schülergruppen mit entsprechenden Chemikalien befüllt und in einen Stromkreis mit Elektromotor nach Anleitung eingebaut. Bis sich der Motor dreht, muss erst ein Kondensator geladen werden, da die Energie einer einzelnen mikrobiologischen Brennstoffzelle nicht ausreicht den Motor direkt anzutreiben und man so den Kondensator als Zwischenspeicher für die freigesetzte Energie braucht.

Nach dieser instruktiven Phase erfolgt der Arbeitsauftrag für die Schülergruppen, an Hand von fertigen Brennstoffzellen, deren Aufbau so zu analysieren, dass sie die Gehäuse mit den ausliegenden Materialien nachbauen können. Der Ansatz die Gehäuse nicht nach einer gezeichneten Bauanleitung Schritt für Schritt zusammen zu setzen, sondern an Hand von originalen Brennstoffzellen, die Gehäuse nach zu bauen, wurde gewählt, um die Schülerinnen und Schüler stärker in den Entwicklungsprozess des technischen Gerätes mit einzubeziehen und durch das Gefühl tatsächlich etwas Neues zu bauen, ihre intrinsische Motivation zu erhöhen.

Während dieser Ladephase beginnen die Schülerinnen und Schüler mit der Dokumentation ihrer Arbeiten. Sie müssen dabei eine schematische Skizze des Versuchsaufbaus anfertigen, ein Foto des Versuchsaufbaus machen (s. Abbildung 9) und eine Wertetabelle für die Spannung am Kondensator in Abhängigkeit von der Zeit erstellen.



**Abbildung 9:** Der vollständige Aufbau zum Laden des Kondensators inklusive Spannungsüberprüfung mit einem Multimeter. Sind die Kondensatoren vorgeladen, muss unbedingt auf die Polung geachtet werden.

Die schwierigste Aufgabe bei der Dokumentation dürfte für die Schülerinnen und Schüler die Anfertigung eines Schaltplanes der Versuchsapparatur sein, da sie hier die konkreten Objekte (Verbraucher, Stromquelle, Kabel, Kondensatoren, ...) in Form einer symbolischen Schreibweise (s. Abbildung 10) dokumentieren müssen, d. h. diese Aufgabe setzt ein großes Maß an Abstraktionsfähigkeit voraus und eignet sich sehr gut zur Binnendifferenzierung innerhalb der Gruppe.

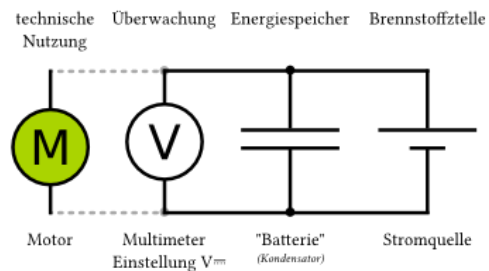
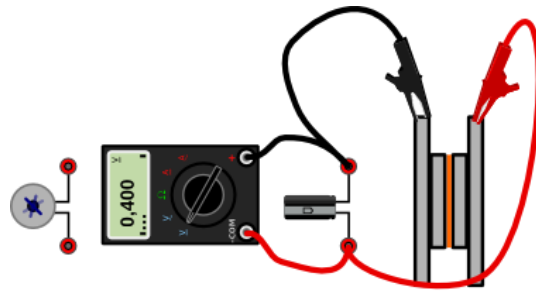


Abbildung 10: Schüler müssen nach dem realistischen Bild den Schaltplan erstellen und anschließend, notfalls mit einer Hilfskarte, in der abstrakten Darstellung wiedergeben.

Um auch den Leistungsschwächeren die Möglichkeit zu geben, steht ihnen bei Bedarf eine Hilfskarte zur Verfügung (s. Abbildung 11).

**Mission2Mars**  
Modul Energiebereitstellung  
Hilfskarte

---

**Thema: Bau und Funktion einer biologischen Brennstoffzelle**

Falls du die allgemeinen Symbole in elektrischen Schaltkreisen vergessen haben solltest, gibt' s hier eine kleine Gedächtnisstütze:

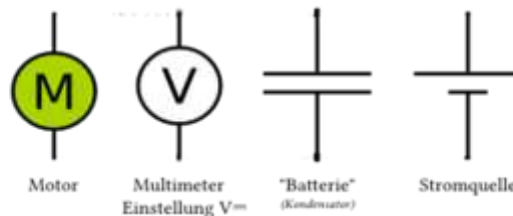


Abbildung 11: Hilfskarte für die Erstellung des Schaltplans mit den wissenschaftlichen Symbolen.

Sollte diese Informationen immer noch nicht ausreichen, stehen natürlich die beiden Lehrkräfte immer als Ansprechpartner zur Verfügung.

Nach der Dokumentation sollten die Kondensatoren soweit geladen sein ( $U=400\text{mV}$ ), dass sich der Motor zumindest für eine kurze Zeit dreht. Damit ist der experimentell verbindliche Teil für alle Schülergruppen erfolgreich abgeschlossen. Zusätzlich müssen alle noch ein Versuchsprotokoll mit oben beschriebenen Inhalten anfertigen.

Die restliche Zeit der Stunde kann dann zum freien Experimentieren genutzt werden. Dabei bieten sich zahlreiche Möglichkeiten für verschiedenste Messungen und Schaltungen. Einige Varianten sind dabei auf dem Arbeitsblatt im Bereich "Forschungsaufträge" aufgelistet.



Abbildung 12: Während des Aufladens des Kondensators erstellen die Schüler einerseits eine Wertetabelle und andererseits ein Protokoll für eine spätere Postergestaltung.

Als weitere Ausbaumöglichkeiten können die nun fertigen Brennstoffzellen-Gehäuse in einer weiteren Übungsstunde benutzt werden um durch Variation des Versuchsaufbaus die Leistungsfähigkeit der ursprünglichen Brennstoffzelle zu verbessern. Im Folgenden sollen einige dieser Fragen aufgelistet werden:

- Wie wirkt sich die Verwendung anderer Mikroorganismen wie z.B. Joghurtbakterien auf die Leistung der Zelle aus?
- Wie verändert sich die Leistungsfähigkeit der Versuchsaufbauten, wenn man mehrere Einheiten parallel oder in Serie schaltet?
- Wie wirken sich veränderte Konzentrationen (Methylenblau, Glucose, Hexacyanoferrat(III)-Anionen) auf die gemessene Leerlaufspannung aus?
- Spielt die Temperatur für die Leistungsfähigkeit der Zelle eine Rolle?
- Lässt sich die Leerlaufspannung der Zelle durch Rühren beeinflussen?
- Wie verändert sich die Leerlaufspannung der Brennstoffzellen, wenn man statt Glucose einen anderen Zucker verwendet?
- ...

Tatsächlich ergeben sich hier zahlreiche Fragestellungen, die die Schülerinnen und Schüler nicht nur selbstständig entwickeln und formulieren, sondern tatsächlich auch leicht experimentell überprüfen können.

Alles in allem zeigt sich trotz des auf den ersten Blick zu kompliziert erscheinenden Geschehens innerhalb einer mikrobiologischen Brennstoffzelle, dass bei geeigneter didaktischer Reduktion der fachlichen Inhalte, einer Fokussierung auf den technischen Aufbau des Gehäuses und die Phänomenebene des Experiments bereits in der Mittelstufe diese Inhalte durchaus ambitioniert aber dennoch schülergemäß unterrichtet werden können.



**Abbildung 13: Die Gruppen arbeiten individuell, wobei beide Lehrer jederzeit für Fragen und Anregungen zur Verfügung stehen.**

Tatsächlich können die hier angebahnten Inhalte dann in späteren Jahren z.B. im Fach Biologie im Rahmen der Stoffwechselphysiologie der Oberstufe bzw. in Chemie bei der elektrochemischen Stromerzeugung wieder aufgegriffen werden. Im Fach Physik bieten sich in späteren Jahrgangsstufen Anknüpfungspunkte bei Kondensatoren und Lade- bzw. Entladevorgängen. Eine Ausdehnung der Inhalte ins Fach Biophysik der Oberstufe ist auch denkbar. Aus diesen Gründen erscheint die Einführung dieser Inhalte in der Mittelstufe sinnvoll.

## Möglichkeiten zur Evaluation/Leistungsmessung

Im Sinne unsere HoriZONTec-Grundgedankens die Motivation für HighTech zu wecken und Begeisterung für experimentelles Tun zu erhalten, schien es uns in diesem Fall nicht sinnvoll hauptsächlich praktisches Arbeiten durch einen schriftlichen Test von Fachwissen abzuprüfen. Dennoch ergaben sich schon im Rahmen der Unterrichtseinheit zahlreiche Möglichkeiten der Qualitätskontrolle und Binnendifferenzierung, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

Der experimentelle Charakter der Unterrichtseinheit, wie sie von uns geplant wurde, bietet immer wieder Kontrollmöglichkeiten für Schülerinnen und Schüler, um den Erfolg ihrer Arbeiten anhand von Beobachtungen verifizieren zu können.

So liefert z.B. die Dichtigkeitsprüfung ein unmittelbares Feedback, ob das Gehäuse korrekt zusammengesetzt ist oder nicht ohne dass die Lehrkraft ein beurteilendes oder erklärendes Gespräch führen muss.

Ähnliches gilt für den Aufbau des Schaltkreises. Hier wurden die Arbeiten erfolgreich durchgeführt, wenn die gemessene Spannung mit der Zeit größer wird und sich letztlich der Elektromotor dreht. Auch hier liefert die unmittelbare Beobachtung von Phänomenen den Schülergruppen einen Aufschluss über die Qualität ihrer Arbeit.

Dabei beschreiben die Schülerinnen und Schüler im Anschluss an die Arbeiten gerade dieses Erlebnis des unmittelbaren “Gelingens”, d. h. einen sich drehenden Elektromotor zu sehen, als besonders motivierend.

Selbstverständlich muss bei einer solchen Unterrichtseinheit auch die Dokumentation der Ergebnisse gewürdigt werden. Deshalb wurden die Schülerinnen und Schüler gebeten ihre Aufzeichnungen und Versuchsprotokolle so zu ordnen, dass eine “Poster-Publikation” möglich wird. Besonders gelungene Werke konnten dann in der Schule ausgestellt werden, wodurch diese Arbeiten und ihre Autoren eine besondere Würdigung erfuhren.

Selbstverständlich wäre es auch denkbar die fachlichen Inhalte über eine klassische Leistungserhebung abzu prüfen.

## Literaturverzeichnis

1. <http://www.scienceinschool.org/2010/issue14/fuelcell>
2. Bennetto P (1987) Microbes come to power. *New Scientist* **114**: 36–40
3. Bennetto HP (1990) Electricity generation by micro-organisms. *BIO/technology Education* **1**: 163–168. This article can be downloaded from the NCBE website: [www.ncbe.reading.ac.uk](http://www.ncbe.reading.ac.uk) or here: <http://tinyurl.com/ncf6ql>
4. Lovley DR (2006) Bug juice: harvesting electricity with micro-organisms. *Nature Reviews Microbiology* **4**: 497–508. doi: [10.1038/nrmicro1442](https://doi.org/10.1038/nrmicro1442)
5. Anleitung [nugi-zentrum.de](http://nugi-zentrum.de) (siehe Anhang)
6. Alexej Grjasnow und Sebastian Spohner (2008) Strom aus Joghurt. Jugend Forscht. Max-Beckmann-Schule Frankfurt
7. Video von der Unterrichtsstunde <https://www.youtube.com/watch?v=KeAuZXqdkl0>