



Brücke zwischen der modernen physikalischen Forschung
und dem Unternehmertum im Bereich Nanotechnologie

Quantenphysik

*Die Physik der sehr kleinen Teilchen
mit großartigen Anwendungsmöglichkeiten*

Teil 2

QUANTENEIGENSCHAFTEN & TECHNOLOGIE

Lernstation XII:

Mikrobielle Brennstoffzelle



Quantum Spin-Off is funded by the European Union under the LLP Comenius
programme
(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).
Renaat Frans, Laura Tamassia, Erica Andreotti
Contact: renaat.frans@khlim.be

Dieses Material gibt nur die Meinung der Autoren wieder. Die Europäische Kommission kann für den Einsatz der Informationen
dieser Webseite nicht verantwortlich gemacht werden.

ÜBERSETZT VON:



Inhaltsverzeichnis

LERNSTATION XII: MIKROBIELLE BRENNSTOFFZELLE

Einführung	3
1. Funktionsweise einer mikrobiellen Brennstoffzelle und Anwendungsbereiche	3
1.a. Mögliche Anwendungsbereiche der mikrobiellen Brennstoffzelle	4
2. Zellatmung	5
3. Elektrochemie und Bioelektrochemie	7
3.a. Redoxreaktionen	7
3.b. Elektrochemie	8
3.c. Bioelektrochemie	9
4. Nanostrukturierte Materialien für die mikrobielle Brennstoffzelle	10
4.a. Über nanostrukturierte Materialien.....	10
4.b. Nano-Verbundwerkstoffe für die mikrobielle Brennstoffzelle	12
5. Effizienz der mikrobiellen Brennstoffzelle	12
6. Mikrobielle Brennstoffzellen aus verfügbaren Materialien	14

Attribution-Non-Commercial-Share-Alike-4.0-International (CC BY-NC-SA 4.0)

Es gelten die folgenden Bedingungen:

- Attribution – Sie müssen die [entsprechenden Quellen nennen](#), einen Link auf die Lizenz bereitstellen und [angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden](#). Sie können dies auf beliebige sinnvolle Art und Weise tun, allerdings nicht so, dass suggeriert wird, der Lizenzgeber würde Sie oder Ihre Verwendung unterstützen.
- NonCommercial – Sie dürfen das Material nicht für [kommerzielle Zwecke](#) verwenden.

Sie dürfen:

- Teilen – das Material in Form beliebiger Medien oder Formate kopieren und weiter verteilen
- Adaptieren – das Material neu zusammenstellen, transformieren und darauf aufbauen

Der Lizenzgeber kann diese Freiheiten nicht widerrufen solange die Lizenzbedingungen eingehalten werden.

Auf das Werk ist wie folgt zu verweisen:

Tamm, T. (2015). Quantum SpinOff Lernstation: Mikrobielle Brennstoffzelle. Institut für Technologie, Universität Tartu, Estland.



Lernstation XII:

Mikrobielle Brennstoffzelle

Einführung

Ziel dieser Lernstation ist es, grundlegende Kenntnisse aus verschiedenen Bereichen zu vermitteln, die das Verständnis der Funktionsweise einer mikrobiellen Brennstoffzelle ermöglichen. SchülerInnen bekommen die Gelegenheit, aus leicht zugänglichen Materialien selbst ein mikrobielles Brennelement herzustellen. Im Rahmen der Lernstation werden neueste Fortschritte aus dem Forschungsbereich vorgestellt, aber auch die hinter mikrobiellen Brennstoffzellen stehende Theorie kommt nicht zu kurz. Phänomene zu verstehen, die häufig schwierig zu erfassen sind und für die sich deshalb kaum jemand interessiert, ist der Schlüssel zum Bau eines echten Gerätes. Wenn man das Ganze von einem breiteren Standpunkt aus betrachtet, könnte das vorliegende Material also das Interesse der SchülerInnen für die Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie praktische Übungen wecken, während sie darüber nachdenken, wie die Dinge eigentlich funktionieren. Die Lernstation setzt sich aus mehreren unabhängigen, aber miteinander verknüpften Modulen zusammen, da ja auch die mikrobielle Brennstoffzelle auf Phänomenen aus unterschiedlichen Bereichen beruht.

Zunächst einmal werden die grundlegenden Funktionsmechanismen der mikrobiellen Brennstoffzelle vorgestellt. Anschließend sehen wir uns an, was sie so effizient macht. Dafür müssen wir uns mit den grundlegenden Prinzipien unterschiedlicher Forschungsbereiche befassen: Das erste Hintergrundthema betrifft die in Zellen ablaufenden Prozesse. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Zellatmung und dem Zellstoffwechsel. In einem nächsten Schritt untersuchen wir den Energiegehalt organischer Materie und die Möglichkeit, daraus Energie zu gewinnen. Anschließend machen wir uns mit elektrochemischen Prozessen vertraut, darunter jenen, die in der Natur ablaufen. Zum Schluss erfahren wir, welche Materialien für den Bau einer mikrobiellen Brennstoffzelle in Frage kommen und wie der Stand der Technik auf diesem Gebiet ist.

1. Funktionsweise einer mikrobiellen Brennstoffzelle und Anwendungsbereiche

Ganz allgemein gesagt beruht das Prinzip der mikrobiellen Brennstoffzelle (MBZ) darauf, dass die von Mikroorganismen erzeugten Elektronen in einem Gerät aufgefangen und zur Elektrizitäts-/Energiegewinnung verwendet werden. Mikroorganismen nehmen Energie auf, indem sie unterschiedliche Oxidations- und Reduktionsprozesse durchlaufen, während derer die chemische Stoffenergie (teilweise) in Elektrizität umgewandelt wird. Durch die Oxidierung organischer Substanzen geben Mikroorganismen Elektronen ab. In der Natur werden diese freigesetzten Elektronen dann für andere Prozesse verwendet. Die Idee hinter MBZ ist, dass diese Elektronen in einer Elektrode (Anode) gesammelt werden, von wo aus sie in einen äußeren Stromkreis gelangen, so dass ihre Energie für den Antrieb eines elektronischen Geräts genutzt werden kann. Anschließend bewegen sich die Elektronen weiter zur gegenüberliegenden Elektrode (Kathode), wo ein bestimmter Reduktionsprozess abläuft (in der Regel die Reduktion von Sauerstoff aus der Luft). Genau wie die Elektronen müssen auch die während der Oxidierung freigesetzten und bei der Reduktion verwendeten Protonen von einer Elektrode zur nächsten gelangen. Normalerweise kommen die Protonen durch eine protonenleitende Membran auf die andere Seite.

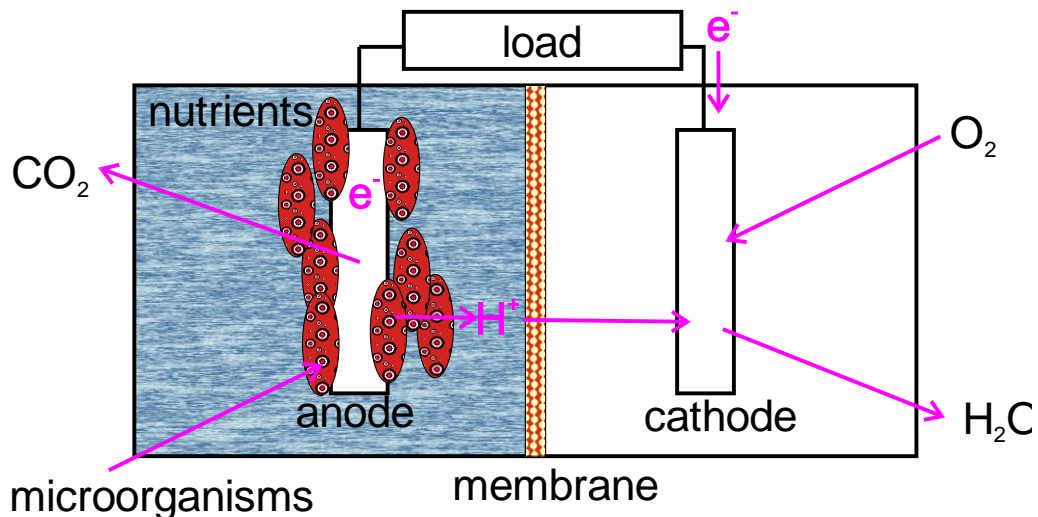


Abbildung 1. Schematische Darstellung einer MBZ

Genau wie viele andere interessante Phänomene der modernen Wissenschaft wurde die Fähigkeit von Mikroorganismen zur Energieerzeugung bereits vor vielen Jahren entdeckt. Bereits 1911 gelang es M. Potter, Elektrizität aus *E. Coli* herzustellen. Allerdings vergingen viele Jahre, bis die Funktionsweise der MBZ vollständig verstanden war und man zielgerichteter an dem Phänomen forschen konnte. Die Arbeit von H. P. Bennetto zu Beginn der 1980er Jahre leistete einen wichtigen Beitrag zum Übergang der MBZ von einem verschrobenen Forschungsthema hin zu einem Gerät mit tatsächlichem praktischen Nutzen.

1.a. Mögliche Anwendungsbereiche der mikrobiellen Brennstoffzelle

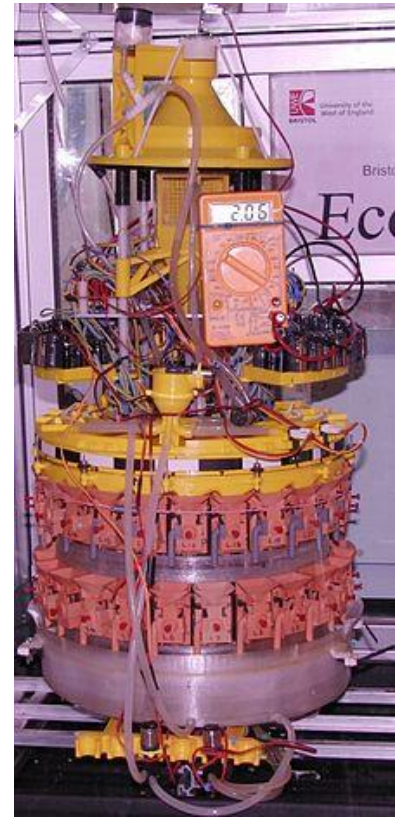
Die MBZ wird häufig als wichtige alternative Energiequelle der Zukunft genannt, aber bevor dies Wirklichkeit werden kann, wird es noch eine ganze Weile dauern und ist noch viel Forschungsarbeit nötig. Bis dahin können wir uns mit einer Reihe von spezifischeren Anwendungsmöglichkeiten der MBZ beschäftigen. Zu den realistischeren Anwendungsbereichen gehören:

- i) **Abwasseraufbereitung:** Eine der Vorteile von Mikroorganismen ist ihre Doppelfunktion. Sie erzeugen nicht nur Energie, sondern reinigen auch Wasser. Man geht heute davon aus, dass Mikroorganismen insbesondere in der Aufbereitung von Abwässern aus der Landwirtschaft und der Lebensmittelindustrie eine Rolle spielen werden, die einen hohen Gehalt an organischer Materie aufweisen. Die Hauptaufgabe der MBZ wäre dann, ein Gegengewicht zu energieintensiven Techniken der Abwasseraufbereitung zu bilden.
- ii) **Stromversorgung für Unterwasser- oder Fernüberwachungsgeräte:** Dank des technischen Fortschritts verbrauchen moderne Geräte heute weniger Strom. Verschiedene unabhängig arbeitende Sensoren, die beispielsweise den Zustand der Umwelt überwachen, befinden sich oftmals an schwer erreichbaren Stellen, was das Auswechseln der Batterien in diesen Sensoren zu einer komplizierten Aufgabe macht. Die Fähigkeit von MBZ, vor Ort vorhandenes organisches Material als Brennstoff zu verwenden, wäre in dieser Situation perfekt, da eine geringe Leistung durch die Möglichkeit, Energie in Batterien oder Superkondensatoren zu speichern und nach Bedarf zu verwenden, kompensiert würde. Einige Sensorsysteme mit MBZ laufen seit mehr als fünf Jahren ohne Unterbrechung, was verglichen mit alternativen Lösungen ein sehr gutes Ergebnis ist.

iii) Erzeugung von Methan oder Wasserstoff: Wenn in der Kathodenkammer anaerobe Bedingungen herrschen, ist es abhängig von den Bedingungen und zu Lasten einer niedrigeren erreichbaren Anschlussspannung möglich, dass die Kathode Methan oder Wasserstoff produziert, die aufgefangen und als Brennstoffe verwendet werden können. Diese multifunktionale System wird auch als mikrobieller Reaktor bezeichnet.

iv) Autonome mobile Roboter: Die Verwendung von MBZ als Energiequelle für autonome mobile Roboter wurde breit untersucht. Eines der fortschrittlichsten bisher entwickelten Systeme ist sicher die EcoBot-Serie, deren dritte Generation 2010 entwickelt wurde (siehe Abb. 2). Die vierte Generation dieses Roboters befindet sich derzeit in der Entwicklung. Die Stromversorgung des Roboters wurde über einen Akku mit 48 MBZ sichergestellt. Unter anderem war der Roboter in der Lage, sich selbst etwas zu essen zu suchen. Einzelheiten über das Projekt zu autonomen mobilen Robotern stehen auf der Internetseite des Bristol Robotics Laboratory (in englischer Sprache) zur Verfügung:

Abbildung 2. Autonome mobiler Roboter mit EcoBot-III-MBZ (Quelle: Wikipedia)



<http://www.brl.ac.uk/researchthemes/bioenergysustainable/ecobotprojectoverview.aspx>.

Weitere Informationen zur Entwicklung der Kapazität von MBZ gibt der folgende Überblick (in englischer Sprache): <http://link.springer.com/article/10.1007/s00253-009-2378-9> (B. E. Logan. Scaling up microbial fuel cells and other bio-electrochemical systems. Applied Microbiology and Biotechnology 85(6), 2009, 1665-71).

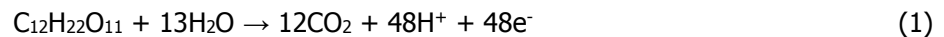
2. Zellatmung

Wie jeder andere lebende Organismus auch brauchen Mikroben Energie, um zu wachsen, sich weiterzuentwickeln und schlicht und einfach zu existieren. Um Energie zu bekommen, brauchen Organismen ein geeignetes Lebensumfeld und Nährstoffe, aber auch einen Elektronenakzeptor, der die in den Oxidationsprozessen freigesetzten Elektronen akzeptiert. Die Grundlage für die Atmung von Pflanzen und Tieren ist Sauerstoff, das letzte (empfangende) Glied in der mehrstufigen Elektronenübertragungskette. In anderen Worten handelt es sich bei der Sauerstoffreduktion um einen Prozess, bei dem die überschüssigen Elektronen des Organismus endlich verbraucht werden. Das Energiesystem von Bakterien ist deutlich flexibler: Verschiedene Bakterien können so unterschiedliche Elemente wie Schwefel und viele seiner Verbindungen, mehrere Stickstoffverbindungen und in einigen Fällen sogar Metallverbindungen mit höheren Oxidationszahlen als Elektronenakzeptor verwenden. Diese Anpassungsfähigkeit ermöglicht den Bakterien das Überleben in Umgebungen, auch anaeroben Umgebungen, in denen höhere Organismen nicht existieren können. Außerdem sind viele Bakterien in der Lage, sich an instabile oder sich verändernde Bedingungen anzupassen und in jeder Situation optimale Prozesse zu nutzen. Der aerobe (sauerstoffbasierte) Stoffwechsel ist allerdings sehr viel effizienter. Aus diesem Grunde ziehen Bakterien aerobe Prozesse zur Energiegewinnung wenn möglich immer vor.

Wenn es in der Umgebung keine geeigneten Elektronenakzeptoren gibt, können einige Bakterien (aber auch Hefepilze) eine weniger effiziente Alternative zur Energieerzeugung nutzen: Gärung. Bei der Gärung befindet sich der geeignete Elektronenakzeptor in der Zelle. Beispielsweise erhalten

Milchsäurebakterien ihre Energie, indem sie Milchzucker zu Milchsäure abbauen. Im Alltag begegnet uns dieses Phänomen bei der beabsichtigten oder unbeabsichtigten Gerinnung von Milch.

Zellatmung bezeichnet eine Reihe metabolischer Reaktionen und Prozesse in der Zelle. Als Ergebnis dieser Prozesse wird die biochemische Energie von Nährstoffen in Energie umgewandelt, die in Adenosintriphosphat (ATP) gespeichert wird. Überschüsse werden freigesetzt. Zellatmung ist in der Regel exotherm, das heißt, es wird Wärme abgegeben. Die anaerobe Zellatmung, bei der Energie aus Zucker hergestellt wird, lässt sich mit der folgenden Reaktionsgleichung ausdrücken (1):



Die Gleichung zeigt ganz deutlich, dass die Reaktion neben Elektronen auch viele Protonen (Wasserstoffionen) erzeugt, die freigesetzt werden müssen, da sonst das Umfeld im Organismus zu sauer würde (d. h. der pH-Wert wäre zu niedrig).

Bei der Energieerzeugung mit MBZ wurden Bedingungen für die Bakterien geschaffen, in denen die Möglichkeit, geeignete Elektronenakzeptoren in der Umgebung (Lösung) zu finden, extrem begrenzt ist. Um Energie über die Atmung und nicht die deutlich weniger effiziente Gärung zu erzeugen, verwenden die Bakterien einen extrazellulären Elektronenakzeptor: eine feste Elektrode (Anode). Die Protonen müssen aber trotzdem die Kathode erreichen, wo sie neutralisiert werden. Die Verwendung der Elektrode als Akzeptor ermöglicht es den Bakterien, die Umgebung der Elektrode (Anode) zu besiedeln und den geeignetsten Weg zu finden, das Elektron in der gegebenen Umgebung zu transportieren. Bakterien haben unterschiedliche Methoden entwickelt, um das Elektron zur Anode zu bringen (siehe Abb. 3).

Eine Option ist die Verwendung eines Vermittlers, um das Elektron durch die Zellmembran zu transportieren. Manche MBZ sind auch mit einem Vermittler ausgestattet, um die Nutzung elektrochemisch inaktiver Bakterien zu ermöglichen. Leider sind solche künstlichen Vermittler in der Regel teuer und außerdem toxisch. Deshalb wird MBZ mehr Potenzial zugeschrieben, die auf elektrochemisch aktiven Bakterien basieren, als solchen, die hinzugefügte Vermittler verwenden. Eine mögliche Strategie für die Abgabe von Elektronen sind elektrochemisch aktive Bakterien, die in der Lage sind, Nanodrähte zu erzeugen, die Elektronen transportieren (z. B. Vertreter der in MBZ häufig eingesetzten Spezies *Geobacter* und *Shewanella*). Solche bakteriellen Nanodrähte (siehe Abb. 4) können das Elektron direkt zur Elektrode, aber auch zu benachbarten Bakterien, die es weiterleiten, transportieren. Eine noch spannendere Lösung könnte es sein, die Fähigkeit von Bakterien zur Entladung zu nutzen und im System vorkommende Moleküle mit bestimmten Eigenschaften als Transportmittel zu verwenden, um Elektronen zum Akzeptor zu leiten.

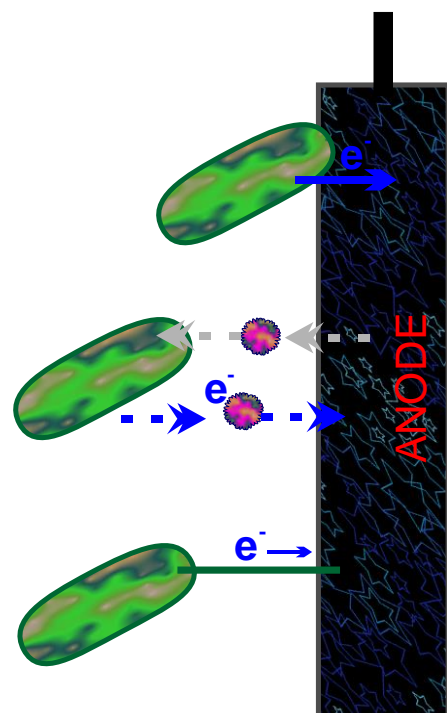


Abbildung 3. Unterschiedliche Methoden, wie Bakterien das Elektron zur Anode transportieren: Direkt (oben), über einen Vermittler (Mitte), über einen Nanodraht

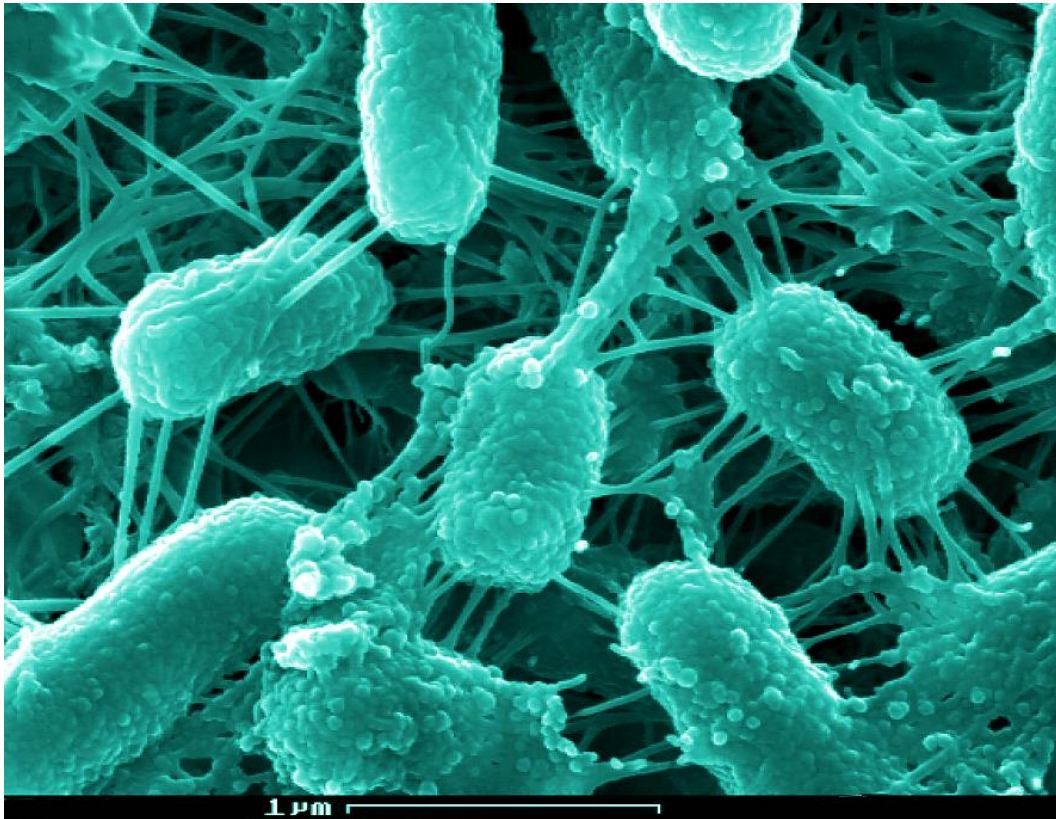


Abbildung 4. Bakterien werden durch Nanodrähte verbunden (adaptiertes REM-Mikrofoto vom BlueTechBlog – <http://bluetechblog.com/2010/06/15/make-electricity-not-sludge/>)

3. Elektrochemie und Bioelektrochemie

3.a. Redoxreaktionen

Bevor wir uns an die Elektrochemie machen, ist es vielleicht hilfreich, sich die allgemeinen Prinzipien von Reduktions-Oxidations-Reaktionen (oder **Redoxreaktionen**) in Erinnerung zu rufen, denn letztendlich sind elektrochemische Reaktionen ein Teil von Redoxreaktionen. Redoxreaktionen sind Prozesse, bei denen ein Elektron von einem Teilchen (Molekül oder Ion) auf ein anderes übergeht. Reduktion und Oxidation gehören stets zusammen: Wenn ein Teilchen (Reduktionsmittel) ein Elektron abgibt (Oxidation), muss ein anderes Teilchen (Oxidationsmittel) dieses Elektron aufnehmen (Reduktion). Schematisch können diese Übertragungen wie in Abbildung 5 dargestellt und benannt werden. Redoxreaktionen sind häufig vorkommende Reaktionen: Jedes Mal, wenn ein Element in eine Verbindung übergeht oder umgekehrt, haben wir es mit einer Redoxreaktion zu tun. Wenn die Redoxreaktion in Reaktionen zwischen Verbindungen erfolgt, wird sie durch die Änderung der Oxidationszahl eines bestimmten Elements während der Reaktion beschrieben.

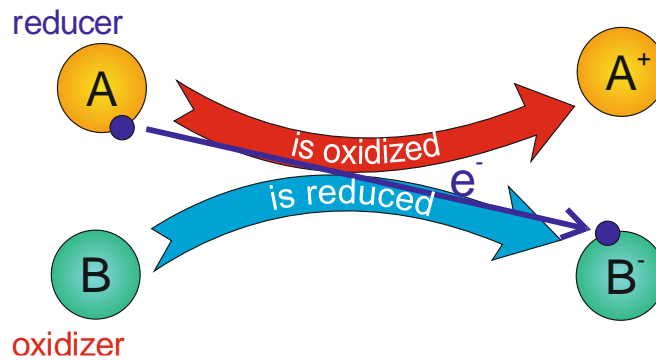


Abbildung 5. Begriffe für die Beschreibung von Redoxreaktionen. Das Reduktionsmittel ist der Stoff, der das Elektron abgibt (Oxidation). Das Elektron wird von einem Oxidationsmittel aufgenommen (Reduktion).

3.b. Elektrochemie

Die Elektrochemie befasst sich mit **elektrochemischen Reaktionen**. Entweder wird die Redoxreaktion durch eine von außen angelegte elektrische Spannung erzwungen (Elektrolyse), oder es wird durch die chemische Reaktion geeigneter Substanzen eine messbare Spannung hervorgerufen (galvanisches Element). Elektrochemische Reaktionen zeichnen sich auch dadurch aus, dass Oxidation und Reduktion niemals an demselben Ort stattfinden, sondern von einem Elektrolyt (Ionenleiter) getrennt sind, während sich die Elektronen durch den externen Kreislauf bewegen. Insgesamt vollziehen sich die elektrochemischen Reaktionen an Elektroden, die aus Metall oder anderem Halbleitermaterial bestehen.

Wenn ein Stück Metall (z. B. eine Elektrode) in eine Salzlösung des gleichen Metalls gegeben wird, entsteht am Übergang zwischen Metall und Lösung eine Potenzialdifferenz. Man spricht davon, dass die Elektrode ein gewisses Potenzial in Bezug auf die Lösung gewinnt, das so genannte **Elektrodenpotenzial**. Metalle mit einer niedrigen Aktivität (z. B. Kupfer) gewinnen ein positives Potenzial in Bezug auf die Lösung, weil Kupferionen in einem gewissen Ausmaß auf die Elektrode zueilen. In der entsprechenden Reaktionsgleichung (2) ist das chemische Gleichgewicht nach rechts (in Richtung der Entstehung der Produkte) verschoben:



Im Falle eines aktiven Materials (z. B. Zink) passiert das Gegenteil: Der bevorzugte Prozess ist die Lösung des Metalls, und die Elektrode bekommt ein negatives Potenzial in Bezug auf die Lösung. In der folgenden Reaktionsgleichung ist das chemische Gleichgewicht nach links (in Richtung der Ausgangsstoffe) verschoben:



Das erreichte Potenzial hängt deshalb von den Eigenschaften des Metalls, aber auch von der Konzentration der Lösung und der Temperatur ab. Keiner der beiden Prozesse kann alleine besonders lange so ablaufen, denn beim Kupfer fehlen der Elektrode irgendwann Elektronen, während es beim Zink zu einem Elektronenüberschuss kommt. Wenn Sie die beiden Metallstücke jedoch in einem Schaltkreis miteinander verbinden und zwischen den Lösungen für die Ionenleitfähigkeit sorgen (mithilfe einer Salzbrücke oder einer Membran), haben Sie eine chemische Energiequelle gebaut (siehe Abb. 6). Die Elektronen können sich von einer Elektrode (Anode) zur anderen (Kathode) bewegen, und die Elektrodenprozesse können so lange ablaufen, wie genug Reaktanten vorhanden sind.

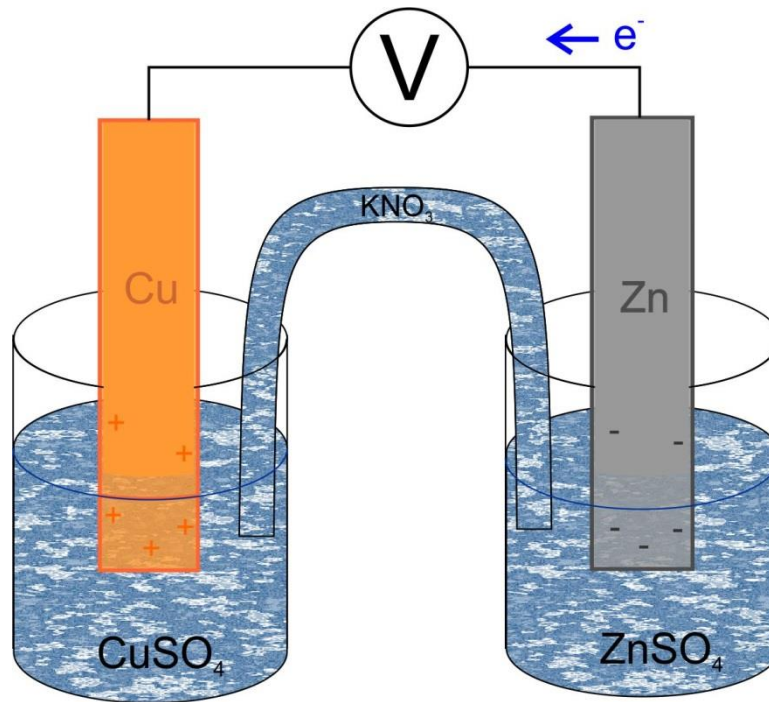


Abbildung 6. Galvanisches Element (Danielli - Jacob), bei dem die gesamte Redoxreaktion $\text{Cu}^{2+} + \text{Zn} = \text{Cu} + \text{Zn}^{2+}$ in räumlich voneinander getrennten einzelnen Elektroden stattfindet, während die Elektronen sich über einen externen Kreislauf von der Anode (Zn) zur Kathode (Cu) bewegen.

3.c. Bioelektrochemie

Die Ursprünge der Elektrochemie und der Bioelektrochemie gehen auf die berühmten Experimente von A. Volta und L. Galvani im 18. Jahrhundert zurück. Die **Bioelektrochemie** umfasst die Forschung an und Anwendung von biologischen Transportprozessen von Elektronen. Heute ist Bioelektrochemie weiter gefasst und hat Berührungspunkte mit der Medizin, der Physiologie und Bioreaktoren (auch MBZ). MBZ sind bei weitem nicht der einzige Bereich, in dem sich Elektrochemie und (Zell-) Biologie überlappen. Forscher untersuchen beispielsweise die Möglichkeiten für den Einsatz biologischer Materialien in den Bereichen Elektronik, Datenspeicherung, Bionik und mehr. Auch im Bereich biologische Elektrosynthese, wo neue Substanzen mithilfe von Mikroorganismen synthetisch hergestellt werden, gibt es große Entwicklungen.

Weitere Informationen zu Anwendungsmöglichkeiten der Bioelektrochemie gibt der folgende Artikel: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/13640321> (Deepak Pant, Anoop Singh, Gilbert Van Bogaert, Yolanda Alvarez Gallego, Ludo Diels, Karolien Vanbroekhoven. *An introduction to the life cycle assessment (LCA) of bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy and product generation: Relevance and key aspects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2), 2011, 1305–1313).

4. Nanostrukturierte Materialien für die mikrobielle Brennstoffzelle

4.a. Über nanostrukturierte Materialien

Lange Zeit ging man davon aus, dass MBZ nur wenig Potenzial besitzen, da ihre Produktivität und Effizienz niedrig seien – insbesondere im Vergleich zu anderen Brennelementen – und ihr Bau teure Materialien erfordere. Über die Hälfte der Kosten einer klassischen MBZ hängt mit dem Material für die Kathode (meist Platin oder ein anderer Sauerstoffreduktionskatalysator) zusammen. Mehr als die Hälfte der verbleibenden Kosten sind dem Material für die Membran zuzurechnen. In der letzten Zeit gab es jedoch bedeutende Entwicklungen in diesem Bereich. Zu den wichtigsten gehört die Verwendung von günstigeren Nano-Verbundwerkstoffen (oft auf Basis von nanostrukturiertem Kohlenstoff – siehe Abb. 7) für die Elektroden. Solche Elektroden verfügen über eine bessere Leitfähigkeit, eine lange Haltbarkeit und eine große spezifische Oberfläche. Außerdem weisen sie häufig nützliche katalytische Eigenschaften auf. Dies ist sehr wichtig für den Aufbau von MBZ, da ihre Effizienz von dem für die Elektrode verwendeten Material abhängt. Das Material der Anode entscheidet über die Ansiedlung der Bakterien, die Geschwindigkeit des Elektronentransports und die Oxidierung der Nährstoffe und damit über die Gesamtkapazität der MBZ. Wichtige Merkmale der Kathode sind die spezifische Oberfläche der Elektrode und ihre katalytischen Eigenschaften für die Beschleunigung des Prozesses der Sauerstoffreduktion.

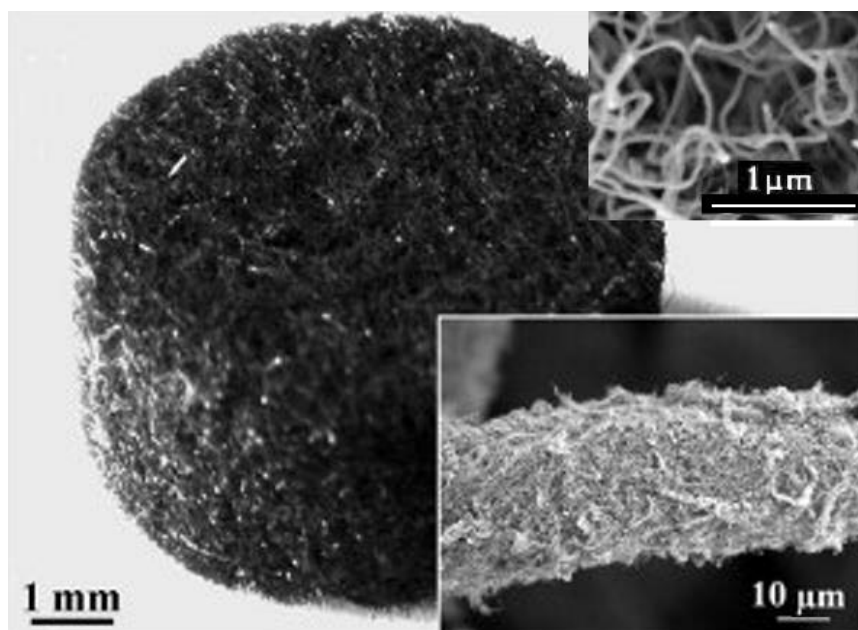


Abbildung 7. Kohlenstofffilz mit nanostrukturierter Kohlenstofffaser in unterschiedlicher Vergrößerung (in Anlehnung an R. Vieira, <http://dx.doi.org/10.5772/8145>).

In den letzten Jahren hat die Nanotechnologie eine Revolution in vielen Bereichen der Naturwissenschaft und Technik hervorgebracht, da die besonderen, vom Nanobereich abgeleiteten Eigenschaften wesentliche Verbesserungen des Verhaltens unterschiedlicher Materialien oder allgemeiner die Entwicklung von Oberflächen oder Materialien mit bisher undenkbaren Eigenschaften ermöglichen. Die Errungenschaften der Nanotechnologie sind in vielen Feldern sichtbar, beispielsweise in den Techniken der Bereiche Textilien, Kunststoff- und Glasverbundwerkstoffe, in der Entwicklung von Stromquellen, in der Elektronik, Optik, Medizin, Sensortechnik und einer Reihe weiterer Geräte und Objekte. Nanomaterialien verfügen aber nicht nur über herausragende Eigenschaften, sondern sind darüber hinaus häufig relativ kostengünstig, da hocheffizient. Außerdem entsteht bei der

Produktion und Nutzung dieser Materialien wenig Abfall und Umweltverschmutzung. Nanotechnologien sind Technologien, bei denen die Verwendung von Teilchen mit einer Größe unter 100 nm neue qualitativ hochwertige Eigenschaften im Vergleich zu Materialien aus größeren Teilchen hervorbringt. Zu den wichtigsten Eigenschaften von Nanopartikeln gehören eine besonders große spezifische Oberfläche, eine höhere Aktivität (zum Teil als Folge der spezifischen Oberfläche) und eine höhere (chemische) Empfindlichkeit. Solarbatterien, Superkondensatoren und andere moderne Errungenschaften der Naturwissenschaften wären ohne Nanotechnologie undenkbar. Teilchen im Nanobereich weisen außerdem eine sehr viel höhere biologische Aktivität auf, auch wenn das in manchen Fällen eine negative Eigenschaft sein kann (z. B. wenn die Teilchen toxisch sind).

Kohlenstoffnanoröhrchen sind sicherlich die modernen nanostrukturierten Materialien, über die am meisten gesprochen wird. Das mehrere Millionen große Verhältnis zwischen Länge und Durchmesser der zylinderförmigen Röhrchen sowie ihre Widerstands- und Leitfähigkeit sind die wichtigsten Merkmale, die in der Technik genutzt werden sollen. Gleichzeitig bestehen aber noch mehrere technische Probleme: Unveränderte Nanoröhrchen sind nicht löslich, so dass es schwierig ist, dünne und ebene Schichten daraus zu extrahieren. Es ist auch schwierig, Nanoröhrchen in biologischen Anwendungen zu nutzen, da sie meist zytotoxisch (d. h. lebensgefährlich für Zellen) sind. Kohlenstoffnanoröhrchen, die nicht wesentlich chemisch verändert wurden, um ihre Löslichkeit zu erhöhen und ihre Toxizität zu verringern, eignen sich daher nicht für die Verwendung in MBZ oder anderen mikrobiellen Systemen.

Nano-Verbundwerkstoffe sind mehrphasige Verbindungen, bei denen mindestens eine Abmessung eines Bestandteils kleiner als 100 nm ist (siehe Abb. 8). Solche Materialien können organischen oder anorganischen Ursprungs sein. Die Verwendung beider Formen nimmt in der Naturwissenschaft und Technik rapide zu. Besondere Aufmerksamkeit sollte polymeren Nano-Verbundwerkstoffen gewidmet werden, bei denen eine gleichmäßige Anordnung der Nanopartikel in der polymeren Matrix dem Material erstaunlich verbesserte Eigenschaften verleiht, wobei der Materialverbrauch aber niedrig bleibt.

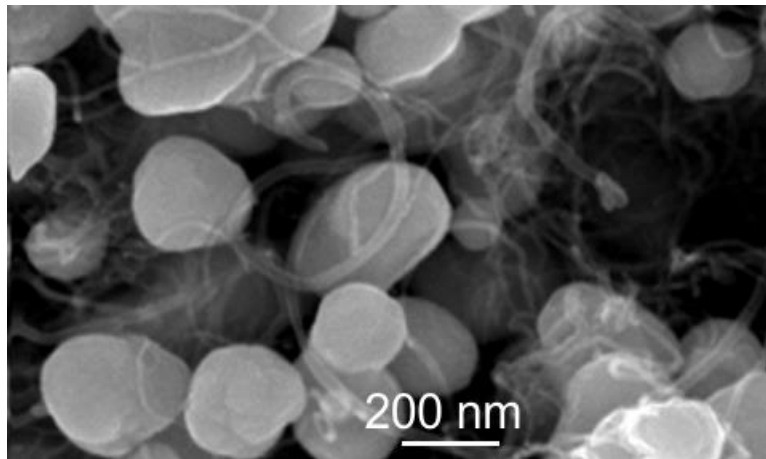


Abbildung 8. Nano-Verbundwerkstoff aus Kohlenstoffnanoröhrchen und Kupfer-Nanopartikeln (in Anlehnung an eine Abbildung der Bioneer Corp. <http://nanobio.bioneer.com>).

Weitere nanostrukturierte Materialien werden im Detail in Lernstation XI: Von der Quantenmechanik zur Nanophysik vorgestellt.

4.b. Nano-Verbundwerkstoffe für die mikrobielle Brennstoffzelle

Die von MBZ erzeugte Energie hängt direkt von der Oberfläche der Elektroden ab. Natürlich ist es technisch nicht sinnvoll, Geräte mit unendlich großen Elektroden zu bauen. Daher ist es wichtig, für die Elektroden Material mit einer großen spezifischen Oberfläche zu verwenden, bei dem die Oberfläche pro Masse- oder Volumeneinheit so groß wie möglich ist. Heutzutage werden viele unterschiedliche Kohlenstoffmaterialien mit große spezifischen Oberflächen (beispielsweise Kohlepapier, Kohlenstofffilz, Kohletuch usw.) in MBZ-Anoden eingesetzt. Häufig wird versucht, die spezifische Oberfläche zu vergrößern und die Eigenschaften des mikrostrukturierten Hauptmaterials durch die Hinzufügung nanostrukturierter Ergänzungen oder durch Behandlungen zu verbessern (siehe Abb. 9). Weitere positive Eigenschaften vieler Kohlenstoffmaterialien neben großen spezifischen Oberflächen sind die Tatsache, dass sie in einem biologischen Umfeld stabil bleiben und ihre akzeptable Leitfähigkeit. Im Falle der Kathoden besteht die traditionelle, aber leider kostspielige Methode darin, Platin auf (Kohlenstoff-) Materialien mit einer großen spezifischen Oberfläche aufzubringen, damit es als Katalysator in der Sauerstoffreduktionsreaktion wirkt. Leitfähige Polymere werden auch in der Elektrodenherstellung verwendet, als Kathode in Katalysatoren, als Grundstoff für andere Katalysatoren oder als Grundstoff für Kohlenstoffmaterialteilchen in der Anode oder Kathode. Solche Polymere weisen neben ihrer Leitfähigkeit noch andere positive Eigenschaften auf: Sie sind biokompatibel, widerstandsfähig und einfach und kontrolliert zu synthetisieren. Kontrollierbarkeit ist beim Bau von Elektroden wichtig, da die Effizienz der MBZ häufig von der Mikro- oder Nanostruktur der Elektroden abhängt. In jüngster Zeit hat sich die Forschung verstärkt gut kontrollierten polymeren Nano-Verbundwerkstoffen und ihrer Anwendung als Elektrodenmaterial zugewandt.

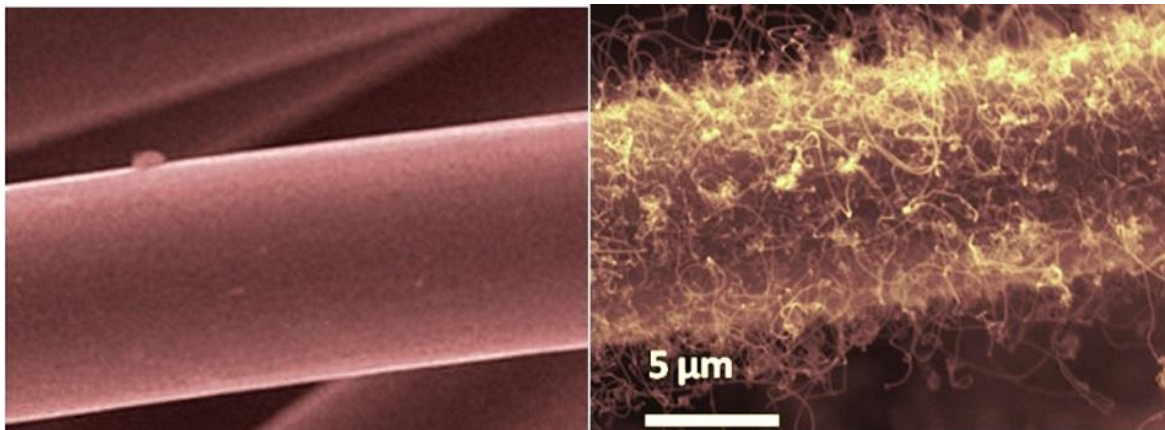


Abbildung 9. Veränderte (links) und unveränderte (rechts) Fasern von Graphitkohlenstofffilz (adaptierte REM-Mikrofotos von Shen et. al. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/130185>).

5. Effizienz der mikrobiellen Brennstoffzelle

Allgemein gilt für jede Stromquelle: Die verfügbare Leistung (P) ist abhängig von der Potenzialdifferenz (ΔE) und elektrischen Stromstärke (I) gemäß der Gleichung (4):

$$P = I \times \Delta E. \quad (4)$$

Das Ohmsche Gesetz setzt die Stromstärke und die Potenzialdifferenz über den externen Widerstandswert (R_{ext}) zueinander in Bezug. Dies ergibt die Gleichung (5):

$$\Delta E = I \times R_{\text{ext}}. \quad (5)$$

Wäre der externe Widerstand unendlich groß und die Stromstärke null, entspräche die Potentialdifferenz der elektromotorischen Kraft (E ; es sind auch Begriffe wie Leerlaufspannung und Ursprungspannung gebräuchlich). Umgekehrt würde bei null Widerstand (Kurzschluss, $\Delta E = 0$) die Stromstärke einem Kurzschlussstrom (i_{lv}) entsprechen. Der Zusammenhang zwischen Stromstärke (oder genauer Stromdichte) und Potentialdifferenz ist gut durch die Polarisationskurve (siehe Abb. 10) beschrieben, wo die elektromotorische Kraft und der Kurzschluss gut zu erkennen sind. Von der maximalen Leistung (oder Leistungsdichte) lassen sich die optimale Stromdichte (i_{opt}) und die optimale Potentialdifferenz (ΔE_{opt}) für die MBZ ableiten.

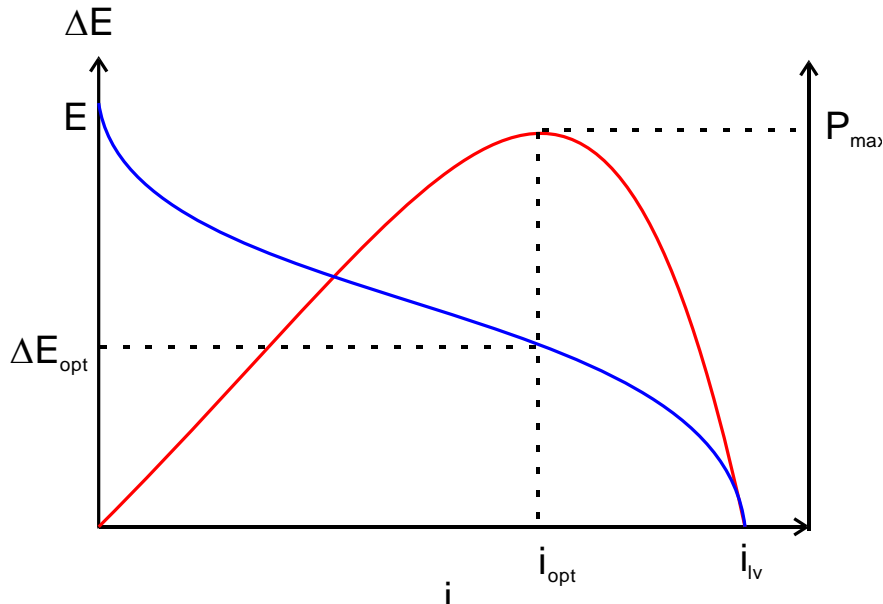


Abbildung 10. Eine typische Polarisationskurve (blau) und die entsprechende Leistungskurve (rot) der MBZ.

Die ideale Produktivität einer MBZ hängt von den Eigenschaften der elektrochemischen Prozesse ab, die zwischen dem organischen Ausgangsmaterial und dem End-Akzeptor (in der Regel Sauerstoff) ablaufen. Die MBZ verwandelt geschätzte 50-90 % der verfügbaren Energie in die Oxidierung eines organischen Nährstoffs in Elektrizität. Der Rest wird für das Wachstum von Mikroben gebraucht.

Die Anschlussspannung aus den Elektroden ist tatsächlich niedriger als dieser Idealwert, da in MBZ immer mindestens drei Arten von Energieverlust vorliegen. Die erste, Aktivierungspolarisation, spielt eine wichtige Rolle bei niedrigen Stromdichten und hängt mit der für die Reaktion notwendigen Aktivierungsenergie zusammen. Dies umfasst die Aufnahme des Ausgangsmaterials und die Abgabe der Produkte sowie die Energieschwelle der Elektronenübertragung. All dies wird umgekehrt von den Eigenschaften und der Oberfläche des Elektroden, dem verwendeten Organismus und anderen Parametern beeinflusst. Im Falle höherer Lasten gewinnt der Beitrag des Wirkwiderstands bei Energieverlusten an Bedeutung. Dies wird durch die begrenzte Elektron- und Ionen-Leitfähigkeit in verschiedenen Teilen der MBZ (Membran, Elektrolyt etc.) verursacht. Die Struktur der MBZ spielt eine wichtige Rolle für die Verringerung des Wirkwiderstands: Elektrolyte und eine Membran mit einer guten Leitfähigkeit sind vorzuziehen, während der Abstand zwischen den Elektroden so kurz wie möglich sein sollte. Bei den höchsten Ladungsdichten ist der wichtigste Faktor für die sinkende Effizienz jedoch die Konzentrationspolarisation. Diese wird durch den Rückgang verfügbarer Nährstoffe verursacht, entweder aufgrund der allgemeinen Nährstoffkonzentration oder von Problemen mit ihrer Einstufung. Dieser Verlust kann durch Rühren (entweder mechanisch oder mit Gasblasen) und die Verwendung eines ausgewogenen MBZ-Designs kontrolliert werden.

Letztendlich wurden die meisten Versuche mit MBZ unter Laborbedingungen und mit relativ kleinen Geräten durchgeführt. Diese Versuche haben gezeigt, dass es nicht ausreicht, einfach eine größere MBZ zu bauen, um die Leistung zu erhöhen, da mit der Größe die Effizienz (und insbesondere die Energiedichte) sinkt. Bessere Ergebnisse wurden durch die Zusammenfassung mehrerer MBZ in Reihen- oder Parallelschaltung erzielt. So konnten sowohl die Anschlussspannung als auch die Leistung erhöht werden.

6. Mikrobielle Brennstoffzellen aus verfügbaren Materialien

Jeder kann aus einfach verfügbaren Materialien und ohne großen Aufwand eine mikrobielle Brennstoffzelle bauen. Ein solches Gerät ist sicher keine in der Forschungsliteratur beschriebene Spitzenleistung, aber ganz bestimmt eine spannende und informative Aktivität. Im Internet lassen sich verschiedene fertige Bausätze und Anleitungen für den Bau einer MBZ finden (z. B. www.mudwatt.com/products/mudwatt?variant=766869483). Unten ist eine Möglichkeit des Baus einer MBZ mit frei verfügbaren Materialien beschrieben.

Für den Bau einer MBZ benötigen Sie Folgendes:

- Schlamm: Der einfachste Weg ist, in einem Gewässer nach Schlamm zu graben. Stellen Sie sicher, dass der Schlamm nicht all zu sehr mit Luft in Berührung kommt, um die anaeroben Bakterien zu erhalten.
- Behälter: Jede Schachtel und jedes Glas mit einem gleichmäßigen Durchmesser ist geeignet.
- Elektroden: Eine Elektrode mit einer großen spezifischen Oberfläche kann man aus verkohltem Stoff bauen. Dafür legen Sie Baumwollstücke (Denim ist ein gutes Material) in eine Metallschachtel mit einer kleinen Öffnung. Erhitzen Sie die Schachtel über einer Flamme oder Holzkohle, bis kein Rauch mehr aus der Schachtel tritt. Lassen Sie die Schachtel abkühlen. Entfernen Sie den verkohlten Stoff aus der Schachtel. Messen Sie den Widerstand des Materials mit einem Multimeter. Wenn er bei einer Messung mit 1 cm Abstand unter 200 Ohm liegt, ist das Material geeignet. Wenn der Widerstand höher als 200 Ohm ist, sollten Sie den Stoff erneut erhitzen. Um eine Elektrode zu bauen, wickeln Sie den verkohlten Stoff in ein Netz ein oder wickeln Sie einen dünnen Draht um den Stoff (verwenden Sie jedoch keinen Kupferdraht; Kupferdraht sollte nicht mit dem Schlamm in Berührung kommen, da Kupfer für viele Bakterien giftig ist).
- Membran: Aus Tafelsalz, Wasser und Gelatine lässt sich eine einfache Membran herstellen. Geben Sie 75 g Salz und 5 g Gelatine mit 200 ml Wasser in eine Pfanne. Mischen Sie das Ganze und bringen Sie die Mischung zum Kochen. Gießen Sie die Mischung in einen Behälter mit einer glatten Oberfläche (idealerweise sollte dieser dieselbe Form und den gleichen Durchmesser haben wie der Behälter, den Sie für die den Bau der MBZ verwenden). Lassen Sie die Mischung abkühlen, am besten im Kühlschrank.

Um eine MBZ zu bauen, schütten Sie Schlamm in den Behälter. Verbinden Sie eine Elektrode (Anode) mit einem Draht und stecken Sie ihn in den Schlamm. Bedecken Sie den Schlamm mit der Membran. Verbinden Sie die andere Elektrode (Kathode) mit einem anderen Draht und setzen Sie sie auf die Membran. Gießen Sie so viel Wasser auf die Membran, dass die Kathode noch halb aus dem Wasser ragt (siehe Abb. 11). Ihre MBZ ist jetzt fertig! Sie können die von Ihrer MBZ erzeugte Anschlussspannung messen, indem Sie einen Spannungsmesser zwischen den beiden Drähten

anbringen. Notieren Sie die Spannung und messen Sie sie in ein paar Tagen oder einer Woche erneut. Bis dahin sollte die Spannung gestiegen sein, da sich die Bakterien vermehren und die Anode besiedeln. Es ist hilfreich, für die Zeit des Bakterienwachstums einen Widerstand (zum Beispiel 100Ω bis $1\text{ k}\Omega$) zwischen den Enden der MBZ vorzusehen.

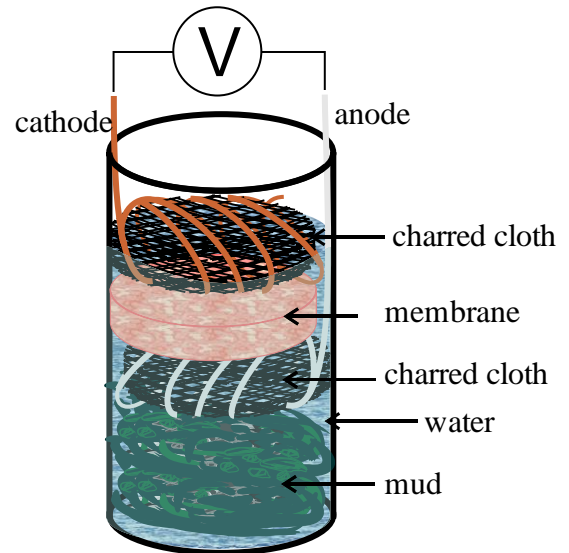


Abbildung 11. Eine selbstgebaute MBZ.

Konzepte in der Lernstation XII

In dieser Lernstation unterteilen wir die Konzepte nicht in klassische und Quanten Konzepte. Die Hauptkonzepte gehören allerdings nicht nur zur Physik, eher zu unterschiedlichen Disziplinen und sie zeigen eine Verbindung zwischen Quantenmechanik und anderen wissenschaftlichen Bereichen wie Biologie und Chemie.

Durch die Oxidierung organischer Substanzen geben Mikroorganismen **Elektronen** ab, welche von MBZs (mikrobielle Brennstoffzellen) in einer Elektrode (Anode) gesammelt werden, von wo aus sie in einen äußeren Stromkreis gelangen, so dass ihre Energie für den Antrieb eines elektronischen Geräts genutzt werden kann.

Um Energie zu bekommen, brauchen Mikroorganismen einen **Elektronenakzeptor**, der die in den Oxidationsprozessen freigesetzten Elektronen aufnimmt. Als Akzeptor können die Bakterien verschiedene **Elemente oder Verbindungen** brauchen, welche ihnen das Überleben in Umgebungen - auch anaeroben Umgebungen - ermöglichen, in denen höhere Organismen nicht existieren können.

In der Abwesenheit von genügend Elektronenakzeptoren, können Bakterien ebenfalls Energie durch **Fermentation** erhalten, welche weniger effektiv als die **Atmung** ist.

In der MBZ haben Bakterien eine sehr geringen Chance, um geeignete **Elektronenakzeptoren** zu finden. Um genügend Energie über die Zellatmung zu gewinnen, verwenden Bakterien einen extrazellulären Elektronenakzeptor - eine **feste Elektrode (Anode)**. Bakterien haben unterschiedliche Strategien entwickelt, um das Elektron zur Anode zu transportieren.

Eine mögliche Strategie für die Abgabe von Elektronen sind elektrochemisch aktive Bakterien, die in der Lage sind, **Nanodrähte** zu erzeugen, die Elektronen transportieren. Solche bakteriellen Nanodrähte können das Elektron direkt zur Elektrode transportieren sowie auch zu **benachbarten Bakterien**, die das Elektron weiterleiten.

Eine andere Strategie besteht in der Produktion oder im Einsatz von bereits existierenden **Molekülen** mit bestimmten Eigenschaften, die als Transportmittel verwendet werden können, um Elektronen zum Akzeptor zu leiten.

Die von MBZ erzeugte Energie hängt direkt von der Oberfläche der Elektroden ab. Da es praktisch gesehen nicht sinnvoll ist, Geräte mit unendlich großen Elektroden zu bauen, sollte für die Elektroden Material mit einer **großen spezifischen Oberfläche** verwendet werden. Unterschiedliche Kohlenstoffmaterialien mit großer spezifischer Oberfläche werden derzeit in MBZ-Anoden eingesetzt. Und der spezifische Oberflächenbereich des mikrostrukturierten Hauptmaterials wird oft vergrößert. Die Qualität wird verbessert durch **nanostrukturierte** Zusätze oder Modifikationen.