Biologische Brennstoffzellen

Strom aus Schlamm?

http://bfc.tuxipuxi.de

Axel Jäger, Dawiet Y. Haile und Matthias Kaiser (von links)

Max-Beckmann-Schule, Frankfurt am Main

Inhalt

Biologische Brennstoffzellen 1
Inhalt 2
Einleitung 3
Versuchsaufbau 4
Bodenprobe 4
Elektroden 4
Messungen 5
Automatische Messwerterfassung 6
Relaisplatine 6
Steuerstromkreis 6
Messstromkreis 6
Material 6
Q Lab 7
Andere Faktoren 8
Bakterien 9
Charakterisierung der Bakterien 9
Messung der elektrochemischen bakteriellen Aktivität 10
Beispiel für eine Messung 10
Ergebnisse: 11
Abiotische Faktoren 11
Physikalische Parameter 12
Zugabe einer Bakteriensuspension 14
Einfluss von Mediatoren 14
Mikrobiologische Arbeiten 14
Ergebnisse der S16 rRNA Analyse. 15
Zusammenfassung 16
Ausblick 17
Danksagung 18
Literaturliste 18

Einleitung

Im letzten Jahr haben wir uns mit Experimenten zu biochemischen Brennstoffzellen und deren Anwendungen im Unterricht beschäftigt. Hintergrund waren Berichte in Fachzeitschriften, wie z.B. Nature, in denen von solchen Zellen berichtet wurde. Sie arbeiten mit anaerob lebenden Bakterien (Archaebakterien), die sich auf einer Kohlefasermatte in einem Meerwasserbecken festsetzen und die dort, gefüttert mit organischen Säuren, Reduktionsäquivalente schaffen. Der oxidierende Teil des Systems ist die Oberfläche des Meerwassers, das gut mit Luftsauerstoff belüftet wird.

In Anlehnung an die unten beschriebenen Experimente wurde überlegt, ob in einer leicht zugänglichen Umgebung wie Schlamm auch Keime zu finden sind, die eine mikrobielle Brennstoffzelle bilden könnten. Mit ähnlichen Experimenten, z.B. der Winogradski Säule, können spezifische Umweltbedingungen geschaffen werden, in denen das Wachstum bestimmter Bakterien gefördert wird. Dabei fokussierte sich das Interesse auf obligat bzw. fakultativ anaerobe Bakterien, wie sie im Schlamm vorkommen. Als Selektionsbedingung wurde eine Natriumchloridkonzentration von 3% eingestellt, wie sie in Meerwasser durchschnittlich zu finden ist. Dadurch wurde auf halotolerante Mikroorganismen selektiert, die sich an unterschiedliche osmotische Drücke anpassen können.

Die Idee war, dass sich an einer Graphitfasermatte im anaeroben Bereich Mikroorganismen ansiedeln, die den Elektronenaustausch ihrer Stoffwechsel-Redoxprozesse über die Elektroden für uns messbar zumindest teilweise vollziehen. Anaerobier müssen, um die Glykolyse zur Energieerzeugung durchführen zu können, NADH zu NAD^+ regenerieren. Dazu müssen sie zwei Elektronen und ein Proton abgeben. Zur Aufnahme der Elektronen wurde in einem Aquarium eine Graphitfasermatte als Anode in den Schlamm gelegt und eine Platinelektrode an die Oberfläche platziert, welche mit einer kleinen Pumpe belüftet wurde. Zusammen mit den entstehenden leicht alkalischen Bedingungen an der Oberfläche (pH-Gradient) sollte dies die Triebkraft für eine Reaktion sein.

Versuchsaufbau

Bodenprobe

Die Bodenprobe wurde der Uferregion unseres Schulgarten-Teichs entnommen und in ein ca. 50 l großes Aquarium gegeben (Bodenhöhe ca. 8 cm). Das Aquarium wurde mit 3 %er Kochsalzlösung gefüllt, welches etwa dem Gehalt an Natriumchlorid im Meer entspricht.

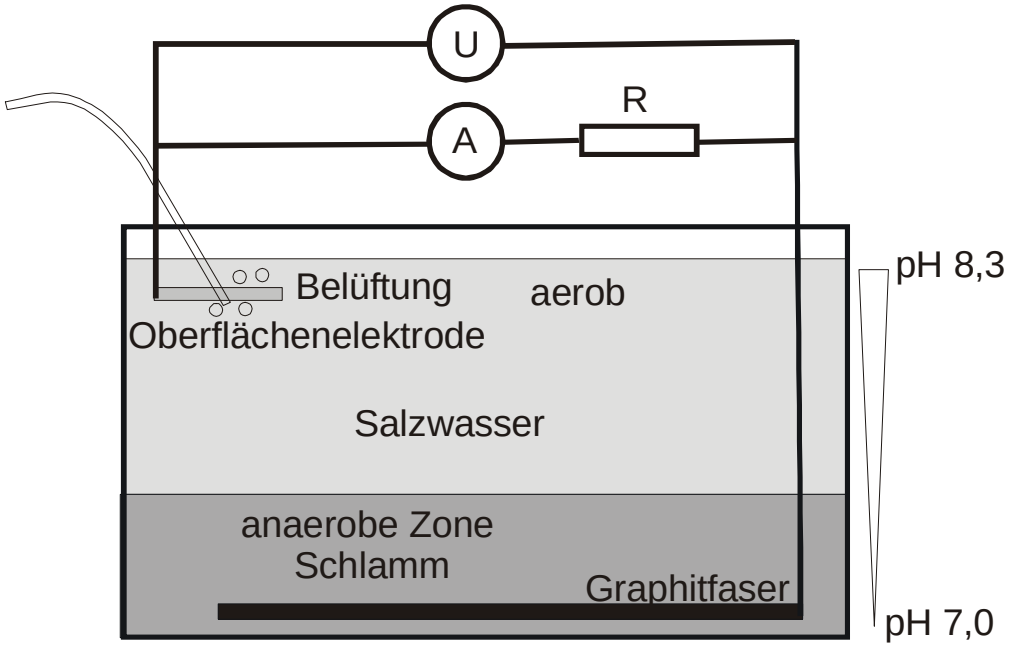


Abbildung 1 Schematischer Versuchsaufbau

Elektroden

Auf den Boden in die Schlamm/Erde-Schicht wurde eine ca. 50 cm^2 große Kohlefasermatte (Gewebe mit Fäden der Dicke von ca. 0,1 mm und ca. 400 Fäden/cm^2) gelegt. Die Matte wurde mit einem Kupferdraht verbunden, der mit einem herkömmlichen Zweikomponentenkleber nach außen isoliert mit der Kohlefaser verbunden war. Widerstandsmessungen ergaben Übergangswiderstände unter 1 Ω.

Eine zweite Elektrode aus aufgewickeltem Platindraht (0,4 mm Durchmesser, ca. 10 cm lang) wurde in der Oberflächenregion des Aquariums eingetaucht und mit einer Aquariumpumpe belüftet.

Abbildung 2 Kohlematte mit angeharztem Kupferdraht

Messungen

Gemessen wurden verschiedene Parameter: Temperatur, pH in verschiedenen Zonen, EMK (Zellspannung bei I = 0 A), Klemmspannungen und Stromstärken bei R = 47 kΩ und R = 0 Ω(Kurzschluss). In größeren Zeitabständen wurden Ammomium-, Nitrat-, Nitrit-, Phosphat- und Sauerstoffgehalt des Überstandes bzw. über der Schlammzone und die Carbonathärte unter Verwendung des Wasserlabors von Riedel de Haen bestimmt

Ständig interessante Messwerte der Zelle ist die EMK, die Spannung und Stromstärke unter Last, sowie die Kurzschlussstromstärke. Mit diesen Werten lässt sich sowohl die Leistung der Zelle, als auch eine Kennlinie bestimmen.
Die Spannung und Stromstärke zwischen den beiden Elektroden wurden zuerst mit digitalen Messgeräten der Fa. Phywe zeitabhängig verfolgt

Später entwickelten wir ein automatisches System zur Messerwerterfassung auf PC-Basis. Die Messwerte sollten möglichst ohne Umstecken von Messgeräten oder Widerständen erfasst werden. Auch das lästige Ablesen der Werte und das Aufschreiben mit einem Stift auf Papier sollte entfallen, da die Dokumentation ohnehin auf Computer geschrieben werden sollte.

Durch den Einsatz einer Relaisplatine fiel das Umstecken der verschiedenen Messschaltungen weg. Es konnte nun auf Knopfdruck zwischen verschiedenen Verbrauchern umgeschaltet werden.

Das Abschreiben der Displays wurde obsolet, als ein Multimeter zum Einsatz kam, das über einen Anschluss für einen PC verfügt. Dieses Gerät ist in der Lage, den aktuell angezeigten Messwert auf Nachfrage an den Computer zu senden, wo er von entsprechender Software verwertet werden kann.

Es musste noch eine Software geschrieben werden, die nacheinander alle Widerstandswerte über die Relaisplatine einstellt, das Multimeter ausliest und anschließend den Messwert zusammen mit einem Zeitstempel in eine Datei schreibt.

Automatische Messwerterfassung

Relaisplatine

Auf der Relaisplatine sind zwei Stromkreise aufgebaut: Der Steuerstromkreis(grün), der mit dem Computer verbunden ist und der Messstromkreis(blau), der mit der Zelle und dem Multimeter verbunden ist.

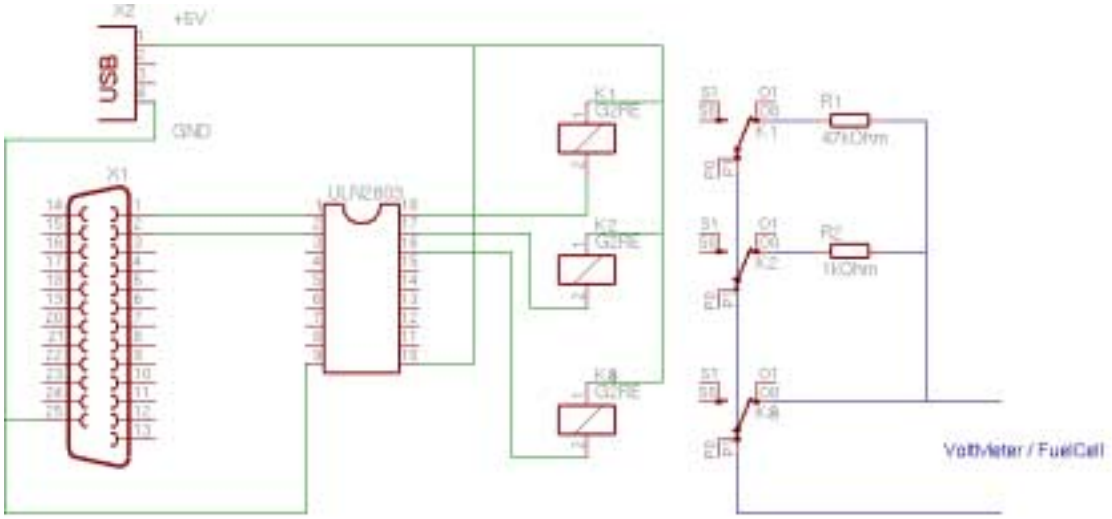


Abbildung 3 Schaltplan der Relaisplatine

Steuerstromkreis

Es ist von Softwareseite aus möglich, bis zu 16 der 25 Leitungen der parallelen Schnittstelle mit +5 V Spannung gegenüber GND zu belegen („anzuschalten“). Die parallele Schnittstelle stellt aber nicht genügend Leistung zur Verfügung, um einen elektromechanischen Schalter (Relais) auslösen zu können. Da das Problem der Relaisschaltung geläufig ist, gibt es fertige Bausteine, die zwischen Schnittstelle und Relais geschaltet werden können, und in der Lage sind, das Signal der Schnittstelle zu verstärken. In der Relaisplatine wird der Treiberbaustein ULN2803 eingesetzt, der von verschiedenen Firmen, unter anderem Motorola, Toshiba oder auch Thomson Electronics angeboten wird. Die Energie bekommt der Treiberbaustein aus einem USB-Anschluss, der im Gegensatz zum Parallelport über genügend Leistungsreserven verfügt, um externe Geräte betreiben zu können. Neben den Relais und den beiden Schnittstellen sind noch einige LEDs mit Vorwiderstand angebracht, um den Zustand der Relais anzuzeigen.

Messstromkreis

Der Steuerstromkreis kann in den Messstromkreis 3 verschiedene Widerstände mit der Brennstoffzelle in Reihe schalten kann, nämlich 47 kOhm, 1kOhm und 0 Ohm (Kurzschluss). Das Multimeter bleibt während des gesamten Messvorganges parallel geschaltet und misst jeweils die Spannung. Die Stromstärke errechnet sich als Quotient von Spannung und Widerstand.

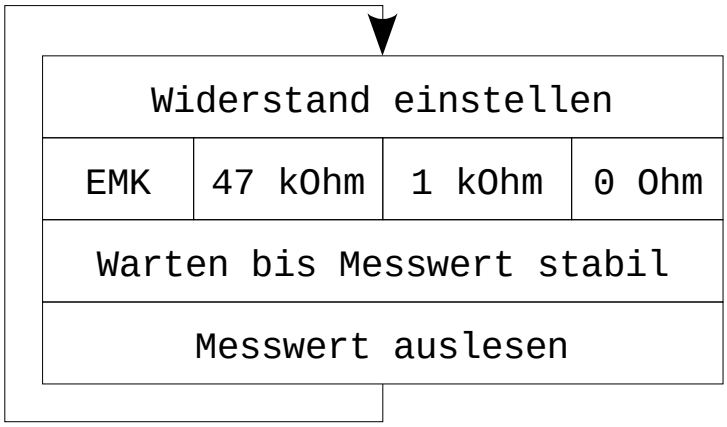
Material

Die Relaisplatine wurde auf eine Hartpapierplatte mit Sub-D-Steckverbinder für die parallele Schnittstelle aufgebaut, wie sie etwa bei der Fa. Conrad Elektronik für wenige Euro zu haben ist. Die Bauteile sind ebenfalls für wenige Euro zu haben, wobei die Relais mit 2.60€ pro Stück noch die teuersten Teile sind. Der Treiberbaustein ULN2803 kann bis zu 8 Relais schalten, es bleibt also noch

genügend Raum für Erweiterungen. Reichen die 8 Relais nicht mehr aus, kann noch ein zweiter Treiberbaustein an die parallele Schnittstelle angeschlossen werden.

Q Lab

Zur Steuerung der Relaiskarte und Aufnahme der Messwerte wurde die Software Q Lab entwickelt. Q Lab stellt jeweils einen Widerstand ein, wartet eine eingestellte Anzahl Sekunden, bis der sich der Messwert stabilisiert hat, liest dann den Messwert aus und speichert ihn in eine Datei



Q Lab wurde auf einem SuSE 9 Linuxsystem entwickelt. Neben dem einfachen Erfassen der Messwerte kann auch die aktuelle Situation über eine komfortable grafische Benutzeroberfläche eingesehen werden. Die Relais können auch manuell geschaltet werden und der Export der Messdaten in die Zwischenablage ist möglich, so dass die Messwerte direkt in andere Anwendungen, wie etwa Tabellenkalkulation oder auch Programme zur Visualisierung eingefügt werden können. Die grafische Benutzeroberfläche wurde mit der Qt Bibliothek[1] der norwegischen Softwarefirma Trolltech erstellt, die Ansteuerung der parallelen Schnittstelle übernimmt die Parapin-Bibliothek[2] von Jeremy Elson.

[1] http://www.trolltech.com/products/qt
[2] http://www.circlemud.org/~jelson/software/parapin

Andere Faktoren

Weitere Messparameter waren der pH-Wert an der Oberfläche und die pH-Werte in der Bodenschicht bis direkt an der Graphitelektrode. Als abiotische Faktoren wurde von Zeit zu Zeit die Carbonathärte, Ammonium-, Nitrit-Nitrat- und der Phosphatgehalt mit einem Wasserlabor der Fa. Riedel de Haen gemessen. Mit einem digitalen Multimeter wurde die Temperatur verfolgt.

Zum Studium externer Einflüsse wurden aus dem Aquarium zwei kleine 250 mL Proben des Schlamms und des Überstands entnommen und in separate sterile Glasbehälter gefüllt. Wie im Großversuch wurde eine Graphitmatte (A = 5 cm^2) auf den Boden in den Schlamm gelegt und eine belüftete Oberflächenelektrode aus Platindraht platziert.

Abbildung 4 Versuchsansatz in kleinerem Gefäß

Bakterien

Zur Identifizierung der Mikroorganismen wurde die Graphitmatte aus dem Schlammbett gezogen und mit einer sterilen Impföse abgeimpft. In einem mit CO_2 gefluteten Becken wurden LB-Agarplatten angeimpft, die mit Parafilm verschlossen und über Nacht bei 37 °C bebrütet wurden. Von diesen Platten wurden einzelne Klone auf eine neue Platte überimpft, um einheitliche Bakterienklone zu erhalten. Da in der Schule von Schülern mit angereicherten Kulturen von nicht klar definierten Bakterien nicht gearbeitet werden darf, wurden diese mikrobiologischen Experimente vom betreuenden Lehrer durchgeführt. Die weiterführenden Experimente zur Charakterisierung besonders die molekulargenetische Analyse wurden von uns im Institut für Mikrobiologie und Molekularbiologie der Universität Gießen bei *Prof. Manfred Kröger* durchgeführt.

Charakterisierung der Bakterien

Die klassische Charakterisierung bedient sich der Gramfärbung, Mobilität, Form, Sporenbildung usw., d. h. die unter dem Mikroskop sichtbare Morphologie. Hier wurde die Gramfärbung verwendet.
Als wesentlich aussagekräftigere Methode ist die molekularbiologische 16S rRNA Analyse durchgeführt worden, wobei ein bestimmtes Segment des bakteriellen *ssr*-Gens durch die PCR amplifiziert und anschließend sequenziert wird. Diese Arbeiten (PCR) führten wir in Gießen durch, die Sequenzierung wurde von einer technischen Assistentin mit einem automatischen Sequenzer vorgenommen.

Abbildung 6 Matthias beim Pipettieren

Abbildung 5 Dawiet beim Vorbereiten der Proben

Die universellen Primer - entwickelt von *Professor Kröger* - haben folgende Sequenzen:
Forward GTGCCAGCAGCCGCGGTA; Reverse TTGTAGCACGTGTGTAGCCC.
Sie binden an hochkonservierte Bereiche im Initiationskomplex der Translation an die Sequenz der rRNA. Die Genabschnitte dazwischen sind in vielen Bakterienspezies unterschiedlich, so dass durch Vergleich mit Datenbanken (NCBI BLAST) eine

Zuordnung bzw. Eingrenzung möglich wird. Allerdings muss gesagt werden, dass eine 100%ige Charakterisierung auch durch diese Methode nicht möglich ist, wie uns *Prof. Kröger* aufklärte, da z. B. *bacillus anthracis* die gleiche Sequenz wie das harmlose *bacillus subtilis* hat, welches wir als Positivkontrolle benutzten.
Die Charakterisierung kann nur über eine Anreicherung erfolgen, wobei es sicher dem Zufall überlassen ist, aber auch dem Medium (Medium der Agarplatte) auf welches die Bakterien der Primärkultur umgesetzt werden. Deshalb müssen wir hier schon spezielle Bedingungen schaffen, um bestimmte Bakterien anzureichern.

Messung der elektrochemischen bakteriellen Aktivität

Die mikrobielle Brennstoffzelle (Aquarium) hat einen recht hohen Innenwiderstand, der abhängig von der Stromstärke ist. Dieser berechnet sich nach: $EMK = U_{(Klemm)} + R_i I$. Zur Aufnahme der Kennlinie genügen hier drei Messwerte:

U (mV)	I (µA)	R (kΩ)
700	0	∞
250	6	47
7	60	10^{-3}(Kurzschluss)

Beispiel für eine Messung

Die von Luft umspülte Oberflächenelektrode ist die Kathode, die im Schlamm befindliche Kohlematte die Anode. Um anodische Oxidationsvorgänge durch die Bakterien zu induzieren und zu messen, wurden bestimmte Selektions- und Reaktionsbedingungen gewählt. An der Oberfläche bestand eine Sauerstoffsättigung, am Boden weitgehend anaerobe Bedingungen. Die hohe Salzkonzentration bedingte die Besiedlung im Boden mit halotoleranten und –philen Keimen. Die weitgehende Abwesenheit von Sulfaten schloss die Desulfurikanten aus (keine H_2S-Bildung), alle Experimente wurden unter Ausschluss von Licht im Abzug durchgeführt. Da Schlamm aus dem Garten/Teich verwendet wurde, waren anfänglich verschiedene organische Kohlenstoffquellen vorhanden, so dass chemoorganoheterotrophe- bzw. chemolithotrophe Organismen eine Nahrungsgrundlage hatten.
Zum „Anheizen“ der bakteriellen Stoffwechselaktivität wurde nach dem Abflauen der bakteriellen Aktivität Vollmedium (LB-Medium), Glucose und Natriumacetat verwendet, letzteres mit dem Gedanken, dass dieses Substrat kaum von Anaerobiern als Kohlenstoffquelle nutzbar ist und eine Verstoffwechslung nur über die aerobe Oberflächenelektrode erfolgen sollte. Allerdings fanden wir bei unserer Recherche auch ein überall vorkommendes fakultativ anaerobes heterotrophes Bodenbakterium der Spezies *myxobacter*, welches über eine Nutzung von Fe^{3+} als Elektronenfänger, Acetat verstoffwechseln kann. Wir vermuten bei unseren erfolgreichen „Fütterungsversuchen“ mit Acetat, dass wir hier die Stoffwechselaktivität dieser Spezies messen konnten.
Zur Charakterisierung der Effekte wurde mit *bacillus subtilis* aus dem Praktikum der Giessener Mikrobiologie weitergearbeitet, da dieses Bakterium völlig harmlos ist. Eine 300 mL Probe (Glas mit Elektrode und Schlamm aus dem Aquarium) wurde auf 80 °C aufgeheizt, bis praktisch keine Spannung bzw. Stromstärke mehr nachweisbar war. Danach wurde mit 2 mL einer Bakteriensuspension (4 OD bei 600 nm) im Grundelektrodenbereich angeimpft, bis bei 47 kΩ nur geringe Stromstärken/ Spannungen nachzuweisen waren: 0 µA, 0,013 V (kein Kurzschluss-Strom).

Ergebnisse:

Abiotische Faktoren

Nach anfänglichen uneinheitlichen Messungen stabilisierte sich das große System Aquarium. Der pH-Wert stieg an der Oberfläche in den alkalischen Bereich und pendelte um pH 8,3. Im Schlamm baute sich ein pH-Gradient auf, wobei in der Nähe der Graphitmatte um pH 7, am Übergang zum Salzwasser pH 7,5 und an der belüfteten Oberfläche pH 8,3 gemessen wurde.

Innerhalb eines Monats stieg die Elektrodenspannung (EMK) auf Werte über 0,7 V (stromlos gemessen), die Spannung bei R = 47 kΩ pendelte um 0,25 V bei Strömen um 6 µA, bei Kurzschluss wurden über längere Zeit Ströme von 60 µA bei Spannungen um 7 mV gemessen. Nach längerem Kurzschluss allerdings sanken diese Werte weiter ab (auf um 40 µA).

pH (Oberfläche)	um 8,3
pH (Grenzfläche des Bodens)	Um 7,6- 7,8
pH Elektrode	6,9 –7
Carbonathärte	5 (kein freies CO_2)
Ammonium	0,2 – 1 mg/mL
Phosphat	1,2 mg/mL
Nitrat/Nitrit	0

Die Temperatur blieb im gesamten Versuchszeitraum relativ gering variierend von 20 - 23 °C.
Das Nahrungsangebot für die die Kohlematte besiedelnden Bakterien blieb über lange Zeit ausreichend, um die vorgenannten Messwerte zu erhalten.
Die mit dem Wasserlabor verfolgten anderen Parameter zeigten an der Oberfläche eine Sauerstoffsättigung, für die Carbonathärte einen Wert von etwa 5, d. h. es war hier kein freies CO_2 vorhanden. Die Belüftung der Oberfläche ist maßgeblich für die Stromstärke/Spannung verantwortlich. Der Ammoniumwert lag zwischen 0,2 – 1 mg/mL, es war kein messbares Nitrat bzw. Nitrit vorhanden, der Phosphatwert zeigte 1,2 mg/mL. Im Oberflächenwasser gab es folglich keine Aktivität von nitrifizierenden Mikroorganismen. Eine Schlammprobe wurde zur qualitativen Bestimmung von H_2S mit verdünnter Salzsäure versetzt und Bleiacetatpapier darüber gehalten. Es war keine eindeutige Verfärbung festzustellen, was auf das Vorhandensein von Desulfurikanten im Schlamm spräche.

Physikalische Parameter

Die Kennlinie offenbart, dass hier nur eine minimale Leistung erzeugt wird und der zeitliche Verlauf der Stromstärke nach Kurzschluss (unten) spiegelt die starke Hemmung des Elektronenaustauschs wieder.

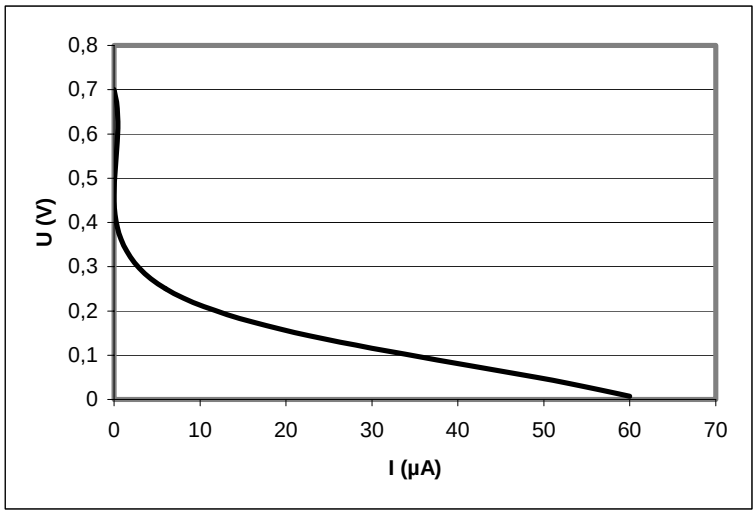


Abbildung 7 Kennlinie

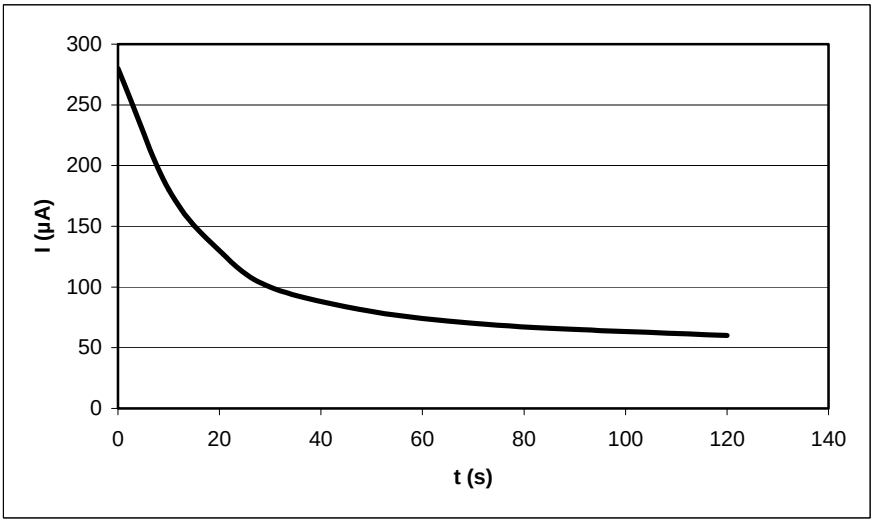


Abbildung 8 Zeitlicher Ablauf der Stromstärke bei Kurzschluss der Zelle

Der Verlauf von Stromstärke und Spannung spiegelt die Sukzession der die Elektroden besiedelnden Mikroorganismen wieder, die von den äußeren selektiven Bedingungen in diesem Experiment geprägt werden. Klimax-Stadien und Effekte der Nahrungszugabe lassen sich offensichtlich anhand der Spannung/ Stromstärkemessung verfolgen.

Mit Hilfe des kleinen Ansatzes(vgl. Abbildung 4) wurde der Effekt der Zugabe von Acetat in den Schlamm an der Elektrode über Tage verfolgt. Es wurden 2 mL einer 20%igen Acetatlösung über die Graphitmatte in den Schlammgrund mit einer Pipette injiziert. Ein sofortiger Effekt war festzustellen (Siehe Graph am Tag 15).

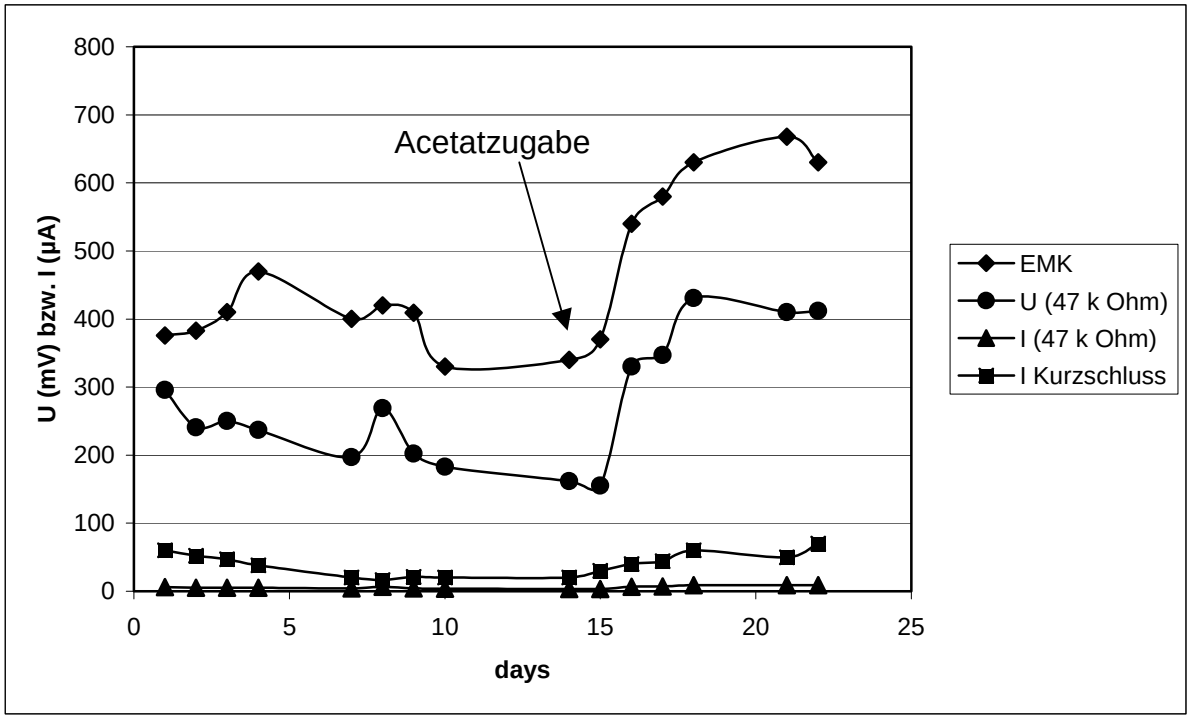


Abbildung 9 Verlauf der Spannung/Stromstärke bei Zugabe von Acetat

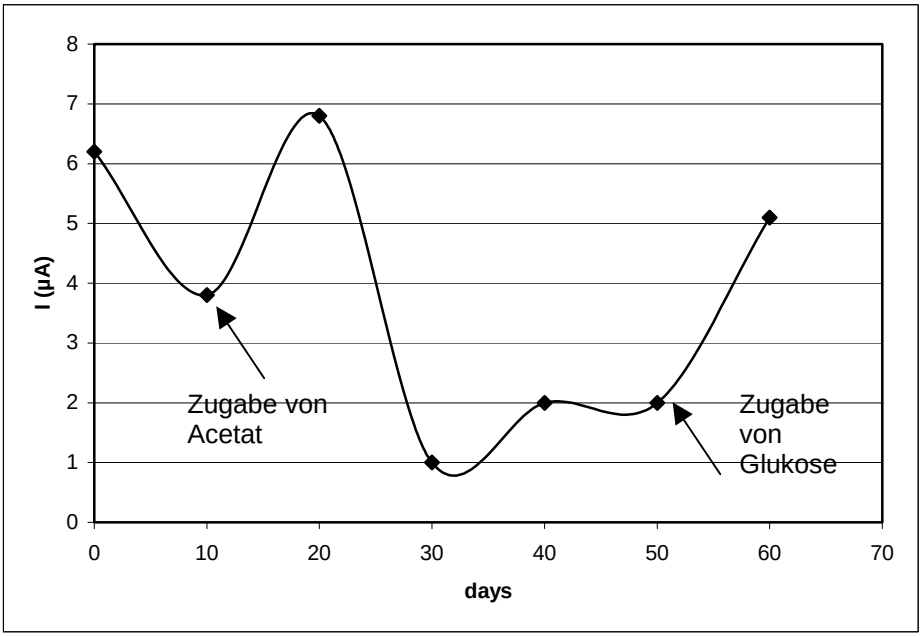


Abbildung 10 Langzeitdiagramm der Stromstärke bei 47 kΩ

Nach etwa 2 Monaten waren alle Messwerte stark gesunken und auch das Einbringen der gleichen Menge an Acetat zeigte einen wesentlich kleineren Effekt, obwohl die abiotischen Faktoren wie pH, Salzkonzentration, Ammonium-, Phosphat und Carbonathärte etwa gleich geblieben waren.
Im Aquarium waren nur noch um 0,1 V und 2 µA bei 47 kΩ zu messen, die EMK pendelte um 0,4 V, Kurzschluss-Ströme von 10 –15 µA. Der pH-Wert im Boden war auf 7,5 gestiegen, während der Oberflächen-pH um 8,3 pendelte.
Die Bildung von Schwefelwasserstoff war nicht nachzuweisen.

Zugabe einer Bakteriensuspension *bacillus subtilis*

Der auf 80 °C aufgeheizte Ansatz zeigte keine messbare Ströme und minimale Spannungen von unter 0,013 V. Nach Zugabe der Bakteriensuspension (4 OD bei 600 nm) stieg die Spannung bei 47 kΩ auf 0,161 V und 4 µA was über mehrere Tage konstant blieb. Die EMK betrug um 0,37 V.

Einfluss von Mediatoren

Zugabe von Neutralrot als Mediator (Endkonzentration 100 µM) in dem kleinen Ansatz erhöhte die Kurzschluss-Stromstärke deutlich von 10 µA auf über 20 µA.

Mikrobiologische Arbeiten

Von der Grundlektrode wurden mit einer Impföse Keime abgeimpft und in Folge dessen entwickelten sich eine Fülle von Keimen auf einer primären LB-Platte.

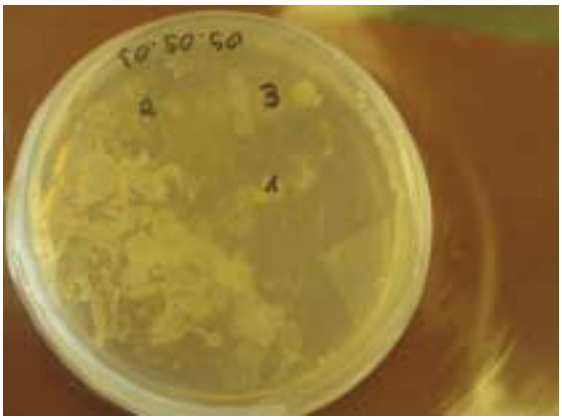


Abbildung 11 Primäre LB-Platte

Aus den mit Zahlen markierten Bereichen wurden Bakterien auf frische Platten überimpft Es wurden dem Aussehen nach auf jeder Platte einheitliche Kolonien erhalten.
Die aus den Bereichen 1 und 3 erhaltenen „schleimigen“ Bakterien wuchsen anaerob auf LB-Agar, jedoch nicht auf Chinablau-Lactose Agar. Aus der Region 2 der primären Platte wurden dem Aussehen nach andere „nicht schleimige“ Bakterien isoliert.

Abbildung 13 Nicht schleimige Bakterien

Abbildung 12 Schleimige Bakterien

Ergebnisse der S16 rRNA Analyse.
BLAST in der NCBI-Datenbank ergab bei schleimigen Bakterien folgende 100% Aligment Ergebnisse:
AJ316308.1 *Bacillus* spezies LMG21002 ; AF157696.1 *Bacillus macroides*
AJ315057.1 *Bacillus* spezies 19489; AJ315062.1 *Bacillus* spezies 19494
AF479334.1 *Glacial ice bacterium* G500K-17; AF423217.1 Uncultured soil bacterium clone
Bei den anderen nicht schleimigen Bakterien:
AJ276810.1 *Staphylococcus* spezies strain LMG ; L37603.1 *Staphylococcus warneri*
AB009941.1 *Staphylococcus lugdunensis*; bzw. AJ223451.1 *Unidentified bacterium*

Alle Bakterien sind fakultativ Anearobier, halotolerant und grampositiv.

Zusammenfassung

Unsere Ergebnisse belegen, dass man bakterielle Aktivitäten auf die von uns beschriebene Weise verfolgen kann. Über die Zufuhr verschiedener Substrate und andere selektive Faktoren können einzelne Bakterien Spezies angereichert werden. Die Leistungen allerdings dieser Brennstoffzellen sind extrem niedrig, da der Übergang der Elektronen vom Bakterium zur Elektrode stark gehemmt ist und aufgrund absterbender Bakterien die Elektrodenoberfläche mit der Zeit blockiert wird. Entscheidend ist die Beschaffenheit und Größe der Elektrodenoberflächen. Unsere überschlagenen Berechnungen ergaben, dass bei einer Stromstärke von 20 µA von den Bakterien immerhin 10^{14} Elektronen pro Sekunde abgegeben werden. Nimmt man an, dass die Elektrode mit einer Schicht von Bakterien (Monolayer)[3] besiedelt wird und schätzt man die Elektrodenoberfläche im Aquarium mit $50 \cdot 10^{-2}$ m^2, so ist die Elektrodenoberfläche mit etwa $6 \cdot 10^{10}$ Bakterien besiedelt. Dann gäbe jedes Bakterium pro Sekunde immerhin noch mehr als 1000 Elektronen an die Elektrode ab.

Bisher lassen sich durch einen solch einfachen Aufbau, wie wir realisierten, nur anaerobe bakterielle Aktivitäten verfolgen. Um nutzbare elektrische Energie zu gewinnen, müssen wir die im folgenden Ausblick beschriebenen Parameter verändern.

[3] Die wirksame Oberfläche eines etwa 3 µm großen quadratisch angenommenen Bakteriums ist $9 \cdot 10^{-12}$ m^2.

Ausblick

Unsere weiteren Vorhaben sind Verbesserungen im Versuchsaufbau um das Aquarium. Das bedeutet unter anderem: Vergrößerung der Oberfläche der Kohlefasermatte(Anode), Austausch des Platindrahts(Kathode) durch ein platiniertes Kohlefaserfloß, Verbesserung der Sauerstoffzufuhr und Automatisierung der Nährstoffzufuhr. In Überlegung sind auch Experimente mit durch Protonenaustauschmembranen (PEM) getrennte Zweikammersysteme.

Durch die Optimierung erhoffen wir uns eine Steigerung der Leistung der bakteriellen Brennstoffzelle um mindestens eine bis zwei Zehnerpotenzen:
Die Vergrößerung der Kohlefasermatte ermöglicht eine größere Besiedlung von Bakterien, so dass insgesamt mehr Elektronen an die Matte abgeben werden. Dies wiederum macht eine Vergrößerung der Kathode notwendig. Durch eine erhöhte Sauerstoffzufuhr und Platinierung erhoffen wir uns einen verbesserten Elektronenaustausch. Durch die Automatisierung der Nährstoffzufuhr erhoffen wir uns eine Vereinfachung der Wartung des Versuchsansatzes und eine Steigerung der Genauigkeit des Systems. Um zum Betrieb einer LED nötige Leistung zu erhalten, wollen wir die elektrische Energie in einem Kondensator sammeln und periodisch entladen. Dies könnte ein Modellexperiment zum Betrieb eines elektronischen „Monitoring“ sein.

Weiter möchten wir unsere Versuchsergebnisse online zu gängig machen. Aus diesem Grund ist eine Internetseite in Arbeit, auf der wir unsere Messdaten direkt präsentieren. Das Messsystem soll vereinfacht werden, so dass auf das Multimeter verzichtet werden kann. Ein programmierbarer Mikrocontroller soll die Erfassung der Werte und die Steuerung von weiterem Gerät übernehmen. Die Messdaten soll unser Messcomputer direkt auf die Webseite stellen. Außerdem soll uns ein Webcambild zusätzlich zu den Messdaten eine optische Kontrolle des Versuchs von überall auf der Welt ermöglichen.

Wenn dies alles funktioniert, wollen wir es auch möglich machen, die Nährstoffzufuhr über das Internet zu steuern.
Bisher blieben auch noch einige wichtige Versuche aus, die wir aus Zeitgründen erst in nächster Zeit durchführen können, z.B. müssen wir den Einfluss von Mediatoren auf die Leistung noch weiter untersuchen. Weiterhin müssen wir noch prüfen, inwieweit abgestorbene Bakterien Elektronen an die Elektrode abgeben, deren zelluläre Systeme (Enzyme) noch intakt sind, oder aber diese das eigentliche Hindernis bei der Elektronenübertragung auf die Elektroden sind.

Danksagung

Wir danken: Herrn Prof. M. Kröger Universität Gießen, Dr. Habermann, Aventis, Michael Götsche, Frau Dr. Wojczewski, Fa. Biospring

Literaturliste

Swades K Chaudhuri & Derek R Lovley, Nat Biotechnol. 2003 Oct;21(10):1229-32 Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells
http://www.nature.com/nbt/email_response/email.taf?address=dlovley%40microbio.umass.edu
Park DH, Zeikus JG, Appl Environ Microbiol. 2000 Apr;66(4):1292-7.
Electricity generation in microbial fuel cells using neutral red as an electronophore.
D. R. Bond et al. Science Vol 295 (2002) 483 – 485 Electrode-Reducing Microorganisms That Harvest Energy from Marine Sediments
National Centre for Biotechnology Education an der University of Reading UK
http://www.ncbe.reading.ac.uk/NCBE/MATERIALS/MICROBIOLOGY/fuelcell.html
G. Teichmann, Biol. Unserer Zeit, Nr.5, 33 Jg. (2003), S. 318 Die Winogradsky-Säule