

AS900 : Grüne Energie aus braunem Schlamm: Selbstbau einer Bio-Brennstoffzelle

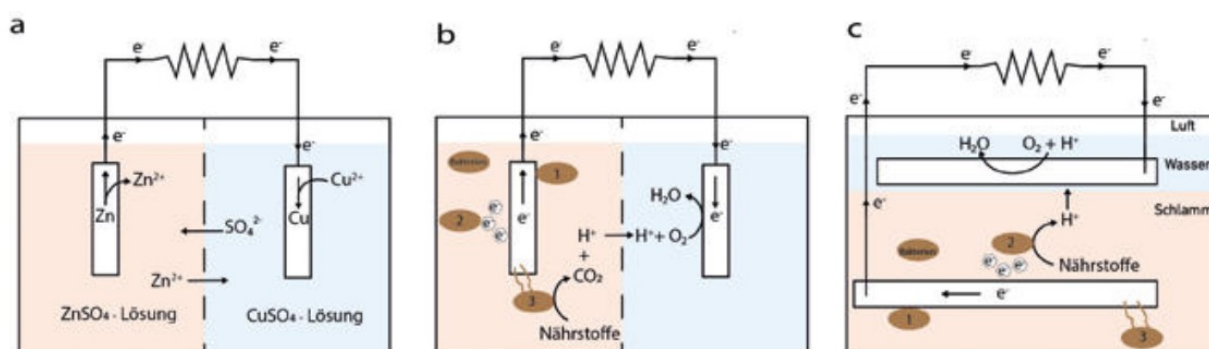
Autoren :

Dr. rer. nat. Oliver Happel (Karlsruhe), o.happel@gmx.de

Vincent Scholz (Aarhus University, Dänemark), vincent.scholz@bios.au.dk

Abstract

Bedingt durch den angestrebten Atom- und Kohleausstieg werden aktuell auf allen Ebenen alternative Verfahren der Energieerzeugung thematisiert. Bio-Brennstoffzellen, in denen mit Hilfe von Mikroorganismen Elektrizität erzeugt werden kann (sogenannte Microbial Fuel Cells – MFC), sind eine interessante Variante grüner Energiegewinnung.



Galvanische Zelle

Anodische Halbzelle (rosa)
katodische Halbzelle (blau)

Mikrobielle Brennstoffzelle

mit drei bekannten Mechanismen zur Elektronenübertragung
(siehe Text für Erläuterung)

Schlamm-Batterie

Abb. 1: Verschiedene Varianten zur elektrochemischen Energiegewinnung.

In diesem Artikel wird nach Vorstellen des allgemeinen Prinzips von Bio-Brennstoffzellen deren Selbstbau anhand des Bausatzes AS900 beschrieben. Eine solche »Schlamm-Batterie« wird zum Beispiel mit einer Mischung aus Gartenerde und Flusssediment befüllt und über spezielle Elektroden aus Graphit-Weichfilz kontaktiert. Nach einer Anlaufphase von ein bis zwei Wochen kann eine Klemmenspannung von bis zu 0,8 V gemessen werden. Mit den erreichbaren Strömen im unteren bis mittleren μA -Bereich kann über eine Serienschaltung von zwei Zellen zum Beispiel direkt ein Digitalthermometer betrieben werden. Es werden einige Varianten im Aufbau (z. B. spezielle Substrate, bepflanzte Batterien) und typische Messkurven vorgestellt. Zum besseren Verständnis der RedOx-Verhältnisse an der Anode und Katode werden Messungen vorgestellt, bei denen eine zusätzliche Silber-Silberchlorid-Referenzelektrode aus einer pH-Einstabmesskette verbaut wurde. Der Selbstbau von Bio-Brennstoffzellen bleibt überschaubar einfach, bietet aber dennoch viel Raum für eigene Ideen und Varianten in der Ausführung. Dabei werden viele MINT-Bereiche angesprochen und es wird das grundlegende Verständnis zu Fragen der Energiegewinnung geschärft.

Einleitung

Unsere Zukunft hängt von grünen Energiequellen wie Wind und Sonnenenergie ab. Wodurch wird aber unser Strom an windstillen und wolkenigen Tagen produziert? Die Antwort könnte in braunem Schlamm zu finden sein, in dem Bakterien von mikroskopischer Größe die

elektroaktive Fähigkeit besitzen, solide Materialien, wie etwa Eisen zu atmen. Dabei inhalieren die Bakterien nicht einen Eisenklumpen, wie wir Menschen den Sauerstoff, sondern transportieren dafür Elektronen aus der Zelle heraus und laden sie auf der festen Eisenoberfläche ab. Bakterien können aber nicht nur Eisen, sondern zum Beispiel auch Elektroden »atmen« und diese Fähigkeit kann genutzt werden, um Strom zu erzeugen.

Diese Stromerzeugung lässt sich als biologische Variante zur galvanischen Zelle verstehen, die aus zwei elektrochemischen Halbzellen besteht. Ein unedleres Metall wie Zink in der anodischen Zelle geht freiwillig in Lösung (= Oxidation), um Elektronen durch einen Leiter auf edlere Metallionen (z. B. Cu^{2+}) in der katodischen Halbzelle zu übertragen (= Reduktion). Wichtig hierbei ist der elektrolytische Kontakt zwischen beiden Halbzellen durch eine semipermeable Membran oder Salzbrücke, so dass Ionen die Ladungsdifferenz ausgleichen können (Abbildung 1a). Der Elektronenfluss von einer Halbzelle zur anderen kann dann genutzt werden, um einen Verbraucher zu betreiben. Dieses Prinzip einer Brennstoffzelle verbirgt sich hinter einer herkömmlichen Batterie. Werden die Metalle in den Halbzellen mit Elektroden ausgetauscht, elektroaktive Mikroben und Nährstoffe in der anodischen Halbzelle und ein elektronenakzeptorreiches Medium (z. B. mit Sauerstoff gesättigtes Wasser) in der katodischen Halbzelle bereitgestellt, dann können die Bakterien die Nährstoffe verzehren und durch die Elektrode den Sauerstoff auf der anderen Seite atmen. Die Bakterien nutzen sozusagen die Elektroden wie einen Schnorchel zum Atmen. So entsteht eine Mikrobielle Brennstoffzelle (engl. Microbial Fuel Cell MFC) (Abbildung 1b). *Shewanella* sp. und *Geobacter* sp. sind die Vorreiter unter den elektroaktiven Bakterien. Ihre elektroaktive Fähigkeit besteht darin, Elektronen aus dem Inneren der Zelle auf die externen Elektronenempfänger zu schleusen. Diese Elektronenübertragung kann über einen direkten Zellkontakt mit Hilfe von Cytochromen (1), indirekt über lösliche Elektronen-Mediatoren (2) und durch Ausbildung von »Nanodrähten« von den Bakterienzellen auf den externen Elektronenempfänger (3) stattfinden (Abbildung 1b).

Die Bio-Brennstoffzelle hat in den letzten 20 Jahren exponentiell an Bedeutung gewonnen, was sich in der Anzahl der Publikationen widerspiegelt (Abbildung 2) und findet vielseitig Anwendung.

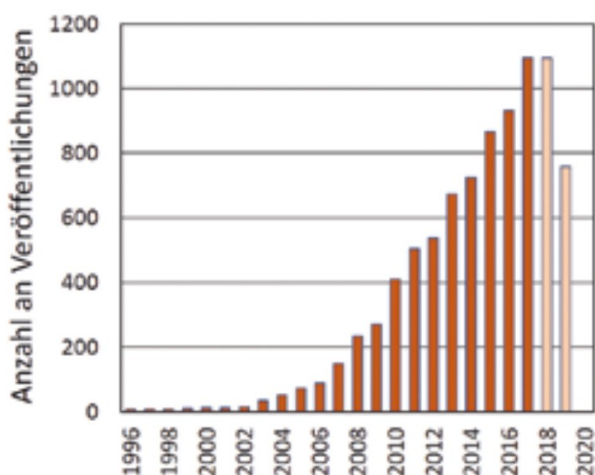


Abb. 2: Wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Stichwortsuche »Microbial Fuel Cell«

Die hellroten Balken der Jahre 2018 und 2019 sollen andeuten, dass noch nicht alle Publikationen in der wissenschaftlichen Datenbank »Web Of Science« erfasst sind. Zum Einstieg in die wissenschaftliche Literatur kann ein Review aus 2017 empfohlen werden, in dem viele Informationen zum Mechanismus, zu Materialien, Kenndaten und Anwendungen enthalten sind [1].

Schlamm und Abfall enthalten viel Nahrung für die elektroaktiven Bakterien und so können Bio-Brennstoffzellen zum Beispiel in Kläranlagen eingesetzt werden, um organische

Stoffe im Schmutzwasser abzubauen und gleichzeitig Strom zu erzeugen. Generell scheitert aber das Prinzip der Mikrobiellen Brennstoffzelle zur reinen Energiegewinnung derzeit noch, da es mit größer werdendem Maßstab an Effizienz verliert. Dennoch bietet der rasante Anstieg in der Forschung, etwa für effizientere Elektrodenmaterialien, Hoffnung für die Zukunft. Weiterhin wurde im Jahre 2017 von Reimers und Co-Autoren gezeigt, dass filamentöse Kabelbakterien über eine Art Nanodrähte mit einer Anode verbunden waren [2]. Kabelbakterien können in Zellketten von über 10 000 Zellen wachsen und bilden dadurch zentimeterlange Filamente. Durch die gesamte Länge ihrer Filamente erstrecken sich interne Kabel, die von den Bakterien genutzt werden, um Strom zu leiten und dadurch ihren Metabolismus aufrecht zu erhalten. Diese erstaunliche Lebensweise ist erst seit acht Jahren bekannt und die chemische Struktur der leitfähigen Kabel ist noch völlig unbekannt. Mit weiterer Forschung über diese Superleiter in Nanogröße und Fortschritten auf dem Gebiet der Mikrofluidik (Lab-on-a-Chip) liegt die Zukunft von Mikrobiellen Brennstoffzellen vermutlich in der Miniaturisierung anstatt der Energieerzeugung im großen Maßstab.

Die Schlamm-Batterie ist eine Modifizierung der mikrobiellen Brennstoffzelle. Hierzu wird anstatt zweier Halbzellen Schlamm beziehungsweise Erde als Medium genutzt, was die Erzeugung von anodischen Bedingungen wenige Zentimeter unterhalb der Schlammoberfläche und katodischen Bedingungen an der Oberfläche, wie auch den elektrolytischen Kontakt zwischen den Elektroden erlaubt (Abbildung 1c). Des Weiteren ist Schlamm ein natürliches Habitat für elektroaktive Bakterien und bietet viele Nährstoffe, die durch ein vielseitiges Konsortium an Bakterien wieder recycelt werden können, so dass die Schlamm-Batterie ein Selbstläufer mit scheinbar unendlich langer Lebenszeit ist. Dieser unendliche Stromfluss findet eine praktische Anwendung zum Beispiel an Orten, an denen das Wechseln einer herkömmlichen Batterie umständlich ist, wie etwa auf dem Meeresboden. Hier können Messstationen durch den von Bakterien produzierten Strom dauerhaft betrieben werden. Eine Schlamm-Batterie kann viele Formen annehmen und mit anderen Systemen gekoppelt werden. Zum Beispiel können Bakterien in einer Pflanzen-Schlamm-Batterie die organischen Wurzelausscheidungen als Nährstoffe nutzen, was schließlich zur erhöhten Stromproduktion führt [3].

Mit Hilfe dieses Artikels kann der interessierte Leser seine eigene Schlamm-Batterie bauen. Vielleicht gelingt es ihm, sie jahrelang effizient laufen zu lassen, sie mit anderen Systemen zu kombinieren, neue Anwendungen zu finden und unerforschte elektroaktive Bakterien anzureichern. Im Text wird Schritt-für-Schritt erklärt, wie mit Hilfe des Bausatzes AS900 solche Batterien aufzubauen sind. Wenn sich die mikrobielle Gemeinschaft nach einigen Tagen an die neue Aufgabe angepasst hat, kann damit zum Beispiel das im Bausatz enthaltene Digitalthermometer mit Hygrometer betrieben werden (Abbildung 3).



Abb. 3: Betrieb des im Bausatz enthaltenen Thermo-/ Hygrometers über zwei Schlamm-Batterie-Zellen

Der Bausatz »MudWatt«

Die Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Stichwortsuche »Microbial Fuel Cell« zeigt, dass es sich um ein aktuelles Thema handelt, an dem derzeit viel geforscht wird. Neben diesen Publikationen ist der populäre Bausatz »MudWatt« zu nennen, der im Jahr 2010 von Keegan Cooke und Kevin Rand herausgebracht wurde [4]. Es handelt sich um ein Kit, mit dem sich nach dem Aufbau der Schlamm-Batterie eine LED blinken oder eine Uhr betreiben lässt. Zum Bausatz steht auf der Homepage auch umfangreiches Informationsmaterial in englischer Sprache zur Verfügung. Es ist sehr zu empfehlen sich diese Unterlagen anzuschauen und Anregungen für eigene Experimente daraus zu sammeln.

Die Erfahrungen mit diesem Bausatz waren Auslöser dafür, das Thema »Bio-Brennstoffzelle« im Rahmen des AATiS anzugehen. Bei einem der Autoren läuft diese Batterie schon länger als ein Jahr und lässt eine rote LED etwa im Sekundentakt blinken. Der Aufbau kann zum Beispiel auch nachts ins Auto gestellt werden und als sehr spezieller Einbrecherschutz dienen. Eine blinkende und verkabelte Dose hat immer die Aura des Gefährlichen. Da das »MudWatt«-Kit derzeit nur aus den USA oder aus Australien mit langen Lieferzeiten bestellt werden kann und unter Berücksichtigung aller Gebühren am Ende circa 75 € fällig werden, wurde für den deutschsprachigen Raum der eigene Bausatz AS900 entwickelt. Das »MudWatt«-Kit stand zum Teil für den AATiS-Bausatz Pate, in einigen Details gibt es aber auch Unterschiede, auf die weiter unten eingegangen wird.

Zunächst soll der Inhalt des Kits kurz vorgestellt werden, so dass ein Eindruck über den Lieferumfang gewonnen wird. In Abbildung 4 ist im oberen Foto das transparente Plastikgefäß mit weißem Deckel zu sehen.



Gehäuse mit Elektroden



elektrische Komponenten

Abb. 4: Einige Originalteile aus dem »MudWatt«-Bausatz

Das Gefäß hat einen Durchmesser von circa 85 mm und fasst etwa 400 ml. Darunter sind in zwei Plastiktüten die beiden Graphit-Weichfilz-Elektroden enthalten, die 5 mm und 10 mm stark sind. Weiterhin sind zwei Titandrähte enthalten, wobei im »MudWatt«-Kit die orange Isolierung für die Katode und die grüne für die Anode verwendet wird. Im unteren Bild ist die kleine Platine mit dem Step-Up-Wandler-IC. Über eine zweireihige Buchsenleiste als einziges weiteres Bauteil werden die Titandrähte, der Elektrolytkondensator (10 μ F), eine rote LED oder die Digitaluhr angeschlossen. Die Platine wird bereits in dieser Form geliefert, so dass keine Lötarbeit mit dem SMD-Bauteil nötig ist. Neben den abgebildeten Gegenständen enthält das Kit noch zwei Einmalhandschuhe und eine Aufbauanleitung. Auch wenn alles sehr ansprechend gestaltet ist und

zum Beispiel der weiße Deckel passende Aussparungen für die Platine und Löcher für die Drähte hat, sind 75 € für diesen Bausatz ein stolzer Preis.

Step-Up-Wandler

Der MudWatt Step-Up-Wandler

Es wurde bereits angesprochen, dass umfangreiches Informationsmaterial für verschiedene Wissensniveaus zum »MudWatt«-Kit existiert [4]. Unter Berücksichtigung dieser vielen Informationen kann es von den Machern des Kits kein Zufall sein, dass zu einem zentralen Bauelement, nämlich dem verwendeten Step-Up-Wandler, keine adäquaten Informationen zu finden sind (weder Schaltbild noch Typenbezeichnung). Da eine Schlamm-Batterie-Zelle bestenfalls eine Spannung von etwa 0,8 V liefern kann, reicht dies nicht zum direkten Betrieb von LEDs oder von Digitaluhren aus. Eine Möglichkeit ist nun, einen Step-Up-Wandler einzusetzen, um von dieser niedrigen Spannung auf zum Beispiel 1,5 V oder auf 3 V zu kommen. Bei Verwendung eines Wandlers muss bedacht werden, dass die Ströme einer Schlamm-Batterie gering sind (ca. 200 μA) und deshalb Schaltungen mit sehr gutem Wirkungsgrad und einem minimalen Eigenstrombedarf erforderlich sind.

Wie erwähnt, wird der IC-Typ in den Unterlagen nicht benannt. Es bedurfte einer langen Recherche, bis die Identität herausgefunden wurde. Auf dem Gehäuse (SOT-23-5) des ICs steht nicht der IC-Name, sondern nur das Kürzel für die IC-Variante (Ausgangsspannung). Auf der MudWatt-Platine handelt es sich um das IC S-882Z mit dem Aufdruck QYDX. Das bedeutet, dass es die Variante S-882Z24-M5T1x mit einer Entlade-Startspannung von 2,4 V ist. Das IC ist ein DC-DC-Wandler nach dem Prinzip einer Ladungspumpe, die bereits bei sehr niedrigen Spannungen von 0,30 V bis 0,35 V anläuft. Die transformierte Ladung wird in einem Kondensator gespeichert und erst freigegeben, wenn ein Schwellenwert erreicht ist. In Abbildung 5 ist die Step-Up-Schaltung abgebildet.

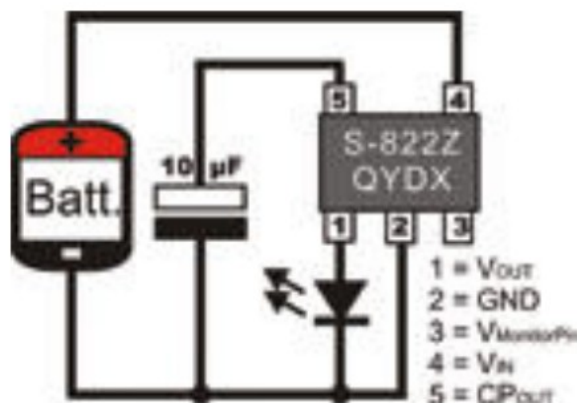


Abb. 5: Schaltbild des MudWatt-Bausatzes

Sie ist an Einfachheit nicht zu übertreffen. Während des Betriebs fließt ein Strom von maximal 500 μA . Im Ruhezustand sinkt dieser Strom auf maximal 0,6 μA . Dieses IC ist sehr gut für die Schlamm-Batterie geeignet, da es mit nur einem externen Kondensator bereits eine vollwertige Step-Up-Schaltung zum Betrieb einer LED oder einer Uhr ermöglicht.

Dieses IC S-882Z wäre auch sehr gut für den AATiS-Bausatz geeignet gewesen. Leider ist es schon seit langer Zeit nicht mehr kommerziell verfügbar. Die derzeit verkauften MudWatt-Platinen müssen demnach aus eingelagerten Altbeständen bedient werden. Einen direkten 1 : 1-Ersatz (z. B. Nachfolgetyp mit gleichen Eigenschaften) scheint es nicht zu geben.

Alternative Step-Up-Wandler

Auf der Suche nach Alternativen sind in der Literatur durchaus andere IC-Typen zu finden. Zu diesen Varianten sollen im folgenden Abschnitt erste Informationen gegeben werden. Es lässt sich aber schon vorab sagen, dass bislang keine Lösung in einer derartigen Einfachheit mit nur einem externen Bauteil gefunden werden konnte. Viele der alternativen Step-Up-ICs sind SMD-Bauteile mit sehr kleinen Pin-Abständen. Bei einigen Typen kann manuelles Löten noch funktionieren, andere können nur über fertige Evaluation-Boards genutzt werden. Weiterhin sind oft, neben Kondensatoren, auch spezielle Spulen für den Betrieb erforderlich.

Für die Tests wurde als reproduzierbare Spannungsquelle im unteren mV-Bereich ein Spannungsfolger auf Basis eines Operationsverstärkers verwendet. Zum Messen der Spannungen und Ströme am Ein- und Ausgang wurden vier Multimeter benutzt. In den Messreihen unter diesen »Laborbedingungen« wurden unterschiedliche Lastwiderstände angeschlossen und die Schaltungen bei verschiedenen Eingangsspannungen getestet.

Als eine Alternative zum S-822Z wurde das IC LTC3108 mit diversen Übertragern (1 : 10, 1 : 20, 1 : 50 und 1 : 100) getestet. Hierzu kamen eine fertig bei Ebay erworbene Platine, sowie der AATiS-Bausatz AS341 zum Einsatz [5]. Weiterhin wurde das IC MCP1640, das im AATiS-Bausatz AS911 verbaut ist, getestet [6]. Als drittes wurde eine fertige Step-Up-Platine mit dem LTC3105, als viertes eine mit dem IC BQ25570 (CJMCU2557) getestet. Mit allen Platinen konnten unter Laborbedingungen Step-Up-Schaltungen aufgebaut werden. Leider lagen die Eingangsströme in den bisherigen Schaltungsvarianten noch zu hoch, so dass ein Betrieb an einer typischen Schlamm-Batterie nicht funktionieren würde. Einige der ICs ermöglichen aber spezielle Beschaltungen, mit denen eventuell doch ein Betrieb möglich ist. Aus Zeitgründen konnte sich diesem Thema noch nicht so umfassend gewidmet werden, dass es hier fundiert vorgestellt werden kann. Es ist geplant, das Thema »Step-Up-Schaltungen für Bio-Brennstoffzellen« im Laufe des Jahres nochmals anzugehen und dann im nächsten Praxisheft darüber zu berichten.

Aufbauhinweise zur AATiS-Schlamm-Batterie

Der AATiS-Bausatz AS900 enthält Material zum Bau von zwei Zellen. Da pro Batterie rund 0,6 V bis 0,8 V Klemmenspannung erreicht werden, kann über eine Serienschaltung zweier Zellen eine typische Batteriespannung von circa 1,4 V erzielt werden. Hierüber lassen sich zum Beispiel schon Digitalthermometer oder Ähnliches betreiben, die ansonsten eine normale Batterie erfordern. Durch die Dopplung der Zellen erübrigt sich dann ein Step-Up-Wandler.

Bis auf wenige spezielle Bauteile sind für den Bau von Schlamm-Batterien nur Bauteile aus einer gut sortierten Bastelkiste nötig. Im Bausatz sind insbesondere spezielle Graphit-Weichfilme enthalten, die als Elektroden dienen. Zur Herstellung solcher Filme werden Zellulosefasern in einem ersten Schritt bei 800 °C bis 1000 °C in Kohlenstoffweichfilme umgewandelt. In einem weiteren Schritt bei circa 2200 °C nehmen die Kohlenstofffasern zunehmend graphitähnliche Struktur an. Es handelt sich also um eine aufwändige Herstellungsprozedur, was sich auch im Preis des Materials niederschlägt. Der Quadratmeter des 5 mm-Materials kommt auf etwa 100 €, der des 10 mm-Materials auf circa 200 €.

Dieses Material wird typischerweise zur Isolation von speziellen Hochtemperaturöfen eingesetzt. Es hat eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit (ca. 1 Ω beim Test mit einem Multimeter) und bietet den Mikroorganismen des Bodens eine große Oberfläche. Weiterhin lässt dieser Film als obere Elektrode auch einen Luftaustausch zu, so dass die gewünschte Reaktion mit Sauerstoff ablaufen kann.

Die besonderen Eigenschaften des Filzes (große Oberfläche, sehr gute elektrische Leitfähigkeit, chemische Beständigkeit und biologische Kompatibilität), machen es trotz des hohen Preises ideal für die Anwendung als Elektrode in den Batterien.

Die im Bausatz enthaltenen Weichfilze haben ein Maß von 10 cm × 10 cm und sind in zwei Dicken enthalten. Der dünnere Filz (5 mm) ist für die untere Anode vorgesehen. Für die obere Katode wird dickerer Filz verwendet (10 mm). Diese beiden Dicken entsprechen den im »MudWatt«-Bausatz verwendeten Filz-Dicken. Als Unterschied zum »MudWatt«-Bausatz bietet der AATiS-Bausatz aber die etwa doppelte Fläche (100 cm² statt ca. 50 cm²) an.

Als weiteres spezielles Bauteil ist der Titandraht zu nennen, der in den Graphit-Weichfilz gesteckt wird und als Ableitelektrode der Katode und Anode dient. Bei der Auswahl dieses Metalls wurde sich an wissenschaftlichen Veröffentlichungen und am »MudWatt«-Bausatz orientiert. Alternativ scheint auch ein Edelstahl-Draht zu funktionieren. Da aber nun seit einigen Jahren im Internet oder in Fachgeschäften Titandraht für e-Zigaretten zum Selbstwickeln von Verdampfer-Spulen erhältlich ist, wurde dieses Material auch im AATiS-Bausatz verwendet. Die Verwendung eines Kupferdrahtes ist nicht zielführend, da Kupferionen für Mikroorganismen toxisch sind und somit kontraproduktiv wirken.

Bevor aber mit dem Bau der Batterie wirklich begonnen werden kann, ist die Beschaffung einer geeigneten Schlammmischung und von geeigneten Plastik-, Glas- oder Keramikgefäßen nötig. Für den erfolgreichen Betrieb der Batterie muss der Schlamm mehrere Bedingungen erfüllen. Zum einen muss er die nötigen Mikroorganismengemeinschaften (Bakterien) enthalten, die später in den unterschiedlichen RedOx-Bereichen des Bodens für die Erzeugung der Elektrizität eine entscheidende Rolle spielen. Neben einer ausreichenden Organismenvielfalt muss aber auch genügend Nahrung enthalten sein, aus dem die Organismen ihre Energie ziehen können. Denn es ist natürlich klar, dass auch diese Batterie kein Perpetuum Mobile sein kann und die von ihr gelieferte Energie irgendwoher entnommen werden muss. Dass zu diesem Punkt mehrere Alternativen bestehen, wird weiter unten noch näher erläutert. Für den Anfang ist folgende Mischung eine gute Grundlage:

- 1 Teil Gartenerde
- 1 Teil Blumenerde (Pflanzerde)
- 2 Teile Flusssediment

Beim Flusssediment sollte man mit der Schaufel ruhig eine Probe aus circa 10 cm Tiefe nehmen. Dort ist oft schon eine gut angepasste mikrobiologische Gemeinschaft für anaerobe Bedingungen enthalten. Wenn dieser Schlamm faulig riecht, dann ist er genau richtig. Alternativ kann auch zum Beispiel aus dem Watt oder vom Strand etwas Schlamm genommen werden.

In Abbildung 6 sind die drei Teile aus dem oben beschriebenen Rezept vor dem Mischen zu sehen.



Abb. 6: Die Mischung macht's: Blumenerde, Gartenerde und Schlamm aus dem Fluss vor der Durchmischung

Alles wird unter Zugabe von etwas Wasser zu einem homogenen Schlamm gemischt. Dabei sollte die Wassermenge nur so bemessen sein, dass ein stichfester und dennoch glatter Brei entsteht. Wenn im Boden größere Steine enthalten sind, sollten diese zuvor entfernt werden (z. B. durch Sieben).

Für den Aufbau der Batterien müssen noch geeignete Gefäße mit Deckeln organisiert werden, die nicht im Bausatz enthalten sind. Um das Angenehme mit dem Nützlichen zu verbinden, sind hier zum Beispiel quadratische Plastikdosen von Roter Grütze, Kraut- oder Nudelsalat aus dem Kühlregal (ca. 1000 ml Volumen) sehr zu empfehlen. Diese Produkte kosten mit Füllung weniger als ein Einzelkauf von leeren Plastikdosen in gleicher Größe. Für die weiter unten beschriebene Variante mit Reis-Bepflanzung können auch glasierte Blumenübertöpfe oder Ähnliches verwendet werden.

Sind Schlamm und passende Plastikgefäße vorhanden, kann es mit dem Bau der Batterie losgehen. Für einen ersten Probeaufbau einer Doppel-Batterie wurden gekaufte Plastikgefäße genutzt (siehe Abbildung 7).



Abb. 7: Plastikdosen und GraphitWeichfilz-Elektroden vor der Befüllung

Im Foto sind auch die vorbereiteten Graphit-Weichfilz-Elektroden zu sehen. Sofern Gefäße mit kleineren Abmessungen verwendet werden, kann der Weichfilz leicht mit einer Schere auf die passende Größe zurechtgeschnitten werden. Die Titandrähte werden dann in die Elektroden gesteckt. Für den Aufbau ist zu beachten, dass der Draht für die Anode (5 mm-Material) circa 7 cm länger zu wählen ist. Die Katode oben (10 mm-Material) liegt näher am oberen Ausgang und kommt mit einem um die Schichthöhe kürzeren Kabel aus. Um eine gute Ableitung zu erhalten, wurde der Titandraht in Form einer Schleife durch die Filzschicht gezogen. Für diesen Arbeitsgang liegen auch Einmalhandschuhe im Bausatz bereit, da das Fasermaterial der Weichfilze merklich auf der Haut juckt (ähnlich wie bei Steinwolle). Auch wenn Graphit als Material nicht toxisch ist, sollte als Vorsichtsmaßnahme so gearbeitet werden, dass die Fasern nicht eingeatmet werden. Sind die Titandrähte durch den Filz gezogen, wird der Rest des Drahtes mit Schrumpfschlauch versehen. Hierzu wird der längere Draht mit dem schwarzen Schrumpfschlauch überzogen (späterer Minuspol). Der kürzere Draht der Katode wird mit dem roten Schrumpfschlauch überzogen. Die Länge der Schläuche wird so gewählt, dass am Ende noch circa 2 cm blanker Draht übrigbleiben. Dieser wird verdreht und am besten mit einer Aderendhülse verstärkt.

In das Plastikgefäß werden in den oberen Rand oder in seinen Deckel zwei Löcher zum Durchziehen der beiden Drähte gebohrt. Die Löcher am Seitenrand haben den Vorteil, dass der Deckel abgenommen werden kann, ohne dass hierzu die Kabel abgeschraubt werden müssen. Hermetisch dicht darf der Aufbau nicht sein, da ein ausreichender Luftaustausch für den Betrieb nötig ist. Daher sollten die Deckel auch nur lose aufgesetzt werden.

Zur Befüllung wird zunächst eine etwa 1 cm dünne Schicht Schlamm auf den Gefäßboden gegeben. Nun wird die dünnere Graphit-Weichfilz-Elektrode (dazu sollten wieder Einmalhandschuhen benutzt werden) auf den Gefäßboden gelegt und mit Schlamm soweit überschichtet, dass noch 2 cm bis zum oberen Rand frei bleiben.

Nach etwas Glattrütteln wird die dicke obere Elektrode auf die Oberfläche gelegt. Beide Drähte werden nun durch die Löcher im Rand oder Deckel gezogen (Abbildung 8).



Abb. 8 : Zwei befüllte Schlamm-Batterien

Dann wird vorsichtig Wasser auf die Katode gegeben, bis die Elektrode gut durchfeuchtet ist. Schlamm, der am inneren Rand des Gefäßes haftet, sollte mit einem Tuch abgewischt werden.

Um ein Austrocknen der Batterie zu vermeiden, sollte regelmäßig Wasser nachgegeben werden. Der Wasserstand kann sogar bis Fingerbreite über der Elektrode erhöht werden, wenn das Wasser klar und die Oberseite der Elektrode nicht von Schlamm bedeckt ist.

Die Enden der Titandrähte werden am besten verdrillt und mit einer Aderendhülse versehen. Zum direkten Anschluss von Verbrauchern liegen dem Bausatz Lüsterklemmen bei. Für systematische Untersuchungen der Batterieleistung wird mit logarithmisch abgestuften Widerständen der Punkt maximaler Leistung ermittelt. Im Bausatz sind hierzu die Widerstände 100 k Ω , 56 k Ω , 22 k Ω , 10 k Ω , 5,6 k Ω , 2,2 k Ω , 1 k Ω , 560 Ω , 220 Ω und 100 Ω in doppelter Ausführung enthalten. Mit diesen Widerständen und den anderen enthaltenen Materialien lassen sich zwei Platinen aufbauen, wie eine in Abbildung 9 zu sehen ist.

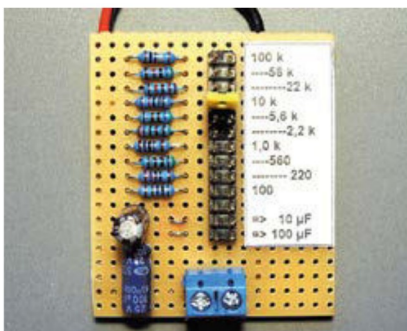


Abb. 9 : Platine zur Auswahl der Lastwiderstände

Über einen Jumper kann dann komfortabel der gewünschte Wert ausgewählt werden. Das fest verlötete Kabel ist mit der Lüsterklemme an der Batterie verbunden. Über die Schraubklemmen kann ein Spannungsmesser oder ein weiterer Verbraucher angeschlossen werden. Die beiden Kondensatoren mit 10 μ F und 100 μ F lassen sich optional über weitere Jumper zuschalten. Über

sie können Verbraucher unterstützt werden, die eher impulsartig Leistung benötigen (z. B. ein mechanisches Uhrwerk). Die Aufbauhinweise sind auf einem Begleitblatt im Bausatz enthalten.

Varianten im Aufbau

Die oben vorgeschlagene Schlamm Mischung aus Gartenerde, Blumenerde und Flussschlamm kann als Ausgangsrezept dienen. Letztlich muss sich eine elektroaktive mikrobielle Gemeinschaft ausbilden können, weshalb es hilft, Boden von unterschiedlichen Standorten zu mischen. Daneben benötigen die Mikroorganismen auch genügend Nahrung, aus der die Energie entnommen wird. In der Literatur ist es daher eines der Hauptthemen, optimale Substrate für Bio-Brennstoffzellen zu finden. In den Unterlagen zur »MudWatt«-Batterie wird zum Beispiel vorgeschlagen, in den Schlamm etwas Ketchup einzumischen. Auch in wissenschaftlichen Veröffentlichungen sind Versuche mit der Dosierung verschiedener Zucker unternommen worden. In einem im Jahr 2010 erschienenen Übersichtsartikel wurden vielfältige Substrat-Beispiele zusammengetragen, z. B. Acetat, Cellulose, Ethanol, Glucose, Milchzucker, Deponiesickerwasser, Mikroalgen, Makroalgen, Sorbitol, Stärke, Abwässer aus verschiedenen Quellen [7]. Bereits aus dieser unvollständigen Auflistung wird deutlich, wie breit gefächert die Experimente gestaltet werden können und dass ein einfacher Gang zum hauseigenen Kühlschrank oft schon ausreichend ist.

Variante 1:

In einem Versuch wurde zu ca. 1 L Schlamm 1 g Natriumacetat gegeben, da diese Zugabe in der Literatur als vorteilhaft erwähnt wurde. Messungen mit dieser Batterie #5 folgen am Ende dieses Beitrags. Dem Bausatz liegt ein Röhrchen mit 2 g Natriumacetat bei, das als Option in die eigene Schlamm Mischung gegeben werden kann. Wer mehr Substanz benötigt, aber keinen direkten Zugang zu dieser Chemikalie hat, kann auch ein Wärmekissen »schlachten«, in dem über das Knicken eines Metallblättchens im Innern eine Kristallisation ausgelöst wird. Diese Kissen enthalten typischerweise eine übersättigte Natriumacetatlösung.

Variante 2:

Durch Eintrag von Nährstoffen in den Schlamm wird den Mikroorganismen die benötigte Energie zur Verfügung gestellt. Es ist leicht nachzuvollziehen, dass mit zunehmender Betriebszeit einer solchen Batterie der Nährstoffvorrat gezehrt wird. Ob sich nach langer Betriebszeit über eine »Energiespritze« die Leistungsfähigkeit der Batterie wieder steigern lässt, wird die Zukunft zeigen. Derzeit fehlen hierzu noch Erfahrungswerte. Das Faszinierende bei der Schlamm-Batterie ist aber, dass sich der Traum von einem Perpetuum Mobile hier fast erfüllen lässt: Es gibt Varianten des Aufbaus, in denen zusätzlich Pflanzen im Schlamm kultiviert werden. Als Pflanzentyp eignen sich zum Beispiel Sumpfpflanzen oder Reis sehr gut. Bei diesem Setup gewinnt die Pflanze über Photosynthese Energie, die zum Aufbau verschiedener organischer Verbindungen verwendet wird (z. B. Zucker, Carbonsäuren). Diese Verbindungen werden in die Wurzeln transportiert und über diese teilweise in den Boden ausgeschieden. Auf dieses gefundene Fressen hat das vielseitige Konsortium von Mikroorganismen natürlich nur gewartet und bedankt sich dann mit einem gesteigerten Wachstum, Abgabe von anderen energiereichen Endprodukten und schließlich der erhöhten Stromproduktion. Die für die Anoden-Reaktion benötigten Nährstoffe werden also immer wieder neu, ausgehend von den Wurzelausscheidungen, nachgeliefert. Ein echtes Perpetuum Mobile ist ein solcher Aufbau natürlich nicht, aber ausgehend von Sonnenenergie organische Verbindungen herzustellen, die dann an einer mit Mikroorganismen bewachsenen Graphit-Weichfilz-Elektrode zu elektrischer Energie führen, um damit etwa ein Digitalthermometer zu betreiben, ist außergewöhnlich genug. Auch für diese Variante liegt dem Bausatz ein Tütchen mit passenden Reissamen (eventuell auch Samen von anderen Pflanzen) bei. Die Reissamen sollten ein paar Tage in Leitungswasser zum Keimen gebracht werden und dann in

Blumenerde für mindestens eine Woche wachsen, bevor die kleinen Reispflanzen schließlich den anoxischen Bedingungen im Schlamm ausgesetzt werden. Die Reispflanzen benötigen viel Wasser, Wärme und Licht zum Wachsen. Falls keine sonnige Fensterbank zur Verfügung steht, kann auch eine Bürolampe als Lichtquelle genutzt werden.



Abb. 10: Pflanzen als EnergyBooster: Reispflanze nach einem Monat

Zum Umpflanzen in die Schlambatterie können passende Löcher in die Elektroden-Filze gestochen werden, damit die Pflanze durch die Katode und die Wurzeln durch die Anode wachsen können.

Variante 3:

Bei dem bislang beschriebenen Aufbau aus zwei Graphit-Elektroden kann mit jedem billigen Digitalvoltmeter die Höhe der Spannung zwischen den Elektroden bestimmt werden. Das allein ermöglicht schon unzählige Versuchsvarianten. Wer sich aber näher mit der RedOx-Situation an den beiden Elektroden der Batterie beschäftigen will, kann dies über eine kleine Erweiterung im Aufbau für wenig Geld erreichen. Denn zum Zeitpunkt der Befüllung einer Schlambatterie liegen noch völlig symmetrische Bedingungen vor: Es werden die gleichen Elektrodenmaterialien und Drähte, sowie ein homogen durchmischter Schlamm verwendet. Erst im Verlauf mehrerer Tage bilden sich aufgrund der RedOx-Situation im Boden unterschiedliche mikrobielle Lebensgemeinschaften aus, die letztlich zu der biologisch generierten Elektrizität führen.

Soll die RedOx-Situation im Experiment miterfasst werden, ist eine zusätzliche Referenzelektrode erforderlich. Die angegebenen Spannungen in der elektrochemischen Spannungsreihe werden konventionsgemäß auf die Standard-Wasserstoffelektrode (SHE) bezogen (z. B. $+0,35 \text{ V}$ bei $\text{Cu}^{2+} + 2 \text{ e} \rightleftharpoons \text{Cu}$). Über eine Strombrücke aus der Schlambatterie zu einer SHE könnte somit direkt das Potenzial der Anode oder Katode abgelesen werden. Die Anwendung einer solchen Elektrode ist kompliziert, weshalb sie in der Praxis üblicherweise durch eine Silber-Silberchlorid-Elektrode (Ag/AgCl) ersetzt wird. Dieser Typ findet sich standardmäßig in pH-Einstabmessketten und hat somit eine sehr große Verbreitung. Da pH-Einstabmessketten schon für ca. 6 € aus China erhältlich sind, liegt es nahe, die Referenzelektrode einer solchen pH-Elektrode für die Potenzial-Messungen in der Schlambatterie zu »missbrauchen«. Die pH-Elektrode wird mit einem BNC-Stecker geliefert, wobei am Masseanschluss die Verbindung zur Referenzelektrode abgegriffen werden kann. Bei Nutzung einer Ag/AgCl-Elektrode ist zu beachten, dass das Potenzial etwa um 0,2 V zur SHE verschoben ist. Dieser Versatz muss später wieder herausgerechnet werden.

In einem Test wurde eine pH-Elektrode mit wenigen Lagen dünnem Baumwollstoff umwickelt und in einer Ecke einer Batterie etwa auf mittlere Bodenhöhe gesteckt. Der Stoff soll einen direkten Kontakt von Sand oder Steinchen mit der Glasmembran verhindern. Zur Potenzialmessung kann nun ein normales Digitalmultimeter verwendet werden, wobei die Anode

oder Katode gegen den Massekontakt des BNC-Steckers zu messen ist. Die Potenziale einer eingelaufenen Schlamm-Batterie gegen eine SHE bewegen sich nach MudWatt-Informationen für die Anode in einem Bereich von -200 mV bis 0 mV. Für die Katode werden typischerweise +200 mV bis +600 mV gefunden. Am Ende des Beitrags werden Messungen zu den Potenzialen gezeigt, wie sie bei der Batterie #5 gefunden wurden.

Variante 4:

Abschließend soll noch erwähnt werden, dass in einigen YouTube-Videos und Informationen aus dem Internet statt des Graphit-Weichfilzes auch andere Elektrodenaufbauten verwendet werden. Bei einer alternativen Bauform wird granuliert (Aktiv-)Kohle von beiden Seiten auf ein mit Klebstoff behandeltes Edelstahl-Drahtnetz fixiert. Ein so vorbereitetes Sandwich wird dann noch in einer Presse in Form gebracht. Versuche zu dieser Variante wurden von den Autoren nicht durchgeführt, da die Kombination Graphit-Weichfilz und Titandraht hier weniger spezielle Werkzeuge erfordert. Auch stellt sich die Frage, wie die langfristige Haltbarkeit der Kohle-Klebstoff-Draht-Verbindung ist. Zudem ist fraglich, ob eine Klebstoffschicht nicht zu erhöhten Übergangswiderständen und Verblockungen führt. Oder ob Klebstoff hier (un)beabsichtigt als Nährstoff den Mikroorganismen verabreicht wird.

Messungen

Wer nach den oben angeführten Aufbauhinweisen seine Batterien fertiggestellt hat und ein Digitalmultimeter anschließt, wird in den ersten Stunden eventuell nur ganz wenige Millivolt messen. Dieses Ausbleiben einer Spannung ist verständlich, da am Anfang ja eine symmetrische Bauweise (gleiche Elektrodenmaterialien und homogener Schlamm) vorherrschen. Wird gleich zu Beginn eine deutliche Spannung gemessen, kann dies nicht auf eine mikrobiologische Aktivität zurückgeführt werden. In diesem Fall liegt vielleicht viel fauliger (reduzierter, anaerober) Schlamm vor (z. B. aus einem tieferen Flusssediment oder tieferer Wattschicht entnommen), in dem nun durch Luftkontakt der oberen Schicht sich spontan eine Spannung aufgrund von chemischen RedOx-Prozessen einstellt.

Für Schlamm, der kein direktes chemisches Potenzial zur Spannungsversorgung hat, baut sich die Spannung erst über einige Tage auf. Eine erste Messreihe gilt daher der sich täglich erhöhenden Klemmenspannung. Auf der »Weißen DVD« des AATiS ist als Zusatzmaterial eine Excel-Vorlage für ein Messprotokoll enthalten. Wenn alles normal verläuft, können nach wenigen Tagen mehrere Hundert Millivolt gemessen werden. In den eigenen Versuchen wurde die Batterie in den ersten Tagen nur mit einer geringen Last betrieben (100 k Ω). In Abbildung 11 sind die manuell aufgenommenen Messwerte der Schlamm-Batterie #1 zu sehen.

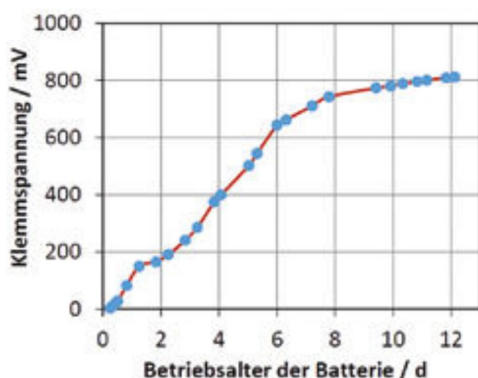


Abb. 11: Zum Einstieg: Anstieg der Klemmenspannung der Schlamm-Batterie #1 ($R_{\text{last}} = 100 \text{ k}\Omega$)

Nach etwa zwei Wochen Betriebszeit konnten Werte um 800 mV bei 100 k Ω gemessen werden. Auf diesem Wert stabilisierte sich die Spannung, was im Einklang mit den bei MudWatt gemachten Angaben ist. Aus der gemessenen Klemmenspannung am Lastwiderstand können Strom und Leistung errechnet werden. Dies ist auch in der erwähnten Excel-Vorlage vorbereitet.

So schnell und einfach eine Schlammatterie aufgebaut werden kann, so lange benötigen repräsentative Experimente damit. Wie bereits aus der ersten Einlaufkurve ersichtlich wird, benötigt der Aufbau circa zwei Wochen bis einigermaßen stabile Werte erreicht werden. Beim Anschluss von Verbrauchern (Lastwiderständen) mit unterschiedlicher Stromaufnahme stellt sich gegebenenfalls erst nach einigen Stunden (oder Tagen) ein neuer stabiler Wert ein. Wer ein solches Einlaufverhalten genauer untersuchen möchte, sollte idealerweise ein- bis zweimal pro Tag die Klemmenspannung protokollieren. Über einen einfachen Funkwecker neben der Batterie können bequem die weiteren Metadaten (Datum, Uhrzeit, Zimmertemperatur) aufgenommen werden.

Als Alternative zur manuellen Datenaufnahme kann die Messbox AS646 mit SD-Kartenlogger-Erweiterung genutzt werden [8]. Da die Eingangsbereiche beider Kanäle der Messbox kleiner als die Klemmenspannung der Batterie sind, ist beim Anschluss ein Spannungsteiler nötig. Für die hier durchgeführten Experimente wurde ein Teiler aus einem 100 k Ω - und einem 1 k Ω -Widerstand eingesetzt. Die Messschaltung belastet die Batterie demnach mit einem Widerstand von 101 k Ω nur geringfügig, während der AD-Wandlereingang K+ und Kü über den 1 k Ω Widerstand recht niederohmig ist und hierdurch Störungen gering bleiben. Durch den Teiler ist an der Messbox mit einem Signal von < 10 mV zu rechnen, was perfekt im Messbereich des AD-Wandlers liegt und dennoch eine mehr als ausreichende Auflösung sicherstellt. Als Beispiel einer solchen Datenaufnahme wurden die Einlaufkurven der zwei identisch hergestellten Schlammatterien #2 und #3 aufgenommen (Abbildung 12).

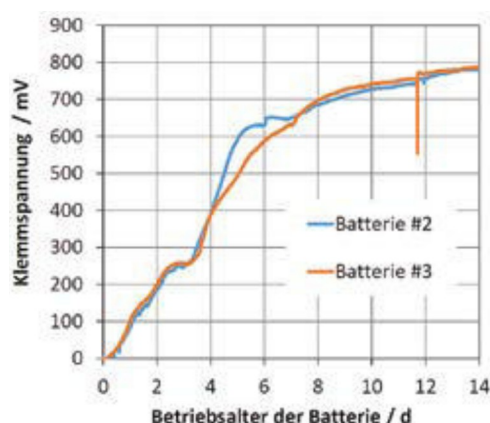


Abb. 12: Einlaufkurve zweier Batterien (Datenaufnahme per Messbox AS646)

Bei solchen Messungen mit Datenlogger ist zu beachten, dass die Arduino-Schaltung nach Anlegen der Versorgungsspannung eine Nullung durchführt. Es ist daher notwendig, die Messbox mit abgeklemmter Batterie aber angeschlossenem Stecker einzuschalten. Nach einigen Messwerten wird dann die Batterie angeklemt.

In diesem Experiment ging es auch um die Frage, inwieweit sich Unterschiede bei der Zusammenschaltung von mehreren Zellen ergeben. Der Logger war so programmiert, dass pro Minute eine Messung durchgeführt wurde. Jede Kurve aus Abbildung 12 wird demnach bei einer Laufzeit von 14 Tagen durch circa 20 000 Einzelwerte repräsentiert. Die erzeugte TXT-Datei wurde 890 KB groß und es ist klar, dass auch eine wesentlich geringere Datenaufnahmefrequenz völlig ausreichend ist (z. B. stündliche Messungen). Die Streuung der y-Werte von Messung zu Messung ist gering und erlaubt das Beobachten von Änderungen der Klemmenspannung von etwa 0,1 mV auf einem Spannungsniveau von 800 mV. Im Experiment gab es im Betriebsalter von 4 bis 7 Tagen unterschiedliche Kurvenverläufe, die sich später wieder angeglichen haben. Im Nachgang

zu dieser Messreihe wurden beide Batterien nochmals über einen Zeitraum von 15 Tagen mit dem Logger beobachtet. Auch in diesem Zeitraum hat sich ein nahezu perfekter Gleichlauf in den Spannungen auf einem Niveau von etwas über 800 mV ergeben. Nur in einem Zeitabschnitt über 2 Tage konnte bei einer Zelle ein Spannungseinbruch festgestellt werden, der auch über die täglichen manuellen Messungen aufgefallen ist. Die Ursache war eine schlechte Kontaktierung der oberen Elektrode mit der Schlammoberfläche. Nach Festdrücken und Nachfeuchten stellte sich bald wieder eine gleich hohe Spannung ein.

Im nächsten Beispiel wird die Einlauf-Kurve der bereits oben erwähnten Batterie #5 gezeigt, in deren Schlamm 1 g Natriumacetat eingemischt und die zusätzlich mit einer Silber-Silberchlorid-Referenzelektrode (pH-Einstabmesskette) ausgerüstet wurde. Die blaue Kurve in Abbildung 13 zeigt die mittels Digitalmultimeter gemessene Klemmenspannung in gewohnter Weise.

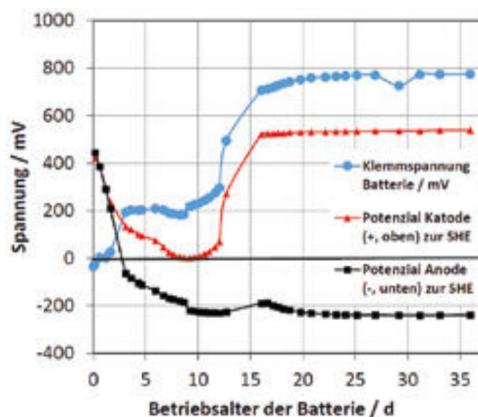


Abb. 13: RedOx-Messungen mittels Referenz-Elektrode (Batterie #5)

Bei dieser Batterie wurde für knapp zwei Wochen eine nur vergleichsweise geringe Spannung gemessen (Lastwiderstand war bei allen Messungen 100 k Ω). Erst nach zwei Wochen gab es innerhalb weniger Tage einen deutlichen Spannungsanstieg, der sich dann stabil auf knapp 800 mV stabilisiert hat. Das verzögerte »Ansprechen« der Batterie könnte damit zu tun haben, dass für die Füllung nur Garten- und Blumenerde verwendet wurden. Ein Fluss-Sediment aus tieferen Schichten mit einer möglicherweise schon besser adaptierten Mikrobiologie war nicht enthalten.

Zusätzlich dazu sind auch die Potentiale der Anode (schwarze Kurve) und Katode (rote Kurve) gegen die Referenzelektrode aufgeführt. Die hier aufgetragenen Werte wurden bereits von der Ag/AgCl auf die SHE umgerechnet. Die gefundenen Werten von 550 mV für die Katode und 200 mV für die Anode stimmen gut mit den in den »MudWatt«-Unterlagen gemachten Angaben überein. Die Potentiale liegen zum Beginn auf dem gleichen Wert und differenzieren sich im Laufe der Betriebszeit. Interessant ist der Kurvenverlauf der Katode, der zunächst abfällt, danach aber steil ansteigt. Aus diesem Verlauf wird deutlich, dass es insbesondere die Katode ist, die ab zwei Wochen Betriebszeit zu der erhöhten Klemmenspannung den Hauptanteil der Spannung beisteuert, denn die Anode bleibt in dieser Zeit auf einem ähnlichen Niveau stehen.

In den bisher gezeigten Messkurven wurden nur Spannungsverläufe betrachtet. Soll über eine Schlamm-Batterie ein Verbraucher betrieben werden, sind neben ihrer Klemmenspannung auch der von ihr lieferbare Strom und die sich daraus ergebende Leistung wichtige Kenndaten. Im AATiS-Bausatz sind Bauteile für die in Abbildung 9 gezeigte Widerstands-Platine vorhanden, mit der sich der optimale Arbeitspunkt einer Batterie ermitteln lässt. Eine entsprechende Messreihe mit dieser Platine ist in Abbildung 14 zu sehen, bei der eine mit Ostsee-Schlamm befüllte Salzwasser-Batterie eingesetzt wurde.

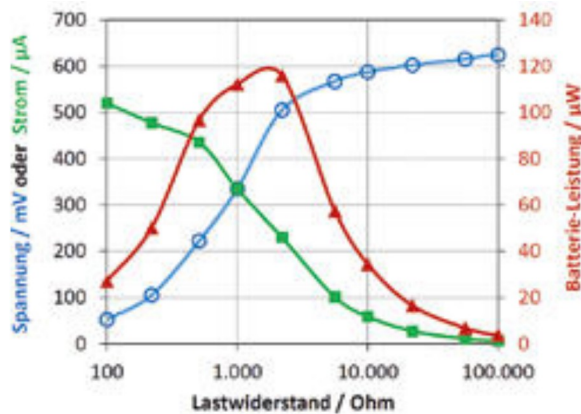


Abb. 14: Kenndaten von Batterie #4 in Abhängigkeit vom Lastwiderstand

Der Versuch wurde bei einem Batterie-Lebensalter von circa drei Monaten und bei 21 °C Zimmertemperatur durchgeführt. Ist kein Widerstand angeschlossen, wird sich die maximale Klemmenspannung einstellen (hier waren es knapp 650 mV). Beim Anschluss von hochohmigen Widerständen (z. B. 100 kΩ) fließt ein nur geringer Strom, so dass es zu keinem großen Spannungseinbruch kommt. Die Batterieleistung als Produkt aus Strom und Spannung bleibt aber auf einem kleinen Wert. Um mehr Leistung abzuschöpfen, muss der Widerstand verringert werden. Die Batterie zeigte im Bereich um 2 kΩ ihren maximalen Leistungswert. Wird der Widerstand weiter verringert (z. B. auf 100 Ω), steigt zwar der Stromfluss nochmals an, aber die Spannung bricht auf Werte um 50 mV ein. Im Produkt ergibt sich dann wieder eine nur geringe Gesamtleistung. Die Aufnahme dieser Daten erstreckte sich über zwei Tage, da jede Stufe für einige Stunden Stabilisierungszeit bekam.

Die Batterie #4 brachte im vorgestellten Experiment im optimalen Bereich eine Leistung von etwas mehr als 100 μW. Ergänzend soll erwähnt werden, dass bei vergleichbaren Messungen mit Batterie #5 über einen Zeitraum von mehreren Tagen Leistungen von 300 μW gemessen werden konnten. Diese wurden mit einem 1 kΩ-Widerstand und bei einer Klemmenspannung von 550 mV erzielt. Die Batterie hatte zu diesem Zeitpunkt ein Alter von 50 Tagen und wurde im Keller bei einer Raumtemperatur von nur 12 °C betrieben. Das ist erwähnenswert, da ein Betrieb bei solchen Temperaturen anscheinend noch problemlos möglich ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurde zunächst das Prinzip von Bio-Brennstoffzellen vorgestellt, bei denen die elektroaktive Fähigkeit von Bakterien, Elektronen auf der Anode abzuladen, zur Stromerzeugung genutzt wird. Anschließend wurde der Aufbau von Schlamm-Batterien auf Grundlage des AATiS-Bausatzes AS900 beschrieben. In der einfachsten Ausführung werden nur noch ein passendes Gefäß und etwas Erde benötigt. Es wurden aber auch Varianten in der Ausführung vorgestellt (Natriumacetat als Dünger, bepflanzte Schlamm-Batterien, RedOx-Messungen), die als Anstoß für eigene Untersuchungen dienen sollen. Abgerundet wurde der Beitrag mit der Vorstellung typischer Messkurven, die eine erste Orientierung geben. Als erste Anwendung kann über die zwei Zellen direkt ein Digitalthermometer mit Hygrometer betrieben werden.

Die Schlamm-Batterie als eine Variante einer Bio-Brennstoffzelle trifft den Nerv aktueller Diskussionen um alternative Energiequellen und verknüpft in hervorragender Weise Themen aus den MINT-Fächern mit gesellschaftlich-wirtschaftlichen Fragestellungen. Es bleibt zwar zu bezweifeln, ob in Zukunft über Bio-Brennstoffzellen jemals signifikante Energiemengen gewonnen werden können, aber der einfache und ungefährliche Aufbau, sowie die Möglichkeit des Einbringens eigener Ideen prädestinieren dieses Thema für den didaktischen Bereich.

Thematisch ausstehend ist noch eine möglichst einfache Step-Up-Schaltung, um auch mit einer einzigen Zelle zum Beispiel eine LED blinken zu lassen oder eine Digitaluhr zu betreiben. Es ist geplant, dieses Thema für das nächste Jahr in den Fokus zu rücken. Eventuell gibt der Selbstbau-Bausatz auch bei den Lesern den Anstoß für eigene Lösungsvorschläge. Das Vorstellen dieser Schaltungen und Kenndaten wäre ein spannendes Thema für das nächste Praxisheft.

Literatur/Links:

- [1] C. Santoro u. a.: Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review, in: Journal of Power Sources, 356 (2017), 225—244.
- [2] C.E. Reimers u. a.: The identification of cable bacteria attached to the anode of a benthic microbial fuel cell: evidence of long distance extracellular electron transport to electrodes, in: Frontiers in microbiology, 8 (2055) (2017), S. 1—14. (Open Access)
- [3] A. Kouzuma u. a.: Microbial electricity generation in rice paddy fields: recent advances and perspectives in rhizosphere microbial fuel cells, in: Applied Microbiology and Biotechnology, 98 (2014), S. 9521—9526.
- [4] Magical Micro es: MudWatt 11. 12. 2019 – www.magicalmicrobes.com/
- [5] K. Hansky,: Energy Harvesting mit AS341, in: AATiS-Praxisheft 21 (2011), S. 61—64.
- [6] T. Stepanek: StepUp-Wandler AS911 mit hohem Wirkungsgrad, in: AATiS-Praxisheft 21 (2011), S. 65—66.
- [7] D. Pant u. a.: A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production, in: Bioresource Technology, 101 (2010), S. 1533—1543.
- [8] U. Pöggel: Messbox AS646, in: AATiS-Praxisheft 26 (2016), S. 95—98.