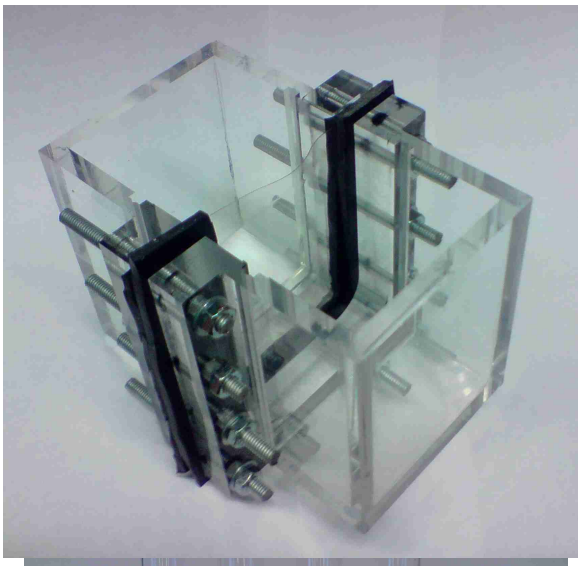
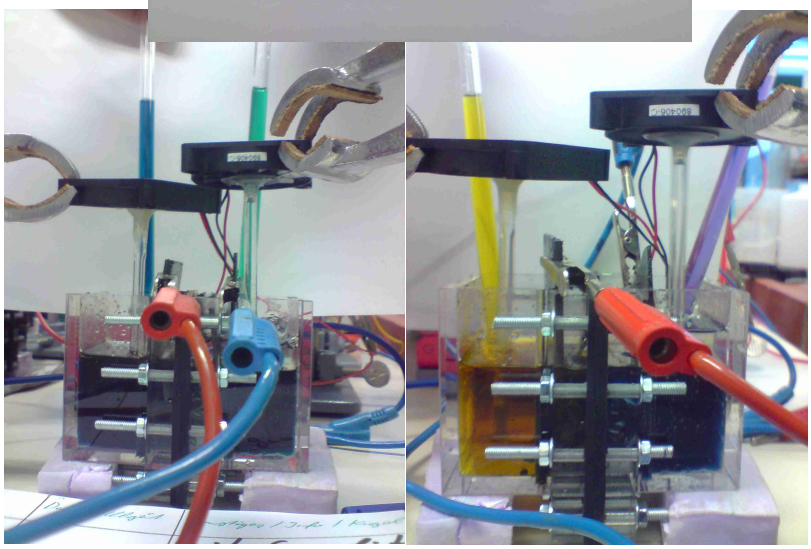
Die Redox-Flow-Zelle 2.0





Eine Jugend-forscht-Arbeit

von

Jens Nettersheim, Michael Garzem und Sebastian Klick

Inhaltsverzeichnis

Die Redox-Flow-Zelle 2.0....1
Inhaltsverzeichnis....1
1. Kurzfassung....2
2. Zielsetzung....3
3. Funktionsweise einer Redox-Flow-Zelle....3
4. Sicherheit....4
5. Die Redox-Flow-Zelle 1.0....5
5.1 Aufbau....5
5.2 Probleme....6
6. Die Redox-Flow-Zelle 2.0....6
6.1 Aufbau der neuen Redox-Flow-Zelle....6
6.2 Vorteile der neuen Redox-Flow-Zelle....8
6.3 Experimente zur Steigerung der Leistung....9
6.4 Auswertung....12
6.5 Technische Daten unserer Zellen....12
6.6 Beispiele für die Leistung unserer Zelle....13
7. Ausblick....14
8. Sicherheit für den mobilen Einsatz....15
8. Danksagung....15
9. Literatur- und Linkliste....15

1. Kurzfassung

Die Redox-Flow-Zelle ist eine sehr gute Möglichkeit Energie über lange Zeiträume zu speichern, da sie keine Selbstentladung aufweist und auch keinen Memory-Effekt kennt. Sie speichert die Energie in Flüssigkeiten und nicht in Feststoffen oder Gasen, damit hat sie auch eine sehr hohe Lebensdauer, da keine strukturellen Änderungen an den Elektroden stattfinden. Außerdem können große Mengen Energie relativ preiswert gespeichert werden, da lediglich große Tanks und ausreichend Elektrolytlösung erforderlich ist.

In dieser Arbeit entwickelten wir eine völlig neuartige Redox-Flow-Zelle auf der Basis eines Vanadium/Vanadium-Akkus. Es ist uns gelungen die Probleme der Dichtigkeit sowie des Oxidationsschutzes preiswert zu lösen. Außerdem konnten wir durch einen speziellen Aufbau der Elektrode die Leistung unserer Zelle steigern.

2. Zielsetzung

In dieser Jugend-forscht-Arbeit möchten wir die Redox-Flow-Zelle, die Sebastian im Rahmen seiner letzten Jugend-forscht-Arbeit präsentieren konnte, weiter verbessern und die Sicherheit erhöhen. Die Redox-Flow-Zelle ist ein Energiespeicher mit viel Zukunftspotenzial. Redox-Flow-Zellen kennen keine Selbstentladung und keinen Memory-Effekt. Daher können sie sehr gut den Strom aus erneuerbaren Energien speichern. Außerdem speichern sie den Strom in Flüssigkeiten. Dadurch lassen sie sich sehr schnell wieder aufladen und könnten bei höherer Energiedichte auch in Elektroautos eingesetzt werden. Darüber hinaus haben die Redox-Flow-Zellen auch eine extrem hohe Lebensdauer, da an den Elektroden keine strukturellen Veränderungen stattfinden. Außerdem kann der Strom einfach in großen Tanks gespeichert werden, sodass große Mengen elektrischer Energie sehr preiswert gespeichert werden können. Zudem lässt sich die maximale Leistung unabhängig von der gespeicherten Energie einstellen (Große Zelle + kleine Tanks = hohe Leistung + wenig Energie, kleine Zelle + große Tanks = geringe Leistung + viel Energie).

3. Funktionsweise einer Redox-Flow-Zelle

Die Redox-Flow-Zelle ist eine spezielle galvanische Zelle, bei der die Redoxpaare nur aus Ionen bestehen, die in einem Lösungsmittel, zum Beispiel Schwefelsäure gelöst sind. Die Energie wird also in Flüssigkeiten gespeichert und nicht in Feststoffen oder Gasen.
Ein Redox-Flow-System besteht aus einer Reaktionseinheit, der eigentlichen Zelle und den Tanks in denen die Flüssigkeiten gespeichert werden. In der Reaktionseinheit befindet sich eine Membran die den Austausch von H_3O^+ Ionen ermöglicht, aber den Übergang der Metallionen möglichst verhindert. Die Größe der Tanks kann frei nach dem benötigten Speichervolumen gewählt werden.

Abb.3.1: Die vier Oxidationsstufen des Vanadiums: (V, IV, III, II von links nach rechts) aus eigener Herstellung

Bei einer Redox-Flow-Zelle auf Vanadium Basis befinden sich im geladenen Zustand in einem Tank zweifach positiv geladene Vanadiumionen (V^{2+}). In dem anderen Tank befindet sich einfach positiv geladenes Vanadium(V)oxid (VO_2^+). Diese Zutaten sind in Batteriesäure (38% Schwefelsäure) gelöst. Wenn die Zelle entladen ist enthält die Zelle dreifach positiv geladene Vanadiumionen (V^{3+}) und zweifach positiv geladene Vanadium(IV)oxid-Ionen (VO^{2+}) Durch die Verwendung von Vanadium auf beiden Seiten

der Zelle ist eine Beschädigung der Zelle durch Crossovereffekt der Ionen in der Membran ausgeschlossen, sodass eine Vanadium/Vanadium-Zelle eine sehr hohe Lebensdauer hat. Außerdem kann der Ladezustand der Zelle an der Farbe der Flüssigkeiten erkannt werden (VO_2^+-Ionen sind gelb, VO^{2+}-Ionen blau, V^{3+}-Ionen grün und V^{2+}-Ionen grauviolett s. Abb. 3.1).

Wenn die Zelle entladen wird, reagieren die Stoffe wie folgt

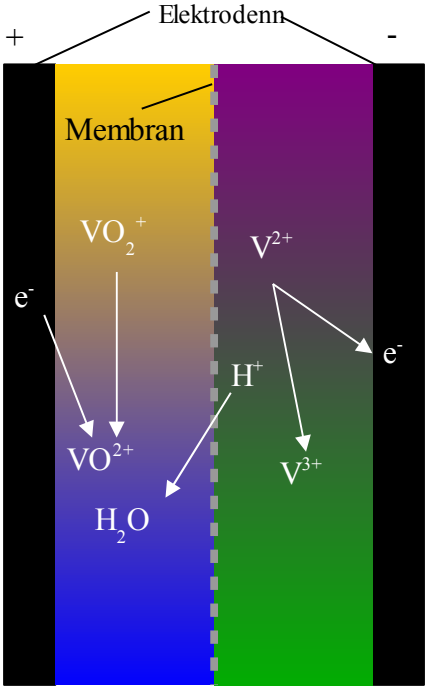


Abb. 3.2: die Entladereaktion in der Redox-Flow-Zelle

an der Anode: $V^{2+} \rightarrow V^{3+} + e^-$

an der Kathode: $VO_2^+ + 2H^+ + e^- \rightarrow VO^{2+} + H_2O$

Daraus folgt die Gesamtreaktion:

$$V^{2+} + VO_2^+ + 2H^+ \rightarrow V^{3+} + VO^{2+} + H_2O$$

Das V(II) gibt also ein Elektron ab um der günstigen Elekronenkonfiguration von acht Elektronen näher zu kommen. An der Kathode nimmt das VO_2^+ ein Elektron auf, dadurch kann sich ein Sauerstoffatom lösen und sich mit den H^+-Ionen zu Wasser verbinden. Beim Laden laufen die Reaktionen genau anders herum ab. Die Membran dient dazu, dass sich die H^+-Ionen austauschen können und das Spannungspotenzial erhalten bleibt.

Das Spannungspotenzial der Zelle lässt sich aus den Standardpotenzialen der beteiligten Redoxpaare berechnen;

$V^{2+} \rightarrow V^{3+} + e^-$ E_0= -0,26V

$VO_2^+ + 2H^+ + (SO_4)^{2-} + e^- \rightarrow VO^{2+} + (SO_4)^{2-} + H_2O$ E_0=+1.00V

Allerdings spielt auch das verwendete Elektrodenmaterial eine Rolle. Aufgrund der Nernst-Gleichung lässt sich jedoch eine höhere Spannung erreichen. Allerdings liegt die maximale Spannung bei 1,7V, da über dieser Spannung das Wasser aus der Lösung zersetzt wird.

4. Sicherheit

Bevor wir mit unseren Experimenten beginnnen konnten mussten wir natürlich sicherstellen, dass uns und unserer Umwelt dabei nichts zustoßen kann. Die von uns verwendete Batteriesäure ist stark ätzend (Schutzbrille und Schutzhandschuhe) und das Vanadiumpentoxid, welches wir zur Herstellung der Elektrolytlösung verwenden ist giftig und umweltgefährlich. Daher arbeiteten wir mit Vanadiumpentoxid stets unter dem Abzug und testeten alle Materialien der Zelle zunächst auf ihre Säurebeständigkeit. Außerdem

stellten wir unsere Zelle zunächst in eine Kunststoffkiste, um im Falle eines Lecks die Folgen gering zu halten. Um uns selbst zu schützen, verwendeten wir Kittel, Schutzbrillen und Schutzhandschuhe. Selbstverständlich beachteten wir die S-Sätze und nahmen die R-Sätze zur Kenntnis. Außerdem standen wir bei besonders kritischen Versuchen unter Aufsicht unserer Chemielehrerin.

Abb.4.1: Wir drei in vollständiger Schutzausstattung

5. Die Redox-Flow-Zelle 1.0

5.1 Aufbau

Die Redox-Flow-Zelle ist nach dem Sandwichprinzip aus zwei Gummischichten, einer Elektrodenschicht, einer Plexiglasschicht und einer Membranschicht aufgebaut. Die dabei benutzte Membran besteht aus Nafion und separiert die beiden Halbzellen, indem sie nur Oxoniumionen (H_3O^+) hindurch lässt. Auf sie folgt eine Gummischicht, aus der zentral ein großes Rechteck herausgeschnitten wurde, damit die Elektrolytflüssigkeit Kontakt zu den Elektrodenplatten hat, die die nächste Schicht der Zelle darstellt. Die Elektrodenschicht besitzt, wie die beiden folgenden Schichten zwei Löcher, die den Elektrolyten den Zugang zum Zelleninneren (über Glasröhrchen) ermöglicht. Eine weitere Gummischicht (hier ohne rechteckige Freifläche) wird nun als Dichtung eingesetzt. Komplettiert wird das Ganze von einer Plexiglasschicht, die von der Fläche größer ist, als die restlichen Schichten der Zelle, sodass Gewindestangen durch Löcher am überstehenden Rand gesteckt werden und so die Zelle zusammengepresst werden kann. Die Dichtigkeit wird durch dieses Vorgehen deutlich verbessert.

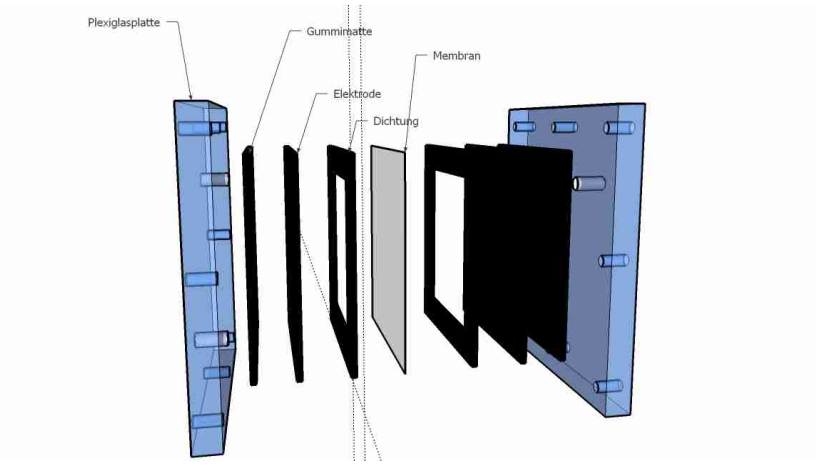


Abb. 5.1.1: Plan unserer Zelle

Die Elektrolytflüssigkeiten werden in externen Tanks gelagert. Den Transport der Flüssigkeiten erledigt eine Schlauchpumpe.
Die Stromversorgung für den Auf- und Entladevorgang erfolgt über Kupferblech, welche zwischen die Elektrodenschicht und die 2. Gummischicht geklemmt wird.

Abb.5.1.2: Unsere Zelle in Nahaufnahme (links) und der gesamte Aufbau (rechts)

5.2 Probleme

Wie wir leider feststellten, brachte diese Konstruktion der Zelle viele Probleme mit sich.
Ein großes Problem war die **Dichtigkeit der Zelle** an den Anschlüssen des Schlauchs und in der Schlauchpumpe, wo der Schlauch einer hohen mechanischen Belastung ausgesetzt ist. Auch die Schlauchpumpe brachte Probleme mit sich. Zum Einen wurden die Kunststoffschläuche von der rotierenden Walze auf der einen Seite eingezogen und auf der anderen ausgestoßen, sodass sie nach einiger Zeit von den Elektrolytflüssigkeitstanks getrennt wurden und das System nicht dauerhaft in Betrieb sein konnte.
Außerdem benötigt die **Schlauchpumpe sehr viel Energie** und arbeitet damit nicht effizient.
Ein weiteres sehr großes Problem für uns war die **Oxidation von V^{2+} an der Luft**. Dieses Problem konnten wir durch eine Schutzgasatmosphäre (hierzu verwendeten wir Stickstoff) beheben, die allerdings für den Dauerbetrieb ein hohes Kostenaufkommen darstellte.

6. Die Redox-Flow-Zelle 2.0

6.1 Aufbau der neuen Redox-Flow-Zelle

Unsere bisherigen Durchflusszellen haben alle die Probleme, dass sie nicht vollständig und langfristig dicht sind und außerdem eine Pumpe benötigen, die sehr viel Energie verbraucht. Daher entschlossen wir uns eine neue Zelle zu entwickeln, die diese Probleme nicht mehr hat.

Die Dichtungen der jeweiligen Reaktionseinheit waren nicht das Problem. Die kritischen Stellen stellten die Übergänge von der Zelle zum Schlauch sowie der Schlauch in der Pumpe, der sehr starken mechanischen Belastungen ausgesetzt ist, dar. Ideal wäre der Verzicht der Pumpe. Allerdings ist sie für den dauerhaften Betrieb der Zelle nötig, da die Elektrolyten bewegt werden müssen um zu reagieren.

Doch dann kam uns die Idee die Tanks in die Zelle zu integrieren. So müssen die Elektrolyten nur noch durch einen Rührer bewegt werden. Dazu verwendeten wir zunächst Magnetrührer, die wir später durch selbst gebaute Rührer ersetzten. Diese neue Zelle sieht im Prinzip genauso aus wie unsere letzte flache Durchflusszelle allerdings mit dem Unterschied, dass auf beiden Seiten statt einer durchgehenden Wand ein Tank angebracht ist (siehe Abb.6.1.1). Die Halbzellen ließen wir von der Firma Creaplex aus Plexiglas anfertigen.

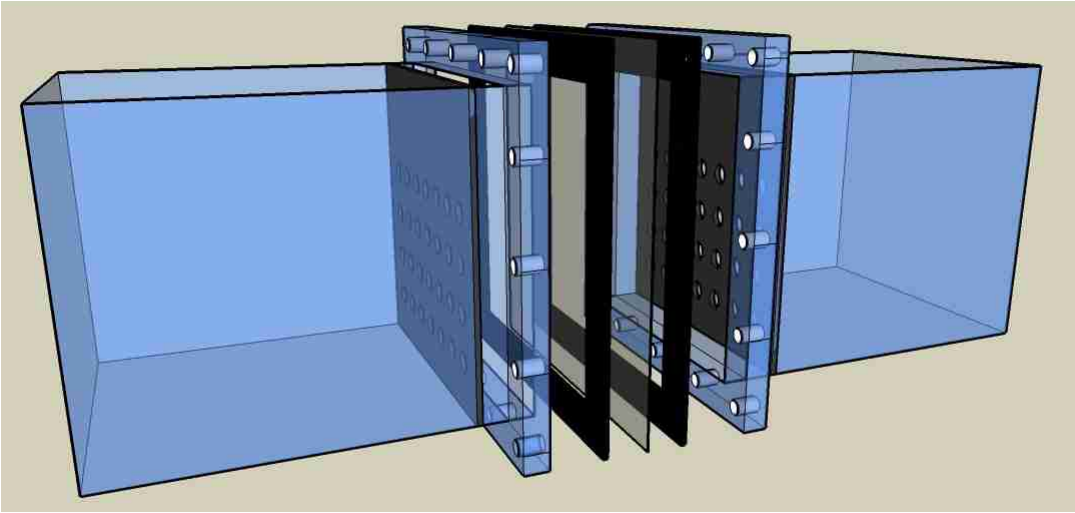


Abb.6.1.1: der Plan unserer Redox-Flow-Zelle 2.0

Die komplette Zelle besteht aus zwei Halbzellen, auf die Gummirahmen mit Löchern für die Gewindestangen zur Abdichtung der Zelle gesetzt werden. Die Membran, welche später die Elektrolyte voneinander trennt, befindet sich zwischen den Dichtungsgummis. Sie besitzt ebenfalls Löcher für die Gewindestangen. Das System wird wie unsere bisherigen Zellen durch Gewindestangen zusammengehalten (siehe Abb. 6.1.2). Die zwei Elektroden (je eine pro Halbzelle), welche mit Löchern versehen sind um die Lösung durchzulassen, werden von oben an die Membran gesetzt.

Bei den ersten Tests kam das erhoffte Ergebnis, welches uns sehr zufrieden stellte.

Die Zelle war vollständig dicht!

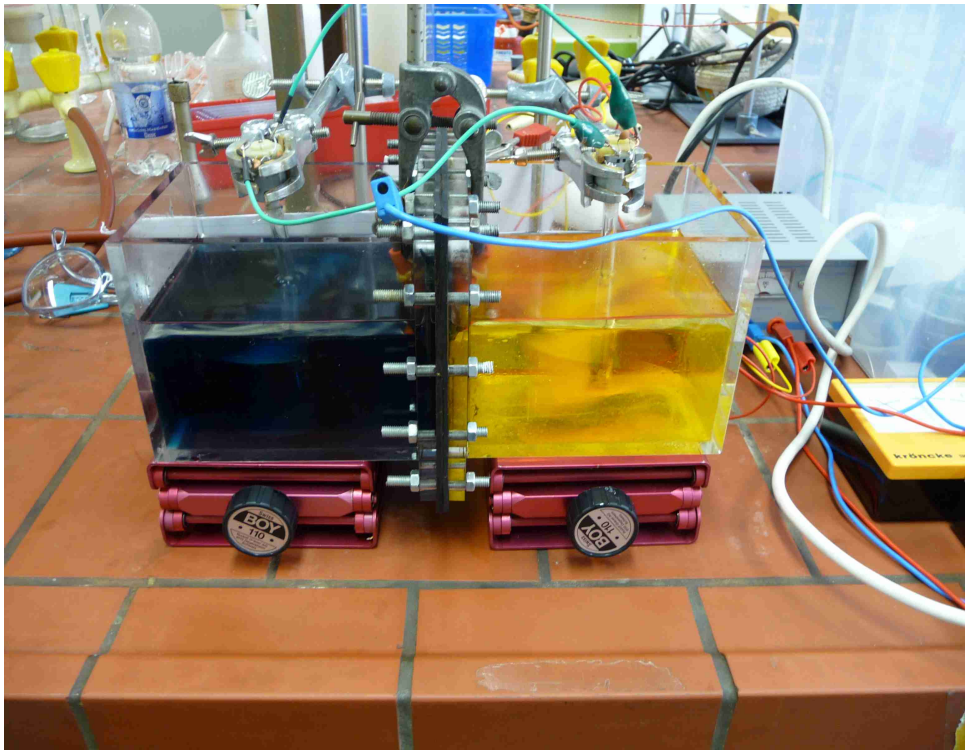


Abb. 6.1.2: Unsere fertige Redox-Flow-Zelle 2.0 mit selbst gebauten Rührern

Somit haben wir jetzt ein System, das auch längere Zeit unbeaufsichtigt laufen kann. Allerdings mussten wir uns für den Oxidationsschutz der Zelle eine Alternative zur Gasspülung überlegen, da diese auf Dauer auch nicht ganz billig ist. Doch ein komplett luftdichtes Gefäß, das wir bis oben mit der Elektrolytflüssigkeit auffüllen ist nicht einfach zu konstruieren, da die Elektroden und Rührer eine Verbindung nach außen brauchen. Außerdem soll die Flüssigkeit ausgetauscht werden können. Doch wie sonst kann man einen Oxidationsschutz gewährleisten?

Schließlich kamen wir auf die Idee eine Ölschicht über die Lösung zu geben. Das Öl kann sich nicht mit der wässrigen Elektrolytlösung vermischen, da es hydrophob ist, und schwimmt auf der Lösung, da es eine geringere Dichte besitzt. Doch das Öl wurde nach einigen Tagen ranzig, sodass wir eine andere Flüssigkeit verwenden mussten. Dabei entschieden wir uns für flüssiges Paraffin.

Der Vorteil des Paraffins im Gegensatz zum Öl ist, dass es nicht ranzig wird und damit über längere Zeit als Oxidationsschutz dienen kann.

6.2 Vorteile der neuen Redox-Flow-Zelle

Gegenüber der Redox-Flow-Zelle 1.0 hatten wir nun eine Zelle entwickelt, die auf der einen Seite **absolut dicht** ist, auf der anderen Seite mit Hilfe des **neuen Oxidationsschutzes** durch Paraffin sowie den **Verzicht** auf eine **Schlauchpumpe** eine **enorme Kosteneinsparung** erzielt hat. Außerdem sparen wir durch den Verzicht auf die Schlauchpumpe Energie ein und erhöhen somit die nutzbare Energie unserer Zelle. Trotz intensiver Recherche konnten wir

keine Erwähnung des Paraffins als Oxidationsschútz für die Redox-Flow-Zelle finden. Da wir überzeugt sind, dass der Oxidationsschutz durch das Paraffin in Kombination mit dem Verzicht auf eine Pumpe eine sehr gute Verbesserung der Redox-Flow-Zelle ist, haben wir uns diese Neuerung patentieren lassen. Durch unsere Verbesserung lässt sich eine Redox-Flow-Zelle deutlich preiswerter betreiben, da keine dauerhafte Schutzgasspülung mehr nötig ist.

6.3 Experimente zur Steigerung der Leistung

Um verschiedene Elektroden zu vergleichen, ließen wir weitere kleinere Zellen bauen. Sie sind innen 6cm hoch 4,5cm breit und 4cm tief. Da sie jedoch nicht komplett gefüllt werden können gehen wir davon aus, dass wir sie bis zu einem Füllstand von 4cm Höhe befüllen. Daraus ergibt sich eine aktive Membranfläche von 18cm^2 (siehe Abb. 6.3.1). Als Rührer verwendeten wir Glasröhrchen aus der Chemie-Sammlung, die wir auf ausrangierte PC-Lüfter klebten.

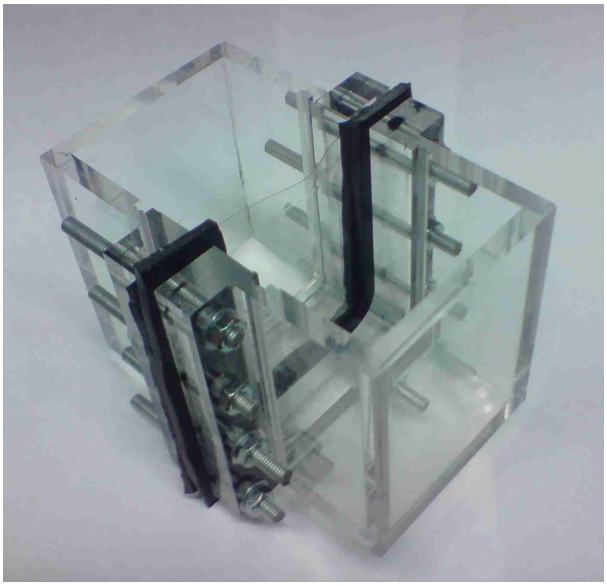


Abb. 6.3.1: Unsere kleine Versuchszelle

Um unsere Versuchszellen schneller zu laden und die Leistung, die aus der Zelle entnommen werden kann zu erhöhen, haben wir den Strom den die Zelle liefern kann erhöht. Der Strom ist abhängig von der Elektrodenoberfläche sowie der Membranfläche. Bei unserer Zelle erreichen wir einen Ladestrom von 10mA, die Membran hat nach Angaben aus dem Internet eine maximale Stromdichte von 80mA/cm². Das ergibt für unsere kleinen Versuchszellen einen maximalen Strom von etwa 1,5A! Daraus folgerten wir, dass die Erhöhung der Elektrodenoberfläche der erfolgsversprechendste Ansatz zur Steigerung der Leistung ist.
Dafür suchten wir nun nach besseren Grafitvliesen, die aber für eine Schule zu teuer waren; einige Quadratzentimeter kosten über 100€. Also suchten wir Materialien, die an der Schule vorhanden sind, eine große Grafitoberfläche haben und zudem noch säurefest sind. Dabei stießen wir auf Aktivkohle. Sie besteht aus Grafit und hat eine große innere Oberfläche. Damit war die Aktivkohle für uns ein Kandidat um unsere Elektrodenoberfläche zu vergrößern.

Doch natürlich muss der Vorteil zunächst experimentell nachgewiesen werden. Dazu benutzten wir zwei unserer Versuchszellen und statteten eine mit normalen Grafitplatten als

Elektroden aus. In die andere Zelle gaben wir 7g Aktivkohle pro Elektrode und kontaktierten diese mit zwei Grafitplatten. In beide Zellen gaben wir nun 100ml der Elektrolytlösung. Dann legten wir eine Ladesspannung von 1,7V an. Durch zwei Amperemeter konnten wir den Ladestrom jeder Zelle messen. Dabei hatte die Aktivkohlenzelle 160mA Ladestrom wohingegen die normale Zelle mit 10mA lud. Somit war unser **Experiment erfolgreich!**
Um herauszufinden welchen Einfluss unterschiedliche Mengen der Aktivkohle haben testeten wir weitere Zellen mit unterschiedlichen Mengen Aktivkohle (s. Abb.6.3.2).

Abb. 6.3.2: Verschiedene Ladeströme bei unterschiedlichen Mengen Aktivkohle

Doch als wir dann in eine Zelle mit frischer Aktivkohle die geladenen Elektrolyte gaben wurde das Vanadium(V) zu Vanadium(IV) reduziert. Doch was wurde oxidiert? Auf der Suche nach einer Antwort überlegten wir zunächst ob das Grafit oder andere Bestandteile der Lösung oxidiert wurden. Die Lösung enthält noch SO_4^{2-} - Ionen sowie Wasser und H^+ -Ionen. Von diesen Teilchen kann nichts durch das Vanadium oxidiert werden. Auch das Grafit erschien uns als zu stabil. Also fragten wir unsere Chemielehrerin nach Rat. Sie war der Meinung, dass Verunreinigungen der Aktivkohle für die Reaktion verantwortlich waren. Allerdings konnten wir die Aktivkohle selbst durch sehr starke Oxidationsmittel wie Kaliumpermanganat nicht „reinigen“.
Also mussten wir die Elektrodenoberfläche auf andere Art und Weise vergrößern.
Doch welches Material hat eine große Grafitoberfläche, ist preiswert und dazu noch säurebeständig? Bei unserer Suche fanden wir außer Aktivkohle und den bereits erwähnten teuren Grafitvliesen nichts. Also kamen wir zu den Elektrodenplatten zurück. Doch wie kann man die Oberfläche der Elektrodenplatten stark erhöhen? Natürlich kann man eine geringfügige Erhöhung der Oberfläche erreichen indem man die Platten mit Schmirgelpapier anraut. Allerdings kann damit keine deutliche Erhöhung der Leistung unserer Zelle erreicht werden. Nach einiger Überlegung kamen wir auf die Idee Bruchstückchen der Elektrodenplatten einzusetzen. Den Kontakt zu Elektrodenplatte stellen wir sicher indem wir den Bereich zwischen den Elektroden und der Membran mit den Bruchstücken auffüllen, sodass sie sich gegenseitig berühren.

Nun setzten wir eine Zelle mit diesen modifizierten Elektroden an. Zum Vergleich starteten wir zur selben Zeit eine zweite Zelle mit normalen Elektroden. Jetzt luden wir diese Zelle auf Am nächsten Morgen konnten wir in der modifizierten Zelle eine deutliche Gelbfärbung der Elektrolytlösung in der positiven Halbzelle erkennen. Auch in der negativen Halbzelle hatte sich die Farbe verändert (siehe Abb. 6.3.3). Als wir den Ladestrom maßen, stellten wir einen Strom im Mikroamperebereich fest.
So schnell hatten wir noch nie eine Zelle geladen!

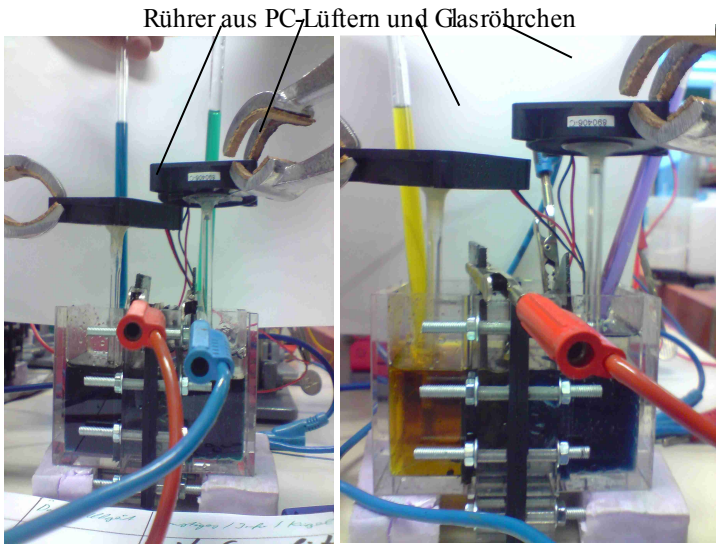
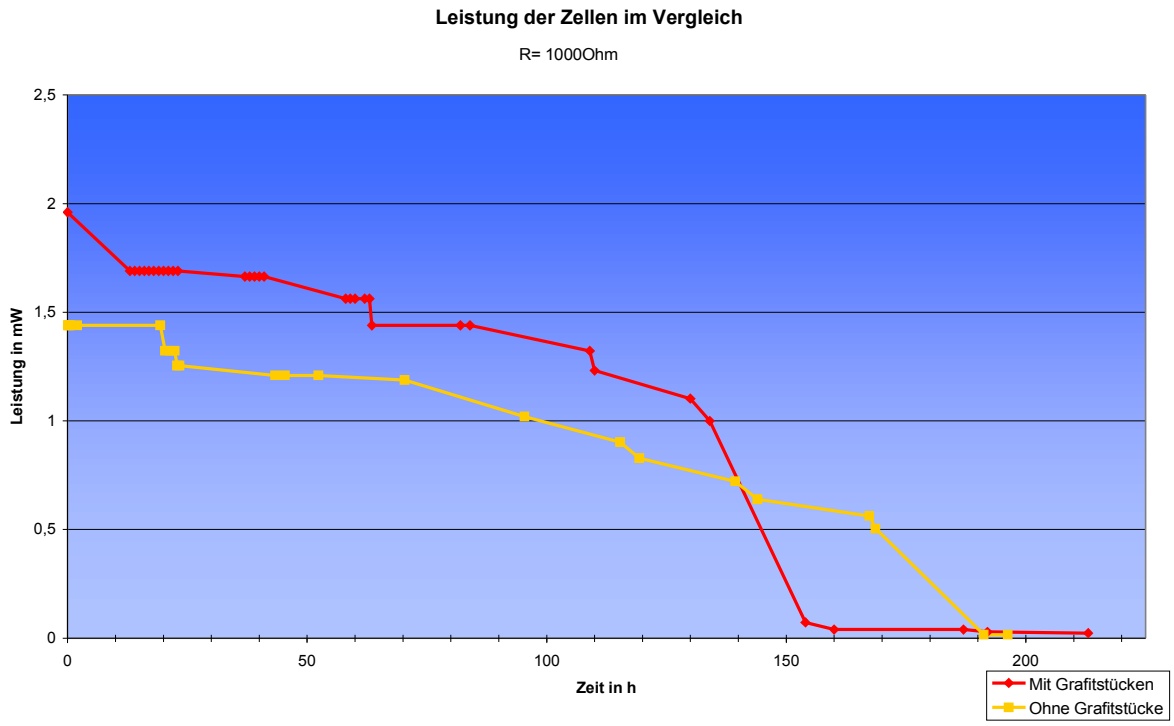


Abb. 6.3.3: unsere Versuchszelle; links vor dem Ladevorgang und rechts danach

Nach einem weiteren Tag war auch die unveränderte Zelle geladen.

Um nun zu ermitteln wie die Leistung einer so modifizierten Zelle im Vergleich zu einer Zelle mit den normalen Elektrodenplatten aus Grafit aussieht, stellten wir die nötigen Elektrolyte Vanadium(V) und Vanadium(II) her und füllten zwei Zellen mit je 50ml pro Halbzelle, davon wieder eine mit Grafitstücken und eine ohne. Nun entluden wir diese Zellen über einen Widerstand (R=1kΩ). Dieser Widerstand hat den Vorteil, dass der Betrag der gemessenen Spannung gleichzeitig der Betrag des Stroms in mA ist, der durch den Widerstand fließt (I=U/R).

6.4 Auswertung



Wie aus dem Diagramm (Abb.6.4.1) ersichtlich ist, liefen unsere Experimente über einen Zeitraum von etwa 200 Stunden. Die Anfangsleistung lag bei der modifizierten Zelle bei 1,96mW. Dies ist eine um 36% höhere Leistung als bei der Zelle mit den normalen Elektroden, die eine Anfangsleistung von 1,44mW aufweist. Im weiteren Verlauf bleibt die Leistung der modifizierten Zelle zunächst höher. Die Kurven laufen ca. 137 Stunden annähernd parallel mit einem leichten Leistungsabfall. Danach sinkt die Leistung der modifizierten Zelle innerhalb von 20 Stunden von 1mW auf 0,073mW. 34 Stunden später nimmt auch die Leistung der normalen Zelle von 0,5mW innerhalb von ca. 23 Stunden auf 0,016mW ab.
Dieses Ergebnis zeigt, dass die Modifizierung der Elektroden eine deutlich höhere Leistung mit sich bringt. Dadurch wird die Zelle natürlich schneller entladen. Dies kann man an dem früheren Leistungsabfall erkennen. Die relative Abnahme der Leistung liegt bei beiden Zellen in derselben Größenordnung.

6.5 Technische Daten unserer Zellen

Nun versuchten wir einige wichtige technische Daten unserer Redox-Flow-Zelle zu ermitteln. Zunächst ermittelten wir aus mehreren Entladeversuchen die Energiedichte. Dazu ermittelten wir die Fläche unter dem Graphen des P-t-Diagramms. Diese Fläche stellt die abgegebene Energie dar. Danach setzten wir diese Energie mit der Menge der von uns verwendeten Elektrolytlösung in Beziehung. Die Energiedichte ist aber direkt von der Menge an Vanadium abhängig. Also bezogen wir auch unsere Konzentration mit in diese Rechnung ein. So kamen wir auf eine Energiedichte von 9,3 Wh/mol Vanadium.
Unsere bisher höchste maximale Leistung liegt bei 50mW beim Entladen einer Zelle über einen 22Ohm Widerstand.

Nach einigen Lade- und Entlademessungen konnten wir einen Wirkungsgrad von 66% ermitteln. Dazu verglichen wir die Energie, die wir beim Aufladen in die Zelle hineinsteckten und die Energie, die beim Entladen freigesetzt wurde.
Bei diesen Versuchen trieben wir die Rührer mit einer kleinen Solarzelle an. Zudem ist im Entladevorgang der Rührer nicht zwingend erforderlich, da durch Konvektion eine ausreichende Bewegung der Flüssigkeiten gegeben ist.

6.6 Beispiele für die Leistung unserer Zelle

Um zu sehen was unsere Zelle leisten kann, testeten wir sie zunächst an kleinen Motoren mit Propellern. Diese liefen ohne Probleme (siehe Abb. 6.5.1). Danach wollten wir die Zelle vor größere Aufgaben stellen.
Wir versuchten ein Auto einer Carrerabahn mit der Zelle zu betreiben. Allerdings war dafür der Reibungswiderstand zu groß; der Motor lief mit der Zelle, aber leider nicht auf der Bahn. Als wir ein Modellboot fanden, versuchten wir dieses mit der Zelle anzutreiben. Und tatsächlich das Boot lief (siehe Abb. 6.5.2). Dies überraschte uns, da das Boot doch recht groß war (40cm lang, 14cm breit, über 1kg schwer und 2 cm Tiefgang). Damit haben wir eine sehr leistungsfähige Zelle gebaut.

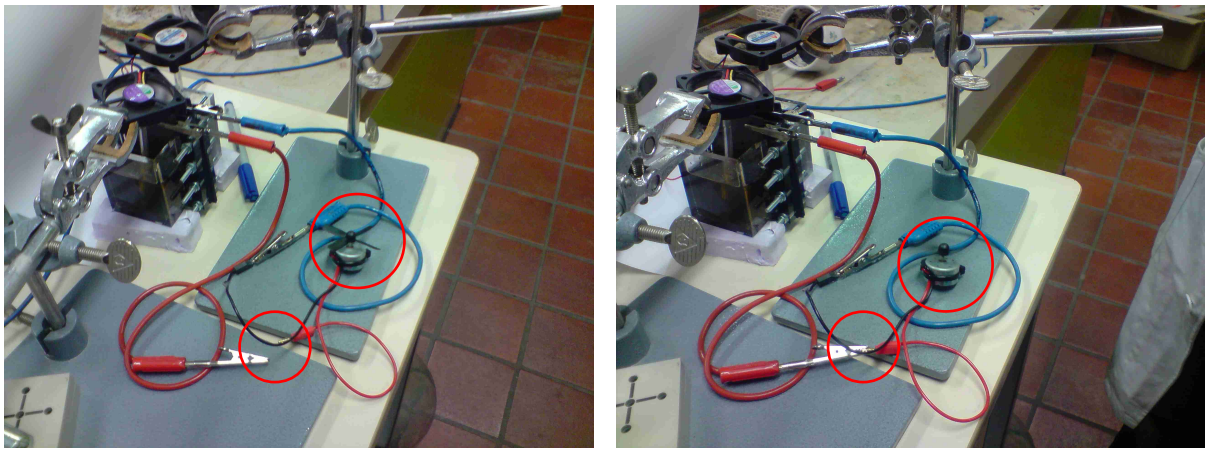


Abb. 6.6.1: unsere Zelle treibt einen Propeller an (rechts) links ist die Zelle nicht angeschlossen

Abb.6.6.2: Unser Boot rechts mit angeschlossener Zelle und links als Gesamtaufnahme

7. Ausblick

Wir konnten in dieser Arbeit die Redox-Flow-Zelle verbessern und haben einige Kernprobleme gelöst. So haben wir nun eine dichte Zelle, die außerdem ohne Schutzgasspülung auskommt. Dadurch konnten wir die Kosten eines Redox-Flow-Systems deutlich senken, da weder eine teure Pumpe noch eine Schutzgasspülung benötigt werden. Des Weiteren konnten wir auch die Leistung unserer Zelle deutlich steigern. Damit haben wir unser Ziel erreicht!

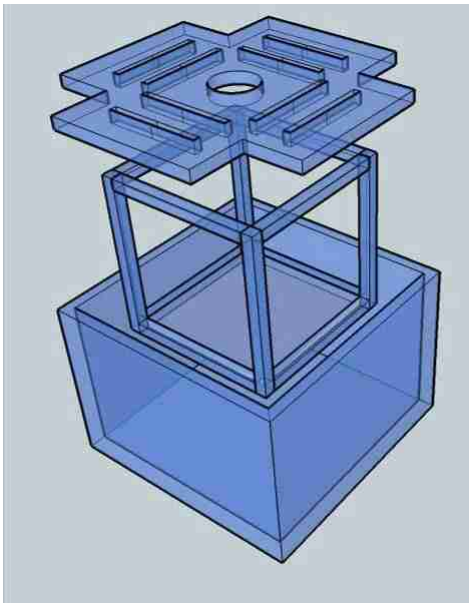


Abb. 7.1: Plan unserer neuen Zelle

Nachdem wir nun eine funktionstüchtige und leistungsfähige Zelle gebaut haben entwickeln wir nun eine Zelle, die die vierfache Leistung unserer bisherigen Versuchszelle haben soll, dabei jedoch kaum mehr Platz benötigt. Zudem soll diese Zelle keine Dichtungen benötigen. Dies möchten wir durch einen speziellen Aufbau gewährleisten (s Abb. 7.1). Die Tanks werden bei dieser Zelle ineinander gesetzt. Außen befindet sich nur ein Plexiglasquader. Somit gibt es keine Stellen mehr, die durch Gummis abgedichtet werden müssen. Im Innern befindet sich ein kleinerer Plexiglaswürfel, welcher einen Boden, jedoch keine Wände oder einen Deckel besitzt, sodass er an den vier Außenseiten mit der Nafionmembran beklebt werden kann. Die Elektroden werden durch Schlitze in einem Deckel membrannah fixiert, der außerdem noch Öffnungen für Rührer, bzw. für den Befüllungsprozess der Zelle aufweist. Da nun keine Elektrolytflüssigkeit nach außen austreten kann, da der äußere Plexiglasquader absolut dicht ist, wird die Sicherheit des Systems enorm gesteigert. Durch eine vierfache Membran- und Elektrodenfläche erhoffen wir uns eine viermal so große Leistung wie bei unseren kleinen Zellen.

Dies hört sich in der Theorie einfach an, wie wir jedoch wieder einmal feststellen mussten, ist der Unterschied zwischen Theorie und Praxis in der Praxis größer als in der Theorie. Die Membran, die wir auf die Außenseiten unserer Zelle geklebt haben, saugt sich mit Wasser (welches auch zum Teil in der Schwefelsäure vorhanden ist) voll. Dadurch ändert sich ihre Größe. Die Membran wird gewellt, wodurch die Klebestellen aufreißen. Daher versuchten wir durch einen weiteren Rahmen, welcher auf die Membranaußenseite geklebt wird einen Gegendruck zu erzeugen und so ein Aufreißen der Klebestellen zu verhindern. Wir sind zuversichtlich die Zelle mit diesen Rahmen abdichten zu können.

Dies klappt in der Praxis auch sehr gut, allerdings hatten wir durch die zusätzlich verwendeten Rahmen viel weniger Freiraum in der äußeren Halbzelle, als geplant, sodass wir Grafitstückchen, so wie es bei der Redox-Flow-Zelle 2.0 der Fall war, nicht zwischen Membran und Elektrode geben konnten, da die Elektroden durch die neuen Ausmaße nicht richtig durch Schlitze im Deckel fixiert werden konnten.

Da wir das erhoffte Ergebnis, eine Vervierfachung der Leistung aufgrund der oben genannten Probleme nicht erzielen konnten, überlegten wir uns, dass die Leistung mit der Anzahl der Teilchen, die zur Reaktion zur Verfügung stehen zusammenhängen muss. Somit dachten wir, bei einer Erhöhung der Konzentration sollten mehr Teilchen für die Reaktion zur Verfügung stehen und demnach sollte auch die Leistung der Zelle steigen. In einem Experiment,

steigerten wir die von uns verwendete Konzentration um 100% auf 0,4mol/l. Erste Ergebnisse zeugten von einer doppelt so hohen Leistung.

8. Sicherheit für den mobilen Einsatz

Die Redox-Flow-Zelle wird bisher nur im stationären Bereich angewendet. Allerdings besteht auch die Möglichkeit die Redox-Flow-Zelle für zukünftige Elektroautos zu verwenden. Ein zentrales Problem ist dabei die Sicherheit. Wenn es zu einem Unfall kommt, darf die Schwefelsäure mit dem Vanadium auf keinen Fall in die Umwelt gelangen. Um dies zu verhindern suchten wir ein Material, was die Flüssigkeit absorbiert. Ideal wäre es zudem, wenn sich dieses Material ausdehnt und somit das Leck im Tank wieder verschließt. Zunächst verwendeten wir Superabsorber wie sie auch in Windeln vorkommen für unsere Versuche. Allerdings können diese Superabsorber Lösungen mit hohem Salzgehalt nicht aufnehmen. Somit mussten wir ein anderes Material suchen.

Abb.8.1: Das Zeolith reagiert mit der Säure und bildet einen Stopfen

Dabei stießen wir auf Zeolith. Dieses Material kann großem Mengen Wasser aufnehmen. Es besteht aus AlO_4 und SiO_4 Tetraedern. An die negativ geladenen AlO_4 Tetraeder sind Alkali- oder Erdalkalimetallionen gebunden. Diese Kationen werden bei der Reaktion mit Schwefelsäure durch die H^+ Ionen der Säure ausgetauscht. Die (Erd-)Alkalimetallkationen bilden mit dem Sulfation die jeweiligen Salze wie zum Beispiel Kaliumsulfat. So bildet sich ein Feststoff, der das Leck abdichtet und auch in unseren Versuchen mit einem Trichter (s. Abb.8.1) über ca. fünf Stunden dicht blieb.

9. Danksagung

Abschließend möchten wir uns bei allen, die uns in unserer Jugend-forscht-Arbeit unterstützen recht herzlich bedanken, insbesondere bei unseren Betreuungslehrerin Frau Stein, sowie bei Herrn Hickmann von der Firma Eisenhuth für die Elektroden, der Firma Creaplex, die uns die Zellen nach unseren Plänen baute. Außerdem gilt unser Dank Herrn Dr. Martin Metzger von der Firma Lanxess. Desweiteren bedanken wir uns natürlich bei unseren Eltern, die uns in jeder Situation unterstützen und regelmäßig Taxi spielten.

10. Literatur- und Linkliste

[1] http://www.heise.de/tr/artikel/Lebensverlaengerung-fuer-den-Tankwart-821340.html

[2] http://de.wikipedia.org/wiki/Vanadium

[3] http://www.isea.rwth-aachen.de/eess/technology/redox-flow

[4] http://de.wikipedia.org/wiki/Redox-Flow-Zelle

[5] http://www.bayern-innovativ.de/ib/ site/documents/media/690a7c5e-c0ef-3e32-606c-6b892e8e5551.pdf/09_Jossen.pdf