



Marie Curie Gymnasium, Kirchzarten

Redox-Flow-Batterien als dezentralisierte Energiespeicher

Jugend Forscht 2023

Tom Adam (17), Greyson Wiesenack (16)

Projektbetreuer: Herr Wolff

Erarbeitungsort: Marie Curie Gymnasium Kirchzarten

Fachgebiet: Chemie

Wettbewerbssparte: Jugend Forscht

Projekttitel: Redox-Flow-Batterien: Strom wie Benzin speichern?

Bundesland: Baden-Württemberg

Jahr: 2023

KURZFASSUNG

Energie langfristig zu speichern, stellt bisherige Speichersysteme wie Lithium-Ionen-Akkumulatoren vor eine Herausforderung. Hier kommt die Technik der Redox-Flow-Batterien (RFB) ins Spiel. Da diese über das Auf- und Entladen von Elektrolytflüssigkeiten funktionieren, sind sie in der Lage den zugeführten Strom über eine sehr lange Zeit zu speichern mit nur marginaler Selbstentladung. Diese Art der Batterie könnte z.B. für die Speicherung von Solarstrom in Frage kommen, oder Spitzen im Stromnetz abfedern.

Unser Projekt befasst sich mit dem Entwerfen und Testen einer 3D-druckbaren RFB, welche kostengünstig zu bauen ist und das Konzept der Redox-Flow-Speichertechnologie für großräumige und private Anwendungen veranschaulicht.

INHALTSVERZEICHNIS

- 1. Einleitung**
- 2. Vorgehensweise**
 - 2.1 Redox-Reaktion**
 - 2.2 Aufbau der RFB**
 - 2.3 Steuerungs- und Messelektronik**
- 3. Ergebnisse**
- 4. Ergebnisdiskussion**
- 5. Zusammenfassung und Ausblick**
- 6. Danksagung**
- 7. Quellen- und Literaturverzeichnis**

I. EINLEITUNG

Erneuerbare energetische Lösungen für den Privathaushalt sind schon lange auf dem Markt. Moderne Systeme mit Warm-Wasserröhren, Wärmetauscher und Solarzellen können meist sogar mehr als genügend Energie für den Eigenbedarf liefern. Diese überschüssige Energie kann allerdings mit bisher verfügbaren Speichersystemen nur für maximal fünf bis sieben Tage in Solarbatterien gespeichert werden, aufgrund ihrer recht hohen Selbstentladung. Dies reicht möglicherweise aus, um eine Schlechtwetterfront zu überstehen, jedoch muss man in den Wintermonaten wieder auf den Strommix aus dem Netz zurückgreifen.

Wie viele Menschen in 2022, beschäftigte uns das Thema der Energie für Privathaushalte sehr. Die explodierenden Treibstoff- und Gaspreise und die dadurch stark erhöhten Heizkosten gaben uns einen Anlass, im Bereich der Energietechnik ein Projekt zu starten. Obgleich die Erzeugung von erneuerbarer Energie ein sehr wichtiger Bereich der Forschung ist, interessierten wir uns hauptsächlich für die Speicherungen der erzeugten Energie. Nach einiger Recherche stießen wir auf Redox-Flow-Batterien (RFBs), die als Schulexperiment gebaut und getestet werden können. Bedeutende Vorteile der RFBs sind, dass eine nur marginale Selbstentladung stattfindet, sodass sie in der Lage sind, elektrische Energie vom Sommer bis in den Winter ohne wesentlichen Energieverlust zu speichern. So hat die chemische Batterie das Potential, in naher Zukunft als großräumige Lösung für die Speicherung erneuerbarer Energien implementiert zu werden, da die Systeme eine lange Lebensdauer besitzen und die Chemikalien gut recyclebar sind.

Unser Ziel war es, ein RFB-System mit für den Schulunterricht zugelassenen Materialien zu bauen, welches kostengünstig skaliert werden kann und somit das Konzept der dezentralisierten Energiespeicherung mit RFBs veranschaulicht.

2. VORGEHENSWEISE

Da Batteriezellen für RFBs entweder nicht für Privatpersonen erhältlich sind, oder weit außerhalb unseres Projektbudgets lagen, entschieden wir uns eine eigene Zelle zu entwickeln. Diese sollte mit FDM-Druckern (Fused Deposition Modelling) günstig gedruckt werden können, sodass wir die chemische Resistenz der verschiedenen Polymere gegen die Elektrolytflüssigkeiten der Batterie testen können. Dabei werden PLA (Polylactic Acid), PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) und PP (Polypropylene) Samples für die Arbeit verwendet.

Aufgrund der im schulischen Raum vorliegenden Beschränkungen mussten wir auf Chemikalien zurückgreifen, welche für Schülerexperimente genehmigt sind. Da die Chemikalien für die populäre Vanadium-Redox-Flow-Batterie (VRFB) keinesfalls in Gymnasien zulässig sind, entschieden wir uns für einen Eisen-Chrom-Akkumulator (ICRFB), dessen Bau und Verwendung im schulischen Raum gestattet ist.

2.1 REDOX-REAKTION

Prinzip einer Redox-Flow-Batterie

Eine Redox-Flow-Batterie (RFB) basiert auf dem Prinzip der Galvanischen Zelle (auch Primärelement genannt). Solche nicht wiederaufladbaren Primärzellen sind vielen als Haushaltsbatterien bekannt. Sie besteht aus zwei Halbzellen, welche jeweils eine Elektrolytflüssigkeit eines Metalls und eine Elektrode aus demselben Metall enthalten. Die Halbzellen sind durch eine Salzbrücke oder ein Diaphragma getrennt. Wird nun Strom abgenommen, reagiert das Metall der unedleren Elektrode (Anode) wobei Metallionen und Elektronen entstehen. An der edlen Elektrode (Kathode) wird unter Verwendung der über Kabel weitergeleiteten Elektronen und den Metallionen in der Flüssigkeit, elementares Metall gebildet, welches sich auf der Elektrode abscheidet. Die Salzbrücke dient zum Ionen Austausch der beiden Flüssigkeiten, da sonst nach einiger Zeit keine positiv geladenen Ionen des unedleren Metalls gelöst werden könnten, da die Lösung sonst zu viele positive Ladungen und zu wenig negative Ladungen enthalten würde. Für die edlere Seite gilt dies insofern, dass zu viele negative Ladungen und zu wenig positive Ladungen vorhanden sind. Die Salzbrücke lässt also negativ geladene Ionen passieren, so dass die Lösungen sich elektrisch ausgleichen.

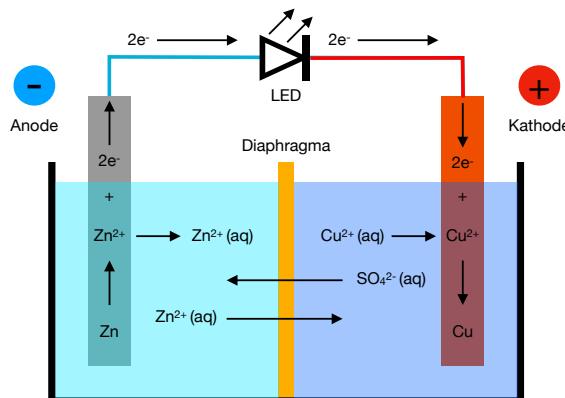


Fig 1: Aufbau und Funktionsweise eines Galvanischen Elements

Neben den einfachen Galvanischen Elementen (Primärzellen), gibt es auch, die wiederaufladbaren Sekundärzellen. In diesen sind die ablaufenden Reaktionen reversibel. Redox-Flow-Batterien sind besondere Sekundärzellen, da die für die Reaktionen genutzten Metalle im oxidierten und im reduzierten Zustand in Wasser löslich sind. Für die Anwendung bedeutet das, dass es sich bei beiden Stoffen in beiden Zuständen um Elektrolytflüssigkeiten handelt. Die zur Reaktion verwendeten Metalle müssen also jeweils in unterschiedlichen Oxidationszuständen vorliegen. Die Elektroden der RFB dienen lediglich zum Strom abführen und nehmen nicht an den Reaktionen teil. Bei der „All-Vanadium-Batterie“ wird z.B. in beiden Halbzellen Vanadium verwendet, da dieses in vielen verschiedenen Oxidationszuständen vorliegen kann.

Die von uns verwendete Redox-Flow-Batterie (RFB) verwendet als Elektrolyte $\text{Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+}//\text{Cr}^{3+},\text{Cr}^{2+}$. Sie sind im stark salzauren Milieu gelöst. Ein weiterer Unterschied der RFB gegenüber herkömmlichen Batterien ist, dass die Elektrolytflüssigkeiten nicht durch eine Salzbrücke oder ein herkömmliches Diaphragma getrennt sind, sondern durch eine Protonen durchlässige Membran. Der Ladungsausgleich der Flüssigkeiten findet also durch den Austausch von Wasserstoffionen der Salzsäurelösung statt.

Da diese Batterie rein auf Flüssigkeiten basiert, ist ihre Kapazität leicht durch das Anschließen von Tanks und den dazugehörigen Pumpen zu erhöhen.

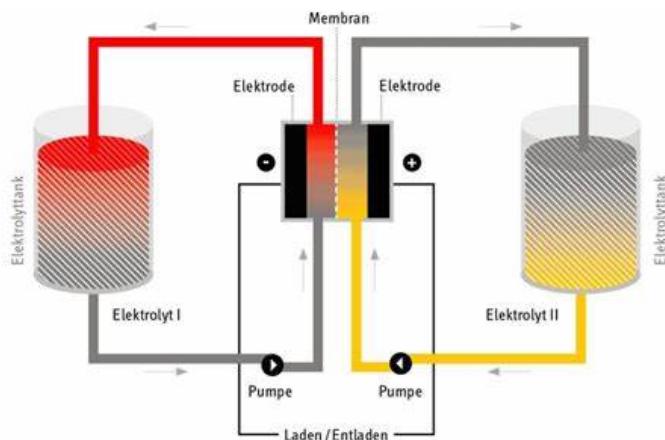


Fig 2: Aufbau einer Redox-Flow-Batterie

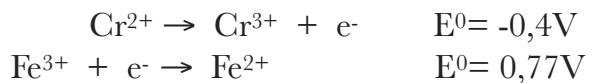
Die Chemische Funktionsweise unserer Eisen-Chrom-Redox-Flow-Batterie

Wir haben als Elektrolyte je eine 1-molare FeCl_2 Lösung und eine 1-molare CrCl_3 Lösung in 1-molarer Salzsäure-Lösung (HCl_{aq}) verwendet. Die Funktionsweise einer RFB lässt sich in zwei Zustände untergliedern: das Aufladen und das Entladen.

Entladung:

Bei dem Entladen wird das Cr^{2+} welches sich in der anionischen Halbzelle befindet zu Cr^{3+} oxidiert. Die freiwerdenden Elektronen werden an der Elektrode abgenommen

und erzeugen den Stromfluss. In der kationischen Halbzelle nimmt das Fe³⁺ Elektronen über das Kabel auf und reduziert zu Fe²⁺.

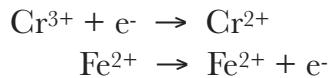


Die Leerlaufspannung (OVC) berechnet sich entsprechend zu:

$$\Delta E^0 = E_{(Fe2+,Fe3+)}^0 - E_{(Cr3+,Cr2+)}^0 = 0,77V + 0,4V = 1.17V$$

Aufladung:

Beim Aufladen finden die Entladereaktionen umgekehrt statt. Das heißt, dass das Cr³⁺ zu Cr²⁺ reduziert und Fe²⁺ zu Fe³⁺ oxidiert wird.



Da sich in einer Chrom-Chlor-Elektrolytlösung jedoch Chrom-Chlor-Komplexe bilden, lauten die tatsächlichen Reaktionsgleichungen für die Anode:

Entladung:



Aufladung:



Die Farben der Komplexe geben auch eine gute Auskunft über den Ladezustand der Batterie, da sie die Elektrolytflüssigkeit einfärben. Im geladenen Zustand ist sie blau-grün, im entladenen grün.

Auch die Eisen-Elektrolyt Flüssigkeit zeigt eine Farbveränderung. Im geladenen Zustand ist sie rot bräunlich, im entladenen gelblich trüb.

Herstellung der Elektrolytflüssigkeiten

1. Berechnung der Stoffmengen (Für 500ml jeder Lösung):

- Gegeben:
 - Molare Masse von FeCl₂ * 4H₂O = 198,7 g/mol
 - Molare Masse von CrCl₃ * 6H₂O = 266,35 g/mol
 - Molare Masse von HCl = 36,45 g/mol

- Gesucht:

- 1) 500ml 1-molare FeCl_2 Lösung
- 2) 500ml 1-molare CrCl_3 in 1-molarer Salzsäure-Lösung

- Lösung:

- 1) Stoffmenge $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$:

$$198,7\text{g} \cdot 0,5 \approx 99,35\text{g}$$

in 500ml H_2O

- 2) Stoffmenge $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$:

$$266,35\text{g} \cdot 0,5 \approx 133,18\text{g}$$

Stoffmenge HCl:

$$36,45\text{g} \cdot 0,5 \approx 18,23\text{g}$$

in 500ml H_2O

2. Abwiegen/Abmessen der Chemikalien:

- 99,35g $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [in 250ml Becherglas]
- 133,18g $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [in 250ml Becherglas]
- 500ml H_2O [in großem Erlenmeyerkolben]
- 500ml 1-molare HCl-Lösung [in großem Erlenmeyerkolben]

3. Herstellen der Lösungen:

- 1-molare FeCl_2 Lösung: Abgemessene $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Stoffmenge zum Erlenmeyerkolben mit 500ml Wasser hinzugeben
- 1-molare CrCl_3 Lösung: Abgemessene $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Stoffmenge zum Erlenmeyerkolben mit 500ml 1-molare HCl-Lösung hinzugeben

2.2 AUFBAU UNSERER RFB

Grundlegender Aufbau

Die RFB Zelle besteht im Wesentlichen aus nur vier verschiedenen Komponenten: (1) Proton-Austausch-Membran (2) Zellwände, (3) Dichtungen/Dichtungsringe, (4) Elektroden.

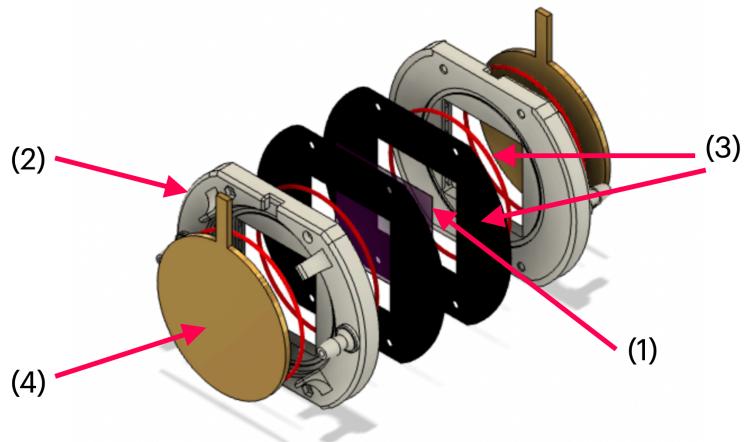


Fig 3: Explosionszeichnung einer Flow-Through RFB

Im Betrieb werden beide Elektrolytflüssigkeiten durch die Zelle gepumpt, entlang der Membran. Dieser Aufbau einer RFB wird als sog. “Flow-Through-Cell” bezeichnet. Sie haben im Vergleich mit anderen RFB-Zellen den Vorteil, dass ihr Aufbau sehr simpel und so weniger anfällig für Pannen ist.

Entwicklung der 3D-druckbaren Zellwände

Beim Entwurf der Zelle bezogen wir uns vorerst auf ein bereits vorhandenes Design, welches im Rahmen des wissenschaftlichen Artikels “An open-source solution for 3D-printed redox flow battery test cells”¹ zur Verfügung stand. Diese haben wir im CAD-Programm (Computer Aided Design) Fusion 360 leicht an unsere Elektrode angepasst und auf einem Ultimaker 2+ als Testmodell ausgedruckt. Beim Anschließen der Zelle an einen Test-Kreislauf, war gut erkennbar, dass das Design die Flüssigkeit gleichmäßig über die aktive Zone verteilt. Wir bemerkten jedoch auch, dass es mehrere Problemzonen bei diesem Modell gab, wie z.B., dass die Schläuche auf den 3D gedruckten Schlauchtüllen nie vollständig dicht saßen und dass die Batterie aufgrund der vertikalen Positionierung der Elektrolytein- und Ausgänge, die Zelle nicht leicht gestapelt werden kann. Dies würde die Modularität des Systems stark einschränken, wenn sich ein System auf jeweils eine Zelle beschränken müsste.



Fig 4: Test-Version

Diese Probleme haben wir beim Entwerfen unseres eigenen Designs adressiert, in dem wir die Anschlüsse für die Elektrolyte auf die Seiten der Zellwände verlegten und diese horizontal herausragen. Auch experimentierten wir mit dem Schlauchtüllendesign, sodass es gut mit FDM-Druckern druckbar war, aber dennoch gut mit den Schläuchen abdichtete. Auch fügten wir Montagelöcher für M3-Schrauben hinzu, welche die Abdichtung zwischen den Zellhälften verbessern soll. Beim Testen mit dem Probe-Kreislauf ergaben sich jedoch ähnliche Resultate wie bei der Vorgängerzelle. Insgesamt dichtete die Zelle v.a. zwischen den Zellhälften besser ab, jedoch waren immer noch kleine undichte Stellen an den Schlauchtüllen zu erkennen, welche aufgrund der 0.1mm hohen Schichten des 3D-drucks entstanden.

Die darauffolgende Version der Zelle verwendete daher Schlauchtüllen aus messing, welche ein M8-Gewinde besitzen, sodass sie in den Druck geschraubt werden können. Die Zellwand wurde so entworfen, dass zwischen Druck und Schlauchtülle ein Dichtungsring Platz hat, der beim Festziehen der Tüllen gegen die Oberfläche des 3D-Drucks gedrückt wird, um jegliche potentielle Lücken abzudichten. Darüberhinaus verdoppelten wir die Anzahl der Montage Löcher, welche nun die aktive Zone „einrahmen“, sodass die Zelle möglichst gleichmäßig beim festziehen belastet wird. Dieses Design erwies sich als das dichteste der getesteten Modelle, da wir bei über 1h Betriebszeit im Test-Kreislauf keinen Flüssigkeitsaustritt an der Zelle beobachten konnten.

Protonenaustauschmembran

Die Protonenaustauschmembran (PEM) sind semipermeable, aus einem Ionomer hergestellte Membranen, welche den Ladungsausgleich zwischen den Elektrolyten über das Durch-diffundieren von H^+ -Ionen bei der Auf- und Entladung ermöglichen. Wir verwendeten für unseren Aufbau eine Frontcell™ PFSA 130 Membran aus Teflon (PTFE Copolymer) aufgrund seiner hohen chemischen Resistenz gegenüber Säuren.



Weitere Bestandteile der RFB

Als Elektrodenmaterial verwendeten wir für alle Versionen 3mm-starke Messingplatten die wir auf einer CNC-Fräse (Computer numerical control) rund frästen. 1mm dicke Gummimatten dienten zusammen mit 72x2mm O-Rings als Dichtungsmateriale, aufgrund ihrer hohen chemischen Beständigkeit.

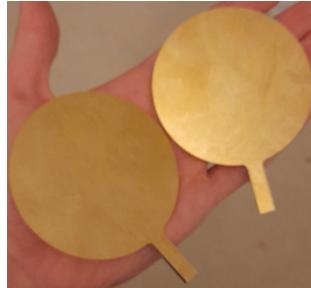


Fig 9: CNC-gefräste Messinglektroden

Bau

Beim Zusammenbau der Zelle wird die Protonenmembran zwischen zwei Dichtungsmatten mit 50x50mm quadratischem Ausschnitt gelegt. Diese wird zwischen den beiden 3D-gedruckten Zellhälften eingebaut und mit M3x25 Schrauben aus Edelstahl, welche direkt in die Zelle geschraubt werden, eingespannt. Auf die Außenseiten der Zellhälften wird jeweils ein 72x2 Dichtungsring die die dafür vorgesehene Vertiefung gelegt und anschließend eine Runde Dichtungsmatte mit quadratischem Ausschnitt darauf. Zuletzt werden die Messinglektroden auf das äußere Dichtungsmaterial gelegt und von beiden Seiten mit einer Klemmzwinge festgezogen.

2.3 STEUERUNGS- UND MESSELEKTRONIK

Steuerungselektronik

Die hauptsächliche Aufgabe der Steuerungselektronik ist es, die Durchflussgeschwindigkeit der Elektrolyte, dh. die Geschwindigkeit der Pumpenmotoren zu regulieren. Dies geschieht bei unserem Aufbau digital, dh. die Geschwindigkeit wird auf einem Mikrocontroller (1) als ganze Zahl zwischen 0 (=Aus) und 100 (=Maximale Leistung) aufgefasst und anschließend in eine PWM-Frequenz (Pulse Width Modulation) umgerechnet und an die Motorsteuerung weitergegeben. Die digitale Geschwindigkeit wird mit einem 10k Ω Drehpotentiometer (2) eingestellt und auf einem 16x2 LCD-Display (3) als Prozent der maximalen Motorleistung ausgegeben. Als Pumpen verwendeten wir zwei 6V peristaltische Pumpen (4) mit einem angegebenen Durchfluss von 60ml/min bei voller Leistung. Bei diesen wird die gepumpte Flüssigkeit durch das Zusammendrücken eines Schlauchs gepumpt, welches sich für unsere Anwendung anbot, da die Elektrolyte nicht entweichen können und die Pumpe diese nicht kontaminiert. Zum Betrieb des Pump-Arrays verbauten wir L289N-Motorsteuerung (5), welche mit einer Eingangsspannung von 12V (6) sowohl die Pumpen, als auch den Mikrocontroller und das LCD-Display betreibt.

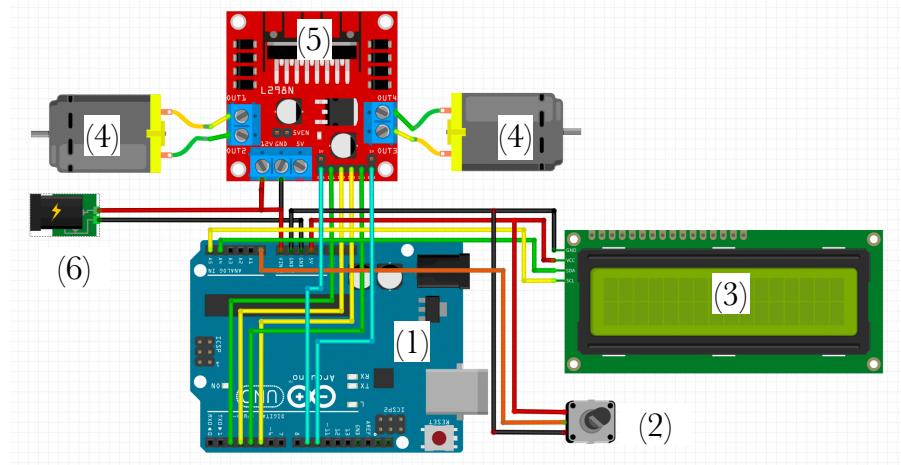


Fig 10: Schematische Darstellung der Steuerungselektronik in Fritzing

Die Batterie wird mithilfe einer Gleichstromquelle an seinen Elektroden aufgeladen. Dabei müssen die Elektrolyte mit ca. 11ml/min (Referenziert aus¹) durch die Zelle fließen um einen effektiven Ladevorgang zu garantieren. Dies entspricht 18-20% der maximalen Pumpleistung.

Die beschriebene Elektronik ist in einer maßangefertigten Verkleidung verbaut, welches in Fusion 360 entworfen wurde. Dieses besteht aus einem Gerüst aus 10x10mm Aluminiumextrusionen und 3D-gedruckten Seitenwänden mit Ein- und Ausgängen für die peristaltischen Pumpen und Montageaufnahmen für alle elektronischen Bauteile. Die Apparatur wurde so konzipiert, sodass sie sowohl modular und leicht erweiterbar, als auch kostengünstig zu bauen ist.



Fig 11: Verkleidung der Steuerungselektronik

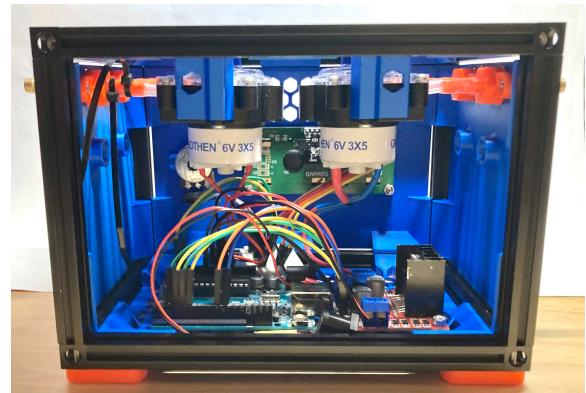


Fig 12: Verkabelung der elektronischen Bauteile

Messelektronik

Die Messelektronik besteht aus einem Spannungsmessgerät, welches die an den Elektroden vorliegende Spannung misst. Dieses wird in regelmäßigen Zeitabständen ausgelesen, bzw. seine Messdaten über ein iPad in einen Plotter eingetragen, welches das Zeit-Spannung-Diagramm der RFB aufzeichnet.

3. ERGEBNISSE

Aufgrund langer Lieferverzögerungen und einem dadurch sehr eingeschränkten Zeitfenster zum Experimentieren, konnte bis zur Veröffentlichung dieser Version der schriftlichen Ausarbeitung lediglich die Redox-Flow-Batteriezelle aus dem PLA-Polymer getestet werden. Bis zum Wettbewerb werden die fehlenden Messdaten ergänzt und weitere Ergebnisse im Rahmen der Präsentation vorgestellt.

Zunächst wurde die Batterie mit den Elektrolyten gefüllt und ein 20-minütiger Ladevorgang unternommen. Bei diesem wurden mit 16-18% Motorleistung die Elektrolyte durch die Zelle gepumpt, an dessen Elektroden eine Ladespannung von 1.17V angeschlossen war.

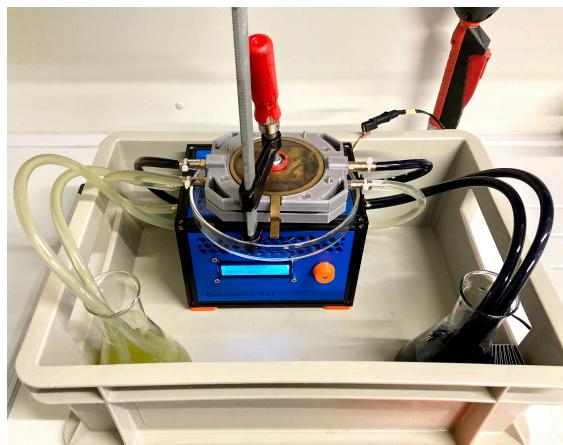


Fig 13: Befüllung der Zelle



Fig 14: Ladevorgang bei 1,17V

Nach diesem konnte an den Elektroden der RFB eine Leerlaufspannung (OVC) von 0,5V mit einem Multimeter gemessen werden, welche sich jedoch bald auf 0,4V stabilisierte.



Fig 15: Abmessen einer OVC von 0,4V

Die 3D-gedruckte Redox-Flow-Batterie-Zelle, wies im Experiment mit den Elektrolytflüssigkeiten weder Flüssigkeitsaustritt noch Kontamination der Elektrolyte auf. Dennoch wurde das Experiment, wie in Fig x-x zu sehen, auf einer Unterlage in einem säureresistenten Behälter, mit einer weiteren Auffangschale unter der Zelle selbst durchgeführt.

4. ERGEBNISDISKUSSION

Unsere Zelle lieferte bereits bei geringer Ladung, die an der kaum vorhandenen Verfärbung der Elektrolyte zu erkennen ist, eine konstante Spannung. Von dieser stabilen experimentellen Grundlage ausgehend, sind wir gespannt, welche Spannung die Batterie bei längerem Ladevorgang liefern kann und welche Parameter dazu noch optimiert werden können. Auch das Konzept 3D-gedruckter Zellwände wurde durch dieses Experiment, unserer Ansicht nach, validiert. Aus dem Versuchsaufbau samt Pump-Elektronik ist keine Flüssigkeit entwichen und die Zelle ist gegenüber der 1-molaren Salzsäure-Lösung resistent geblieben. Dies hatten wir nicht im ersten Anlauf des Versuchs mit der PLA-Zellwand erwartet.

Mit diesem erfolgreichen Test unserer selbstgebauten Redox-Flow-Batterie, sehen wir das Konzept der dezentralisierten Energiespeicherung mit RFBs als vielversprechende Technik für Fortschritt in unserer Energiewende. Zwar ist die Energiedichte von Redox-Flow-Batterien (noch) nicht mit denen von Li-Ion und LiPo Zellen zu vergleichen, jedoch bieten sie wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen Akkumulatoren. Beispielsweise findet in RFBs kaum Selbstentladung statt, da die Elektrolyte räumlich getrennt werden können, sodass in ihnen für lange Zeiträume Strom wie Treibstoffe gelagert werden können. Zudem handelt es sich bei Flow-Batterien um eine sehr umweltfreundliche Speicherlösung, da sie zum Einen um ein Vielfaches langlebiger sind als herkömmliche Zellen mit ca. 13000 Ladezyklen im Vergleich zu 4000 bei Li-Ion, zum Anderen die Elektrolytflüssigkeiten mit Chemikalien hergestellt werden können, von denen reichlich vorhanden ist. Dies steht ganz im Gegensatz zu den Lithiumsalzen, die für Lithium-Batterien häufig umweltschädigend unter inhumanen Bedingungen gefördert werden müssen. Des Weiteren, können die Chemikalien mit herkömmlichen Methoden recycled werden, sodass keine schwerwiederverwertbaren Abfälle entstehen, anders als bei Lithium-Batterien.

Mögliche Einsatzbereiche für Flow-Batterien sind nicht nur stationäre Anwendungen sowie z.B. als "Pufferspeicher" für Windräder oder als zusätzlicher Speicher im Energienetz Zur Entlastung bei Belastungsspitzen, sondern finden sich auch in der Automobilbranche. Es wurde in mehreren Forschungsprojekten gezeigt, dass die Verwendung von Redox-Flow-Batterien in elektrischen Fahrzeugen das Stromnetz sehr entlasten würde, da die elektrische Energie in Form von der Elektrolytflüssigkeiten auf Vorrat gelagert und später getankt werden könnte. Es ist so erkennbar, dass die Anwendungsmöglichkeiten von Flow-Batterien extrem vielseitig sind, aufgrund der Modularität des Aufbaus der Akkumulatoren. So kann beispielsweise die maximale Entladungsgeschwindigkeit oder Entladungsspannung einfach durch das Hinzufügen weiterer Flow-Zellen und die jeweilige Anwendung angepasst werden. Auch die Speicherkapazität kann über zusätzliche Elektrolytflüssigkeiten erweitert werden. So scheint es uns, dass Redox-Flow-Batterien eine versatile Lösung für die Speicherung von elektrischem Strom bieten, weshalb wir hoffen zukünftig eine Weiterentwicklung in diesem Bereich der Speichertechnologien zu beobachten.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Redox-Flow-Batterien: Strom wie Benzin Speichern? Wir glauben, dass die Antwort auf diese Frage eindeutig “JA” lauten sollte. Unser Projekt zeigte nicht nur dass die Technologie und die Chemie für solche Batterien schon da ist, sondern auch, dass sie sehr zugänglich ist. Mit unserer selbstgebauten Flow-Zelle hoffen wir, die Einstiegshürde für den Bau chemischer Batterien im Schulunterricht zu senken und Begeisterung für dieses Experiment zu schaffen. Auch demonstrierten wir die Modularität der Flow-Batterien, welche diese zu einer sehr attraktiven Lösung für maßgefertigte Stromspeicher machen.

Bis zum Wettbewerb werden wir noch Messkurven für die Entwicklung der Leerlaufspannung, sowie fuhr die des Verhaltens der Batterie unter Belastung mit einem Ohm'schen Widerstand (DC Motor, LED, etc.). Zudem planen wir in einem längerfristigen Test (ca. 24-48h) die Chemische Resistenz der 3D-Druck-Polymeren zu analysieren.

Des Weiteren befindet sich bereits eine Version 2.4 und eine Version 3.0 der Zelle in Entwicklung, welche Probleme, wie das Verformen der PE-Membran oder die Verwendung der Klemmzwinge für den Zusammenbau der Zelle. Unser nächstes Ziel ist die Optimierung der Zelle auf eine höhere Auf- und Entladegeschwindigkeit, sowie auf eine höhere Ausgangsspannung. Dabei wollen wir die Auswirkungen von Graphitfilzelektroden in einer Eisen-Chrom-RFB erforschen und dokumentieren.

6. DANKSAGUNG

Wir bedanken uns herzlich bei unseren Fachlehrern am MCG: Herrn Wolff, Frau Steffens und Herrn Poppe, die uns zu diesem Projekt inspirierten und die Durchführung dieser Experimente in der Schule ermöglichen, bei dem Freiburg-Seminar für seine großzügige Unterstützung unserer Forschungsarbeit, durch die Übernahme der Kosten der PE-Membran und dem Spendenpool BW, der uns mit der Finanzierung eines neuen 3D-Druckers es ermöglichte, mit neuen Polymeren zu arbeiten und experimentieren.

7. QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

- (1) The QUILL Research Centre, School of Chemistry and Chemical Engineering, Queen's University Belfast; School of Mechanical and Aerospace Engineering, Queen's University Belfast; Electrochemical Innovation Laboratory, Department of Chemical Engineering, University College London; Shell Global Solutions International B.V., Grasweg 31, 1031 HW Amsterdam; "An open-source platform for 3D-printed redox flow battery test cells"; <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/se/dlse01851e>; besucht am 03.12.2022
- (2) Thorsten Hickmann; "Eisen-Chorm-Redox-Flow-Batterie für Schülerversuche"; <https://www.researchgate.net/publication/328023249> Eisen-Chrom-Redox-Flow-Batterie für Schülerversuche; besucht am 21.05.2022
- (3) Fig 8: Frontcell™ PFSA 130 Membran, Produktbild; <https://shop.frontis-energy.com/frontcell-tm-pfsa-130-membran>; besucht am 15.01.2023
- (4) Fig 2: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Redox-Flow-Batterie; <https://bing.com/search?q=OIPHgy731r6BMEc2eJd7-67vwHaFF+474x325>; besucht am 10.01.2023
- (5) Informationen über Anzahl der Ladezyklen einer Redox-Flow-Batterie; <https://www.youtube.com/watch?v=l3hnKL-oTDo>; besucht am 01.01.2023

Alle weiteren Graphiken und Bilder: © Greyson Wiesenack 2023