

Rosenberg, Dominique; Busker, Maike; Jansen, Walter

Modellversuche zu Redox-Flow-Batteries

formal überarbeitete Version der Originalveröffentlichung in:

formally revised edition of the original source in:

Chemie konkret : CHEMKON 26 (2019) 5, S. 203-210



Bitte verwenden Sie in der Quellenangabe folgende URN oder DOI /

Please use the following URN or DOI for reference:

urn:nbn:de:0111-pedocs-247089

10.25656/01:24708

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-247089>

<https://doi.org/10.25656/01:24708>

Nutzungsbedingungen

Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Die Nutzung stellt keine Übertragung des Eigentumsrechts an diesem Dokument dar und gilt vorbehaltlich der folgenden Einschränkungen: Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document.

This document is solely intended for your personal, non-commercial use. Use of this document does not include any transfer of property rights and it is conditional to the following limitations: All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

Kontakt / Contact:

peDOCS
DIPF | Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation
Informationszentrum (IZ) Bildung
E-Mail: pedocs@dipf.de
Internet: www.pedocs.de

Mitglied der


Leibniz-Gemeinschaft

Modellversuche zu Redox-Flow-Batteries

D. Rosenberg, M. Busker, W. Jansen

Redox-Flow-Batteries werden derzeit als eine mögliche Technologie zur Energiespeicherung im Rahmen der Energiewende diskutiert. Das Prinzip kann mit einfachen Modellversuchen demonstriert werden.

Stichwörter: Redox-Flow-Batteries, Energiewende, organische Batteriesysteme

Einleitung

Die Speicherung von Energie ist im Rahmen der Energiewende durch einen stetig wachsenden Anteil an Strom aus regenerativen Energien an der gesamten Stromproduktion von besonderer Bedeutung. Strom der mittels Windkraft oder Solaranlagen erzeugt wird, lässt sich häufig nicht mit den Zeiten, in denen der Stromverbrauch am höchsten ist, vereinbaren. Um in Zeiten einer hohen Stromerzeugung bei gleichzeitig niedrigem Stromverbrauch die überschüssige Energie speichern zu können, ist die Errichtung entsprechender Energiespeichersysteme notwendig [1]. Eine aktuell viel diskutierte Möglichkeit stellen sogenannte Redox-Flow-Batterien dar, die aufgrund ihrer Konstruktionsweise eine umfangreiche Energiespeicherung versprechen. Im Sinne des modernen naturwissenschaftlichen Unterrichts ist es nötig, solche Diskurse Schülerinnen und Schüler zugänglich zu machen. In diesem Artikel soll daher das Prinzip von Redox-Flow-Batterien beschrieben und Modellexperimente präsentiert werden, mit denen das Prinzip dieser elektrochemischen Zellen für Schülerinnen und Schüler veranschaulicht werden kann.

Funktionsweise von Redox-Flow-Batteries

Redox-Flow-Batterien fußen auf dem Prinzip einer galvanischen Zelle. Beim Entladen der Batterie wird am Minuspol eine Substanz oxidiert; am Pluspol eine andere Substanz reduziert. Wesentlich für die Funktion einer Flow-Batterie ist, dass die elektrochemisch wirksamen Substanzen sowohl in der reduzierten wie auch in der oxidierten Form im Elektrolyten gelöst sind. Auf diese Weise können die Elektroden gleichmäßig mit dem Elektrolyten umspült werden und so z.B. an der Anode die reduzierte Form der elektrochemisch aktiven Substanz der Batterie gleichmäßig zugeführt und die oxidierte Form abtransportiert werden. Für beide Halbzellen ist in einer Flow-Zelle ein Kreislauf installiert, in dem von einem Tank der jeweilige Elektrolyt der einzelnen Halbzelle zugeführt wird. Nach dem der Elektrolyt über die Elektrodenoberfläche geleitet wurde, wird dieser von der Halbzelle wieder dem Tank zugeführt (vgl. Abb. 1). Auf diese Weise kann eine Flow-Zelle bei Stromentnahme über einen langen Zeitraum mit stabiler Spannung betrieben werden [2,3].

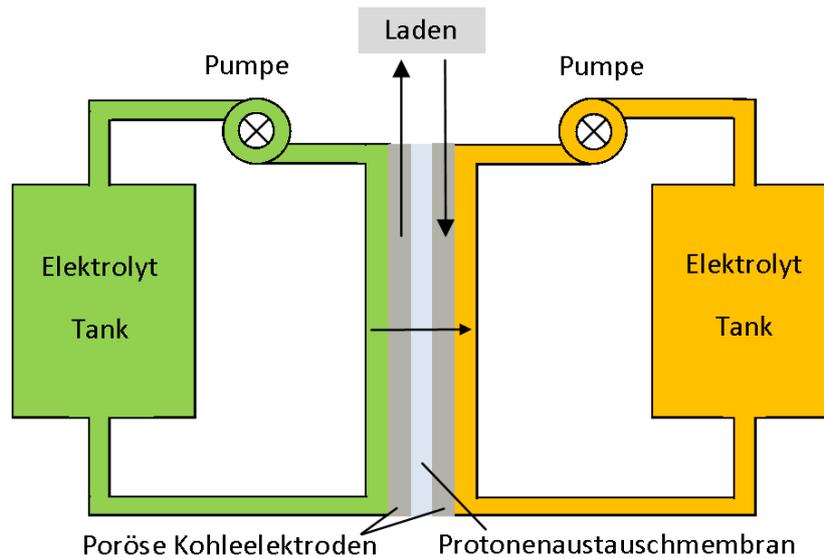
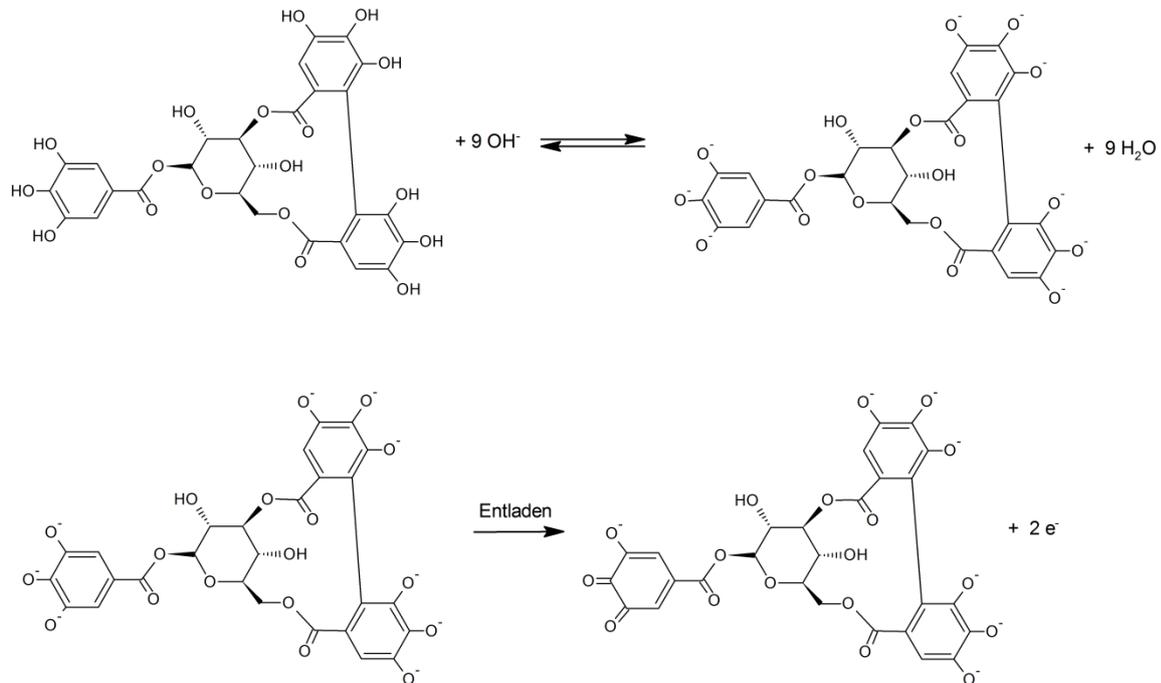


Abb. 1: Aufbau einer Redox-Flow-Batterie

Zu den Anforderungen an elektrochemisch aktive Substanzen, die in Flow-Batterien eingesetzt werden können, gehören neben einer guten Löslichkeit eine Reversibilität der Reduktion bzw. Oxidation und eine hohe Zyklenstabilität, so dass auch nach zahlreichen Lade- und Entladevorgängen die Batterie weiterhin betrieben werden kann. Die NASA untersuchte bereits in den 1970er Jahren den Einsatz von Metall-Ionen-Paaren in Flow-Batterien. Es wurde u.a. das Redoxpaar $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ in der einen Halbzelle und das Redoxpaar $\text{Cr}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$ in der anderen Halbzelle eingesetzt. Ebenso wurden von der NASA die Redoxpaare $\text{V}^{2+}/\text{V}^{3+}$ und $\text{VO}^{2+}/\text{VO}_2^+$ erfolgreich erprobt [4,5]. Redox-Flow-Zellen, die diese Vanadium-Verbindungen einsetzen, stehen heutzutage vor der großtechnischen Umsetzung. Eine erste Anlage befindet sich zum Beispiel zur Speicherung von Strom aus Windkraftanlagen an der Westküste Schleswig-Holsteins in der Erprobung [6-8]. Redox-Systeme auf Basis von Chrom- und Vanadium-Verbindungen können aufgrund ihrer Einstufung als kanzerogene und mutagene Stoffe nicht im Chemieunterricht eingesetzt werden. Eine gute Möglichkeit bieten hier die von Aziz et al. [9,10] und Narayanan et al. [11] betrachteten Redox-Systeme mit organischen Substanzen auf der Basis von Chinonen und Hydrochinonen. So kann in einer organischen Flow-Batterie in der einen Halbzelle das Redox-Paar 9,10-Anthrachinon-2,7-disulfonsäure/ 9,10-Anthrahydrochinon-2,7-disulfonsäure eingesetzt werden und in der anderen Halbzelle das Redox-Paar 1,2-Benzochinon-3,5-disulfonsäure/ 1,2-Benzohydrochinon-3,5-disulfonsäure. Diese Substanzen liegen in einer wässrigen Lösung vor und werden an Kohleelektroden umgesetzt. In den bisher erschienenen Artikeln in dieser Zeitschrift haben wir bereits für den Chemieunterricht verschiedene Substanzen vorgestellt, die sich für den Einsatz in organischen Batterien eignen [12-15], darunter auch bekannte Naturstoffe wie das Alizarin oder das Vanillin. Ebenso wurden bereits Systeme untersucht, die in der Schulchemie für den Einsatz in wiederaufladbaren Redox-Flow-Batterien eingesetzt werden können (z.B. eine verdünnte Lösung von p-Aminophenol). Die bisherigen Versuche verwenden einen einfachen Versuchsaufbau in einem Becherglas und einem Tontopf. Dieser eignet sich zwar, um die eingesetzten Substanzen zu untersuchen, jedoch ist das Prinzip einer Flow-Zelle daraus nur schwer ersichtlich. Im Folgenden sollen daher ausgehend von diesem ersten stationären Versuchsaufbau zwei weitere Möglichkeiten beschrieben werden, die Funktionsweise von Redox-Flow-Batteries im Unterricht mit einem Modellversuch zu demonstrieren.

Für die Beschreibung der Modellversuche wird auf der Anodenseite eine alkalische Lösung von Ellagtannin und auf der Kathodenseite eine p-Benzochinon Lösung im sauren Milieu verwendet. Die Hydroxy-Gruppen des Ellagtannins werden durch die Lauge deprotoniert und anschließend beim Entladevorgang zu einer Sauerstoffdoppelbindung oxidiert. Das p-Benzochinon wird mit beim Entladevorgang zu einem Hydrochinon reduziert (Abb. 2).

Anode:



Kathode

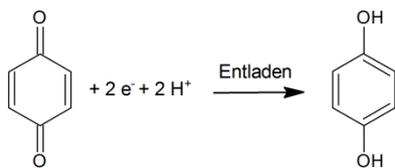


Abb. 2: Reaktionen von Ellagtannin und p-Benzochinon

Die Versuche können entsprechend auch mit anderen Substanzen durchgeführt werden, wie sie bereits in der Literatur beschrieben sind [12-15].

Modellversuch 1: Durchführung im Tontopf

Dieser Modellversuch wird in einem Becherglas durchgeführt. Die beiden Halbzellen werden durch einen Terrakotta Blumentopf voneinander getrennt. Das Umströmen der Elektroden mit den Elektrolytlösungen wird mit Hilfe eines Rührers simuliert. Dadurch wird das Prinzip der Flow-Zelle sehr stark reduziert, wenn gleich dieser Modellversuch einem typischen Aufbau einer elektrochemischen Zelle sehr stark ähnelt. Dieser Modellversuch eignet sich daher insbesondere als ein erster Einstieg in die elektrochemische Umsetzung organischer Stoffe und bietet damit die Möglichkeit im weiteren Verlauf des Unterrichts an die Konstruktion von Flow-Zellen anzuschließen.

Geräte und Chemikalien: Becherglas (weite Form, 600 mL), Blumentopf aus Terrakotta – unten mit einem passenden Gummistopfen verschlossen, leistungsstarker Motor von Heliocentris, 2 Kohlefolien (5 x 3 cm), Krokodilklemmen, Kabel, 2 Multimeter, Silber/Silberchlorid-Elektrode, Ellagtannin (z.B. <http://www.faesser-shop.de>, Art.- Nr. 661001, 500 g/108 €), p-Benzochinon (z. B. Sigma Aldrich, 100g/ 26,40€), Schwefelsäure $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ mol/L}$, Natronlauge $c(\text{NaOH}) = 1 \text{ mol/L}$, Kaliumchloridlösung $c(\text{KCl}) = 1 \text{ mol/L}$, Eisessig (Die Bezugsquellen können nachgelesen werden in [12-14])

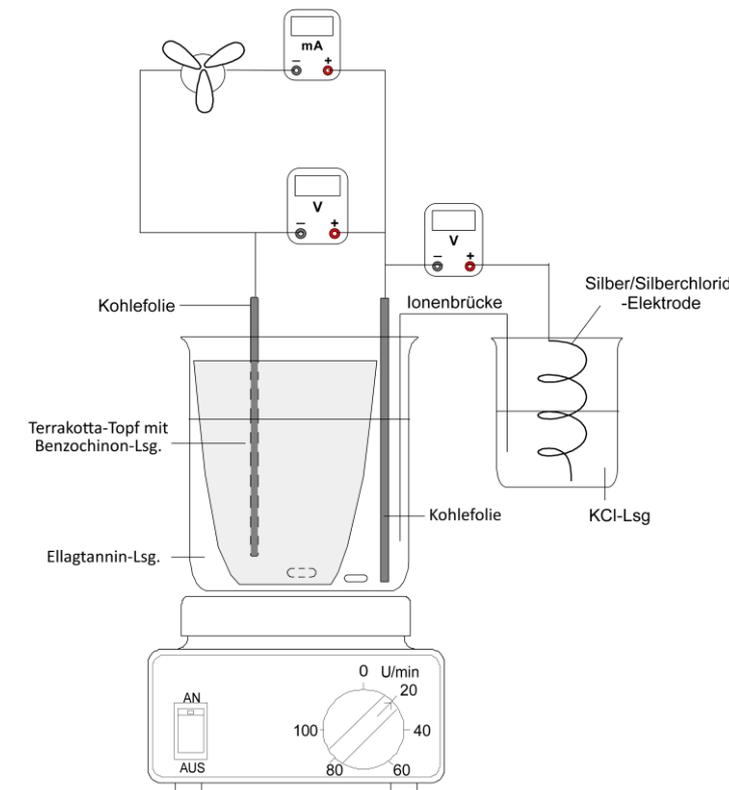


Abb. 3: Versuchsaufbau zur Ellagittannin-p-Benzochinon-Batterie

Durchführung: Der Versuch wird wie in Abb. 3 aufgebaut. Im Becherglas werden 5 g Ellagittannin in 150 ml 1-molarer Natronlauge und im Terrakottatopf werden 10 g p-Benzochinon in 50 ml 1-molarer Schwefelsäure und 50 ml Eisessig gelöst. Es wird zunächst die Ruheklemmenspannung und das Ruhepotential gemessen. Anschließend wird der Motor angeschlossen und über 30 Minuten jede Minute die Stromstärke, Spannung und Potentiale notiert. Der Motor wird anschließend abgeklemmt und über weitere 5 Minuten die Ruheklemmenspannung und das Ruhepotential gemessen.

Beobachtung und Auswertung: In unserem Versuch stellte sich eine Ruheklemmenspannung von 0,826 V. Das Potential der Ellagittannin-Elektrode betrug -0,136 V und das Potential der p-Benzochinon-Elektrode 0,684 V. Nach Einbringen des Motors sank die Spannung auf 0,391 V bei einer Stromaufnahme von 10,6 mA. Das Potential der Ellagittannin-Elektrode stieg auf -0,086 V und das der Benzochinon-Elektrode fiel auf einen Wert von 0,315 V. Die Batterie konnte über 30 Minuten konstant betrieben werden. Nach dem Abklemmen des Motors stellte sich nach 5 Minuten eine Ruheklemmenspannung von 0,822 V ein. Auch die Potentiale der beiden Elektroden nahmen in dieser Zeit in etwa ihren Ausgangswert wieder ein. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt.

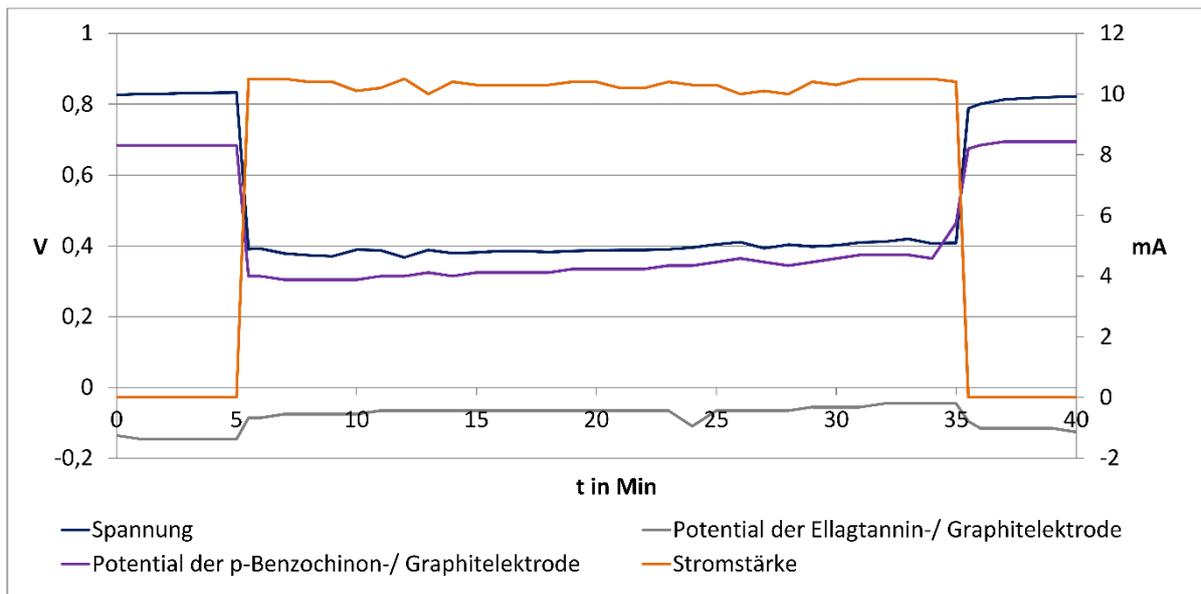


Abb. 4: Verlauf von Spannung, Stromstärke und den Potentialen der Ellagittannin-p-Benzochinon-Batterie im Modellversuch mit dem Terrakotta-Blumentopf und einem leistungsstarken Motor

An der Kathode wird p-Benzochinon unter Aufnahme von 2 Elektronen zu Hydrochinon umgesetzt (Abb. 2) und der Anode findet eine Umsetzung des Ellagittannins unter Elektronenabgabe statt.

Anknüpfend an diesen ersten Modellversuch eignen sich nun zwei weitere Modellversuche, um das Prinzip einer Flow-Zelle zu veranschaulichen.

Modellversuch 2: PMMA-Flow-Zelle

Der zweite Modellversuch ähnelt sehr stark dem wirklichen Aufbau einer solchen Zelle, indem der Elektrolyt durch Serpentinaen über die Elektrodenoberfläche geführt wird. Dieser Aufbau ist nur mit Hilfe eines Technikers herzustellen. Das Modell besteht aus PMMA-Platten. Alle vier Platten werden an den Ecken und in der Mitte der vier Seiten durchbohrt (siehe Abb. 6). In zwei Platten ist ein Kanal in Form einer Serpentine eingelassen. Das abgebildete Modell (Abb. 5) wurde mit Hilfe eines Lasersystems der Klasse 3R (CO₂-Gravierlaser) hergestellt. An den Ausgang der Serpentine sind Schlauchtüllen eingelassen, an dem ein Schlauch angeschlossen werden kann. Nachdem die vier Bauteile hergestellt wurden, stehen diese für den Einsatz wiederholt zur Verfügung.

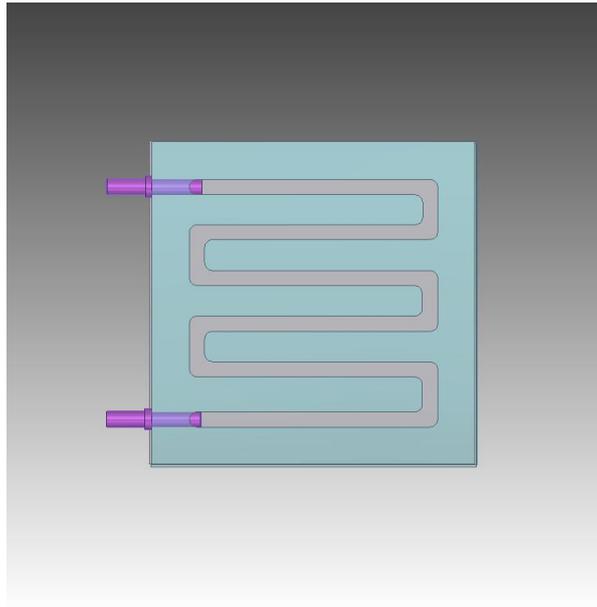


Abb. 5: Skizze einer einzelnen Kammer mit dem Serpentinverlauf und den Schlauchtüllen als Ausgang

Geräte und Chemikalien: 2 PMMA-Deckenplatten, 2 PMMA-Platten mit eingelassener Serpentine, 8 Gewindeschrauben, 16 Unterlegscheiben, 8 Muttern, Schlauchmaterial, 2 Schlauchpumpen (z.B. von GemkeTechnik, 24 V, 2,4 L/h für 24,50 €), 2 Bechergläser (600 mL), Membran (z. B. Kationenaustauschermembran fumasep® FKB-PK-130 bei www.fumatech.com für 35 €), leistungsstarker Motor, 2 Multimeter, Kohlefolie, Kupferblech (ca. 2x1 cm), Krokodilklemmen, Schliff fett, Stativmaterial, Werkzeug (Schraubenzieher, Zange, Schere), p-Benzochinon-Lösung (20 g p-Benzochinon in 200 ml Schwefelsäure $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ mol/L}$ und 200 ml Eisessig), Ellagatannin-Lösung (20 g in 400 ml Natronlauge $c(\text{NaOH}) = 1 \text{ mol/L}$)

Aufbau: Die Kohlefolie wird in der Größe der PMMA-Platten zugeschnitten, dabei wird an einer Stelle (Abb. 6) eine Lasche an der Kohlefolie gelassen. Diese dient später der Stromabnahme. Die beiden Kohlefolien werden an den Stellen, an denen die PMMA-Platten später verschraubt werden sollen, durchbohrt. Dieses soll verhindern, dass die Schrauben mit der Kohlefolie in Kontakt stehen und somit ein Kurzschluss zwischen den beiden Halbzellen entsteht. Die Membran wird ebenfalls in der Größe der PMMA-Platten zugeschnitten und an den entsprechenden Stellen durchbohrt. Nun kann mit der Montage der Flow-Zelle begonnen werden. Hierzu wird eine PMMA-Deckplatte von einer Seite mit Schliff fett benetzt und eine Kohlefolie darauf gelegt. Anschließend wird eine PMMA-Platte mit Serpentine mit Schliff fett benetzt und auf die Kohlefolie gebracht. Auf die erste Serpentine-Platte folgt nun die Membran. Anschließend wird wiederum eine Serpentine-Platte aufgelegt, dann die zweite Kohlefolie und zum Schluss die zweite PMMA-Deckplatte. Auch diese Bauteile werden vor dem Zusammenlegen dünn mit Schliff fett bestrichen. Nun wird das Modell mit den Schrauben, Unterlegscheiben und Muttern vorsichtig, fest verschraubt. Das Modell wird an einem Stativ befestigt. Die beiden Elektrolytlösungen werden in einem Becherglas vorgelegt. Nun wird ein Schlauch von dem Becherglas zur Schlauchpumpe geführt, ein weiterer Schlauch von der Schlauchpumpe zum unteren Eingang einer Halbzelle der Redox-Flow-Zelle. Ein weiterer Schlauch wird vom oberen Eingang der Halbzelle zum Becherglas geführt. Dieses wird für die zweite Halbzelle analog aufgebaut. Bei der Installation der Schlauchpumpen ist darauf zu achten, dass diese den Elektrolyten in die Zelle hineinpumpen. Die Elektrolytlösungen können wieder verwendet werden.

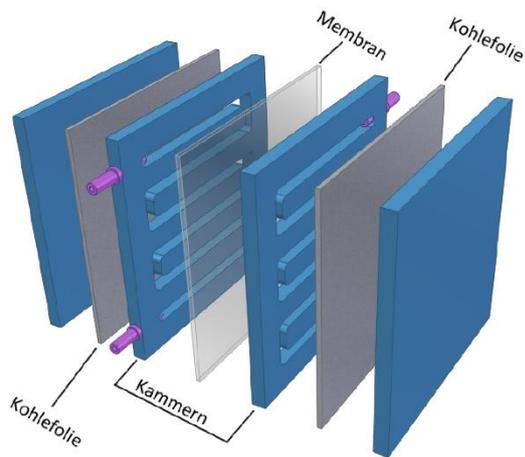


Abb. 6: Aufbau einer PMMA-Redox-Flow-Zelle als Skizze (links) und im Original (rechts)

Durchführung: Die beiden Kohlefolien werden über ein Voltmeter miteinander verbunden. Um der Krokodilklemme mehr Halt zu geben, kann die Lasche der Kohlefolie mit einem Stück Kupferblech ummantelt werden. Die Schlauchpumpen werden in Betrieb genommen. Nachdem die Zelle sich mit den beiden Elektrolytlösungen gefüllt hat, wird die Ruheklemmenspannung notiert. Der Motor wird angeschlossen und über eine längere Zeitspanne jede Minute die Spannung und die Stromstärke notiert. Anschließend wird der Motor abgeklemmt und die Spannung über weitere 5 Minuten notiert.

Beobachtung und Auswertung: In unserem Versuch stellte sich zu Beginn eine Ruheklemmenspannung von etwa 0,85 V ein. Bei einer Stromaufnahme von 22 mA konnte der Motor auch über 75 Minuten betrieben werden. Mit dem Einbringen des Motors in den Stromkreis fiel die Spannung auf 0,53 V und nach 75 Minuten 0,45 V ab. Nach dem Entfernen des Motors stieg das Potential binnen weniger Minuten auf 0,63 V. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 dargestellt. Auch in diesem Fall erfolgt an der Anode die Umsetzung des Ellagatannins und an der Kathode des p-Benzochinons.

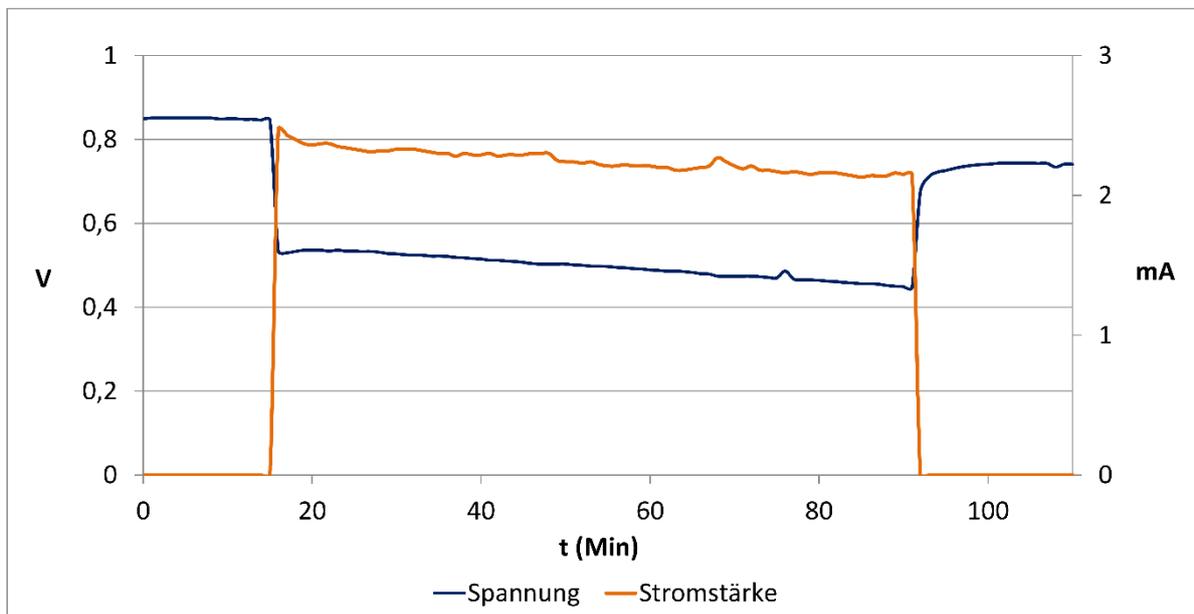


Abb. 7: Verlauf von Spannung und Stromstärke der Ellagtannin-p-Benzochinon-Batterie in der PMMA-Redox-Flow-Zelle mit einem leistungsschwachen Motor

Modellversuch 3: Lowcost-Flow-Zelle

Bei diesem Modellversuch werden zum größten Teil einfache Haushaltsmaterialien für den Bau verwendet, die günstig zu beschaffen sind, sowie Materialien, die zum üblichen Laborbedarf gehören; lediglich die verwendete Membran muss im Chemikalienhandel erworben werden (siehe Tabelle 3). Dadurch kann diese Zelle auch gemeinsam mit Schülerinnen und Schülern hergestellt werden. Wichtig ist, dass die als Dichtung verwendete Knete den Elektrolyten nicht auf Dauer Stand halten kann. Daher ist ein Langzeitversuch über mehrere Tage mit diesem Aufbau nicht zu empfehlen und die Knete sollte nach jedem Versuch entsorgt und ersetzt werden.

Teil 1: Bau der Lowcost-Flow-Zelle

Materialien: 2 große Tictac-Dosen mit Deckel, Knete, Membran (z. B. Kationenaustauschermembran fumasep® FKB-PK-130 bei www.fumatech.com), Klebeband, Schlaucholiven, Schlauchmaterial, 2 Spritzen (20 mL – ohne Kanülen), Schere, Verbrennungslöffel, Bunsenbrenner

Durchführung für den Bau der Zelle: Die beiden Tictac-Dosen werden zunächst von Aufklebern befreit. Der Deckel wird entfernt; dieser wird erst später wieder benötigt. Die beiden TicTac-Dosen müssen vor dem ersten Betrieb der Redox-Flow-Zelle bearbeitet werden. Danach können diese zum erneuten Bau der Flow-Zelle wiederverwendet werden. Hierzu wird in eine der Seiten eine Fläche ausgeschnitten, sodass an den Seiten und an der unteren Kante der Dose ein Rand von ca. 1 cm stehen bleibt. Es fehlen nun noch die Ausgänge für den Elektrolyten. Hierfür wird das Ende eines Brennloffels in der Bunsenbrennerflamme erhitzt. Mit dem heißen Draht wird nun ein Loch ($\varnothing = 5$ mm) in die schmale Seite der TicTac-Dose geschmolzen (siehe Abb. 8). Die Membran wird auf die Größe der TicTac-Dose zugeschnitten. Nun kann mit dem Zusammenbau der Lowcost-Flow-Zelle begonnen werden.

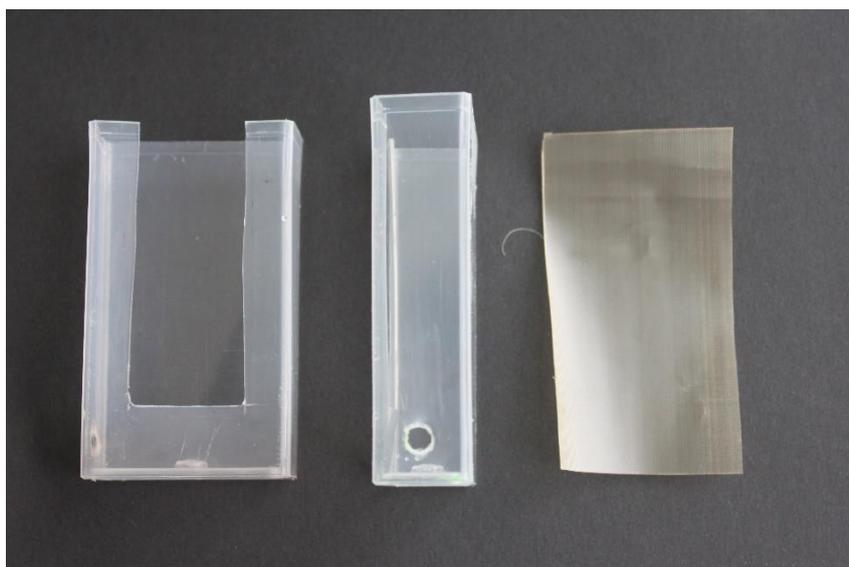


Abb. 8: TicTac-Dose ausgeschnitten (links), Seitenansicht der TicTac-Dose (mitte) und die Membran (rechts)

Eine TicTac-Dose wird mit einer Dichtung aus Knete versehen (siehe Abb. 9). Anschließend wird die Membran vorsichtig auf die Dichtung gedrückt. Anschließend wird die zweite Dose mit einer Dichtung aus Knete bestückt und diese dann vorsichtig, fest auf die Membran und die erste Dose gedrückt. Nun wird alles mit Klebeband umwickelt. Es empfiehlt sich zunächst die Deckel der Dosen wieder aufzusetzen, am oberen Teil die beiden Dosen fest zusammenzukleben und dann am unteren Ende fortzufahren bis die gesamte Modell-Zelle gut verklebt ist (Abb. 9). Wurde zu viel Knete aufgetragen wird diese vor dem Verkleben mit einem Spatel entfernt. In die Löcher der beiden Dosen wird nun eine Schlaucholive gepresst und der Übergang zwischen Schlaucholive und Dose wiederum mit Knete abgedichtet (Abb. 10). Es empfiehlt sich nach dem Zusammenbau die Dichtigkeit der Zelle zu überprüfen und ggf. durch weitere Knete zu verbessern.

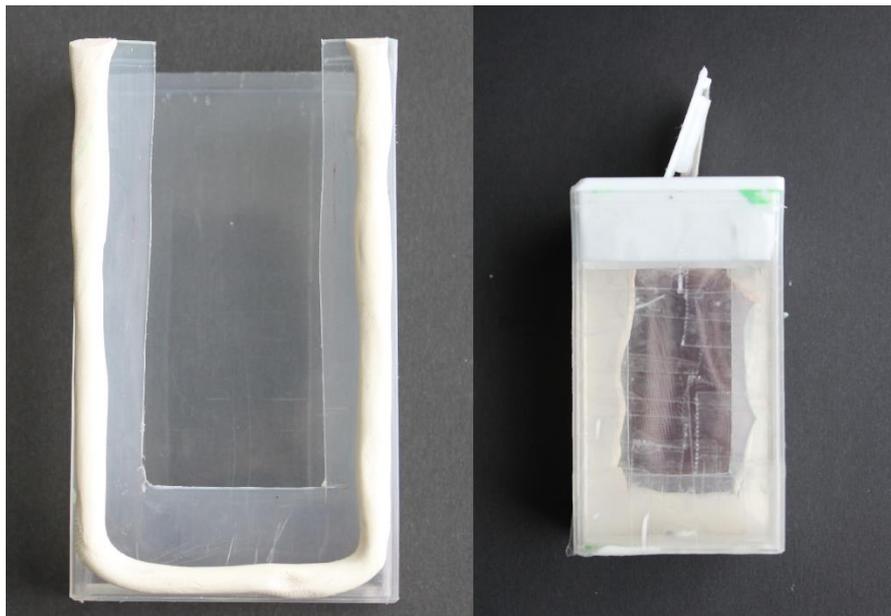


Abb. 9: Ummantelung mit der Knete (links) und zusammengebaute TicTac-Dose (rechts)



Abb. 10: Dichtung der Ausgänge der TicTac-Dose

Teil 2: Verwendung der Lowcost-Flow-Zelle

Materialien und Chemikalien: selbstgebaute Lowcost-Redox-Flow-Zelle, 2 Spritzen (20 mL – ohne Kanülen), Hebebühne, Stativmaterial, 2 Schlauchklemmen, 2 Pasteurpipetten, 2 Bechergläser (200 mL), Kabelmaterial mit Krokodilklemmen, Multimeter, leistungsschwacher Motor von LemoSolar, p-Benzochinon-Lösung (20 g p-Benzochinon in 200 ml Schwefelsäure $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ mol/L}$ und 200 ml Eisessig), Ellagtannin-Lösung (20 g in 400 ml Natronlauge $c(\text{NaOH}) = 1 \text{ mol/L}$)

Durchführung: Die Redox-Flow-Zelle wird auf eine Hebebühne gestellt und vorsichtig mit einem Stativ gesichert. An die Schlaucholiven wird ein Schlauch mit einer Pasteurpipette befestigt und der Schlauch mit einer Schlauchklemme verschlossen. Die Pasteurpipetten werden jeweils in ein Becherglas eingehängt und darin wird jeweils eine Elektrolyt-Lösung vorgelegt (Abb. 11). In die Redox-Flow-Zelle wird Stück Kohlefolie eingehängt. Um die Elektrodenoberfläche zu vergrößern, kann ein größeres Stück Kohlefolie gefaltet werden. Die beiden Kohlefolien werden über ein Voltmeter miteinander verbunden. Um der Krokodilklemme mehr Halt zu geben, wird die Lasche der Kohlefolie mit einem Stück Kupferblech ummantelt. Nun wird je eine Spritze mit einer Elektrolytlösung gefüllt und damit die Flow-Zelle befüllt. Dabei bildet die Ellagtannin-Lösung die Anodensubstanz und die p-Benzochinon-Lösung die Kathodensubstanz. Die Schlauchklemmen wird leicht geöffnet, so dass die Elektrolytlösung bei beiden Halbzellen langsam heraustropft. Nun wird mit Hilfe der Spritzen stetig der Elektrolyt nachgefüllt.

Zunächst wird die Ruheklemmenspannung gemessen. Der Motor wird angeschlossen und dann über 30 Minuten jede Minute die Spannung und die Stromstärke notiert. Anschließend wird der Motor abgeklemmt und noch für fünf weitere Minuten die Spannung gemessen.

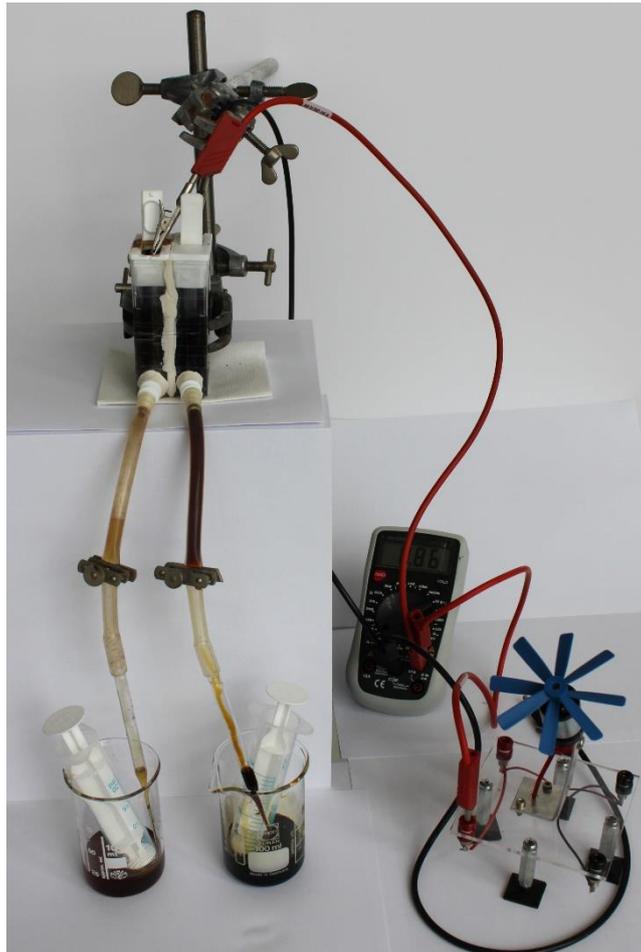


Abb. 11: Aufbau der Lowcost-Redox-Flow-Zelle

Beobachtung und Auswertung: Die Ruheklemmenspannung liegt nach 5 Minuten bei ca. 0,9 V. Nach Abschluss des Motors dreht sich dieser lebhaft und die Spannung fällt lediglich auf 0,8 V ab. Bei einer Stromaufnahme von ca. 2,6 mA bleibt die Spannung über 30 Minuten sehr konstant. Nach Abschluss des Motors steigt die Ruheklemmenspannung auf etwa 0,9 V wieder an. Der Verlauf von Spannung und Stromstärke ist in Abb. 12 dargestellt. Wie bereits in den Versuchen zuvor wird an der Kathode p-Benzochin reduziert und an der Anode Ellagtannin oxidiert (vgl. Abb. 2).

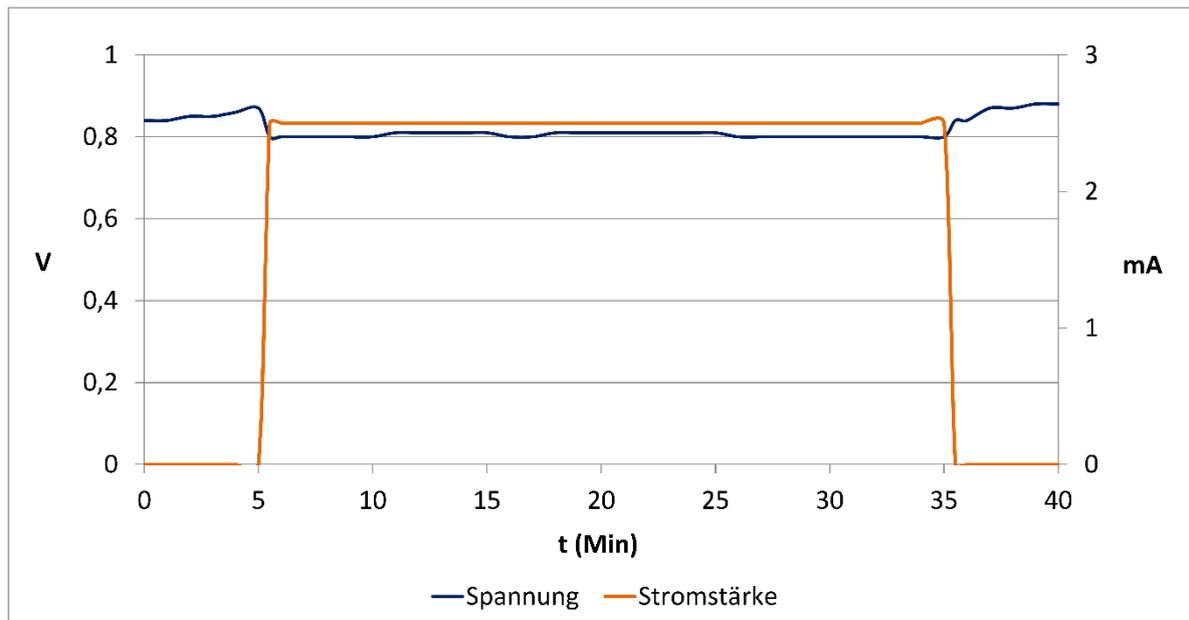


Abb. 12: Zeitlicher Verlauf von Spannung und Stromstärke der Lowcost-Redox-Flow-Batterie mit Ellgatannin und p-Benzochinon mit einem leistungsschwachen Motor

Fazit

Mit den drei dargestellten Versuchen kann die Thematik der Redox-Flow-Batterien auf sehr unterschiedliche Weise betrachtet werden. Während im ersten Modell die Umsetzung organischer Stoffe in Batterien in erster Linie demonstriert wird, ist es möglich mit dem PMMA-Modell den Schülerinnen und Schülern einen Einblick in die mögliche technische Umsetzung zu geben. Mit dem Lowcost-Modell wird es möglich, mit Schülerinnen und Schülern ein einfaches Modell zur Redox-Flow-Batterie herzustellen.

Dank

Wir danken dem Fonds der chemischen Industrie für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Literatur:

- [1] J. Lambertz, H.-W. Schiffer, I. Serdarusic, H. Voß, Flexibilität von Kohle- und Gaskraftwerken zum Ausgleich von Nachfrage- und Einspeiseschwankungen, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 62/7, S. 16-20 (2012) www.et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen_2012_07_lambertz.pdf. (letzter Zugriff am 20.10.2016).
- [2] M. Sterner, I. Stadler, *Energiespeicherung – Bedarf, Technologien, Integration*, Berlin-Heidelberg, S. 282f (2014).
- [3] P. Kurzweil, O. K. Dietlmeier, *Elektrochemische Speicher – Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff*, Rechtliche Grundlagen, Wiesbaden, S. 343 (2015).
- [4] A. Z. Weber, M. M. Mensch, J. P. Meyers, P. N. Ross, J. T. Gostick, Q. Liu, Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied Electrochemistry*, 41 S. 1137-1164 (2011).
- [5] M. Bartolozzi, Development of Redox Flow Batteries. A Historical Bibliography, *Journal of Power Sources*, 27, S. 219-234 (1989).

- [6] A. Gillhuber, Eine Woche Strom für 40 Häuser? (2014)
www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/artikel/111844/ (letzter Zugriff am 20.10.2016).
- [7] A. Gillhuber, Leistungs- vs. Energiebatterie – der feine Unterschied (2014)
www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/artikel/111844/1/ (letzter Zugriff am 20.10.2016).
- [8] A. Gillhuber, Energiespeicher Chance für Energiewende (2014)
www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/artikel/111844/2/ (letzter Zugriff am 20.10.2016).
- [9] B. Huskinson, S. Nawar, M. R. Gerhardt, M. Aziz, Novel Quinone-Based Couples for Flow-Batteries. ECS Transactions **57** (7) S. 101-105 (2013).
- [10] B. Huskinson, M. P. Marshak, S. Changwon, E. Süleyman, M. R. Gerhardt, C. J. Galvin, X. Chen, A. Aspuru-Guzik, R. G. Gordon, M. Aziz, A metal-free organic – inorganic aqueous flow-battery. Nature **505**, S. 195-198 (2014).
- [11] B. Yang, L. Hooper-Burkhardt, F. Wang, G. K. S. Prakash, S. R. Narayanan, An Inexpensive Aqueous Flow Battery for Large-Scale Electrical Energy Storage Based on Water-Soluble Organic Redox Couples. ESC 161(p), A1371-A1380 (2014).
- [12] D. Rosenberg, M. Behnisch, S. Pansegrau, M. Busker, W. Jansen, W., Speicherung elektrischer Energie mit neuartigen, organischen Batterien, PdN-ChiS **65** (4) S. 36-42 (2016).
- [13] D. Rosenberg, M. Wachholz, M. Busker, W. Jansen, Organische Batterien mit Alizarin. PdN-ChiS **65** (3) S. 14-19 (2016).
- [14] D. Rosenberg, A. Rehling, M. Busker, W. Jansen, W., Organische Batterien mit Gallussäure, Pyrogallol und grünem Tee. Schulexperimente zur Demonstration von Flow-Batteries. PdN-Chemie in der Schule **65** (6) S. 22-27 (2016).
- [15] D. Rosenberg, A. Rehling, D. Ernst, M. Busker, W. Jansen, Organische Batterien mit Phloroglucin und Vanillin. PdN-ChiS (eingereicht).

Kontakt:

Dominique Rosenberg, Prof. em. Dr. Walter Jansen, Europa-Universität Flensburg, Abteilung Chemie und ihre Didaktik, Auf dem Campus 1, 24943 Flensburg, Email: dominique.rosenberg@uni-flensburg.de

Dr. Maike Busker, Universität Hamburg, Fakultät für Erziehungswissenschaften, Max-Brauer-Alle 58/60, 22756 Hamburg, Email: maike.busker@uni-hamburg.de