

Rosenberg, Dominique; Wachholz, Mirco; Böttger, Sebastian; Jansen, Walter
Organische Batterien mit Ascorbinsäure und die etwas andersartige Zitronenbatterie

formal überarbeitete Version der Originalveröffentlichung in:

formally revised edition of the original source in:

Chemie konkret : CHEMKON 26 (2019) 3, S. 119-123



Bitte verwenden Sie in der Quellenangabe folgende URN oder DOI /
Please use the following URN or DOI for reference:

urn:nbn:de:0111-pedocs-247078

10.25656/01:24707

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-247078>

<https://doi.org/10.25656/01:24707>

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

Organische Batterien mit Ascorbinsäure und die etwas andersartige Zitronenbatterie

Dominique Rosenberg, Mirco Wachholz, Maike Busker und Walter Jansen*

Zusammenfassung: Über die sogenannte Zitronenbatterie ist in der Vergangenheit schon viel geschrieben worden. Sie funktioniert nicht gut, und die chemischen Reaktionen sind komplex. Mit der Ascorbinsäure der Zitrone lässt sich allerdings eine wirksame organische Batterie konstruieren. In diesem Artikel werden Versuche zu organischen Batterien präsentiert, die mit Ascorbinsäure und deren Alltagsprodukte betrieben werden können.

Stichworte: Organische Batterie · Ascorbinsäure · Zitronensaft

Abstract: Numerous scientific papers have been published concerning the lemon battery, albeit it exhibits complex electrochemical reactions and a limited functionality. The ascorbic acid of the lemon can be used nevertheless to construct an effective Organic Battery. In this article experiments linked with Organic Batteries are presented, which can be operated with ascorbic acid and everyday life materials.

Keywords: Organic battery · ascorbic acid · lemon juice

1. Einleitung

Ascorbinsäure, Vitamin C (Abb. 1), gehört für den Menschen zu den unverzichtbaren Substanzen, die mit der Nahrung in ausreichender Menge aufgenommen werden müssen, da der menschliche Organismus diese Substanz im Gegensatz zu vielen Tieren nicht selbst herstellen kann. Ascorbinsäure wirkt im Organismus als Radikalfänger und ist darüber hinaus an vielen Prozessen zur Bildung von Enzymen und Aminosäuren beteiligt [1, 2]. Dabei kann eine mangelnde Aufnahme von Ascorbinsäure für den menschlichen Körper schwere Auswirkungen haben. Skorbut war eine berüchtigte Erkrankung und eine der häufigsten Todesursachen auf langen Seereisen. Zwar erkannte man bereits im 19. Jahrhundert, dass bestimmte Nahrungsmittel wie Orangen oder Zitronen den Skorbut heilen konnten, dennoch gelang es erst in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts die chemische Natur der verantwortlichen Verbindung aufzuklären: der L-Ascorbinsäure. Neben ALBERT SZENT-GYÖRGYI waren besonders WALTER N. HAWORTH und sein Arbeitskreis an der Isolierung und Strukturaufklärung der dann von ihnen Ascorbinsäure genannten Verbindung beteiligt [3]. HAWORTH erhielt 1937 für seine Arbeiten zur Ascorbinsäure den Nobelpreis für Chemie. Das Antioxidans Ascorbinsäure wird im Organismus leicht zur Dehydroascorbinsäure oxidiert, deren Struktur im festen kristallinen Zustand aus Abb. 1 ersichtlich ist. Neben Zitronen und Orangen, die einen durchschnittlichen Gehalt von 55 mg bzw. 50 mg Vitamin C pro 100 g Frucht aufweisen, enthalten viele weitere Früchte einen beachtlichen Anteil an Ascorbinsäure. So enthalten 100 g Vogelbeeren (Eberesche) 100 mg Vitamin C, schwarze Johannisbeeren 180 mg und Sanddornbeeren 200 bis 800 mg. Besonders reich an Vitamin C sind beispielsweise Hagebutten (1250 mg pro 100 g Frucht) und Acerolakirschen (1300 bis 1700 mg) [4].

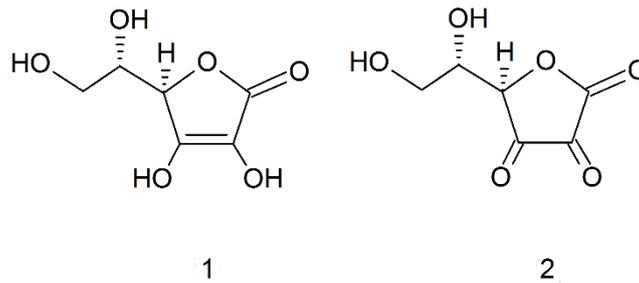


Abb. 1: Ascorbinsäure 1 und Dehydroascorbinsäure im festen Zustand 2

2. Organische Batterien mit Ascorbinsäure

Ascorbinsäure und ihre Wirkungsweise als Reduktionsmittel ist bereits in der Chemiedidaktik diskutiert worden [z.B. 5]. Eine Möglichkeit die Wirkungsweise von Ascorbinsäure als Antioxidans Schülerinnen und Schüler zugänglich zu machen, besteht in der Betrachtung von entsprechenden organischen Batterien. Hierzu sollen in Anlehnung an die bereits von uns vorgestellten organischen Batterien mit Alltagsmaterialien (z.B. grünem Tee, Vanillin und Paracetamol) [6-8] Experimente zur Oxidation von Ascorbinsäure erläutert werden.

2.1 Ascorbinsäure-Sauerstoff-Batterie

Geräte: Bechergläser 600 mL und 100 mL, Tontopf aus Terrakotta, unten mit passendem Gummistopfen verschlossen, Kohlefolie ca. 3 cm x 4 cm, Aktivkohleelektrode nach OETKEN [9], leistungsstarker Elektromotor (z.B. von Dreibein GmbH Lehrsysteme) oder ein 47 Ohm Widerstand, Multimeter, Kabelmaterial, Krokodilklemmen, Silber/Silberchloridelektrode, Stativmaterial, Magnetrührer (Bezugsquellen siehe [6, 7])

Chemikalien: Ascorbinsäure (z.B. Drogeriemarkt, 100 g ca. 4 €), Natriumhydroxid, Schwefelsäure $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ mol L}^{-1}$, Kaliumchlorid-Lösung $c(\text{KCl}) = 1 \text{ mol L}^{-1}$, Natriumperoxodisulfat (Bezugsquellen siehe [5, 6]).

Durchführung: 10 g Ascorbinsäure werden in 200 mL Wasser gelöst. Zur Bildung einer alkalischen Lösung werden 14 g Natriumhydroxid in das Becherglas gegeben und gelöst. Dann wird eine Kohlefolie eingehängt. In den Tontopf werden 100 mL Schwefelsäure mit 5-10 g Natriumperoxodisulfat versetzt und die Aktivkohleelektrode nach OETKEN [9] hineingestellt. Natriumperoxodisulfat zerfällt in Sauerstoff, Wasserstoffperoxid und Natriumsulfat. Dadurch steht immer genügend Sauerstoff an der Elektrode zur Verfügung. Natriumperoxodisulfat ist elektrochemisch nicht wirksam. Man installiert die Silber/Silberchloridelektrode in der Kaliumchlorid-Lösung. Die Elektroden werden wie in Abb. 2 gezeigt über die Messinstrumente verbunden. Die Ruhespannung und die Ruhepotentiale werden über mehrere Minuten notiert. Anschließend wird der Elektromotor oder ein 47 Ohm Widerstand samt Amperemeter in den Stromkreis geschaltet (vgl. Abb. 2) und über einen längeren Zeitraum (10 - 60 Minuten) Spannung und Stromstärke notiert. Danach wird der Motor bzw. Widerstand aus dem Stromkreis entfernt und Spannung sowie Potentiale für weitere 5 Minuten beobachtet.

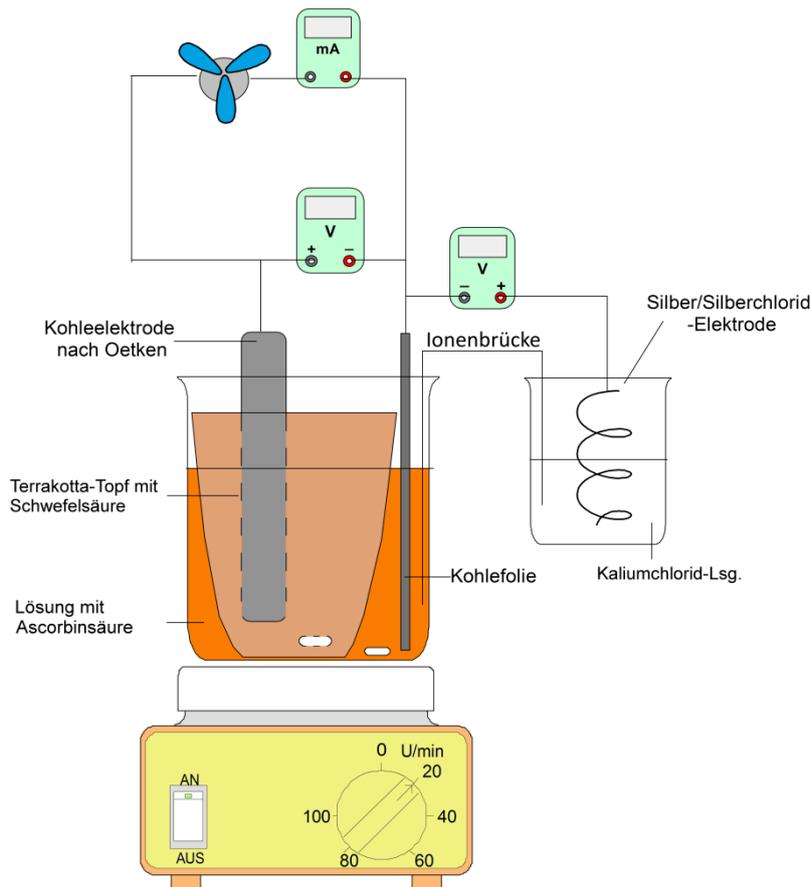


Abb. 2: Versuchsaufbau der Ascorbinsäure-Sauerstoff-Batterie

Beobachtung und Auswertung: In einem Versuch mit 10 g Ascorbinsäure steigt die Ruheklemmenspannung innerhalb von 5 Minuten auf 1,48 V an, das Ruhepotential der Ascorbinsäure-/Kohlelektrode beträgt -0,17 V. Während der 20-minütigen Belastung mit einem leistungsstarken Elektromotor oder dem 47 Ohm Widerstand färbt sich die Lösung im Becherglas von einer leicht gelblichen bis zu einer rötlich-orangen Färbung. Die Spannung fällt bei einer Belastung von etwa 12,5 mA auf etwa 1,40 V ab. Das Potential der Ascorbinsäure-/Kohlelektrode steigt langsam auf etwa -0,12 V an. In Abb. 3 sind die Messwerte dargestellt.

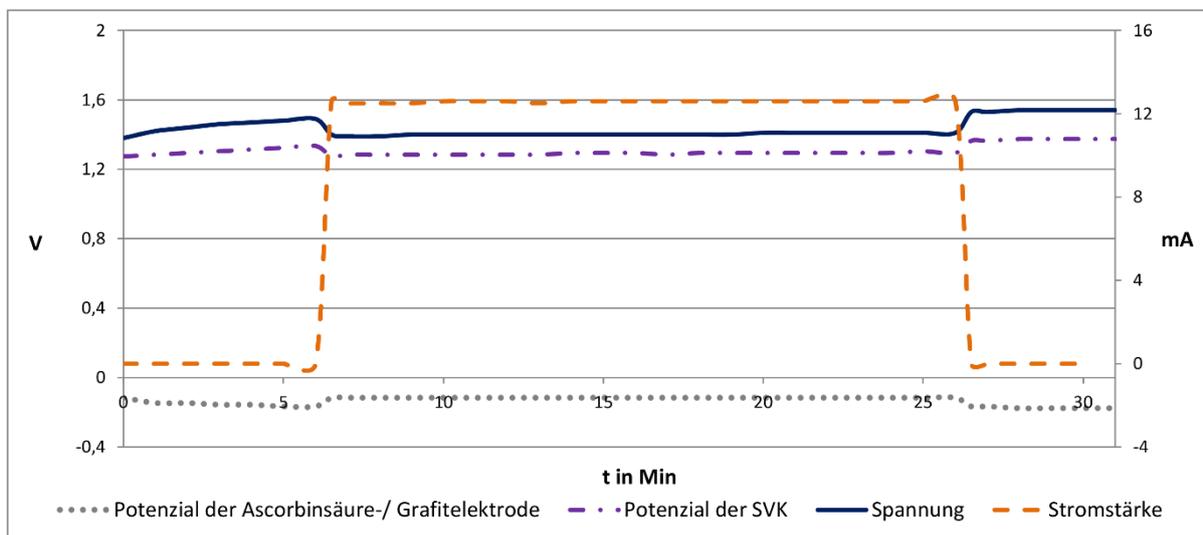


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf von Spannung, Stromstärke und Potential der Ascorbinsäure-Sauerstoff-Batterie

Die Kathodenreaktionen ist in Abb. 4a und die Anodenreaktion in Abb. 5 ersichtlich. Dabei ist zu beachten, dass die Struktur der Dehydroascorbinsäure in wässriger Lösung nach [10] eine andere als im festen Zustand ist (Abb. 5).

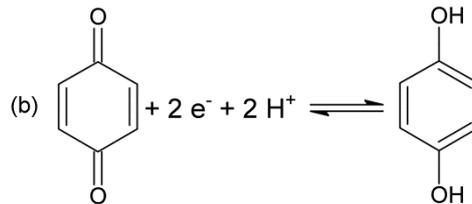
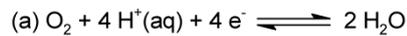
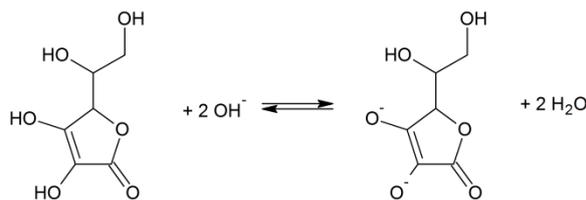


Abb. 4: Elektrodenreaktionen an der Sauerstoffverzehrkatode (a) sowie an der p-Benzochinon-/ Grafitelektrode (b)

Deprotonierung:



Reaktion am Minuspol:

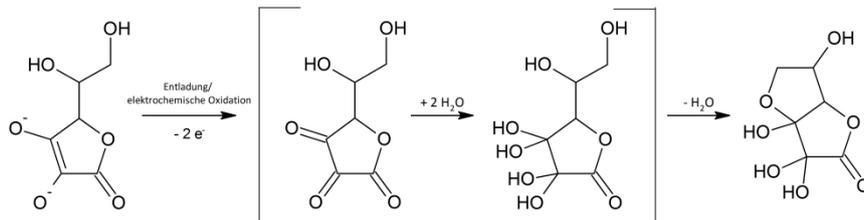


Abb. 5: Reaktionen der Ascorbinsäure an der Grafitelektrode nach [10]

Wie bei den Versuchen mit anderen Anodensubstanzen lassen sich auch mit Ascorbinsäure Batterien mit p-Benzochinon oder Eisen(III)-sulfat als Kathodensubstanzen verwenden.

2.2 Ascorbinsäure-p-Benzochinon-Batterie

Versuchsdurchführung a

Man verfährt ähnlich, wie in Versuch 1 geschildert, wobei auf der Kathodenseite eine p-Benzochinonlösung (20 g p-Benzochinon in einem Lösungsmittelgemisch von 100 ml Eisessig und 100 ml Schwefelsäure $c = 1 \text{ mol L}^{-1}$) verwendet und statt der Aktivkohleelektrode eine Kohlefolie eingesetzt wird. p-Benzochinon wird, wie Schildknecht zeigen konnte, von Bombardierkäfern, einigen Laufkäferarten und Tausendfüßlern als Abwehrwaffe eingesetzt [11, 12]. Eine solche Batterie kann also als eine Batterie aus Naturprodukten bezeichnet

werden. In Abb. 6 sind die Messwerte der Ascorbinsäure-p-Benzochinon-Zelle dargestellt, und aus Abb. 4b sind die Kathodenreaktion und in Abb. 5 die Anodenreaktion ersichtlich. Die Messergebnisse zeigen kaum Veränderungen zu dem vorigen Versuch der Ascorbinsäure-Sauerstoff-Zelle.

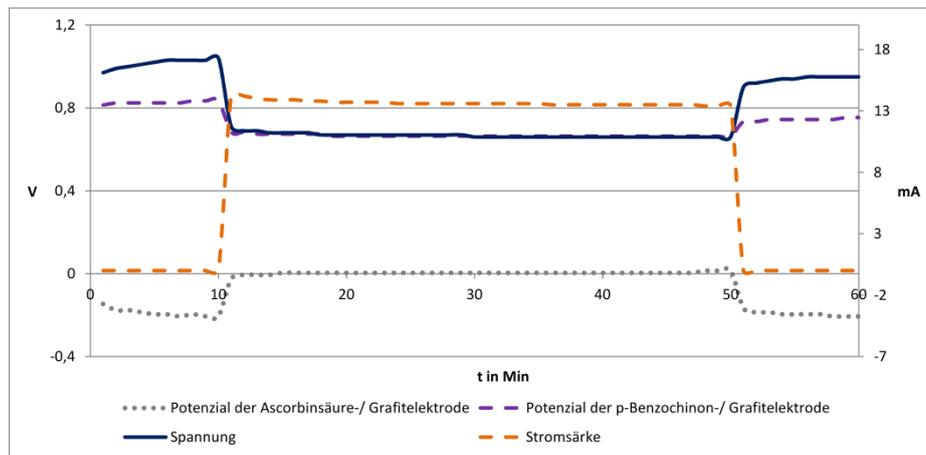


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf von Spannung, Stromstärke und Potential der Ascorbinsäure-p-Benzochinon-Batterie

Um die Reversibilität der Oxidation von Ascorbinsäure und damit die Wiederaufladbarkeit dieser Batterie zu überprüfen, wird eine Untersuchung mittels Cyclovoltammetrie herangezogen [13-15]. Das Cyclovoltammogramm der Ascorbinsäure in alkalischer Lösung zeigt, dass eine Oxidation leicht erfolgt, auch die Abweichung bei der Erhöhung der Scanrate ist relativ gering (Abb. 7a). Allerdings zeigt sich, dass die Reduktion des Oxidationsprodukts deutlich gehemmt ist. Dennoch steht nach dem Rücklauf des Potentials für eine Oxidation wieder genügend Ascorbinsäure zur Verfügung, wie die Ergebnisse bei höherer Scanrate zeigen. Es handelt sich aber nicht um ein reversibel wiederaufladbares System. Der Grund liegt vermutlich in der Struktur der oxidierten Ascorbinsäure in wässriger Lösung (siehe Abb. 5), die eine Reduktion zu Ascorbinsäure erschwert, was in einer bemerkenswerten Arbeit von PFEILSTICKER ET AL. gezeigt werden konnte [10]. Dagegen ist das System p-Benzochinon/Hydrochinon ein ideal reversibles System (Abb. 7b, c), was insbesondere Abb. 7c zeigt.

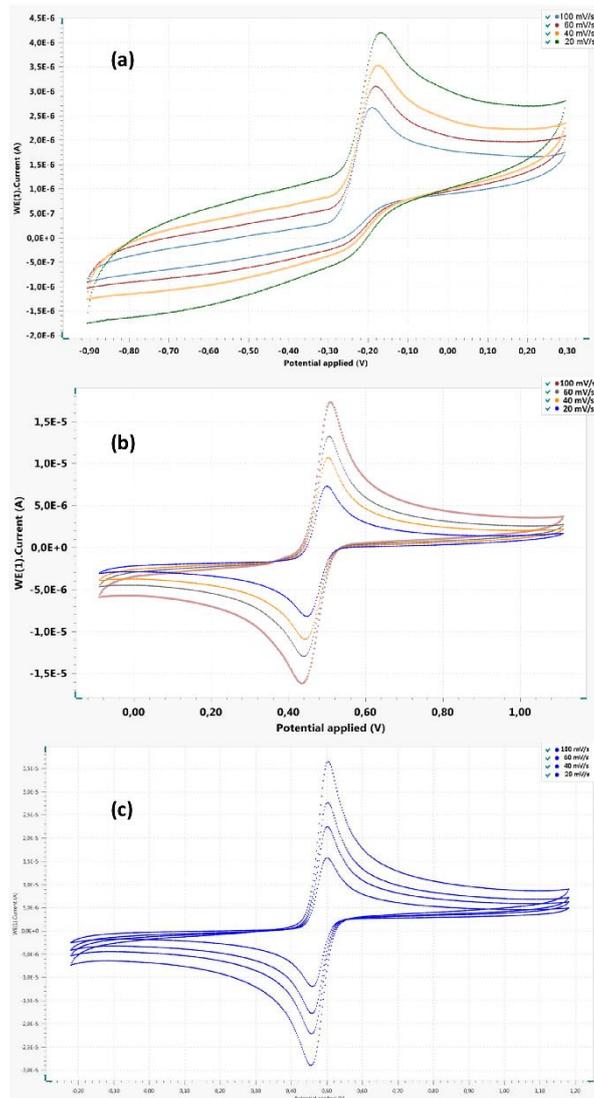


Abb. 7: Cyclovoltammogramme von (a) L-Ascorbinsäure in alkalischer Lösung und (b/c) p-Benzochinon/Hydrochinon in schwefelsaurer Lösung

Versuchsdurchführung b

Anstelle der bisher beschriebenen Apparatur verwendet man eine elektrochemische Zelle, die von der University of Reading vertrieben wird (Abb. 8). Diese kann online unter <http://www.ncbe.reading.ac.uk/MATERIALS/Microbiology/fuelcell.html> für umgerechnet ca. 68 € bestellt werden. Allerdings werden als Elektrodenmaterial Carbonfilze von SGL Carbon verbaut, da diese einen besseren elektrochemischen Stoffumsatz ermöglichen als die bisher verwendeten Grafitfolien. Die Grafitfilze werden auch in der Forschung an Vanadin-Redox-Flow-Zellen wegen ihrer großen Oberfläche eingesetzt. Als Membran wird eine Kationenaustauschermembran von fumasep® (erhältlich unter www.fumatech.com, Art.-Nr. FKB-PK-130 für 35 €) eingesetzt.

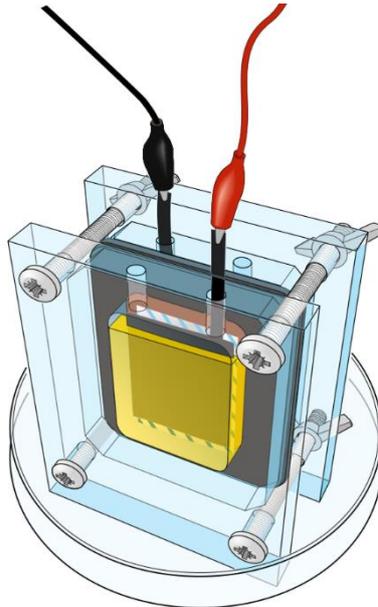


Abb. 8: Darstellung der Fuel Cell der University of Reading;
 Quelle: <http://www.ncbe.reading.ac.uk/MATERIALS/Microbiology/fuelcell.html>

Die Apparatur wird mit dem Grafitfilz und der Kationenaustauschermembran aufgebaut und verschraubt. Zur elektrischen Ableitung werden Kupfer- oder Silberdrähte durch die vorgesehenen Öffnungen durch in die Filze gesteckt. Dann werden Lösungen von 5 g Vitamin C Pulver und 5 g Natriumhydroxidplättchen in 50 ml 1 molarer Natronlauge und 3 g p-Benzochinon in 25 ml Eisessig und 25 ml 1 molarer Schwefelsäure hergestellt. Mit Hilfe von 20 ml Spritzen werden die beiden Lösungen jeweils in die Teilräume der Zelle gegeben. Die Ruheklemmenspannung beträgt nach 4 Minuten 1,03 V. Nach Anschluss eines leistungsstarker Elektromotors fällt die Spannung auf 0,73 V. Bei einer durchschnittlichen Stromstärke von 15,5 mA kann die Zelle problemlos bei einer Spannung von 0,73 V für 20 Minuten betrieben werden.

Da Ascorbinsäure in vielen Alltagsprodukten vorhanden ist, können diese für den Betrieb organischer Batterien herangezogen werden. Im Folgenden seien die Batterie mit Vitamin C – Tabletten, die andersartige Zitronenbatterie sowie eine Batterie aus Grippemitteln vorgestellt.

2.3 Batterie mit Vitamin C-Tabletten

Geräte und Chemikalien: wie in Versuch 1, dazu Vitamin C-Tabletten (z.B. aus Drogerien)

Durchführung: Die Versuchsanordnung entspricht der in Versuch 1. Man gibt zunächst 20 Tabletten, die jeweils 120 mg Vitamin C enthalten, in das große Becherglas und löst diese in etwa 200 mL Wasser. Unter starkem Aufbrausen entsteht eine gelb-gefärbte Suspension. Nach Abklingen der Kohlenstoffdioxidentwicklung werden 20 g Natriumhydroxid hinzugeben und gelöst. Als Elektrode wird eine Kohlefolie verwendet. Im Tontopf befindet sich Schwefelsäure und die Aktivkohleelektrode nach OETKEN [9]. Die Elektroden und die Silber/Silberchloridelektrode werden wie in Abb. 2 gezeigt verbunden. Nach dem Notieren der Ruheklemmenspannung wird ein Motor in den Stromkreis geschaltet.

Beobachtung: Die Ruheklemmenspannung steigt auf etwa 1,38 V an, das Ruhepotential der Anode beträgt etwa -0,11 V und das der Kathode +1,25 V. Nach dem Einbringen des Motors in den Stromkreis, kann dieser bei einer Stromaufnahme von ca. 18 mA dauerhaft betrieben werden. Nach 10 Minuten Betriebsdauer werden die Ausgangswerte für den Ruhezustand wieder erreicht. Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 9 dargestellt.

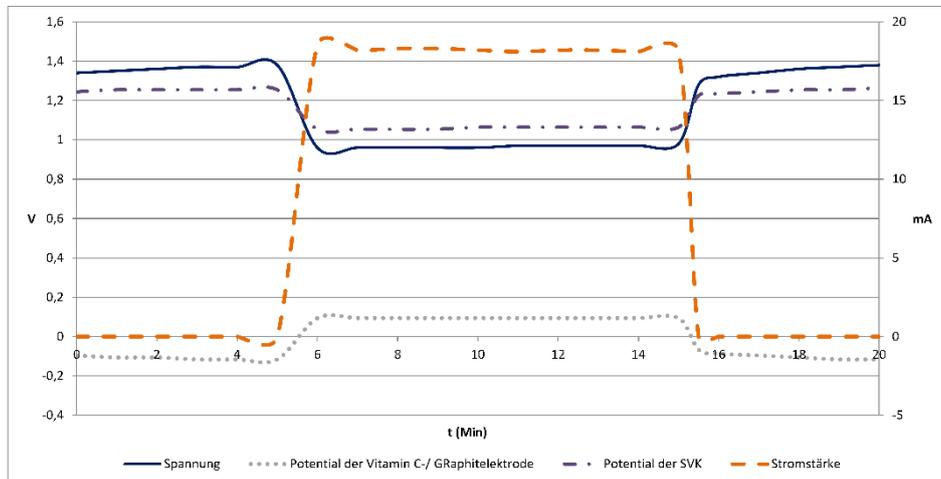


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf von Spannung, Stromstärke und Potential der Vitamin C-Sauerstoff-Zelle

Es liegt nahe, Ascorbinsäure-haltige Früchte bzw. Fruchtsäfte in organischen Batterien zu verwenden. Insbesondere von Interesse ist es, eine etwas andersartige Zitronenbatterie zu konstruieren. In der normalerweise als Zitronenbatterie bezeichneten Batterie werden ein Zink- und ein Kupferblech in eine Zitrone gesteckt bzw. in Zitronensaft eingestellt. Die Ergebnisse sind in der Regel ernüchternd [16]. Im folgenden Versuch wird eine andersartige Zitronenbatterie vorgestellt, welche die Oxidation von Ascorbinsäure in alkalischer Lösung nutzt.

2.4 Die andersartige Zitronenbatterie

Geräte: wie in Versuch 1, auf die Messung der Elektrodenpotentiale, und damit auf die Silber/Silberchloridelektrode kann verzichtet werden.

Chemikalien: wie in Versuch 1, anstelle der Ascorbinsäure-Lösung frisch gepresster Zitronensaft

Durchführung: Zu etwa 150 mL frisch gepressten Zitronensafts werden 10 g Natriumhydroxid-Plätzchen gegeben und im Saft gelöst. Die alkalische Reaktion der Lösung wird durch eine Rotfärbung des Zitronensafts deutlich. Vermutlich verändert ein Farbstoff im alkalischen Milieu seine Farbe. Die Lösung wird in das Becherglas gegeben. In den Tontopf werden 100 mL Schwefelsäure und 10 g Natriumperoxodisulfat gegeben und die Aktivkohleelektrode nach OETKEN hineingestellt. Der Tontopf wird in das Becherglas gestellt und die Elektroden über die Messinstrumente miteinander verbunden. Nachdem das Ruhepotential sich eingestellt hat, wird ein Motor in den Stromkreis eingebracht.

Beobachtung: Die Ruheklemmenspannung beträgt nach 5 Minuten etwa 1,3 V. Nach dem Einbringen des Motors in den Stromkreis, dreht sich der Propeller des Motors lebhaft. Man

kann so über eine lange Zeit diese Batterie erfolgreich betreiben. In Abb. 10 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Neben der Ascorbinsäure (Abb. 5) können auch noch andere Inhaltsstoffe der Zitrone, wie z. B. Polyphenole umgesetzt werden.

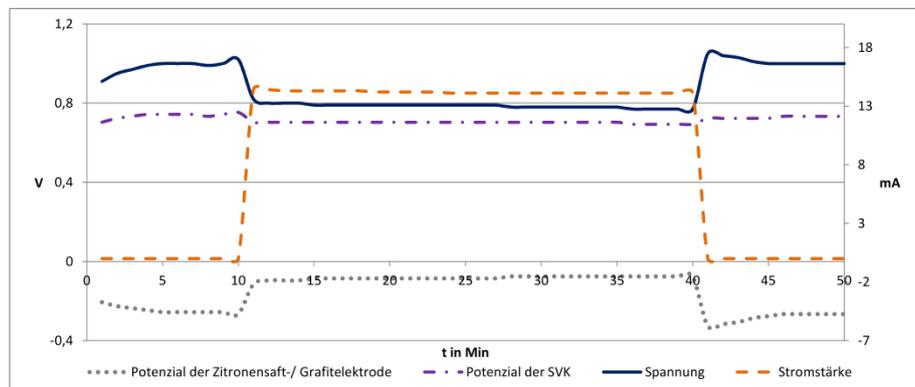


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf von Spannung, Stromstärke und Potential der andersartigen Zitronenbatterie

2.5 Batterie mit einem Grippemittel

Grippostad® C ist ein Medikament, das häufig bei Erkältungen und Grippe genommen wird. Es enthält eine Reihe von Wirkstoffen wie Paracetamol, Ascorbinsäure, Coffein und Chlorphenaminhydrogenmaleat. Eine Kapsel Grippostad® C enthält 150 mg Ascorbinsäure und 200 mg Paracetamol.

Geräte: wie in Versuch 1

Chemikalien: wie in Versuch 1, anstelle der Ascorbinsäure-Lösung Grippostad® C Kapseln.

Durchführung: Der Versuch wird analog zu Versuch 1 durchgeführt. An Stelle von Ascorbinsäure verwendet man 12 pulverisierte Kapseln Grippostad® C, die in 200 mL Wasser gelöst werden. Dann gibt man 20 g Natriumhydroxid hinzu und löst dieses auf. Die Lösung färbt sich leicht orange; etwas fester Bodenkörper bleibt zurück. Ansonsten wird weiter wie in Versuch 1 verfahren.

Beobachtung und Auswertung: Die Ruheklemmenspannung liegt nach 5 Minuten bei 1,44 V und das Ruhepotential der Grippostad C-/ Grafitelektrode bei -0,16 V. Nach Anschluss des leistungsstarken Motors steigt das Anodenpotential auf +0,06 V und die Spannung fällt auf 1,06 V ab. Während des 10-minütigen Betriebes bleiben diese Werte in etwa konstant. Nach Abklemmen des Motors erholt sich die Ruheklemmenspannung auf ihren Ausgangswert (1,44 V), und das Ruhepotential der Grippostad C-/ Grafitelektrode liegt bei -0,13 V (Abb. 11).

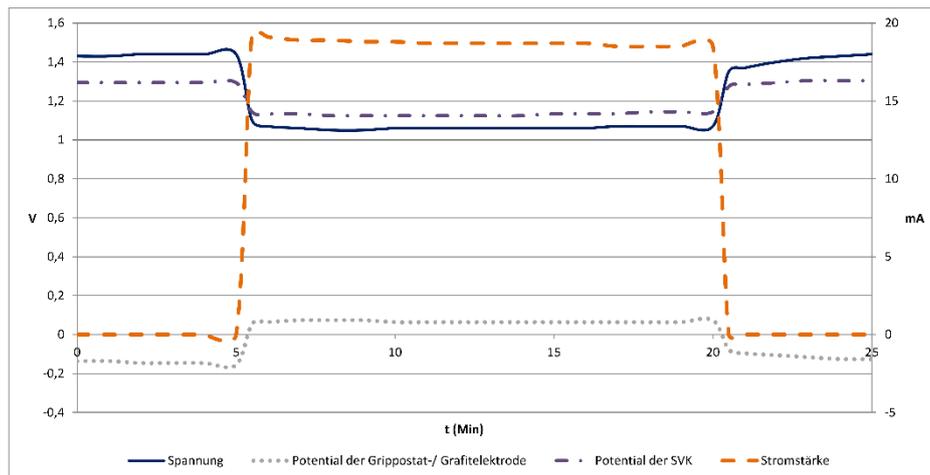


Abb. 11: Zeitlicher Verlauf von Spannung, Stromstärke (a) und Potential (b) der Grippostad® C-Sauerstoff-Batterie

Paracetamol ist ein N-Acetylderivat des p-Aminophenols. In [13] haben wir gezeigt, dass Paracetamol in alkalischer Lösung in einer organischen Batterie zu N-acetyl-Benzochinonimin oxidiert werden kann (Abb. 12). In der Grippostad-Batterie werden sowohl Ascorbinsäure als auch Paracetamol oxidiert. Im Laufe von einigen Tagen wird in alkalischer Lösung die Acetylgruppe abgespalten und das elektrochemisch noch besser geeignete p-Aminophenol gebildet. Dieses kann ebenfalls elektrochemisch zu einem Chinon-imin umgesetzt werden [13].

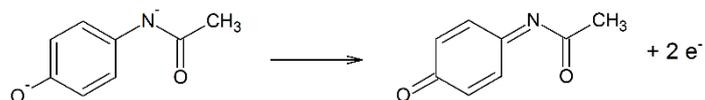


Abb. 12: Oxidation von Paracetamol in alkalischer Lösung

3. Ausblick

Neben Zitronen können auch andere Ascorbinsäure- haltige Früchte und Fruchtsäfte in organischen Batterien umsetzen. Wir haben mit Erfolg Extrakte von Vogelbeere (Ebereschen) und Paprika eingesetzt. Neben den von uns bisher beschriebenen organischen Batterien und Redox-Flow-Batterien zeigt die von OETKEN et al. beschriebene Methylenblau/Zink-Batterie die Redox-Vorgänge sehr eindeutig in der Farbänderung der elektrochemisch aktiven Substanzen [17].

Literatur

- [1] Bäßler, K. H. (1990). Die Bedeutung der Vitamine in der parenteralen Ernährung. *Transfusion Medicine and Hemotherapy* **17**/1, 19-23.
- [2] Rossow, J., Hauser, K., Netzker, R., Deutzmann, R. (2016). *Biochemie*. 4. Auflage, Thieme, Stuttgart, New York, 318-320.
- [3] Carpenter, K. J. (2012). The discovery of vitamin C. *Annals of Nutrition and Metabolism* **61**/3 259-264.
- [4] Wiehoczek, D. (2013). Das Vorkommen von Vitamin C. Im Internet: <http://www.chemieunterricht.de/dc2/asch2/a-vorkom.htm> - letzter Aufruf: 09.07.2018

- [5] Bader, H. J., Drechsler, B., Salzner, J., Dogan, B. (2001). Vitamin C als Nahrungsergänzung und Arzneimittelbestandteil. *Chemkon* **8/4**, 187-192.
- [6] Rosenberg, D., Behnisch, M., Pansegrau, S., Busker, M., Jansen, W. (2016). Speicherung elektrischer Energie mit neuartigen, organischen Batterien. *PdN-ChiS* **65/4**, 36-42.
- [7] Rosenberg, D., Wachholz, M., Busker, M., Jansen, W. (2016). Organische Batterien mit Alizarin. *PdN-ChiS* **65/3**, 14-19.
- [8] Rosenberg, D., Rehling, A., Busker, M., Jansen, W. (2016). Organische Batterien mit Gallussäure, Pyrogallol und grünem Tee - Schulexperimente zur Demonstration von Flow-Batteries. *PdN-Chemie in der Schule* **65/6**, 22-27.
- [9] Klaus, M., Hasselmann, M., Rubner, I., Mößner, B., Oetken, M. (2014). Metall-Luft-Batterien mit einer neuartigen Kohlelektrode. *Chemkon* **21/2**, 65-71.
- [10] Pfeilsticker, K., Marx, F. (1974). Gaschromatographische Methode zur Trennung und Bestimmung von L-Ascorbinsäure und ihren Oxydationsprodukten. *Chromatographia* **7/7**, 366-368.
- [11] Schildknecht, H. (1963). Abwehrstoffe der Anthropoden, ihre Isolierung und Aufklärung. *Angew. Chem.* **75**, 762-771.
- [12] Schildknecht, H. (1970). Die Wehrchemie von Land-und Wasserkäfern. *Angew. Chem.* **82**, 17-25.
- [13] Rosenberg, D., Pansegrau, S., Wachholz, M., Busker, M., Jansen, W. (2018). Organic Redox-Flow Batteries Using Hair Dyes and Pharmaceuticals. *WJCE* **6/1**, 63-71.
- [14] Habekost, A. (2015). Die Elektrochromie von Tetramethylphenylendiamin, Diphenylamin und Methylviologen im Vergleich. *PdN-Chemie in der Schule* **64/8**, 13-18.
- [15] Hamann, C. H., Vielstich, W. (1998). *Elektrochemie*. Wiley-VCH-Verlag, Weinheim.
- [16] Peper-Bienzeisler, R., Bröll, L., Pöhls, C., Jansen, W. (2013). Untersuchungen zur Zitronenbatterie. *Chemkon* **20/3**, 111-118.
- [17] Quarthal, D., Novotny, J., Oetken, M. (2018). Die „Blue Bottle“-Redox-Fow-Batterie. *Chemkon* **25/2**, 74-81.