

Wie viel Energie steckt in der Zitrone?

Forschendes Lernen am Beispiel der Zitronenbatterie

Erich Reichel, Eduard Schittelkopf

Wenn es gelingt, forschendes Lernen auf möglichst alle gängigen Experimente im Unterricht zu übertragen, wird Forschen im naturwissenschaftlichen Unterricht zur Selbstverständlichkeit. Der Wunsch, dass diese Methode im Schulalltag berücksichtigt wird, besteht bereits seit dem Jahr 1811. Maria Edgeworth hat vor zweihundert Jahren die Forderung vertreten: „*Laboraktivitäten können Lernenden helfen, naturwissenschaftliche Phänomene zu verstehen*“ (Edgeworth & Edgeworth, 1811). Auch wenn Experimente heute Bestandteil eines guten naturwissenschaftlichen Unterrichts darstellen, werden Möglichkeiten, Forschungsprozesse im Schulalltag zu verankern, oftmals wegen Zeitmangels oder fehlender Ressourcen nicht genutzt.



Abb. 1: Zinkbarren, gediegenes Kupfer und Zitrone

Am Beispiel der Zitronenbatterie soll die Möglichkeit, das Forschen im Klassenzimmer zu praktizieren, aufgezeigt werden. Für dieses Experiment sind weder Zinkbarren im Kilogramm-Bereich noch gediegenes Kupfer aus der Ray Copper Mine in Arizona notwendig.

Wie viel Energie steckt in der Zitrone? Auch wenn diese Frage eine gute Möglichkeit darstellt, Fehlvorstellungen (Wie viel Strom liefert die Zitrone?) im Unterricht zu bearbeiten, steht sie nicht an vorderster Stelle im Interesse der Schüler und Schülerinnen. Das Phänomen zu beobachten, dass Zitronen elektrische Energie „erzeugen“, ist für die meisten Lernenden ausreichend und führt zu keinen weiteren Beobachtungen, wenn nicht seitens der Lehrkraft noch die eine oder

Mag. Dr. Erich Reichel und Eduard Schittelkopf sind Hochschullehrer im Bildungsmanagement an der PH Steiermark. E-Mail: Erich.Reichel@phst.at bzw. Eduard.Schittelkopf@phst.at

andere Variante in Bezug auf Elektrodenmaterial, Fruchtkörper oder elektrische Messungen eingefordert werden.

Um einen Forschungszyklus im Unterricht zu ermöglichen, werden die Schüler/innen ermutigt, möglichst viele Beobachtungen bzw. Fragen und Variationen des Experiments aufzuschreiben. Für unsere Untersuchungen haben wir ein Zink/Kupfer-Element in einer Zitrone gewählt. Zur Förderung der Kompetenzen nach dem österreichischen Kompetenzmodell für Naturwissenschaften (Sekundarstufe 1) „*Beobachtungen formulieren*“ und „*Fragen stellen*“ ist dieses Experiment aus unserer Sicht sehr gut geeignet (bifie, 2011). Für die Kompetenz „ein eigenes Experiment zu planen“ haben wir im Anschluss Variationen zur Zitronenbatterie ausgewählt. Wir haben die Fragen der Schüler und Schülerinnen zur galvanischen Zelle (Zitronenbatterie) den Fragen der Lehrpersonen gegenübergestellt, und konnten nur wenige Gemeinsamkeiten erkennen. Ein nachhaltiger Unterricht aus unserer Sicht findet jedoch nur dann statt, wenn wir die Fragen der Schüler/innen in unserer Unterrichtsvorbereitung berücksichtigen.

Demonstrationsexperiment: Zn/Cu-Element



Abb. 2: Zitrone mit Zink- und Kupferelektroden

Als Demonstrationsexperiment werden eine Zink- und eine Kupferplatte getrennt durch ein Filterpapier (Küchenrolle) gemeinsam in den vorbereiteten Schnitt einer Zitrone gesteckt. Bedingt durch den geringen Abstand der beiden Elektrodenplatten ist ein Kurzschluss-Strom von ca. 10 mA zu erwarten. Dies reicht, um einen Glockenankermotor (LEMO-SOLAR) einige Minuten lang am Laufen zu halten.

Nun ist ausreichend Zeit, Variationsvorschläge zu diesem Experiment von den Schülern und Schülerinnen einzufordern und am Demonstrationsexperiment die ersten Fragen gemeinsam zu beantworten.

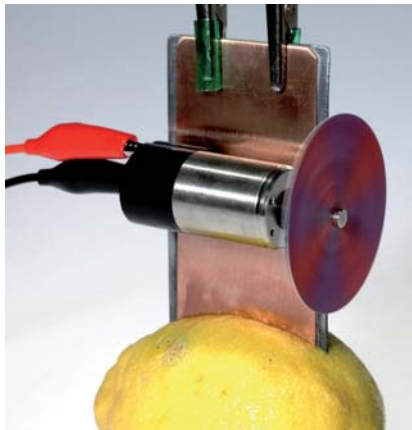


Abb. 3:
Glockenankermotor,
Zink/Kupfer Element
und Zitrone

Diese ersten Fragen wie zum Beispiel: „Was passiert, wenn man die Kabel an den Metallplatten vertauscht?“ sind sehr gut geeignet, die Schüler und Schülerinnen aufzufordern, dieses Experiment sofort vor der Klasse am Demonstrationsobjekt auszuprobieren und die Ergebnisse zu diskutieren. Die Vermutung, dass die geänderte Stromrichtung Einfluss auf die Drehrichtung hat, wird von den meisten Schülern und Schülerinnen noch nicht geäußert. An dieser Stelle kann nun die Beobachtung der Drehrichtung der Scheibe im Besonderen eingefordert werden. Weitere Fragen wie: „Wofür benötigt man das Filterpapier?“ oder „Funktioniert das Experiment auch mit gleichen Metallplatten?“ sind auf ähnliche Weise zu bearbeiten. Schülerfragen durch Experimente zu überprüfen ist der Ausgangspunkt auf dem Weg zum forschenden Lernen.

Wird auf das Filterpapier verzichtet und werden die beiden Metallplatten in einem Abstand von wenigen Millimetern in die Zitrone gesteckt, sind beim Zink/Kupferplatten-Element Stromstärken von maximal 1 mA, beim Zink/Kupferoxidplatten-Element Stromstärken bis zu 6 mA zu erwarten. Die höheren Stromstärken des Zink/Kupferoxid-Elements sollen die Schüler und Schülerinnen ermutigen, Variationen mit diesen Metallkombinationen auszuprobieren.

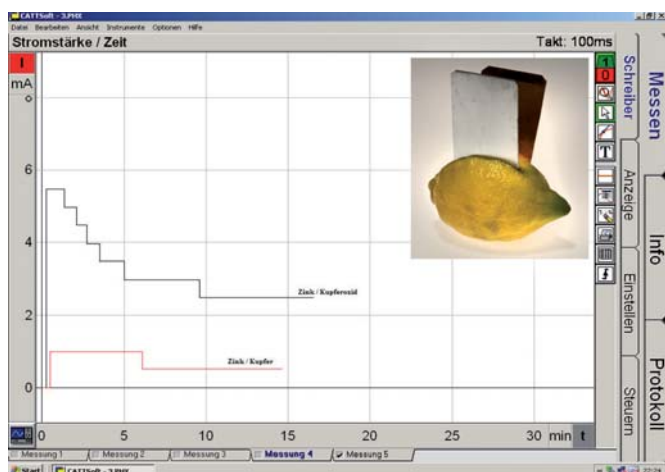


Abb. 4: Gemessener Kurzschluss-Strom bei Zink/Kupfer und Zink/Kupferoxid

Schüler/innen-Experiment

Meine Frage, mein Experiment, meine Präsentation

Als besonders geeignet erweisen sich Fragen, um einen Forschungszyklus in Gang zu setzen, wenn Schüler und Schülerinnen eigene Experimente planen, Messungen durchführen und Beobachtungen dokumentieren. Die Planung des eigenen Experiments wird von jedem Schüler und jeder Schülerin in Absprache mit der ganzen Klasse vorgenommen. Dokumentation der vorhandenen Materialien, Durchführung des Experiments und der entsprechenden Messungen, neue Beobachtungen und weitere Fragestellungen werden im Forschungsheft eingetragen. Das eigene Experiment und die daraus folgenden Ergebnisse sollen in einem Kurzvortrag dem gesamten Forschungsteam präsentiert werden.

Podcast – „Forscher/innen-Interview“

Die Aufbereitung der Ergebnisse als Podcast seitens der Schüler und Schülerinnen erleichtert die Koordination von mehr als 20 unterschiedlichen Experimenten und deren Präsentation. Die Kompetenzbereiche „Wissen organisieren“ und „Schlüsse ziehen“ des österreichischen Kompetenzmodells Naturwissenschaften 8. Schulstufe können durch die Erstellung von Audios besonders gefördert werden. Initiativen wie Radioigel (<http://www.radioigel.at>) zeigen recht eindrucksvoll, wie Interesse geweckt werden kann, damit ein aktiver Lernprozess entsteht. Radioigel steht für *Interesse generiert Lernen* und stellt eine neue Lernplattform für Schulen zur Verfügung. Ohne die Ablenkung durch Bilder müssen Inhalte viel konzentrierter und durchdachter dargeboten werden. Radioigel entstand aus der Arbeit einer Projektgruppe von Lehrer/innen der NMS Webling (Graz), welche sich mit Themen wie „Schreiben fürs Sprechen“, „Sprechen fürs Hören“ und „Studiotechnik“ beschäftigt haben.

Variationen und Besonderheiten des Experiments Zitronenbatterie

Innenwiderstand elektrochemischer Spannungsquellen

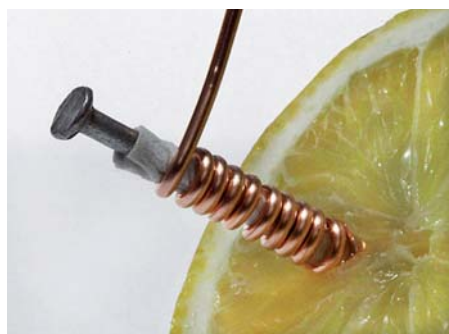


Abb. 5: Verzinkter Drahtstift mit Filterpapier und Kupferdraht

Schließen wir an die Spannungsquelle einen Verbraucher an, so wird die Spannung an der Spannungsquelle kleiner. Dieser Spannungsabfall hängt mit dem Innenwiderstand unseres galvanischen Elements zusammen. Um den Innen-

widerstand einer Spannungsquelle rasch zu beurteilen, ist es bei Eigenbau-Elementen ausreichend, die Leerlaufspannung (U_0) und die Stromstärke im Kurzschluss (I_K) zu messen und mit der Formel $R_i = U_0 / I_K$ zu berechnen.

Aufzeichnung der Messwerte mit Hilfe der Schreibfunktion der Software

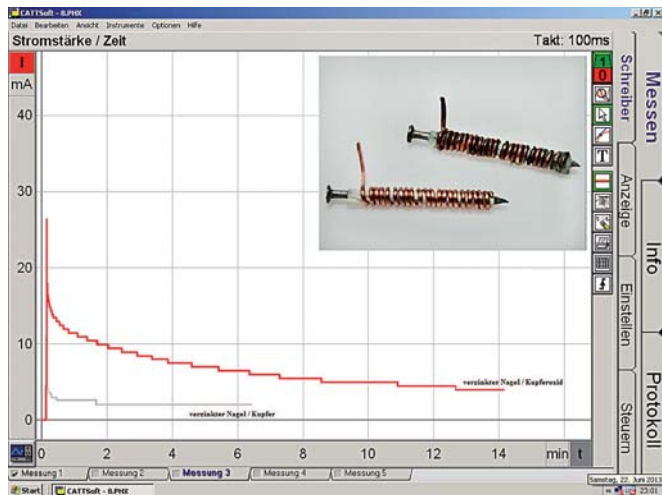


Abb. 6: Kurzschluss-Strom zur Beurteilung des Innenwiderstands eines galvanischen Elements

Der Innenwiderstand des Drahtstift-Elementes (Zink/Kupfer) steigt innerhalb von 6 Minuten von 200Ω auf 500Ω . Wesentlich bessere Werte sind mit dem Drahtstift-Element (Zink/Kupferoxid) zu erreichen. Hier ist zu Beginn der Messung der Innenwiderstand mit 37Ω wesentlich niedriger als beim vergleichbaren Zink/Kupfer-Element. Nach 14 Minuten ist der Innenwiderstand des Zn/CuO-Elements noch immer kleiner als der Innenwiderstand des Zn/Cu-Elements zu Beginn der Messung.

Zn/Cu-Element und Zn/CuO-Element mit kleinem Plattenabstand und großer Elektrodenfläche

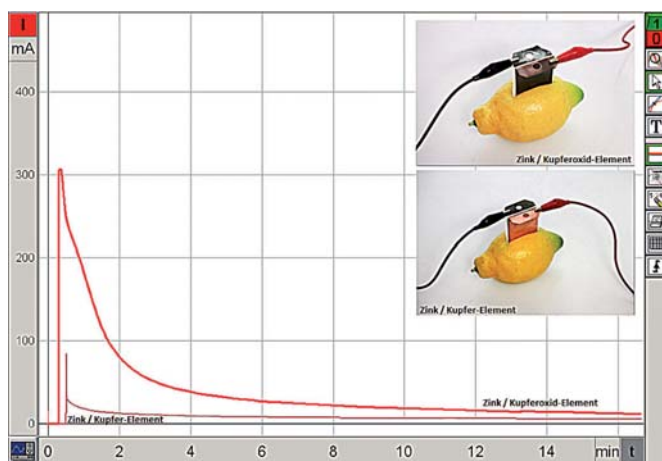


Abb. 7: Kurzschluss-Strom zur Beurteilung des Innenwiderstands eines galvanischen Elements

Berücksichtigt man beim Zitronen-Batterie-Experiment den Abstand der Elektroden, die Größe der Zink- und Kupferplatte und die oxidierte Form des Kupfers, so können mit geringem Aufwand ausreichend hohe elektrische Werte erreicht werden.

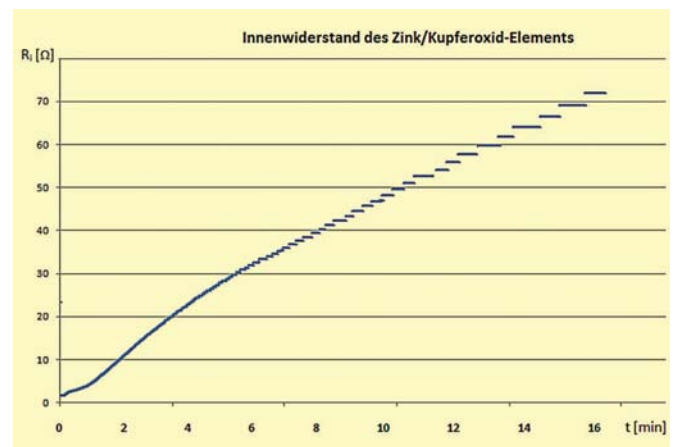


Abb. 8: Zeitverlauf des Innenwiderstands des Zink/Kupferoxid-Elements

Der Innenwiderstand des Zink/Kupferoxid-Elements erhöht sich zwar nach einigen Minuten von 2Ω auf 70Ω , jedoch können unter diesen Bedingungen Verbraucher wie die beschriebenen Elektromotoren sehr gut eingesetzt werden.

Messwert-Dokumentation mit Voltmeter, Amperemeter und Stoppuhr



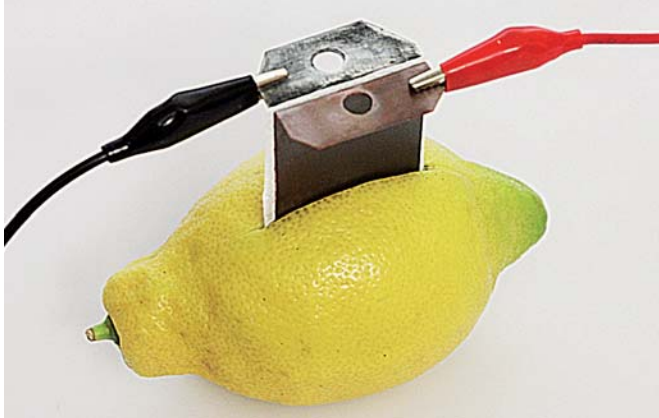
Abb. 9: Messwert-Dokumentation – Anordnung für Videodokumentation der Messwerte

Der Zugriff auf Messgeräte mit automatischer Schreibfunktion ist nicht immer möglich. Um den Spannungs- und Stromstärkeverlauf einer Messung zu dokumentieren können die vorhandenen digitalen Kommunikationsmedien der Schüler und Schülerinnen genutzt werden. Mit Hilfe von Fotos oder Videoaufnahmen sollen die sich ändernden Messwerte der Spannung, der Stromstärke und der Zeit in Tabellen übertragen und als Diagramme dargestellt werden.

Leistung des galvanischen Elements (Zn/CuO) bei unterschiedlicher Last

Welche Leistung $P = U \cdot I$ bringt die galvanische Zelle während der Arbeit?

Um die Leistung einer galvanischen Zelle unter verschiedenen Belastungen zu bestimmen werden unterschiedliche Verbraucher in den Stromkreis geschaltet. In unserem Fall verwenden wir Widerstände von 2 bis 150 Ω .



Elektroden	Zink / Kupferoxid
Elektrolyt	Zitronensaft
Leerlaufspannung	$U_0 = 0,947 \text{ V}$
Kurzschluss-Strom (gemessen)	$I_K = 0,300 \text{ A}$

Abb. 10: Zink/Kupferoxid-Element

Elektrischer Lastwiderstand	Spannung	Stromstärke	Leistung
2 Ω	0,163 V	0,097 A	0,016 W
5 Ω	0,300 V	0,066 A	0,020 W
8 Ω	0,434 V	0,052 A	0,023 W
11 Ω	0,562 V	0,050 A	0,028 W
16 Ω	0,734 V	0,046 A	0,034 W
31 Ω	0,830 V	0,026 A	0,022 W
47 Ω	0,866 V	0,018 A	0,016 W
64 Ω	0,886 V	0,014 A	0,012 W
78 Ω	0,894 V	0,011 A	0,010 W
91 Ω	0,902 V	0,010 A	0,009 W
108 Ω	0,910 V	0,008 A	0,008 W
122 Ω	0,914 V	0,007 A	0,007 W
142 Ω	0,918 V	0,006 A	0,006 W
155 Ω	0,924 V	0,006 A	0,006 W

Tab. 1: Leistung des Zink/Kupferoxid-Elements bei unterschiedlicher Last

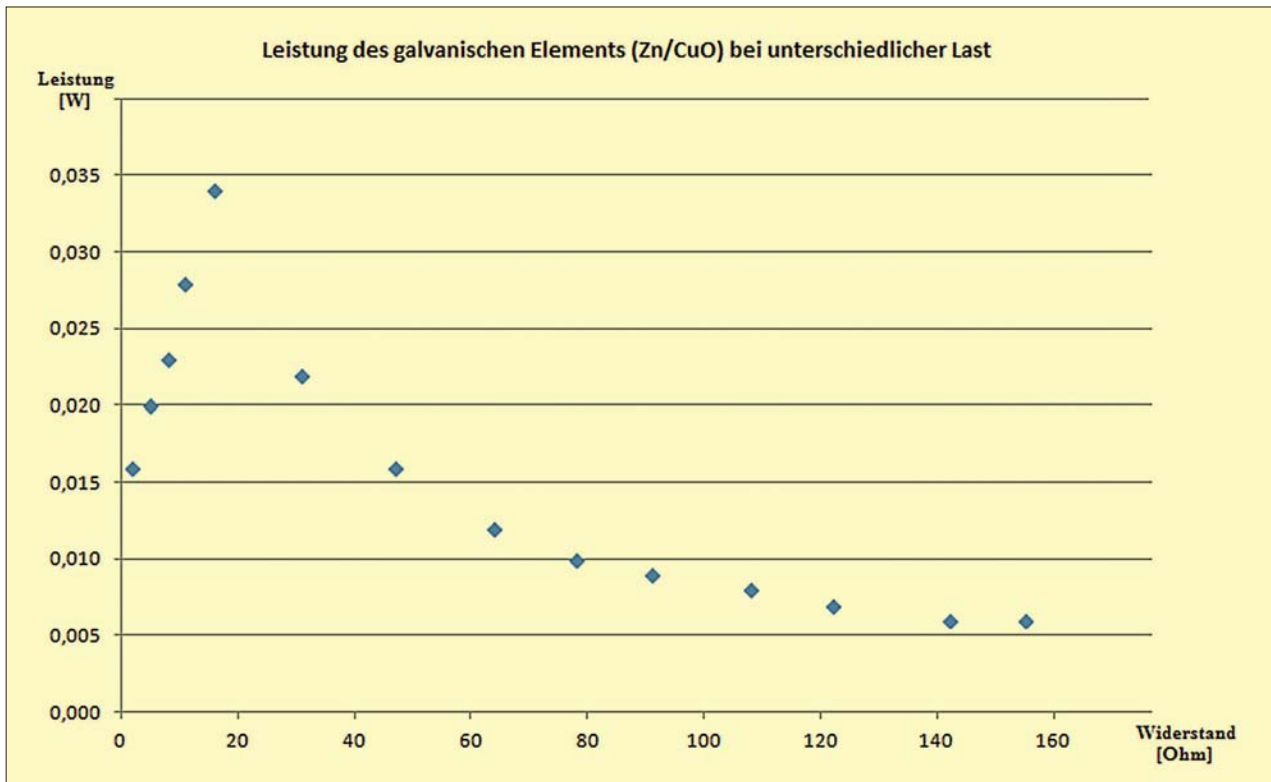


Abb. 11: Leistung bei unterschiedlicher Last

Bei einer elektrischen Last von ca. 15Ω erreicht das Zink/Kupferoxid-Element seine größte Leistung (34 mW). Ein Glockenanker-Motor mit einem Leerlaufstrom von ca. 4 mA (LEMO-SOLAR) kann unter diesen Voraussetzungen bis zu einer Stunde lang die elektrische Energie in Bewegungsenergie umwandeln. Für jedes selbst geplante und durchgeführte Experiment der Schüler und Schülerinnen bestätigt sich die Aussage von A. Witt und A. Flint, dass „mit der Auswertung der Versuche sich immer wieder neue Problemstellungen/Fragestellungen ergeben, welche zu weiteren Untersuchungen überleiten und so das Unterrichtsgeschehen in Fluss bringen“ (Witt, Flint).

Nun kann z.B. die Frage zur Leistung des galvanischen Elements („Wie ändert sich die Leistung des galvanischen Elements bei einer konstanten elektrischer Belastung?“) mit Diagrammen anschaulich bearbeitet werden.

Leistungsänderung des galvanischen Elements (Zn/CuO) bei konstanter Last (Solarmotor)

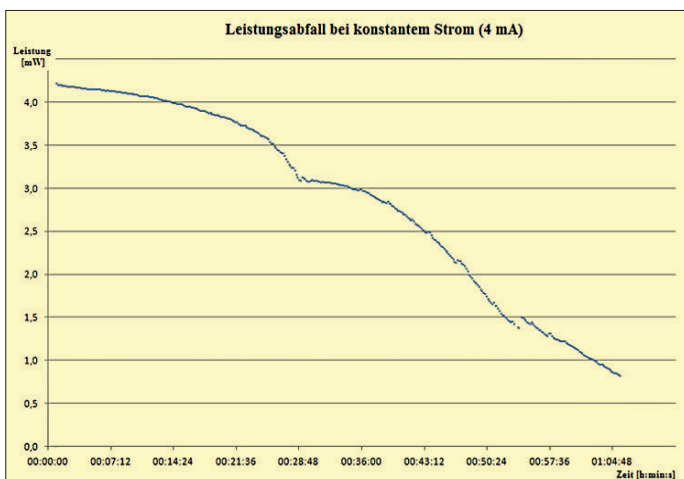


Abb. 12: Leistung bei konstanter elektrischer Last

Wie viel Energie steckt in einer Zitrone?

„Wie viel elektrische Energie ($E = U \cdot I \cdot t$) bezieht der Elektromotor während der Laufzeit aus dem Element?“ oder „Wie viel Energie steckt in einer Zitrone?“ kann mit dem besprochenen Beispiel des Solarmotors bzw. mit den Messwerten des Kurzschluss-Stroms, der Spannung und der Zeit recht einfach beantwortet werden. Die berechneten Werte liegen beim Zn/CuO-Element mit Solarmotor bei $E = 11,18 \text{ Ws}$ bzw. beim kurzgeschlossenen Zn/CuO-Element bei $E = 4,36 \text{ Ws}$.

Die Zitronenbatterie und das Glühlämpchen

Um ein Mini-Lämpchen (Conrad) zum Leuchten zu bringen, ist nicht nur eine Stromstärke von über 70 mA notwendig, sondern auch eine Spannung am Mini-Lämpchen von über 0,5 V. In der Tabelle „Leistung des galvanischen

Elements (Zn/CuO) bei unterschiedlicher Last“ kann man erkennen, dass diese Bedingungen noch nicht erfüllt sind ($R = 11 \Omega$; $U = 0,562 \text{ V}$; $I = 50 \text{ mA}$). Bei entsprechender Vergrößerung der Zink- und Kupferoxidelektroden kann man mit einer einzigen Zelle den Glühdraht eines Mini-Lämpchens mehrere Minuten lang zum Glühen bringen. Die Anordnung der Metallplatten ist wie ein Sandwich aufgebaut. Zwischen zwei Kupferoxidplatten befindet sich, getrennt durch Filterpapier, eine Zinkplatte. Die Fassung des Mini-Lämpchens ist mit einer Klemme an der Zinkplatte und mit der zweiten Klemme an der Kupferplatte angeschlossen. Die Klemmen dienen ausschließlich der Befestigung der Fassung des Lämpchens an den beiden Metallplatten.



Abb. 13: Zitronenbatterie mit einem leuchtenden Mini-Lämpchen ($U = 0,785 \text{ V}$; $I = 68,6 \text{ mA}$)

Literatur

- bifie (2011) Kompetenzmodell Naturwissenschaften 8. Schulstufe. Verfügbar unter https://www.bifie.at/system/files/dl/bist_nawi_kompetenzmodell-8_2011-10-21.pdf [19.03.2012].
- Conrad, Mini-Lämpchen 1.2 – 1.5 V Sockel = E55 (Best.-Nr.: 727920 – 62) <http://www.conrad.at/ce/de/product/727920/Mini-Laempchen-12-15-V-SockelE55-Klar-Bart-helme-Inhalt-1-St> [23.09.2013]
- Edgeworth, R. L. & Edgeworth, M. (1811). Essays on Practical Education. London: Johnson.
- IMST Newsletter, Kompetenzen und Standards in Mathematik und Naturwissenschaften, Jahrgang 11, Ausgabe 37, E. Reichel, E. Schittelkopf, *Förderung von experimentellen Kompetenzen*, S 10
- LEMO-SOLAR Solarmotor; Anlauf bei 0,15 V und 4 mA [www.lemo-solar.de](http://www.lemo-solar.de/shop/glockenankermotoren.php) Artikel Nr.: LE15 <http://www.lemo-solar.de/shop/glockenankermotoren.php> [23.09.2013]
- Witt, A. und Flint, A. „Chemie fürs Leben“ Elektrochemie Vom „umgekehrten Hittorf“ zu Kiwi, Kohlrabi & Co, Universität Rostock Institut für Chemie, Stand: März 2013, <http://www.chemie1.uni-rostock.de/didaktik/pdf/elektrochemie2.pdf> [23.09.2013]