



# Metamorphosen eines Experiments – Vom hightech UV-Tauchlampenreaktor zur Low-Cost TicTac<sup>®</sup>-Zelle

Yasemin Yurdanur\* und Michael W. Tausch\*<sup>[a]</sup>

**Zusammenfassung:** Anknüpfend an A. F. Kekulé's Definition des Forschungsgegenstands der Chemie werden die Metamorphosen des Modellexperiments Photo-Blue-Bottle aufgezeigt, das für die Simulation des Kreislaufs Photosynthese/Atmung entwickelt wurde. Das Experiment wurde auf der Grundlage fachwissenschaftlicher Erkenntnisse, sicherheitstechnischer Anforderungen sowie kommerziell verfügbarer Chemikalien und Lichtquellen im Sinne der didaktischen Zielsetzung schrittweise optimiert.

**Stichworte:** Modellexperiment · Photo-Blue-Bottle · Redoxreaktionen · Kreislauf Photosynthese/Atmung · Konzentrationszellen

## Metamorphoses of an Experiment – From Hightech UV Immersion Lamp Reactor to Low-Cost TicTac<sup>®</sup>-Cell

**Abstract:** Starting from A. F. Kekulé's definition regarding the object of research in chemistry, the metamorphosis of the model experiment Photo-Blue-Bottle is presented. This experiment has been developed in order to simulate the cycle of photosynthesis and respiration. Based on core concepts of chemistry and safety requirements as well as on commercially available chemicals and light sources, the experiment has optimized step by step.

**Keywords:** Model Experiment · Photo-Blue-Bottle · Redox Reactions · Cycle Photosynthesis/Respiration · Concentration Cells

### RECHTSCHREIBUNG

Worttrennung: Me|ta|mor|pho|se

### BEDEUTUNGSÜBERSICHT

1. (bildungssprachlich) Umgestaltung, Verwandlung
2. (Zoologie) Entwicklung vom Ei zum geschlechtsreifen Tier über selbstständige Larvenstadien (besonders bei Insekten)
3. (Botanik) Umbildung der Grundform eines pflanzlichen Organs zu einem Organ mit besonderer Funktion im Verlauf der Stammesgeschichte
4. (Geologie) Umwandlung und Umformung eines Gesteins in ein anderes als Folge einer Veränderung von Druck und Temperatur, denen das Gestein ausgesetzt ist
5. (Mythologie, Dichtung) Verwandlung eines Menschen in Tier, Pflanze, Quelle, Stein o. Ä.
6. (Musik) Veränderungen eines Themas in seiner Grundform (im Unterschied zur Variation eines vorgegebenen Themas)

**Abb. 1:** Quelle: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Metamorphose> (letzter Zugriff: 29.10.2018)

Allerdings trägt diese Definition dem Aufgaben- und Methodenspektrum der Chemiesdidaktik nicht zur Genüge Rechnung. Daher soll aus Sicht der Chemiesdidaktik der Begriff „Metamorphose“ mit „Innovation“ gekoppelt und als „Curriculare Innovation“ wie folgt präzisiert werden:

*Curriculare Innovation ist die Erneuerung und Anpassung der Lehrgänge an den Entwicklungsstand wissenschaftlicher Erkenntnisse und gesellschaftlicher Lebensformen in unserer technischen Zivilisation* [3].

Die damit verbundene **Curriculare Innovationsforschung** ist für die Fachdidaktik eine permanente Herausforderung. Sie betrifft sowohl die Auswahl der aus dem allgemeinen Wissenspool für den Unterricht aufzubereitenden Inhalte, als auch die Entwicklung lern- und erkenntnistheoretisch adäquater Methoden für die Vermittlung und die auf dieser Basis zu erstellenden Materialien für den Schulunterricht und für die universitäre Lehre (Abb. 2).

## 1. Metamorphosen – allgegenwärtig

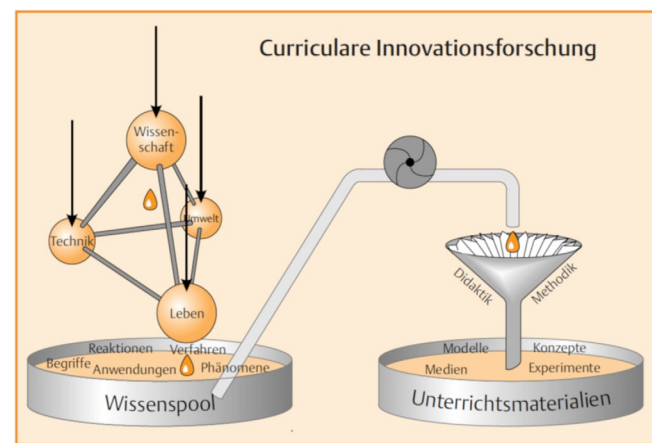
Googelt man nach der Definition von Metamorphose, so erscheinen die Ergebnisse aus Abb. 1 [1]:

Es ist bezeichnend, dass der Altmeister der Organischen Chemie, A. F. Kekulé, sich im Jahr 1859 bei der Definition der Chemie ebenfalls des Titelbegriffs dieses Beitrags bediente. Er stellte fest:

„**Chemie** ist die Lehre von den stofflichen Metamorphosen der Materie ... Ihr wesentlicher Gegenstand ist nicht die existierende Substanz, sondern vielmehr ihre Vergangenheit und ihre Zukunft. Die Beziehungen eines Körpers zu dem, was er früher war, und zu dem, was er werden kann, bilden den eigentlichen Gegenstand der Chemie“ [2].

In Anlehnung an die sechs Definitionen aus der digitalen Suchmaschine und an das historische Kekulé-Zitat ließe sich kurz und knackig fortfahren: **Chemiesdidaktik** ist die Lehre von den curricularen Metamorphosen des Chemieunterrichts.

[a] Y. Yurdanur, M. W. Tausch  
Bergische Universität Wuppertal  
Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften  
Gaußstr. 2  
42119 Wuppertal  
\* E-Mail: [yurdanur@uni-wuppertal.de](mailto:yurdanur@uni-wuppertal.de)  
[mtausch@uni-wuppertal.de](mailto:mtausch@uni-wuppertal.de)

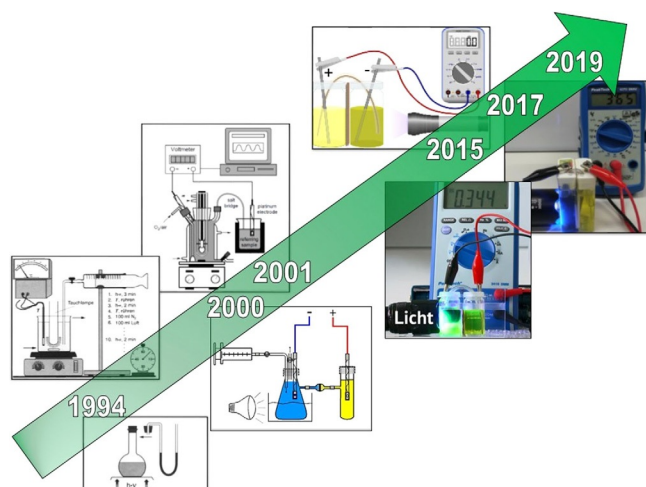


**Abb. 2:** Funktionsmodell der curricularen Innovationsforschung

Curriculare Innovationsforschung verläuft nach dem Modell aus Abbildung 2 und hat als Ziel die Erschließung von didaktisch prägnanten und wissenschaftlich konsistenten Materialien für Unterricht und Lehre. Als Prozess gesehen, beinhaltet curriculare Innovationsforschung die Metamorphose von wissenschaftlichem Fachwissen (*scientific content knowledge*) zu didaktischem Fachwissen (*pedagogical content knowledge*). In ihrer Gesamtheit ist curriculare Innovationsforschung die Synthese aus wissenschaftlicher Grundlagenforschung und angewandter Forschung in der Chemiedidaktik, denn sie generiert neues Wissen über das Lehren und Lernen der Chemie und liefert praktischen Service für den Chemieunterricht.

## 2. Das Photo-Blue-Bottle Experiment – Metamorphosen in einem Vierteljahrhundert

Das **Photo-Blue-Bottle Experiment** ist ein Modellexperiment zum Kreislauf Photosynthese/Atmung. Es wurde erstmalig im Jahr 1994 publiziert [4]. In den 25 Jahren seither hat es mehrere Metamorphosen durchlaufen und hat sich dabei so verändert, dass sich die ursprüngliche Versuchsanordnung aus Abb. 3 und die aktuelle (2019) kaum noch ähneln (Abb. 3). Was geblieben ist, zeigt sich auf phänomenologischer Ebene in den sehr oft (mindestens 20mal) wiederholbaren Farbzyklen gelb – blau – gelb, die mit der Lösung aus dem Photo-Blue-Bottle Experiment durchgeführt werden können. Dabei wird die Farbänderung der PBB-Lösung von gelb nach blau mit Licht angetrieben, die Rückfärbung von blau nach gelb durch Einbringen von Luft (Sauerstoff) in die Lösung (s. Basisversion in Abb. 5).



**Abb. 3:** Das Photo-Blue-Bottle Experiment im Wandel von 1994 bis 2019

Beim ursprünglichen Aufbau des Experiments wurde die PBB-Lösung (Methylviologen  $MV^{2+}$ , Proflavin  $PF^+$  und EDTA in wässriger Lösung – vgl. Hinweis zu Konzentrationen im digitalen Materialpaket „NEIK – Lichtlabor Pflanze“, s. Abb. 6) in einem Standkolben auf einen Tageslichtprojektor gestellt und mit dessen Halogenlampe bestrahlt. Alternativ und schneller zur Blaufärbung führend wurde ein Tauchlampenreaktor mit einer 120-Watt Quecksilber-Hochdrucklampe als Lichtquelle genutzt. Selbst damit gelang es aber trotz größter Anstrengungen über einige Jahre hinweg nicht, den Effekt der Energiespeicherung in der durch Lichtbestrahlung blau gefärbten PBB-Lösung nachzuweisen. Der Durchbruch gelang schließlich, als in den Jahren 2000 und 2001 Versuchsanordnungen nach dem Prinzip von Konzentra-

tionszellen in den beiden Varianten aus Abb. 3 verwirklicht wurden [5].

Vorausgegangen war die Überlegung, dass durch die Zunahme der Konzentration von  $MV^+$  in der bestrahlten Halbzelle sich das Redoxpotenzial des Redoxpaares  $MV^+/MV^{2+}$  in der blauen PBB-Lösung, also der bestrahlten Halbzelle, entsprechend der Nernst-Gleichung zu negativeren Werten verschieben müsste:

$$E = -0,45 \text{ V} + \frac{0,059}{1} \text{ V} \lg c(MV^{2+})/c(MV^+);$$

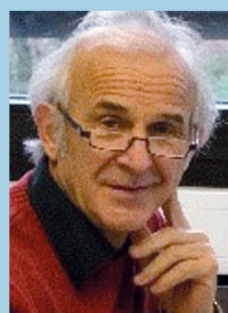
$$E^\circ(MV^+/MV^{2+}) = -0,45 \text{ V}$$

Folglich sollte wie bei den im Chemieunterricht üblichen Konzentrationszellen eine Potenzialdifferenz entstehen und eine Zellspannung zwischen der bestrahlten und unbestrahlten Halbzelle zu messen sein. Tatsächlich konnte in diesen Versuchsanordnungen anhand der Spannungsmessung die Umwandlung von Licht in chemische Energie und die Speicherung im reduzierten Substrat bestätigt werden. Damit war eine zusätzliche und entscheidende Analogie zwischen den Prozessen im Modellexperiment und in der Natur phänomenologisch erschließbar und konzeptionell erklärbar geworden. Der Tauglichkeit als Schulversuch standen allerdings noch zwei wichtige Hürden im Weg, das *giftige* Substrat Methylviologen und die *teuren* Versuchsvorrichtungen.

Diese Hürden wurden in den letzten Jahren schrittweise aus dem Weg geräumt. Im Rahmen von Abschlussarbeiten konnten Frederic Posalla und David Nietz die Versuchsvorrichtung im Jahr 2013 auf Miniatur-Halbzellen aus Schnapdeckelgläsern, Platinelektroden und einem Diaprojektor mit einer 200-Watt Halogenlampe oder einer 300-Watt Ultravitalux-Lampe als Lichtquelle umbauen [6]. Durchgreifende Verbesserungen brachte Maria Heffen im Rahmen ihrer DFG-geförderten Promotionsarbeit. Sie substituierte das giftige Methylviologen durch harmloses Ethylviologen, die Platinelektroden durch Elektroden aus Edelstahl, die Halogenlampen durch LED-Ta-



Yasemin Yurdanur schloss 2014 ihr Studium mit dem 1. Staatsexamen in den Fächern Chemie und Mathematik für das Lehramt an Gymnasien an der Universität Paderborn ab. Während des Studiums war sie als Stipendiatin der Stiftung Deutscher Wirtschaftsdw Vertrauensperson beim Studienkompass für Abiturienten. 2014 arbeitete sie als Vertretungslehrkraft für Mathematik und war in der Chemiedidaktik an der Universität Paderborn. Sie absolvierte 2016 das Referendariat am Zentrum für schulpraktische Ausbildung Krefeld und ist seit November 2016 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Bergischen Universität Wuppertal. Ihr Promotionsthema ist die curriculare Einbindung photochemischer Inhalte in den Chemieunterricht.



Michael W. Tausch, langjähriger Chemielehrer an der KGS Weyhe und Professor für Chemie und ihre Didaktik an den Universitäten Duisburg und Wuppertal entwickelt Lehr-/Lernmaterialien als Print- und Elektronikmedien sowie als Interaktionsboxen mit experimentellem Equipment. Sein Forschungsinteresse gilt insbesondere der curricularen Innovation des Chemieunterrichts und des Chemie-Lehramtsstudiums. Einen Schwerpunkt bilden dabei die Prozesse mit Licht. Auf diesem Gebiet leistet er Pionierarbeit für den Chemieunterricht und die benachbarten MINT-Fächer. M. W. Tausch erhielt im Jahr 2015 als erster Chemiedidaktiker den neu eingerichteten Heinz-Schmidkunz-Preis der Gesellschaft Deutscher Chemiker.



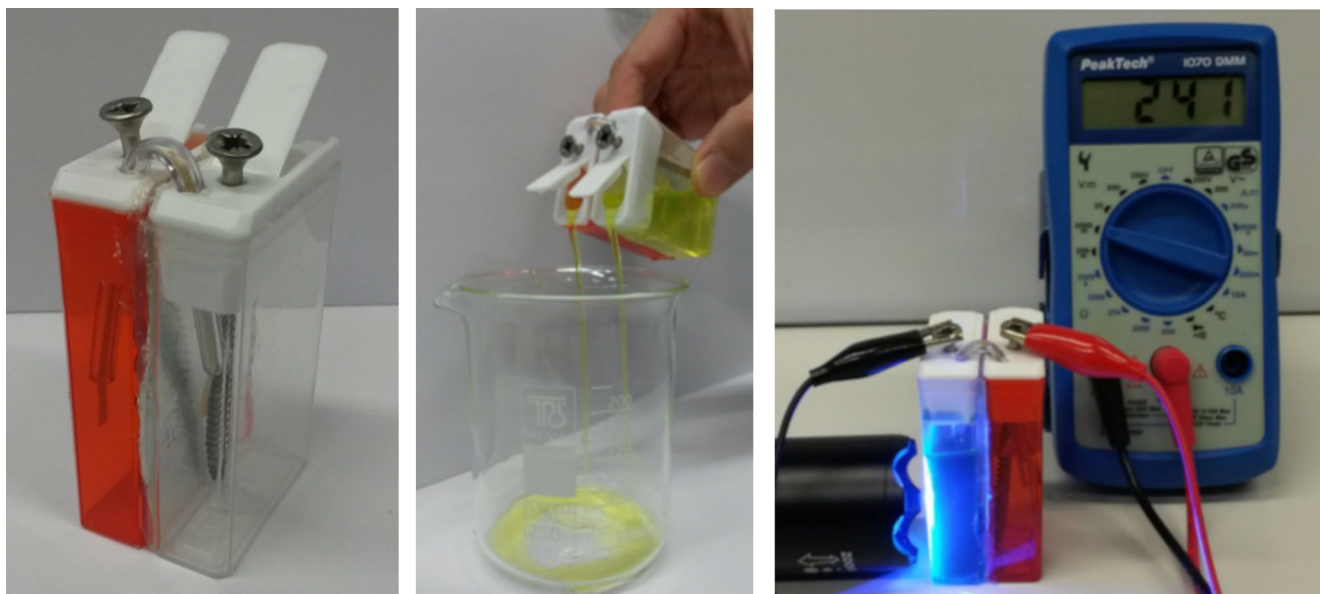


Abb. 4: Die TicTac®-Konzentrationszelle zum Selbstbauen

schenlampen und entwickelte eine Miniatur-Elektrolytbrücke, die gleichermaßen effizient und robust ist [7,8,9]. Die neueste Variante des Photo-Blue-Bottle Experiments, die TicTac®-Konzentrationszelle (Abb. 4), entstand im Rahmen einer explorativen Feldstudie der Autorin dieses Beitrags zum Thema „Ein Modellexperiment zur Energieumwandlung und -speicherung in einer lichtgetriebenen Konzentrationszelle“.

An der Studie haben 100 Oberstufenschüler/-innen aus sechs nordrhein-westfälischen Schulen teilgenommen. Zuerst wurde das PBB-Basisexperiment (Abb. 5) durchgeführt und anschließend arbeiteten die Lernenden mit der PBB-Konzentrationszelle von M. Heffen (Abb. 3, 2015). Bei der Observation der Lernenden fiel auf, dass die Handhabung beim Befüllen und Entleeren der Schnappdeckelgläser etwas unpraktisch erschien. Zudem konnte die Trennwand aus Pappe zwischen den Halbzellen schnell durch unsauberes Arbeiten angefeuchtet werden. Diese Unbequemlichkeiten wurden durch den Austausch der Schnappdeckelgläser mit handelsüblichen TicTac®-Dosen für Frischepastillen beseitigt. Als Trennwand wurde zwischen die Halbzellen ein Stück Alufolie geklebt. Obwohl die Lichtdurchlässigkeit des Kunststoffmaterials, aus dem die TicTac®-Dosen bestehen, im Vergleich zu Glas schwächer ist, erhält man ähnliche Spannungswerte wie bei den Konzentrationszellen aus Schraubdeckelgläsern. Die TicTac®-Konzentrationszellen können von den Lernenden auch zu Hause gebaut und mit in den Unterricht genommen werden. Diese TicTac®-Zellen sind auch für andere Versuche aus der Elektrochemie geeignet. Zum Beispiel wurden Sie von Lehramtsstudierenden der Universität Wuppertal im Laborpraktikum für schulorientiertes Experimentieren als ein weiterer Versuchsaufbau für das Daniell-Element eingesetzt.

onszellen können von den Lernenden auch zu Hause gebaut und mit in den Unterricht genommen werden. Diese TicTac®-Zellen sind auch für andere Versuche aus der Elektrochemie geeignet. Zum Beispiel wurden Sie von Lehramtsstudierenden der Universität Wuppertal im Laborpraktikum für schulorientiertes Experimentieren als ein weiterer Versuchsaufbau für das Daniell-Element eingesetzt.

### 3. Mit Photo-Blue-Bottle forschend-entwickelnd lernen

In Zeitschriftenartikeln [4–8], Schulbüchern [10] und Lehrerfortbildungskursen wurden unterschiedliche Möglichkeiten der didaktischen Verwertung für das Photo-Blue-Bottle Experiment vorgestellt. Sie bewegen sich auf *unterschiedlichen fachlichen Niveaus* (vom Anfangsunterricht bis zur Qualifikationsphase in der Oberstufe und darüber hinaus) und fokussieren *unterschiedliche lehrplankonforme Inhalte* des Chemieunterrichts (Stoffkreisläufe, Energieumwandlung, Redoxreaktionen, Gleichgewichte, Katalyse, Farbstoffe). Gemeinsam ist, dass bei diesen unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten forschend-entwickelnd vorgegangen wird, d.h. von der Basisversion (Abb. 5) des Photo-Blue-Bottle Experiments ausgehend,

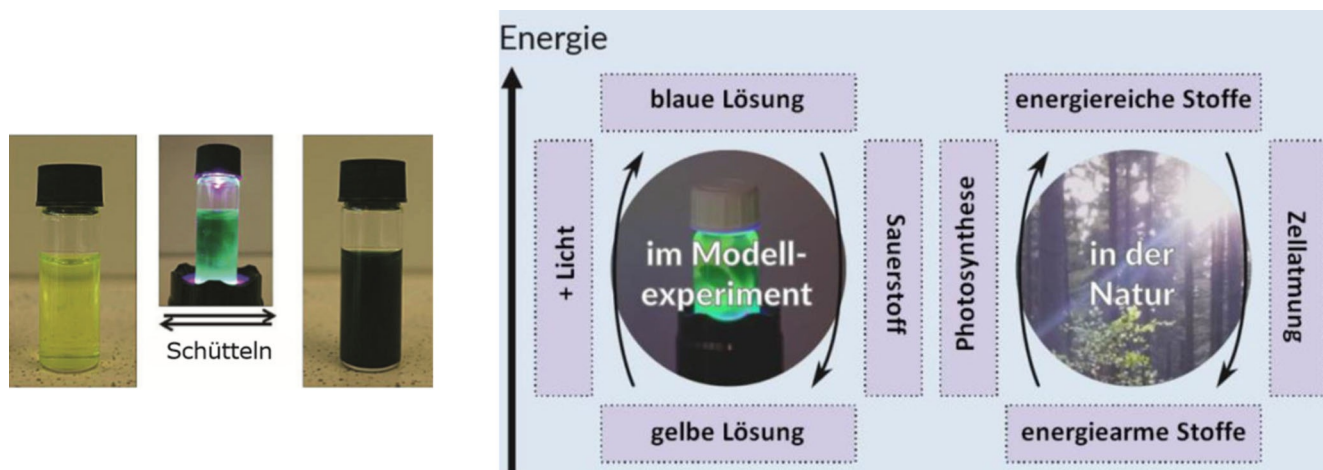


Abb. 5: Basisversion des Photo-Blue-Bottle Experiments und Analogien zum natürlichen Kreislauf Photosynthese/Atmung in vereinfachter Darstellung

werden hypothesengeleitet weitere Experimente geplant, durchgeführt und ausgewertet.

Im Vergleich zu den Stoffkreisläufen und den Energieumwandlungen beim Kreislauf Photosynthese/Atmung können bereits auf niedriger fachlicher Ebene (Abb. 5) ohne Formeln und Reaktionsmechanismen folgende *sieben Gemeinsamkeiten* (Analogien) zwischen Modellexperiment und Natur erschlossen werden:

- der Kreislauf des Substrats im Experiment entspricht dem Kohlenstoff-Kreislauf in den Prozessen der Photosynthese/Atmung;
- beide Kreisläufe beinhalten eine Oxidation und eine Reduktion;
- in beiden Kreisläufen wirkt Sauerstoff aus der Luft als Oxidationsmittel;
- in beiden Kreisläufen verläuft die Reduktion endergonisch und wird durch sichtbares Licht angetrieben;
- in beiden Kreisläufen laufen die Reaktionen in wässriger Lösung ab;
- in beiden Kreisläufen wird Licht in chemische Energie umgewandelt und im reduzierten Substrat bis zu dessen Oxidation gespeichert.

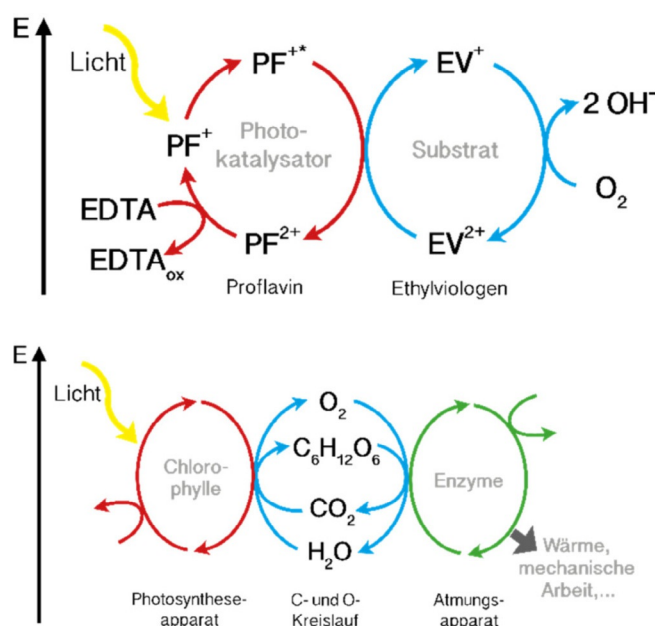
Auf weitere Analogien, die in der Oberstufe thematisiert werden können (z.B. elektronische Anregung, Elektronentransfer, Redoxpotenziale, Nernst-Gleichung, Relation Molekülstruktur-Farbigkeit etc.), wird u.a. im Materialienpaket „NEIK (Nachhaltige Experimente Innovative Konzepte) – Lichtlabor Pflanze“ eingegangen (Abb. 6).

Im NEIK-Paket „Lichtlabor Pflanze“ nimmt das Photo-Blue-Bottle Experiment eine zentrale Rolle ein. Die Materialien können kostenlos über den QR-Code oder die Internetadresse aus Abbildung 6 abgerufen werden. Ein Workshop mit gleichem Titel wird von uns in der Lehrerfortbildung angeboten. Wie immer bei Modellexperimenten gibt es auch *grundlegende Unterschiede* zwischen dem Photo-Blue-Bottle Experiment und dem Kreislauf Photosynthese/Atmung in der Natur:

- anders als im Experiment ist in der Natur an den Kohlenstoff-Kreislauf auch der Sauerstoff-Kreislauf gekoppelt;
- anders als im Experiment verlaufen sowohl die Reduktion von Kohlenstoffdioxid als auch die Oxidation von Kohlenhydraten in offenen Systemen und Beteiligung vieler Stoffe (Blattpigmente, Enzyme u.a.) sowohl im photosynthetischen Zentrum im Blatt als auch in den intrazellulären Mitochondrien;
- die Zahl der Reaktionsschritte (Elementarreaktionen) ist sowohl bei der Photosynthese als auch bei der Atmung weitaus höher als im Modellexperiment.



**Abb. 6:** Die Versuchsvorschriften und das Equipment für die Photo-Blue-Bottle Experimente sind über das digitale Materialienpaket „NEIK – Lichtlabor Pflanze“ zugänglich



**Abb. 7:** Gekoppelte Kreisläufe im Photo-Blue-Bottle Experiment und im natürlichen Kreislauf Photosynthese/Atmung

Und dennoch: Bei minimalem Aufwand an Chemikalien und Geräten können mit der Photo-Blue-Bottle-Lösung in nachhaltigen Schulexperimenten die fundamentalen Merkmale des wichtigsten biochemischen Stoffkreislaufs und der dabei beteiligten Energieformen erschlossen werden. Sie sind als gekoppelte Kreisläufe in Abbildung 7 zusammengefasst.

Daraus leiten sich innovative Konzepte für die Erforschung einer zukünftigen Energieversorgung unter Nutzung des Solarlichts ab. Das Motto könnte lauten: „Von der CO<sub>2</sub>-Biologie zur CO<sub>2</sub>-Ökonomie“ – allerdings nur wenn es gelingt, nach dem Muster der Natur Kohlenstoffdioxid photokatalytisch zu energiereichen Verbindungen (z.B. Alkohole, Kohlenhydrate oder gar Kohlenwasserstoffe) zu reduzieren [11].

#### 4. Ist das PBB-Experiment auch lehrplankonform?

In den Bildungsstandards für das Fach Chemie der Kultusministerkonferenz heißt es: „Die Chemie untersucht und beschreibt die stoffliche Welt unter besonderer Berücksichtigung der chemischen Reaktion als Einheit aus Stoff- und Energie-

Nachhaltige Experimente, Innovative Konzepte:  
Lichtlabor Pflanze

Vortragsfolien, Workshopfolien  
und Materialliste unter:



<http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/fortbildung/>



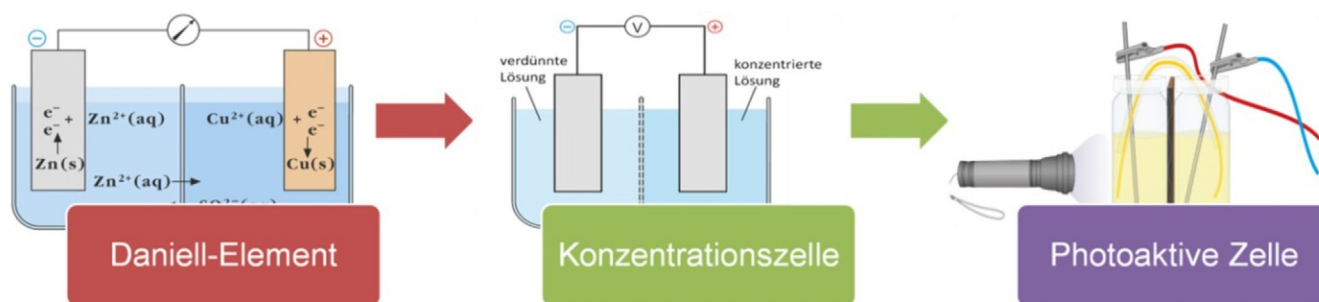


Abb. 8: Vom Daniell-Element zum „Solarakku“ [13]

umwandlung ... und die Schülerinnen und Schüler sollen für nachhaltige Nutzung von Ressourcen sensibilisiert werden“ [12]. Sinngemäße Zitate könnten aus allen landesspezifischen Lehrplänen (Rahmenplänen, Kernlehrplänen, Kerncurricula, Bildungsplänen etc.) angeführt werden.

Doch was bedeutet das konkret für die Umsetzung im Chemieunterricht? Galvanische Zellen gehören spätestens in der Sekundarstufe II zu den ländergemeinsamen Pflichtinhalten und sollen danach experimentell erschlossen werden. Sie werden im Kontext der Speicherung und Nutzung von elektrischer Energie unterrichtet. Das Daniell-Element fehlt in keinem Schulbuch und auch in keinem Chemie-Curriculum. Gleiches gilt für galvanische Zellen mit unterschiedlichen Redoxpaaren in den beiden Halbzellen. Und auch Konzentrationszellen, bei denen das gleiche Redoxpaar Red/Ox in unterschiedlichem Konzentrationsverhältnis  $c(\text{Red})/c(\text{Ox})$  vorliegt, gehören zum Standardrepertoire in der Oberstufe. Bei der photoaktiven Photo-Blue-Bottle Konzentrationszelle liegt die Besonderheit darin, dass es erst durch die Bestrahlung der Lösung in einer der Halbzellen zu unterschiedlichen Konzentrationsverhältnissen  $c(\text{EV}^+)/c(\text{EV}^{2+})$  kommt und daher eine Zellspannung aufgebaut wird (Abb. 8).

Nach dem Muster aus Abb. 8 ergibt sich eine kohärente Anknüpfung der photoaktiven Photo-Blue-Bottle Konzentrationszelle an lehrplankonforme Inhalte. Im Sinne des anfangs zitierten übergeordneten KMK-Bildungsstandards für das Fach Chemie kann und sollte diese als „Solarakku“ arbeitende Zelle Einzug in den Chemieunterricht finden.

Ganz konkret könnten beispielsweise bezogen auf den Kernlehrplan des Landes Nordrhein-Westfalen [14] folgende ausgewählte Kompetenzen gefördert werden: Die Schülerinnen und Schüler

- erklären den Aufbau und die Funktionsweise einer galvanischen Zelle.
- erklären Aufbau und Funktion elektrochemischer Spannungsquellen aus Alltag und Technik (Batterie, Akkumulator, Brennstoffzelle) unter Zuhilfenahme grundlegender Aspekte galvanischer Zellen.
- analysieren und vergleichen galvanische Zellen bzw. Elektrolysen unter energetischen und stofflichen Aspekten.
- vergleichen und bewerten innovative und herkömmliche elektrochemische Energiequellen.
- diskutieren die gesellschaftliche Relevanz und Bedeutung der Gewinnung, Speicherung und Nutzung elektrischer Energie in der Chemie.
- diskutieren Möglichkeiten der elektrochemischen Energiespeicherung als Voraussetzung für die zukünftige Energieversorgung.

Zusätzlich könnten Schülerinnen und Schüler die Aufgabe bekommen, die einzelnen Entwicklungsstufen der Photo-Blue-Bottle Konzentrationszelle zu vergleichen und die jeweiligen Erneuerungen zu bewerten. Im Rahmen von Facharbeiten und Wettbewerben könnten sie Ideen zur Optimierung des „Solarakkus“ entwickeln und umsetzen. Auf diese Weise würden sie sich aktiv als Jungforscher an weiteren Metamorphosen eines zukunftsrelevanten Modellexperiments beteiligen.

## Literatur

- [1] Bibliographisches Institut GmbH. <https://www.duden.de/rechtsschreibung/Metamorphose> (letzter Zugriff: 29.10.2018).
- [2] Kekulé, F. A. (1859). Lehrbuch der Organischen Chemie oder der Chemie der Kohlenstoffverbindungen Stuttgart. F. Enke Verlag, Stuttgart, 3.
- [3] Parchmann, I., Schwarzer, S., Tausch, M. W., Wilke, T., Waitz, T. (2017). Von Innovationen der Chemie zu innovativen Lernanlässen für den Chemieunterricht und darüber hinaus. CHEMKON 24/4, 162.
- [4] Tausch, M. W. (1994). Photo-Blue-Bottle Modellversuche zur Photosynthese und zur Atmung. PdN-ChidS 43/3, 13–18.
- [5] Tausch, M. W., Korn, S. (2001). A Laboratory Simulation for Coupled Cycles of Photosynthesis and Respiration. J. Chem. Edu. 78/9, 1238–1240.
- [6] Tausch, M. W., Bohrmann-Linde, C., Posala, F., Nietz, D. (2013). Akku leer? Licht an! – Photoelektrochemische Lichtenergiekonversion und -speicherung. PdN-ChidS 62/5, 25–31.
- [7] Tausch, M. W., Heffen, M., Krämer, R., Meuter, N. (2015). Passendes Licht – Harmlose Stoffe. PdN-ChidS 64/2, 45–49.
- [8] Tausch, M. W., Heffen, M. (2015). Photokatalyse – homogen und heterogen, Das Photo-Blue-Bottle Experiment runderneuert. PdN-ChidS 64/6, 51–55.
- [9] Tausch, M. W., Heffen, M. (2016). Photosynthese und Atmung in miniature – Teil 1. Chemie & Schule 31/3, 5–11.
- [10] Tausch, M. W., v. Wachtendonk, M., Bohrmann-Linde, C., Krees, S. (2001-2014). CHEMIE 2000+, mehrere Ausgaben für die Sek. II und die Sek. I. Bamberg: C. C. Buchner.
- [11] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. <https://www.zsw-bw.de/forschung/regenerative-kraftstoffe/themen/power-to-gas.html> (letzter Zugriff: 10.01.2019).
- [12] Ständige Konferenzen der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2004). Bildungsstandards im Fach Chemie für den mittleren Schulabschluss. Luchterhand.
- [13] Heffen, Heffen (2017). Photoredoxreaktionen zur Konversion und chemischen Speicherung von Solarenergie. Dissertation. Wuppertal.
- [14] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2014). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.

Eingegangen am 26. November 2018

Angenommen am 16. Januar 2019

Online veröffentlicht am 14. März 2019