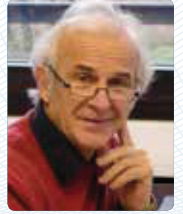


Unterwegs zur künstlichen Photosynthese

Photokatalytische Reduktionen in Modellexperimenten



Richard KREMER
Michael W. TAUSCH

Unter dem Titel „Photosynthese und Atmung *en miniature* – Teil 1“ wurde in dieser Zeitschrift in Heft 3/2016 eine Lerneinheit für den Anfangsunterricht vorgeschlagen, die auf einem Modellexperiment zum Kreislauf Photosynthese/Atmung in der Biosphäre basiert. Der vorliegende Beitrag ist als Fortsetzung anzusehen. Mit neuen Variationen des gleichen Experiments werden nun Schlüsselschritte bei der Lichtreaktion der Photosynthese noch naturnäher als in Teil 1 simuliert und konzeptionell erschlossen. Das sind wegweisende Konzepte für die Erforschung und Verwirklichung der künstlichen Photosynthese. Es ist sinnvoll und notwendig, sie unserer Schuljugend zu vermitteln. So kann die Entwicklung klimaneutraler und nachhaltiger Verfahren beschleunigt werden. *Science for future* ist angesagt, damit die Aktion *Fridays for future* nicht ins Leere läuft.

Modellanimationen und Modellexperimente

In Modellanimationen werden virtuelle Vorgänge z.B. in Form von bewegten Bildern generiert. Sie werden nach Algorithmen berechnet, denen wiederum Modelle über die Vorgänge, die sie simulieren, zugrunde liegen. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in der Regel auf Bildschirmen visualisiert oft als bewegte Bilder und Grafiken, die realitätsnah gestaltet sind. Im Zuge der Digitalisierung gewinnen Modellanimationen zunehmend an Bedeutung, weil insbesondere mit interaktiven Modellanimationen sehr bequem und schnell virtuelle Experimente durchgeführt und ausgewertet werden können. Modellanimationen können – insbesondere bei jüngeren Lernenden – in virtuelle Fallen verführen indem die virtuelle Welt für real gehalten wird. Daher sollten Modellanimationen in der Lehre grundsätzlich als digitale Assistenten von wissenschaftlich gesicherten Fakten und realen Experimente vermittelt und eingesetzt werden.

In Modellexperimenten werden komplexe Vorgänge und Zusammenhänge von Prozessen aus der Natur und aus technischen Einrichtungen im Labor vereinfacht, aber real nachgemacht. Wie ein wissenschaftliches Modell ganz allgemein bildet auch ein Modellexperiment das entsprechende Original nur teilweise ab. Es hilft beim Verständnis des Originals und ermöglicht Voraussagen über dessen Eigenschaften unter veränderten Bedingungen. Diese können mit veränderten Parametern des Modellexperiments überprüft werden. In

der chemischen Forschung haben Modellexperimente einen wichtigen Stellenwert, für die Lehre und das Studium der Chemie sind sie unabdingbar. Ihr entscheidendes Merkmal ist die Erzeugung von realen Fakten in Form von Phänomenen, Beobachtungen, und Messdaten.

Allerdings sollten auch bei den realen Modellexperimenten neben den Gemeinsamkeiten zu den natürlichen oder technischen Prozessen, die sie simulieren, immer auch die Unterschiede zu diesen in Betracht gezogen werden. Nur so können sie die kritische Distanz zur Aussagekraft von Modellexperimenten und die Kreativität bei forschend-entwickelnden Lernprozessen nachhaltig fördern.

Modellanimationen und Modellreaktionen zu essentiellen Teilen der natürlichen Photosynthese sind wichtige Hilfsmittel auf dem Weg zur Konzeption und Entwicklung verschiedener Varianten künstlicher Photosynthese mit Solarlicht.

In der Modellanimation „Ein Fall für 2“ [1] (Abb. 1) werden literaturbekannte Erkenntnisse über die Elementarprozesse im photosynthetischen Zentrum der Thylakoid-Membran von der Absorption der Photonen bis zur Bildung des Reduktionsäquivalents NADPH simuliert. Diese Animation ist für den Einsatz im Chemie- und Biologieunterricht in der Oberstufe geeignet. Sie kann auch unabhängig von den folgenden Modellexperimenten genutzt werden, eignet sich aber gut als digitaler Assistent für die folgenden Versuche.

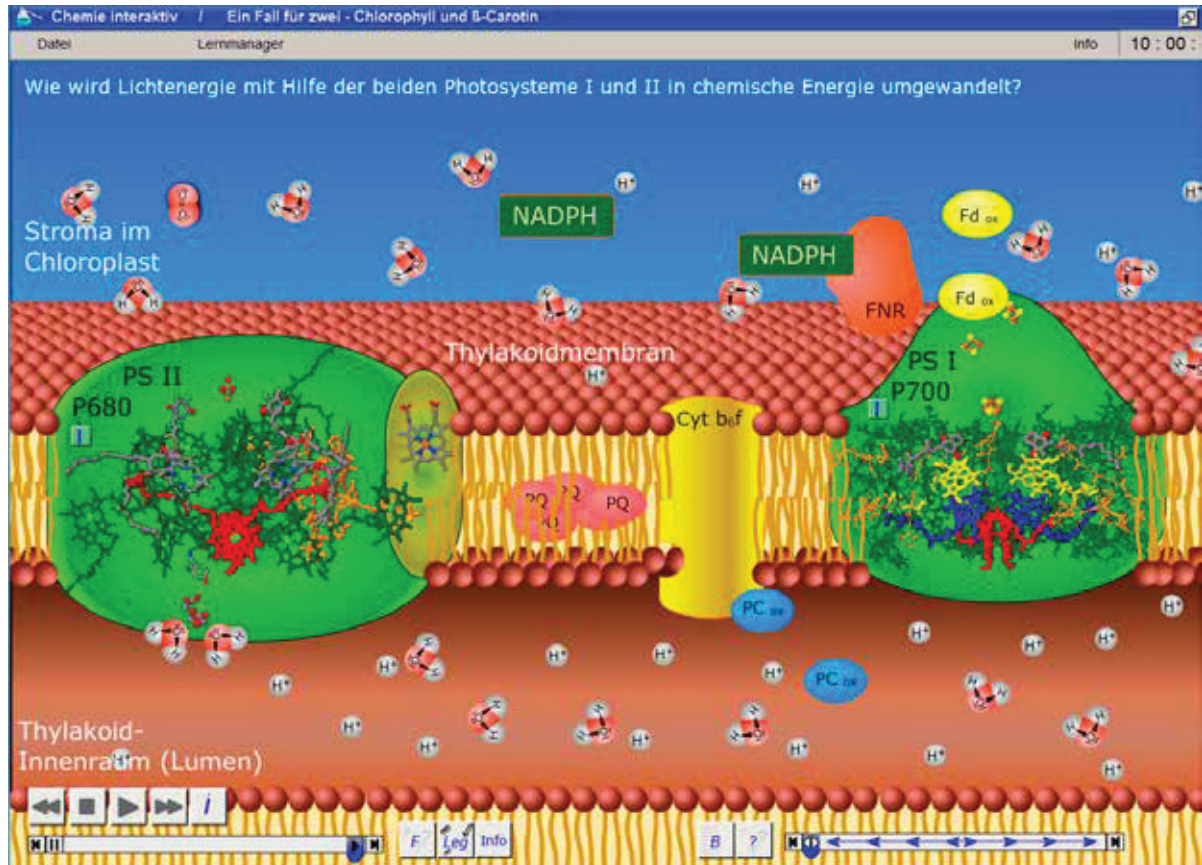
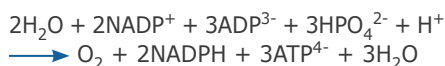


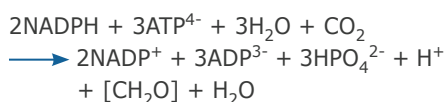
Abb. 1: Screenshot aus einer mehrteiligen Modellanimation zu den Elementarschritten bei der Lichtreaktion in Chloroplasten [1]

Vom Lichtquant zum Reduktionsäquivalent

Die Elementarprozesse bei den Lichtreaktionen in den Photosystemen II und I (Abb. 1) beinhalten im so genannten Z-Schema [1] die Absorption von Photonen, Energie- und Elektronentransferprozesse. Die Energie der Photonen treibt die Photolyse von Wasser sowie die Synthese der zellulären Energiespeicher Adenosintriphosphat ATP und Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat NADPH an. Die stoffliche Gesamtbilanz bei der photokatalysierten Lichtreaktion lautet [1]:



Der gebildete Sauerstoff wird an die Umwelt abgegeben, die restlichen Produkte reduzieren Kohlenstoffdioxid in der Dunkelreaktion (Calvin-Zyklus) enzymkatalysiert zu Kohlenhydrat-Einheiten [CH₂O], die als Mono- oder als Polysaccharide in der Pflanze gespeichert werden:



Stofflich gesehen ist NADPH ein *Reduktionsäquivalent*. Es fungiert als Zwischen-

speicher für reduzierte Protonen, d.h. für Wasserstoff-Atome, die im Calvin Zyklus (in den Dunkelreaktionen) als Hydrid-Ionen H⁻ auf Zwischenspezies bei der Reduktion von Kohlenstoffdioxid zu Glucose übertragen werden. Bei der Bildung eines NADPH-Teilchens aus der oxidierten

Form NADP⁺ werden formal ein Proton und zwei Elektronen benötigt (Abb. 2). Dabei handelt es sich um eine endergonische Reduktion, die bei der natürlichen Photosynthese vom Solarlicht angetrieben in den Chloroplasten in Grünalgen und Blättern höherer Pflanzen abläuft.

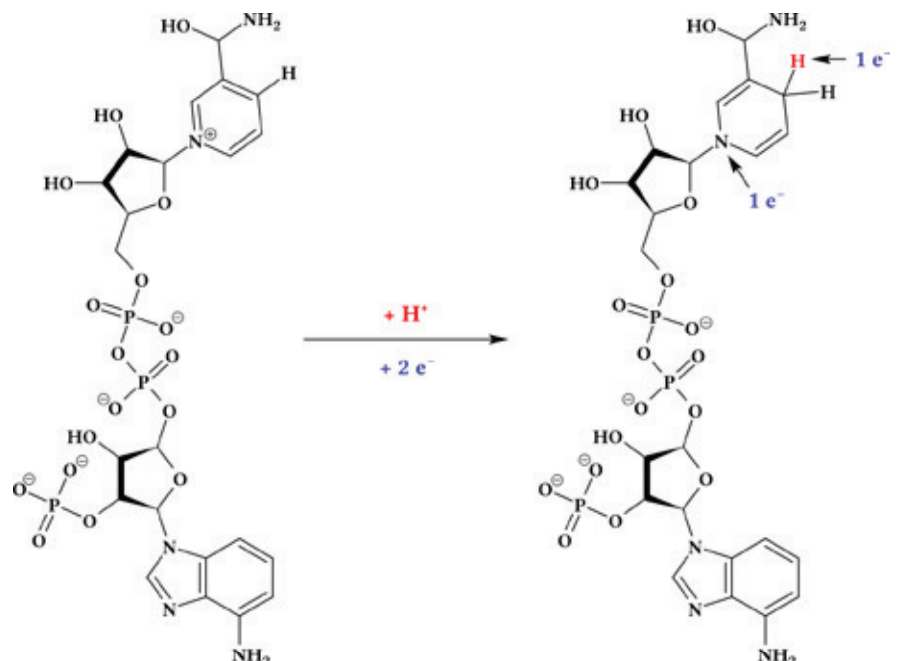


Abb. 2: Reduktion von NADP⁺ zu NADPH

In einem Modellexperiment, bei dem analog zu der *in vivo* Synthese von NADPH die Synthese eines Reduktionsäquivalents *in vitro* angestrebt wurde, konnte der für Schulexperimente geeignete Farbstoff Methylblau eingesetzt werden. Die in Abb. 3 formulierte Reduktion von Methylblau MB⁺ zu farblosem Leukomethylblau MBH lässt sich mithilfe der Photo-Blue-Bottle Lösung verwirklichen. Diese besteht in der aktuellen Zusammensetzung aus drei harmlosen Chemikalien, einem *Photokatalysator* (Proflavin), einem *Redoxmediator* (Ethylviologen), einem *Coelektrolyt* (Kaliumchlorid) und einem *Opferdonor* (EDTA) in wässriger Lösung (Abb. 4).

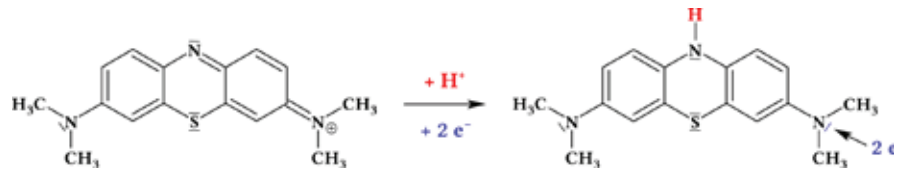


Abb. 3: Reduktion von MB⁺ zu MBH

Die ursprüngliche Version des **Photo-Blue-Bottle Experiments** [3], in der toxisches Methylviologen als Substrat zum Einsatz kam, wurde im Verlauf von mehr als 20 Jahren sicherheitstechnisch optimiert und experimenteltechnisch erweitert [4-8]. Es hat als Beispiel für Photokatalyse Einzug in Praktika an Universitäten gefunden und wurde als Modellexperiment für die stofflichen und energetischen Aspekte beim Kreislauf Photosynthese/Zellatmung in Lehrbücher für die gymnasiale Oberstufe eingebunden [9]. In der Basisversion des Experiments werden Farbzyklen (gelb → blau → gelb) erzeugt, die auf Redoxzyklen des Ethylviologens (EV⁺⁺ → EV⁺ → EV⁺⁺) zurückzuführen sind (Abb. 5). Details zu den gekoppelten Reaktionszyklen aus Abb. 5 wurden in Lit. [3-8] dargestellt. Im Workshop „Nachhaltige Experimente, Innovative Konzepte – Lichtlabor Pflanze“ [10] werden sie anhand von ver-

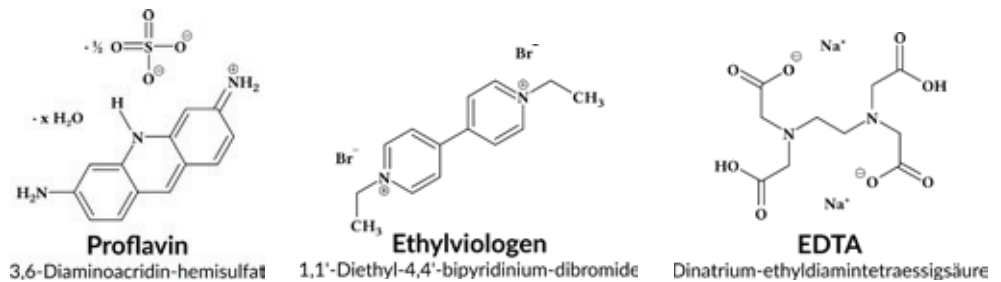


Abb. 4: Chemikalien für die Photo-Blue-Bottle Lösung

schiedenen Versionen des Experiments phänomenologisch erschlossen, konzeptionell ausgeleuchtet und didaktisch für unterschiedliche Alters- und Bildungsstufen ausgewertet. Dabei steht der Chemieunterricht im Vordergrund, aber auch die benachbarten Fächer, insbesondere Biologie und Physik kommen zum Zuge. Für die in dieser Arbeit angestrebte Erzeugung des Reduktionsäquivalents Leukomethylblau MBH in Analogie zur Bildung von NADPH bei der Photosynthese wurde von folgender Annahme ausgegangen: Da in dem photokatalytisch reduzierten Substrat EV⁺ der *Photo-Blue-Bottle* Lösung

formal eine Akkumulation von Elektronen erfolgt, sollte es möglich sein, diese über einen äußeren Stromkreis und über inerte Elektroden auf den Akzeptor Methylblau MB⁺ zu leiten und diesen zu reduzieren. Diese Idee wurde als **photogalvanische Zweitopfzelle** verwirklicht, d.h. einer mit Licht bestrahlten *Photo-Blue-Bottle* Halbzelle und einer dunkel gehaltenen Halbzelle mit Methylblau Lösung MB⁺(aq) bei pH = 1. Die beiden Halbzellen wurden extern über Graphitelektroden, Krokodilklemmen und Kupferkabel im Kurzschlussmodus verbunden und der innere Stromkreis wurde über eine Salzbrücke mit konzentr-

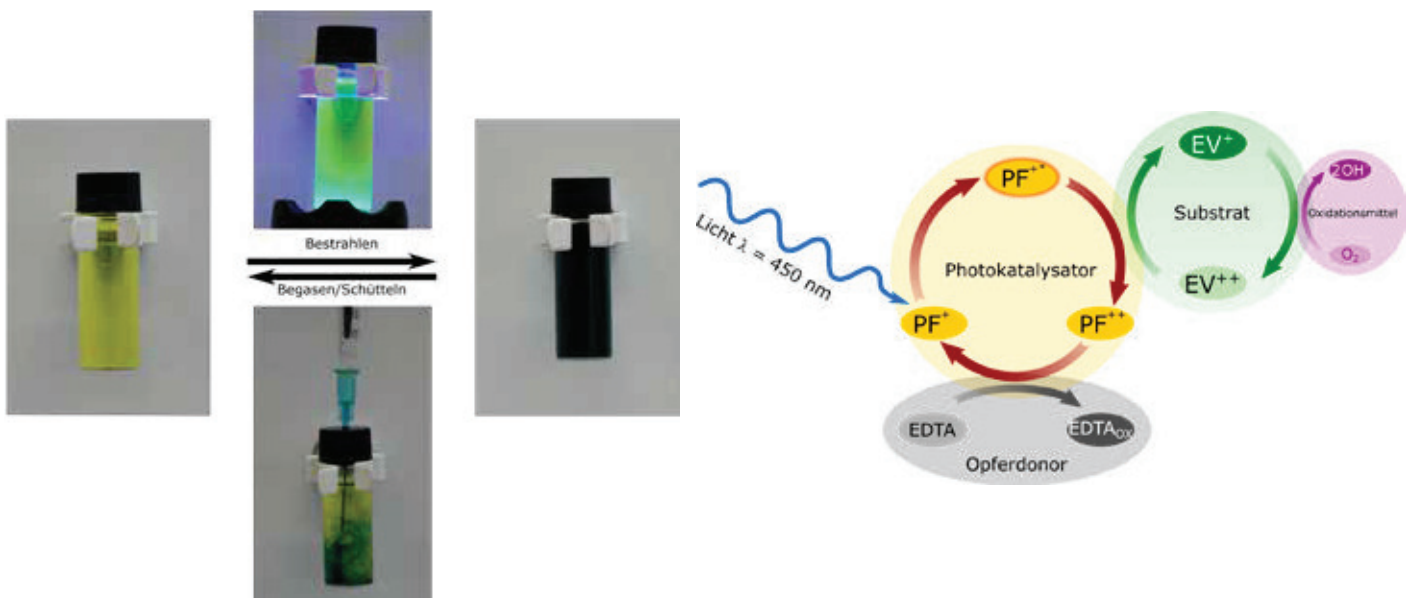


Abb. 5: Basisversion des Photo-Blue-Bottle Experiments und gekoppelte Reaktionszyklen

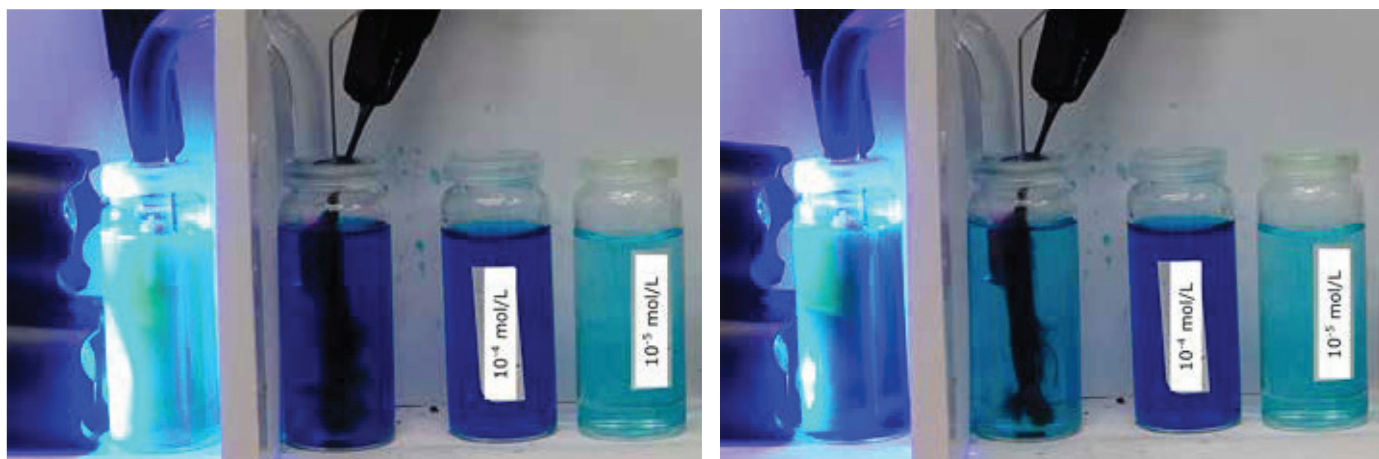


Abb. 6: Photogalvanische Zweitopfzelle zur Synthese des Reduktionsäquivalents Leukomethylenblau MBH beim Start und nach 15 min Bestrahlung

rierter Kaliumchlorid-Lösung geschlossen (Abb. 6).

In der Vorrichtung aus Abb. 6 konnte tatsächlich durch Bestrahlung der Photo-Blue-Bottle Lösung mit LED Taschenlampen ($\lambda = 450 \text{ nm}$) Methyleneblau MB^+ in der nicht bestrahlten Halbzelle bei $\text{pH} = 1$ innerhalb von 18 min weitestgehend zu Leukomethylenblau MBH reduziert werden. Die blaue Farbe der Methyleneblau-Lösung hellte sich dabei beträchtlich auf, die Konzentration von Methyleneblau sank von $c \approx 10^{-4} \text{ mol/L}$ auf $c \approx 10^{-5} \text{ mol/L}$ (vgl. Methyleneblau-Referenzlösungen in Abb. 6). Im Kontrollversuch wurde sichergestellt, dass farbloses Leukomethylenblau MBH gebildet wurde, denn dieses ließ sich durch längeres Einleiten von Luft in die entfärbte Lösung allmählich zu blauem Methyleneblau MB^+ zurück oxidieren. Es dauert allerdings sehr viel länger, ca. 120 min, bis die Blaufärbung der Lösung die anfängliche Intensität vor der Bestrahlung erreicht.

Vergleicht man die reduzierte und oxidierte Form des Redoxmediators in der bestrahlten Halbzelle mit der Photo-Blue-Bottle Lösung mit der reduzierten und oxidierten Form des Redoxäquivalents in der nicht bestrahlten Halbzelle, so wird ein grundsätzlicher Unterschied deutlich: Ein EV^+ -Teilchen enthält nur ein Elektron mehr als die oxidierte Form EV^{2+} ; dagegen enthält ein MBH -Teilchen zwei Elektronen und ein H-Atom mehr als die oxidierte Form MB^+ . Der reduzierte Redoxmediator hat also nur Elektronen zwischengespeichert, die er leicht abgeben kann um oxidiert zu werden. Er kann sie sogar an eine inerte Elektrode wie im oben beschriebenen Versuch abgeben. Dagegen hat das Redoxäquivalent Elektronen und H-Atome zwischengespeichert. Seine Oxidation erfordert nicht nur einen Elektronen-

sondern auch einen Protonenakzeptor, sollte also nicht so leicht erfolgen wie die des Redoxmediators. Die Experimente bestätigen das: Wenn in die blau gefärbte Photo-Blue-Bottle Lösung, die den Redoxmediator vorwiegend in der reduzierten Form EV^+ enthält, Luft eingeleitet wird, entfärbt diese sich innerhalb weniger Sekunden unter Bildung der oxidierten Form EV^{2+} . Leitet man in die weitgehend entfärbte Methyleneblau-Lösung, die vorwiegend das Reduktionsäquivalent MBH enthält, Luft ein, so dauert es mehrere zig-Minuten, bis die Lösung wieder blau wird, d.h. bis sich die oxidierte Form MB^+ zurück bildet. Die Evolution hat als Zwischenspeicher für Elektronen und H-Atome (in der Literatur ist gelegentlich von Zwischenspeicher für Elektronen und Protonen oder auch für Hydrid-Ionen H^- die Rede) das Reduktionsäquivalent NADPH hervorgebracht. Es ist an vielen biochemischen Redoxreaktionen, z.B. auch in der Atmungskette, beteiligt. Bei der Photosynthese ist es ein essentielles Werkzeug, denn es stellt übertragbare Elektronen und H-Atome für die Reduktion von Kohlenstoffdioxid zu Glucose zur Verfügung. Allerdings ist NADPH noch kein Endprodukt der Photo-

synthese, noch kein Langzeitspeicher für konvertierte Lichtenergie.

Vom Lichtquant zum chemischen Langzeitspeicher

In der Literatur werden verschiedene Szenarien für die künstliche Photosynthese „grüner“ Brennstoffe, also chemischer Langzeitspeicher diskutiert [11]. Nach einem dieser Szenarien könnten zu NADPH analoge Reduktionsäquivalente als Wasserstoff-Zwischenspeicher genutzt werden, um Kohlenstoffdioxid zu reduzieren und so zu kohlenstoffhaltigen Brennstoffen wie Methanol oder Methan zu gelangen. Ein alternatives Szenario hat die Erzeugung von molekularem Wasserstoff mithilfe von Solarlicht als Ziel, denn Wasserstoff ist ein sehr effizienter Brennstoff und verbrennt klimaneutral. Echt „grün“, d.h. nachhaltig, ist er aber nur, wenn er nicht elektrolytisch mit Strom aus Kohle oder Atomkraft oder aber aus fossilem Methan oder Öl erzeugt wird, sondern photokatalytisch mit Solarlicht. Das Funktionsschema in Abb. 7 skizziert die Elementarprozesse auf dem Weg vom Lichtquant zum energetischen Langzeitspeicher Wasserstoff als „grünem“ Brennstoff.

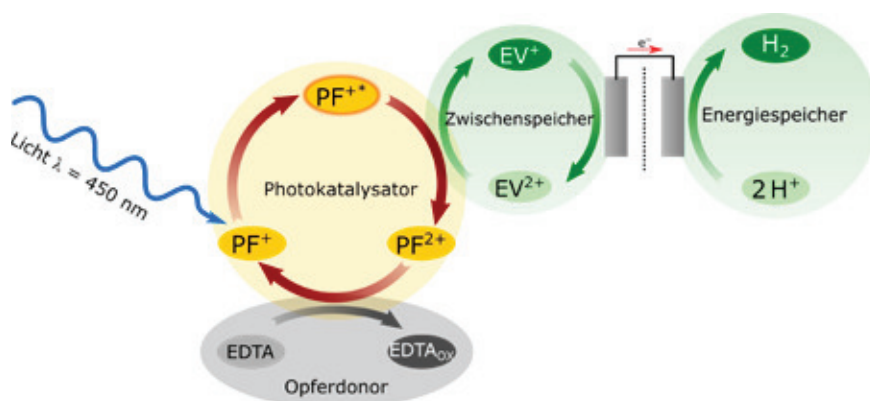
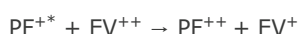


Abb. 7: Photogalvanische Zweitopfzelle zur Erzeugung von Wasserstoff

Das Kernstück in diesem Konzept ist wiederum eine Halbzelle mit *Photo-Blue-Bottle* Lösung, die mit blauem Licht bestrahlt wird. Sie enthält den Photokatalysator, den Opferdonor und den Redoxmediator (vgl. Formeln in Abb. 4). Diese Halbzelle wird mit einer zweiten Halbzelle die Salzsäure und eine Platinelektrode enthält, zu einer photogalvanischen Zweitopfzelle kombiniert. Im ersten Schritt wird ein Photokatalysator-Teilchen (PF^+) durch Absorption eines Photons in einen elektronisch angeregten Zustand (PF^{+*}) versetzt. Daraus wird durch oxidatives Quenching [13], d.h. Desaktivierung des angeregten Teilchens durch Elektronenabgabe, ein Elektron auf ein Redoxmediator-Teilchen übertragen, das dabei reduziert wird:



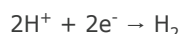
Das oxidierte Photokatalysator-Teilchen wird mithilfe eines Opferdonor-Teilchens reduziert, wobei das Photokatalysator-Teilchen in seiner ursprünglichen Form regeneriert wird:



Durch Abgabe jeweils eines Elektrons an die Elektrode der bestrahlten Halbzelle (Graphit oder Platin) werden reduzierte Redoxmediator-Teilchen wieder oxidiert:



An der Platin-Elektrode der zweiten Halbzelle werden Protonen zu Wasserstoff-Molekülen reduziert:



Dieses Konzept wurde mit dem Versuchsaufbau aus Abb. 8 verwirklicht. Ein Video auf der Internetplattform „chemiemitlicht“ [12] dokumentiert im Zeitraffer die Erzeugung von ca. 0,6 mL Wasserstoff und den Nachweis durch die Knallgasprobe.

Auf diese Art ist es erstmalig gelungen, in einem für Schulversuche und Experimentalvorlesungen geeigneten Experiment den Energieträger Wasserstoff direkt und ausschließlich unter Einsatz von Licht als energetischen Antrieb herzustellen. Die Vorrichtung aus Abb. 8 (vgl. Details im Abschnitt Experimente) lässt zahlreiche Alternativen zu. Es können beispielsweise folgende Teile variiert werden:

i) die Zusammensetzung des photoaktiven Systems (homogene Lösung mit den drei Verbindungen aus Abb. 4 oder heterogenes System mit Titandioxid als Photokatalysator, Triethanola-

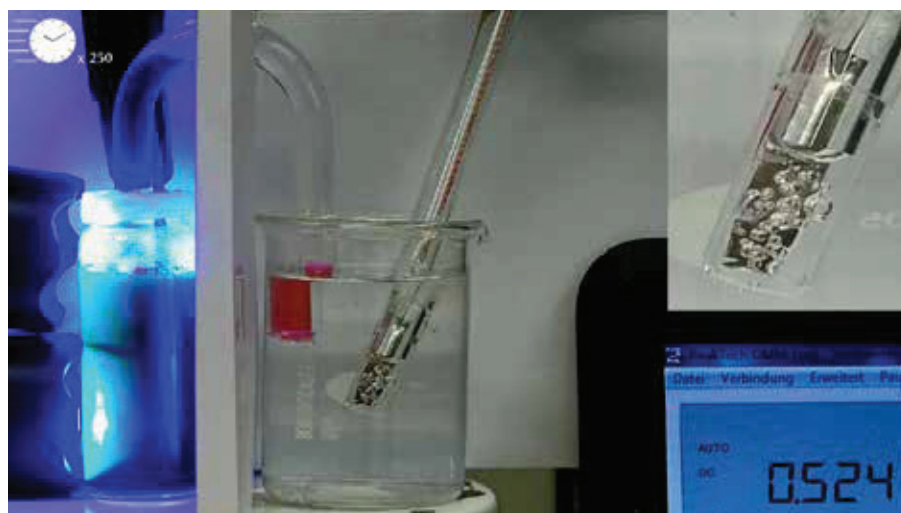


Abb. 8: Photogalvanische Zweitopfzelle zur Erzeugung von Wasserstoff

- min als Opferdonor und Ethylviologen als Redoxmediator) [7],
- ii) die Platzierung und die Art der Bestrahlungsquelle (Bestrahlung von außen mit LED-Taschenlampen, LED-Modulen oder Sonnenlicht bzw. in situ Bestrahlung mit LED-Tauchlampenmodulen),
- iii) die Form und Größe des Reaktionsgefäßes mit der photoaktiven Lösung (runde Schnappdeckelgläser oder Küvetten mit Deckel, unterschiedliche Fassungsvermögen von 50 mL bis 500 mL) [8] und
- iv) die Größe und Bauweise der Elektrode und der Vorrichtung, an der Wasserstoff-Gas gebildet und aufgefangen wird.

Photostationarität – Schlüssel zur künstlichen Photosynthese

Beiden oben diskutierten Modellexperimenten ist gemeinsam, dass in der Photo-Blue-Bottle Lösung, durch Licht einstrahlung dauerhaft angeregte Zustände erzeugt werden, die aber auch ständig durch Elektronenübertragungen verschwinden. Wenn die Raten, mit der sich in einem chemischen System bei Lichtbestrahlung angeregte Zustände bilden und verschwinden gleich sind, stellt sich ein *photostationärer* Zustand (kurz: *Photostationarität*) ein. In unseren Versuchen kann man zwar weder sehen noch messen, wie schnell sich die angeregten Zustände des lichtabsorbierenden Photokatalysators Proflavin PF^+ bilden und verschwinden, aber man kann sehen, dass sich die Lösung bei Lichtbestrahlung blau färbt und dauerhaft blau bleibt, solange Licht eingestrahlt wird. Da die blaue Farbe durch die reduzierte Form EV^+ des Redoxmediators verursacht

wird, bedeutet die konstant blaue Farbe der Lösung eine konstante Konzentration dieser reduzierten Spezies im System bei Lichtbestrahlung.

Zeitlich konstante Konzentrationen in einem chemischen System, gleich schnelles Auftreten und Verschwinden einer chemischen Spezies – das sind Merkmale für den Zustand des „chemischen Gleichgewichts“. In der Tat treffen diese Merkmale auch für den photostationären Zustand zu. Dennoch sind das chemische Gleichgewicht und der photostationäre Zustand (*Photostationarität*) *grundverschieden*. Das betrifft sowohl die Elementarschritte auf der Teilchenebene als auch die Phänomene auf der Stoffebene [2, 14-16]. Die experimentellen Fakten in den Versuchen aus Abb. 6 und Abb. 8 machen folgende Unterschiede deutlich:

- Photostationarität stellt sich im Gegensatz zum chemischen (thermodynamischen) Gleichgewicht nur bei dauerhafter Bestrahlung mit Licht ein und
- Photostationarität kann sich im Gegensatz zum chemischen (thermodynamischen) Gleichgewicht auch in einem offenen System einstellen und zeitlich aufrechterhalten.

Tatsächlich ist die Halbzelle mit der *Photo-Blue-Bottle* Lösung in der Versuchsvorrichtung der photogalvanischen Zweitopfzelle (anders als in der Basisversion aus Abb. 5) zu einem *offenen System* umfunktioniert. Es findet Stoffaustausch (Ionenaustausch) über die Elektrolytbrücke mit der zweiten Halbzelle und Elektronenfluss über den äußeren Stromkreis statt. Der Dauerbeschuss mit Photonen des blauen Lichts erzeugt nach den oben diskutierten, in Abb. 7 zusammengefassten Elementarprozessen einen konstanten und dauerhaft anhaltenden

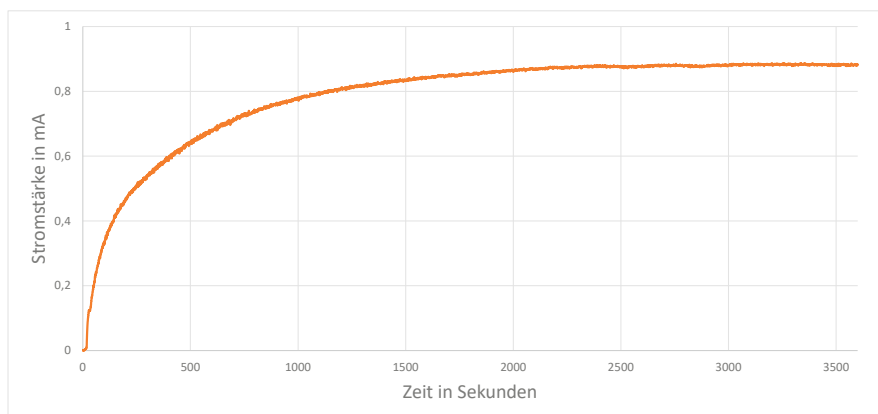


Abb. 9: Bei den photogalvanischen Zweitropfzellen wurden im photostationären Zustand annähernd konstante Stromstärken von ca. 0.9 mA gemessen

Elektronendruck des Redoxmediators auf die Graphit-Elektrode in der bestrahlten Halbzelle. Wegen dieses Elektronendrucks kommt es zu einem Elektronenfluss aus der bestrahlten in die dunkle Halbzelle. Das bewirkt eine konstante Stromstärke in der photogalvanischen Zweitropfzelle im photostationären Zustand (Abb. 9).

Als Wirkung dieser zeitlich konstanten Stromstärke kommt es in der dunklen Halbzelle zur Reduktion von Protonen und Bildung von elementarem Wasserstoff. Die Geschwindigkeit der Gasbildung ist im photostationären Zustand ebenfalls konstant. Sie kann über Stunden konstant bleiben, wenn konstant mit blauem Licht konstanter Intensität bestrahlt wird.

Fazit: Photostationarität in offenen Systemen ist ein fundamentales Merkmal bei der Photosynthese von chemischen Langzeitspeichern. Das ist beim Modellexperiment aus diesem Beitrag ebenso der Fall wie beim grünen Blatt im Sonnenlicht.

Experimente

Herstellung der

Photo-Blue-Bottle Lösung:

Folgende Chemikalien werden eingewogen (vgl. Formeln in Abb. 4):

- 1 g EDTA (Ethyldimaintetraessigsäure-dinatriumsalz)
- 561 mg Ethylviologen (1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridiniumdibromid)
- 15 mg Proflavin (3,6-Diaminoacridin-hemisulfat)
- 3,73 g Kaliumchlorid

Diese Stoffportionen werden in einem Becherglas unter Rührung in 500 mL dest. Wasser gelöst. In der so erhaltenen Photo-Blue-Bottle-Lösung (PBB-Lösung) liegen folgende Konzentrationen vor: $c(\text{EV}^{2+}) = 0,003 \text{ mol/L}$; $c(\text{PF}^+) = 0,000045 \text{ mol/L}$; $c(\text{EDTA}) = 0,0049$ $c(\text{KCl}) = 0,1 \text{ mol/L}$. Die gelbe, schwach fluoreszierende Lösung

wird in eine braune 500 mL Enghalsflasche gefüllt. Falls keine braune Flasche vorhanden ist, kann auch eine aus farblosem Glas genutzt werden, wenn sie in Alufolie lichtdicht verpackt wird. So ist sie unter Lichtausschluss mehrere Monate haltbar.

Bezugsquellen:

- Proflavin hemisulfat (3,6-Diaminoacridin-hemisulfat), CAS 1811-28-5, Sigma Aldrich; (10 g ca. 43 €)
- Ethylviologen dibromid (1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridiniumdibromid), CAS 53721-12-3, Sigma Aldrich; (1 g ca. 45 €)
- EDTA-Dinatriumsalz (Ethyldimaintetraessigsäure-dinatriumsalz), CAS 6381-92-6, Carl-Roth; (1 kg ca. 47 €)
- Graphitfolien, Conrad Electronics, Wärmeleitfolie 0.2 mm 5.5 W/mK (L x B) 100 mm x 100 mm Kerafol 90/10; Art. Nr.: 000189059 ; 2,59 €/Folie
- LED-Taschenlampen mit 4 Farben (violett: 400 nm, blau: 450 nm, grün: 530 nm, rot: 630 nm); im Internet unter Suchbegriff: LE Multi-Color LED, Rechargeable Flashlight (1 Stück ca. 20 €)

Workshop „Lichtlabor Pflanze“ [10]:

Hier werden die Experimente eingeübt und ausgewertet. Ein Paket mit den 3 Chemikalien für das Photo-Blue-Bottle Experiment kann mitgenommen werden. Der Workshop wird in der Lehrerfortbildung und -ausbildung an Schulen und Universitäten angeboten.

Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG wird für die Förderung der Forschungsvorhaben TA 228/4-1 Photo-LeNa (Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften, 2013-2016) und TA 228/4-2 Photo-MINT (Photoprozesse in den MINT-Fächern, 2017-2020) gedankt.

LITERATUR:

- [1] Michael W. Tausch; Ralf-Peter Schmitz; Nico Meuter „Ein Fall für 2 - Interaktion von Chlorophyll und β -Carotin bei der Photosynthese“ *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, 2013 62(8), 15; www.chemiemitlicht.uni-wuppertal.de < Modelle & Animationen < Ein Fall für Zwei
- [2] D. R. Whang, D. H. Apaydin "Artificial Photosynthesis: Learning from Nature" *ChemPhotoChem* 2018, 2 148, DOI: 10.1002/cptc.201700163
- [3] D. Wöhrle, M. W. Tausch, W.-D. Stohrer, *PHOTOCHEMIE - Konzepte, Methoden, Experimente*, Wiley-VCH, Weinheim 1998 m
- [4] M. W. Tausch, S. Korn "A Laboratory Simulation for Coupled Cycles of Photosynthesis and Respiration" *J. Chem. Educ.* 2001 78 (9), 1238
- [5] M. W. Tausch, C. Bohrmann-Linde, F. Posala, D. Nietz „Akku leer? Licht an! - Photoelektrochemische Lichtenergiekonversion und -speicherung“, *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 2013, 62 (5), 25
- [6] M. W. Tausch, M. Heffen "Photokatalyse - homogen und heterogen", *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 2015 64 (8), 42 M. W. Tausch, M. Heffen: "Photosynthese und Atmung en miniature - Teil 1", *Chemie & Schule*, 31 (3/2016), 5 (2016)
- [7] M. W. Tausch, M. Heffen: "Photosynthese und Atmung en miniature - Teil 1", *Chemie & Schule* 2016, 31 (3), 5
- [8] Y. Yurdanur, M. W. Tausch „Metamorphosen eines Experiments - Vom UV-Tauchlampenreaktor zur Low-Cost TicTac®-Zelle" *CHEMKON* 2019, DOI: 10.1002/ckon.201800095
- [9] C. Bohrmann-Linde, S. Krees, M. W. Tausch, M. v. Wachendonk (Hrsg.), *CHEMIE 2000+*, mehrere Bände und Ausgaben, C. C. Buchner, Bamberg 2007 bis 2015
- [10] M. W. Tausch „NEIK (Nachhaltige Experimente, Innovative Konzepte) – Lichtlabor Pflanze" 2019, www.chemiemitlicht.uni-wuppertal.de < Workshops & Vorträge
- [11] K. K. Sakimoto, P. Yang, D. Kim, „Künstliche Photosynthese für die Produktion von nachhaltigen Kraftstoffen und chemischen Produkten" *Angew. Chem.* 2015, 127, 3309
- [12] R. Kremer, N. Meuter, M. W. Tausch „Photokatalytische Erzeugung von Wasserstoff“, www.chemiemitlicht.uni-wuppertal.de < Filme & Videos < Photoredoxreaktionen
- [13] B. König (Ed.) *Chemical Photocatalysis*, De Grueter, Berlin, Boston, 2013
- [14] M. W. Tausch „Ungleiche Gleichgewichte" *CHEMKON* 1996, 3, 123
- [15] M. W. Tausch, N. Meuter "Photonen und Moleküle - Photolumineszenz und Photochromie", Begleitheft zur gleichnamigen Interaktionsbox, Hedinger, Stuttgart 2015
- [16] S. Krees, N. Meuter, M. W. Tausch, *Modellanimationen zur Photostationarität*, 2014, 2019 www.chemiemitlicht.uni-wuppertal.de < Modelle & Animationen < Photostationarität

Prof. Dr. Michael W. Tausch
und Richard Kremer
Bergische Universität Wuppertal
Gebäude V – 11.078/081
Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal
e-mail: mtausch@uni-wuppertal.de
rkremer@uni-wuppertal.de

INGEREICHT AM: 2.5. 2019
ANGENOMMEN AM: 18.8.2019