

Photokatalyse – homogen und heterogen

Das Photo-Blue-Bottle Experiment runderneuert

Maria Heffen und Michael W. Tausch

Photokatalysatoren sind bei der Photosynthese in grünen Pflanzen unverzichtbar. Wie Photokatalyse funktioniert, kann mit einfachen Schulversuchen erschlossen werden, die sich für den Chemie- und Biologieunterricht eignen.

Stichwörter: Photokatalyse, Stoffkreisläufe, Photosynthese, Energieumwandlung, gekoppelte Reaktionszyklen

1 Photokatalyse – Katalyse mit Lichtbeteiligung

Im Jahr 1912 stellte der Italiener Giacomo Luigi Ciamician bezüglich der Nutzung der Sonnenenergie fest: „So far, human civilization has made use almost exclusively of fossil solar energy“ und fragte „Would it not be advantageous to make better use of radiant energy?“ [1]. Will man diese Frage positiv beantworten und in der Tat die Strahlungsenergie des sichtbaren Sonnenlichts nutzen, um chemische Energiespeicher nach dem Muster der Photosynthese zu erzeugen, so muss man nach geeigneten Photokatalysatoren Ausschau halten.

Wie der Begriff „Katalysator“ und das damit verbundene Konzept der Katalyse, unterlag auch die Bedeutung der Photokatalyse einem historischen Wandel. In den 1970er Jahren wurden als Folge der Ölkrise die experimentellen Bemühungen intensiviert, die Wasserphotolyse mit sichtbarem Licht unter Einsatz geeigneter Photokatalysatoren zu realisieren [2,3]. Dadurch rückte das Konzept der Photokatalyse auch in den Fokus theoretischer Betrachtungen. Um zu erörtern, was sich hinter diesem Begriff verbirgt, ist es hilfreich zunächst auf die grundlegenden Vorgänge bei photochemischen Reaktionen im Allgemeinen einzugehen. An allen photochemischen Reaktionen sind auf molekularer Ebene elektronisch angeregte Zustände beteiligt, die von Nicholas J. Turro als „elektronische Isomere“ [4] des Grundzustandes bezeichnet wurden, weil sich ihre Eigenschaften (z.B. das Redoxpotential) von denen des Grundzustandes dramatisch unterscheiden können. Dieser angeregte Zustand wird durch die Absorption eines Photons generiert. Betrachtet man Licht als Reaktionspartner (in der industriellen Chemie ist tatsächlich oft von der

„Chemikalie Licht“ die Rede), so könnte man nach der allgemeingültigen Definition eines Katalysators nur dann von Photokatalyse sprechen, wenn die zu Beginn der Reaktion absorbierten Photonen auch wieder freigesetzt werden würden. Prinzipiell ist dies zwar denkbar, wird bei photokatalytischen Reaktionen aber in aller Regel nicht beobachtet und hat sich auch nicht als Definitionsmerkmal für den Begriff der Photokatalyse durchgesetzt.

Vincenzo Balzani hob im Jahr 1983 den Gegensatz zwischen *Photokatalyse* und *Energiespeicherung* hervor [5]. Von Photokatalyse sollte nur dann die Rede sein, wenn bei einer thermodynamisch erlaubten Reaktion ($\Delta G < 0$), die jedoch auf Grund einer hohen thermischen Aktivierungsenergie sehr langsam verläuft, die Strahlungsenergie des Lichts genutzt wird, um diese zu überwinden (genauer gesagt: um sie überflüssig zu machen). In diesem Konzept ist von *Energiespeicherung* die Rede, wenn bei einer thermodynamisch verbotenen Reaktion ($\Delta G > 0$) Lichtenergie in Form von chemischer Energie gespeichert wird. Das Paradebeispiel für eine solche Reaktion stellt die Photosynthese da.

Aus energetischer Sicht ist diese Definition sinnvoll, sie steht jedoch im Widerspruch zur klassischen Definition von Ka-

talyse von Wilhelm Friedrich Ostwald, nach der ein Katalysator ein Stoff ist, nicht eine Energieform, die an der Reaktion beteiligt ist. Nach der heutigen Definition der IUPAC spricht man von Photokatalyse, wenn unter Einfluss von Strahlung in Form von ultraviolettem Licht, sichtbarem Licht oder Infrarot-Strahlung die Reaktionsrate einer Reaktion verändert wird und wenn dies in Gegenwart einer Substanz, die Licht absorbiert und die chemische Umwandlung der Reaktionspartner vermittelt, geschieht [6]. Diese Substanz bezeichnet man dann als Photokatalysator. Der elektronisch angeregte Zustand des Photokatalysators interagiert mit den Ausgangsstoffen. Es bilden sich Intermediate, aus denen schließlich die Produkte hervorgehen. Der Photokatalysator selbst wird dabei regeneriert.

2 Photokatalyse bei Redoxreaktionen

An einer photokatalysierten Redoxreaktion sind prinzipiell ein Akzeptor (A), ein Donator (D) und ein Photokatalysator (PK) beteiligt. Liegen diese alle drei in einer Phase vor, beispielsweise in einer molekularen Lösung, so spricht man von homogener Photokatalyse.

Der primäre Elementarprozess auf der Teilchenebene ist die Absorption eines

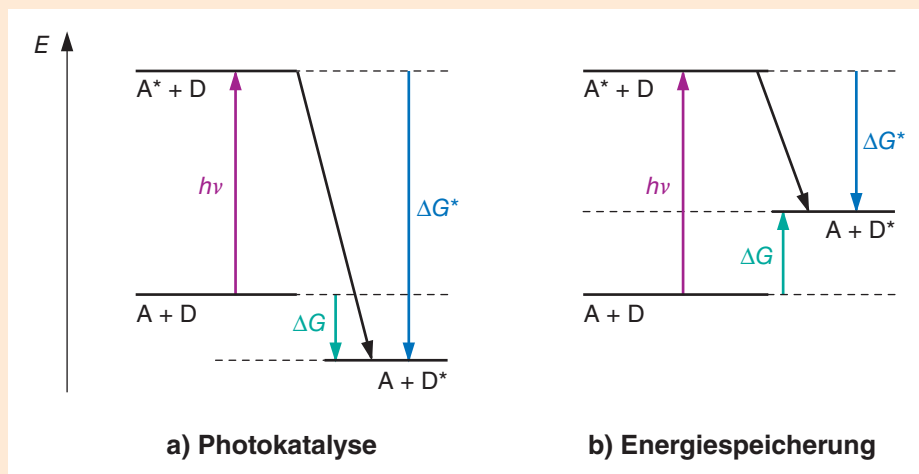
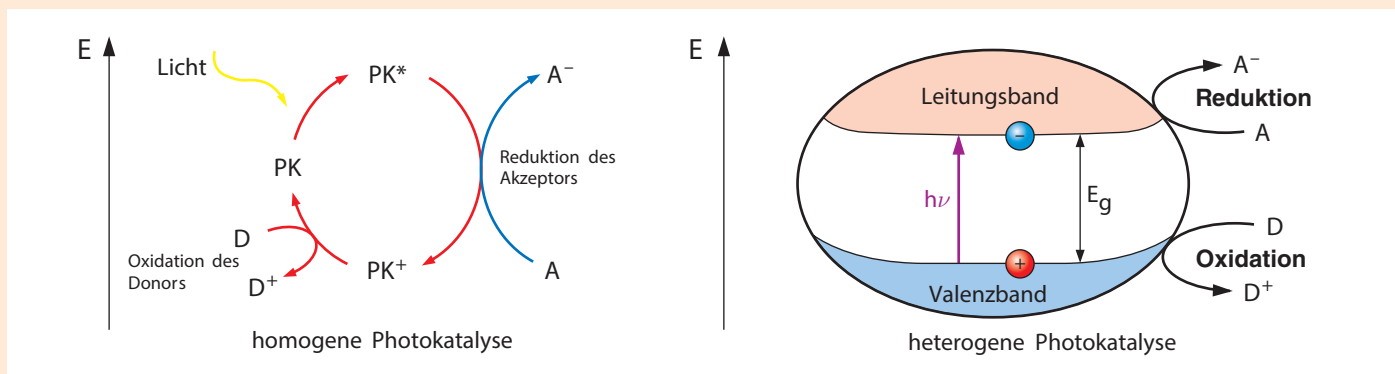


Abb. 1: Photokatalyse in Abgrenzung zur Energiespeicherung nach V. Balzani [5]

Abb. 2: Homogene und heterogene Photokatalyse bei der Redoxreaktion: $A + D \rightarrow A^- + D^+$; ($\Delta G > 0$) [7]

Photons durch das PK-Teilchen (dieses kann ein Molekül oder ein Ion sein), wobei dessen angeregter Zustand PK^* generiert wird (Abb. 2). Aus diesem Zustand heraus kann PK^* nun ein Elektron auf das Akzeptor-Teilchen A übertragen. Dieses wird zu A^- reduziert und das Photokatalysator-Teilchen liegt nun in der oxidierten Form PK^+ vor. Durch eine zweite Elektronenübertragung vom Donator-Teilchen D auf PK^+ wird das Photokatalysator-Teilchen PK wieder zurück gebildet und D wird zu D^+ oxidiert. Die bei der Reduktion $A \rightarrow A^-$ aufzuwendende Energie ist größer als die bei der Oxidation $D \rightarrow D^+$ freiwerdende Energie. In der Summe läuft also eine endergonische Redoxreaktion ($\Delta G > 0$) ab.

Dabei wird ein Teil der Energie des absorbierten Photons in chemische Energie umgewandelt und ist nun im System (A^-/D^+) gespeichert. Bei diesem photokatalytischen Prozess durchläuft der Photokatalysator PK wie ein klassischer Katalysator einen Zyklus, an dessen Ende er schließlich zurückgebildet wird.

Die oben erläuterten Prozesse lassen sich auch auf heterogene Systeme übertragen [8]. Als Photokatalysatoren dienen bei heterogenen photokatalytischen Prozessen Halbleiter wie z.B. Titandioxid, die in Lösungen aus A und D fein verteilt, beispielsweise als Mikro- oder Nanopartikel

vorliegen (Abb. 2). Durch Absorption eines Photons der Energie $h \cdot \nu > E_g$ wird im Halbleiter-Korn ein Elektron aus dem Valenzband ins Leitungsband angehoben.

Es bildet sich ein Elektron-Loch-Paar e^-/h^+ , das am Rand des Korns in der in Abb. 2 angedeuteten Weise an Redoxprozessen teilnehmen kann. Dabei läuft auch in diesem Fall die endergonische Redoxreaktion ab und auch in diesem Fall liegt danach der Photokatalysator, das Halbleiterkorn, in seiner ursprünglichen Form vor. Beispiele für Reaktionen dieses Typs finden sich in [9].

3 Photokatalyse im Photo-Blue-Bottle Experiment

Dieses Experiment wurde bereits in verschiedenen Versionen beschrieben [10, 11]. Je nach didaktischer Intention kann das Photo-Blue-Bottle Experiment, kurz PBB-Experiment, in unterschiedliche Unterrichtsreihen der Sekundarstufen I und II integriert werden.

Als einfaches und innerhalb weniger Minuten durchzuführendes „Handexperiment“ kann es bereits im Anfangsunterricht zur Demonstration des Antriebs einer chemischen Reaktion durch die Energieform Licht eingesetzt werden. Unter Verzicht auf Formeln und Reaktionsgleichungen kann es ebenfalls bereits in der

Sekundarstufe I auch für die Erschließung der Umkehrbarkeit chemischer Reaktionen, sowie der Rolle von Sauerstoff bei Oxidationen eingesetzt werden.

Hervorzuheben sind jedoch die Funktionen des PBB-Experiments in der Sekundarstufe II. Es liefert alle Beobachtungen, die für die konzeptionelle Erschließung der Elementarschritte bei photokatalytischen Redoxreaktionen relevant sind (Abb. 3). Zu Beginn wird das Photokatalysator-Teilchen, das Proflavin-Monokation PF^+ , durch Absorption eines Photons aus blauem Licht in den angeregten Zustand PF^{+*} angeoben und ist dann in der Lage das Ethylviologen-Dikation EV^{2+} zum Monokation EV^+ zu reduzieren. Dieses verursacht eine Blaufärbung der Lösung, was den Reaktionsverlauf optisch gut nachvollziehbar macht. Regeneriert wird das Proflavin-Monokation PF^+ aus dem Dikation PF^{2+} , indem ein Elektron vom Opferdonor-Teilchen EDTA auf PF^{2+} übertragen wird. Durch Einleiten von Luftsauerstoff (z.B. durch Schütteln) wird das reduzierte Substrat-Monokation EV^+ wieder zum ursprünglichen Substrat-Dikation EV^{2+} zurückoxidiert, was mit der Rückfärbung der Lösung von blau nach gelb einhergeht (Abb. 3).

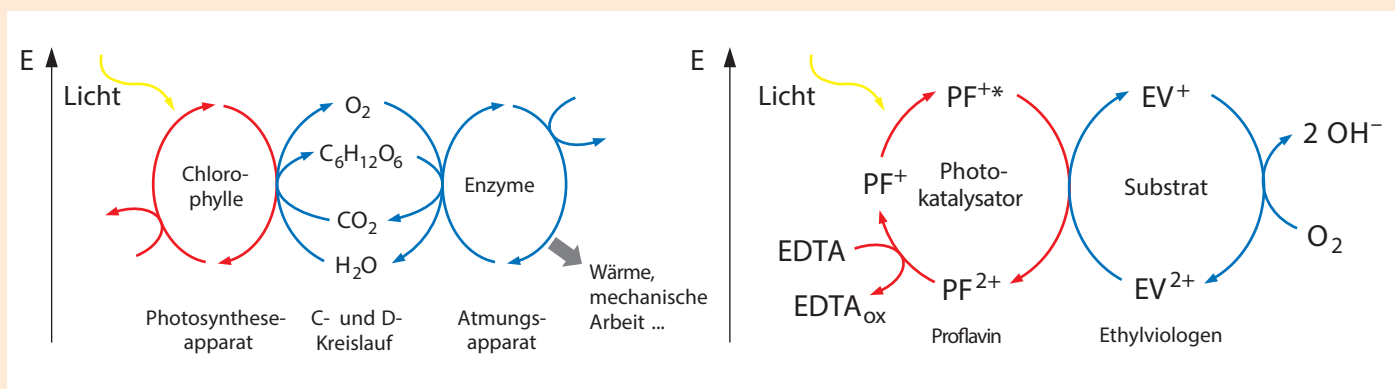


Abb. 3: Gekoppelte Reaktionszyklen beim Kreislauf Photosynthese-Zellatmung und beim PBB-Experiment

Modellexperiment: Photo-Blue-Bottle	Natur: Photosynthese – Zellatmung
Stoffkreisläufe <ul style="list-style-type: none"> Ethylviologen-Kreislauf Kreislauf der zyklisch arbeitenden Photokatalysatoren (Proflavin, Titandioxid u.a.) 	Stoffkreisläufe <ul style="list-style-type: none"> Kohlenstoff-Kreislauf Kreisläufe der zyklisch arbeitenden Photokatalysatoren (Chlorophylle u.a.)
Energieumwandlung <ul style="list-style-type: none"> Lichtenergie wird chemisch umgewandelt, gespeichert und als andere Energieform verfügbar Für die Lichtreaktion ist ein Photokatalysator notwendig, der im Experiment verfügbares Licht absorbiert (Proflavin, Titandioxid u.a.) Die Reaktionen laufen in wässriger Lösung bzw. Suspensionen und an der Phasengrenze flüssig-gasförmig ab 	Energieumwandlung <ul style="list-style-type: none"> Lichtenergie wird chemisch umgewandelt, gespeichert und als andere Energieform verfügbar. Für die Photosynthese sind Photokatalysatoren notwendig, die Sonnenlicht absorbieren (Chlorophylle u.a.) Die Reaktionen laufen in wässriger Lösung und an Membranoberflächen ab
Reaktionstypen <ul style="list-style-type: none"> Der Kreislauf des Ethylviologens setzt sich aus einer endergonen Reduktion ($\Delta G > 0$) und einer exergonen Oxidation ($\Delta G < 0$) mit Sauerstoff zusammen Der Kreislauf beginnt mit der Absorption von (blauem und violettem) Licht Der Lichtabsorption folgt eine Elektronenübertragung 	Reaktionstypen <ul style="list-style-type: none"> Der Kreislauf des Kohlenstoffs setzt sich aus einer endergonen Reduktion ($\Delta G > 0$) und einer exergonen Oxidation ($\Delta G < 0$) mit Sauerstoff zusammen Der Kreislauf beginnt mit der Absorption von (blauem und rotem) Licht Nach der Lichtabsorption folgen (in mehreren Schritten) Elektronenübertragungen

Tab. 1 Vergleich Modellexperiment – Wirklichkeit [12]

Im Zusammenhang mit dem für die naturwissenschaftlichen Fächer gemeinsamen *Basiskonzept Energie* und mit obligatorischen Fachinhalten im Chemie- und Biologieunterricht eignet sich das PBB-Experiment als Modellexperiment für Stoffkreisläufe und gekoppelte Reaktionszyklen nach dem Muster des natürlichen Kreislaufs Photosynthese-Zellatmung. Dabei wird Licht in chemische Energie umgewandelt und in einem reduzierten Substrat, in einem Kohlenhydrat, gespeichert. Selbst unter Verzicht auf die Strukturformeln der beteiligten organischen Verbindungen (Farbstoffe werden – wenn überhaupt – erst im letzten Jahr vor dem Abitur behandelt) können die Stoffkreisläufe, Redoxvorgänge, gekoppelten Reaktionszyklen und Energieänderungen mit einfachen Darstellungen wie in Abb. 3 verständlich vermittelt werden. Besonders ergiebig ist dabei die Gegenüberstellung von Modellexperiment und Wirklichkeit bei der neben den Gemeinsamkeiten auch die Unterschiede herausgearbeitet werden sollten (Tab. 1).

4 Neue Versionen des Photo-Blue-Bottle Experiments

Wir berichten hier über Varianten des rundemeuerten PBB-Experiments, bei denen alle wesentlichen Chemikalien und Geräte der Vorgängerversionen wie folgt ausgetauscht wurden:

a) Die wichtigste Neuerung betrifft die Grundsubstanz, das **Substrat**, das im PBB-Experiment reduziert und oxidiert wird. Giftiges Methylviologen (T^+ ,

GHS 06, 08, 09) konnte durch harmloses Ethylviologen (Xn , GHS 07) substituiert werden, ohne dass dabei die Prägnanz der Beobachtungen leidet.

b) Für den **Photokatalysator** Proflavin, wurden in homogener Lösung die Farbstoffe Eosin Y, Bengalrosa und Acridin Orange getestet, deren photokatalytische Eigenschaften bekannt sind [13, 14, 15]. Proflavin bleibt jedoch der Favorit, weil es sich als der effizienteste erwies, sich durch seine gelbe Farbe am deutlichsten von dem Blau des reduzierten Substrats unterscheidet und ungiftig ist. Allerdings wurde beim PBB-Experiment durch den Ein-

satz von Nano-Titandioxid (Anatas) und von Zinkoxid als Photokatalysator der Schritt aus der homogenen in die heterogene Photokatalyse vollzogen.

c) In den heterogenen Varianten des PBB-Experiments wurde auch der **Opferdonor** EDTA, durch Triethanolamin ersetzt, das in vielen Alltagsprodukten, z. B. Kosmetika, enthalten ist und sich beim Einsatz von heterogenen Photokatalysatoren als sehr effizienter Opferdonor erweist. EDTA kann zwar auch als Opferdonor eingesetzt werden, ist jedoch weniger gut geeignet als das Triethanolamin, weil es sich schlechter löst und unerwünschte Nebenreaktionen, z. B. die Bildung von Komplexen, eingeht.

d) Auch die **Geräte** für alle Varianten des PBB-Experiments wurden erneuert: Während die Schraubdeckelgläschen für die Grundversion sich weder in Größe und Form noch im Preis wesentlich von den früher eingesetzten Reagenzgläsern mit Schraubverschluss unterscheiden, wurden bei den elektrochemischen Konzentrationszellen des PBB-Experiments eine besser handhabbare Salzbrücke (Siliconschlauch mit dünnem Filterpapierstreifen als Einlage) entwickelt und einfache, sehr kostengünstige Elektroden (Nickelstäbe statt Platinelektroden bzw. plattinierte Nickelfolien) eingesetzt.

e) Schließlich wurde das PBB-Experiment so designt, dass als **Lichtquellen** die leistungsstarken Halogenlampen aus Diaprojektoren überflüssig werden. Statt derer können (außer Sonnenlicht) kostengünstige LED-Taschenlampen eingesetzt werden [16].

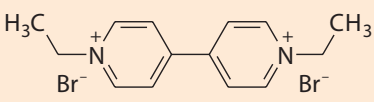
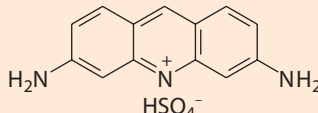
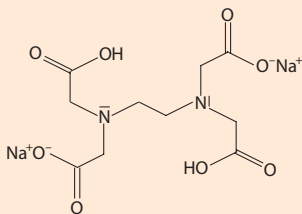
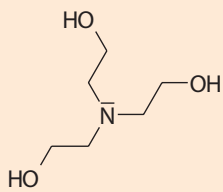
Verwendete Chemikalien	
Ethylviologen  1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridinium dibromid	Proflavin  3,6-Diaminoacridin-hemisulfat
EDTA  Dinatrium-ethylendiamintetraessigsäure	Triethanolamin  2,2',2''-Nitrilotriethanol
Titandioxid: Hombikat UV 100 TiO_2 (Anatas), Sachtleben	Nano-Titandioxid-Suspension: Hombikat XXS 100 TiO_2 (Anatas), Sachtleben
Zinkoxid ZnO	



Abb. 4: Beobachtung zu V2

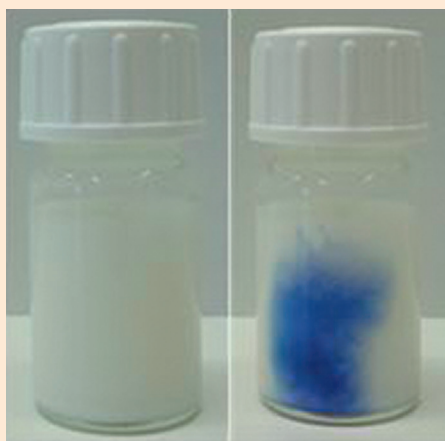


Abb.5: Beobachtung zu V3



Abb.6: Aufbau der PBB-2-Topf-Zelle

Herstellen der Stammlösungen

Lösung I

2,8 g EDTA (Ethyldimaintetraessigsäure-dinatriumsalz) werden in 100 mL dest. Wasser gelöst ($c = 0,075 \text{ mol/L}$).

Lösung II

561 mg Ethylviologen (1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridiniumdibromid) werden in 10 mL dest. Wasser gelöst ($c = 0,15 \text{ mol/L}$).

Lösung III

15,5 mg Proflavin (3,6-Diaminoacridin-hemisulfat) werden in 100 mL dest. Wasser gelöst ($c = 0,0006 \text{ mol/L}$).

Lösung IV

1 mL Triethanolamin werden in 39 mL dest. Wasser gelöst ($c = 0,19 \text{ mol/L}$).

L1: PBB-Lösung für die homogene Katalyse (vgl. [16])

30 mL Lösung I, 10 mL Lösung II, 75 mL Lösung III und 380 mL dest. Wasser werden zur Photo-Blue-Bottle-Lösung (PBB-Lösung) vereinigt. Darin liegen folgende Konzentrationen vor: $c(\text{EV}^{2+}) = 0,003 \text{ mol/L}$; $c(\text{PF}^+) = 0,000045 \text{ mol/L}$; $c(\text{EDTA}) = 0,0049 \text{ mol/L}$. Diese gelbe, schwach fluoreszierende Lösung ist unter Lichtausschluss (z. B. in einer braunen Glasflasche oder in einer Flasche umwickelt mit Aluminiumfolie) mehrere Monate haltbar.

S1: PBB-Suspension für die heterogene Katalyse mit TiO_2

Zu einer Lösung aus 3 mL Lösung IV und 0,2 mL Lösung II werden 0,07 g TiO_2 (Hombikat) gegeben.

S2: PBB-Suspension für die heterogene Katalyse mit TiO_2 -Nanosuspension

Zu einer Lösung aus 3 mL Lösung IV und 0,2 mL Lösung II werden 1 mL Nano- TiO_2 -Suspension gegeben.

S3: PBB-Suspension für die heterogene Katalyse mit ZnO

Zu einer Lösung aus 3 mL Lösung IV und 0,2 mL Lösung II werden 0,07 g ZnO gegeben.

V1: Das PBB-Grundexperiment (nach [16])

In ein 5 mL-Schraubdeckelgläschen werden 4 mL PBB-Lösung gegeben. Das zugeschraubte Gläschen wird mit einer UV-LED-Taschenlampe ($\lambda = 405 \text{ nm}$) einige Minuten lang bestrahlt und dann geschüttelt.

Schon nach weniger als einer Minute tritt eine Blaufärbung ein und nach 5–10 Minuten ist die Lösung vollständig blau (vgl. Bild dazu in [16]). Durch Schütteln des zugeschraubten Gläschens verfärbt sich die Lösung wieder von blau nach gelb. Dieser Zyklus lässt sich ca. 20-mal durchführen. Dabei ist zu beobachten, dass die Zeit, die benötigt wird um die Lösung komplett blau zu färben kürzer wird, während immer länger geschüttelt werden muss, um die ursprüngliche gelbe Farbe wieder herzustellen.

V2: Sauerstoff als Oxidationsmittel im PBB-Experiment

In zwei 5 mL-Schraubdeckelgläschen werden je 4 mL PBB-Lösung gegeben. In dem einen wird die PBB-Lösung vorsichtig mit Öl (Paraffinöl oder Speiseöl) überschichtet. Zwei UV-LED-Taschenlampe ($\lambda = 405 \text{ nm}$) werden mit Hilfe von jeweils einer Muffe senkrecht an einer Stativstange festgeschraubt. Die beiden Schraubdeckelgläschen werden auf die eingeschalteten Taschenlampen gestellt und ca. 5 Min lang bestrahlt. Anschließend wird bei beiden Gläschen der Schraubdeckel entfernt und die Lösungen werden an der Luft stehen gelassen. Die mit Öl überschichtete blaue PBB-Lösung entfärbt sich deutlich langsamer als die PBB-Lösung, die Kontakt mit der Luft hat (Abb. 4).

V3: PBB mit Titandioxid als Photokatalysator

In ein 5 mL-Schraubdeckelgläschen wird die PBB-Suspension S1 gegeben. Das zugeschraubte Gläschen wird mit der UV-LED-Taschenlampe ($\lambda = 405 \text{ nm}$) einige Minuten lang bestrahlt. Dabei tritt eine deutliche Blaufärbung der Suspension auf der bestrahlten Seite ein (Abb. 5). Durch Schütteln des zugeschraubten Gläschens verschwindet die blaue Färbung wieder.

V4: PBB mit Nano-Titandioxid-Suspension als Photokatalysator

In ein 5 mL-Schraubdeckelgläschen wird die PBB-Suspension S2 gegeben. Das zugeschraubte Gläschen wird mit UV-LED-Taschenlampe ($\lambda = 405 \text{ nm}$) einige Minuten lang bestrahlt und dann geschüttelt. Die Beobachtungen sind analog zu V3; der einzige Unterschied ist, dass in diesem Fall die Blaufärbung schneller und intensiver erfolgt.

V5: PBB mit Zinkoxid als Photokatalysator

In ein 5 mL-Schraubdeckelgläschen wird die PBB-Suspension S3 gegeben. Das zugeschraubte Gläschen wird mit der UV-LED-Taschenlampe ($\lambda = 405 \text{ nm}$) einige Minuten lang bestrahlt und dann geschüttelt. Auch in diesem Fall sind die Beobachtungen analog zu V3 und V4. Allerdings dauert es bis zur Blaufärbung länger als bei V3 und diese ist nicht so intensiv.

V6: Homogene PBB-2-Topf-Zelle

Die Salzbrücke wird aus einem transparenten Schlauch (Außendurchmesser 0,4 cm) hergestellt, in den ein dünner Streifen aus saugfähigem Papier (z. B. Filterpapier oder Küchenrolle) eingebracht wird. In die Deckel von zwei Schnappdeckelgläschen wird mit Hilfe einer Lochzange jeweils ein Loch gestanzt. Das Loch sollte etwas grö-

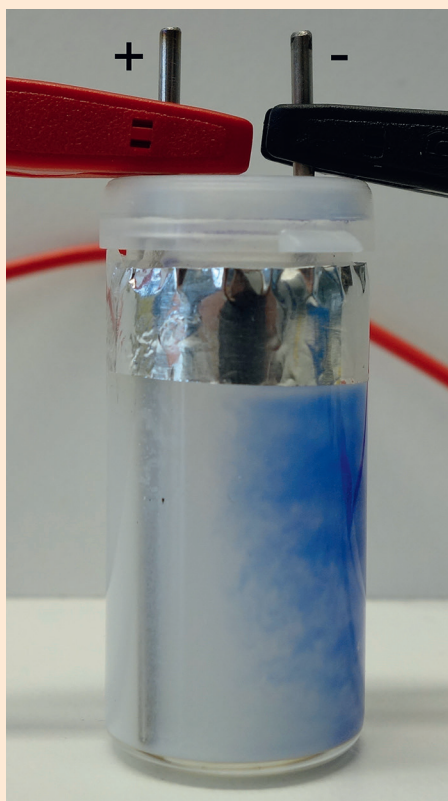


Abb. 7: Aufbau der PBB-1-Topf-Zelle

ößer als der Durchmesser des Schlauches sein, aus dem die Salzbrücke ist. Nun wird die Salzbrücke durch die beiden Löcher so in die Gläschen eingeführt, das sie bis auf die Böden reicht. Auf der gegenüberliegenden Seite zur Salzbrücke im Deckel wird jeweils ein 5 cm langes Stück Nickel-Schweißdraht durch den Deckel gedrückt, ebenfalls so, dass er bis knapp über den Boden reicht.

Erst jetzt werden die zwei 5 mL-Schnappdeckelgläschen mit jeweils 4 mL der PBB-Lösung L1 gefüllt. Zwischen die beiden Gläschen wird ein Stück Pappe geklemmt und mit einem Haushaltsgummi oder einem Stück Tesafilm rundherum fixiert. Das Filterpapier in der Salzbrücke wird vorsichtig mit der PBB-Lösung getränkt und anschließend werden die Deckel auf die Gläschen aufgesetzt. An die Elektroden werden zwei Krokodilklemmen angebracht und mit einem Digitalvoltmeter verbunden.

Die mit dem Minuspol verbundene Halbzelle wird mit einer UV-LED-Taschenlampe ($\lambda = 405 \text{ nm}$) einige Minuten bestrahlt. Schon nach weniger als einer Minute tritt eine Blaufärbung ein und nach 5–10 Minuten ist die Lösung vollständig blau gefärbt. Dabei ist zu beobachten, dass eine Spannung auftritt, die im Verlauf der Blaufärbung bis auf ca. 300 mV ansteigt und nach ca. 10 Minuten konstant bleibt. Sie bleibt auch nach Aus-

schalten der Taschenlampe erhalten. Erst wenn die Lösung mithilfe eine Plastikspritze durch die Kanüle mit Luft gespült wird, entfärbt sich die Lösung und die Spannung fällt wieder ab.

Heterogene PBB-2-Topf-Zellen können ganz analog mit den Suspensionen S1 bis S3 aufgebaut und gemessen werden.

Bei all diesen PBB-2-Topf-Zellen handelt es sich um **photogalvanische Konzentrationszellen**, in denen die Spannung durch das unterschiedliche Konzentrationsverhältnis $c(\text{EV}^{2+})/c(\text{EV}^+)$ in der bestrahlten und unbestrahlten Halbzelle zustande kommt.

V7: Heterogene PBB-1-Topf-Zelle

In den Deckel eines Schnappdeckelgläschen werden an gegenüberliegenden Seiten zwei 5 cm lange Stücke Nickel-Schweißdraht gedrückt, sodass sie bis kurz über den Boden reichen. Die Elektroden werden über Krokodilklemmen und Kabel mit einem Digitalvoltmeter. Das Schnappdeckelgläschen wird mit einer PBB-Suspension S1 (oder S2, oder S3) gefüllt und der Deckel mit den Elektroden aufgesetzt. Der obere Teil des Schnappdeckelgläschen wird mit einem Streifen Alufolie umwickelt. Dann wird die Suspension von der Seite, auf der sich die mit dem Minuspol verbundene Elektrode befindet, mit einer UV-LED-Taschenlampe ($\lambda = 405 \text{ nm}$) bestrahlt. Schon nach weniger als einer Minute tritt eine Blaufärbung ein, wobei gleichzeitig die Spannung bis auf ca. 300 mV ansteigt. Beim Ausschalten der Lampe fällt die Spannung (anders als bei V6) langsam ab. Wenn die Lösung mit Luft gespült wird, entfärbt sich die Lösung und die Spannung bricht vollständig zusammen.

5 Ausblick

Im International Year of Light 2015 wird eine Interaktionsbox mit experimentellem Equipment, Arbeitsblättern und elektronischen Medien zu der in diesem Beitrag vorgestellten Thematik entwickelt. Sie soll zur curricularen Innovation des Chemieunterrichts und benachbarter MINT-Fächer beitragen, indem sie die Einbindung von Photoprozessen in die Lehre der Naturwissenschaften fördert. ■

Dank

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG wird für die Förderung des Forschungsvorhabens TA 228/4-1 **Photo-LeNa** (Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften) gedankt.

Literatur

- [1] G. Ciamician, "The photochemistry of the future", *Science (New York, N.Y.)*, 926 (36), 385–394 (1912).
- [2] D. Ravelli, D. Dondi, M. Fagnoni, A. Albini, "Photocatalysis. A multi-faceted concept for green chemistry", *Chemical Society reviews*, 7 (38), 1999 (2009).
- [3] A. Fujishima, K. Honda, "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode", *Nature*, 5358 (238), 37 (1972).
- [4] N. J. Turro, V. Ramamurthy, J. C. Scaiano, *Modern molecular photochemistry of organic molecules*, University Science Books, Sausalito, Calif., ©2010.
- [5] V. Balzani, F. Bolletta, M. Ciano, M. Maestri, "Electron transfer reactions involving light", *J. Chem. Educ.*, 6 (60), 447 (1983).
- [6] S. E. Braslavsky, "Glossary of terms used in photochemistry, 3rd edition (IUPAC Recommendations 2006)", *Pure and Applied Chemistry*, 3 (79) (2007).
- [7] M. W. Tausch, „Photokatalyse – reif für den Schulunterricht“, *PdN-ChiS*, 60 (1), 29 (2011)
- [8] E. Pelizzetti, N. Serpone, *Homogeneous and heterogeneous photocatalysis*, D. Reidel Pub. Co.; Dordrecht, Holland, Boston, Hingham, MA, U.S.A., ©1986.
- [9] M. W. Tausch, M. Seesing, „Redoxreaktionen an Nano-Titandioxid“, *PdN-ChiS*, 54 (3), 16 (2005).
- [10] M. W. Tausch, „Photo-Blue-Bottle: Modellversuche zur Photosynthese und zur Atmung“, *PdN (Chemie)*, 43 (3), 13 (1994).
- [11] S. Korn, M. W. Tausch, "A Laboratory Simulation for Coupled Cycles of Photosynthesis and Respiration", *J. Chem. Educ.*, 78 (9), 1238 (2001).
- [12] M. W. Tausch, M. von Wachtendonk (Hrsg.), *CHEMIE 2000+*, C. C. Buchner, Bamberg (2007).
- [13] D. P. Hari, B. König, "Synthetic applications of eosin Y in photoredox catalysis", *Chemical communications (Cambridge, England)*, 51 (50), 6688 (2014).
- [14] A. Mills, C. Lawrence, P. Douglas, "Photoreduction of water sensitised by Rose Bengal", *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 2*, 12 (82), 2291 (1986).
- [15] F. Millich, G. Oster, "Photoreduction of Acridine Dyes 1,2", *J. Am. Chem. Soc.*, 6 (81), 1357 (1959).
- [16] M. W. Tausch, M. Heffen, R. Krämer, N. Meuter, „Passendes Licht – Harmlose Stoffe“, *PdN - ChiS*, 64 (2), 45, (2015).

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr. Michael W. Tausch, Maria Heffen
Bergische Universität Wuppertal
FB C – L13.01/04
Gaußstr. 20, 42119-Wuppertal
E-mail: mtausch@uni-wuppertal.de
E-mail: heffen@uni-wuppertal.de