

Passendes Licht – harmlose Stoffe

Photochemische Experimente mit LEDs und unbedenklichen Chemikalien

Maria Heffen, René Krämer, Nico Meuter, Michael W. Tausch

Mit LED's und unbedenklichen Chemikalien können innovative Experimente mit Lichtbeteiligung unter Schulbedingungen sowohl sicher und kostengünstig als auch didaktisch prägnant und wissenschaftlich konsistent durchgeführt werden.

Stichwörter: Gefährdungsbeurteilung, Ersatzstoffe, Lichtquellen, photochemische Experimente

1 Gefährdungsbeurteilung – Gift für forschend-entwickelnden Unterricht

In den letzten vier Jahrzehnten hat es im Chemieunterricht wenige nennenswerte Unfälle gegeben. Im Vergleich zum Sportunterricht machen jedoch Unfälle im Chemieunterricht in der Gesamtanzahl von Unfällen in der Schule nur einen Bruchteil aus. Leider sind im Gegensatz zu Sportunfällen Unfälle im Chemieunterricht ein gefundenes Fressen für sensationshungrige Medien. Vorwiegend unter dem Einfluss so ausgelöster Diskussionen in der Öffentlichkeit und weniger auf Grundlage sachkundiger Beratung aus der Chemie, hat die Politik schrittweise immer schärfere Verordnungen erlassen, die zum Verwendungsverbot (zu) vieler Stoffe geführt haben. Außerdem wurden Auflagen eingeführt, die die Lehrkräfte verpflichten für jedes durchzuführende Experiment im Voraus ein bürokratisches Monster mit dem Namen *Gefährdungsbeurteilung* schriftlich anzufertigen. Darin müssen nicht nur alle eingesetzten Stoffe mit ihren Ge-

fährdungsmerkmalen dokumentiert, sondern auch die Reaktionsbedingungen erläutert werden. Zusätzlich muss ebenfalls angegeben werden, welche Produkte und Nebenprodukte entstehen. Die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen sind anzugeben und eine Ersatzstoffanalyse muss durchgeführt werden. Dabei wird der Frage nachgegangen, ob das Experiment bei gleichem didaktischem Ziel mit anderen, weniger gefährlichen Stoffen durchgeführt werden kann. Entschließt sich die Lehrkraft, auf den Ersatz eines Gefahrstoffes zu verzichten, so muss sie dies bei den Stoffen mit ESP-Kennzeichnung (besondere Ersatzstoffprüfung) ausführlich begründen.

Wie soll in Zeiten von Verwendungsverboten und Gefährdungsbeurteilungen im Chemieunterricht vernünftig experimentiert werden?

Die Arbeitsgruppe „Experimentalunterricht“ der Fachgruppe Chemieunterricht der GDCh erarbeitet neben Empfehlungen an die Kultusministerien auch konkrete Hilfen für Lehrkräfte an Schulen, beispielsweise zur Ausstattung von Chemiesammlungen und Fachräumen. Außerdem leistet sie wichtige Beiträge zur

Ausbildung in der Fachdidaktik an den Hochschulen. Engagierte Chemielehrer, die nach ihrer Pensionierung den experimentellen Chemieunterricht fördern möchten, bieten auf ihren Websites vorgefertigte Gefährdungsbeurteilungen an, die im Einzelfall jedoch angepasst werden müssen. Und schließlich stellen Schulbuchverlage passgenau zu jedem Experiment aus ihren Büchern die zugehörige Gefährdungsbeurteilung zur Verfügung. Zusammen genommen sind das zwar arbeitserleichternde Hilfen, sie lösen aber folgendes Problem nicht: Streng genommen dürfte ein Experiment nur exakt nach der durch die Gefährdungsbeurteilung abgesicherten Version durchgeführt werden. *Forschend-entwickelnder Unterricht* wird so unmöglich. Er setzt voraus, dass die Lernenden Hypothesen aufstellen und weitere Experimente oder zumindest Abänderungen eines durchgeführten Experiments vorschlagen und diese neuen Versuche auch durchführen. Das ist aber nicht möglich, weil die Lehrkraft dafür ad hoc keine Gefährdungsbeurteilung zur Hand hat und auch gar nicht haben kann!

Gleiches gilt für offene Unterrichtsmethoden, bei denen experimentelle Zu-

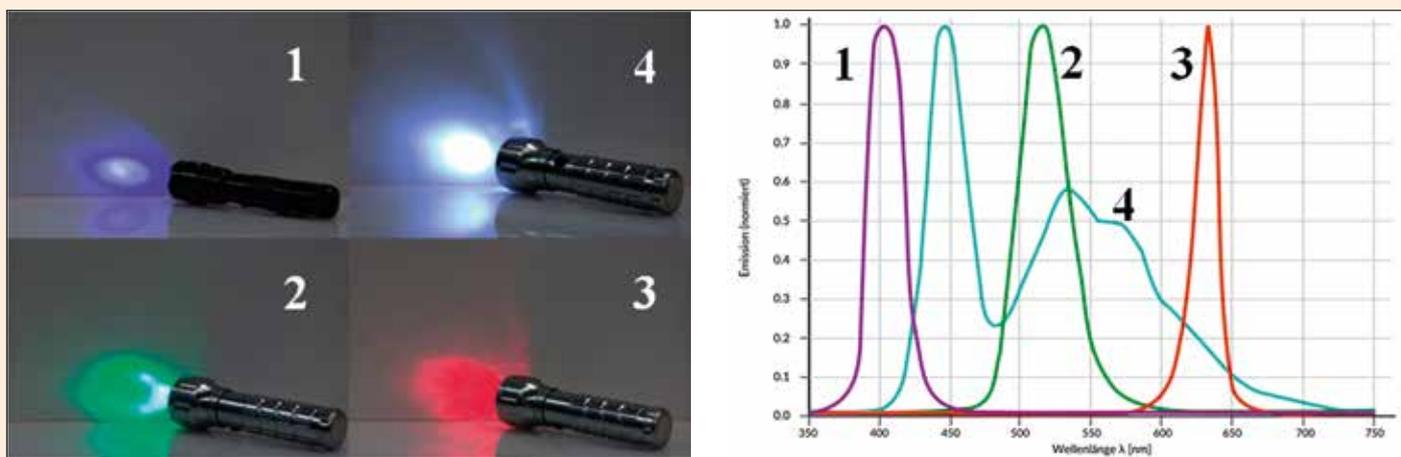


Abb. 1.: LED-Taschenlampen und ihre Emissionsspektren (Von links nach rechts: violett $\lambda_{\max} = 405$ nm; weiß; grün $\lambda_{\max} = 516$ nm; rot $\lambda_{\max} = 633$ nm)

gänge zu einem Problem von den Schülern selbst mithilfe von Interaktionsboxen oder Experimentierkits gefunden und erprobt werden sollen. Die Pflicht einer Gefährdungsbeurteilung für jedes Experiment erstreckt jene Methoden, mit denen ein fachlich solider und gleichzeitig attraktiver und motivierender Chemieunterricht gestaltet werden kann.

Wenn forschend-entwickelnder Unterricht weiterhin Bestand an unseren Schulen haben soll, darf es für Experimente, die im Unterricht geplant werden, keine Pflicht für Gefährdungsbeurteilungen geben.

2 Nachhaltigkeit mit neuen Lichtquellen und Chemikalien

Bei zunehmender Erdbevölkerung, abnehmenden Rohstoffen, drohenden Energieengpässen und zu erwartenden Klimaänderungen müsste das Prinzip der Nachhaltigkeit als *fächerübergreifendes Basiskonzept* in allen Lehrplänen naturwissenschaftlicher Schulfächer vorgeschrieben sein. Wenn im Unterricht Inhalte thematisiert werden, die eng mit nachhaltigen Lebensweisen und Technologien zusammenhängen, wird die *Grundidee der Nachhaltigkeit* ins Bewusstsein der Lernenden transportiert. Um dort zu keimen und auch im Sinne eines lebenslangen, *nachhaltigen Lernens* zu wirken, eignen sich einfache aber aussagekräftige Experimente.

Nachhaltigkeit ist eng an die energetische Nutzung des Sonnenlichts gekoppelt. Daher ist die Erschließung von Verfahren zur großtechnischen Nutzung der Sonnenstrahlung heute eine erstrangige Herausforderung an die Naturwissenschaften. Dieses historische Großprojekt der Menschheit wird sich über die folgenden Jahrzehnte des 21. Jahrhunderts erstrecken. Um es voranzutreiben, muss insbe-

sondere die heranwachsende Generation möglichst früh an Prozesse mit Lichtbeteiligung herangeführt werden. Zahlreiche Experimente mit Licht und Hinweise auf ihre Einbindung in den Chemieunterricht können unter [1] eingesehen werden und sind in der kürzlich erschienenen Übersicht [2] zusammengefasst. Um photochemische Experimente in mehrfachem Sinne *einfacher* für den Schulgebrauch zu gestalten, wurden *Lichtquellen* und *Chemikalien* aus bereits beschriebenen Experimenten durch modernere, kostengünstigere und sicherere Alternativen ersetzt.

Der teure und für Schülerhand ungeeignete UV-Tauchlampenreaktor mit einer 125-Watt Quecksilberhochdrucklampe [3] und die zwar kostengünstige, aber sehr grell weiß leuchtende und stark aufheizende Ultravitaluxlampe [4] haben bei vielen unserer Experimente ausgedient. Sie wurden durch **LED-Taschenlampen** ersetzt, die für weniger als 30 Euro erhältlich sind. Die LED-Taschenlampen sind einfach und sicher handhabbar und somit für Schülerexperimente geeignet. Aus didaktischer Sicht sind LEDs wegen ihres nahezu monochromatischen Lichts „intelligenter“ als Lampen mit breiten Emissionsspektren (Abb. 1).

Für den normalen Chemieunterricht sind die LED-Taschenlampen als Lichtquellen – neben der Sonne – völlig ausreichend. Damit lässt sich erschließen, dass verschieden farbiges Licht aus LED-Taschenlampen unterschiedliche Phänomene mit Lichtbeteiligung bei unterschiedlich gefärbten Ausgangsstoffen antreiben kann. Je nach Unterrichtsziel und Unterrichtsmethode lassen sich mit LEDs u. a. folgende Prozesse mit Lichtbeteiligung erschließen bzw. vermitteln:

- Einfache Leuchterscheinungen wie Fluoreszenz, Phosphoreszenz,
- reversible Farbänderungen bei einfachen photochemischen Reaktionen,
- Relation zwischen Molekülstruktur und Farbe eines Stoffes,
- Zusammenhang zwischen der Farbe des Lichts, der Position dieser Farbe im Spektrum des sichtbaren Lichts, der entsprechenden Wellenlänge und dem Energiegehalt der entsprechenden Photonen.

Schulen, in denen über den Chemieunterricht hinaus Projektkurse und / oder Arbeitsgemeinschaften zu fächerübergreifenden, innovativen und nachhaltigen Inhalten mit Photoprozessen angeboten werden, können außer LED-Taschenlampen auch leistungsstärkere, luftgekühlte high power LEDs anschaffen (Abb.2).

Je nach Wellenlänge des emittierten Lichts sind diese *high power* LEDs allerdings 10- bis 30-mal teurer als LED-Taschenlampen. Beim Arbeiten mit den *high power* LEDs müssen die Augen mit einer dunkel getönten Sonnenbrille geschützt werden.

Zur Anregung der Lumineszenz von fluoreszierenden und phosphoreszierenden Proben eignen sich nach wie vor die in vielen Sammlungen vorhandenen *Hand-UV-Lampen*, die in der Regel bei zwei Wellenlängen, $\lambda = 366 \text{ nm}$ und $\lambda = 254 \text{ nm}$, betrieben werden können. Mit Ausnahme des auf Dünnschichtchromatographie-Folien enthaltenen Fluorophors F_{254} können die meisten Fluorophore bereits mit der violetten LED-Taschenlampe aus Abb. 1 oder auch mit einer preiswerten, im Baumarkt erhältlichen Leuchtröhre für Schwarzlicht angeregt werden.

Die zweite experimentelle Innovationschiene in diesem Beitrag betrifft den Er-

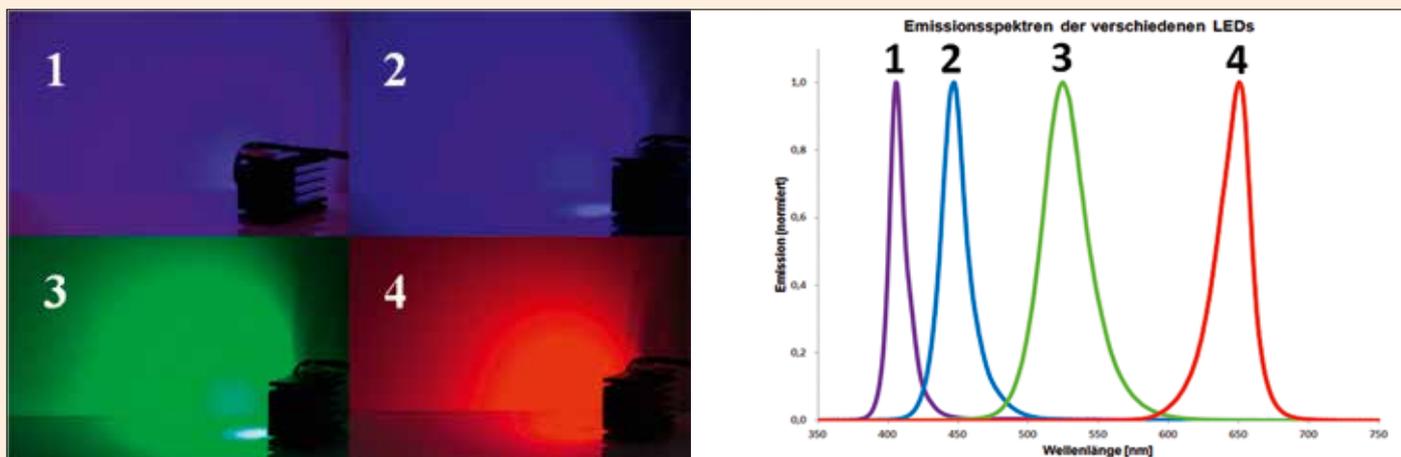
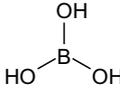
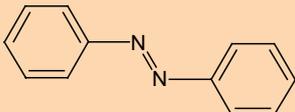
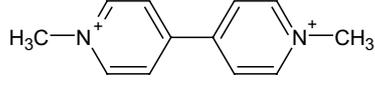
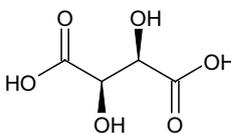
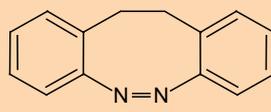
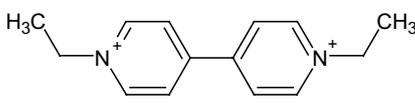


Abb. 2: Luftgekühlte high power LEDs und ihre Emissionsspektren (Von links nach rechts: violett $\lambda_{\max} = 400 \text{ nm}$; blau $\lambda_{\max} = 450 \text{ nm}$; grün $\lambda_{\max} = 530 \text{ nm}$; rot $\lambda_{\max} = 627 \text{ nm}$)

Photolumineszenz	Photoisomerisierungen	Photoredoxreaktionen
<p>Borsäure</p>  <p>Gefahrstoffkennzeichnung EU (bis 2015): T</p> <p>GHS: </p> <p>Einsatz in der Schule Problematisch aufgrund von H360FD: „Kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen. Kann das Kind im Mutterleib schädigen.“ => Nicht in Schülerhände; besondere Beschränkungen für Lehrkräfte; bis August 2014 galt Verwendungsverbot.</p>	<p>Azobenzol</p>  <p>Gefahrstoffkennzeichnung EU (bis 2015): T, N</p> <p>GHS: </p> <p>Verwendungsverbot in der Schule aufgrund von H350: „Kann Krebs erzeugen“ und H341: „Kann vermutlich genetische Defekte verursachen.“</p>	<p>Methylviologen</p>  <p>Gefahrstoffkennzeichnung EU (bis 2015): T+, N</p> <p>GHS: </p> <p>H372: „Schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition.“ Nach RISU-NRW: „Hohe Gefährdung.“ => Für den Einsatz in der Schule nur bedingt geeignet.</p>
<p>L(+)-Weinsäure</p>  <p>Gefahrstoffkennzeichnung EU: Xi</p> <p>GHS: </p> <p>Für den Einsatz in der Schule ab der 5. Jahrgangsstufe unter Einhaltung der TRGS500 gestattet.</p>	<p>Diazocin</p>  <p>Gefahrstoffkennzeichnung Nicht klassifiziert</p>	<p>Ethylviologen</p>  <p>Gefahrstoffkennzeichnung EU: Xn</p> <p>GHS: </p> <p>Für den Einsatz in der Schule ab der 5. Jahrgangsstufe unter Einhaltung der TRGS500 gestattet.)</p>

Tab. 1 Alternative Chemikalien für drei Schlüsselexperimente mit Licht

satz einiger giftiger oder gar mit Verwendungsverbot klassifizierter Chemikalien aus photochemischen Experimenten durch erlaubte, sicherheitstechnisch unbedenkliche Verbindungen. Es handelt sich um Ersatzchemikalien für Azobenzol, Methylviologen und Borsäure (Tab. 1).

Mit diesen Stoffen können die folgenden Experimente durchgeführt werden.

3 Photolumineszenz

Das durch Bestrahlung mit UV-Licht erzeugte farbige Leuchten eines Objekts ist heutzutage eine Alltagserfahrung und hat zahlreiche Anwendungen. Sie reichen von den Bereichen Kunst und Design bis zur hochauflösenden Spektroskopie in der Analytik und der medizinischen Diagnostik. Auf Photolumineszenz basiert auch die hochauflösende Nanoskopie, eine Methode, mit der Vorgänge auf molekularer Ebene im lebenden Körper sichtbar gemacht werden können. Dafür erhielten **Stefan Hell, Eric Betzig und William Moerner** den Chemie-Nobel-Preis 2014.

In vorangegangenen Arbeiten [3] und Schulbüchern [4] wurden Experimente beschrieben, die an Alltagserfahrungen anknüpfen und zur Erschließung des Kon-

zepts vom Grundzustand und elektronisch angeregten Zuständen führen. Das damit einhergehende Energiestufenmodell für Moleküle liefert die theoretische Erklärung für alle Arten von Farbigkeit durch Lichtabsorption und -emission, also neben der Photo- auch für die Chemo- und Elektrolumineszenz. Das Energiestufenmodell ist mittlerweile zu einem obligatorischen Inhalt in den Oberstufen curricula einiger Bundesländer avanciert [5]. Unter diesen Gegebenheiten sind Versuche zur Fluoreszenz und Phosphoreszenz nicht mehr unter „ferner möglich“ zu betrachten, sondern sie sollten zum Standardrepertoire der Schulexperimente gehören. Ein sehr aussagekräftiges Experiment, mit dem forschend-entwickelnd das Energiestufenmodell eingeführt, getestet und verfeinert werden kann, beinhaltet die Immobilisierung eines organischen Fluorophors in einer kristallinen oder amorphen Feststoffmatrix [6]. Wenn die so erhaltene Probe blau fluoresziert und gelb-grün phosphoresziert, sind die Beobachtungen aus didaktischer Sicht besonders prägnant, denn sie eignen sich bestens zur Einführung des Energiestufenmodells [4]. Solche Proben können beispielsweise durch Einschmel-

zen von H-Säure (4-Amino-5-hydroxy-naphthalin-2,7-disulfonsäure-monomatriumsalz) in Borsäure erhalten werden [3a, 4]. Um das Gefährdungspotenzial durch Borsäure (vgl. Tab. 1) zu umgehen und gleichzeitig die Herstellung zu vereinfachen, kann der unten beschriebene Versuch, der ganz ähnliche Beobachtungen liefert (Abb. 3), durchgeführt werden.

Fluoreszenz und Phosphoreszenz von Aesculin in Weinsäure-Matrix: Ca. 5 g Weinsäure werden in ein großes Rggl. gegeben und vorsichtig über der Brennerflamme zum Schmelzen gebracht. In die Schmelze werden ca. 5 mg pulverförmiges Aesculin gegeben und durch vorsichtiges Schütteln in der Schmelze gelöst. Anschließend wird die Schmelze an einem großen Teil der Innenwand des Rggl. verteilt. Das erreicht man, indem das Rggl. schräg gehalten und gedreht wird. Die erstarrte, noch warme Probe fluoresziert im Licht der violetten LED-Taschenlampe blau (Abb. 3, links). Beim Ausschalten der Lampe verschwindet die Lumineszenz sofort. Kühlt man die Probe ebenfalls auf ca. 5 °C ab, fluoresziert die Probe ebenfalls blau, leuchtet jedoch nach dem Ausschalten der Lampe ca. 1–2 Sekunden in grüner Farbe nach (Abb. 3, rechts).

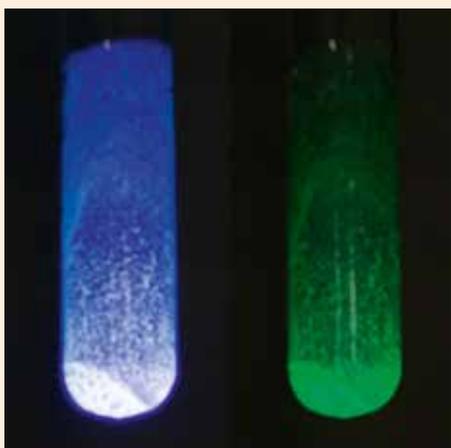


Abb. 3: Fluoreszenz und Phosphoreszenz von Aesculin in Weinsäure

4 Z-E (cis-trans) – Photoisomerisierungen

Mit Z- und E-Azobenzol lässt sich experimentell sehr einfach und schnell auf einer Dünnschichtfolie und mit dem Tageslichtprojektor erschließen, dass die Isomerisierung $E \rightarrow Z$ nur photochemisch, die Isomerisierung $Z \rightarrow E$ dagegen photochemisch und thermisch angetrieben werden kann [4, 7]. Es wird mit geringsten Mengen verdünnter Azobenzol-Lösung gearbeitet. Selbst wenn das gesamte im Experiment eingesetzte Azobenzol in die Luft des Klassenraums gelänge (was aufgrund der Siedetemperatur von 293 °C unter den Bedingungen des Experiments unmöglich ist), läge seine Konzentration unter dem zulässigen Grenzwert für Benzol in der Luft einer Großstadt. Trotzdem ist dieser Versuch nicht mehr möglich, weil für Azobenzol seit geraumer Zeit *Verwendungsverbot* an Schulen gilt (Tab. 1). Dieses Verbot ist übertrieben, unnötig und unsinnig, aber wer es missachtet, macht sich strafbar.

Da in intelligenten Materialien mit photoschaltbaren Eigenschaften oft eine Diazo-Gruppe $-N=N-$ wie im Azobenzol-Molekül als molekularer Schalter fungiert, erschien es angebracht, nach Ersatzstoffen

für Azobenzol zu suchen. Nach etlichen Fehlgriffen wurde eine Verbindung mit dem Kurznamen Diazocin (5,6-Dihydrodibenzo[c,g][1,2]-diazocin), ins Visier genommen, mit der die Kieler Arbeitsgruppe um Prof. R. Herges arbeitet. Diazocin lässt sich durch eine einstufige Synthese herstellen [8]. Anders als bei den Azobenzol-Isomeren ist das Z-Diazocin thermodynamisch stabiler als das E-Isomer. Unter Bestrahlung von Z-Diazocin bei $\lambda = 400$ nm stellt sich ein photostationärer Zustand ein, bei dem zu über 90% E-Diazocin vorliegt (Abb. 4). Durch Bestrahlung mit Licht der Wellenlänge 480–550 nm isomerisiert das E-Diazocin zu 100% zu seinem Z-Isomer zurück. Im Gegensatz zu Azobenzol findet hier ein deutlich erkennbarer Farbwechsel von gelb nach rot und zurück statt.

Z-E (cis-trans) Photoisomerisierungen von Diazocin: 1 mg Diazocin wird in 10 mL Ethansäureethylester gelöst ($c = 0,0005$ mol/L). Die gelbe Lösung ist sehr stabil und hält im Dunkeln gelagert mehrere Monate.

Die angesetzte Diazocin-Lösung wird in zwei 5 mL Schraubdeckelgläser gefüllt. Ein zugeschraubtes Gläschen wird mit einer LED mit violetterm Licht der Wellenlänge $\lambda = 400$ nm bestrahlt. Bereits nach wenigen Sekunden ist eine Farbänderung von gelb nach rot zu beobachten. Nach 2 Minuten ist die Lösung komplett rot gefärbt. Bestrahlt man die rote Lösung nun mit grünem Licht der Wellenlänge $\lambda = 530$ nm, so färbt sie sich innerhalb von 2 Minuten wieder komplett gelb. Die Reaktionszyklen sind beliebig oft wiederholbar.

5 Photokatalytische Redoxreaktionen

Sowohl Katalyse als auch Redoxreaktionen sind schon seit langem etablierte Konzepte im Chemieunterricht. Sie werden von Beginn an bis zum Abitur auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen und an unterschiedlichen Beispielen vermittelt. Photokatalytische Redoxreaktionen wurden erst in den letzten 25 Jahren experi-

mentell und konzeptionell für den Unterricht erschlossen [9] und in einige Lehrgänge eingebunden [4]. Von herausragender Bedeutung ist dabei das Photo-Blue-Bottle Experiment, das grundlegende Analogien zum natürlichen Kreislauf Photosynthese/Zellatmung aufweist [9b, 4].

Während der Photosynthese läuft, wie im Photo-Blue-Bottle-Versuch, eine lichtgetriebene Reduktion ab, bei der Lichtenergie in chemische Energie umgewandelt und gespeichert wird. Diese Reduktion kann in beiden Systemen nur unter Beteiligung eines farbigen Photokatalysators ablaufen. Im Rahmen der Zellatmung werden die Produkte der Photosynthese mit Sauerstoff wieder oxidiert und auch im Photo-Blue-Bottle-Versuch wird das reduzierte Substrat mit Sauerstoff zurückoxidiert.

Das PBB-Experiment eignet sich in seinen verschiedenen Versionen für den Einsatz vom Anfangsunterricht bis zum Abitur auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen und in unterschiedlichen Zusammenhängen, beispielsweise bei der:

- Beteiligung der Energieform Licht an chemischen Reaktionen,
- Beteiligung von Sauerstoff an Oxidationsreaktionen,
- Erweiterung des Redoxbegriffs (Elektronentransferreaktionen),
- Wirkungsweise eines (Photo-) Katalysators,
- Relation Molekülstruktur-Farbigkeit,
- Energiekonversion und -speicherung

Das Photo-Blue-Bottle Experiment kann jetzt mit LED-Taschenlampen und unter Ausschluss des giftigen Methylviologens (Tab. 1) durchgeführt werden. Hier sind die Grundversion und eine erste Erweiterung beschrieben, weitere Versionen werden folgen.

Photo-Blue-Bottle mit LED-Taschenlampe, EDTA, Ethylviologen und Proflavin:



Abb. 4: Z-E-Isomerisierungen von Diazocin (links Z-, rechts E-Isomer)



Abb. 5: Photo-Blue-Bottle Experiment (links mit LED-Taschenlampe, rechts nach der Bestrahlung mit den high power LEDs)

Folgende drei Lösungen werden hergestellt:

Lösung I: 2,8 g EDTA (Ethyldiamintetraessigsäure-dinatriumsalz) in 100 mL dest. Wasser ($c = 0,075 \text{ mol/L}$)

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

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

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. Diese gelbe, schwach fluoreszierende Lösung ist unter Lichtabschluss (z. B. in einer braunen Glasflasche oder in einer Flasche umwickelt mit Aluminiumfolie) mehrere Monate haltbar.

a) In ein 5 mL-Schraubdeckelgläschen werden 4 mL PBB-Lösung gegeben. Das zugeschraubte Gläschen wird mit der UV-LED-Taschenlampe bestrahlt. Schon nach weniger als einer Minute tritt eine Blaufärbung ein und nach 5–10 Minuten ist die Lösung vollständig blau. Durch Schütteln des zugeschraubten Gläschens verschwindet die blaue Farbe,

die Lösung wird wieder gelb. Dieser Zyklus lässt sich ca. 20-mal durchführen.

b) Um den Effekt verschiedener Wellenlängen zu untersuchen werden in vier verschiedene 5 mL-Schraubdeckelgläschen 4 mL PBB-Lösung gegeben. Die Gläschen werden fest zugeschraubt und mit je einer der in Abb. 2 angegebenen LEDs bestrahlt. Nach 5 Minuten Bestrahlung erhält man das in Abb. 5b dargestellte Ergebnis. Es zeigt, dass eine Blaufärbung nur bei Bestrahlung mit blauem oder violetterem, nicht aber mit grünem oder rotem Licht erfolgt. Am intensivsten ist die Blaufärbung bei der Probe, die mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 450 \text{ nm}$ bestrahlt wurde. Dieses Licht der blauen LED wird von der gelben PBB-Lösung besser absorbiert als das der violetten LED mit $\lambda = 400 \text{ nm}$. ■

Dank

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG wird für die Förderung des Forschungsvorhabens Photo-LeNa (Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften) gedankt.

Herrn Prof. Dr. Rainer Herges, Kiel, wird für die Ratschläge zur Synthese von Diazocin gedankt.

Literatur

- [1] <http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de>
 [2] Nr. 212 unter „Publikationen“ auf [1]
 [3] Nr. 22, 49, 107, 170 unter Publ. auf [1]
 [4] Nr. 135, 157, 159, 163, 165, ... 204, 210 unter „Publikationen“ auf [1]
 [5] a) Chemie Kernlehrplan Gymnasium Sek. I (G8), Ritterbach Verlag, Frechen 2008,
 b) Chemie Kernlehrplan Sek. II, Ritterbach Verlag, Frechen 2013
 [6] Min Sang Kwon, Dongwook Lee, Sungbaek Seo, Jaehun Jung, and Jinsang Kim: „Tailoring Intermolecular Interactions for Efficient Room-Temperature Phosphorescence from Purely Organic Material in Amorphous Polymer Matrices“, *Angew. Chem.* 126 (42), 11359 (2014)
 [7] Nr. 21 unter „Publikationen“ auf [1]
 [8] Sell, H., Näther, C., Herges, R.: „Amino-substituted diazocines as pincer-type photochromic switches“ *Beilstein J. Org. Chem.*, 9, 1 (2013)
 [9] Nr. 26, 43, 116, 176 unter Publ. auf [1]

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr. Michael W. Tausch*
Maria Heffen, René Krämer, Nico Meuter
 Bergische Universität Wuppertal
 FB C – L13.01/04
 Gaußstr. 20, 42119-Wuppertal
 mtaus@uni-wuppertal.de