

Mehr Licht im Chemieunterricht! Experimentelle Zugänge zu Grundkonzepten der Photochemie

Michael W. Tausch*

Abstract: On September 8, 2016, the Swiss Chemical Society (SCS) organized a symposium called the ‘Future of Chemical Education’ with lectures and workshops during the SCS Fall meeting at ETH Zurich. This article is a summary of the lecture and workshop that the author held at this event in which teachers carried out model experiments on photocatalysis and conversion of solar energy into stored chemical energy.

Keywords: angeregte Zustände · curriculare Innovationsforschung · Nachhaltigkeit · Photoprozesse

1. Warum „Mehr Licht im Chemieunterricht“?

Diese Frage ist angesichts der vollen, oft übervollen Lehrpläne für den Chemieunterricht berechtigt. Es gibt aber kaum ein Schulfach, dessen Inhalte sich so rasch erneuern wie in der Chemie. Dabei geht es nicht um die Grundkonzepte dieser Disziplin, wohl aber um die Beispiele, an denen sie im Unterricht erschlossen werden. In diesem Zusammenhang sind Alltagsphänomene, technische Anwendungen und Zukunftsvisionen, bei denen *Licht* eine zentrale Rolle spielt, von einer herausragenden Bedeutung.

Unter den globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts nimmt die **Energieversorgung** bei wachsender Erdbevölkerung und steigendem durchschnittlichem Energiebedarf pro Erdbewohner einen Sonderplatz ein. Die Bereitstellung von Energie für die durch Technik geprägte Zivilisation muss gleichzeitig kostengünstig und langfristig sicher, umweltschonend und nachhaltig sein. Die Sonneneinstrahlung beträgt in jedem Jahr das 100-fache der gesamten als abbaufähig erachteten Weltreserven an Kohle,

Erdöl, Erdgas und Uran.^[1] Der Mensch hat in den letzten Jahrhunderten des „*anthropocene*“ die natürlichen Bedingungen für sein langfristiges Überleben auf diesem Planeten massiv beeinträchtigt. Er hat zum einen riesige, Photosynthese treibende Waldflächen vernichtet und zum anderen Kohlenstoff aus den fossilen chemischen Energiespeichern als Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre gebracht. Dadurch hat er die stoffliche Bilanz beim Kreislauf des Kohlenstoffs und seiner Verbindungen in doppelter Weise zuungunsten der Nutzung von Solarlicht beim energetischen Antrieb der Biosphäre beeinflusst. Im „*sustai-nocene*“,^[2] der neuen Ära, in die sich die Menschheit begibt, muss das Prinzip der **Nachhaltigkeit** Vorrang erhalten. Das bedeutet, dass auch die Technosphäre ebenso wie die aus der natürlichen Evolution hervorgegangene Biosphäre vorwiegend die Energieform nutzt, die dem Planeten in kosmischen Größenordnungen und über astronomische Zeiträume hinweg zur Verfügung steht und darüber hinaus, aus der Sicht der höheren Lebewesen auch noch als sauber zu bezeichnen ist. Das Licht der Sonne erfüllt alle diese Bedingungen. Dem entsprechend prognostiziert der Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen WBGU der deutschen Bundesregierung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine Zunahme des Anteils an Solarenergie beim globalen Energiemix auf bis ca. 60%.^[3]

Photoprozesse, d.h. Phänomene mit Lichtbeteiligung, sind **Schlüsselvorgänge in Funktionseinheiten** von größeren Systemen in der Natur und in der Technik. So können beispielsweise das Blatt, das Auge, die Atmosphäre, eine Solarzelle, eine LED und viele ähnliche Systeme, bei denen Licht entweder als *input* oder als *output* beteiligt ist, als Photoreaktoren angesehen wer-

den. Die aktuellen Anwendungen und die Forschung im Bereich der Photoprozesse erstrecken sich quer über alle naturwissenschaftlichen Disziplinen, die Material-, Lebens- und Ingenieurwissenschaften. In fachwissenschaftlichen Zeitschriften ist die Häufigkeit von Stichwörtern wie „Solarzellen“, „Energieumwandlung“, „Photochemie“, „Photokatalyse“, „Wasserphotolyse“, „Photochromie“, „Photosynthese“, „Photoaktive molekulare Schalter“, „Lumineszenz“ etc. außerordentlich hoch, mehrere Nobelpreise der letzten Jahre wurden für wissenschaftliche Leistungen vergeben, die mit solchen Stichwörtern zu tun haben.

Der Vorrang von Photoprozessen bei der Entwicklung von *high tech* Materialien und Verfahren sowie von wissenschaftlichem und technischem *know how* als Garanten für Prosperität und Nachhaltigkeit in der Zukunft steht außer Zweifel. Daher müssen Photoprozesse im 21. Jahrhundert auch in der naturwissenschaftlichen Bildung, speziell im Chemieunterricht und in benachbarten MINT-Fächern, ein höheres Gewicht erhalten (Abb.1).

Um das zu beschleunigen, werden entsprechende Lehr-/Lerninhalte didaktisch erschlossen. Neue Fachinhalte zu Photoprozessen didaktisch erschließen heißt

1. überzeugende Experimente und Experimentreihen zu diesen Fachinhalten entwickeln,
2. sie mit wissenschaftlich konsistenten Konzepten und Modellen untermauern und
3. diese in die chemische Fachsystematik einbinden.

Die **curriculare Innovationsforschung** folgt diesem Fahrplan.^[4,5] Neben Experimenten und Konzepten liefert sie didaktische Materialien für Unterricht, Lehre und individuelles Lernen. Diese umfassen

*Correspondence: Prof. Dr. M. W. Tausch
Bergische Universität Wuppertal
Fakultät 4, Chemie, Gaußstr. 20
D-42119 Wuppertal
E-Mail: mtausch@uni-wuppertal.de



Abb. 1. Photoprozesse haben in den MINT-Fächern des Schulunterrichts Querschnittscharakter (Bildbearbeitung: Nico Meuter).

Printmedien vom Arbeitsblatt bis zum kompletten Lehrbuch sowie elektronische Medien vom Kurzvideo bis zum Tutorial-Lehrfilm und von der Modellanimation bis zum Hypermedia-Netzwerk. Zeitgemäß und von großem Vorteil ist es, wenn die gedruckten und die elektronischen Materialien miteinander vernetzt sind und sich gegenseitig ergänzen. Über die Notwendigkeit, photochemische Inhalte in die Chemielehrerausbildung zu integrieren wird in diesem Heft an anderer Stelle berichtet (vgl. M. W. Tausch, *Chimia* 2018, 72, 13).

2. Didaktisches Schlüsselkonzept und Klassifikation von Photoprozessen

Für die Vermittlung photochemischer und photophysikalischer Inhalte im Schulunterricht enthält das folgende Zitat von N. J. Turro^[6] gleich drei grundsätzliche Gedanken:

„The ‘photo’ part of molecular photochemistry is a historical prefix and is now too restrictive. It is now clear that electronically excited states of molecules are the heart of all photoprocesses. The excited state is in fact an electronic isomer of the ground state.“

Der *erste* Gedanke, die Metapher von den elektronisch angeregten Zuständen als „Herz“ aller Photoprozesse, also aller Phänomene mit Lichtbeteiligung, steht in gutem Einklang mit dem in den Lehrplänen aller Bundesländer in Deutschland verankerten Energiestufen-Modell für Moleküle. Das ist zwar eine recht grobe Vereinfachung des *Jablonski-Diagramms* für die Energiezustände in Molekülen,^[1,7] aber damit lassen sich alle Photoprozesse in erster Näherung wissenschaftlich konsistent erklären.

Der *zweite* insbesondere für die Didaktik des Chemieunterrichts und der Lehre der Chemie an Universitäten ebenfalls bemerkenswerte Gedanke, betrifft den elektronisch angeregten Zustand, den Turro als ein „elektronisches Isomere“ des Grundzustandes bezeichnet. Wir haben es bei einem elektronisch angeregten Zustand tatsächlich mit einer anderen chemischen Spezies zu tun, die ganz andere Eigenschaften hat als das Molekül im Grundzustand, aber immer noch aus den gleichen Atomen besteht. Es handelt sich also schulmäßig um Isomere.

Die *dritte*, für Lehrende und Lernende ebenso wichtige Idee, steht zwar nicht explizit im Turro-Zitat, folgt aber aus dem ersten Satz darin: Der elektronisch angeregte Zustand A^* eines Moleküls A muss nicht notwendigerweise durch Absorption

eines Lichtquants erzeugt werden (Abb. 2). A^* kann auch direkt aus einer stark exergonischen Reaktion hervorgehen (z. B. bei der Chemolumineszenz) oder durch Zufuhr von elektrischer Energie erzeugt werden (z. B. bei organischen Leuchtdioden).

Was das Abklingen oder die Desaktivierung von A^* anbelangt, ergibt sich ein ganzer Zoo von Möglichkeiten (Abb. 2). Sie betreffen die unterschiedlichen Arten von Lumineszenz (Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Chemolumineszenz, Elektrolumineszenz, Elektrochemolumineszenz), unterschiedliche Typen von photovoltaischen Zellen (z. B. anorganische Zellen mit TiO_2 und organische mit Nano- C_{60} und leitenden Polymeren), Energietransfer von A^* auf D (z. B. vom akzessorischen Pigment β -Carotin auf den Photokatalysator Chlorophyll), Isomerisierungen (z. B. *E/Z*-Isomerisierungen), Photoredoxreaktionen (vgl. Teil 3 dieses Aufsatzes) und weitere Photoreaktionen.^[8] Zu allen in Abb. 2 aufgezeigten Desaktivierungsmöglichkeiten des angeregten Zustands A^* gibt es bereits Experimente und weiteres didaktisches Material aus eigener Forschung und Entwicklung.^[9] Diese Artikel sind auf der Website^[7] unter „Publikationen“ als *open access* verfügbar.

3. Photo-Blue-Bottle – ein Experiment mit vielen Facetten

Mit nur drei wasserlöslichen, toxisch harmlosen Chemikalien und LED-Taschenlampen oder Sonnenlicht lassen sich verschiedene Versionen des Photo-Blue-Bottle Experiments durchführen (Abb. 3). Es kann je nach Bedarf als Modellexperiment für Stoffkreisläufe, Redoxreaktionen, Energetik chemischer Reaktionen, galvanische Zellen, Katalyse und Relation Teilchenstruktur-Stoffeigenschaften funktionalisiert werden. Dabei sind diese allgemeinen Konzepte der Chemie ebenso wie die Bezeichnung des Experiments selbst jeweils mit dem Präfix *Photo* zu verknüpfen.

Das Experiment wurde über einen Zeitraum von mehr als zwanzig Jahren getestet, optimiert und in den Lehrgang CHEMIE 2000+ eingebunden.^[10] Die in Abb. 3 dargestellten *low cost* Versionen sind im Rahmen des DFG-Projekts *Photo-LeNa* (Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften) in einem Promotionsvorhaben entwickelt worden.^[11,12] Das Equipment für diese Versuche kann als Experimentierbox über die Wuppertaler Website unter dem Link <http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/lehre/photo-cat/index.html> bezogen werden. Dort sind auch Infos mit fachlichen Grundlagen, didaktischen

Abb. 2. Erzeugung und Desaktivierungsmöglichkeiten des elektronisch angeregten Zustands A^* (F: Fluoreszenz, P: Phosphoreszenz, CL: Chemolumineszenz, EL: Elektrolumineszenz, ECL: Elektrochemolumineszenz).

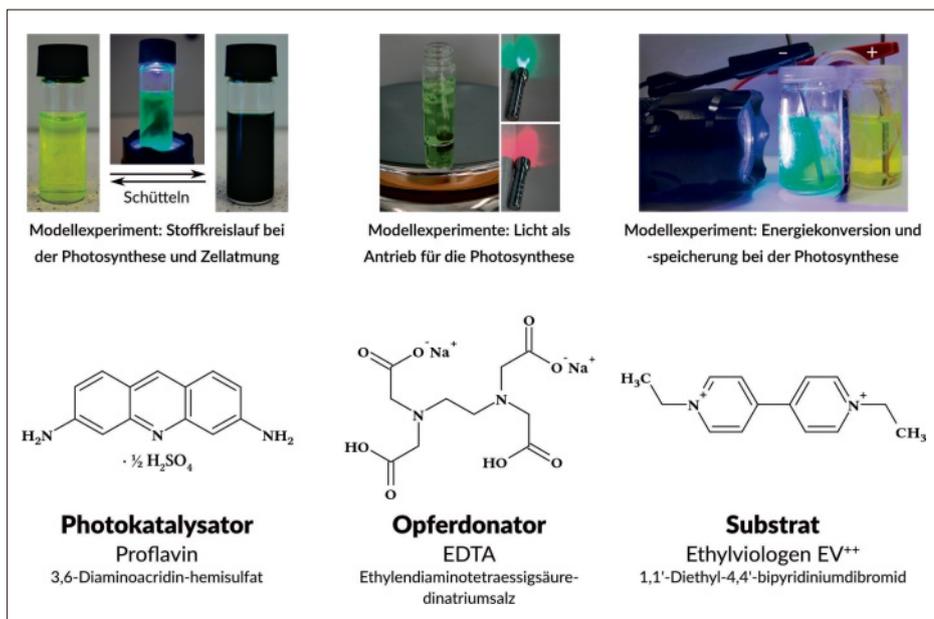
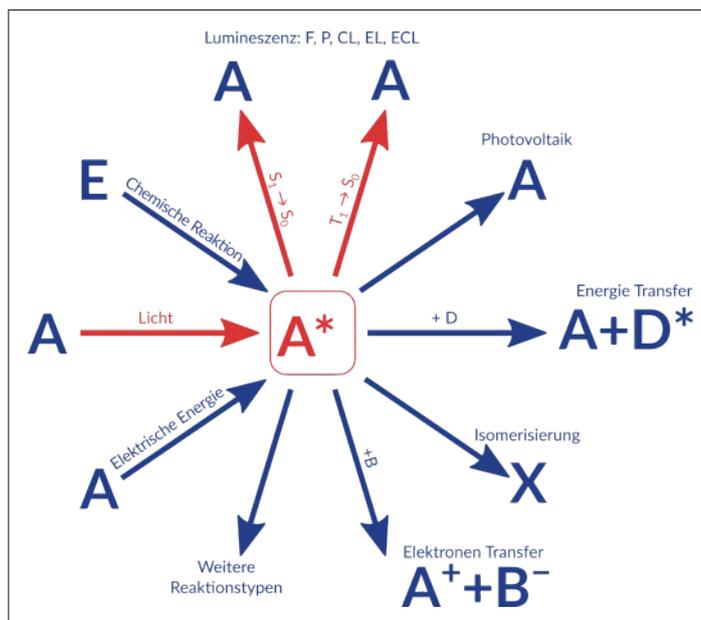


Abb. 3. Drei Versionen, didaktische Funktionen und Chemikalien des Photo-Blue-Bottle Experiments (Bildbearbeitung: Nico Meuter).

Hinweisen, Arbeitsblätter und der Lehrfilm „Photosynthese – ein Fall für zwei“ kostenlos zum Ansehen und Herunterladen bereitgestellt. Mit dem Benutzernamen „Tausch“ und dem Passwort „Photo-Cat“ können bereits publizierte Artikel aus der Literatur als pdf-Dateien geöffnet werden. Dank dieser umfangreichen, leicht zugänglichen *online* Dokumentation können an dieser Stelle die wichtigsten Phänomene und die damit verbundenen Elementarprozesse wie folgt zusammengefasst werden: Die gelbe Lösung färbt sich bei Bestrahlung mit Sonnenlicht oder mit blauem Licht einer LED-Taschenlampe blau. Dabei wird das Ethylviologen-Dikation EV^{++} zum Monokation EV^+ reduziert (Abb. 3). Das ist nur möglich, weil die

Molekül-Ionen PF^+ des Photokatalysators Proflavin durch Photonen aus dem blauen Spektralbereich in den elektronisch angeregten Zustand PF^{+*} angeregt werden und von dort jeweils ein Elektron an ein Dikation EV^{++} übertragen wird (vgl. Abb. 4, Photoelektronentransfer). Ein Teil der Energie des absorbierten Photons ist jetzt im reduzierten Substrat EV^+ gespeichert.

Dass die Reduktion des Substrats nicht thermisch und auch nicht mit grünem oder rotem Licht angetrieben werden kann, wird mit der in Abb. 3 (Mitte) dargestellten Version des Photo-Blue-Bottle Experiments erarbeitet. Der Effekt der Energiekonversion und -speicherung erfolgt in der photoelektrochemischen Konzentrationszelle aus dem

rechten Teil in Abb. 3. Die zusammenfassende Gegenüberstellung in Abb. 5 hebt einige Analogien zwischen dem Modellexperiment und dem natürlichen Stoffkreislauf bei der Photosynthese und Atmung hervor.

Diese Analogien, aber auch die Unterschiede zwischen dem Modellexperiment und den Vorgängen in der Natur bieten gute Möglichkeiten für kritische Reflexion in forschend-entwickelndem Chemie- und Biologieunterricht.

4. Ausblick

Im laufenden DFG-geförderten Forschungsprojekt *Photo-MINT* wird die Qualitätssteigerung der Lehre im Fach Chemie und den benachbarten MINT-Fächern durch curriculare Innovation angestrebt. Der fachliche und didaktische Mehrwert für die Lehre fokussiert als Leitmotiv den elektronisch angeregten Zustand A^* von Molekülen und anderen Teilchenverbänden (vgl. Teil 2 dieses Beitrags). Die möglichen Wege für seine Erzeugung und Desaktivierung (vgl. Abb. 2) werden aus didaktischer Perspektive erschlossen, strukturiert, mit Experimenten, Konzepten, Print- und Elektronikmaterialien für Unterricht und Lehre ausgestattet und in der Lehrerbildung und -fortbildung vermittelt. Dem interdisziplinären Charakter der Phänomene mit Lichtbeteiligung soll dabei besondere Beachtung geschenkt werden. Aus didaktischer Sicht ist es für jedes der Fächer aus Abb. 1 gewinnbringend, wenn die für das jeweilige Fach relevanten stofflichen und energetischen Phänomene bei der Wechselwirkung Licht-Materie auf die Elementarprozesse bei und nach der Interaktion von Photonen mit Molekülen (oder anderen Teilchenverbänden) zurückgeführt werden, also auf diskrete Einheiten, wie sie für die chemische Betrachtungsweise charakteristisch sind. Insofern erhält die Chemie der angeregten Zustände bei der Erschließung und curricularen Integration von Photoprozessen in die Lehrgänge anderer MINT-Fächer eine wegweisende Funktion. Diese Arbeitshypothese wird in mehreren Modulen konkretisiert, die auf jeweils einem oder mehreren Experimenten aus Abb. 6 basieren. In Kooperation zwischen den Fachdidaktiken aus Wuppertal, Köln, Münster und Tübingen wurden bereits die Materialienkoffer „Photo-Mol“^[13] und „Organic Photo Electronics“^[14] nach dem Format von Interaktionsboxen entwickelt, die in Teil 3 erwähnte Materialienbox „Photo-Cat“ ist in Erprobung und an einer weiteren Experimentreihe, die zur „Photo-Switch“ Box führen soll, wird geforscht.

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.

Received: October 19, 2017

- [1] D. Wöhrle, W.-D. Stohrer, M. W. Tausch, 'Photochemie, Konzepte, Methoden, Experimente', Wiley-VCH, Weinheim, **1998**.
- [2] M. Beller, G. Centi, D. Nocera, G. M. Kemeling, P. Göltz: 'Editorial: Foodsteps on the Sustainability Trail', *ChemSusChem* **2010**, 3, 3; D. Nocera: 'The Sustainocene - era of personalized energy', video auf youtube unter: <https://www.youtube.com/watch?v=u92O8LskezY>, letzter Zugriff: 19.10.2017.
- [3] <http://www.agenda21-treffpunkt.de/archiv/04/daten/WBGUenergiemix.htm>, letzter Zugriff: 19.10.2017.
- [4] M. W. Tausch, A. Flint, 'Experimentell-Konzeptionelle Forschung in der Chemiedidaktik', *Nachrichten aus der Chemie* **2016**, 64, 359.
- [5] M. W. Tausch, 'Curriculare Innovationsforschung in der Chemiedidaktik', *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, **2013**, 62 (4), 38.
- [6] N. J. Turro, 'Modern Molecular Photochemistry', Benjamin/Cummings, New York, **1978** (erste Auflage), University Science Books, Sausalito, **1991** (neueste Auflage).
- [7] www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de, Experimente, Videos, Lehrfilme.
- [8] M. W. Tausch, 'Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften', *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, **2015**, 64 (1), 5.
- [9] M. W. Tausch (Hrsg.), *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, Themenheft 'All We Need Is Light', **2015**, 64 (1) und Themenheft 'Funktionelle Farbstoffe', **2016**, 65 (1).
- [10] M. Tausch, M. von Wachtendonk (Hrsg.), 'CHEMIE 2000+, Sekundarstufe II', C.C. Buchner Verlag, Bamberg, **2007**.
- [11] M. W. Tausch, M. Heffen, 'Photokatalyse - homogen und heterogen, Das Photo-Blue-Bottle Experiment runderneuert', *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2015**, 64 (8), 42.
- [12] M. W. Tausch, M. Heffen, 'Photosynthese und Atmung en miniature - Teil 1', *Chemie & Schule* **2016**, 31 (3), 5.
- [13] M. W. Tausch, N. Meuter, 'Funktionelle Farbstoffe - Interaktionsbox für Schulen und Universitäten', *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2016**, 65 (1), 5.
- [14] A. Banerji, 'Organische Elektronik als Lehrstoff', *Nachrichten aus der Chemie* **2017**, 65, 807.
- [15] M. W. Tausch *et al.* Lehrfilme zu Photoprozessen unter: <http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/lehre/lehrfilme/index.html>

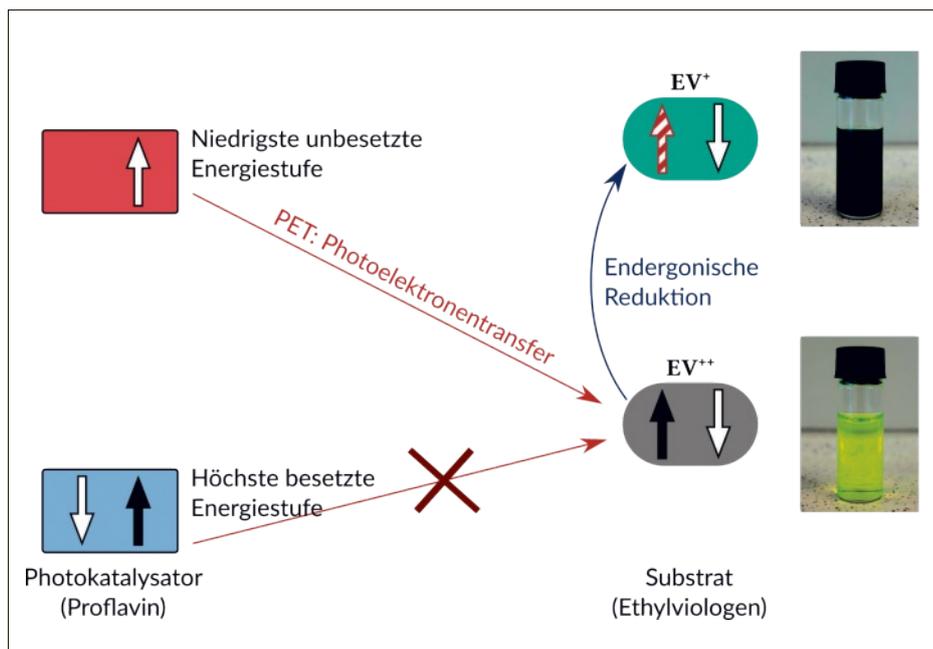


Abb. 4. Elektronische Anregung und Elektronenübertragung bei der photokatalytischen Reduktion von Ethylviologen im Photo-Blue-Bottle Experiment (Bildbearbeitung: Nico Meuter).

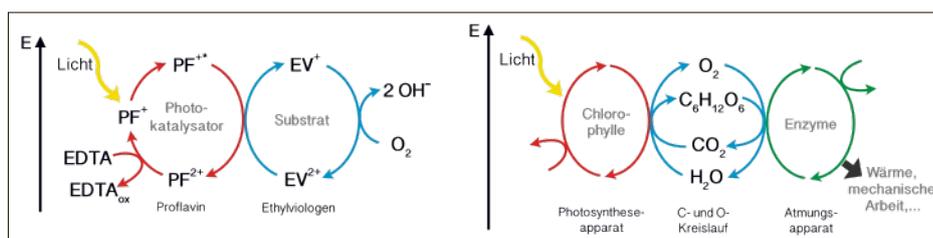


Abb. 5. Die gekoppelten Reaktionszyklen beim Photo-Blue-Bottle Experiment und beim natürlichen Stoffkreislauf Photosynthese-Zellatmung laufen in wässriger Lösung unter Beteiligung von farbigen Stoffen und Sauerstoff aus der Luft ab. Sie werden durch sichtbares Licht angetrieben.

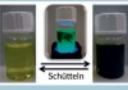
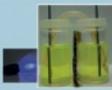
| | |
|--|---|
| Fluoreszenz und Phosphoreszenz Lichtemission nach Anregung mit UV-Licht; Abwärtskonvertierung von Photonen  | Photoredoxreaktionen als Modell Kreislauf Photosynthese-Atmung; Elektronenübertragung und Photokatalyse in homogenen und heterogenen Systemen  |
| Fluoreszenz durch TTA Fluoreszenz durch Triplet-Triplet Annihilation; Aufwärtskonvertierung von Photonen  | Solarenergiekonversion und -speicherung Photoelektrochemische Konzentrationszellen  |
| Chemolumineszenz Lichtemission bei chemischen Reaktionen; Farbstimmung mit Fluorophoren  | Molekulare Schalter Photochemische und thermische Isomerisierungen; optische Datenspeicherung und logische Schaltungen  |
| Elektrolumineszenz Umwandlung von Elektrizität in Licht; Bau und Funktion einer OLED  | Organische Photovoltaik OPV Umwandlung von Licht in Elektrizität; Bau und Funktion einer OPV-Zelle  |
| Solvatochromie Farbänderung in verschiedenen Lösemitteln; Einfluss der Nano-Umgebung auf die Lichtabsorption farbgenerierender Moleküle  | Photosensibilisierung Fluoreszenzlösung und Photoprotektion; Energietransfer und Folgeprozesse in biologischen und technischen Systemen  |

Abb. 6. Die top ten Experimente der curricularen Innovationsforschung in Wuppertal (Bildbearbeitung: Nico Meuter).