

# Photo-LeNa

## Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften

M. W. Tausch

Das International Year of Light 2015 [1] ist nicht der einzige Grund, aber einer mehr, um eine inhaltliche Innovation der MINT-Fächer voranzutreiben, bei der Phänomene mit Lichtbeteiligung einen zentralen Stellenwert einnehmen.

*Stichwörter: Photoprozesse, Energiestufenmodell, Grundzustand, elektronisch angeregte Zustände, Inhaltsfelder des Chemieunterrichts*

### 1 Photoprozesse – eine Herausforderung für Forschung und Lehre im 21. Jahrhundert

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 [2]. Derzeit wird über den so genannten *sustainocene* [3] diskutiert, eine neue Ära, in der das Prinzip der Nachhaltigkeit in allen Bereichen menschlicher Tätigkeiten, Vorrang erhalten wird. 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 zur Verfügung steht und darüber hinaus, aus der Sicht der höheren Lebewesen als „sauber“ zu bezeichnen ist. Das Licht der Sonne erfüllt alle diese Bedingungen.

Ganz in diesem Sinne prognostiziert der Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen WBGU der Bundesregierung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine starke Zunahme des Anteils der Solarenergie beim globalen Energiemix (Abb. 1).

Auch wenn so langfristige Prognosen mit hohen Unsicherheitsfaktoren behaftet sind, wird die eingeleitete Energiewende von großen Teilen der Gesellschaft und Wirtschaft befürwortet. Dadurch er-

geben sich für den Industrie- und Wissenschaftsstandort Deutschland gute Chancen für langfristige Prosperität und Nachhaltigkeit.

Bei der Erforschung und Entwicklung innovativer Materialien und Technologien, die auf der Solarenergienutzung basieren, leistet die Chemie einen essentiellen Beitrag. Um die Exzellenz auf diesem Gebiet zu erhalten und zu steigern muss die junge Generation bereits im Schulunterricht und erst recht im Anfangsstudium *experimentell* und *konzeptionell* an Phänomene mit Lichtbeteiligung, herangeführt werden. Photoprozesse sollten in der Schule nicht nur in Projektkursen und Arbeitsgemeinschaften thematisiert – dort aber verstärkt! – sondern auch in etablierte Lehrgänge der Chemie integriert werden. Hier können sie zur Vermittlung der grundlegenden chemischen Konzepte, Inhalte und Kompetenzen beitragen. Aus der Verknüpfung von Photoprozessen mit interessanten Alltagsphänomenen und innovativen Anwendungen ergibt sich ein hohes Motivationspotential für wissenschaftlichen Nachwuchs in den Natur-, Ingenieur- und Medizinwissenschaften.

### 2 Experimente mit Licht – vom Anfangsunterricht bis zum Abitur

„Ein hübsches Experiment ist an sich oft wertvoller als zwanzig in der Gedankenretorte erbrütete Formeln“ – dieser oft zitierte Aphorismus von A. Einstein sollte stets ein Leitmotiv in der Lehre naturwissenschaftlicher Fächer sein. Der Chemieunterricht ist in ganz besonderer Weise auf „hübsche Experimente“ angewiesen, die in sinnlich wahrnehmbaren Phänomenen genau die Beobachtungen liefern, die treffsicher Deutungen und Erklärungen auf der gedanklichen Ebene der Modelle und Konzepte einleiten. Solche Experimente sind als *didaktisch prägnant* zu bezeichnen.

Experimente, bei denen Vorgänge mit Lichtbeteiligung im Fokus der Beobachtung stehen, können im Unterricht für alle zehn Funktionen, die H.-D. Barke und G. Harsch in ihrer „Chemiedidaktik kompakt“ [5] anführen, didaktisch genutzt werden. Diese zehn didaktischen Absichten lassen sich unter Verzicht auf Details für Experimente mit Photoprozessen auf folgende drei Funktionen zusammenfassen:

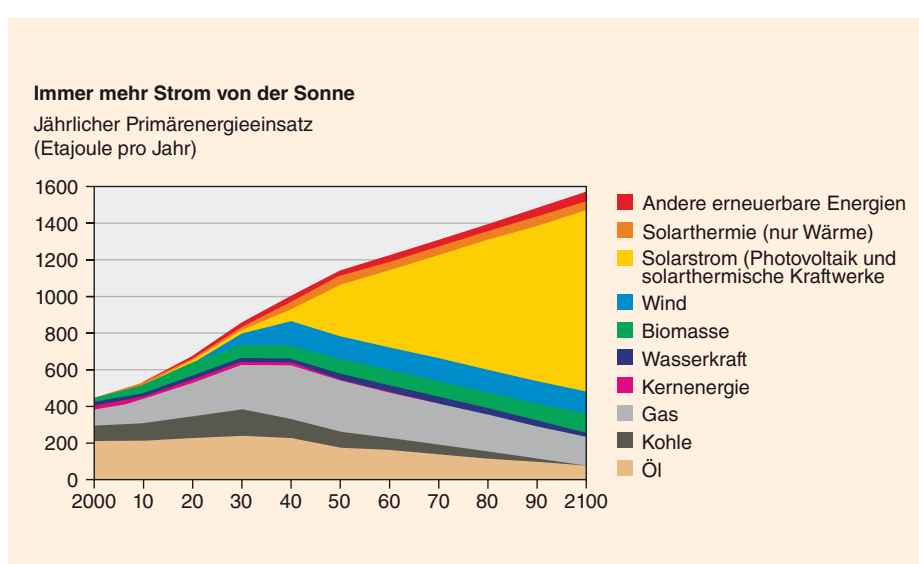


Abb. 1: Prognose zum globalen Energiemix bis zum Jahr 2100 [4]

Tab. 1: Experimente mit Licht, Fachinhalte und Inhaltsfelder der Chemie und anderer MINT-Fächer

Fotos: Claudia Bohrmann-Linde, Simone Krees, Amitabh Banerji, Melanie Zepp, Nico Meuter, Florian Gärtner, Michael Seesing, David Nietz, Sebastian Spinnen, Frederic Posala und Patric Sahling

Bild-Doku	Versuche (Kurzform – Fachinhalte)	Inhaltsfeld	Literatur
	<b>Leuchtfarben*</b> : V1 „Weinender Kastanienzweig“ in Wasser im UV-Licht; als Vergleich im Tageslicht; V2 Geldscheine, Kreditkarten, Textilien, „Kriminaltechnik“ etc. im „Schwarzlicht“ der UV-Lampe; V3 Papier- oder Dünnschichtchromatographie von Blattgrünextrakt, rotes Leuchten der grünen Chlorophyllflecke im UV-Licht <b>Fachinhalte</b> Farbe als Stoffeigenschaft, die bei manchen Stoffen von der Art des Lichts abhängt, in dem der Stoff betrachtet wird; Chromatographie als Trennmethode für Stoffgemische *Weitere Versuche mit Leuchtfarben in Publikationen von M. Ducci et al.	<b>Sek. I: Stoffe und Stoffeigenschaften</b>  <b>Sek. I: Trennung von Stoffgemischen</b> und Nachweis der getrennten Stoffe	22, 38, 46, 135, 170  38, 46, 135, 166
	<b>Licht treibt Reaktionen an</b> : V4 Schwärzung von Silber-salzen bei Licht; V5 Blaufärbung der „intelligenten Folie“ mit LED-Taschenlampen verschiedener Farben und mit Sonnenlicht; V6 Härtung eines Gemisches für Zahnfüllungen im UV-Licht <b>Fachinhalte</b> Antrieb von chemischen Reaktionen durch Licht; Wirkung von Licht verschiedener Farben bei chemischen Reaktionen	<b>Sek. I: Chemische Reaktion als Stoff- und Energieumwandlung</b> ; Beteiligung der Energie in Form von Licht	63, 135, 210
	<b>Licht aus Reaktionen*</b> : V7 „Kalte Weißglut“, d. h. Oxidation von Luminol mit (Luft-) Sauerstoff; V8 Verschiedene Varianten von Luminol-Oxidationen in Lösung mit Wasserstoffperoxid <b>Fachinhalte</b> Kaltes Licht aus chemischen Reaktionen; schnelle und langsame Oxidationen, Sauerstoff als Edukt bei Oxidationen *Weitere Versuche zur Chemolumineszenz in Publikationen von H. Brandl et al.	<b>Sek. I:</b> siehe oben; zusätzlich: <b>Oxidation</b> als Reaktion mit Sauerstoff	48, 166
	<b>UV-Licht, Ozon und Photosmog</b> : V9 Erzeugung von Ozon aus Sauerstoff mit UV-Licht; V10 Nachweis von Ozon durch Schatten auf einem Leuchtschirm, Wirkung von Ozon auf Gummi; V11 Photosmog aus Luft und Luftschadstoffen mit UV-Licht, Wirkung auf Blattgrün; V12 Absorption von UV-Strahlung durch Sonnenschutzcremes <b>Fachinhalte</b> Zusammenhang Sauerstoff-Ozon-UV-Strahlung, Ozonloch und Photosmog	<b>Sek. I: Luft- und Luftschadstoffe</b>	37, 46, 166
	<b>Flammenfärbung durch Alkalimetallverbindungen</b> : V13 Lithium-, Natrium- und Kaliumsalze in der Flamme mit und ohne Cobaltglas <b>Fachinhalte</b> Nachweismethoden, ggf. Energiestufenmodell für Atome	<b>Sek. I: Elementfamilien</b>	46, 166 und alle Schulbücher für Sek., I
	<b>Solarwasserstoff und Brennstoffzelle</b> : V14 Elektrolyse von Wasser mit Strom aus Solarzellen, getrennte Speicherung von Wasserstoff und Sauerstoff in den Perforationen einer platinieren Nickel-folie und ihre „sanfte“ Rückreaktion zu Wasser (Modell einer Brennstoffzelle) <b>Fachinhalte</b> Elektrolyse und Synthese von Wasser, Reaktionsgleichungen mit Energiebeteiligung, Wasserstoff als Energieträger, Energieumwandlungen: Licht → elektrische Energie → chemische Energie (die gespeichert wird) → elektrische Energie → mechanische Arbeit (Funktion der Solarzelle hier noch „black box“)	<b>Sek. I: Wasser, Wasserstoff, Solar-Wasserstoff-Technik</b>	46, 135, 166
	<b>Elektrische Energie aus Licht*</b> : V15 Umwandlung von Licht in elektrische Energie in einer Zelle, die analog zum Daniell-Element aufgebaut ist, jedoch eine lichtempfindliche Photoanode aus TiO <sub>2</sub> enthält, die im Gegensatz zur Anode aus Zink im Daniell-Element nicht abgebaut wird und nur bei Lichtbestrahlung funktioniert <b>Fachinhalte</b> Spannung nur bei Lichtbestrahlung der TiO <sub>2</sub> -Elektrode; diese ist der Minuspol, ändert sich aber nicht; Br <sup>-</sup> -Ionen aus Lösung werden zu Br <sub>2</sub> *Vgl. auch V37 bis V40	<b>Sek. I: Elektrochemische Energiequellen</b>	74, 75, 100, 135, 166
	<b>Photochemische Radikalkettenreaktionen</b> : V16 Zündung eines Chlor-Wasserstoff-Gemisches 1:1 mit einem Lichtblitz (Chlorknallgasreaktion), Nachweis des gebildeten Chlorwasserstoffs; V17 Bromierung von Heptan unter Bestrahlung mit a) blauem und b) rotem Licht; V18 Lichtinitiierte Polymerisation von Acrylaten <b>Fachinhalte</b> Bindung in polaren HCl-Molekülen im Vergleich zu unpolaren H <sub>2</sub> - und Cl <sub>2</sub> -Molekülen; homolytische Bindungstrennung, Bindungsenergien und Energien von Lichtquanten, radikalische Kettenreaktionen	<b>Sek. I: Polare Elektronenpaarbindung</b> <b>Sek. II: Radikalische Substitution und Polymerisation</b> ; Lichtquanten $E = h \cdot \nu$	38, 46, 135, 166; alle Schulbücher für die Sek. II

Bild-Doku	Versuche (Kurzform – Fachinhalte)	Inhaltsfeld	Literatur
	<b>Photochemische und thermische Z-E (cis-trans) Isomerisierungen*:</b> V19 Isomerisierungen von E- und Z-Azobenzol auf DC-Folie bei Bestrahlung mit Tageslichtprojektor und Erwärmung mit Heizplatte; V20 Isomerisierungen von E- und Z-Dihydrodibenzodiazocin in Lösung bei Bestrahlung mit violetterm und grünem Licht aus LED's <b>Fachinhalte</b> Struktur und Eigenschaften von Z und E-Isomeren (Konfiguration, Polarität, Stabilität, Löslichkeit), Energiediagramme für den thermischen und den photochemischen Reaktionsweg; molekulare Schalter mit Z-E-Azobenzol-Einheiten *V19 ist auch als Video auf [6] verfügbar, V20 ist unter [6] verfügbar	<b>Sek. II: Z-E (cis-trans) Isomerie; Energetik</b> (thermische Aktivierungsenergie $E_a$ ; vs. Photochemische Anregungsenergie $E = h \cdot \nu$ ; (ggf. MO-Modell der $\pi$ -Bindung)	11, 21, 38, 54, 135
	<b>Farbigkeit durch Lichtabsorption und Lichtemission:</b> V21 Farbe durch Lichtabsorption von Chlorophyll-Lösungen: Absorptionsspektren in echten Farben und im Photometer; V22 Farbe durch Lichtemission von Fluoreszein, Aesculin und anderen Fluorophoren, jeweils a) in Lösung und b) in rigider Matrix aus Weinsäure, Cellulose oder Borsäure; V23 Erzeugung und Untersuchung von Echtfarbenemissionsspektren mithilfe eines Beugungsgitters aus der Physiksammlung <b>Fachinhalte</b> Absorptionsspektren, Grundzustand und elektronisch angeregter Zustand, höchste besetzte und niedrigste unbesetzte Energiestufe, Schwingungszustände, Spin, Singlett- und Triplett-Zustand, Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Schwingungsrelaxation, Energiediagramme	<b>Sek. II: Farbstoffe</b> (Energienstufen-Modell, Photometrie, Farbigkeit durch Lichtabsorption und -emission); (ggf.: Emissionsspektren und Stokes-Shift; MO-Modell und delokalisierte $\pi$ -Molekülorbitale)	22, 38, 49, 54, 56, 135, 170
	<b>Synthesen von Leuchtstoffen:</b> V24 Synthese von Fluoreszein; V25 Herstellung eines Fluoreszenzkollektors aus PMMA, in das ein Fluorophor, z. B. aus einem Textmarker, einpolymerisiert wurde; V26 Wirkung des Fluoreszenzkollektors auf eine Silicium-Solarzelle <b>Fachinhalte</b> Elektrophile Substitution an Aromaten, radikalische Polymerisation, Konzentration und Farbänderung des Lichts im Fluoreszenzkollektor	<b>Sek. II: Grundreaktionen in der organischen Chemie</b> <b>Physik:</b> Reflexionsgesetze in der Optik	107, 135, 170
	<b>Photochromie, Solvatochromie, intelligente Folie:</b> V27 Hin- und Herschalten der Farbe von Spiropyran in Toluol mit Licht bzw. Wärme; V28 Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeiten bei der photochemischen Blaufärbung und der thermischen Entfärbung der Lösung (ggf. auch im Photometer); V29 Abhängigkeit der Farbe von bestrahlter Spiropyran-Lösung (Merocyanin) von der Polarität des Lösemittels (Toluol, Aceton, Ethanol); V30 Immobilisierung von Spiropyran in einer Polystyrol-Matrix (intelligente Folie); V31 Schreiben, Speichern, Löschen und Überschreiben auf der intelligenten Folie; V32 Fluoreszenz und Fluoreszenzlöschung auf der intelligenten Folie <b>Fachinhalte</b> Photochromie als reversible Isomerisierung zwischen Spiropyran und Merocyanin; Solvatochromie als Ergebnis der Wechselwirkung der Merocyanin-Moleküle mit den Lösemittel-Molekülen verschiedener Polaritäten, Energiediagramme photochemischer und thermischer Reaktionen, photostationärer Zustand und chemisches Gleichgewicht	<b>Sek. II: Relation: Struktur-Eigenschaften, Reaktionskinetik, Energetik, chemisches Gleichgewicht;</b> (grundsätzliche Unterschiede thermischer und photochemischer Reaktionen, Materialien mit photoaktiven molekularen Schaltern); <b>Informatik:</b> binäre codes, und molekulare Logikbausteine	45, 54, 135, 170, 207, 210 vgl. auch S. Krees, PdN-ChiS, 61 (2), 18 (2012)
	<b>Elektrolumineszenz EL und Elektrochemolumineszenz ECL:</b> V33 Bau und Betrieb einer OLED (organic light emitting diode) mit einer Emissionsschicht aus einem halbleitenden Polymer, einer Anode aus FTO-Glas (oder FTO-PET-Folie) und einer Kathode aus Galinstan; V34 Bau und Betrieb einer ECL-Zelle mit einem Rutheniumphenanthrolin-Komplex als Emitter, Elektroden aus plattinierten Nickelfolien (Rasierscherblättern) und EDTA als Opferdonor; V35 Bau und Betrieb einer ECL-Zelle aus einer Halbzelle wie in V34 und einer Halbzelle mit Luminol in alkalischer Lösung <b>Fachinhalte</b> simultane, verschiedenfarbige Emission an beiden Elektroden – Elektrische Halbleiter aus Makromolekülen mit durchgehender Bindungsdelokalisation; Ladungsinjektion aus einer Gleichstromquelle in das polymere Material, Diffusion der Ladungsträger und Rekombination der Elektron-Loch Paare $e^-/h^+$ unter Emission eines Photons; Generierung von elektronisch angeregten Zuständen in einem Ruthenium-Komplex durch anodische Oxidation (Elektronsextraktion) gefolgt von Elektrodeninjektion aus den Teilchen des Opferdonors (EDTA); Vergleich der EL und ECL mit der Photolumineszenz	<b>Sek. II: Kunststoffe</b> (Struktur und Eigenschaften makromolekularer Verbindungen – insbes. innovative Kunststoffe); <b>Elektrochemie</b> (kaltes Licht und durch Emission von Photonen aus elektrisch und chemisch erzeugten angeregten Zuständen); <b>Physik:</b> Wirkungsgrade von LED's und OLED's im Vergleich zu anderen Lichtquellen	82, 135, 169, 183, 191, 192
	<b>Organische Photovoltaizellen OPV:</b> V36 Bau, Betrieb und Charakterisierung einer OPV mit aktiver Schicht aus einem leitenden Polymer (P3HT) und einem Fulleren-Derivat (PCBM) <b>Fachinhalte</b> Elementarprozesse von der Absorption des Photons bis zum Elektronenfluss	<b>Sek. II: Kunststoffe; Nano-Kohlenstoff;</b> Donator-Akzeptor Prinzip	183, 191; vgl. auch Beitrag von M. Zepp diesem Heft

Bild-Doku	Versuche (Kurzform – Fachinhalte)	Inhaltsfeld	Literatur
	<p><b>Photogalvanische und photoelektrochemische Zellen mit TiO<sub>2</sub>:</b>  <b>V37</b> Bau der 2-Topf-, 1-Topf und Kompakt-Zelle mit TiO<sub>2</sub>-Photoelektroden aus Hombikat 100, U- und I-Messungen bei Bestrahlung mit Licht verschiedener <math>\lambda</math>-Bereiche, <b>V38</b> Nachweis der Produkte Br<sub>2</sub>(aq) und H<sub>2</sub>(g) bei der 2-Topf-Zelle; <b>V39</b> Sensibilisierung der TiO<sub>2</sub>-Photoelektroden mit Anthocyanen aus Himbeersaft, U- und I-Messungen bei Bestrahlung mit Licht verschiedener <math>\lambda</math>-Bereiche; <b>V40</b> Bau von transluciden und transparenten Kompakt-Zellen mit Photoelektroden, die aus stabilisierten Suspensionen von Nano-TiO<sub>2</sub> durch a) Rakeln und b) Spincoaten auf FTO-Glas aufgebracht wurden und mit transparentem Elektrolyt-Gel aus Polyvinylalkohol <b>Fachinhalte</b> TiO<sub>2</sub> als elektrischer Halbleiter, Energiebänder-Modell, Bandlücke E<sub>g</sub>, elektrochemische Elementarprozesse an den Elektroden, bestimmende Faktoren für die Leerlaufspannung und für den Kurzschlussstrom einer Zelle, Wirkungsgrad einer Zelle, chemische Elementarprozesse bei der Sensibilisierung; Relation: Teilchenstruktur-Farbe des Stoffes und Relation: Energie der Lichtquanten-Farbe des Lichts</p>	<p><b>Sek. II: Elektrochemie</b> (galvanische Zellen; elektrische Leitung in Metallen, Lösungen und Halbleitern); <b>Energetik</b> (Relation: Farbe-<math>\lambda</math>-E bei Photonen und Farbe-E<sub>g</sub> bei Nanopartikeln) <b>Physik:</b> elektrische Kenngrößen und Schaltungen; <b>Che/Phy:</b> Nanostrukturierte Materialien</p>	<p>74, 75, 100, 105, 135, 199; vgl. auch Beitrag von C. Bohrmann-Linde diesem Heft</p>
	<p><b>Homogene Photokatalyse in Photo-Blue-Bottle-Experimenten*:</b>  <b>V41</b> Blaufärbung der PBB-Lösung (wässrige Lösung aus Methylviologen* = Substrat, Proflavin = Photokatalysator und EDTA = Opferdonor) durch Lichtbestrahlung (blaues oder weißes Licht) und Entfärbung durch Schütteln im halbvollen, verschlossenen Rgggl; <b>V42</b> PBB in Abwesenheit von O<sub>2</sub> im vollen, verschlossenen Rgggl; <b>V43</b> PBB in einer elektrochemischen Messanordnung aus zwei elektrolytüberbrückten Halbzellen mit einer bestrahlten und einer unbestrahlten PBB-Lösung (Solar-Akku mit Halbzellen); <b>V44</b> Kompakt-Zelle aus FTO-Glas, Filterpapier mit PBB-Lösung und Rasierschierfolien (Solar-Akku als Kompakt-Zelle); <b>V45</b> PBB-Variationen mit alternativen Substraten und Photokatalysatoren <b>Fachinhalte</b> gekoppelte Reaktionszyklen des Substrats und des Photokatalysators, lichtgetriebene, Reaktionszyklen des Photokatalysators, Photoelektronentransfer, Redoxpaare und ihre Redoxpotentiale im Grundzustand und im angeregten Zustand, Lichtenergiekonversion und -speicherung im reduzierten Substrat, quantitative Ermittlung des Substrat-Umsatzes; Relation: Struktur-Farbe beim der farblosen und der blauen Form des Substrats  * Methylviologen (T<sup>+</sup>) wurde bei neuen PBB-Experimenten durch ungiftiges Ethylviologen ersetzt – vgl. dazu [6]</p>	<p><b>Sek. II: Stoffkreisläufe</b> (PBB als Modellversuch zum Kreislauf Photosynthese-Zellatmung); <b>Elektrochemie</b> (Redoxreaktionen und -potentiale, Nernst-Gleichung); <b>Katalyse</b> (Abgrenzung der Photokatalyse zur Katalyse) <b>Energetik</b> (Umwandlung von Strahlungsenergie in chemische Bindungsenergie) <b>Che/Bio:</b> PBB und Kohlenstoff-Kreislauf in der Biosphäre</p>	<p>26, 43, 54, 66, 70, 135, 199</p>
	<p><b>Heterogene Photokatalyse:</b>  <b>V46</b> Photokatalytische Reduktion von Methyleneblau an TiO<sub>2</sub> unter Stickstoffbe-gasung und Rückoxidation mit Luft (reversible Reaktionen am Chromophor); <b>V47</b> Photokatalytische Oxidation von Methyleneblau an TiO<sub>2</sub> unter Sauerstoffbe-gasung (irreversible Zerstörung des Chromophors); <b>V48</b> Vollständige Mineralisierung von Tetrachlorethen an TiO<sub>2</sub> in einem Selbstbau-Solarreaktor und Nachweis der Reak-tionsprodukte CO<sub>2</sub>(g) und HCl(aq); <b>V49</b> Photokatalytische Wasser-Photolyse in zwei Schritten mit CuCl und TiO<sub>2</sub> <b>Fachinhalte</b> Energiebänder-Modell zur Funktionsweise eines TiO<sub>2</sub>-Korns als Photokatalysator; Photokatalyse als lichtinduzierter Elektronen-transfer; Photokatalyse bei der Wasserspaltung mit Licht</p>	<p><b>Sek. II: Energetik, Katalyse</b> (umwelttechnische Verfahren, Möglichkeiten der Wasserstoffgewinnung durch Wasserphotolyse) <b>Technik:</b> Konzeption und Bau von Solarreaktoren</p>	<p>23, 26, 33, 62, 116, 117, 119, 122, 130, 135, 176, 180</p>
	<p><b>Intermolekularer Energietransfer:</b>  <b>V50</b> Stimulierte Fluoreszenz von Merocyanin (erzeugt in situ aus Spiropyran mit Licht) durch Immobilisierung in Polystyrol (in Lösung fluoresziert Merocyanin nicht); <b>V51</b> Fluoreszenzlöschung von Chlorophyll mit <math>\beta</math>-Carotin; <b>V52</b> Protektion von Chlorophyll mit <math>\beta</math>-Carotin gegen photooxidativen Abbau bei starkem Licht an Luft; <b>V53–V63</b> Erhöhung der Lichtausbeute bei der Chemolumineszenz mithilfe von Fluorophoren (Rubren, Nilrot, Violanthron u. a.) – dazu ca. 10 Versuchsvarianten mit Luminol, Oxalsäureestern, Siloxen und Singulett-Sauerstoff; <b>Fachinhalte</b> „Löschung“ von angeregten Zuständen durch intermolekularen Energietransfer; Lebensdauer von Singulett- und Triplett-Zuständen; Quantenausbeute bei der Lumineszenz und ihre Beeinflussung durch die molekulare Umgebung des Luminophors: Einfluss der Lebensdauer des primär angeregten Teilchens auf den intermolekularen Energi-transfer; Folgeprozesse nach dem Energietransfer: Lumineszenz (Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Chemolumineszenz, Elektrochemolumineszenz), unterschiedliche Typen chemischer Reaktionen</p>	<p><b>Sek. II: Energetik</b> (Bedeutung des intermolekularen Energietransfers bei den akzesorischen Pigmenten im photosynthetischen Zentrum, der Photosensibilisierung von Materialien in der Photovoltaik und den Wirkstoffen in der photodynamischen Therapie in der Medizin)</p>	<p>50, 52, 54, 57, 135, 170, 201</p>

- **Wow-Effekt** erzeugen, d. h. für ein Problem motivieren und zu Hypothesen anregen;
- **Dialog mit der Natur**, d. h. im Sinne forschend-entwickelnden Lernens aufgrund von Hypothesen Experimente planen, durchführen, auswerten;
- **Praxisfertigkeiten** trainieren, d. h. Geräte,

Vorrichtungen, Lichtquellen, Messgeräte und Chemikalien sachgerecht und sicher handhaben.

Doch wo können Experimente mit Licht curricular in den Chemieunterricht eingebunden werden? In Anlehnung an die Forderung „Es werde Licht!“ vom Anfang der

biblischen Schöpfungsgeschichte, in der deutlich wird, dass Licht als eine jener Urschöpfungen angesehen wird, die Voraussetzung für alle folgenden Schöpfungen sein sollte, lautet die Antwort: *Experimente mit Licht bereits im Anfangsunterricht.*

Die Zusammenhänge zwischen gesehenen Farben von Gegenständen und

der Art des Lichts, in dem sie betrachtet werden sowie die Beteiligung von Licht als Energieform bei chemischen Reaktionen können und sollten bereits im ersten Chemiejahr auf der Phänomen-Ebene ins Curriculum eingefädelt werden. Später bis zum Abitur sollten sie immer wieder aufgegriffen, um erweitert und auf der Teilchen-Ebene mithilfe theoretischer Konzepte erklärt werden.

Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht erprobter Versuche mit Lichtbeteiligung. Die Versuche werden durch ein Bild-Dokument in der ersten und eine Kurzfassung in der zweiten Spalte beschrieben. Unmittelbar hinter den Kurzfassungen der Versuche werden auch Fachinhalte angegeben, die möglichst in einer der jeweiligen Jahrgangsstufe angepassten Ausdrucksweise verfasst sind.

Die dritte Spalte enthält Inhaltsfelder, die für die Sekundarstufe I bzw. II in den meisten Bundesländern als obligatorisch gelten. Erläuternde Stichwörter zu den Inhaltsfeldern und Querverbindungen zu anderen MINT-Fächern ergänzen diese Spalte.

Ausführliche Informationen über die jeweiligen Versuche gibt es in der zitierten Literatur aus der vierten Spalte. Um die experimentellen Details, die fachlichen Hintergründe und die didaktischen Materialien möglichst schnell und einfach zugänglich zu gestalten, sind in der Tabelle jeweils die Nummern angegeben, unter denen die zitierte Literatur auf der Webseite [6] unter *Publikationen* angeklickt werden kann. Die meisten Artikel können online als pdf-Dateien geöffnet werden. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass alleine aus Gründen der Übersichtlichkeit, des schnellen Zugangs und der Platzersparnis beim Druck der Literaturliste zu diesem Beitrag in der Tabelle nur Versuche aus eigener Forschung zitiert wurden.

Zu vielen Versuchen aus der Tabelle wird auf [6] ein erweiterter Service für die Schulen angeboten. Dieser reicht von kostenlos zugänglichen Videos und Animationen zu den Versuchen auf der Web-Seite bis zu Materialien und Experimentierkits für Lehr-/Lerneinheiten. Jedes dieser Experimentierkits enthält jeweils mehrere Einzelversuche und geeignete didaktische Materialien zu einem größeren Kontext, beispielsweise „Intelligente Materialien mit molekularen Schaltern“ oder „Solarenergiekonversion und -speicherung“. Sie sind so konzipiert, dass ein Einsatz in unterschiedlichen Schuljahrgangsstufen möglich und sinnvoll ist.

### 3 Chemiedidaktischer Ausblick mit Licht

Wenn es um die Erklärung der Phänomene mit Lichtbeteiligung auf der Teilchen-Ebene geht, ist der elektronisch angeregte Zustand der Teilchen, ganz gleich, ob durch Absorption von Photonen oder auf anderem Weg erzeugt, das „Herz aller Photoprozesse“ [7]. Die Vorstellung, wonach Moleküle und andere Teilchenverbände außer im Grundzustand auch in elektronisch angeregten Zuständen (wenn auch nur für sehr kurze Zeit) im angeregten Zustand existieren können, ist in der chemischen community ein allgemein akzeptiertes Paradigma, vergleichbar mit der Vorstellung, dass es Atome und Moleküle als Teilchen gibt.

Didaktisch reduziert führt dieses Konzept vom Grundzustand und elektronisch angeregten Zuständen zum Energiestufenmodell, das in anschaulichen Bildchen dargestellt werden kann [8]. Und wenn im neuen Kernlehrplan für Nordrhein-Westfalen [9] das „Energiestufenmodell zur Lichtabsorption“ unter den Pflichtinhalten auftaucht, fehlt nur ein kleiner, aber entscheidender Schritt, der das Paradigma vom „Grundzustand und elektronisch angeregten Zuständen“ zu einem Basiskonzept für den Chemieunterricht erklärt. Es muss den gleichen Stellenwert erhalten wie die in den Lehrplänen der meisten Bundesländer genannten Basiskonzepte „Stoff-Teilchen“, „Struktureigenschaft“, „Donator-Akzeptor“, „chemisches Gleichgewicht“ und „Energie“. Das Basiskonzept vom Grundzustand und elektronisch angeregten Zuständen liefert die theoretische Grundlage für das Energiestufenmodell und damit für die wissenschaftlich konsistente Erklärung aller Phänomene mit Lichtbeteiligung, ganz gleich, ob letztlich auch eine chemische Reaktion abläuft, oder nicht. Dieses Basiskonzept ist aus erkenntnistheoretischer Sicht besonders wertvoll, denn es hat Querschnittscharakter für alle MINT-Fächer, insbesondere für die Physik und Chemie, weil es direkt mit der Wechselwirkung von Energie(Quanten) mit Materie(Teilchen) verbunden ist.

Ausgehend von diesen Überlegungen sowie einer umfassenden Betrachtung der Chemie als Wissenschaft, ihrem Bild in der Öffentlichkeit, ihrer Rolle als Innovationsmotor für die Technik und ihrem Bildungswert ganz allgemein, ist eine innovative Chemiedidaktik notwendig, in der die Photoprozesse für die Lehre der Chemie im 21. Jahrhundert angemessene Berücksichtigung finden. Die konventionellen

Inhalte der Chemiedidaktik (Ziele und Inhalte des Chemieunterrichts, Motivation und Schülervorstellungen, Kontexte und Kompetenzen, Experimente, Modelle und Konzepte, Fach- und Formelsprache, Erkenntniswege und Unterrichtsverfahren, Medien, fachdidaktische Forschung und Entwicklung) können unter der Perspektive „Licht & Chemie“ erläutert und konkretisiert werden. Ein Nachschlagewerk für Studierende des Lehramts für Chemie, Referendarinnen und Referendare sowie Lehrerinnen und Lehrer sollte didaktische Leitlinien, prägnante Experimente und anregende Impulse für individuelle Zugänge anbieten, die für das Studium, den Vorbereitungsdienst und für die Unterrichtspraxis nützlich sind. ■

#### Dank

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

#### Literatur

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/International\\_Year\\_of\\_Light](http://en.wikipedia.org/wiki/International_Year_of_Light)
- [2] D. Wöhrle, W.-D. Stohrer, M. W. Tausch, *Photochemie, Konzepte, Methoden, Experimente*, Wiley-VCH, Weinheim 1998
- [3] D. Nocera M. Beller, G. Centi, D. G. Nocera, G. M. Kemeling, P. Göllitz, *Footsteps on the Sustainability Trail, ChemSusChem*, 3 (1), 3 (2010); vgl. auch onlinevideos unter Stichwörtern „Nocera, sustainocene“
- [4] <http://www.agenda21-treffpunkt.de/archiv/04/daten/WBGUenergiemix.htm> letzter Zugriff: 4.1.2014
- [5] H.-D. Barke, G. Harsch *Chemiedidaktik kompakt*, Springer, Berlin, Heidelberg 2011
- [6] <http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de>
- [7] N. J. Turro, *Modern Molecular Photochemistry*, Benjamin/Cummings, New York 1978 (erste Auflage), University Science Books, Sausalito 1991 (neueste Auflage)
- [8] M. W. Tausch, M. von Wachtendonk, C. Bohrmann-Linde, S. Krees (Hrsg.), *Chemie 2000+, Sekundarstufe II*, C. C. Buchner, Bamberg 2005 (erste Auflage), 2014 (neueste Auflage)
- [9] *Kernlehrplan Chemie, Sekundarstufe II*, Ritterbach Verlag, Frechen 2014

#### Anschrift des Verfassers

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