

Nachhaltige Chemie mit Licht – Experimentelle Zugänge in digitalen Medien

Claudia Bohrmann-Linde* und Michael Tausch*[a]

Zusammenfassung: Für nachhaltige Entwicklung unverzichtbare Photoprozesse sind bisher in bildungspolitischen Vorgaben (KMK und Landesleitlinien BNE) nicht angemessen vertreten. In chemiedidaktischen Publikationen werden die Prinzipien „grüner Chemie“ und der Nachhaltigkeit zwar zunehmend thematisiert, aber Licht als nachhaltigste Energieform und die Chemie mit Licht bleiben auch hier unterrepräsentiert. Im Beitrag werden durch die Didaktik der Chemie produzierte, frei zugängliche digitale Ressourcen zur Erschließung der BNE-relevanten Lehr-/Lerninhalte, bei denen die Energieform Licht im Fokus steht, präsentiert. Darin werden photochemisches Fachwissen und pädagogische Grundsätze in wissenschaftlich konsistente und didaktisch prägnante Formate zusammengeführt. Die Erschließung ist über etablierte Unterrichtsinhalte möglich. Ihre Nutzung durch Lernende sollte unbedingt von Lehrenden geleitet oder zumindest moderiert werden, wobei im Sinne von systemischen Denkprozessen die behandelten Inhalte nicht nur für sich isoliert betrachtet, sondern in größere Zusammenhänge gebracht werden sollen.

Stichworte: Photochemie · Licht · digitale Medien · BNE · Nachhaltigkeit

Sustainable chemistry with light – experimental approaches via digital media

Abstract: Photo processes, which are indispensable for sustainable development, have not yet been adequately represented in educational policy guidelines (KMK and state guidelines on ESD). Although the principles of “green chemistry” and sustainability are increasingly being addressed in chemical education publications, light as the most sustainable form of energy and chemistry with light remains underrepresented here as well. In this paper, freely accessible digital resources produced by the Didactics of Chemistry are presented for the development of ESD-relevant teaching/learning content that focuses on light as a form of energy. In it, photochemical expertise and pedagogical principles are brought together in scientifically consistent and didactically concise formats. It can be accessed via established teaching contents. Its use by learners should definitely be guided or at least moderated by teachers, whereby in the sense of systemic thought processes, the contents dealt with should not only be considered in isolation, but should be brought into larger contexts.

Keywords: photochemistry · light · digital media · EDS · sustainability

1. Solarlicht – Status quo und Zukunftsszenarien

„Licht ist die Quelle jeglicher Kraft, die Leben schafft und Thätigkeit; der zeugende Samen alles Guten, was die Erde trägt ...“ So schwärmte J. W. Ritter im Jahr 1801 in der für die damalige Romantik typischen Ausdrucksweise. Er ist als einer der Pioniere auf dem Gebiet der Elektrochemie bekannt, gilt aber durch ein pfiffig ausgedachtes Experiment auch als Entdecker der UV-Strahlen. Neben vielen neuen Forschungsergebnissen wurde auch dieses historische Experiment für den Chemieunterricht zeitgemäß aufbereitet und in [1] zur Verfügung gestellt.

Von den ca. $5,88 \cdot 10^{24}$ J an extraterrestrischer Einstrahlung der Sonne pro Jahr, einer Größe, an der sich noch einige Milliarden Jahre nicht viel ändern wird, gelangt etwa die Hälfte auf die Erdoberfläche. Davon sind wiederum ca. 50% für die Photochemie nutzbar, aber nur ca. 0,02 bis 0,05% werden photosynthetisch fixiert. Grob kalkuliert bedeutet das pro Jahr den Aufbau von ca. $7 \cdot 10^{11}$ Tonnen an neuer Biomasse unter Bindung von ca. $1,2 \cdot 10^{12}$ Tonnen Kohlenstoffdioxid und Freiset-

zung von ca. $0,9 \cdot 10^{12}$ Tonnen Sauerstoff. Dabei treibt Licht aus dem sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums die Photosynthese, die biochemisch wichtigste Reaktion auf unserem Planeten an. Solarlicht wird dabei in chemische Energie konvertiert und in energiereichen Verbindungen gespeichert. Die Kombination aus der Photosynthese und der Zellatmung, bei der die Umkehrreaktion der Photosynthese abläuft, bildet das „biochemische 1×1 “ auf unserem Planeten. Es beinhaltet die Kreisläufe der Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff in der belebten Natur. Während Sauerstoff darin auch elementar auftritt, kommt Kohlenstoff nur gebunden vor. Der gesamte Zyklus Photosynthese/Zellatmung ist sehr energieaufwändig, er läuft in einer Vielzahl von Schritten ab, benötigt dafür eine Vielzahl von Hilfsstoffen mit verschiedenen Funktionen, aber nur eine Energieform: sichtbares Licht von der Sonne. Strahlungsenergie wird dabei „entwertet“, d.h. letztlich in Wärme umgewandelt, die nicht mehr so effizient nutzbar ist wie Licht, elektrische oder chemische Energie.

Dieser status quo in der Biosphäre ist das Musterbeispiel für Nachhaltigkeit. Allerdings hat der Mensch in den letzten Jahrhunderten des „anthropocenes“ 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 Antrieb der Biosphäre beeinflusst. Im „sustaino-

[a] C. Bohrmann-Linde, M. Tausch
Bergische Universität Wuppertal
Didaktik der Chemie
Gaußstraße 20
42119 Wuppertal
* E-Mail: bohrmann@uni-wuppertal.de
mtausch@uni-wuppertal.de

Immer mehr Strom von der Sonne

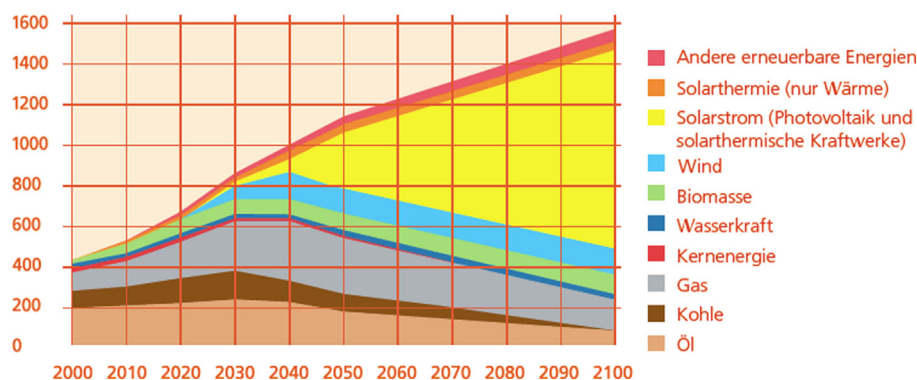
Jährlicher Primärenergieeinsatz
(Etagoule pro Jahr)

Abb. 1: Prognose zum globalen Energiemix bis zum Ende des 21. Jahrhunderts [2].

cene“, dem anstehenden Zeitalter der Nachhaltigkeit, muss sich das Zusammenspiel zwischen der durch die Gesellschaft, Wirtschaft und Politik geprägten Technosphäre und der übrigen Biosphäre in einer Weise den limitierenden Bedingungen für das Leben auf dem Planeten anpassen, die das Überleben gewährleistet. 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 auch noch als sauber zu bezeichnen ist. Alle diese Bedingungen erfüllt das Solarlicht. Dementsprechend sieht der Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen WBGU der Bundesregierung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine starke Zunahme des Anteils an Solarenergie beim globalen Energiemix (Abb. 1).

Wenngleich so langfristige Prognosen mit hohen Unsicherheitsfaktoren behaftet sind, deckt sich das auch mit unserer Vision über die zunehmende Bedeutung der Energieform Licht allgemein und speziell des Solarlichts. Der Beitrag von Solarlicht als „regenerative“ Energiequelle bei der Bereitstellung von elektrischer Energie durch Photovoltaik ist wichtig, aber lange nicht alles, „was Licht bewirken kann“ [3]. Eine weitere Schlüsselrolle haben Photoprozesse auch bei LEDs und OLEDs. Diese modernen Lichtquellen ermöglichen eine hohe Energieeffizienz bei der Umwandlung von elektrischer Energie in Licht und gehören zum Alltag.

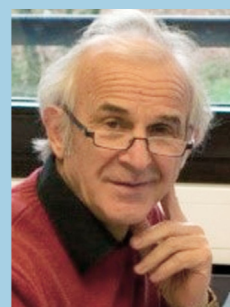
Licht verdient nicht nur im Zusammenhang mit elektrischer Energie das Prädikat der Nachhaltigkeit, es ist auch die nachhaltige Energieform für „grüne“ Chemie. Weltweit werden verschiedene Szenarien mit „grüner Chemie“ intensiv erforscht und in der fachwissenschaftlichen Literatur diskutiert [4]. Eines dieser Szenarien hat die Erzeugung von Wasserstoff mithilfe von Solarlicht als Ziel. Das ist entweder durch Wasserelektrolyse mit photovoltaisch bereitgestellter elektrischer Energie oder durch direkte Wasserphotolyse mithilfe geeigneter Photokatalysatoren möglich (Abb. 2). Da Wasserstoff auf mehrere Arten als Brenn- und Treibstoff oder auch als Reduktionsmittel und Grundchemikalie für Synthesen einsetzbar ist, wäre die entsprechende Wasserstofftechnologie carbonfrei. In einem alternativen nicht carbonfreien Szenario wird Kohlenstoffdioxid mit Wasser unter Einsatz von Solarlicht als einzige Energiequelle zu Kohlenstoffverbindungen, wie Methan, Methanol, Kohlenwasserstoffe und Kohlenhydrate reduziert (Abb. 2). Diese können als Brennstoffe oder als Grundchemikalien für weitere Synthesen verwendet werden. Beide Szenarien

sind ressourcenschonend, klimaneutral und nachhaltig. Das auf Reduktion von Kohlenstoffdioxid basierende Szenario aus Abb. 2 wird dem Forschungsschwerpunkt künstliche Photosynthese zugeordnet [5–7]. Darin wird deutlich, dass Nachhaltigkeit mit „grüner Chemie“ auch mit Kohlenstoffverbindungen nach dem Muster des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs in der Biosphäre möglich ist. Nachhaltigkeit in der Technosphäre muss also die „Defossilisierung“ von Industrie und Verkehr anstreben, und nicht unbedingt die „Decarbonisierung“, wie oft gefordert wird.

In der schulischen Bildung für nachhaltige Entwicklung BNE können alle oben angesprochenen Nachhaltigkeitsmerkmale von Licht im Zusammenhang mit Energie im 21. Jahrhundert im Chemieunterricht anschaulich, gründlich und überzeugend vermittelt werden. In den folgenden Teilen dieses Beitrags geben wir einen Überblick über unsere Sammlung von Lehr-/Lernmaterialien, insbesondere Experimente, Konzepte und Kontexte mit für eine Bildung für nachhaltige Entwicklung re-



Claudia Bohrmann-Linde, ausgebildete Chemielehrerin, von 2016–2018 Professorin für Didaktik der Chemie an der Universität Tübingen, ist seit Oktober 2018 Professorin für Didaktik der Chemie an der Universität Wuppertal. Ihre Forschungsschwerpunkte sind u.a. die experimentell-konzeptionelle Erschließung innovativer und zukunftssträchtiger Entwicklungen im Bereich Energie und Energieumwandlungen für den Chemieunterricht, die Entwicklung und Optimierung digitaler Lehr-Lernressourcen, die Entwicklung BNE-bezogener Unterrichtsmaterialien und bilingualer Chemieunterricht.



Michael W. Tausch, langjähriger Chemielehrer an der KGS Weyhe und Professor für Chemie und ihre Didaktik an den Universitäten Duisburg und Wuppertal entwickelt Lehr-/Lernmaterialien als Print- und Elektronikmedien sowie als Interaktionsboxen mit experimentellem Equipment. Sein Forschungsinteresse gilt insbesondere der curricularen Innovation des Chemieunterrichts und des Chemie-Lehramtsstudiums. Einen Schwerpunkt bilden dabei die Prozesse mit Lichtbeteiligung. Auf diesem Gebiet leistet er Pionierarbeit für den Chemieunterricht und die benachbarten MINT-Fächer.

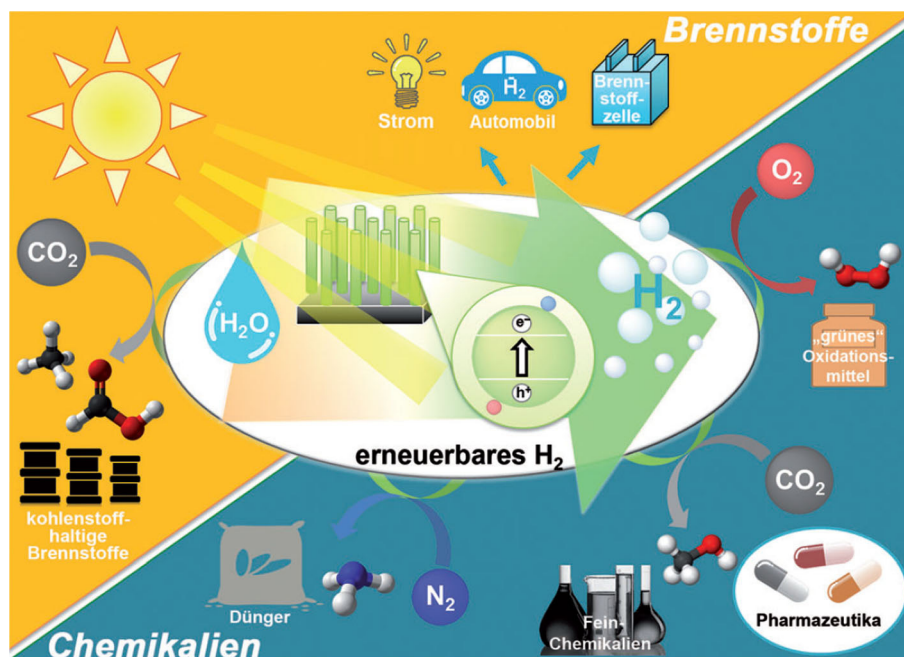


Abb. 2: Szenarien zur „grünen Chemie“ mit Solarlicht als energetischem Antrieb [5].

levanten Inhalten zum Thema Licht, mit denen Lehrkräfte ihren Unterricht gestalten können.

2. Licht – Energieform in der Bildung für nachhaltige Entwicklung BNE

Die Kultusministerkonferenz KMK der Länder hat unter Bezug auf die UNESCO Agenda 2030 die Bildung für nachhaltige Entwicklung BNE als fundamentalen Auftrag an den Schulunterricht und das Lehramtsstudium deklariert und in ihrem Bericht aus dem Jahr 2017 allgemeine Grundsätze formuliert [8]. In Nordrhein-Westfalen wurde im Jahr 2019 erstmalig eine verbindliche BNE-Leitlinie mit konkreten Inhalten und Kompetenzerwartungen für die beteiligten Fächer vorgegeben [9], in analoger Weise wurde auch in anderen Bundesländern vorgegangen. Die für nachhaltige Entwicklung unverzichtbaren Photoprozesse sind bisher weder in den Grundsätzen der KMK noch in den BNE-Leitlinien der Länder angemessen vertreten. In chemiedidaktischen Publikationen werden die Prinzipien „grüner Chemie“ und der Nachhaltigkeit zwar zunehmend thematisiert, aber Licht als nachhaltigste Energieform und die Chemie mit Licht bleiben auch hier bisher unterrepräsentiert. Um die Entwicklung von nachhaltigen, auf Solarlicht basierenden Verfahren am Wissenschafts- und Technologiestandort Deutschland zu beschleunigen, gilt die Devise „Mehr Licht! Auch im Chemieunterricht!“. Licht kann und muss zu einem Schlüsselkonzept in der Chemiedidaktik werden und curricular vom Anfangsunterricht bis zum Abitur mit Experimenten, Konzepten und Lehr-/Lernmaterialien vertreten sein [1].

Um diesen Prozess zu beschleunigen, müssen die konzeptionellen Grundlagen der Photochemie für Lehramtsstudierende an der Universität vermittelt, didaktisch reduziert und für den Unterricht zugeschnitten werden. Kerninhalte des Chemieunterrichts, beispielsweise der Begriff der chemischen Reaktion als Stoff- und Energieumwandlung sollten entsprechend der forschend-entwickelnden Vorgehensweise bereits in der Sekundarstufe I experimentell erschlossen werden (Abb. 3).

Die frühe Einführung der Energieform Licht als Antrieb für chemische Reaktionen ist von eminenter Bedeutung im Sinne von BNE. Entsprechende Experimente sind sicher, schnell

und einfach mit Sonnenlicht oder LED-Taschenlampen durchführbar (Abb. 3 und [1]). Auf theoretische Vertiefungen mit Modellen und Konzepten der Photochemie sollte in der Sekundarstufe I verzichtet werden. In der Sekundarstufe II können und sollten grundlegende Konzepte der Photochemie anhand BNE-relevanter Kontexte an passende Pflichtinhalte des Unterrichts angebunden werden. Schülerlaborangebote zu innovativen und teils apparativ oder zeitlich aufwändigeren Experimentiersettings können dies flankierend unterstützen, z. B. [10].

3. Chemie mit Licht – digitale Medien in unterschiedlichen Formaten

Dass in diesem Beitrag die digitalen Medien im Fokus stehen, ist ein Tribut an die Corona-Pandemie. Digitales Lernen und Lehren gehörte zwar bereits vor Corona an Schulen und Universitäten zum Alltag, hat aber während der Pandemie zusätzlich stark an Fahrt zugenommen und wird auch danach qualitativ eine höhere Stufe besetzen als davor. Das veranlasst uns, à priori festzustellen:

Digitale, multimediale Lehr-/Lernarrangements können im Präsenzunterricht und erst recht beim Homeschooling gegenüber klassischen Medien und Methoden motivierend und effizient sein. Sie sollten aber nicht die realen Experimente ersetzen. Die Primärerfahrungen mit den Eigenschaften von Stoffen und Reaktionen, also Stoff- und Energieumwandlungen, sind und bleiben die faktische Grundlage allen Wissens und Könnens, das es in der Chemie zu vermitteln gilt. Insbesondere für die forschend-entwickelnde Vorgehensweise beim Chemielernen und -lehren ist digitale Assistenz hilfreich und ergiebig – digitale Autonomie kann irreführend und ineffizient sein.

Alle nachfolgend diskutierten digitalen Medien sind auf unserer Internetplattform <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/> zu Lit. [1] verfügbar.

3.1 Lehrfilme im Dialog-Format

Diese Filme wurden finanziert vom Beilstein-Institut zur Förderung der Chemischen Wissenschaften und in den Wuppertaler Laboren produziert. Sie können außer über [1] auch über

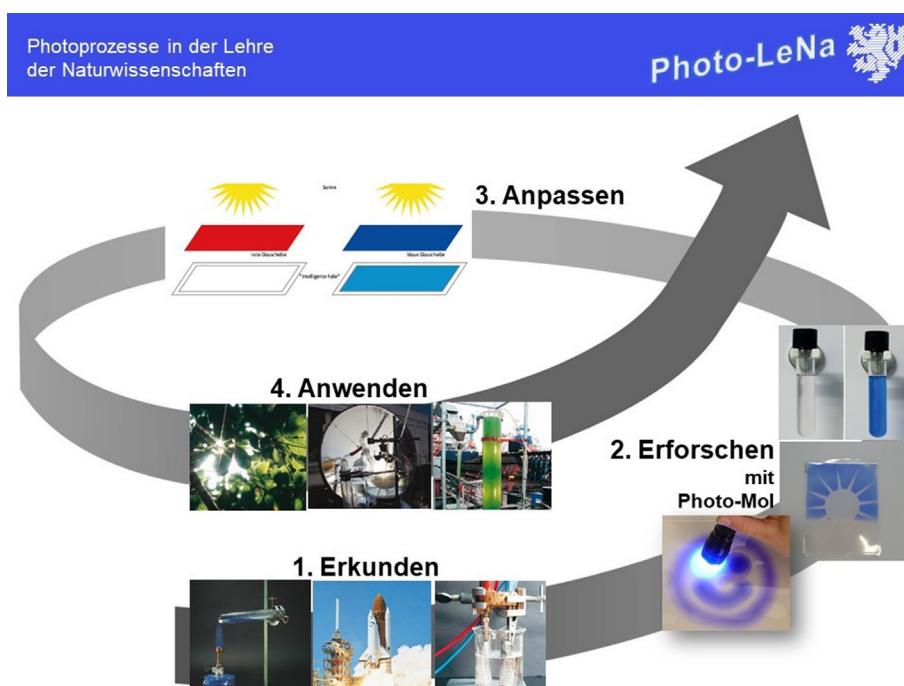


Abb. 3: Schema einer konstruktivistischen Lernschleife für die Sekundarstufe I zur Lerneinheit „Licht treibt Reaktionen an“ – vgl. Details dazu in [1].

den BEILSTEIN TV Kanal erreicht werden. Diese zweisprachig (deutsch/englisch) abspielbaren Lehrfilme eignen sich zur auflockernden „Didaktisierung“ konzeptioneller Grundlagen der Photochemie. Gleichzeitig dienen sie der Vertiefung lehrplanpflichtiger Inhalte des Chemieunterrichts. In den fünf Filmen erschließt Niklas, ein junger naturwissenschaftlicher Laie, im Dialog mit Chemiker*innen unter Einsatz von Experimenten wissenschaftliches Neuland zu Phänomenen, die ihn faszinieren und neugierig machen. Es sind i) die Farbtonung von Sonnenbrillen, ii) die Farben des Regenbogens, iii) die bunten Leuchtfarben im Schwarzlicht, iv) die Farbänderungen eines Chamäleons und v) die Verschiedenheit von Gleichgewichten. Die Titel und Kurzfassungen mit Hervorhebung der wichtigsten Fachbegriffe sind:

AN und AUS mit Licht – Photoaktiver molekularer Schalter: In diesem Tutorial möchte Niklas erfahren, wie selbsttönende Brillen funktionieren. Er sucht den Jungchemiker Nuno in seinem Labor auf, der ihm zunächst eine „intelligente“ Folie vorführt, auf die er mit violettem Licht aus einer LED schiebt und mit grünem Licht löscht (Abb. 4). Als Niklas feststellt, dass auch das Glas seiner Brille sich bei violettem Licht so verhält, jedoch bei grünem nicht, ist er verblüfft. Nuno erklärt ihm mithilfe der Molekülmodelle von Spiropyran und Merocyanin das Phänomen der *Isomerie*, die *Spektralfarben* des sichtbaren Lichts, die unterschiedliche Lichtabsorption der beiden Isomere aufgrund ihrer verschiedenen *Chromophore*

und letztlich die Begriffe *Photochromie* und photoaktiver *molekularer Schalter*.

Begeistert von so viel Neuem, aber auch etwas verwirrt durch Nunos Erläuterungen, in denen er immer wieder auch von Photonen spricht, begibt sich Niklas auf seine nächste Erkundungsreise.

Was ist ein Photon? – Teilchen-Welle-Dualismus: Fasziniert von der Pracht eines Regenbogens und bereits ahnend, dass die Photonen des Lichts auch damit etwas zu tun haben, will Niklas in diesem Film von einer Professorin der Chemiedidaktik wissen, was ein *Photon* überhaupt ist. Sie führt ihn zu seiner völligen Überraschung nicht in ein Labor, sondern in einen Skulpturenpark. In einem Zwiegespräch im Café des Parks, in dem es um *Quanten* und *Jein-Aussagen* geht, unterrichtet sie ihn über die komplementären Eigenschaften des Photons und veranschaulicht den *Teilchen-Welle-Dualismus* mithilfe von aufgezeichneten Experimenten zur *Reflexion*, *Beugung* und *Interferenz von Licht*. Der besondere Reiz dieses Films ist die metaphorische Szene am Schluss (Abb. 5): An der Skulptur „Photon“ des Künstlers Tony Cragg lassen die beiden Protagonisten ihrer Fantasie freien Lauf und entdecken in diesem Kunstwerk eine sinnbildliche Analogie zum Teilchen-Welle-Dualismus des Photons.

Es ist offensichtlich, dass diese Analogie einer exakten und abschließenden Antwort auf die Titelfrage eigentlich aus dem Weg geht. Allerdings sind Lehrende der Chemie berechtigt

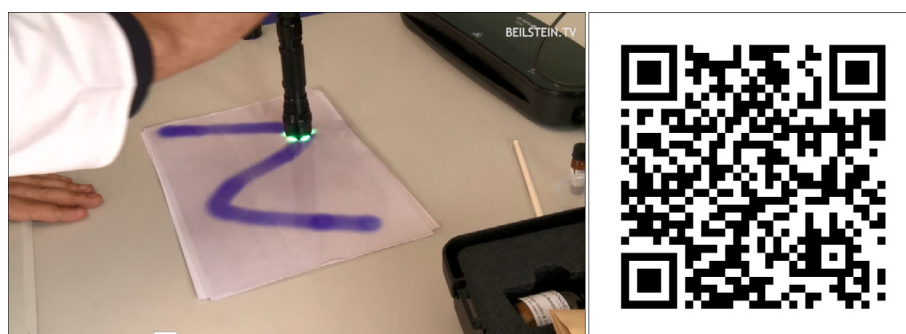


Abb. 4: Szene aus dem Lehrfilm „An und AUS mit Licht“ und QR-Code zum Film.

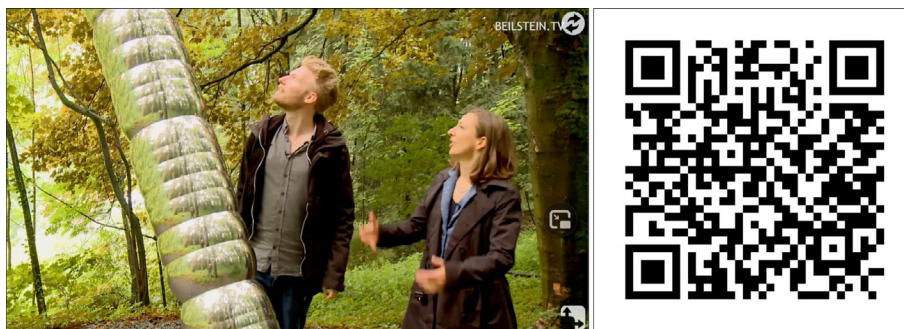


Abb. 5: Szene aus dem Lehrfilm „Was ist ein Photon?“ und QR-Code zum Film.

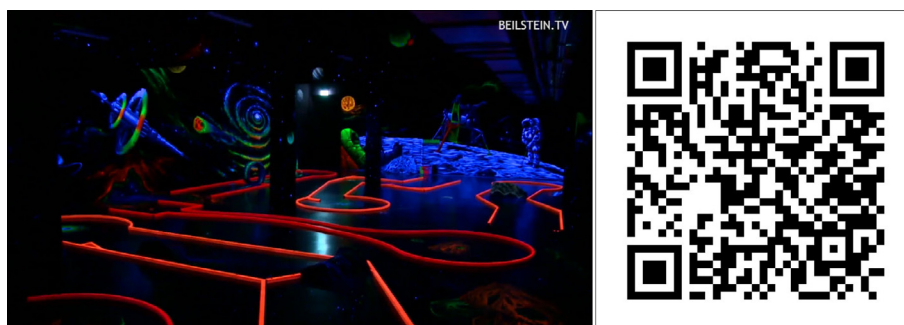


Abb. 6: Szene aus dem Lehrfilm „Underground Minigolf“ und QR-Code zum Film.

und aufgerufen, solche Analogien zu finden und didaktisch zu nutzen.

Underground Minigolf – Farbe durch Lichtemission: Wie ist es möglich, dass die Schwarzlichtlampen an der Decke so viele verschiedene Leuchtfarben in der Landschaft des Underground Minigolfs (Abb. 6) erzeugen?

Mit dieser Frage geht Niklas in Nicos Photochemie-Labor und lässt sich von ihm mithilfe von Modellen des Grundzustands und der elektronisch angeregten Singlett- und Triplett-Zustände die Fluoreszenz und Phosphoreszenz durch Emission von Photonen erklären. Dabei erfolgt jeweils eine Abwärtskonvertierung der absorbierten Photonen aus dem UV-Licht in energieärmere Photonen aus dem sichtbaren Spektralbereich. Niklas findet Nicos Erklärungen logisch. Umso mehr überrascht ihn ein Zusatzexperiment, in dem Nico ihm eine Aufwärtskonvertierung von Photonen vorführt. Niklas gibt sich erst zufrieden, nachdem Nico ihm den Mechanismus der Triplett-Triplett-Anihilation erklärt und seine Fragen beantwortet hat.

Ein chemisches Chamäleon – Solvatochromie und molekulare Umgebung: Diesmal spannt Niklas eine Brücke zwischen einem echten Chamäleon, das zu Beginn des Films auf seiner Schulter weilt und einem chemischen Chamäleon, das er mit Sebastian experimentell und konzeptionell erschließt. Dabei

nutzen sie erneut den molekularen Schalter Spiropyran/Merocyanin in drei Lösemitteln mit unterschiedlich polaren Molekülen. Sie bestrahlen die farblosen Spiropyran-Lösungen mit violetterm Licht aus LED-Taschenlampen und erzeugen so das Isomer Merocyanin. Die drei Lösungen färben sich rot bzw. violett bzw. blau. Das überrascht Niklas, denn er weiß bereits, dass in allen drei Lösungen der gleiche Stoff Merocyanin enthalten sein müsste. Sebastian bestätigt das und erklärt ihm das Phänomen der Solvatochromie. Daran veranschaulicht er die energetischen Lagen und die Energieabstände zwischen der höchsten besetzten und der niedrigsten unbesetzten Energiestufe (NUE und HBE) im Merocyanin-Molekül (Abb. 7) unter dem Einfluss der jeweiligen Lösemittel-Moleküle und schließt mit der Feststellung: „Die Nano-Umgebung macht’s.“

Ungleiche Gleichgewichte – Thermodynamisches Gleichgewicht vs. photostationärer Zustand: In der Startszene versucht der Protagonist Niklas, auf einer Slackline sein Gleichgewicht zu halten und scheitert dabei. Er weiß, dass es viele Gleichgewichte gibt und zählt einige auf. Ob es aber auch chemische Gleichgewichte gibt, will er in der Uni erfahren. In einem Syntheselabor sieht er zunächst, wie temperaturgesteuerte Gleichgewichtsreaktionen durchgeführt werden. Dann erkundet er zusammen mit Yasemin photochemische und thermische Reak-



Abb. 7: Szene aus dem Lehrfilm „Chemisches Chamäleon“ und QR-Code zum Film.

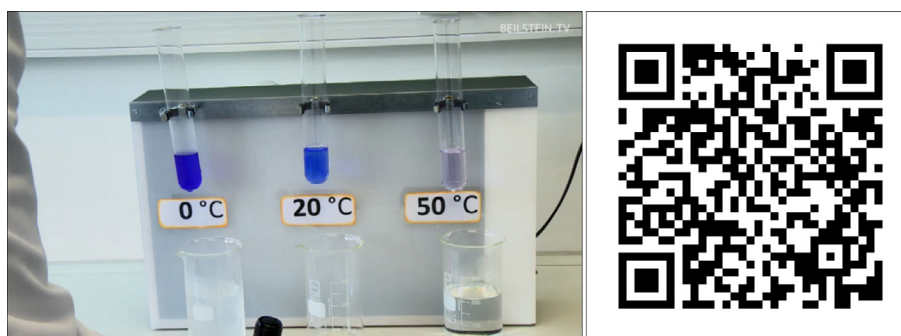


Abb. 8: Szene aus dem Lehrfilm „Ungleiche Gleichgewichte“ und QR-Code zum Film.

tionen, die sie beide mit dem ihm schon bekannten Isomerenpaar Spiropyran und Merocyanin durchführen. Drei Spiropyran-Lösungen mit gleicher Konzentration, aber bei unterschiedlichen Temperaturen, färben sich bei Bestrahlung mit violetterm LED-Licht sofort blau. Beim Ausschalten der Lampe entfärben sie sich spontan, aber unterschiedlich schnell (Abb. 8).

Natürlich will Niklas den Sachverhalt verstehen und Yasemin erklärt ihm den wesentlichen Unterschied zwischen einem chemischen (thermodynamischen Gleichgewicht) und dem photostationären Zustand (der Photostationarität) in einem System. Dies führt Niklas spontan zu einer Vermutung darüber, was bei tieferen Temperaturen, z. B. bei -20°C passieren würde, welche im Film experimentell überprüft wird.

3.2 Lehrfilme im Präsentationsformat

Die ersten beiden der folgenden drei Filme wurden mit Eigenmitteln der Wuppertaler Chemiedidaktik unter Beteiligung der Filmagentur TRICAST Wuppertal mit professionellen Sprechern hergestellt. Der dritte Film ist die Produktion von zwei Lehramtsstudierenden im Rahmen ihrer Master-Thesis. Diese Filme können außer über die Internetplattform zu [1] auch über das Portal „colour.education“ der Bergischen Universität Wuppertal angesteuert werden.

Photosynthese – ein Fall für zwei/Teil 1: Dieser erste Teil des Lehrfilms hat das *Photo-Blue-Bottle Experiment* (PBB) im Fokus. Zu Beginn gibt der bzw. die Chemiedidaktiker*in ein Statement zum Gesamtprozess der *Photosynthese* sowie zur Schlüsselrolle des Lichts und der farbigen Stoffe bei diesem einzigartig nachhaltigen Vorgang auf unserem Planeten (Abb. 9).

Das PBB-Experiment wird in verschiedenen Versionen durchgeführt. Über die ganze Filmlänge werden die Experimente nach einem mit Fachbegriffen und Modellanimationen adäquat dosierten Drehbuch kommentiert. Das betrifft die ablaufenden *Redoxreaktionen*, die *gekoppelten Reaktionszyklen*

bei der *Photokatalyse*, die *Energieumwandlung* und *-speicherung* sowie die Analogien des PBB-Modellexperiments mit dem natürlichen Stoffkreislauf *Photosynthese/Zellatmung*.

Photosynthese – ein Fall für zwei/Teil 2: Dieser Teil des Films stellt zwei chemische Protagonisten bei der Photosynthese, das *Chlorophyll* und das β -*Carotin* in den Mittelpunkt. Die Experimente zur chromatographischen Trennung von Blattfarbstoffen und zu den Funktionen von Chlorophyll (*Photokatalysator*) und β -*Carotin* (*Sensibilisator* bzw. *akzessorisches Pigment* und *Photoprotektor*) werden von einer jungen Chemiedidaktikerin vorgeführt und an entscheidenden Stellen kommentiert. Im Film kommen u. a. auch die Fachbegriffe *Fluoreszenz*, *angeregtes Chlorophyll*, *Triplet-Chlorophyll*, *Singulett-Sauerstoff*, *Triplet-Carotin* und *strahlungsloser Übergang* vor (Abb. 10).

Photolumineszenz – Farbige durch Lichtemission: Zwei Lehramtsstudenten mit der Fächerkombination Chemie und Physik erläutern in dem von ihnen produzierten Lehrfilm den Aufbau und die Funktionsweise von modernen Lampen, deren Licht durch *Photolumineszenz* generiert wird. Sie führen Experimente zur Erzeugung von *Fluoreszenz* und *Phosphoreszenz* vor und erläutern die Elementarschritte unter Verwendung des *Energiestufenmodells* mit den entsprechenden *elektronisch angeregten Singulett- und Triplet-Zuständen* mithilfe von animierten Grafiken und Modellen (Abb. 11).

3.3 Weitere digitale Formate zum Titelthema auf der Internetplattform zu [1]

Die Seite „Filme & Videos“ enthält zusätzlich zu den oben diskutierten Lehrfilmen auch weitere Videos mit Kommentaren in Ton- oder Schriftform. Sie liefern sowohl experimentelle Details zu den Fachbegriffen und Konzepten aus den Lehrfilmen als auch weitere Experimente mit Licht. Ausgesprochen BNE-relevant sind die Videos zu photogalvanischen und photovoltaischen Zellen, zu OLEDs und zur photokatalyti-

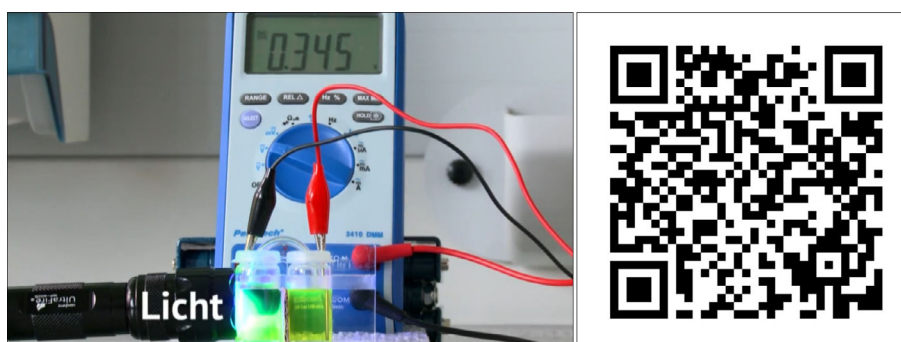


Abb. 9: Szene mit der PBB-Konzentrationszelle aus dem Lehrfilm „Photosynthese – ein Fall für zwei/Teil 1“ und QR-Code zum Film.



Abb. 10: Szene aus dem Lehrfilm „Photosynthese – ein Fall für zwei/Teil 2“ und QR-Code zum Film.

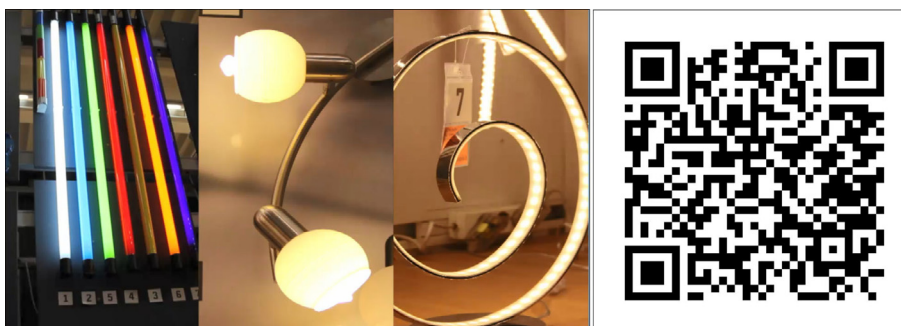


Abb. 11: Szene mit Lampen aus dem Lehrfilm „Photolumineszenz – Farbigkeit durch Lichtemission“ und QR-Code zum Film.

schen Herstellung von Wasserstoff. In der eigenständigen Rubrik „Experimente“ sind die in den Lehrfilmen und Videos enthaltenen und weitere Versuche nach Schulstufen (Sek. I und II) sortiert und schulspezifischen Themen zugeordnet. Die Schlüsselexperimente wurden auf dieser Seite auch mit Gefahrenhinweisen und Referenzen zu direkt aufrufbaren Artikeln ausgestattet. Auf der Seite „Modelle & Animationen“ werden interaktive Animationen zu Experimenten und Konzepten in Flash- und HTML5-Formaten angeboten. In der Rubrik „QR-Materialien“ werden Experimentierkoffer und digitale Materialienpakete zu Themen des Chemieunterrichts sowie zu photochemischen Inhalten in Anlehnung an Lit. [1] angeboten. Für die Einbindung von photochemischen Inhalten in den Chemieunterricht werden von uns in Schulbücher eingebrachte Unterrichtsbausteine zur Verfügung gestellt. Fachliche Vertiefungen zu photochemischen Inhalten und Ideen für Forschungsthemen in Projektkursen und Facharbeiten in der Oberstufe sowie Abschlussarbeiten im Studium sind in der Rubrik „Dissertationen“ zu finden. Die Seite „Kontexte & Anwendungen“ enthält Links zu allgemeinverständlichen Beiträgen von Wissenschaftler*innen aus der GDCh-Fachgruppe Photochemie zum Jahr des Lichts 2015 sowie Experimente und Materialien von Mitgliedern der GDCh-Fachgruppe Chemieunterricht aus Schulen und Hochschulen. Die auf der Seite „Workshops & Vorträge“ zusammengefassten Bildungs- und Fortbildungsangebote wurden bereits vor Corona an mehreren Schulen, Instituten und Universitäten durchgeführt; nach Corona geht's weiter.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In den beschriebenen digitalen Medien erschließen wir BNE-relevante Lehr-/Lerninhalte, bei denen die Energieform Licht im Fokus steht. Da es sich um innovative Inhalte für den Chemieunterricht handelt, haben wir in den Lehrfilmen angestrebt, photochemisches Fachwissen und pädagogische Grund-

sätze so in Formate zusammenzuführen, dass damit ein wissenschaftlich konsistentes und didaktisch prägnantes Unterrichten möglich ist. Wie oben angedeutet, ist die Erschließung über etablierte, bereits eingeführte Unterrichtsinhalte möglich. Die Filme können experimentelle Zugänge zu BNE-relevanten Lehr-/Lerninhalten unterstützen und beschleunigen. Ihre Nutzung durch Lernende sollte unbedingt von Lehrenden geleitet oder zumindest moderiert werden, wobei im Sinne von systemischen Denkprozessen [11] die behandelten Inhalte nicht nur für sich isoliert betrachtet, sondern in größere Zusammenhänge gebracht werden sollen. Das kann in Zusammenhang mit der Erschließung des Phänomens der Elektrolumineszenz eine Betrachtung der Effizienz, Verwendung (z. B. in Smartphone-Displays), Lebensdauer und Recycling von modernen Lichtquellen sein, inklusive der Recherche zur Herkunft benötigter Rohstoffe und der Arbeitsbedingungen bei der Herstellung sein, oder auch das Thema Lichtverschmutzung.

Die Filme können verschiedene Funktionen erfüllen, z. B. der Vorbereitung der im Folgenden von Schüler*innen oder Lehrkräften selbst durchgeführten Versuche oder als Diskussionsgrundlage für die eingangs aufgeworfenen Fragestellungen dienen; die Filme können zu Hause oder im Präsenzunterricht ganz oder teilweise geschaut werden, z. B. als Ergänzung oder auch Ersatz eines Fachinputs der Lehrkraft verwendet werden. Hier sind der Kreativität der Lehrkraft keine Grenzen gesetzt.

Die digitalen Medien von der Internetplattform zu [1] werden fortlaufend aktualisiert und mit Ergebnissen aus eigener Forschung und Entwicklung sowie aus anderen Arbeitsgruppen ergänzt. Es wäre wünschenswert, wenn Kolleg*innen aus Schulen und Hochschulen die Plattform chemiemitlicht mit ihren Experimenten und Materialien bereichern könnten. Wir laden in diesem Sinne zur Kooperation mit uns ein.

Dank

Wir danken allen Mitwirkenden bei der Herstellung der Lehrfilme, Videos und Animationen. M. W. Tausch dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung der Forschungsvorhaben Photo-LeNa und Photo-MINT. C. Bohrmann-Linde dankt dem FCI für die Förderung des Projekts DiChemLab und dem BMBF für die Förderung digitalisierungsbezogener Projekte.

Literatur

- [1] Tausch, M. (2020): „Chemie mit Licht – Innovative Didaktik für Studium und Unterricht“, Lehrbuch, Springer, Heidelberg; mit Internetplattform <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/>.
- [2] WBGU (Wiss. Beirat Globale Umweltveränderungen) des BMBF (letzter Zugriff am 17.10.2020).
- [3] Wöhrle, D. (2015). Was Licht bewirken kann, *ChiuZ*, 49, 386–401.
- [4] Wöhrle, D. (2016). Was Licht bewirken kann, *ChiuZ*, 50, 244–259.
- [5] Kim, D. et al. (2015). Künstliche Photosynthese für die Produktion von nachhaltigen Kraftstoffen und chemischen Produkten, *Angew. Chem.* 127 (11), 3309–3316.
- [6] Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2018). Künstliche Photosynthese – Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven.
- [7] Weitze, M.-D. (2020). Die Natur macht es vor – Künstliche Photosynthese, *ChiuZ*, 54 (4), 2–12.
- [8] Bericht der Kultusministerkonferenz (2017). Zur Situation und zu Perspektiven der Bildung für nachhaltige Entwicklung.
- [9] Schulministerium NRW (2019). Leitlinie Bildung für Nachhaltige Entwicklung; online unter: https://www.schulministerium.nrw.de/Schulsystem/Unterricht/BNE/Kontext/Leitlinie_BNE.pdf (letzter Zugriff am 28.2.2021).
- [10] Grandrath, R. et al. (2019). E3 – Energieumwandlung experimentell erleben. *NiU* 30 (4), 29–38.
- [11] Mahaffy, P. G. (2019). Can Chemistry Be a Central Science without Systems Thinking?, *JCE* (96), 2679–2681.

Eingegangen am 20. November 2020

Angenommen am 3. März 2021

Online veröffentlicht am 14. April 2021