

Spiropyran – ein didaktisches Multitalent – Experimentelle Erschließung chemischer Basiskonzepte mit dem molekularen Schalter Spiropyran/Merocyanin

Nico Meuter, Sebastian Spinnen, Yasemin Yurdanur und Michael W. Tausch^{*[a]}

Zusammenfassung: Im Beitrag wird über die experimentelle Anwendung der chemischen Basiskonzepte mit einer Substanz berichtet, die im Chemieunterricht bisher wenig bekannt ist. Innovative Zugänge werden insbesondere für das in den MINT-Fächern interdisziplinäre Konzept Energie und für digitale Logik mit dem molekularen Schalter Spiropyran/Merocyanin erschlossen.

Stichworte: Molekularer Schalter · chemisches Gleichgewicht · photostationärer Zustand · Energiekonzept · Modellexperiment

Spiropyrane – a Dream Compound for Teaching Purposes – Experimental Approaches to Basic Concepts of Chemistry Using the Molecular Switch Spiropyran/Merocyanine

Abstract: This paper presents an experimental application of basic principles of chemistry with a substance that is yet quite unknown in the chemistry classroom. Innovative approaches towards the interdisciplinary concept of energy in the STEM context as well as towards the field of digital logics with the molecular switch spiropyran/merocyanine are explored.

Keywords: Molecular switch · equilibrium · photostationary state · concept of energy · model experiment

1. Einleitung – der molekulare Schalter Spiropyran/Merocyanin

Spiropyran (1,3,3-Trimethylindolino-6'-nitrobenzopyrylospiran) ist seit 1950 [1] in zahlreichen Publikationen Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Das wissenschaftliche Interesse an Spiropyran beruht vornehmlich auf der Eigenschaft des *molekularen Schalters*, den Spiropyran zusammen mit seinem Isomer Merocyanin bildet (Abb. 1).

Allerdings ist es nicht allein die Farbe bei Tageslicht, die diesen Schalter in der Erforschung und Entwicklung neuer, „intelligenter“ Materialien so interessant macht. Das Spiropyran aus Abb. 1 und seine Derivate können in bestimmten molekularen Umgebungen, z. B. in bestimmten Lösemitteln oder makromolekularen Stoffen, auch das Ein- und Ausschalten anderer Eigenschaften, wie Fluoreszenz, Viskosität, Elastizität, elektrische Leitfähigkeit oder katalytische Wirkung des betreffenden Materials ermöglichen. Dass diese Eigenschaften ganz ohne stoffliche Einwirkung durch bloße Bestrahlung mit Licht einer bestimmten Wellenlänge auch aus der Ferne geschaltet werden können, hat für Experimente einen besonderen Charme. Für praktische Anwendungen ergeben sich daraus einzigartige Vorteile. So kann beispielsweise die pharmakologische Wirkung eines Arzneimittels mit Licht verschiedener Wellenlängen ein- und ausgeschaltet werden. Auf eine Anwendung von molekularen Schaltern in der hochauflösenden Mikro- und Nanoskopie wird weiter unten eingegangen.

Der Titel drückt das Hauptanliegen dieses Beitrags aus. Daher bilden die Experimente mit der Titelsubstanz und ihre Bezüge

zu den Basiskonzepten des Chemieunterrichts das konzeptionelle Rückgrat des Artikels. Da Spiropyran sicherheitstechnisch unbedenklich ist, sich für einfache, didaktisch prägnante Experimente eignet, in denen nur Kleinstmengen von einigen Milligramm benötigt werden, begann die Erschließung dieser Substanz für Schulversuche bereits 1996 [2a]. In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden in Forschungsarbeiten mit didaktischem Fokus an verschiedenen Standorten eine Vielzahl von Experimenten und Lehr-/Lernmaterialien mit Spiropyran entwickelt und publiziert [2b–e]. Seit 2015 ist Spiropyran auch Teil des Experimentierkoffers Photo-Mol [3], der bei Fa. Hedinger, kommerziell für ca. 450 € erhältlich ist. Die Anschaffung des Koffers für Schulen wird vom Fonds der Chemischen Industrie FCI im Rahmen des Schwerpunkts „Schulpartnerschaft Chemie“ gefördert. Unabhängig vom Koffer können 1,2 g Spiropyran für 55.–€ bei Hedinger bezogen werden.

V1 Molekularer Schalter Spiropyran/Merocyanin: Eine kleine Spatelspitze (ca. 20 mg) Spiropyran werden in ca. 10 mL Xylol in einem Reagenzglas mit Schraubkappe gelöst (Abb. 1). Die farblose Lösung wird mit violetterem Licht ($\lambda \approx 400$ nm) aus einer LED-Taschenlampe oder mit Sonnenlicht bestrahlt. Dabei färbt sich die Lösung in Sekundenschnelle blau. Im Dunkeln und im diffusen Tageslicht entfärbt sie sich bei Raumtemperatur innerhalb von ca. 2 Minuten. Die Dauer der Entfärbung kann durch Erwärmen (Eintauchen des Reagenzglases mit der Lösung in ca. 50 °C warmes Wasser) bis auf weniger als 5 Sekunden verkürzt werden. Der Schaltprozess Färbung/Entfärbung kann beliebig oft wiederholt werden. Die Lösung aus diesem Versuch kann auch in V4 und V5 eingesetzt werden.

Das System der beiden Isomere Spiropyran und Merocyanin offenbart im Einstiegsversuch V1 das Phänomen der *Photochromie*. Im unpolaren Lösemittel Xylol erscheint es blau oder farblos, je nachdem, ob es mit Licht der Wellenlängen

[a] N. Meuter, S. Spinnen, Y. Yurdanur, M. W. Tausch
Bergische Universität Wuppertal
Gaußstr. 20
42119 Wuppertal

* E-Mail: mtausch@uni-wuppertal.de

$\lambda < 400$ nm bestrahlt oder nur bei diffusem Tageslicht betrachtet wird. Der Stoff Spiropyran selbst erzeugt keine Farbe (Abb. 1). Sein Isomer Merocyanin, das bei der Bestrahlung mit violettem oder ultraviolettem Licht gebildet wird, erzeugt in unpolare Umgebung eine blaue Farbe. Die didaktische Verwertung dieses Versuchs kann auf ganz unterschiedlichen Abstraktionsstufen, von der Grundschule bis zum Abitur, erfolgen. Darauf wird ansatzweise in den folgenden Teilen dieses Aufsatzes eingegangen. Ausführliche didaktische Ergänzungen und fachliche Grundlagen sind in den Publikationen [3,6] und im Lehrbuch [18] zu finden.

2. Ein Stoff – viele Farben

Wenn ein Stoff in unterschiedlichen Lösemitteln verschiedene Farben erzeugt, spricht man vom Phänomen der *Solvatochromie*. So erzeugt beispielsweise Iod in unpolaren Lösemitteln eine violette und in Ethanol eine braune Farbe. In diesem Abschnitt gehen wir auf die Solvatochromie von Merocyanin, dem Isomer von Spiropyran, ein. Damit kann die ganze Farbskala aus Abb. 2 erzeugt werden (s. Abb. 2).

Wenngleich die Farbskala in Abb. 2 an einen Säure-Base Indikator erinnert, hat sie nichts mit den pH-Werten der Lösungen zu tun. Die Farbe einer Merocyanin-Lösung hängt nur von dem Lösemittel, in dem Merocyanin gelöst vorliegt, ab. Die stark ausgeprägte *negative Solvatochromie* des Merocyanins wird durch die hypsochrome Verschiebung der Absorptionsmaxima bei zunehmender Polarität der Lösemittel-Moleküle verursacht und lässt sich mit seiner zwitterionischen Molekülstruktur (vgl. Abb. 1) unter Anwendung des *Struktur-Eigenschaft-Konzepts* erklären. Die ausführliche, bereits publizierte Erklärung [6,18] wird hier verkürzt in folgendem Gedankengang zusammengefasst:

- Merocyanin-Teilchen (vgl. Formel in Abb. 1) werden wegen ihrer zwitterionischen Struktur in Lösungen umso besser stabilisiert, je polarer die Moleküle des Lösemittels sind.
- Je besser diese Stabilisierung ausfällt, desto energiereichere Photonen sind erforderlich, um Merocyanin-Teilchen elektronisch anzuregen, d. h. Elektronen aus der höchsten besetzten in die niedrigste unbesetzte Energiestufe anzuheben.
- Daher werden die absorbierten Anteile des sichtbaren Lichts bei zunehmender Polarität der Lösemittel-Moleküle zunehmend in den blauen Bereich des Spektrums verschoben.
- Bei zunehmender Polarität der Lösemittel-Moleküle verschiebt sich daher die Farbe, die wir sehen, in Richtung Rot, weil sie sich aus den Anteilen des nicht absorbierten Lichts zusammensetzt.

Entsprechend korreliert die in Abb. 2 dargestellte Farbverschiebung mit den von links nach rechts zunehmenden Polaritäten der entsprechenden Lösemittel-Moleküle. Das steht in voller Übereinstimmung mit den von C. Reichardt bei anderen Systemen mit negativer Solvatochromie ermittelten Zusammenhängen [4]. Merocyanin kann also als Farbindikator für die Polarität von Lösemittel-Molekülen dienen.

Drei wichtige Ausschnitte aus der solvatochromen Farbskala in Abb. 2 mit schulüblichen Lösemitteln können in den Versuchen V2 und V3 reproduziert und ergänzt werden.

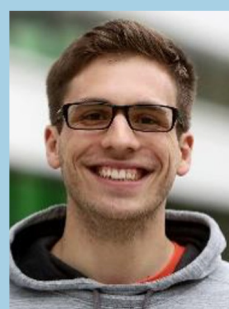
V2 Herstellung und Solvatochromie von Merocyanin: In einem Reagenzglas mit Schraubkappe wird eine gesättigte Lösung von Spiropyran in Heptan (ca. 20 mg Spiropyran in ca. 15 mL Heptan) hergestellt und mit der violetten LED-Taschenlampe ($\lambda \approx 400$ nm) bestrahlt. Die Lösung färbt sich zunächst blau. Anschließend bildet sich ein schwarzer Niederschlag. Die jeweils 2-minütige Bestrahlung und Bildaufnahme mit jeweils

kurzzeitig ausgeschalteter LED ergibt die ersten fünf Fotos aus Abb. 3. Der schwarze Feststoff setzt sich innerhalb von ca. 4 Minuten am Boden des Reagenzglases ab (zwei letzte Fotos in Abb. 3). Der Feststoff wird abfiltriert und auf drei kleine Schraubdeckelgläser verteilt. In die drei Gläser werden je 2 bis 3 mL Ethanol bzw. Aceton bzw. Xylol zugegeben. Beim Schütteln löst sich der Feststoff und erzeugt eine rote bzw. violette oder blaue Lösung (Abb. 4).

V3 Fluoreszenz von Merocyanin: Die drei Lösungen aus V2 werden im violetten Licht der LED-Taschenlampe ($\lambda \approx 400$ nm) oder besser im UV-Licht ($\lambda \approx 365$ nm) einer LED- oder einer „Schwarzlichtlampe“ betrachtet. Bei der ethanolischen Lösung ist eine starke rote Fluoreszenz zu beobachten,



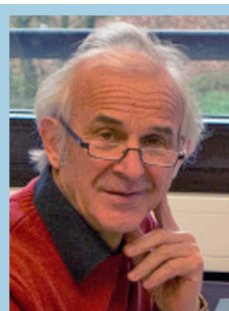
Nico Meuter studierte Chemie und Mathematik für das Lehramt an Gymnasien an der Bergischen Universität Wuppertal. Im Anschluss an die Staatsexamensarbeit folgte eine Anstellung in der Arbeitsgruppe Chemie und ihre Didaktik unter Prof. Dr. Tausch in Wuppertal. Nach Abschluss der Promotion zum Thema Photolumineszenz und Photochromie in Lösungen und in Feststoffmatrices – Interaktionsbox Photo-Mol im Dezember 2018, erfolgte eine Anstellung als Post-Doc in der Arbeitsgruppe Chemiedidaktik von Frau Prof. Dr. Bohrmann-Linde.



Sebastian Spinnen studierte Chemie und Biologie für das Lehramt an Gymnasien an der Bergischen Universität Wuppertal. Im Anschluss an seine Masterarbeit war er von 2015 bis 2016 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Dr. K. Schaper an der HHU Düsseldorf beschäftigt. Anschließend beendete er in der Zeit von Januar 2017 bis Februar 2019 seine Promotion in der Arbeitsgruppe Prof. Dr. Tausch an der Bergischen Universität Wuppertal. Derzeit absolviert er sein Referendariat am Zentrum für schulpraktische Ausbildung Mönchengladbach.



Yasemin Yurdanur schloss 2014 ihr Studium mit dem 1. Staatsexamen in den Fächern Chemie und Mathematik für das Lehramt an Gymnasien an der Universität Paderborn ab. Sie absolvierte 2016 das Referendariat am Zentrum für schulpraktische Ausbildung Krefeld an dem Mataré Gymnasium in Meerbusch und ist seit November 2016 wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Chemiedidaktik an der Bergischen Universität Wuppertal. Ihr Promotionsthema ist die curriculare Einbindung photochemischer Inhalte in den Chemieunterricht.



Michael W. Tausch, langjähriger Chemielehrer, Schulbuchautor und Professor für Chemie und ihre Didaktik an den Universitäten Duisburg und Wuppertal entwickelt Lehr-/Lernmaterialien in Print- und Elektronikformaten sowie als Interaktionsboxen mit experimentellem Equipment. Sein Forschungsinteresse gilt insbesondere der curricularen Innovation des Chemieunterrichts und des Lehramtsstudiums. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Chemie mit Licht. Im Jahr 2015 erhielt M. W. Tausch als erster Chemiedidaktiker den neu eingerichteten

Heinz-Schmidkunz-Preis der Gesellschaft Deutscher Chemiker.

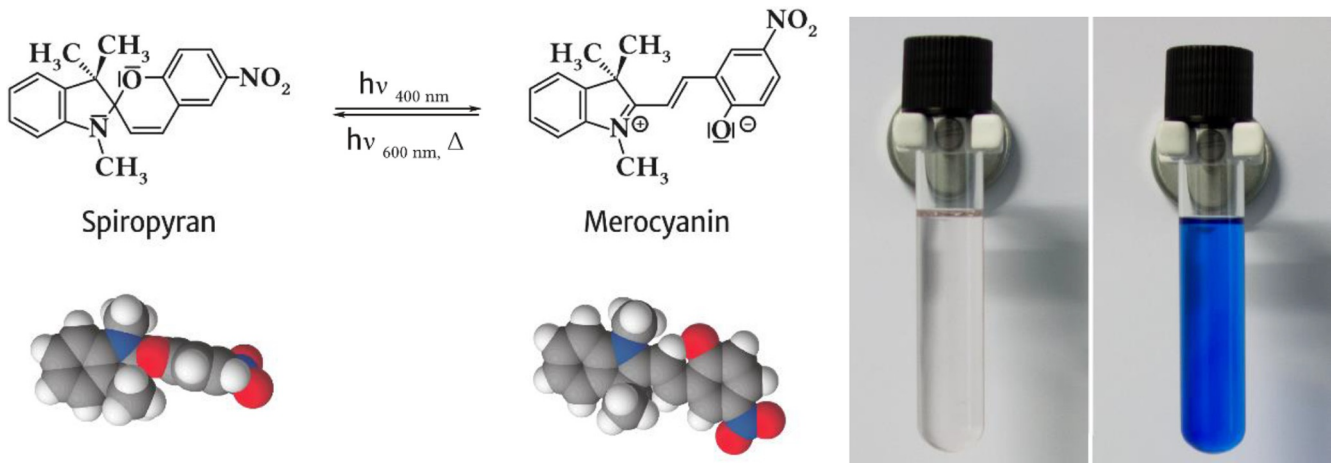


Abb. 1: Spiropyran und Merocyanin (Molekülformel $C_{19}H_{18}O_3N_2$) gehen bei Lichtbestrahlung und/oder thermisch ineinander über. In einem unpolaren Lösemittel ist Spiropyran farblos, Merocyanin blau

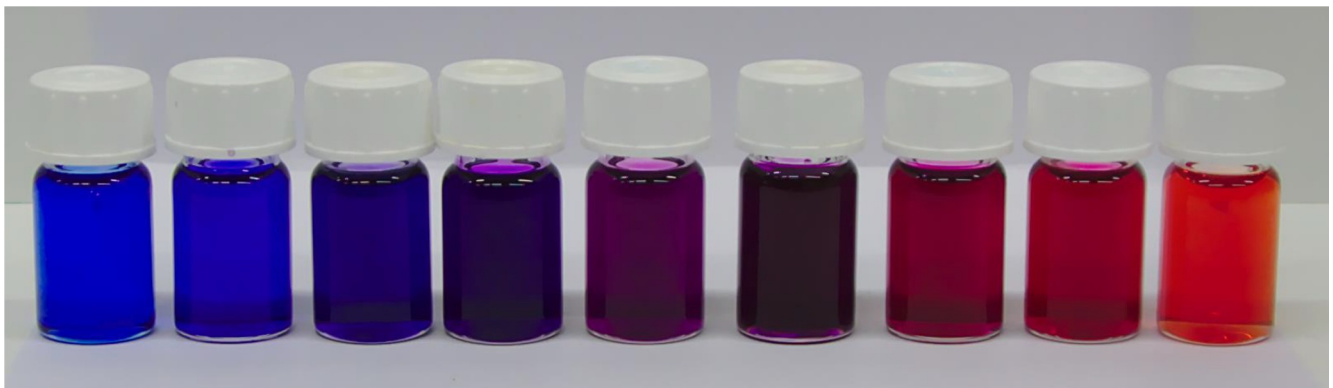


Abb. 2: Merocyanin in verschiedenen Lösemitteln (v.l.n.r.: Toluol, Tetrahydrofuran, Chloroform, Aceton, Acetonitril, Dimethylsulfoxid, Ethanol, Methanol und Ethylenglykol)

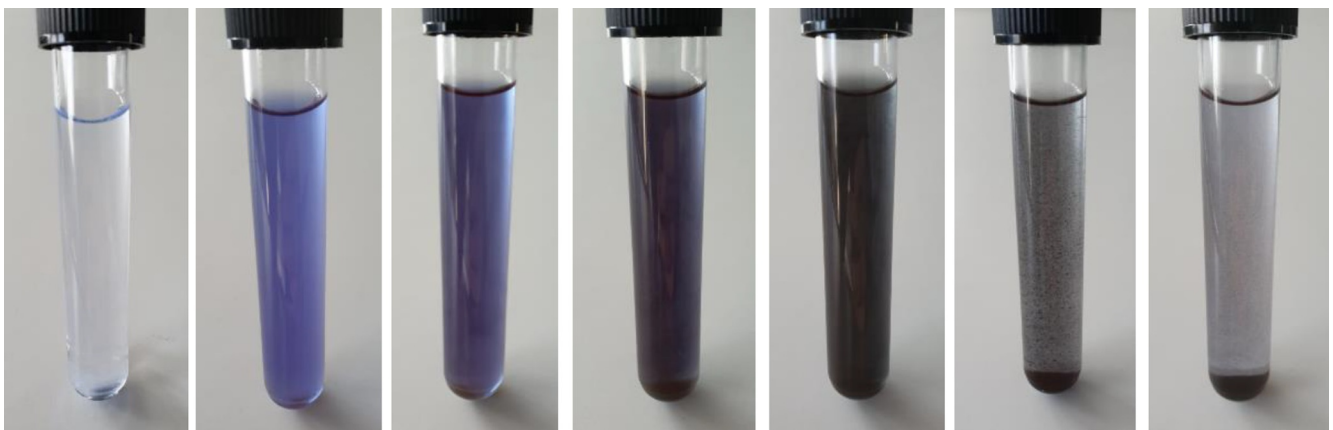


Abb. 3: Herstellung von Merocyanin aus einer gesättigten Spiropyran-Lösung in Heptan (V2)

die Lösung in Aceton fluoresziert nur schwach und die Lösung in Xylol fluoresziert praktisch nicht (Abb. 4).

Bei der Auswertung von V2 und V3 sollte zuerst das *Stoff-Teilchen-Konzept* angewendet werden und zwar bei der Frage, warum durch Bestrahlung der Spiropyran-Lösung in Heptan Merocyanin als Feststoff ausfällt. Die Erklärung unter Verknüpfung der Stoff- und der Teilchenebene lautet wie folgt:

- Bei der Lichtbestrahlung in V2 isomerisiert Spiropyran zu Merocyanin (Abb. 1).

- Dabei bilden sich aus unpolaren Spiropyran-Molekülen polare Merocyanin-Zwitterionen.
- Diese Zwitterionen lagern sich in dem Lösemittel Heptan, das aus unpolaren Molekülen besteht, aufgrund der elektrostatischen Anziehungskräfte bevorzugt „salzartig“ zusammen.
- Auf der Stoffebene entspricht das der Bildung von Feststoff-Partikeln aus Merocyanin, die sich am Boden absetzen.



Abb. 4: Ausgefälltes Merocyanin, Farben der Lösungen bei Tageslicht (v.l.n.r.: Ethanol, Aceton, Xylol) und Fluoreszenzverhalten der Lösungen im UV-Licht (V2, V3)

Die Argumentationsfolge zur Erklärung der Solvatochromie von Merocyanin nach dem *Struktur-Eigenschaft-Konzept* ist bereits weiter oben bei Abb. 2 angegeben. Dass die drei Lösungen aber nicht nur unterschiedliche Farben, sondern auch ein ganz unterschiedliches Fluoreszenzverhalten zeigen (Abb. 4), erfordert noch tiefere Betrachtungen. In der Fachliteratur lautet das allgemeine Prinzip dazu *aggregationsinduzierte Emission* [7]. Eine entsprechend didaktisch angepasste Erklärung für das Fluoreszenzverhalten von Merocyanin wurde im Sinne des Struktur-Eigenschaft-Konzepts in dieser Zeitschrift im Jahr 2017 für den Einsatz in der Oberstufe erörtert [6]. Weitere Experimente und Arbeitsblätter für die Sekundarstufen I und II zur Fluoreszenz von Merocyanin und anderen Fluorophoren sind im Begleitheft zur Interaktionsbox Photo-Mol [3] finden.

An dieser Stelle sei auch auf den in Zusammenarbeit und mit dem Beilstein-Institut zur Förderung der Chemischen Wissenschaften produzierten Lehrfilm „Ein chemisches Chamäleon – molekulare Umgebung und Solvatochromie“ [5] hingewiesen. Darin wird das Phänomen der Solvatochromie ausgehend von einem echten Chamäleon anhand eines im Film durchgeführten Experiments mit Spiropyran im *Dialog* zwischen einem naturwissenschaftlich interessierten Laien und einem chemiedidaktischen Jungforscher auf verständliche Weise erschlossen. Dabei kommen auch Videosequenzen des Realexperiments, Formeln von beteiligten Teilchen und Energiediagramme zum Einsatz. Lehrfilme dieser Art können als Tutorials in der Lehramtsausbildung und im Chemieunterricht ergänzend und unterstützend zu den Realexperimenten eingesetzt werden. Allerdings sollten sie die Realexperimente nicht ersetzen, besonders dann nicht, wenn die Experimente so einfach, sicher und aussagekräftig wie V2 und V3 sind.

3. Zwei Energieformen – Licht und Wärme als Antrieb chemischer Reaktionen

Dieser Untertitel hebt die Tatsache hervor, dass eine chemische Reaktion immer eine Stoff- und Energieumwandlung beinhaltet. Genau das wird auch in den Lehrplänen bereits für den Anfangsunterricht als obligatorische Kompetenz im Bereich Fachwissen gefordert. Das *Basiskonzept Energie* soll also im Chemieunterricht bereits bei der Einführung des Begriffs der chemischen Reaktion thematisiert werden. Dabei geht es weder um die exakte Definition des Energiebegriffs noch um die Formeln der an einer bestimmten Reaktion beteiligten Stoffe, sondern zunächst nur um die beteiligten Energieformen. In der Regel kommen die Wärme und die elektrische Energie als beteiligte Energieformen an chemischen Reaktionen zum Zuge. Entsprechende Experimente gehören zum Standardrepertoire in Schulbüchern und im Unterricht.

Mit Spiropyran und Merocyanin ist es möglich, sehr einfach und überzeugend Licht als eine Energieform, die chemische Reaktionen antreiben kann, experimentell zu erschließen. Auf die Formeln im Reaktionsschema aus Abb. 1 muss im Anfangsunterricht verzichtet werden. Worauf es im ersten Chemiejahr ankommt, sind die beobachtbaren Phänomene, die Bildung und der Abbau eines Stoffes. Der neue Stoff in V1, V4 und V5 offenbart sich durch die neue Farbe. Das ist für die Schülerinnen und Schüler insofern überzeugend, als kein Stoff von außen hinzugegeben wird. Also muss aus einem oder mehreren Stoffen, die im Reagenzglas sind, ein neuer Stoff entstanden sein, der dann aber auch wieder verschwindet. Um alle Zweifel darüber, dass bei der Bestrahlung wirklich ein neuer Stoff entstanden ist, zu beseitigen, kann an dieser Stelle auch V2 durchgeführt werden. Dort wird der neue Stoff auch als Feststoff ausgefällt und abfiltriert.

Im weiteren Verlauf des Curriculums kann (sollte) das Reaktionsbeispiel aus Abb. 1 in der Grundversion aus V1 und in den folgenden Versionen aus V3, V4 und V5 wieder aufgegriffen und mit jeweils geeigneten Begriffen (Molekülformel, Strukturformel, Isomere, Chromophore, Photonen, Energiestufen etc.) konzeptionell vertieft werden. Didaktische Hinweise dazu sind in [3] und in [18] verfügbar.

Als Einstieg zur Beteiligung von Licht und Wärme bei der Reaktion aus Abb. 1 eignet sich also bereits der Versuch V1. Im Kontext des Untertitels dieses Abschnitts sollten aber bereits im Anfangsunterricht auch die folgenden Versuche V4 und V5 in Lösung und/oder der Versuch V6 in fester Phase in forschend-entwickelnder Unterrichtsweise durchgeführt werden. Sie liefern prägnante Phänomene, durch die grundsätzliche Unterschiede bei der Art und Weise, wie sich die Energieformen Licht und Wärme bei chemischen Reaktionen beteiligen, deutlich werden.

V4 Photochemische Reaktion von Spiropyran zu Merocyanin: Die Spiropyran-Lösung aus V1 wird auf drei kleine Reagenzgläser mit Schraubdeckel verteilt. Eines wird im Eiswasserbad auf ca. 0 °C gekühlt, eines bei Raumtemperatur gehalten und eines im Wasserbad auf ca. 50 °C erwärmt. Bei jeder Probe wird geprüft, ob und wie schnell die Bildung von Merocyanin (Blaufärbung der Lösung) erfolgt, wenn mit violettem Licht ($\lambda = 400$ nm) aus einer LED-Taschenlampe wie in Abb. 5 bestrahlt wird. Der Versuch kann auch mit Licht anderer Wellenlängen, z. B. $\lambda = 625$ nm (rot), $\lambda = 525$ nm (grün), $\lambda = 450$ nm (blau) und $\lambda = 365$ nm (UV) wiederholt werden.

V5 Thermische und photochemische Reaktion von Merocyanin zu Spiropyran: Bei den drei Proben aus V4 wird jeweils ermittelt, welchen Einfluss die Temperatur auf die Rückreaktion von Merocyanin zu Spiropyran (Entfärbung der blauen Lösung bei diffusem Tagesslicht oder bei Dunkelheit) hat. Danach werden alle drei Proben auf ca. 0 °C gekühlt, durch Bestrahlung mit violettem Licht wird jeweils blaues Merocyanin erzeugt und nun ermittelt, ob und wie die Entfärbung durch

Bestrahlung mit Licht, z. B. $\lambda = 525$ nm (grün), $\lambda = 625$ nm (rot) und $\lambda = 450$ nm (blau) beeinflusst wird (s. Abb. 5).

In V4 wird deutlich, dass die Reaktion Spiropyran \rightarrow Merocyanin nur mit Licht (nicht mit Wärme) angetrieben werden kann und dass dafür violettes und UV-Licht (nicht rotes und grünes Licht) geeignet sind. Die Ergebnisse aus V5 zeigen, dass die Reaktion Merocyanin \rightarrow Spiropyran auch ohne Lichtbeteiligung, also thermisch verlaufen kann und durch Wärmezufuhr beschleunigt wird. Diese Reaktion eignet sich in der Oberstufe für kinetische Messungen im Photometer (vgl. didaktischen Hinweis zu V7). Um deutlich zu erkennen, dass die gleiche Reaktion Merocyanin \rightarrow Spiropyran auch durch Bestrahlung mit grünem Licht angetrieben werden kann, ist es zweckmäßig, die Reaktion bei niedriger Temperatur durchzuführen, um so die thermische Umlagerung zu unterdrücken.

Schülerversuche zur Energiebeteiligung bei den Reaktionen aus V4 und V5 können insbesondere im Anfangsunterricht noch einfacher, schneller und sicherer, gleichzeitig aber didaktisch prägnant, mit der „intelligenten Folie“ durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um Spiropyran in einer Feststoffmatrix aus Polystyrol, die hauchdünn auf eine PET-Folie aufgebracht und in eine PE-Tasche laminiert wurde. Die Bezugsquelle für die Materialien ist in [3] angegeben. Die „intelligente Folie“ kann nach der *online* verfügbaren Vorschrift aus [8] hergestellt werden. Damit wird der folgende Versuch V6 durchgeführt:

V6 Energiebeteiligung bei chemischen Reaktionen: Die folgenden Versuche werden mit der „intelligenten Folie“ und mithilfe von LED-Taschenlampen durchgeführt: a) Um die Wirkung der verschiedenen Lichtfarben der LED-Taschenlampe (violett, rot, grün, blau, weiß) auf die bereitgestellte „intelligente Folie“ zu untersuchen, stellt man die eingeschaltete LED-Lampe mit der entsprechenden Lichtfarbe jeweils 4 Sekunden lang auf die Folie. Anschließend stellt man fest und notiert, bei welcher Lichtfarbe sich ein blauer Stoff in der Folie gebildet hat. b) Es wird untersucht, ob und mit welcher Lichtfarbe der LED-Lampe der blaue Stoff in der Folie wieder in einen farblosen Stoff umgewandelt werden kann. Dazu stellt man die eingeschaltete LED-Lampe für mindestens 30 Sekunden lang auf den blauen Fleck der Folie. c) Man taucht die Folie, auf der Stellen mit dem blauen Stoff erzeugt wurden, in ein Becherglas mit ca. 60 °C warmem Wasser und beobachtet die Veränderung. d) Man überprüft, ob sich die Bildung und der Abbau des blauen Stoffes wiederholen lassen.

Didaktischer Hinweis: Es bietet sich an, die Versuche a) bis d) in Gruppen durchzuführen und die Gruppen gegebenenfalls mit einem geeigneten Arbeitsblatt beispielsweise aus [3] auszustatten.

Die Ergebnisse aus V6 sind qualitativ die gleichen wie in V4 und V5. Sie bestätigen die Angaben aus Abb. 1 bezüglich der Energiebeteiligung bei den beiden betrachteten Reaktionen. Eine der Reaktionen kann nur durch Licht angetrieben werden, die andere durch Wärme und Licht. Wenn Licht als Antrieb einer Reaktion wirkt, dann gilt das jeweils nur für Licht bestimmter Farben (Wellenlängenbereiche). Auf der „intelligenten Folie“ kann die blaue Farbe wie bei einer selbsttönenden Sonnenbrille AN und AUS geschaltet werden. Diese Analogie wird in dem Lehrfilm über den photoaktiven molekularen Schalter Spiropyran/Merocyanin [9] aufgenommen, experimentell demonstriert und mithilfe von Molekülmodellen und Absorptionsspektren auf Sek. II-Niveau erklärt (Abb. 6).

4. Ungleiche Gleichgewichte – chemisches Gleichgewicht vs. photostationärer Zustand

Das *Basiskonzept Gleichgewichte* ist in allen Bundesländern für die Sekundarstufe II lehrplanpflichtig. Da der Begriff Gleichgewicht auch weit über das Fach Chemie hinaus gebraucht wird, kommt es beim chemischen (thermodynamischen) Gleichgewicht ganz besonders darauf an, seine Bedeutung und seine zu anderen Gleichgewichten abgrenzenden Merkmale zu präzisieren. Ein chemisches Gleichgewicht kann sich nur in einem geschlossenen System einstellen, es hat einen dynamischen Charakter, seine Lage ist temperaturabhängig und es unterliegt dem Prinzip des kleinsten Zwangs. Diese Merkmale wurden in der Fachdidaktik experimentell, konzeptionell und modelltheoretisch erschöpfend erschlossen und sie nehmen in allen Schulbüchern einen prominenten Stellenwert ein. Es wird bewusst darauf verzichtet, ausgewählte Artikel und Bücher an dieser Stelle hervorhebend zu zitieren.

Neu und didaktisch bisher noch nicht angemessen berücksichtigt ist die Unterscheidung zwischen einem *thermodynamischen Gleichgewicht* (im Schulunterricht als chemisches Gleichgewicht bezeichnet) und dem *photostationären Zustand* (Photostationarität). Letzteres wird nur in Systemen erreicht und aufrechterhalten, die dauerhaft mit Licht bestrahlt

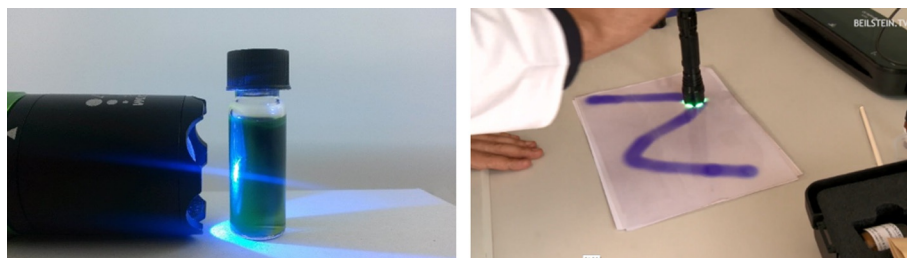


Abb. 5: Positionierung der LED-Taschenlampen bei der Bestrahlung der Lösungen und der „intelligenten Folie“

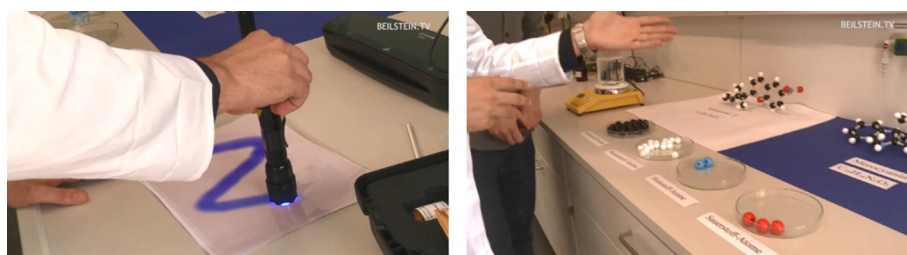


Abb. 6: Screenshots aus dem Film „AN und AUS mit Licht – ein photoaktiver molekularer Schalter“ [9]

werden und bei denen mindestens eine Komponente des Systems photochemisch reagiert. Dabei kommt es zur Überlagerung thermischer und photochemischer Reaktionen. Die Absorptionskurven von Spiropyran und Merocyanin in Abb. 7 belegen, warum die Reaktion Spiropyran→Merocyanin mit violetter oder ultraviolettem Licht und die Reaktion Merocyanin→Spiropyran mit grünem Licht angetrieben wird. Modelltheoretisch verläuft die thermische Reaktion von Merocyanin zu Spiropyran im Energiediagramm aus Abb. 7 entlang der blauen durchgezogenen Kurve des elektronischen Grundzustands, die photochemischen Reaktionen beginnen jeweils mit der Absorption von Photonen der Wellenlängen λ_1 (blaues oder ultraviolettes Licht) bzw. λ_2 (grünes, gelbes oder rotes Licht) und verlaufen teilweise (bis zu TS, *transition state*) entlang der roten durchgezogenen Kurve, die das Energieprofil des elektronisch angeregten Zustands darstellt (s. Abb. 7).

Das System Spiropyran/Merocyanin ist sowohl in Lösung, z. B. in Xylol, als auch in der unpolaren Matrix aus Polystyrol für die experimentelle Erschließung der Gemeinsamkeiten und der Unterschiede zwischen einem chemischen Gleichgewicht und einem photostationären Zustand geeignet.

V7 Chemisches Gleichgewicht und photostationärer Zustand: In diesem Versuch können erneut die drei Reagenzgläser mit den Spiropyran-Lösungen aus V4 verwendet werden. Eine davon wird im Eiswasserbad auf ca. 0 °C gekühlt, eine bei Raumtemperatur gehalten und eine im Wasserbad auf ca. 50 °C erwärmt. Die drei Rggl. mit den unterschiedlichen Temperaturen werden vor einem weißen Hintergrund gleichzeitig 3 Sekunden lang mit violettem Licht ($\lambda = 400$ nm) aus LED-Taschenlampen bestrahlt. Nach dem Ausschalten der Lampen wird die Farbänderung in den drei Reagenzgläsern ca. 2 Minuten lang beobachtet.

Didaktischer Hinweis: Der zeitliche Verlauf der thermischen Reaktion Merocyanin→Spiropyran bei verschiedenen Temperaturen kann in einer Küvette photometrisch aufgezeichnet

und kinetisch ausgewertet werden. Bei den unterschiedlichen Temperaturen erhält man Kurven, die jeweils eine Kinetik 1. Ordnung belegen. Aus den Messdaten kann die RGT-Regel abgeleitet werden.

In der Grundversion aus V7 ohne photometrische Messungen kann beobachtet werden, dass nach nur 3 Sekunden Bestrahlung unabhängig von der Temperatur die Lösung eine satte blaue Farbe annimmt, dass sich also etwa gleich viel Merocyanin gebildet haben muss. Es kann nachgewiesen werden, dass auch bei längerer Bestrahlung die blaue Farbintensität gleichbleibt. Es kann auch überprüft werden, dass selbst eine unter 0 °C gekühlte Probe sich ebenso schnell tiefblau färbt und bei längerer Bestrahlung so bleibt. Unmittelbar nach dem Ausschalten der LED-Lampe setzt bei der warmen Probe die Entfärbung ein. Sie ist nach ca. 30 Sekunden abgeschlossen. Die Probe unter Raumtemperatur ist nach 30 Sekunden nur teilweise entfärbt und bei der auf 0 °C gekühlten Probe ist der Beginn einer Entfärbung noch kaum beobachtbar.

Der photostationäre Zustand stellt sich bei diesem System also sehr rasch, in Sekundenschnelle ein und liegt auf der Seite des Merocyanins. Es liegt so viel Merocyanin vor, dass die Lösung tiefblau erscheint. Dagegen liegt das chemische Gleichgewicht im unpolaren Lösemittel Xylol auf der Seite des farblosen Spiropyrans und die Geschwindigkeit, mit der es sich ohne Lichtbestrahlung einstellt, ist temperaturabhängig. Die Geschwindigkeit folgt dabei der RGT-Regel, d. h. 2- bis 4-fache Beschleunigung bei einem Temperaturanstieg von 10 °C. Das Experiment V7 steht auch im Mittelpunkt des Lehrfilms zu den „ungleichen Gleichgewichten“ [10]. Ausgehend vom mechanischen Gleichgewicht beim Balancieren auf einer Slackline (s. Abb. 8)

spricht der Protagonist verschiedene Arten von Gleichgewichten an, bis hin zum chemischen Gleichgewicht. Dann geht er in die Labore der Universität, wo zunächst chemische Gleichgewichte in einer Rückflussapparatur gezeigt und kommen-

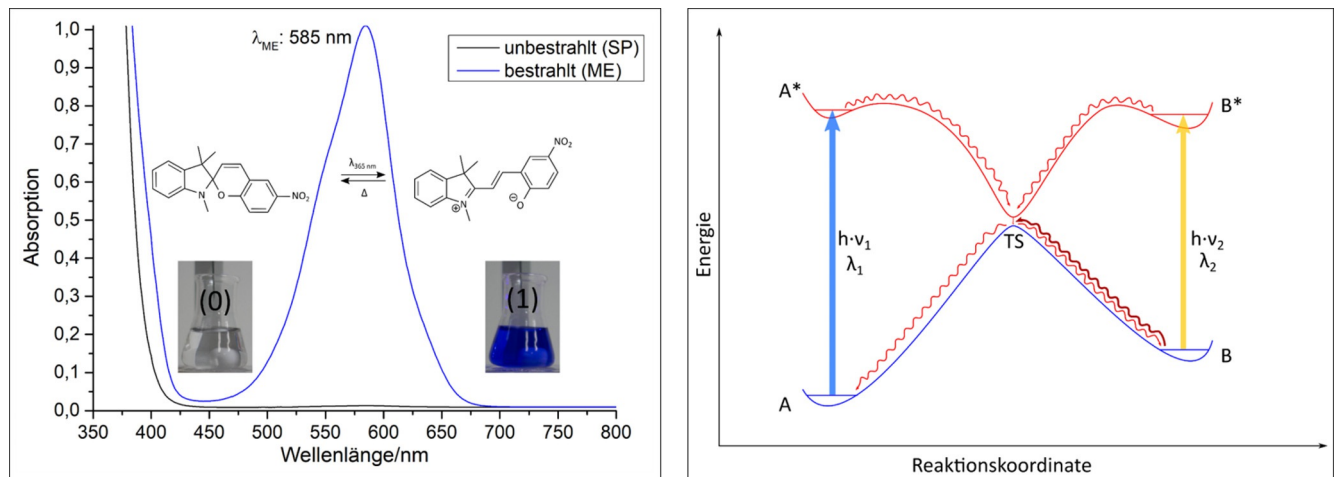


Abb. 7: Absorptionskurven und Energiediagramm zu den Isomerisierungen von Spiropyran und Merocyanin



Abb. 8: Screenshots aus dem Film „Ungleiche Gleichgewichte – chemisches Gleichgewicht vs. photostationärer Zustand“ [10]

tiert werden, um schließlich im Experiment den photostationären Zustand kennenzulernen.

In einer neu konzipierten Modellanimation zur Photostationarität [11] können sowohl das chemische (thermodynamische) Gleichgewicht als auch der photostationäre Zustand am Beispiel einer Modellreaktion, die dem Spiropyran/Merocyanin-System entspricht, unter verschiedenen Temperatur- und Bestrahlungsbedingungen simuliert werden. Die *online* verfügbare Animation ist auf Notebooks, Tablets oder Smartphones interaktiv verwendbar und eignet sich sowohl für den Einsatz im Unterricht als auch für individuelles Lernen zu Hause oder unterwegs (s. Abb. 9).

5. Orthogonale Lösemittel – Umkehrung mehrerer Eigenschaften

Lösemittelpaare wie Wasser und Heptan, die sich praktisch nicht ineinander lösen, bezeichnet man als *orthogonale* Lösemittel. Für den folgenden Versuch sind die orthogonalen Lösemittel Xylol (oder Toluol) und Ethylenglykol (1,2-Ethandiol) aufgrund der Dichteunterschiede am besten geeignet.

V8 Extraktion und Stabilisierung von Merocyanin: In einem großen Schnappdeckelglas werden 30 mg Spiropyran in 30 mL Toluol oder Xylol gelöst und vorsichtig mit 10 mL Ethylenglykol unterschichtet. Die Ethylenglykol-Phase wird mit Alufolie abdunkelt und die Toluol-Phase unter magnetischer Rührung mit der violetten LED-Taschenlampe ($\lambda = 400$ nm) über einen Zeitraum von 20 Minuten direkt an der Außenwand des Glases bestrahlt. Wenn man in Zeitabständen von 5 Minuten die Bestrahlung und die Rührung unterbricht, sind die in Abb. 10 dargestellten Ergebnisse zu beobachten (s. Abb. 10).

Diese Ergebnisse erscheinen auf den ersten Blick verblüffend, denn anders als zu erwarten gewesen wäre, färbt sich die obere bestrahlte Toluol-Phase im Schnappdeckelglas nicht blau, obwohl sich dort Merocyanin aus Spiropyran bildet (Abb. 10). Stattdessen färbt sich die untere Phase, in der reines Ethylenglykol vorlag, allmählich rot. An der Phasen-

grenze wird photochemisch gebildetes Merocyanin sofort in Ethylenglykol extrahiert, weil es sich darin besser löst. In Ethylenglykol erzeugt das solvatochrome Merocyanin (Abb. 2) jedoch nicht eine blaue, sondern eine rote Farbe. Beim Stehenlassen im Dunkeln ändert sich nichts, denn Merocyanin ist in Ethylenglykol nicht nur besser löslich, sondern auch langfristig stabil.

Didaktischer Hinweis: Der Versuch V8 kann vereinfacht und schnell als Handversuch ohne magnetische Rührung in einem Reagenzglas mit Schraubkappe durchgeführt werden. Darin wird eine ca. 3 cm hohe Schicht aus Ethylenglykol mit einer ca. 3 cm hohen Schicht aus Xylol (oder Toluol), die gelöstes Spiropyran enthält, überschichtet. Beide Schichten sind farblos. Die obere Schicht wird 2–3 Sekunden lang mit violettem Licht ($\lambda = 400$ nm) aus einer LED-Taschenlampe bestrahlt und färbt sich dabei blau. Die Lampe wird ausgeschaltet und das Reagenzglas wird gut durchgeschüttelt. Nach einigen Sekunden trennen sich die beiden Phasen, wobei die untere Phase nun rot und die obere farblos ist.

Bei der Extraktion von Merocyanin aus der Xylol-Phase in die Ethylenglykol-Phase handelt es sich um mehr als nur um die Löslichkeitsunterschiede nach dem Motto „Gleiches löst sich in Gleichem“. Es wird außerdem deutlich, dass auch die *Stabilität* eines Stoffes, in diesem Fall Merocyanin, sich in zwei orthogonalen Lösemitteln völlig umkehrt. Während Merocyanin in Xylol- oder Toluol-Lösung spontan zu thermodynamisch stabilerem Spiropyran reagiert (V7, Abb. 8), ist es in Ethylenglykol thermodynamisch stabiler als Spiropyran, d.h. in der Nano-Umgebung von Ethylenglykol-Molekülen bilden die Merocyanin-Zwitterionen ein energieärmeres System als die Spiropyran-Moleküle. Das lässt sich mithilfe von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Ethylenglykol-Molekülen und den Merocyanin-Zwitterionen erklären [6, 12, 18]. Die unterschiedlichen Löslichkeiten, Farben und Stabilitäten von Merocyanin werden im nächsten Abschnitt aufgegriffen, erweitert und für die experimentelle Erschließung digitaler Schaltungen mit molekularer Logik genutzt.

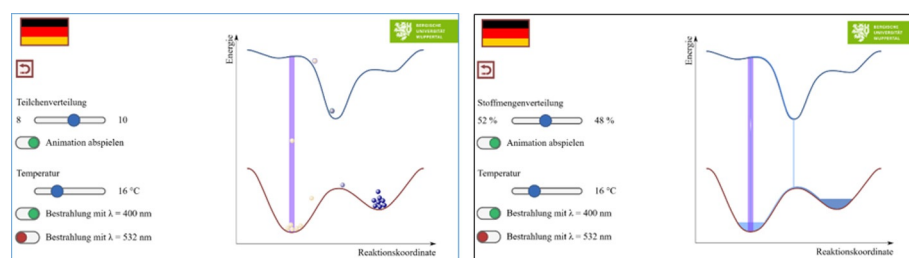


Abb. 9: Screenshots aus der interaktiven Modellanimation zur Photostationarität: Teilchenmodell (links) und Kontinuumsmodell (rechts) [11]

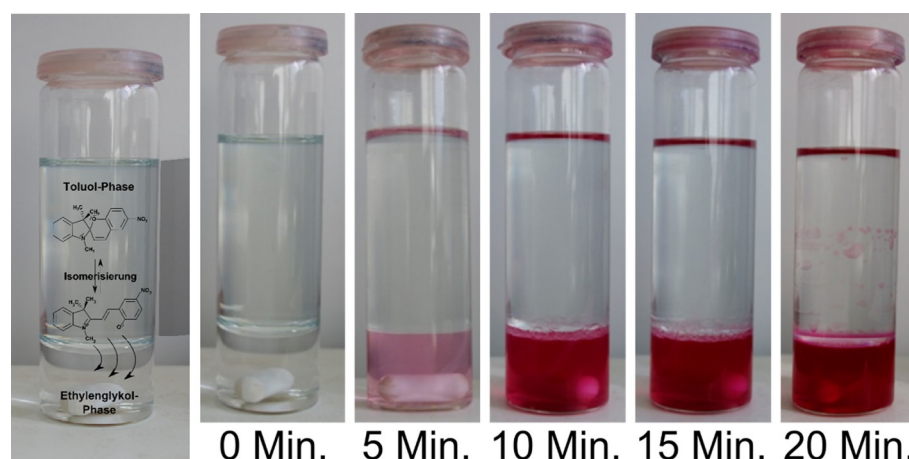


Abb. 10: Merocyanin bildet sich durch Lichtbestrahlung in der Toluol-Phase und wird an der Phasengrenze in Ethylenglykol extrahiert. Darin ist es im Dunkeln langfristig stabil



Abb. 11: INHIBIT-Schaltung mit dem System (SP/MC/MCH⁺) im Lösemittel Ethylenglykol (V9) [12]

6. Molekulare Logik – Digitale Schaltungen mit Spiropyran und Merocyanin

Auch unter dieser Überschrift erweist sich der molekulare Schalter Spiropyran/Merocyanin als ein „didaktisches Multitalent“, denn er ermöglicht die Übertragung der binären Codes „0“ und „1“ in distinkte molekulare Strukturen, die ein- und ausgelesen werden können. Damit lassen sich logische Gatter (*logic gates*) oder logische Verknüpfungen nach den Regeln der Boole'schen Aussagenlogik konzipieren und realisieren, in denen verschiedene molekulare Strukturen für die binären Codes stehen. In einem Artikel aus dem Jahr 2013 [13] und in einem CHEMKON-Beitrag [14] aus dem Jahr 2018 wurde gezeigt, dass beim molekularen Schalter Spiropyran/Merocyanin (SP/MC) durch Protonierung mit Säuren und Deprotonierung mit Basen die Anzahl der Strukturen von zwei (SP/MC) auf drei (SP/MC/MCH⁺) erhöht werden kann. Beim Experimentieren mit Spiropyran kommt also auch das *Donator-Akzeptor-Konzept* zur Anwendung. Im Beitrag [14] und *online* in [12] wird über die Wahrheitstabellen verschiedener Schaltungen und die Realisierungsmöglichkeit einer INHIBIT-Schaltung mit ausschließlich optischen Signalen (*all-optical INHIBIT-Gate*) ausführlich berichtet. Folgende experimentelle Varianten sind seither neu hinzugekommen [12,16] (s. Abb. 11). *V9 All-optical INHIBIT-Gate mit (SP/MC/MCH⁺) in Ethylenglykol-Lösung*: Eine mit Trichlorethansäure TCE angesäuerte Lösung von Spiropyran in Ethylenglykol, $c(\text{SP})=10^{-3}$ mol/L, $c(\text{TCE})=5 \cdot 10^{-2}$ mol/L, wird in einer Petrischale auf der ganzen Oberfläche mit UV-Licht ($\lambda=365$ nm) aus einer Dreifach-LED-Lampe (vgl. genaue Angaben und Bezugsquelle im experimentellen Teil aus [12]) bestrahlt. Dies ist das AN-Signal für eine rotviolette Fluoreszenzemission mit $\lambda=615$ nm (Abb. 11). Als AUS-Signal wird blaues Licht ($\lambda=450$ nm) verwendet, das aus einer Dreifach-LED-Lampe über ein vertikales montiertes Linsensystem auf drei kleine Flächen fokussiert wird. Damit wird 4 s lang bestrahlt (Abb. 11, Mitte). Unmittelbar nach dem Ausschalten des blauen AUS-Signals ist zu erkennen, dass die Fluoreszenz auf den drei kleinen Flächen gelöscht ist (Abb. 11, rechts). Es dauert ca. 10 Sekunden, bis wieder die gesamte Oberfläche rot leuchtet.

Der Versuch V9, in dem ferngesteuert allein mit Licht ein fluoreszierender Zustand AN und AUS geschaltet werden kann, führte uns zu einem Modellexperiment, in dem das RESOLFT-Konzept (*reversible saturable/switchable optically linear fluorescence transitions*) verwirklicht wird. Dieses von Stefan Hell erdachte Konzept hat mit seinem nobelpreisgekrönten STED-Konzept (*stimulated emission depletion*) eine fundamentale Gemeinsamkeit, die in folgendem Zitat aus dem Nobelaufsatz deutlich wird [15]: „Mittels zweier unterscheidbarer Zustände machen wir die Strukturen kurzfristig unterscheidbar, so halten wir sie auseinander. Tatsächlich bewerkstelligen alle ernstzunehmenden beugungsunbegrenzten Fern-

feld-Mikroskopiemethoden die Trennung im Bild, indem sie die Moleküle, die enger beieinander sind als die Beugungsgrenze, für die Dauer der Erfassung durch den Detektor in zwei verschiedene Zustände überführen. „Fluoreszent (AN)“ und „nicht-fluoreszent (AUS)“ ist das einfachste Zustandspaar, das man dafür verwenden kann, und so ist es auch nicht verwunderlich, dass „An“- und „Aus“-Zustände bisher am häufigsten dafür eingesetzt wurden.“

Mit dieser Idee kippte S. Hell ein über 100 Jahre altes Paradigma aus der Physik, das so genannte Ernst-Abbe-Limit. Danach wird in der optischen Mikroskopie die Auflösungsgrenze durch die Beugungsgrenze des Lichts bestimmt und die liegt bei der halben Wellenlänge des sichtbaren Lichts, also bei 200 nm. Man könnte meinen, Hell hätte die Physik mit der Chemie ausgetrickst, denn er hat nicht nach besseren Linsen für die Mikroskope gesucht, sondern nach Molekülen mit passenden Eigenschaften für das AN- und AUS-Schalten von Fluoreszenz.

So wurde die STED-Methode, bei der Fluoreszenz an einer Sorte von Molekülen ein- und ausgeschaltet wird, zum Durchbruch in der supraauflösenden Mikro- und Nanoskopie. Die Fluoreszenz wird ganz normal mit Laserlicht geeigneter Wellenlänge eingeschaltet. Für das Ausschalten der Fluoreszenz durch stimulierte Emission, muss Laserlicht sehr hoher Intensität im Bereich von Gigawatt/cm² eingesetzt werden, denn jedes Molekül aus dem untersten Schwingungszustand des ersten elektronisch angeregten Zustands muss von einem Photon aus dem STED-Strahl „erwischt“ und in den elektronischen Grundzustand „gezwungen“ werden (Abb. 12) [15]. Beim RESOLFT-Konzept, das Hell zunächst an Z/E-(*cis-trans*-) Isomerenpaaren testen wollte, schreibt er [15]: „Ich nannte diesen Ansatz RESOLFT, ... ganz einfach deshalb, weil ich es nicht mehr „STED“ nennen konnte. Es findet dabei ja keine stimulierte Emission statt, also musste ich einen anderen Namen finden. Die Stärke des Ansatzes liegt nicht nur darin, dass man eine hohe Auflösung mit weniger intensivem Licht erreichen kann. Man kann auch günstigere Laserquellen einsetzen, CW-Laser („continuous wave“), und/oder man kann das Licht über ein großes Bildfeld verteilen, einfach weil man nicht so intensives Licht benötigt, um die Moleküle zu schalten.“

Tatsächlich werden in dem von uns entwickelten Modellexperiment (Abb. 12) „continuous waves“ aus LED-Lampen mit Intensitäten von weniger als einem Watt/cm² aus LED genutzt, um Fluoreszenz ein- und auszuschalten.

Nach dem gleichen Prinzip wie in Abb. 11, jedoch mit Feststoffproben aus Spiropyran in Polymer-Matrices, wird die Fluoreszenz an allen Stellen der Probe, die mit UV-Licht ($\lambda_1=365$ nm) bestrahlt werden, auf AN gestellt. An den gleichzeitig mit blauem Licht ($\lambda_2=450$ nm) bestrahlten Stellen wird die Fluoreszenz auf AUS geschaltet. Didaktisch prägnante Ergebnisse liefern Proben aus Spiropyran und Trichloressigsäure in einer Matrix aus Polymethylmethacrylat PMMA, die als

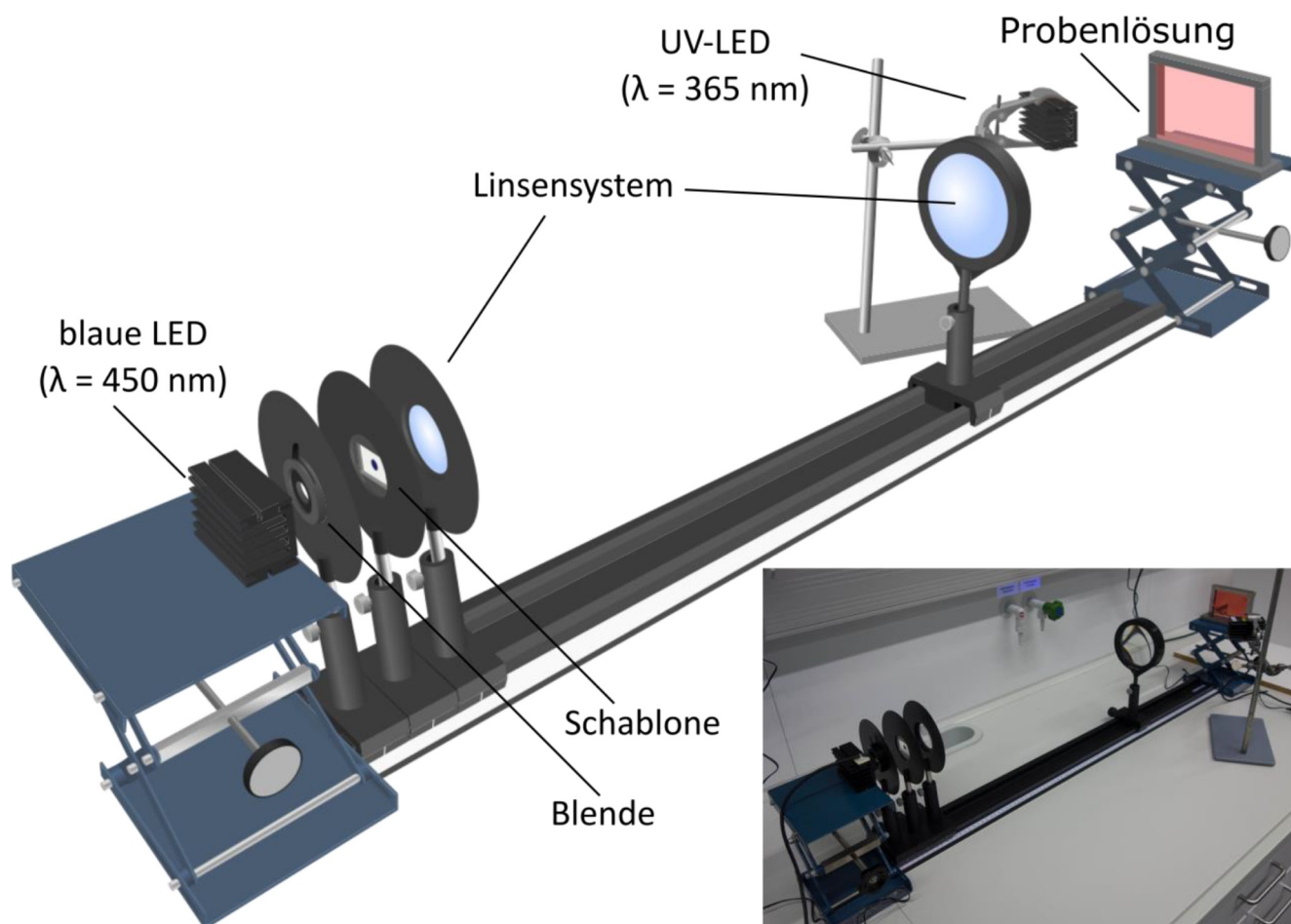


Abb. 12: Skizze und Foto des horizontalen Aufbaus zum RESOLFT-Modellexperiment mit Spiropyran/Merocyanin in verschiedenen Lösemiteln und Feststoffmatrices [12, 16]

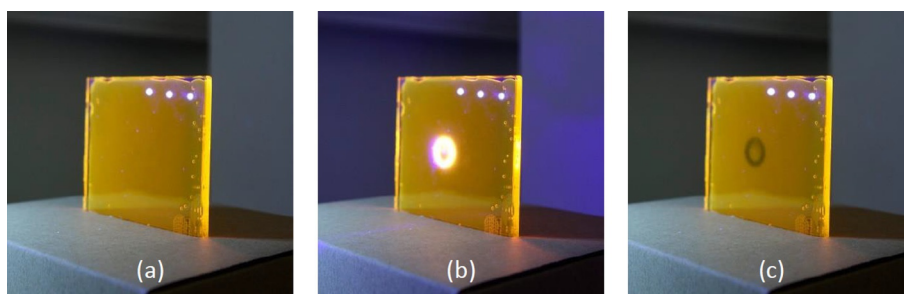


Abb. 13: RESOLFT-Modellexperiment mit Spiropyran in angesäuerter PMMA-Matrix. a) Anschalten mit UV-Licht ($\lambda_1 = 365$ nm), b) Ausschalten der Doughnut-Zone mit blauem ($\lambda_2 = 450$ nm) oder mit grünem ($\lambda_3 = 530$ nm) Licht, c) gelöschte Fluoreszenz in der Doughnut-Zone [12]

dünner Film auf einen Objektträger oder auf eine größere Glasscheibe aufgetragen ist (Abb. 13).

Wie jedes *Modellexperiment* ist auch dieses von realen superauflösenden Mikroskopen nach dem STED- oder RESOLFT-Konzept weit entfernt. Gleichwohl wird sein *didaktisches Potenzial* durch die dargestellten Ergebnisse und die als digitale Assistenten dienenden *Modellanimationen* [17], aber auch durch die beiden oben wiedergegebenen Zitate aus *S. Hells* Nobelaufsatz belegt. Darüber hinaus haben molekulare Schalter im Kontext von digitaler Logik und künstlicher Intelligenz eine herausragende wissenschaftliche Bedeutung. Diesbezüglich „ist viel Luft nach oben“, sowohl bei der Entwicklung neuer „intelligenter“ Materialien als auch besserer Methoden und Geräte in der Wissenschaft und Technik. Nicht zuletzt könnten molekulare Schalter dank ihrer optischen Eigenschaften eine Rolle bei der Entwicklung von Quantencomputern spielen. Grund für diese Annahme ist, dass sich damit außer

den beiden Zuständen „ja“ und „nein“ auch abgestufte Zwischenzustände verwirklichen lassen.

7. Chemie mit Licht – Vision und Intention [18]

Nachhaltig, interdisziplinär, kohärent und experimentbasiert – das sind aktuelle Forderungen an den Unterricht im Fach Chemie und in den benachbarten MINT-Fächern. Unsere Vision ist, dass Sonnenlicht, der energetische Antrieb für das Leben auf der Erde, bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auch in der klimaneutralen Technik auf den vordersten Platz avancieren wird. Diese Prognose käme in Einklang mit den genannten Forderungen, wenn die Energieform Licht auch im naturwissenschaftlichen Unterricht einen höheren Stellenwert erhielte, als es derzeit der Fall ist. Die Chemie erfüllt dabei eine Schlüsselfunktion, weil sie die Phänomene bei der Wech-

selwirkung von Licht mit Stoffen auf der Ebene der kleinsten Teilchen in Stoffen mit den kleinsten Energiepackchen des Lichts, den Photonen, untersucht und beschreibt. Dazu stellen wir auf der Internetplattform <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/> als digitale Ergänzungen zum Lehrbuch [18] Lehr-/Lernmaterialien aus unserer curricularen Innovationsforschung zur Verfügung. Es sind Experimente, Lehrfilme, Videos, Modelle, Animationen, Unterrichtsbausteine und Arbeitsblätter [5, 8–12, 16–17, 19] sowie Workshops und Vorträge für die Fortbildung. Die Intention von „Chemie mit Licht“ ist, innovative Didaktik im Lehramtsstudium, im Referendariat und im Chemieunterricht anzuregen und zu unterstützen. Die Schülerinnen und Schüler sollen mit den Möglichkeiten innovativer Technologien unter Nutzung von Licht vertraut gemacht werden, um sie für Naturwissenschaften zu motivieren und für Berufe zu aktivieren, in denen sie diese Möglichkeiten weiter erforschen, Verfahren entwickeln und technisch umsetzen. Das „didaktische Multitalent“ Spiropyran ist dafür ein empfehlenswerter Protagonist.

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.

Literatur

- [1] Bergmann, E. D., Weizmann, A., Fischer, E. (1950). *J. Amer. Chem. Soc.* 72, 5009.
- [2] a) Tausch, M. W. (1996). Ungleiche Gleichgewichte, *CHEMKON* 3 (3), 123. b) Spinnen, S., Tausch, M. W. (2018). Chem4Digit – Chemie für digitale Logik, *CHEMKON* 25 (2), 69. c) Tausch, M. W., Meuter, N. (2015). Photonen und Moleküle – Experimente und Materialien für den Unterricht, *Chemie & Schule* 30(3), 5. d) Schwarzer, S., Rudnik, J., Parchmann, I. (2013). Chemische Schalter als potenzielle Lernschalter – Fachdidaktische Begleitung eines Sonderforschungsbereichs. *CHEMKON* 20(4), 175. e) Krees, S. (2012). Chemisches Gleichgewicht und photostationäres Gleichgewicht, *PdN-ChiS* 61 (2), 18.
- [3] Tausch, M. W., Meuter, N. (Hrsg.). *Photonen und Moleküle – Photolumineszenz und Photochromie*, Begleitheft zur gleichnamigen Interaktionsbox, Hedinger, Stuttgart, 2015.
- [4] Reichardt, C., Welton, T. (Hrsg.). *Solvents and Solvent Effects in Organic Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2010.
- [5] Spinnen, S., Tausch, M. W. et al. (2017). „Ein chemisches Chamäleon – Molekulare Umgebung und Solvatochromie“. <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/filme-videos/photochromie-solvatochromie-photostationaritaet/ein-chemisches-chamaeleon.html>, TV Beilstein.
- [6] Meuter, N., Spinnen, S., Yurdanur, Y., Tausch, M. W. (2017). Photonen und Moleküle, *CHEMKON* 24 (4), 265–271.
- [7] Mei, J., Hong, Y., Lam, J. W. Y., Qin, A., Tang, Y., Tang, B. Z. (2014). Aggregation-Induced Emission: The Whole Is More Brilliant than the Parts, *Adv. Mat.* 26/31, 5429–5479.
- [8] Tausch, M. W., Meuter, N. et al. (2017). <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/experimente/photochromie-solvatochromie-intelligente-folie/herstellung-einer-intelligenten-folie.html#c16819>, TV Beilstein.
- [9] Pereira Vaz, N., Tausch, M. W. et al. (2017). <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/filme-videos/photochromie-solvatochromie-photostationaritaet/an-und-aus-mit-licht.html>, TV Beilstein.
- [10] Yurdanur, Y., Tausch, M. W. et al. (2017). <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/filme-videos/photochromie-solvatochromie-photostationaritaet/ungleiche-gleichgewichte.html>, TV Beilstein.
- [11] Meuter, N., Tausch, M. W. (2019). https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiemitlicht/files/animations/html5/photosteady_state/index.html.
- [12] Spinnen, S. (2018). Dissertation, Wuppertal. <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/dissertationen.html>.
- [13] Krees, S. (2013). Bits und Bytes auf der Basis molekularer Schalter – Modellversuche zur optischen Datenspeicherung, *PdN-ChiS* 62 (8), 35–41.
- [14] Spinnen, S., Tausch, M. W. (2018). Chem4Digit, *CHEMKON* 25 (2), 69–73.
- [15] Hell, S. (2015). „Nanoskopie mit fokussiertem Licht (Nobel-Aufsatz)“ *Angew. Chem.* 127 (28), 8167.
- [16] Meuter, N. (2018). Dissertation, Wuppertal. <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/dissertationen.html>.
- [17] Spinnen, S., Meuter, N., Tausch, M. W. (2019). <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/qv-materialienpakete/kapitel-7/qv-716-logische-gatter-mit-spiropyranmerocyanin.html>.
- [18] Tausch, M. W. (2020). *Chemie mit Licht – Innovative Didaktik für Studium und Unterricht*, Lehrbuch, 284 Seiten, 209 Abbildungen in Farbe, Springer Verlag, Heidelberg.
- [19] Yurdanur, Y., Tausch, M. W. (2019). <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/qv-materialienpakete/experimentierkoffer-materialiensets/qv-34-materialienbox-photo-like.html>.

Eingegangen am 18. Februar 2020

Angenommen am 15. Januar 2017

Online veröffentlicht am 15. Mai 2020