

Kleiner Dreh mit großen Folgen

Die Azo-Gruppe als molekulares Schaltelement in funktionellen Farbstoffen

R. Krämer, M. W. Tausch

Azobenzol eignet sich als Musterbeispiel für die Erschließung molekularer Schalter auf der Basis von Z-E Isomerisierungen. Da für Azobenzol jedoch absolutes Verwendungsverbot in Schulexperimenten vorliegt, wurden ein Video und eine Flash-Animation für den Einsatz im Chemieunterricht entwickelt.

Stichwörter: Molekulare Schalter, Z-E-(cis-trans)-Isomerisierungen, Konfiguration, Konstitution, Konformation, funktionelle Farbstoffe, Basiskonzepte

1 Molekulare Schalter – von der Natur abgesehen

Wenn wir sehen, ist der Initialvorgang eine lichtgetriebene Z-E-Isomerisierung in einem Retinal-Rest unseres Auges. Die geometrische Konfiguration an einer Doppelbindung wird wie bei einem Kippschalter umgelegt. Es folgt eine Konformationsänderung im Rhodopsin-Molekül und danach Kaskade von chemischen Vorgängen, an deren Ende das Erregungspotenzial für den Sehnerv entsteht [1]. Anders als beim Retinal-Rest aus dem Rhodopsin gibt es auch Molekül-Reste und Moleküle, deren Konfiguration oder Konstitution sich viel Male reversibel hin- und herschalten lassen. Sie werden als *molekulare Schalter* bezeichnet. Die Schaltvorgänge können durch verschiedene externe Stimuli ausgelöst werden, beispielsweise durch Licht verschiedener Wellenlängen, Wärme, Säuren und Basen, Oxidations- und Reduktionsmittel.

Da bei einem molekularen Schalter aus ca. 100 Atomen die beiden Strukturen, zwischen denen er geschaltet werden kann, einem logischen „ja“ oder „nein“ bzw. einer „1“ oder „0“ entsprechen, kann er informationstechnologisch als physikalische Speichereinheit für 1 Bit angesehen werden. Wenn man berücksichtigt, dass auf den derzeitigen Festplatten die physikalische Einheit für 1 Bit aus einigen Zehntausend Atomen besteht, könnten molekulare Schalter in der Computerindustrie interessante Anwendungsmöglichkeiten anbahnen. Über die Datencodierung und –speicherung im Zusammenhang mit Schulexperimenten hat S. Krees in dieser Zeitschrift berichtet [2].

Wenn ein molekularer Schalter als Fragment in ein größeres Molekül oder in ein supramolekulares System eingebaut ist, kann der Schaltprozess aufgrund nachge-

ordneter Konformationsänderungen wie beim Rhodopsin zu tiefgreifenden Eigenschaftsänderungen führen. Es wurden bereits intelligente Materialien entwickelt, in denen Nanomaschinen mit *lichtgetriebenen molekularen Schaltern* faszinierende Anwendungsmöglichkeiten in der Synthesechemie und in der Medizin zugänglich machen [3–5]. Sie haben den einzigartigen Vorteil, dass sie sich ohne Zusatz von Chemikalien nur durch Licht verschiedener Wellenlängen hin- und herschalten lassen.

Derartige *photoaktive molekulare Schalter* sind im Prinzip *funktionelle Farbstoffe* und eignen sich auch für den Chemieunterricht. Damit können die Basiskonzepte Stoff-Teilchen, Struktur-Eigenschaft, Energie und chemisches Gleichgewicht an innovativen Beispielen aus Wissenschaft und Technik forschend-entwickelnd erschlossen und/oder angewendet und vertieft werden. Voraussetzung ist, dass es dazu auch experimentelle Zugänge gibt, die für die Schule geeignet sind. Das ist der Fall beim Isomerenpaar Spiropyran-Merocyanin, über das bereits vielfach berichtet wurde [6]. Es ist sicherheitstechnisch unbedenklich und ist auch Bestandteil des *Photo-Mol Koffers* (vgl. S. ). Nachteilig ist, dass die bei diesem Schalter ablaufende electrocyclische Ringöffnungs- und Ringschlussreaktion nicht zum Kanon der schulüblichen Reaktionstypen gehört.

2 Z-E-(cis-trans)-Isomerisierungen – auch in der Schule?

Prinzipiell eignen sich E-Z-Isomerenpaare sehr gut als molekularer Schalter. Bei Molekülen mit einer C=C, C=N- oder N=N-Doppelbindung kann der Schaltprozess durch Licht und/oder durch Wärme in die eine oder andere Richtung angetrieben werden. Entsprechend werden in der Forschung molekulare Schalter auf der Grundlage von E-Z-Isomerisierungen intensiv untersucht.

Da sich bei Z-E-Isomerisierungen „nur“ die geometrische Anordnung der Substituenten an einer Doppelbindung ändert,

sind sie als Reaktionstyp leicht verständlich, ebenso leicht, wie beispielsweise Additions- und Substitutionsreaktionen. Es bleibt allerdings offen, wie der Reaktionsweg verläuft: Werden zuerst zwei Einfachbindungen im Molekül getrennt und nach dem Tausch der Substituenten neu geknüpft, oder findet doch „irgendwie“ die Drehung des einen Molekülrests um die Achse der Doppelbindung statt? Im Unterricht wird immerhin vermittelt, dass solche Drehungen nicht möglich sind und dass dieses Merkmal der Doppelbindung die Ursache der E-Z-Isomerie überhaupt ist! Die Moleküle von E- und Z-Isomeren haben die gleiche *Konstitution*, unterscheiden sich aber durch ihre *Konfigurationen*. Die Isomere weisen folglich unterschiedliche Eigenschaften auf. Da an solchen Isomeren das *Basiskonzept (Molekül)Struktur-(Stoff)Eigenschaft* sehr anschaulich zum Ausdruck kommt und auch ein wesentlicher Unterschied zwischen Doppelbindungen und Einfachbindungen deutlich wird, ist die E-Z-Isomerie fester Bestandteil einiger Lehrpläne, beispielsweise des Kernlehrplans für Nordrhein-Westfalen (Inhaltsfeld 1, Qualifikationsphase in der gymnasialen Oberstufe).

Ein didaktisch sehr ergiebiges Beispiel, das früher bereits für den Einsatz im Schulunterricht ausgearbeitet und in Lehrwerke integriert wurde ist *Azobenzol* [7]. Bei Bestrahlung mit Licht auf dem Tageslichtprojektor isomerisiert E-Azobenzol zu Z-Azobenzol. Die Farbe des gebildeten Z-Azobenzols unterscheidet sich zwar nur geringfügig von der des E-Azobenzols, aber die Polaritäten der Moleküle unterscheiden sich beträchtlich (vgl. Abb. 4). Daher lassen sich die beiden Isomere sehr einfach mittels Dünnschichtchromatographie voneinander trennen und nachweisen. Durch Lichtbestrahlung oder durch Erwärmen kann Z-Azobenzol wieder zu E-Azobenzol zurückisomerisiert werden.

Leider hat die Bildungsbürokratie bereits vor einigen Jahren für Azobenzol ab-

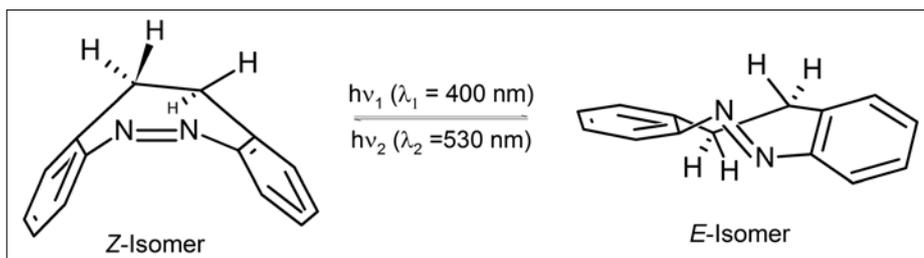


Abb. 1: Z- und E-Konfigurationen von Diazocin

solutes Schulverbot erlassen, ganz gleich, mit welchen Mengen und unter welchen Bedingungen gearbeitet wird. Als in einer Lehrprobe der Kandidat eine Lösung aus 2 mg Azobenzol in 2 mL Toluol den Schülern zum Auftragen mittels Kapillarröhrchen auf DC-Folien gab, unterbrach die Prüfungskommission die Unterrichtsstunde wegen akuter Gesundheitsgefährdung. Der Kandidat fiel durch und musste ein halbes Jahr später antreten - selbstverständlich ohne Versuche mit Azobenzol.

3 Z- und E-Diazocin

Über Diazocin als einen möglichen Ersatzstoff für Azobenzol haben wir kürzlich berichtet [8]. Wir stellen diesen molekularen Schalter aus zwei E-Z-Isomeren hier etwas ausführlicher vor. Diazocin (11,12-Dihydrodibenzo[c,g][1,2]diazocin, Abb. 1) wurde in der Literatur erstmals im Jahr 1910 [9] erwähnt, aber erst vor wenigen Jahren auf seine photochemischen Eigenschaften hin untersucht [3]. Diazocin liegt bei Raumtemperatur und bei Lichtausschluss, anders als es bei den meisten E-Z-Isomerenpaaren der Fall ist, in der thermodynamisch stabileren Z-, also cis-Konfiguration vor. Der Grund für die bessere Stabilität der Z-Konfiguration liegt am 8-gliedrigen Ring, der die Azogruppe enthält. In der E-Konfiguration weist dieser Ring eine höhere Spannung und damit geringere Stabilität auf als in der Z-Konfiguration. Durch Bestrahlung mit violettem Licht isomerisiert Z-Diazocin zu E-Diazocin, mit grünem Licht lässt sich der umgekehrte Schaltvorgang antreiben (Abb. 1).

Die beiden Isomere haben unterschiedliche Farben: Z-Diazocin ist sowohl als Feststoff als auch in organischen Lösungsmitteln gelb, E-Diazocin hingegen rot. Daher eignet sich dieses Isomerenpaar aus didaktischer Sicht sehr gut zum Einsatz im Schulunterricht. Der Schaltvorgang mit LED-Lampen erfolgt innerhalb weniger Sekunden in beide Richtungen und kann beliebig oft wiederholt werden. Das thermodynamisch weniger stabile E-Diazocin lagert sich auch ohne Lichtbestrahlung allmählich in das stabilere Z-Diazocin um. Dieser Vorgang verläuft bei Raumtemperatur allerdings langsam genug (die Halbwertszeit beträgt ca. 4 Stunden), um nicht nur die Farbe, sondern auch andere Eigenschaften des instabileren E-Isomers zu untersuchen. Durch NMR-Untersuchungen konnte über einen längeren Zeitraum und in vielen Schaltvorgängen keine Photodegradation des Stoffs festgestellt werden, was auch in der Literatur bestätigt wird [3]. Diazocin wurde nach Vorschrift [10] mit einigen Abänderungen synthetisiert:

Synthese von Diazocin: 500 mg (1,84 mmol) 2,2'-Dinitrodibenzyl in 200 mL Ethanol werden bis zum Rückfluss erhitzt. Dabei bildet sich eine hellgelbe Lösung. Durch Zugabe einer Lösung von 1,16 g $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ in 30 mL heißem Wasser wird das Reaktionsgemisch basisch eingestellt. Danach werden 1,96 g (30 mmol) Zink-Pulver zugefügt. Das Gemisch wird 24 h unter Rückfluss gerührt.

Zunächst entfärbt sich die Lösung, nimmt dann aber allmählich wieder eine gelbliche Farbe an. Das überschüssige Zink setzt sich fest am Kolbenrand ab.

Nach Abkühlen auf Raumtemperatur wird über Celite (Kieselgur) filtriert und das Lösungsmittel am Rotationsverdampfer entfernt. Der Rückstand wird erneut über Kieselgel in n-Pentan/Dichlormethan 1:1 filtriert und mittels Säulenchromatographie (Laufmittel: Cyclohexan/Dichlormethan 1:1) aufgetrennt. Da das Produkt Z-Diazocin in den ersten Fraktionen enthalten ist, wird das Rohgemisch vor der Säulenchromatographie 10 Minuten mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 400 \text{ nm}$ bestrahlt. Dabei entsteht E-Diazocin, dessen Moleküle weniger polar sind. Es wandert schneller mit dem Laufmittel und kann somit als erste Fraktion aufgefangen werden. Auf diese Weise wird die Trennleistung verbessert. Nach Umkristallisation der gereinigten Fraktionen in n-Pentan erhält man ausschließlich Z-Diazocin als gelbe Kristalle, die bei 105–106 °C schmelzen.

In einem repräsentativen Ansatz wurde nach dieser Vorschrift 85 mg (0,4 mmol) erhalten, was einer Ausbeute von 22 % entspricht

Im Gegensatz zu Azobenzol sind die Isomere von Diazocin anhand der Farbe gut unterscheidbar (Vgl. Abb. 2). Daher handelt es sich bei diesem Isomerenpaar um eine didaktisch prägnantes Beispiel, das die Thematik der E-Z-Isomerisierung im Unterricht unterstützen kann. Auch im Hinblick auf molekulare Schalter eignet sich Diazocin hervorragend für den Schulunterricht. Es erfüllt die Anforderungen an einen molekularen Schalter, beide Isomere weisen eine ausreichend hohe Stabilität auf, sodass weitere Untersuchungen durchgeführt werden können. Die Absorptionsbanden der beiden Isomere sind sehr unterschiedlich, sodass sie mit Licht unterschiedlicher Wellenlänge gezielt und mit sehr hoher Ausbeute ($Z \rightarrow E > 90\%$; $E \rightarrow Z \sim 100\%$) ineinander überführbar sind.

Substituierte Diazocin-Derivate werden in der aktuellen Forschung in der Arbeitsgruppe von Rainer Herges aus Kiel als schaltbare Molekular-Pinzetten synthetisiert [11].

Die Schülerinnen und Schüler könnten den Versuch Z-E- und E-Z-Isomerisierung innerhalb von 2 Minuten in einem geschlossenen Reagenzglas und mit Licht aus einer violetten und einer grünen LED durchführen und ihre Beobachtungen festhalten. Ein wichtiger Vorteil ist, dass kein UV-Licht wie bei vielen anderen E-Z-Isomerisierungen benötigt wird. Darüber hinaus ist diese Substanz nicht als gefährlich eingestuft, sodass kein Verwendungsverbot für den Schulunterricht vorliegt. Der Umgang mit Diazocin ist trotzdem

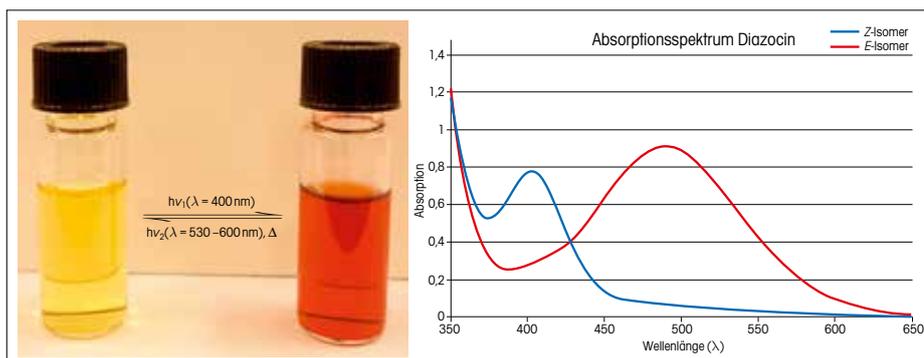


Abb. 2: Z-Diazocin (links) und E-Diazocin (rechts) in Ethylacetat; Absorptionsspektren

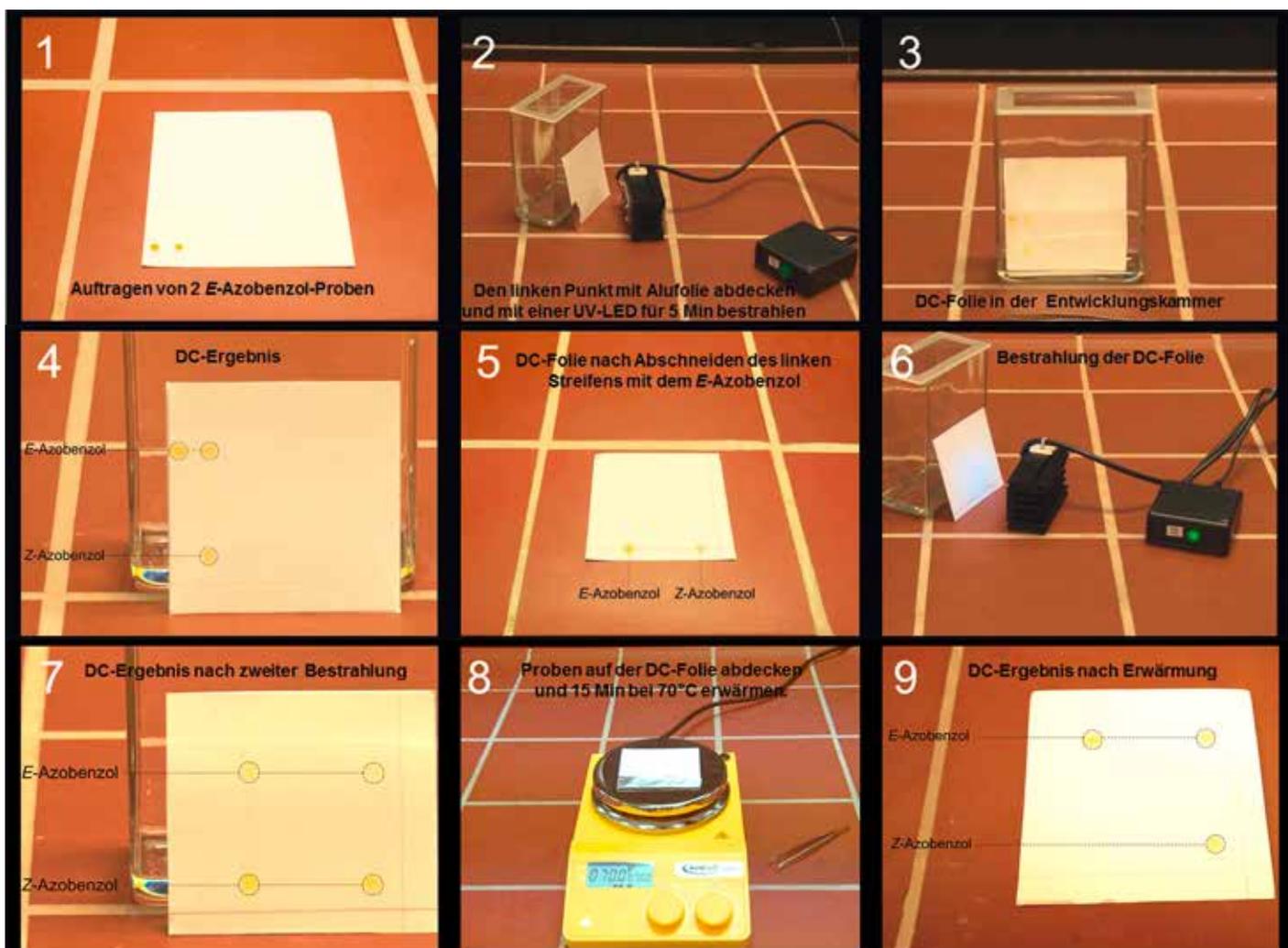


Abb. 3: Screenshots aus dem Video „Photoisomerisierung von Azobenzol“

nur unter Vorsichtsmaßnahmen möglich. Die sehr geringe Konzentration (5 mg in 10 mL Ethylacetat, $c = 0,05 \text{ mol/L}$) sowie die Möglichkeit, den Stoff in einem geschlossenen Gefäß aufzubewahren, garantiert dennoch einen sicheren Umgang für die Schülerinnen und Schüler.

Problematisch für die unterrichtliche Verwertung ist der im Vergleich zum Azobenzol-Molekül kompliziertere Aufbau des Diazocin-Moleküls (vgl. Abb. 1) sowie die Tatsache, dass *Z*-Diazocin thermodynamisch stabiler ist als *E*-Diazocin, was eine außergewöhnliche Ausnahme ist. In den allermeisten Fällen ist das *E*-Isomer stabiler als das *Z*-Isomer. Diazocin ist leider (noch) nicht käuflich zu erwerben. Es kann allerdings nach der oben angeführten Vorschrift beispielsweise im Rahmen von Facharbeiten synthetisiert werden. Experimentelle Details können bei René Krämer erfragt werden.

4 Azobenzol – ein Video als Rettung

Da ein experimenteller Zugang zu *E-Z*-Isomerisierungen im Schulunterricht auch mit Diazocin schwierig ist, wurde auch nach weiteren Alternativen gesucht, aller-

dings ohne Erfolg. Bei Stilben-Derivaten, die eine C=C Doppelbindung enthalten, finden bei Lichtbestrahlung außer *E-Z*-Isomerisierungen auch (2+2)-Cycloadditionen, Aromatisierungen zu Phenanthren und andere Nebenreaktionen statt, sodass sie nicht als molekulare Schalter geeignet sind. Für den Unterricht zugelassene, in der Regel wasserlösliche Azo-Verbindungen sind ebenfalls ungeeignet, weil polare Gruppen in den Molekülen eines der Isomere (*E* oder *Z*) so stark stabilisieren, dass eine Isomerisierung gar nicht durchführbar ist.

In dieser Situation ist es vertretbar, das reale Experiment mit Azobenzol durch ein Video zu ersetzen.

Video:

Im Folgenden werden Ausschnitte des Videos beschrieben, das chronologisch die Experimente rund um die photochemische und thermische Isomerisierung von Azobenzol behandelt (vgl. Abb. 3). Im Video wird für das Experiment Toluol als Lösungsmittel sowie als Laufmittel verwendet, da Toluol in der DC-Kammer die beste Trennleistung erzielt. Es wird mit kleinen

Konzentrationen ($c = 5 \cdot 10^{-2} \text{ mol/L}$) gearbeitet, sodass im Video auf Handschuhe verzichtet wird. Die Azobenzol-Lösung wird mithilfe einer Mikropipette auf einer $8 \cdot 8 \text{ cm}$ großen DC-Platte (Kieselgel auf Aluminium) links auf der Startlinie zwei Mal aufgetragen (Bild 1 in Abb. 3). Die Flecken sollten dabei einen Abstand von ca. 1 cm zueinander aufweisen. Der äußere Fleck wird mit Alufolie abgedeckt und der andere mit UV-Licht der Wellenlänge $\lambda = 365 \text{ nm}$ 5 Minuten lang bestrahlt (Bild 2, Abb. 3). Die Alufolie wird entfernt und die DC-Folie in eine vorbereitete DC-Kammer mit Toluol als Laufmittel zur Entwicklung gestellt (Bild 3, Abb. 3). Nach der Entwicklung kann festgestellt werden, dass die bestrahlte Probe einen zweiten Fleck aufweist, der eine kleinere Retentionszeit besitzt (Bild 4, Abb. 3). Als nächstes wird die DC-Folie für den zweiten Versuchsteil vorbereitet. Dazu muss die unbestrahlte Probe auf der DC-Folie aus Versuchsteil 1 abgeschnitten werden. Über die beiden aufgetrennten Flecken der bestrahlten Probe aus Versuchsteil 1 wird mit Bleistift eine neue Startlinie gezogen (Bild 5, Abb. 3). Um die photochemische

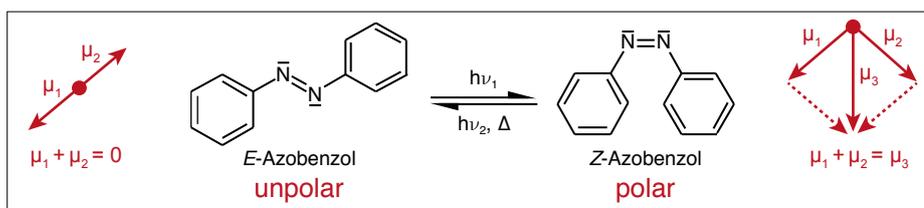


Abb. 4: Beim *E*-Azobenzol-Molekül heben sich die partiellen Dipolmomente μ_1 und μ_2 gegenseitig auf, beim *Z*-Azobenzol-Molekül addieren sie sich zum Dipolmoment μ_3

Rückisomerisierung zu überprüfen werden nun beide Flecken mit UV-Licht der Wellenlänge $\lambda = 365 \text{ nm}$ für 5 Minuten bestrahlt (Bild 6, Abb. 3). Anschließend wird in der DC-Kammer entwickelt. Das Ergebnis der DC zeigt, dass sich bei dem aus Versuchsteil 1 neu gebildeten Fleck durch die Bestrahlung wieder zwei Flecken gebildet haben, die dieselbe Auftrennung wie im ersten Versuchsteil zeigen. Bei der unbestrahlten Probe ist die gleiche Auftrennung zu erkennen. Beide weisen die gleiche Retentionszeit auf. (Bild 7, Abb. 3). Im dritten Versuchsteil wird die thermische Isomerisierung von Azobenzol überprüft. Dazu wird Versuchsteil 1 zunächst wiederholt, um *E*- und *Z*-Azobenzol aufzutrennen. Die frisch entwickelte und getrocknete DC-Folie wird mit Alufolie bedeckt und 15 Minuten bei ca. 70°C auf einer Heizplatte erwärmt (Bild 8, Abb. 3). Die Abdeckung der Proben ist wichtig, da normales Tageslicht ebenfalls zu einer Isomerisierung führen kann. Wie die anschließende Entwicklung in der DC-Kammer zeigt, trennt sich der Substanzfleck mit der kleineren Retentionszeit aus dem Versuchsteil 1 wieder in zwei Flecken auf, der andere Substanzfleck hingegen nicht (Bild 9, Abb. 3).

Auswertung:

Die Bestrahlung von *E*-Azobenzol mit UV-Licht ($\lambda = 365 \text{ nm}$) bewirkt eine Isomerisierung zu *Z*-Azobenzol. Da auch *Z*-Azobenzol UV-Strahlung absorbiert, isomerisiert dieses teilweise zu *E*-Azobenzol zurück. Durch lange Bestrahlung stellt sich daher ein photostationäres Gleichgewicht ein, in dem *E*- und *Z*-Azobenzol in einem bestimmten Verhältnis zueinander vorliegen. Wie bei einem thermodynamischen Gleichgewicht halten sich Hin- und Rückreaktion beim photostationären Gleichgewicht die Waage, die Anteile der Edukte und Produkte im Reaktionsgemisch sind zeitlich konstant.

Die Moleküle von *E*- und *Z*-Azobenzol unterscheiden sich in ihrer Polarität (Abb. 4). Daher kann ein Gemisch aus *E*- und *Z*-Azobenzol mittels Dünnschichtchromatographie an einem polaren Trägermaterial (Kieselgel) und mit einem unpolaren Laufmittel (Toluol) gut in die beiden Komponenten aufgetrennt werden.

Im Ergebnis von Versuch 1 ist zu erkennen, dass die bestrahlte *E*-Azobenzol-Probe nach der Entwicklung in der DC-Kammer zwei Flecken aufweist, einen mit der gleichen Retentionszeit wie die unbestrahlte *E*-Azobenzol-Lösung und einen mit einer deutlich kleineren Retentionszeit. Folglich ist bei der bestrahlten Probe ein neuer Stoff entstanden, dessen Moleküle polarer sind als die des Edukts. Dabei handelt es sich um *Z*-Azobenzol. Durch erneute Bestrahlung der beiden Flecken aus dem ersten Versuchsteil (Bild 5 in Abb. 3) wird im DC-Ergebnis des zweiten Versuchsteils deutlich, dass aus *E*-Azobenzol erneut *Z*-Azobenzol gebildet wurde, aber gleichzeitig auch *Z*-Azobenzol zu *E*-Azobenzol isomerisiert ist (Bild 7, Abb. 3). Die thermische Behandlung der beiden Isomere von der DC-Folie aus dem ersten Versuchsteil (Bild 5, Abb. 3) liefert das DC-Ergebnis aus Bild 9 in Abb. 3. Darin wird deutlich, dass *E*-Azobenzol thermisch nicht zu *Z*-Azobenzol isomerisiert, *Z*-Azobenzol dagegen durch das Erwärmen teilweise in *E*-Azobenzol umgewandelt wurde. *E*-Azobenzol (*trans*-Azobenzol) ist das thermodynamisch stabilere Isomer. Das hat zur Folge, dass durch Erwärmung einer Azobenzol-Lösung, die beide Isomere enthält, reines *E*-Azobenzol erhalten werden kann.

Mithilfe einer von uns erstellten Flash-Animation, die ebenso wie das Video von unserer Homepage [12] kostenfrei herunterladbar ist, können auch die Reaktionswege (Reaktionsmechanismen) der thermischen und photochemischen *E*-*Z*-Isomerisierungen am Beispiel von Azobenzol erschlossen werden. Essentiell ist dabei, dass die thermische Reaktion ausschließlich im elektronischen Grundzustand verläuft, während der photochemische Reaktionsweg grundsätzlich den elektronisch angeregten Zustand, das „Herz aller Photoprozesse“ beinhaltet. ■

Dank

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG wird für die Förderung des Forschungsvorhabens **Photo-LeNa** (Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften) gedankt. Herrn Prof. Dr. **Rainer Herges**, Kiel,

wird für die Ratschläge zur die Synthese von Diazocin gedankt.

Literatur

- [1] M. W. Tausch, A. Grolmuss, M. Woock: „Vom Lichtquant zum Sehreiz“, PdN-Physik 47 (5), 26 (1998)
- [2] S. Krees: „Bits und Bytes auf der Basis molekularer Schalter“, PdN-ChiS 62 (8), 35 (2013)
- [3] R. Siewertsen, H. Neumann, B. Buchheim-Stehn, R. Herges, C. Näther, F. Renth, F. Temps: „Highly Efficient Reversible Z-E Photoisomerization of a Bridged Azobenzene with Visible Light through Resolved $s_1(\pi\pi^*)$ Absorption Bands“, J. Amer. Chem. Soc. 131, 15594 (2009)
- [4] R. S. Stoll, S. Hecht: „Artificial Light-Gated Catalyst Systems“, Angew. Chem.-Int. Ed., 49 (30), 5054 (2010)
- [5] J. Bauer, L. Hou, J. C. M. Kistemaker, B. Feringa: „Tuning the Rotation Rate of Light-Driven Molecular Motors“, J. Org. Chem. 79 (10), 4446 (2014)
- [6] a) M. W. Tausch: „Ungleiche Gleichgewichte“, Chemkon, 3 (3) 123, (1996); b) M. W. Tausch, M. v. Wachtendonk, C. Bohrmann-Linde, S. Krees (Hrsg.), Chemie 2000+, Lehrwerk für die S II, C.C. Buchner, Bamberg 2007;
- [7] a) M. W. Tausch: „Photochemische cis-trans Isomerisierungen“, MNU, 40, 92 (1987); b) M. W. Tausch, M. v. Wachtendonk (Hrsg.), Stoff Formel Umwelt II, Lehrwerk für die S II, C.C. Buchner, Bamberg 1990
- [8] M. Heffen, R. Krämer, N. Meuter, M. W. Tausch: „Passendes Licht – harmlose Stoffe“, PdN-ChiS, 64 (2), 45 (2015)
- [9] H. Duval: „Benzidination“, Bulletin de la Societe Chimique de France, 7, 727 (1910)
- [10] T. Tellkamp: „Synthese neuer Photoschalter zur Funktionalisierung von Trazatriangulenen auf Goldoberflächen“, Dissertation Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2014
- [11] H. Sell, C. Näther, R. Herges: „Amino-substituted diazocines as pincer-type photochromic switches“, Beilstein J. Org. Chem., 9, 1–7 (2013)
- [12] www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de vgl. unter „Flash-Animationen“ bzw. „Experimente & Videos“

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr. Michael W. Tausch, René Krämer
Bergische Universität Wuppertal
FB C – L13.01/08
Gaußstr. 20, 42119-Wuppertal
mtausch@uni-wuppertal.de
rkraemer@uni-wuppertal.de