

Vom Lichtquant zum Sehreiz

Ein Beitrag zur Chemie des Sehens

M. Tausch, M. Woock und A. Grolmuss

„Das Licht ist die Quelle jeglicher Kraft, die Leben schafft und Thätigkeit; der zeugende Saame alles Guten, was die Erde trägt ... im Menschen kehrt es doch zu sich zurück, und feyert selbst mit allen Farben seines Daseyns ewiges Fest.“

J. W. Ritter im Intelligenzblatt
der Erlanger Literatur-Zeitung, 1801

1 Einleitung

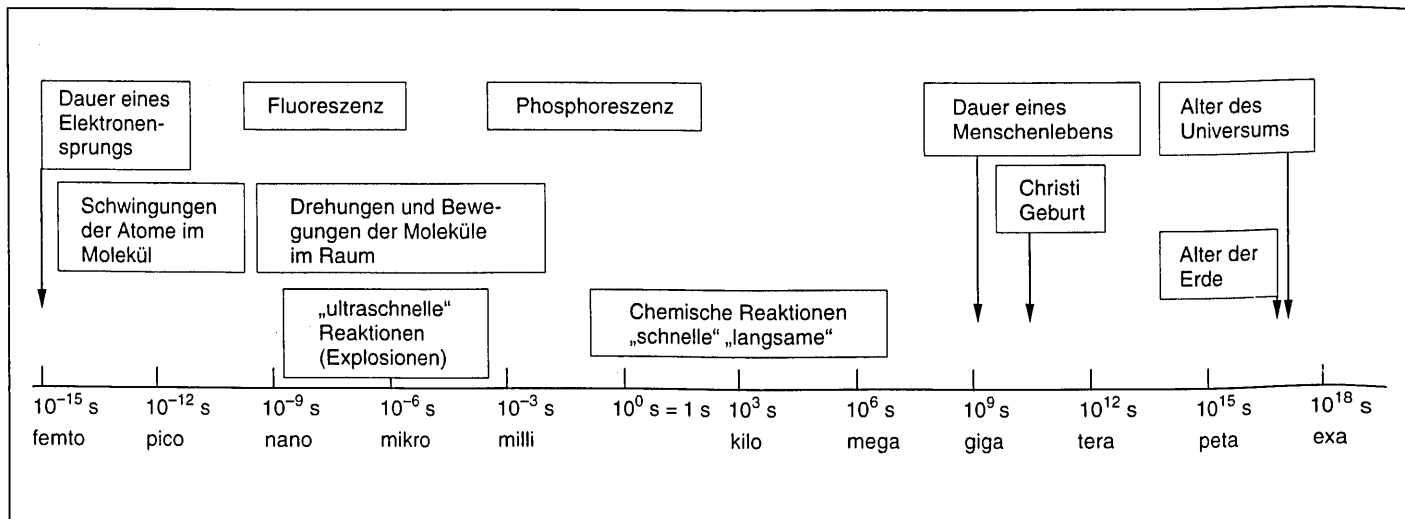
Die Bedeutung des Lichts für das irdische Leben ist seit jeher bekannt. Wenn hier der Physikochemiker *Johann Wilhelm Ritter* zitiert wird, dann nicht nur seiner romantisch-schwärmerischen, heute nicht mehr üblichen Ausdrucksweise wegen, sondern auch, weil er der erste war, der experimentell nachwies, daß es Licht auch jenseits unseres Sehvermögens gibt: *Ritter* ist der Entdecker der UV-Strahlen. In diesem Beitrag geht es um den zweiten Teil aus *Ritters* Aussage, um „die Rückkehr des Lichts zu sich zurück“ im menschlichen Auge. Allerdings darf nicht zu viel versprochen werden, denn die vollständige Aufschlüsselung aller Gehirntätigkeiten, die zu dem beitragen, was wir „sehen“ nennen, kennt noch niemand. Was man jedoch heute relativ gut kennt, ist der erste Abschnitt beim Sehprozeß, der *chemische* Weg vom Lichtquant, der auf die Netzhaut fällt, bis zum elektrischen Aktionspotential, das der Sehnerv übernimmt und ins Gehirn leitet. Die Darstellungen dieses Vorgangs in Teilschritten sind in Chemie-

und Biologiebüchern teilweise falsch, besonders was die im 4. Teil dieses Aufsatzes beschriebene „Sehkaskade“ betrifft. Die Chemie des Sehens beginnt aber *weit* vor der Sehkaskade, nämlich mit der Absorption eines Lichtquants durch ein Molekül. Warum hier als „weit“ bezeichnet wird, was in den uns zugänglichen Dimensionen weder räumlich noch zeitlich merkbar auseinander liegt, wird im 2. und 3. Teil des Aufsatzes erläutert. Die im 5. Teil beschriebenen Versuche tragen zur experimentellen Veranschaulichung einiger Schlüsselvorgänge beim Sehprozeß bei und können mit einfachen Schulmitteln durchgeführt werden. Zusammen mit den Hinweisen und dem Arbeitsblatt im letzten Teil des Aufsatzes sollen die Versuche bei der didaktisch-methodischen Gestaltung des Themas Sehen in den drei naturwissenschaftlichen Fächern oder in einem fächerübergreifenden Projekt behilflich sein.

2 Das Licht – ein Antrieb für molekulare Metamorphosen

Ein Lichtquant geeigneter Energie kann von einem Molekül vollständig absorbiert werden. Das Molekül erfährt dabei eine elektronische Anregung aus dem Grundzustand in den angeregten Zustand. Die Dauer des Elektronenübergangs beträgt ca. 10^{-15} s. Darüber, wie kurz diese Zeitspanne ist, kann man sich mit Hilfe von Abb. 1 eine Vorstellung machen, wenn man jeweils Vorgänge aus dem zeitlichen Mikro- und Makrokosmos miteinander vergleicht.

Abb. 1: Zeitskala mit Vergleich einiger Phänomene aus dem „zeitlichen Mikrokosmos“ und aus dem „zeitlichen Makrokosmos“



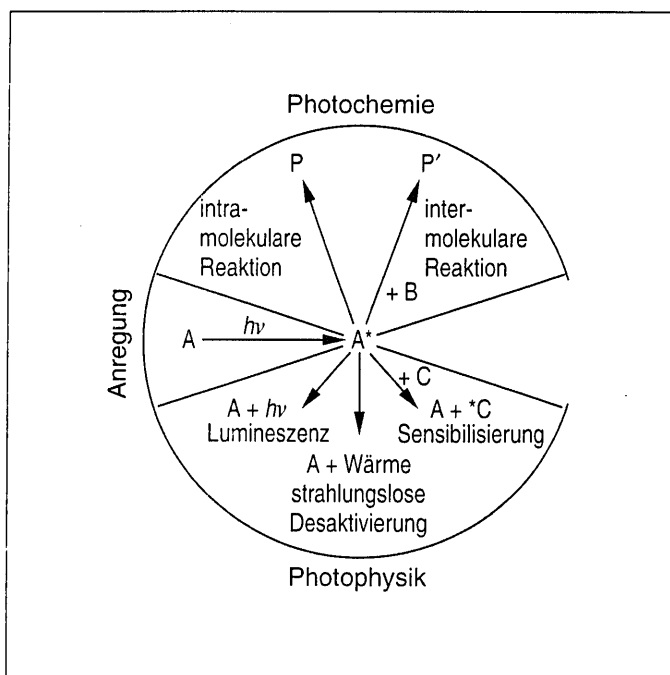


Abb. 2: Lichtabsorption durch ein Molekül A und Desaktivierungsmöglichkeiten für das elektronisch angeregte Molekül *A.

Auf die quantenmechanischen „Erhaltungsregeln“ bei Elektronenübergängen in Molekülen wird hier nicht eingegangen, dazu wird auf die Literatur verwiesen [1], [2]. Es ist im Sinne der Titelfrage aber von Interesse zu wissen, was mit einem elektronisch angeregten Molekül weiter geschieht. Die durch den Lichtquant dem Molekül übertragene Energie ist vergleichsweise (z. B. zur Energie, die beim Erwärmen übertragen wird) enorm hoch: würde jedes Teilchen einer Stoffportion kurzfristig diesen Energiebetrag zugeführt bekommen und ihn in Wärme umsetzen, dann müßte die Stoffportion eine Temperatur von einigen zigtausend Kelvin erreichen (etwa das 7fache der Temperatur, die an der Sonnenoberfläche herrscht)!

Bei solchen Temperaturen gibt es keine Moleküle, die Materie befindet sich im Plasmazustand. Es ist daher sehr naheliegend, das angeregte Molekül, das ja nun doch trotz des enormen Energiegehalts als Atomverband bestehen bleibt, als eine neue chemische Spezies anzusehen, als ein *Elektronenisomer* des Moleküls im Grundzustand. In ihm sind nicht nur die geometrischen Verhältnisse (Bindungslängen, Bindungswinkel) zwischen den Atomen andere als im Grundzustand, auch stoffliche Eigenschaften wie Säurestärke und Redoxpotential können sich dramatisch verändern [1], [3]. Moleküle im angeregten Zustand können auch andere chemische Wege gehen als ihre Elektronenisomere im Grundzustand, d. h. sie können zu anderen Produkten führen. Um einen bestimmten Reaktionspfad zu beschreiten, haben sie aber sehr wenig Zeit, in der Regel weniger als 10^{-8} s (Reaktionen aus dem Singulett-Zustand), nur selten bis zu 10^{-1} s (Reaktionen über den Triplett-Zustand). In Konkurrenz zur Bildung eines neuen chemischen Produkts stehen noch andere Desaktivierungsmöglichkeiten (vgl. Abb. 2). Ein Teil davon kann der Physik zugeordnet werden, weil nach der Desaktivierung von *A (ganz gleich, ob durch Ausstrahlung von Licht, durch thermische Energiedissipation oder durch Energietransfer an andere Teilchen C) am Ende wieder A vorliegt, also in summa keine Chemie stattgefunden hat.

Unter den Desaktivierungsmöglichkeiten, bei denen Chemie abläuft, sind intramolekulare Reaktionen gegenüber intermolekularen in der Regel bevorzugt, weil die Umorganisation im angeregten Molekül selbst stattfindet, ein Stoß mit einem anderen Molekül also nicht notwendig ist. Als Ergebnis dieser Umorganisation entsteht schließlich ein neues Molekül im Grundzustand, das aus den gleichen Atomen besteht, wie das Ausgangsmolekül, in dem die Atome aber entweder anders miteinander verknüpft sind (andere Topologie) oder sich zumindest in ihrer geometrischen Anordnung vom Ausgangssystem unterscheiden (also gleiche Topologie aber andere Geometrie). Im ersten Fall stellt das Produkt ein Konstitutionsisomer zum Edukt dar, im zweiten Fall ein Konfigurationsisomer. Die chemische Primärreaktion beim Sehprozeß ist eine Isomerisierung, bei der „nur“ die Konfiguration an einem „kleinen“ Molekülteil (an 2 Atomen eines Moleküls, das aus über 5000 Atomen besteht) geändert wird. Es handelt sich um eine cis-trans Isomerisierung des Chromophors 11-cis-Retinal im integralen Membranprotein Rhodopsin aus den intrazellulären Disks der Stäbchen- und Zapfen(zellen) von der Netzhaut der Augen. In den folgenden zwei Abschnitten wird das Durcheinander, das der Hagel von biologischen und chemischen Fachbegriffen im voranstehenden Satz möglicherweise angerichtet hat, etwas entwirrt.

3 Der Initialzündler – eine cis-trans Isomerisierung

Wenn zwei Atome über eine Doppelbindung, d. h. 2 Elektronenpaare, miteinander verbunden sind, dann ist eine Drehung um die Achse, die sie verbindet, nicht möglich. Die Folge ist das Phänomen der cis-trans Isomerie, d. h. das Auftreten verschiedener Verbindungen, deren Moleküle sich nur durch die diesseits- bzw. jenseits-Stellung von Substituenten, d. h. Atomen oder Atomgruppen, an der Doppelbindung unterscheiden. Im Beispiel aus Abb. 3a ziehen die Chlor-Atome die Bindungselektronen stärker an als die Wasserstoff-Atome. Aufgrund der entgegengesetzten Anordnung im trans-Isomer heben sich die beiden durch die Chlor-Atome verursachten Partialmomente auf und insgesamt ergibt sich für das Molekül das Dipolmoment gleich Null. Beim cis-Isomer addieren sich die Partialmomente zu einem von Null verschiedenen Dipolmoment für das Molekül. In einer Stoffportion aus flüssigem cis-1,2-Dichlorethen ist demzufolge der Zusammenhalt zwischen den polaren Molekülen größer als in einer Stoffportion aus trans-1,2-Dichlorethen (unpolare Moleküle). Entsprechend siedet das cis-Isomer bei einer höheren Temperatur (Abb. 3a). Chemisch unterscheiden sich so einfache Moleküle wie die isomeren Dichlorethene aus Abb. 3a kaum. Es gibt aber cis-trans Isomerenpaare, wie z. B. cis- und trans-Butendisäure (Trivialnamen: Maleinsäure bzw. Fumarsäure; Halbstrukturformel: HOOC-CH=CH-COOH), bei denen auch die chemischen Eigenschaften deutlich voneinander abweichen [4]. Ganz dramatisch werden die Unterschiede aber bei biochemisch relevanten cis- und trans-Isomeren. Ungesättigte Fettsäuren aus Ölen, in der Werbung als „leicht abbaubar“ gepriesen, haben cis-Konfiguration und werden in der Tat leichter metabolisiert als die entsprechenden gesättigten Fettsäuren. Trans-ungesättigte Fettsäuren werden dagegen nicht verdaut, sondern in Fett-

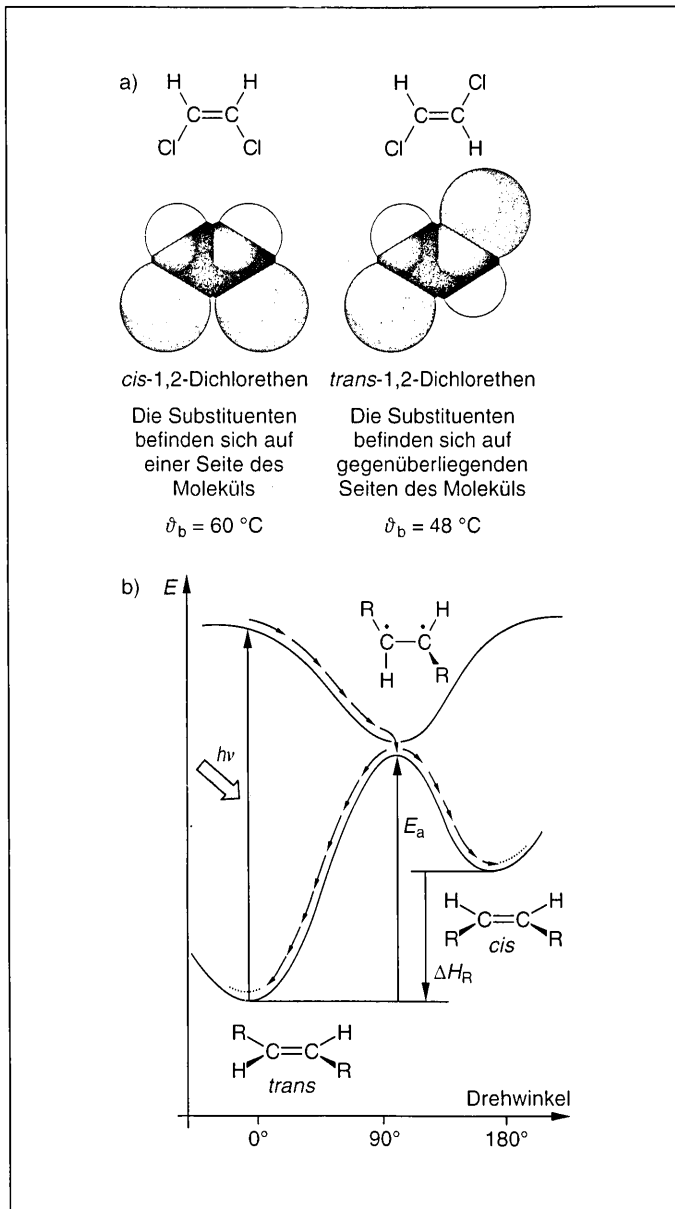


Abb. 3: Beispiel eines einfachen cis-trans Isomerenpaares (a) und Verlauf einer photochemischen Isomerisierung von trans nach cis (b) – vgl. auch Text

geweben deponiert und können z. B. zu Herz-Kreislauferkrankungen führen. Bei biochemischen Reaktionen muß also die räumliche Architektur der Moleküle genau stimmen, sonst bleiben die Enzyme, die diese Reaktionen katalysieren, inaktiv. Bevor in Teil 4 genauer auf die molekulare Architektur der Lichtantenne beim Sehprozeß eingegangen wird, soll in aller Kürze der Reaktionspfad einer cis-trans (oder trans-cis) Isomerisierung erläutert werden (Abb. 3b). In der Abszisse ist der Drehwinkel zwischen den Ebenen dargestellt, in denen sich jeweils die drei Atome aus der linken und rechten Molekülhälfte befinden (vgl. auch Abb. 3a), in der Ordinate die Energie des Gesamtsystems. Durch Absorption eines Lichtquants geeigneter Energie wird das Ausgangsmolekül (hier das trans-Isomer) in den elektronisch angeregten Zustand angehoben. Das Energieminimum des angeregten Zustandes ist (im Gegensatz zum Grundzustand) bei der geometrischen Konfiguration der Atome gegeben, bei der die beiden o. g. Ebenen senkrecht zueinander stehen. Im angeregten Zu-

stand drehen sich die beiden Molekülhälften um 90° gegeneinander, d. h. das System wandert ins Energietal. Dort angelangt, fällt es durch den Boden des Energietals wie durch einen Trichter in den Grundzustand (vgl. gestrichelte Pfeile in Abb. 3b). Hierüber landet es auf einem Energiemaximum, von wo es nunmehr auf der Energiekurve des Grundzustandes in eines der beiden angrenzenden Energieminima wandert. Diese entsprechen geometrischen Konfigurationen, bei denen der Drehwinkel 0° oder 180° beträgt, entsprechend der ebenen Anordnung der Atome im cis- oder im trans-Isomer. Verläuft die Drehung um 90° weiter (in die gleiche Richtung wie sie bereits im angeregten Zustand verlaufen war), so wird die cis-Konfiguration erreicht. Wollte man diese trans-cis-Isomerisierung ohne Licht bewirken, so müßte die Aktivierungsenergie E_A in Form von Wärme zugeführt, also die Probe müßte stark erhitzt werden. Dabei aber werden in der Regel andere Bindungen im Molekül aufgetrennt und man erhält Zeretzungsprodukte des Ausgangsstoffes. Bei der beschriebenen trans-cis-Isomerisierung zeigt sich also. a) daß mit Licht auch Reaktionen angetrieben werden können, die durch Wärmezufuhr gar nicht möglich sind und b) daß ein photochemisch erzeugtes Produkt ein chemischer Energiespeicher sein kann (vgl. den Betrag ΔH_R in Abb. 3b).

Der chemische Teil des Sehvorgangs beginnt mit einer cis-trans-Isomerisierung in einer der ca. 100 Millionen Stäbchen(zellen) oder in einer der ca. 3 Millionen Zapfen(zellen) von der Netzhaut (Retina) des Auges. Diese Zellen erfüllen gewissermaßen eine Photometer-Funktion, d. h. sie transformieren Lichtsignale in elektrische Signale, die über den Sehnerv von der Retina gesammelt und zum Gehirn geleitet werden. Die spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen und Zapfen ist differenziert: Die Lichtrezeptoren in Stäbchen mit $\lambda_{\max} = 496 \text{ nm}$ sind für das Sehen in der Dämmerung verantwortlich; sie können keine Farben unterscheiden. Sie reagieren auf extrem schwache Lichtreize und benötigen bis zum Aufbau des elektrischen Signals einige Zehntelsekunden. Die Zapfen dagegen sind mit drei Arten von Lichtrezeptoren ausgestattet, und zwar Blaurezeptoren ($\lambda_{\max} = 419 \text{ nm}$), Grünrezeptoren ($\lambda_{\max} = 531 \text{ nm}$) und Rotrezeptoren ($\lambda_{\max} = 559 \text{ nm}$). Sie benötigen relativ hohe Lichtintensitäten, antworten dafür aber innerhalb von Millisekunden mit einem Aktionspotential. Die Erregungskaskade, d. h. die biochemische Reaktionsfolge vom absorbierten Lichtquant bis zum Erregungspotential ist in Zapfen und Stäbchen im wesentlichen die gleiche; daher wird sie hier ausschließlich am Beispiel einer Stäbchenzelle diskutiert.

4 Die Sehkaskade – ein biochemisches Meisterwerk

Als spezialisierte Nervenzelle ist eine Stäbchenzelle (vgl. Abb. 4a) funktionell in mehrere Aufgabenbereiche kompartimentiert: Während die Routineaufgaben (ATP-Synthese, Ionenpumpe u. a.) im sog. Innensegment des Stäbchens wahrgenommen werden, erfüllt das Außensegment die Lichtantennen-Funktion. Es enthält 1000 bis 2000 eng übereinander gepackte intrazelluläre Disks, „wächst“ ständig vom Cilium aus nach oben und „stirbt“ im oberen Be-

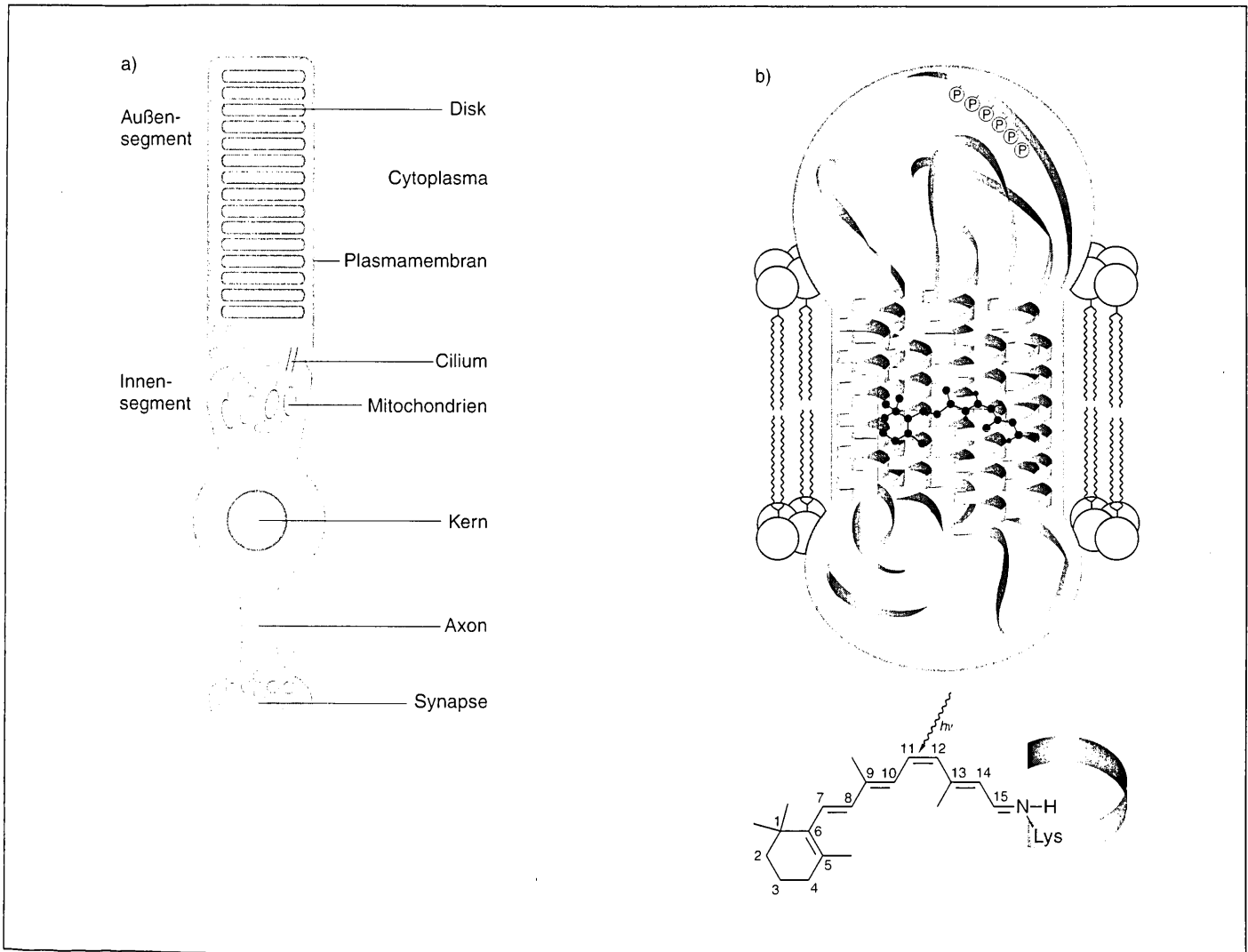


Abb. 4: Stäbchenzelle mit intrazellulären Disks (a) und Disk-Membran mit Rhodopsin (b)

reich ab. Die molekularen Bestandteile der Disks werden in den Mitochondrien im Bereich des Ciliums synthetisiert. Die Lipid-Doppelschicht der Disk-Membran enthält das Sehpigment Rhodopsin (Abb. 4b). Außerdem enthält die Plasmamembran Ionenkanäle, die im Dunkeln zu einem großen Teil offen sind und als Antwort auf ein Lichtsignal geschlossen werden. Dadurch wird der Einstrom von Na^+ -Ionen ins Zellinnere gebremst und die auch ansonsten negative Polarisierung des Zellinneren (-40 mV) wird auf ca. -80 mV erhöht. Diese Hyperpolarisation ist das eigentliche Aktionspotential, das vom Außensegment des Stäbchens über das Innensegment und das kurze Axon bis zur Synapse weiterläuft, wo das Signal mittels Neurotransmitter an die nächste Nervenzellen-Schicht übertragen wird. Das Rhodopsin der Disk-Membran ist ein membrandurchdringendes (integrales) Chromoprotein, d. h. ein Riesemolekül aus einem Eiweiß-Teil (Opsin) und einem lichtabsorbierenden Teil (Retinal). Die 348 Aminosäure-Bausteine des Opsins bilden sieben, die Lipidschicht durchdringende α -Helixabschnitte; die verbindenden Schleifen oberhalb und unterhalb der Lipid-Doppelschicht sind konformationell beweglicher und spielen in der Erregerkaskade eine wichtige Rolle (vgl. weiter). Im Zentrum des hydrophoben Bündels ist eine 11-cis Retinal-Einheit (Vitamin-A-Aldehyd) an einen Lysin-Baustein des Opsins gebunden.

Wie wird nun das Erregungspotential (das Aktionspotential) aufgebaut?

Zuerst wird durch die Absorption eines Lichtquants die cis-trans Isomerisierung des 11-cis Retinals zu all-trans Retinal ausgelöst. Das bewirkt konformationelle Änderungen im gesamten Rhodopsin-Molekül was zur Folge hat, daß im cytoplasmatischen Raum (Abb. 4a) gewisse Proteine, sog. G-Proteine, an die Disk-Membran andocken können.

Als Second Messenger für das Lichtsignal in Sehstäbchen galten früher Ca^{2+} -Ionen, weil sie in relativ hoher Konzentration in den Disks enthalten sind. Zwischen den Jahren 1970 und 1980 konnte jedoch sichergestellt werden, daß ein G-Protein, das *Transducin*, die molekulare Spezies darstellt, die unmittelbar auf die Lichtaktivierung des Rhodopsins in Aktion tritt [5], [6], [7]. An der Außenseite der Diskmembran, dort wo ein Rhodopsin-Molekül wegen der gerade erfolgten cis-trans Isomerisierung seines Retinal-Bausteins die Konformation geändert hat, dockt zunächst ein Transducin-Molekül an, um kurz darauf in zwei Teile zu zerfallen. Einer dieser Teile ist aktiv für den nächsten Schritt in der Erregerkaskade. Da diese Vorgänge nur wenige Millisekunden beanspruchen, bewirkt die cis-trans Isomerisierung in einem Rhodopsin-Molekül die Aktivierung von ca. 100 Transducin-Molekülen (erste Verstärkung

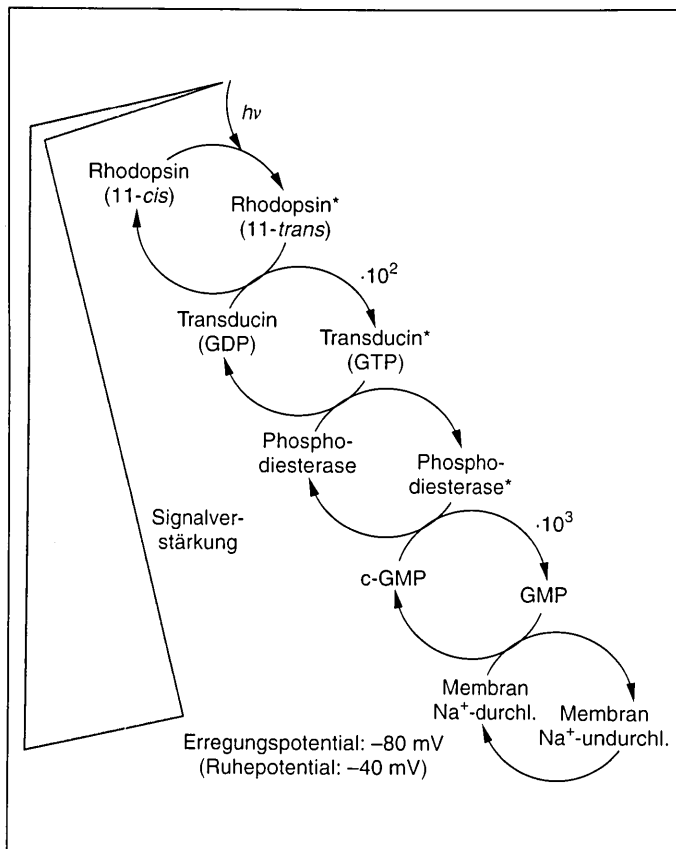


Abb. 5: Reaktionszyklen in der Erregungskaskade

des Lichtsignals). Eines der beiden Fragmente, in die ein Transducin-Molekül zerfallen ist, aktiviert nun seinerseits ein Molekül des Enzyms Phosphodiesterase PDE. Die PDE wiederum katalysiert die Ringöffnung des cyclischen Guanosinmonophosphats cGMP zu 5'-GMP. Bei der PDE-Aktivierung findet keine Signalverstärkung statt, dafür kann aber jedes aktivierte PDE-Molekül bis zu 1000 cGMP-Moleküle öffnen (die energieliefernden Prozesse für die endergonische Signalverstärkung sind im wesentlichen Abbaureaktionen der zellulären „Energiewährung“ Adenosintriphosphat ATP). Während die cGMP-Moleküle an den Ionenkanälen der Zellmembran haften und dafür sorgen, daß diese offen sind, diffundiert das gebildete 5'-GMP in die Zelle und bewirkt die Schließung der Ionenkanäle. Das Einströmen von Na⁺-Ionen wird dadurch verhindert und die Folge ist der Aufbau des Aktionspotentials, das in Bezug auf die Energie des absorbierten Photons einen Verstärkungsfaktor von ca. 10^5 beinhaltet (Abb. 5).

Die neuronale Verarbeitung der in den Stäbchen bzw. Zapfen photochemisch induzierten Aktionspotentiale von den Gangliazellen hinter der Retina über die seitlichen Kniehöcker bis zum visuellen Cortex in der hinteren Großhirnrinde ist nur teilweise aufgeklärt und bildet das Objekt neurophysiologisch ausgerichteter Werke [8], [9].

5 Sehen – ein Thema, viele Fächer

Zu den Pflichtinhalten der Fächer Biologie und Physik zählen traditionell bereits in der Sekundarstufe I eine

Reihe von Fragen rund um das Sehen, beispielsweise die Anatomie des Auges bzw. die Funktionsweise der Linse. Die in diesem Beitrag erörterten chemischen Aspekte beim Sehprozeß können in der Sekundarstufe II in jedem der drei naturwissenschaftlichen Schulfächer eingesetzt werden, zwar je nach Fach mit unterschiedlicher Gewichtung, aber auf jeden Fall fächerverbindend zu den beiden anderen Naturwissenschaften. Das auf S. 33 abgedruckte Arbeitsblatt stellt unverkennbar die chemische Sichtweise des Sehens in den Vordergrund, könnte aber als Modell für ähnliche Arbeitsblätter mit biologischen oder physikalischen Schwerpunkten dienen. Das Thema Sehen eignet sich auch gut für ein interdisziplinäres Projekt, weil Sehen neben Wahrnehmen auch Erkennen, Verstehen, Empfinden, Verhalten und Bewerten einleitet. Gruppenweise könnten naturwissenschaftliche, erkenntnispsychologische und ästhetische Fragen in Verbindung mit dem Sehen erarbeitet, die Ergebnisse den anderen Gruppen präsentiert und mit ihnen diskutiert werden.

Literatur

- [1] H. G. O. Becker: Einführung in die Photochemie, Deutscher Verl. der Wiss., Berlin 1991
- [2] M. W. Tausch, D. Paterkiewicz: Fluoreszenz und Phosphoreszenz, PdN-Chemie, 37 (1), 14 (1988)
- [3] W.-D. Stohrer: Konzeptionelle Grundlagen der Photochemie, PdN-Chemie, 40, Heft 4, 15 (1991)
- [4] (a) M. Tausch, M. von Wachtendonk, H. Deissenberger, H.-R. Porth, R. G. Weißenhorn: Chemie S II Stoff-Formel-Umwelt, C. C. Buchner-Verlag, Bamberg 1997; (b) M. Tausch: Photochemische cis-trans Isomerisierungen, MNU, 40, 92, (1987)
- [5] L. Stryer: Die Erregungskaskade, Spektrum d Wiss., 86, 9/1987
- [6] H. Kühn: Aus Forschung und Medizin 3, 63, 2/1988
- [7] W. P. Horspool, *Pill-Soon Song*: (ed) Handbook of Photochemistry and Photobiology, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida 1995, Chapter 26–29
- [8] J. E. Dowling: The Retina, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, London, 1987
- [9] P. Churchland: Die Seelenmaschine, Spektrum Akad. Verl., Heidelberg 1997
- [10] J. Paust et al.: Oxidation von Phosphor-Yliden mit Hydroperoxiden: Ein neuer und ergiebiger Weg zu symmetrischen Carotinoiden, Liebigs Ann. d. Chemie, 1146 (1977)
- [11] M. Wock: Extraktion, Synthese und Chromatographischer Nachweis von Lebensmittelfarbstoffen, Examensarbeit, Universität Duisburg, 1997
- [12] W. Gärtner: Max-Planck-Institut für Strahlenchemie, Mülheim, pers. Mitteilung

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. M. Tausch, Universität Duisburg, FB 6, Didaktik der Chemie, MG 324, 47057 Duisburg

Kopiervorlage: Versuch 1 – Eine cis-trans Isomerisierung

Geräte und Chemikalien:

Kieselgelbeschichtete Dünnschichtfolien, Entwicklungskammer, Tageslichtprojektor, Heißluftfön, trans-Azobenzol $C_6H_5-N=N-C_6H_5$ X_n , Petrolether F^+ (40 °C bis 70 °C), Toluol X_n , F .

Durchführung, Beobachtungen, Erklärungen:

1) Auf eine mit Kieselgel beschichtete DC-Folie werden zwei Startflecke A und B einer konzentrierten trans-Azobenzol-Lösung in Petrolether aufgetragen (Abb. 6a) Der linke Streifen der DC-Folie wird mit Alu-Folie lichtdicht verpackt. Zwei auf diese Weise präparierte DC-Folien werden 30 min lang auf dem Tageslichtprojektor bestrahlt und nacheinander in einer abgedeckten DC-Kammer entwickelt. Der bestrahlte Fleck hat sich zweigeteilt (vgl. Abb. 6b). Das unpolare trans-Azobenzol ist mit dem ebenfalls unpolaren Fließmittel mitgelaufen, das polare cis-Azobenzol, das sich bei der Bestrahlung gebildet hat, bleibt in der Nähe des Startflecks.

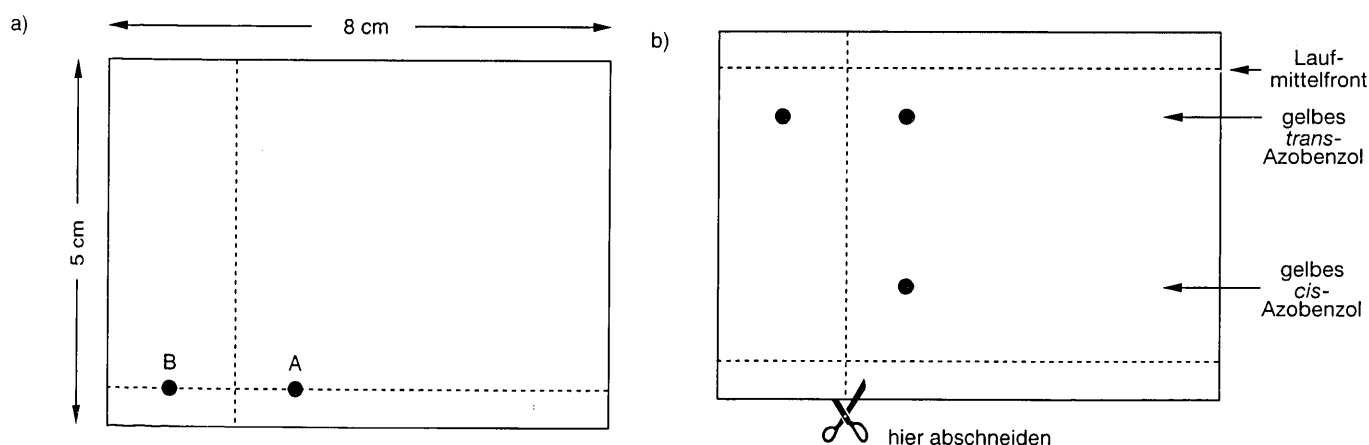


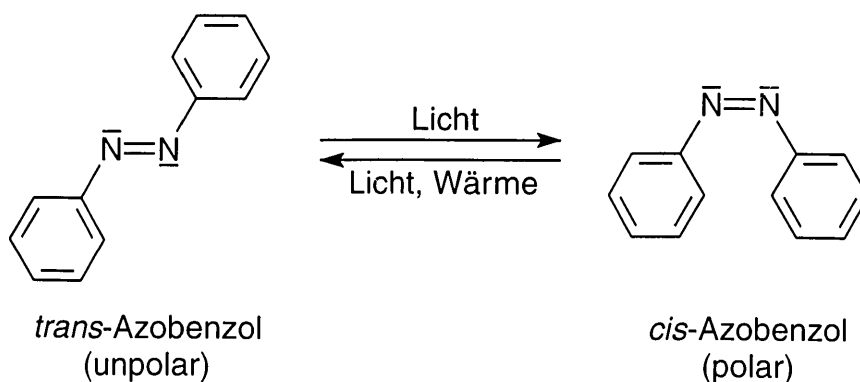
Abb. 6: Cis-trans Isomerisierungen von Azobenzolen auf DC-Folien (vgl. Erläuterungen im Text zu V1)

2) Von jeder der beiden DC-Folien wird nun der Streifen auf dem sich das unbestrahlte Azobenzol befindet, abgeschnitten (Abb. 6b).

- Eine der beiden Folien wird 15 min lang mit dem Heißluftfön erwärmt und anschließend so entwickelt, daß die beiden Flecke unten stehen. Man erhält ein 2-dimensionales Chromatogramm mit 3 Flecken. Diese beweisen, daß sich beim Erhitzen ein Teil des cis-Azobenzols in trans-Azobenzol umgelagert hat, während das trans-Azobenzol nicht isomerisiert ist.

- Die andere Folie wird 30 min lang wie unter 1) bestrahlt (jedoch ohne Abdeckung eines Teils der DC-Folie) und anschließend entwickelt. Hier ergibt sich ein 2-dimensionales Chromatogramm mit 4 Flecken. Beim Bestrahlen hat sowohl eine cis-trans, als auch eine trans-cis Isomerisierung stattgefunden.

Die Beobachtungen lassen sich im folgenden Reaktionsschema zusammenfassen:



Kopiervorlage: Versuch 2 – Eine lichtinitiierte Reaktionsfolge

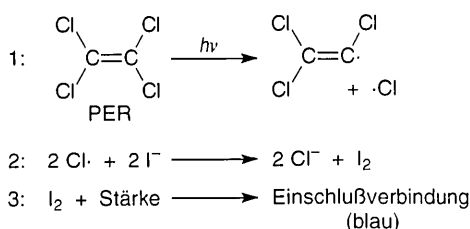
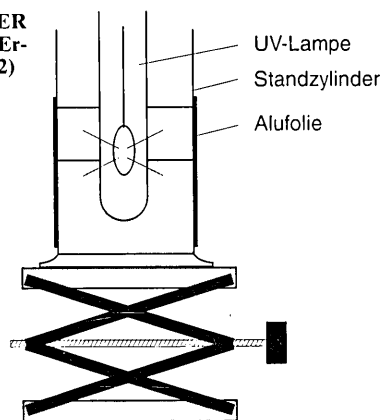
Geräte und Chemikalien:

UV-Lampe (150-W-Quecksilberhochdruckbrenner, wassergekühlt), UV-Schutz durch Abdecken mit Alu-Folie, Standzylinder, Stativmaterial, Alu-Folie, Kaliumiodid-Lösung, $c = 0,5 \text{ mol/l}$, Stärke-Lösung, Petroleumbenzin ($70 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $100 \text{ }^\circ\text{C}$) F, Perchlorethylen PER X_n .

Durchführung, Beobachtungen, Erklärung:

Im Standzylinder (vgl. Abb. 7) befinden sich 2 Schichten: die untere besteht aus ca. 100 ml Kaliumiodid-Lösung und einigen Tropfen Stärke-Lösung, die obere aus ca. 10 ml Petroleumbenzin und 0,5 ml PER. Die Lampe wird so eingetaucht, daß das Licht genau in die obere organische Schicht trifft. Es wird 3 bis 5 min lang unter Wasserkühlung der Lampe bestrahlt. Zwecks UV-Schutz wird der Zylinder in Alu-Folie eingewickelt. Nach Ausschalten der Lampe und Entfernen der Alu-Folie beobachtet man in der unteren Schicht, an der Phasengrenze beginnend, Blaufärbung, die in Schlieren nach unten fällt. Durch UV-Licht wurden PER-Moleküle gespalten. Die gebildeten Chlor-Radikale oxidieren an der Grenzschicht Iodid-Ionen zu Iod-Molekülen. Diese werden in Stärke-Moleküle eingelagert und geben eine blaue Einschlußverbindung. Einem photochemischen Start-Schritt folgen also zwei Dunkelreaktionen, die schließlich zum wahrnehmbaren Effekt (Blaufärbung) führen.

Abb. 7: Photolyse von PER und Folgereaktionen (vgl. Erläuterungen im Text zu V2)



Kopiervorlage: Versuch 3 – Eine konzentrationsbedingte Potentialdifferenz

Geräte und Chemikalien:

U-Rohr mit Fritte, 2 Kupferblechstreifen, Kabel, Krokodilklemmen, Millivoltmeter, gesättigte Kupfersulfat-Lösung X_n , dest. Wasser.

Durchführung, Beobachtungen, Erklärung:

In die beiden Schenkel des U-Rohres wird gesättigte Kupfersulfat-Lösung gefüllt, die Kupferelektroden werden eingetaucht und über die Klemmen und Kabel mit dem Millivoltmeter verbunden. Die Spannung ist gleich Null. Nun werden aus dem einen Schenkel mit der Pipette ca. 3/4 der Lösung entnommen, der verbliebene Rest wird mit dest. Wasser auf das ursprüngliche Volumen verdünnt. Man mißt jetzt eine deutlich von Null verschiedene Spannung, wobei die Elektrode in der verdünnteren Lösung den Minuspol bildet. Zur Erklärung und Auswertung vgl. Aufg. 3 auf dem Arbeitsblatt.

Kopiervorlage: Versuch 4 – Der Chromophor der Sehzellen und das β -Carotin

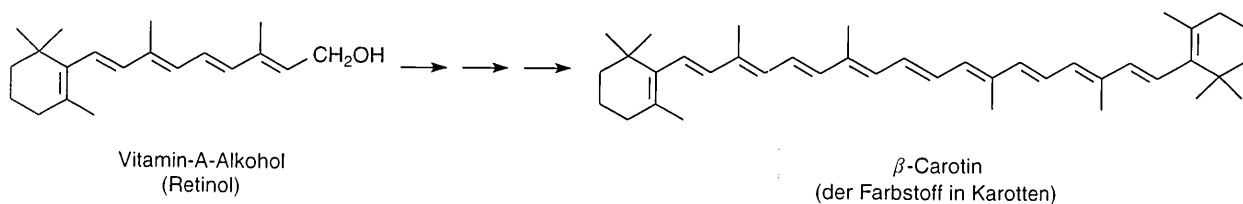
a) Synthese von β -Carotin aus Vitamin-A-Alkohol (Retinol)

Geräte und Chemikalien:

50 ml-Erlenmeyerkolben, Scheidetrichter, Pipetten, Vitamin-A-Alkohol (Retinol) Triphenylphosphin, X_n , 2-Propanol, F, Heptan F, konz. Schwefelsäure C, Wasserstoffperoxid-Lösung, C, O, Natronlauge, $c = 1 \text{ mol/l}$, C, ggf.: Alu-Folien, mit Kieselgel beschichtet, 1-Propanol F, 2,5%ige Natriumacetat-Lösung, Ethylacetat F.

Durchführung, Beobachtung, Erklärung:

0,5 g Vitamin-A-Aldehyd und 0,45 g Triphenylphosphin werden unter Rühren in 20 ml 2-Propanol im Erlenmeyerkolben gelöst. Es wird mit ca. 0,1 ml konz. Schwefelsäure angesäuert und ca. 20 min weiter gerührt. Anschließend werden 20 ml Heptan hinzugefügt, kurz gerührt und im Scheidetrichter mit 20 ml Wasser umgeschüttelt. Zur abgetrennten wäßrigen Phase werden ca. 3 ml Wasserstoffperoxid-Lösung, $w = 5 \%$, pipettiert, dann wird mit konz. Natronlauge alkalisch eingestellt. Es bildet sich ein orangefarbener Niederschlag aus β -Carotin, der abgesaugt und getrocknet werden kann [10], [11].



Dünnschichtchromatographisch (Alu-Folien, mit Kieselgel beschichtet, Laufmittel: 1-Propanol / 2,5%ige Natriumacetat-Lösung/Ethylacetat, 60/30/10) kann eine weitere Stütze dafür gebracht werden, daß das synthetisierte Produkt und der aus Karotten mit Heptan extrahierte Farbstoff die gleiche Verbindung darstellen, nämlich β -Carotin.

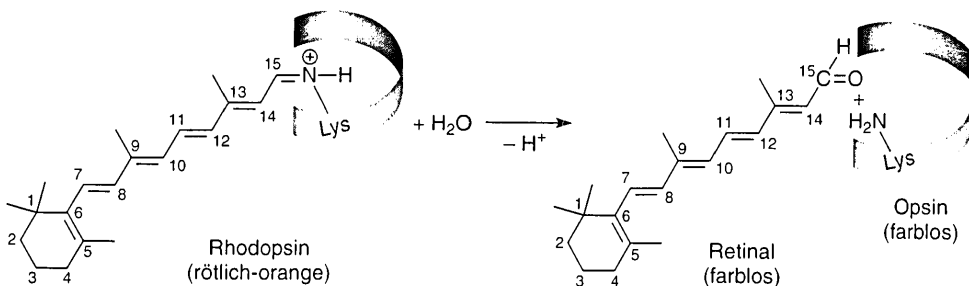
b) Präparation einer Retina und Bleichung des Rhodopsins

Geräte und Chemikalien:

Scharfes Schneidwerkzeug (Teppichmesser, Rasierklinge mit Halter o. ä.), Rinderaugen (im Schlachthof erhältlich), 50-ml Becherglas, 2-Propanol F, Heptan F.

Durchführung Beobachtung, Erklärung:

Vom Rindauge wird durch einen kreisförmigen Schnitt eine Kugelkappe etwa über dem vorderen Schwarzteil des Auges entfernt [12]. Dann wird das Auge umgestülpt, wobei der Glaskörper herausfällt. Der jetzt nach außen gewölbte Rückteil des Auges ist mit der dünnen, kaum sichtbaren Retina überzogen, die man mit einem Spatel abgeschabt und vom Sehnerv, in dem sie zusammenläuft und der sie festhält, abschneidet. Die zusammengeballte Retina erscheint jetzt rötlich-orange. Man gibt sie in ca. 10 ml Heptan in ein Becherglas und zerdrückt sie mit einem Glasstab. Dabei ändert sich ihre Farbe kaum. Gießt man nach einigen Minuten 10 ml 2-Propanol dazu und bearbeitet die Retina weiter mit dem Glasstab, so verliert sie ihre Farbe innerhalb einer Minute. Die Zugabe des Propanols bewirkt eine Faltung der Membran (vgl. Abb. 4b) und macht somit das Rhodopsin der Hydrolyse zugänglich. Das dabei gebildete Retinal (Vitamin-A-Aldehyd) ist ebenso wie das in Teil a) eingesetzte Retinol (Vitamin-A-Alkohol) farblos. Im folgenden Reaktionsschema ist das Retinal in seiner all-trans Form gezeichnet, wie es bei der primären Lichtreaktion im Auge gebildet wird:



Die Extraktion und der dünn-schichtchromatographische Vergleich des Retinals aus der Probe mit authentischem Retinal sowie die Reduktion des isolierten Retinals mit Natriumborhydrid zu Retinol, aus dem (nach der Vorschrift des Teils a) zu diesem Versuch) wiederum β -Carotin synthetisiert werden kann, wären weitere Experimentiermöglichkeiten, die allerdings größere Mengen von biologischem Ausgangsmaterial und einen höheren Zeitaufwand erfordern.

Arbeitsblatt

1.1 Zeichnen Sie in das nebenstehende Energiediagramm in Anlehnung an Abb. 3b aus dem Artikel die Formeln und den Reaktionsweg einer lichtangetriebenen cis-trans Isomerisierung ein.

Erläutern Sie den Reaktionsweg in Anlehnung an Teil 3 des Artikels.

1.2 Berichten Sie die folgende Aussage, indem Sie unzutreffende Begriffe im Kursivgedruckten streichen. Begründen Sie die Aussage mündlich mit Hilfe der Angaben im Energiediagramm und Ihrer Kenntnisse aus dem Physik- und Chemieunterricht:

Bei einer cis-trans Isomerisierung ist:

- a) die Wellenlänge λ der Lichtquanten *größer/kleiner* und
 b) ihre Energie E *größer/kleiner* als bei der entsprechenden trans-cis Isomerisierung.

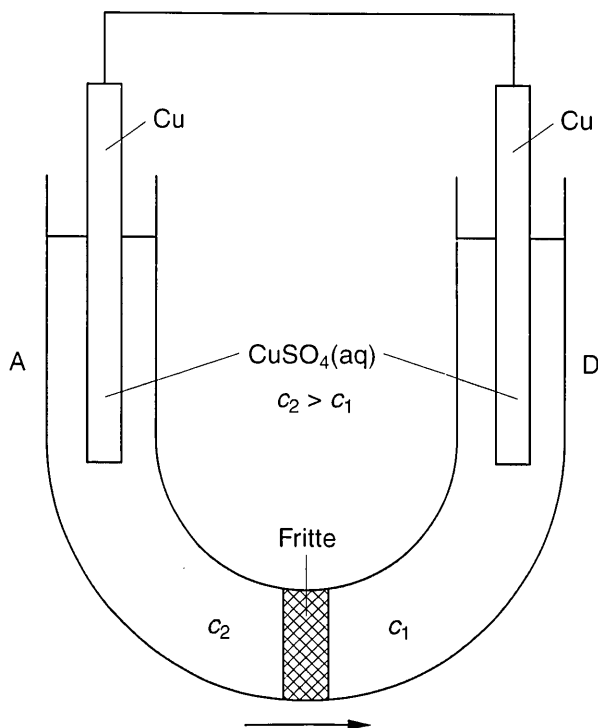
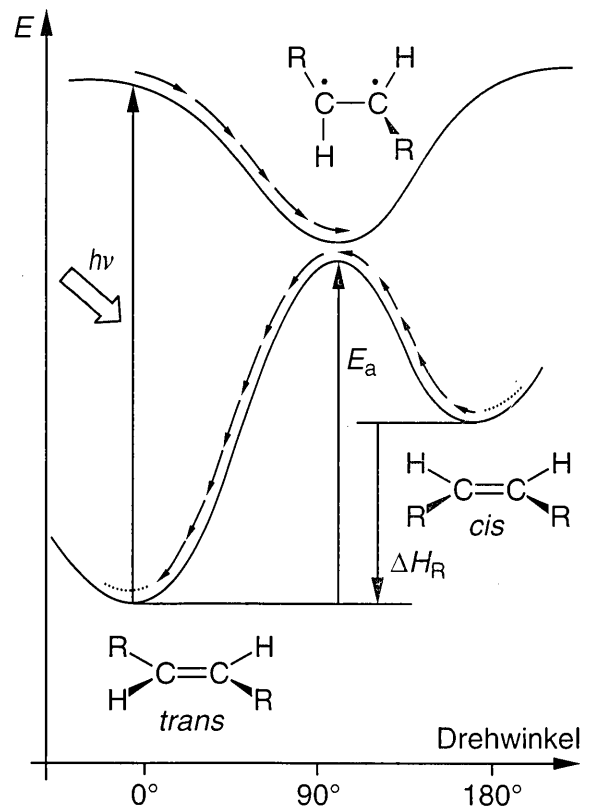
1.3 Welche unmittelbare Konsequenz hat die Änderung der geometrischen Anordnung im Molekül (d. h. die cis-trans Isomerisierung):

- a) bei den cis-trans Isomerisierungen von Azobenzolen in V1 und
 b) bei der cis-trans Isomerisierung des Retinals in der Stäbchenzelle?

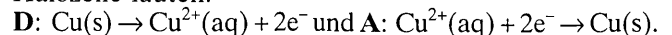
Erläutern Sie anhand der Versuchsergebnisse aus V1 und der Ausführungen in Teil 4 des Artikels bzw. Ihrer Kenntnisse aus dem Biologieunterricht.

2. Erläutern Sie, inwiefern die folgenden Aussagen zum Sehvorgang in den 4 Versuchen bewiesen oder nur (mehr oder weniger gut) veranschaulicht werden. Markieren Sie jede Aussage mit einem der folgenden Symbole: \Uparrow (bewiesen), \Rightarrow (veranschaulicht) oder \Downarrow (siehe keinen Zusammenhang zwischen dieser Aussage und den Versuchen).

- a) Cis-trans und trans-cis Isomerisierungen können mit Hilfe von Licht angetrieben werden.
 b) Der erste Schritt auf dem Weg „vom Lichtquant zum Sehreiz“ ist eine cis-trans Isomerisierung.
 c) Eine lichtangetriebene Reaktion kann eine Folge von mehreren Reaktionen auslösen, die kein Licht benötigen.
 d) Die lichtempfindliche Substanz in der Retina (Rhodopsin) enthält gebundenes Retinal (Vitamin-A-Aldehyd).
 e) Beim Aufbau des Aktionspotentials wird die Energie des absorbierten Photons um den Faktor 10^5 verstärkt.
 f) Es gibt einen engen Zusammenhang zwischen Lichtabsorption im Sichtbaren, Farbigkeit und Molekülstruktur.



3. Die in V3 beschriebene Konzentrationskette sei wie in nebenstehender Skizze kurzgeschlossen. Die Vorgänge in der Donator-Halbzelle und in der Akzeptor-Halbzelle lauten:



3.1 Ergänzen Sie die Skizze mit der Angabe des Pluspols, des Minuspols und der Stromrichtung im Kabel.

3.2 Tragen Sie auf den Pfeil unter der Fritte die Teilchensorte ein, die in der vorgegebenen Richtung durch die Fritte wandert. Begründen Sie.

3.3 Wie verändert sich die Differenz der Konzentrationen $c_2 - c_1$, wenn das System sich selbst überlassen wird?

3.4 Vergleichen Sie die Polarisation an der Fritte der Konzentrationskette mit der Polarisation an der Membran einer Stäbchenzelle, an der sich gerade ein Aktionspotential aufbaut, indem Sie zu folgenden Aspekten jeweils Gemeinsamkeiten und Unterschiede feststellen und erläutern:

- a) Existenz einer Polarisation aufgrund unterschiedlicher Konzentrationen von Ionen;
 b) Veränderung dieser Polarisation (Zunahme/Abnahme, exergonisch/endergonisch);
 c) Durchlässigkeit der Fritte bzw. Membran (selektiv/unselektiv, veränderlich/konstant).