Ausarbeitung
zum Experimentalvortrag

Die Chemie der Farbstoffe

im SS 2006
Leitung: Dr. P. Reiß

vorgelegt von:
Julia Böcher
Steinweg 4
35096 Weimar
e-mail: julia.boecher@gmx.de

Inhaltsverzeichnis

Thema	Seite
1. Einleitung	3
2. Klassifizierung	3
3. Theorie der Farbigkeit	5
4. Der Einsatz von Farbstoffen	9
4.1 Die Textilfärberei	10
4.2 Lebensmittelfarbstoffe	19
4.3 Funktionelle Farbstoffen	21
5. Schulische Relevanz	30
6. Literatur	31

1. Einleitung

Schon seit alters her verwendet der Mensch farbige Substanzen für die Gestaltung seiner Umwelt. In der Altsteinzeit wurden Farben anorganischen Ursprungs aus Mineralien wie Mennige, Zinnober und Malachit gewonnen, welche beispielsweise für die Höhlenmalerei dienten. Weiterhin standen organische Naturfarbstoffe aus Pflanzen und Tieren zur Verfügung, die hauptsächlich zum Färben von Textilien verwendet wurden. Beispielsweise isolierte man in späteren historischen Epochen Purpur aus der Purpurschnecke und das leuchtend rote Karmin aus der Conchenille-Laus.

Aufgrund der nur sehr begrenzten Mengen dieser Farben waren diese natürlich sehr kostbar und standen nur den höheren Gesellschaftsschichten zu. Erst Ende des 19. Jahrhunderts gelangen die ersten Synthesen künstlicher Farbstoffe. Ab da an begann eine stürmische Entwicklung immer neuer Farbstoffe, welche die natürlichen Farbstoffe vom Markt verdrängten, da die synthetischen Farbstoffe um ein vielfaches günstiger waren. Von nun an war Farbe kein Luxusprodukt mehr, da die Farben für jedermann bezahlbar geworden waren. Die Entwicklung neuer Farbstoffe führte zu einem rasanten Aufschwung der chemischen Industrie. So weisen die Namen einiger bekannter deutschen Chemiekonzerne wie Hoechst (früher Farbwerke Bayer und Farbwerke Hoechst) oder BASF (Badische Anilin- und Sodafabrik) auf die Zeit des industriellen Aufschwungs, der seinen Ursprung in der Entwicklung neuer Farbstoffe hatte, hin.

Für uns ist die Allgegenwärtigkeit farbiger Substanzen nichts besonderes mehr. Wir tragen farbige Textilien, essen gefärbte Lebensmittel und erfreuen uns am breiten Anwendungsspektrum synthetischer Farbstoffe[1].

In diesem Vortrag sollen nun die physikalisch-chemischen Grundlagen des Farbensehens und einige Aspekte der Anwendungsmöglichkeiten behandelt werden.

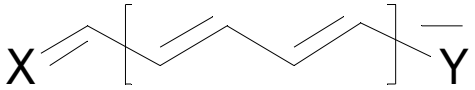
2. Klassifizierung

Es gibt eine Reihe farbiger Substanzen, jedoch zählt man nicht alle zu den Farbstoffen. Zunächst einmal kann man alle farbigen Substanzen unter dem Sammelbegriff Farbmittel zusammenfassen. Unter Farbmitteln versteht man solche Substanzen, die uns farbig erscheinen. Dieser Sinneseindruck hängt mit einer bestimmten Eigenschaft dieser Substanzen zusammen: Alle farbigen Substanzen absorbieren einen Teil des sichtbaren Lichts, also im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 800 nm. Nun unterscheidet man zunächst die anorganischen und die organischen Farbmittel. Die anorganischen Farbmittel sind Pigmente, hierbei handelt es sich um Moleküle, die in ihrem Anwendungsmedium nicht löslich sind.

1 Vgl.: H. Rampf, S. Schaumann-Eckel. Abiturhilfe Chemie. Organische Chemie Aufbauwissen. Band 681. Mentor. 2001 München

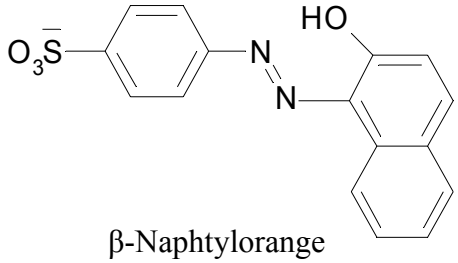
Zu den organischen Farbmitteln zählen die Farbstoffe und die organischen Pigmente. Farbstoffe sind demnach organische Moleküle. Des weiteren sind Farbstoffe in ihrem Anwendungsmedium löslich. Die organischen Pigmente sind hingegen, wie auch die anorganischen Pigmente, in ihrem Anwendungsmedium unlöslich.

Die Farbstoffe kann an nach vielerlei Kriterien weiter klassifizieren. Zunächst unterscheidet man zwischen natürlichen und synthetischen Farbstoffen. Weiterhin kann eine wissenschaftliche Klassifizierung nach Art des Farbträgers (Chromophor) vorgenomen werden: Der Chromophor der Polymethinfarbstoffe ist beispielsweise eine unverzweigte Kette konjugierter Doppelbindungen:



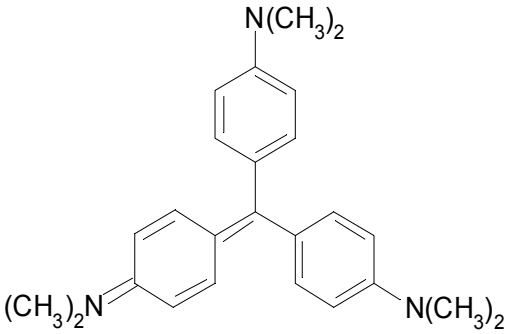
Polymethinfarbstoff

Des weiteren wären die Azofarbstoffe zu nennen, deren Chromophor eine Azo-Gruppe (zwei Stickstoff-Atome über eine Doppelbindung miteinander verknüpft) ist:

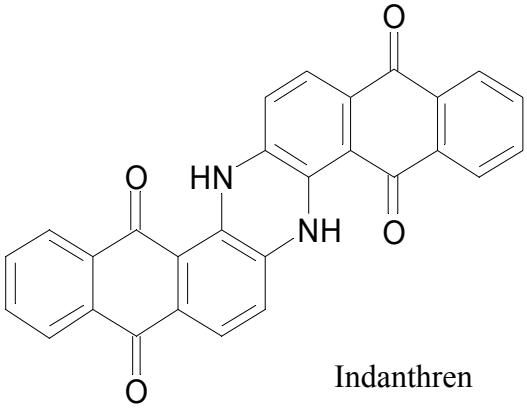


β-Naphtylorange

Zwei weitere Vertreter wären die Triphenylmethanfarbstoffe, deren Chromophor ein Kohlenstoffatom mit drei daran gebundenen Phenylresten darstellt, sowie die Anthrachinonfarbstoffe, deren Grundbaustein das Anthrachinon darstellt:



Kristallviolett



Indanthren

3. Die Theorie der Farbigkeit

Wie schon erwähnt besitzen alle farbigen Substanzen eine gemeinsame Eigenschaft, die erst dazu führt, dass der Sinneseindruck Farbe beim Betrachter entsteht: Sie absorbieren einen Teil des Spektrums des sichtbaren Lichts. Demnach ist Farbigkeit das Resultat aus der Wechselwirkung von Licht und Materie. Um diese Wechselwirkung verstehen zu können muss zunächst geklärt werden was Licht ist:

Licht ist ein Teil der elektromagnetischen Strahlung, der vom menschlichen Auge wahrgenommen wird. Die elektromagnetische Strahlung bewegt sich wellenförmig fort. Das sichtbare Licht bewegt sich dabei in einem Wellenlängenbereich von 400 bis 800 nm. Zu dieser Erkenntnis gelangte man mittels einer Reihe physikalischer Experimente. Jedoch wurde durch weitere physikalische Experimente eine weitere Eigenschaft des Lichts deutlich: Licht besitzt weiterhin einen Teilchencharakter. Dies bedeutet Licht ist ein Teilchenstrom der sich wellenförmig fortbewegt. Dieser Wellen-Teilchen-Dualismus wurde durch die Quantenphysik aufgeklärt.

Die Lichtteilchen (Photonen) bewegen sich immer gleich schnell mit der Lichtgeschwindigkeit *c*, lediglich in ihrer Energie und Wellenlänge unterscheiden sie sich.

Mittels der Wellenlänge des Lichts (λ) und dem Planckschen Wirkungsquntum *h* kann man die Energie des Lichts berechnen:

$$E = h \cdot \nu \qquad \text{mit } \nu = c/\lambda$$

$$E = h \cdot c/\lambda$$

Aus dieser Gleichung wird ersichtlich, dass die Energie des Lichts größer wird, je kleiner die Wellenlänge ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der, dass sichtbares, weißes Licht sich aus den Spektralfarben zusammensetzt. Diesen Sachverhalt kann man mittels eines einfachen Versuches demonstrieren:

D1: Lichtbrechung

Geräte:

- Prisma
- Overhead-Projektor
- Leinwand

Durchführung:

Das Prisma wird auf dem Overhead-Projektor so positioniert, dass bei Einschalten des Geräts ein kleiner „Regenbogen“ auf der Leinwand erscheint.

Auswertung:

Beim Übergang des Lichts in ein anderes Medium wird das Licht aus seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt. Der Ablenkungs- oder Brechungswinkel hängt dabei von der Wellenlänge des Lichts ab: Je kleiner die Wellenlänge des Lichts ist, desto größer wird der Brechungswinkel. Dies hängt mit der Wahrscheinlichkeit zusammen, dass kleinere Wellenlängen natürlich häufiger auf Moleküle des anderen Mediums treffen und dadurch aus ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt werden.

Somit wird deutlich, dass violettes Licht energetisch höher einzuordnen ist als rotes Licht:

Farbton	**Wellenlänge**	**Energie pro Photon**
Violett	380 - 420 nm	3,26 - 2,95 eV
Blau	420 - 490 nm	2,95 - 2,53 eV
Grün	490 - 575 nm	2,53 - 2,16 eV
Gelb	575 - 585 nm	2,16 - 2,12 eV
Orange	585 - 650 nm	2,12 - 1,91 eV
Rot	650 - 750 nm	1,91 - 1,65 eV

Diese Eigenschaften des Lichts sind Grundlage für das Entstehen des Sinneseindrucks Farbe:

Trifft weißes Licht auf einen Körper, so kann ein Teil des Spektrums absorbiert werden. Der Rest des sichtbaren Lichts wird von dem Körper reflektiert oder durchgelassen (Transmision). Die Summe des Lichts, welches nicht absorbiert wurde, ist nun für uns sichtbar und erzeugt den Sinneseindruck Farbe. Die reflektierte Licht hat dabei immer die Komplementärfarbe zum absorbierten Licht. Ein blaues T-Shirt beispielsweise absorbiert oranges Licht und reflektiert den Rest des sichtbaren Lichts, wobei die Summe des reflektierten Lichts die Farbe blau besitzt- die Komplementärfarbe zu orange.

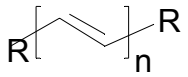
Farbe	**Komplementärfarbe**
Rot	Grün
Violett	Gelb
Blau	Orange

Ein weißer Körper hingegen reflektiert das gesamte Spektrum des sichtbaren Lichts und ein schwarzer Körper absorbiert das gesamte Spektrum des sichtbaren Lichts.

Warum absorbiert aber nun das blaue T-Shirt gelbes Licht, und was passiert im Farbstoff mit diesem Licht?

Wie schon erwähnt, besitzen die einzelnen Spektralfarben des Lichts Photonen unterschiedlicher

Energie. Die Energie dieser Lichtteilchen führt nun im Farbstoffmolekül zu einer Elektronenanregung. Das bedeutet Elektronen gehen aus dem höchsten besetzten Molekülorbital (HOMO = **H**ighest **O**ccupied **M**olecular **O**rbital) in das niedrigste unbesetzte Molekülorbital (LUMO = **L**owest **U**noccupied **M**olecular **O**rbital) über. Die Energie des Lichts muss dabei jedoch genau der Ergiedifferenz zwischen HOMO und LUMO entsprechen. Nun wird deutlich, dass die Energiedifferenz zwischen HOMO und LUMO in verschiedenfarbigen Farbstoffen unterschiedlich hoch sein muss. Diese Energieunterschiede, welche mit der Farbe des Farbstoffs korrelieren, hängen mit dem Molekülbau der Farbstoffe zusammen: Farbstoffe besitzen allesamt ausgedehnte konjugierte π-Systeme. Dabei handelt es sich um eine Überlappung mehrerer π-Orbitale. Dies kommt in den Farbstoffen durch eine abwechselnde Aneinanderreihung einfach gebundener und doppelt gebundener Kohlenstoffatome. Die Elektronen welche sich in den sp^2-Hybridorbitalen befinden (π- Elektronen), können sich in den p-Orbitalen frei bewegen, man spricht dann von delokalisierten Elektronen. Die einzelnen π-Elektronen können somit keinem Atomrumpf eindeutig zugeordnet werden. Da die Verteilung von Ladungsdichte zu mehr Stabilität im Molekül führt, ist es nicht verwunderlich, dass mit zunehmender Zahl konjugierter Doppelbindungen der Abstand zwischen HOMO und LUMO immer weiter abnimmt. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist die Reihe der Polymethinfarbstoffe: Polymethinmoleküle mit einer bis 9 Doppelbindungen sind farblos, dass bedeutet, dass diese Moleküle noch nicht im sichtbaren Bereich absorbieren, da die Energie dieser elektromagnetischen Strahlun noch nicht für eine Elektronenanregung von HOMO zu LUMO ausreicht. Ein Polymethinmolekül ab 10 Doppelbindungen hingegen absorbiert im sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung. Ein Molekül mit 10 Doppelbindungen ist gelb, ein Polymethinfarbstoff mit 12 Doppelbindungen ist orange und eines mit 14 Doppelbindungen ist rot.



n	**Farbe**	**Absobierte Farbe**
1-9	farblos	UV-Strahlung
10	gelb	violett
12	orange	blau
14	rot	grün

Die Energie des violetten Lichts ist am höchsten, darauf folgt das blaue und das grüne Licht. Somit wäre eine Korrelation zwischen der Länge des konjugierten Systems und der Energiedifferenz zwischen HOMO und LUMO deutlich gemacht.
Mittels eines einfachen Experiments kann man diesen Zusammenhang verdeutlichen: Bei der Aromatenprobe wird aus Aromaten ein konjugiertes System hergestellt, welches farbig ist.

V1: Aromatenprobe[2]

Geräte:

- Demoreagenzglas
- Reagenzglasständer
- Pipetten
- Spatel

Chemikalien:

- Toluol
- Aluminium(III)chlorid
- Trichlormethan

Durchführung:

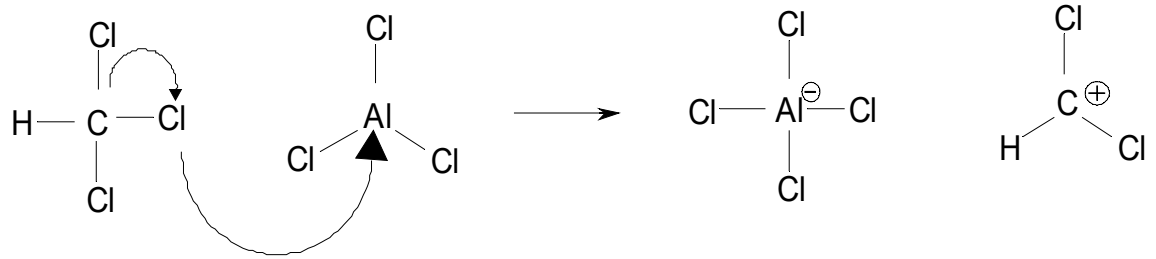
Man versetzt etwas wasserfreies Aluminium(III)chlorid mit Chloroform und Toluol.

Beobachtung:

Die zunächst farblose Lösung verfärbt sich über gelb, orange hin zu tiefrot. Des weiteren ist eine Gasentwicklung zu beobachten.

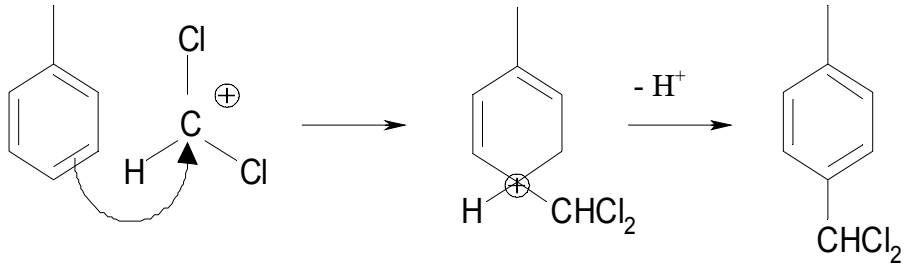
Auswertung:

Das Aluminium(III)Chlorid dient als Lewis-Säure (Elektronenpaar-Akzeptor) indem es ein Chlorid-Ion des Chloroforms aufnimmt:

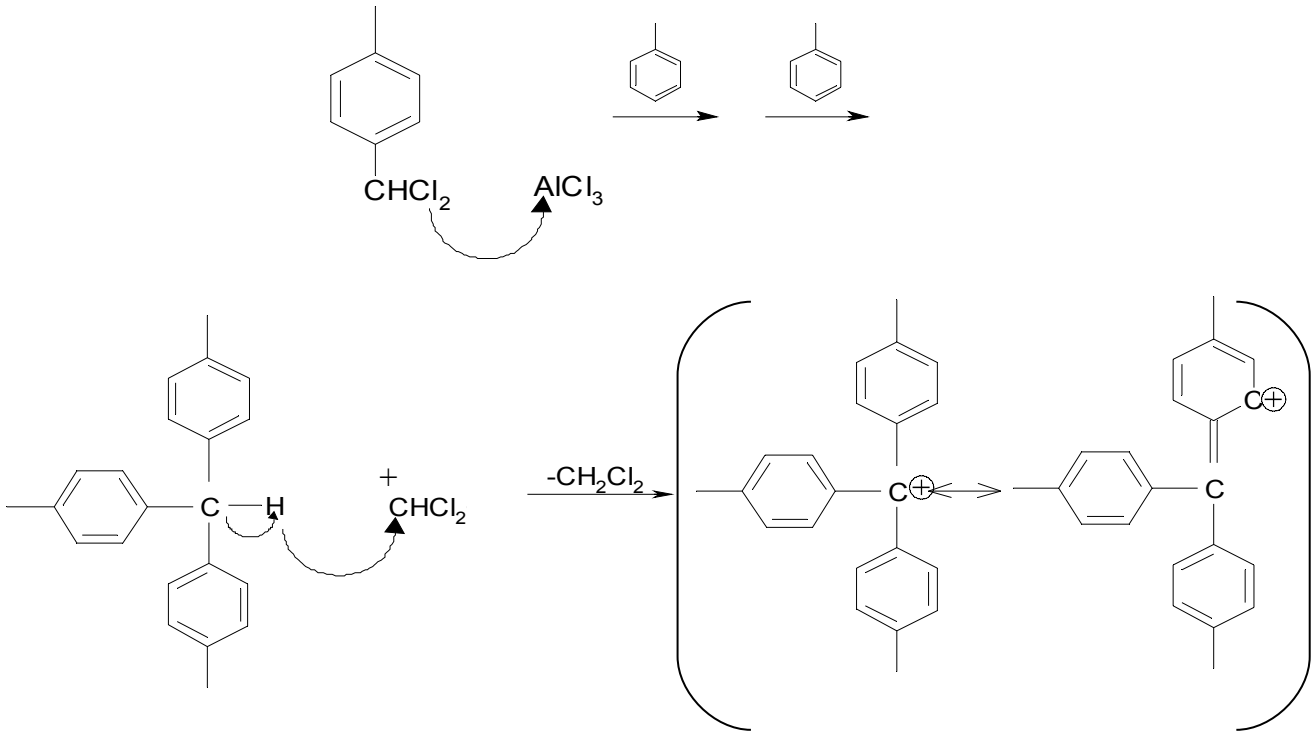


2 Vgl.: http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/farben/farbv_01.htm

Das dabei entstehende Carbenium-Ion kann nun im Rahmen einer elektrophilen aromatischen Substitutions-Reaktion am Toluol angreifen:



Das neu entstandene Zwischenprodukt kann nun noch zwei mal mit der Lewis-Säure Aluminium(III)Chlorid unter Abspaltung eines Chlorid-Ions reagiern und das Carbenium-Ion kann wieder am Toluol angreifen:



Konjugiertes π-System

4. Der Einsatz von Farbstoffen

Man kann in Bezug auf die Anwendungsmöglichkeiten der Farbstoffe zunächst zwischen dem Einsatz aus ästhetischen Gründen und dem Einsatz aus funktionellen Gründen unterscheiden. Farbstoffe werden zum Färben von Textilien und Leder verwendet, in der Druckerei und Papierindustrie, zum Färben von Lebensmitteln und Kosmetika, u.s.w.

Wir gestalten mit den Farbstoffen unsere Umwelt, tragen Kleidung in unserer Lieblingsfarbe, bevorzugen appetitlich gefärbte Speisen und betonen unser Äußeres mit Kosmetikprodukten, selbst Seifen und Duschgele benutzen wir lieber, wenn sie eine schöne Farbe haben.

Neben diesen Anwendungsmöglichkeiten im ästhetischen Bereich existieren jedoch noch eine Reihe weitere Einsatzgebiete in Bereichen, wo Farbstoffe ein wohldefinierte Funktion erfüllen müssen. Zu nennen wären hierbei beispielsweise die Säure-Base-Indikatoren, Sensibilisatoren in Fotofilmen, Photochrome Verbindungen in Sonnenbrillen und viele mehr.

4.1 Die Textilfärberei

Die Textilfärberei hat das Ziel die Textilien möglichst waschecht zu färben, dass heißt der Farbstoff muss möglichst fest an der Faser haften, so dass er bei der ersten Wäsche nicht gleich aus der Faser gespült wird. Dies wird durch eine möglichst hohe Wechselwirkung von Farbstoff und Faser erzielt. Dabei muss beachtet werden, dass nicht alle Farbstoffe für alle Fasertypen geeignet sind: Man unterscheidet bei den Fasertypen zunächst zwischen natürlichen Fasern, wie Wolle, Seide und Baumwolle, sowie zwischen den künstlichen Fasern, wie beispielsweise Polyamid und Acryl. Die Wechselwirkung zwischen Farbstoff und Faser hängt vom Molekülbau des Farbstoffs und der Fasern zusammen: Die funktionellen Gruppen tierischer Fasern, wie Wolle und Seide, stellen ionisierte Amino- bzw. Carboxylgruppen dar, während die pflanzlichen Fasern, wie Baumwolle und Viskose, aus Polysacchariden aufgebaut sind, deren funktionelle Gruppen die ungeladenen Hydroxylgruppen sind. Die ionisierten Seitengruppen der tierischen Fasern reagieren schnell mit sauren oder basischen Farbstoffen unter Ausbildung einer salzartigen Verbindung. Pflanzliche Fasern hingegen, die keine ionisierten Seitengruppen besitzen und daher nicht ganz so einfach eine feste Bindung eingehen, müssen vor dem Färbeprozess meist vorbehandelt werden.
Da das Färbeergebnis jedoch nicht nur von der Struktur der Fasern abhängt, sondern in gleichem Maße auch von den Eigenschaften der Farbstoffe, gibt es eine Reihe Färbeverfahren, die auf Faser und Farbstoff abgestimmt ist. Einige dieser Färbeverfahren sollen im folgenden erläutert werden.

4.1.1 Entwicklungsfarbstoffe

Die Entwicklungsfarbstoffe stellen eine besonders waschechte Variante der Texilfärbung dar. Der Grund hierfür liegt in der Löslichkeit des Farbstoffs: Ist ein Farbstoff wasserunlöslich, so kann er natürlich nur schlecht beim Waschen der Textilien aus der Faser gespült werden. Ideal wäre daher ein Farbstoff der absolut wasserunlöslich ist. Wie jedoch bringt man einen wasserunlöslichen Farbstoff auf die Faser auf? Denn die Textilien werden ja mit einer wäsrigen Lösung der Farbstoffe gefärbt. Die Lösung für dieses Problem ist die Entwicklung eines unlöslichen Farbstoffs direkt auf der Faser, daher auch der Name Entwicklungsfarbstoff.
Bei dieser Färbemethode werden meist Azofarbstoffe verwendet. Azofarbstoffe erhält man durch

die sogenannte Diazotierung und die anschließende Azokupplung. Im ersten Schritt muss zunächst das Nitrosylkation hergestellt werden. Dies geschieht in einer sauren wässrigen Lösung eines Salzes der salpetrigen Säure. Das Nitrosylkation wiederum reagiert im zweiten Schritt mit einer Anilinverbindung zu einer N-Nitrosoverbindung, welche im sauren Milieu unter Wasserabspaltung in das Diazoniumion übergeht. Diazoniumionen sind sehr instabil und zerfallen bei Temperaturen über 5° C (Phenolverkochung: Abspaltung von Stickstoff), weshalb die Diazotierung nur unter Eiskühlung im Temperaturbereich von 0-5° C vorgenommen werden kann.

Im dritten Reaktionsschritt erfolgt nun die Azokupplung, die Entstehung des Azofarbstoffs. Hierbei regiert das Diazoniumion als Elektrophil mit der Kupplungskomponente. Als Kupplungskomponente werden meist aromatische Kohlenwasserstoffe verwendet, die im Rahmen einer elektrophilen Aromatischen Substitution mit dem Diazoniumsalz zum Azofarbstoff reagieren.

Diazoniumion und Kupplungskomponente sind beide wasserlöslich, erst der neu entstandene Azofarbstoff ist wasserunlöslich, weshalb die Azofarbstoffe besonders waschechte Textilfarbstoffe darstellen.

Diese Variante der Textilfärbung lässt sich anschaulich in einem einfachen Versuch darstellen:

V2: Entwicklungsfärben[3]

Geräte:

- 2 Bechergläser (200 mL)
- Thermometer
- Eisbad

Chemikalien:

- Sulfanilsäure
- Natriumnitrit
- Verdünnte Natronlauge
- Verdünnte Salzsäure
- ß – Naphthol
- Wollstreifen

3 Vgl.: http://ruschmidt.de/FarbSite/pages/CAdrian/CAdrian.html

Durchführung:

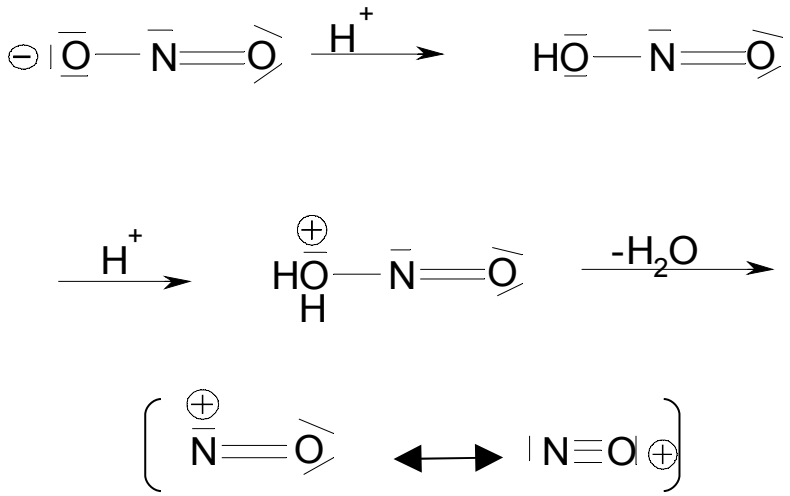
1 Spatelspitze Sulfanilsäure wird in etwa 10 ml NaOH (verd.) gelöst. Dazu gibt man eine Lösung von 1 Spatelspitze $NaNO_2$ in ca. 20 ml Wasser. Diese Mischung kühlt man mit Eis und gibt langsam etwa 20 ml HCl (verd.) zu, wobei die Temperatur der Lösung 5 Grad Celsius nicht übersteigen soll. In einem zweiten Becherglas löst man eine Spatelspitze ß - Naphthol in ca. 50 ml Wasser und gibt 10 ml NaOH (verd.) hinzu. In diese ß - Naphthollösung gibt man einen weißen Wollstreifen. Den getränkten Wollstreifen gibt man in die Diazoniumsalzlösung. Anschließend wäscht man die gefärbte Wolle unter fließendem Wasser aus.

Beobachtung:

Die zwei farblosen Lösungen ergeben zusammen auf der Faser einen intensiven orangen Farbton.

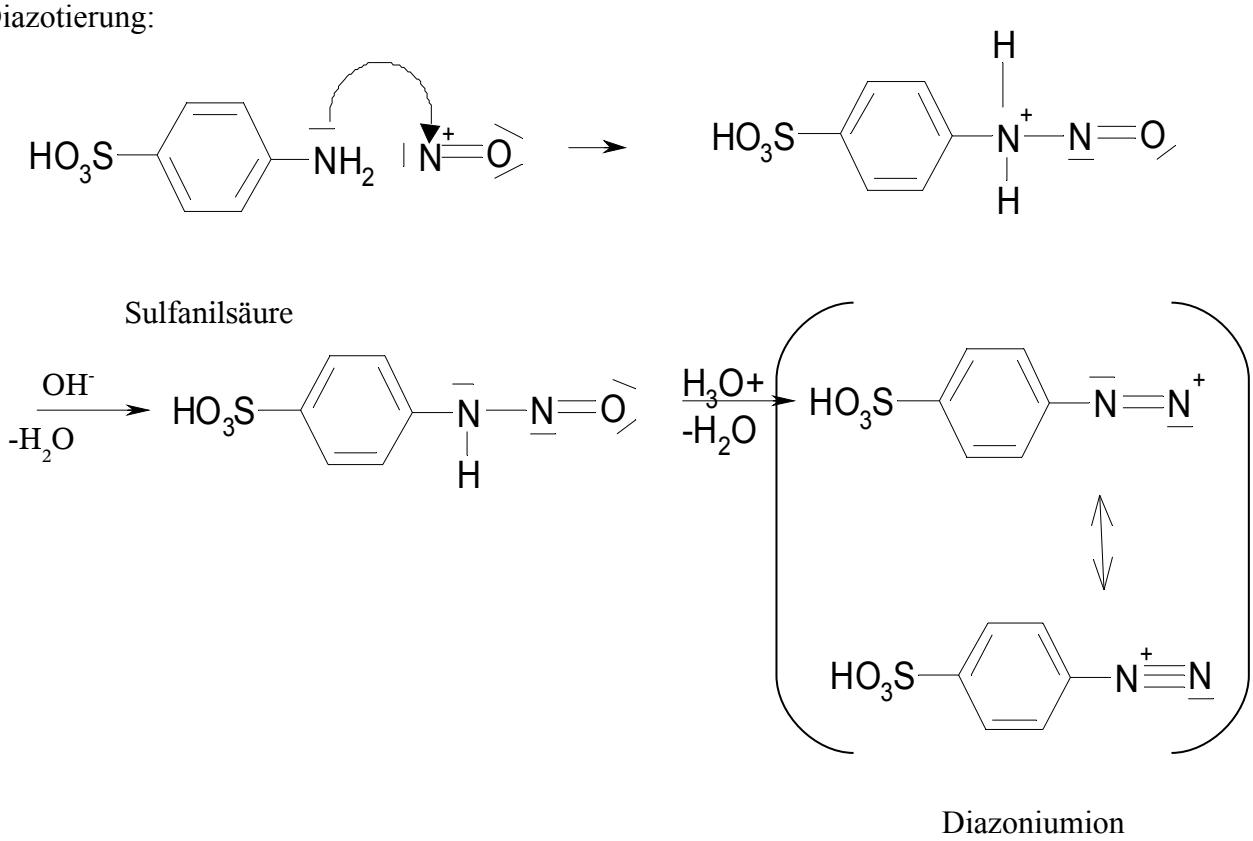
Auswertung:

1. Bildung des Nitrosylkations:

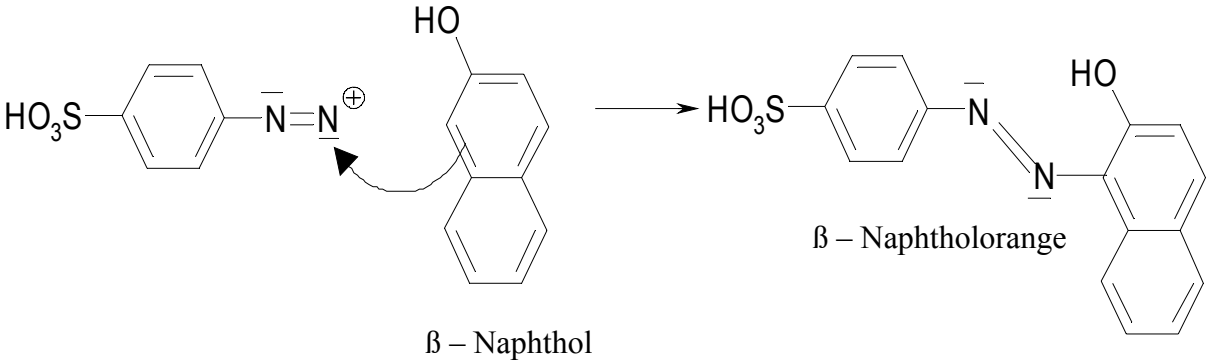


Nitrosylkation

2. Diazotierung:



3. Azokupplung:

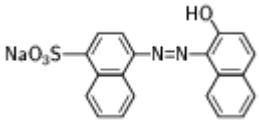


Der so entstandene wasserunlösliche Azofarbstoff haftet durch Adsorption auf der Faser.

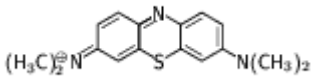
Dieses Verfahren eignet sich auch sehr gut für das Bedrucken von Fasern: Die Faser wird dafür zunächst mit der Kupplungskomponente bedruckt und getrocknet und dann mit der Diazoniumsalzlösung versetzt.

4.1.2 Direktfarbstoffe

Neben der Farbstoffentwicklung direkt auf der Faser gibt es natürlich noch die Möglichkeit, den Farbstoff einfach auf die Faser aufzuziehen, man spricht dann von Direktfarbstoffen. Saure oder basische Farbstoffe bilden dann mit den ionisierten Seitengruppen tierischer Fasern ein festes Farbsalz. Hierbei kann man beispielsweise Echtrot A oder Methylenblau verwenden:



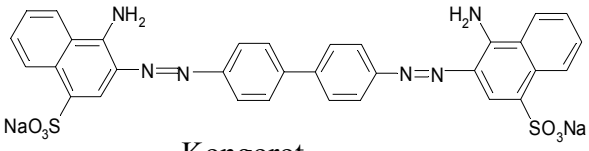
Echtrot A



Methylenblau

Man kann den Farbstoff allerdings auch in Form kolloidaler Teilchen auf die Faser aufziehen, man spricht dann von Substantivfarbstoffen. Der Farbstoff haftet dann über Dipolkräfte an und in der der Faser. Da in diesem Fall keine salzartige Bindung aufgebaut wird, ist der Farbstoff natürlich nicht allzu waschecht.

Substantivfarbstoffe besitzen meist mehrere Azogruppen (Polyazofarbstoffe), sowie freie Amino-Gruppen. Ein Beispiel für einen solchen Polyazofarbstoff ist das Kongorot:



Kongorot

Die freien Amino-Gruppen können mit den Hydroxid-Gruppen der Cellulosefaser Wasserstoffbrückenbindungen eingehen. Daher eignet sich dieser Farbstoff nur für Baumwollfasern.

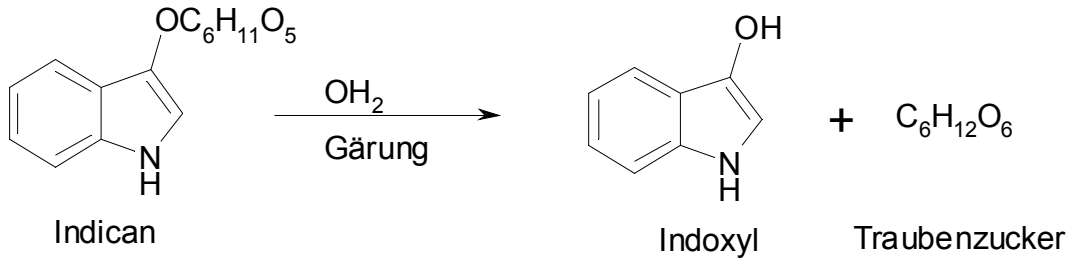
4.1.3 Küpenfarbstoffe

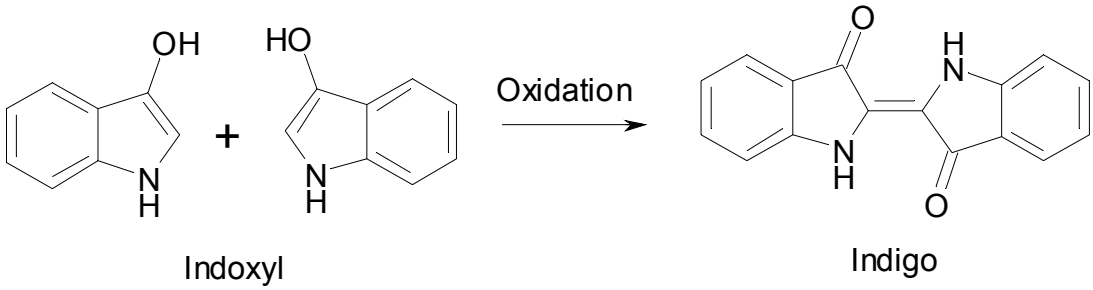
Eine weitere sehr waschechte Farbstoffklasse sind die Küpenfarbstoffe. Küpenfarbstoffe sind auch wie die Azofarbstoffe wasserunlöslich, was die besten Voraussetzungen für eine lange Beständigkeit der gefärbten Textilien darstellt. Natürlich existiert auf hier nun wieder die Frage, wie man denn nun einen unlöslichen Farbstoff auf die Faser aufbringen kann.

Bei der Küpenfärbung überführt man den wasserunlöslichen Farbstoff durch Reduktion in eine wasserlösliche Form. Dieser Vorgang wird *Küpen* genannt. Bei der wasserlöslichen Form des Farbstoffs handelt es sich um die farblose *Leukoverbindung* (leukos (griech.) = weiß).

Die Faser wird dann mit der Küpe getränkt und an der Luft getrocknet. Durch den Luftsauerstoff wird die reduzierte Form des Farbstoffs wieder oxidiert und man erhält den wasserunlöslichen Farbstoff.

Der wohl bekannteste Küpenfarbstoff ist das Indigo. Der tiefblaue Farbstoff Indigo wurde schon 2500 v. Chr. in Agypten verwendet. Man gewann den Farbstoff aus der indischen Indigopflanze oder dem einheimischen Färberwaid. Da diese Pflanzen jedoch kein Indigo, sondern nur das Indican erhielten, musste dieses zunächst durch Gärung mit Glucose in das Indoxyl umgewandelt werden. Durch anschließende Oxidation an der Luft durch Sauerstoff entstand das blaue Indigopulver.





Erst 18 78 gelang dem deutschen Chemiker Adolf von Baeyer die vollsynthetische Herstellung von Indigo. Obwohl auch heute noch vereinzelt Indigo auf natürlichem Wege gewonnen wird, verdrängt das synthetische Produkt immer mehr as natürliche Indigopulver.

Zum Färben überführt man das wasserunlösliche Indigo mit einer alkalischen Natriumdithionit-Lösung bei 50 – 70° C in die Leukoform.

Die Reoxidierung des Färbeguts kann entweder mit Wasserstoffperoxid, oder aber durch den Luftsauerstoff erfolgen.

Dieses weit verbreitete Färbeverfahren kann man leicht in einem Versuch nachvollziehen:

V3: Küpenfärbung[4]

Geräte:

- Heizplatte mit Magnetrührer
- Rührfisch
- Becherglas
- Wäscheleine

Chemikalien:

- Indigo
- Nitriumdithionit
- Natriumhydroxid
- Baumwolle

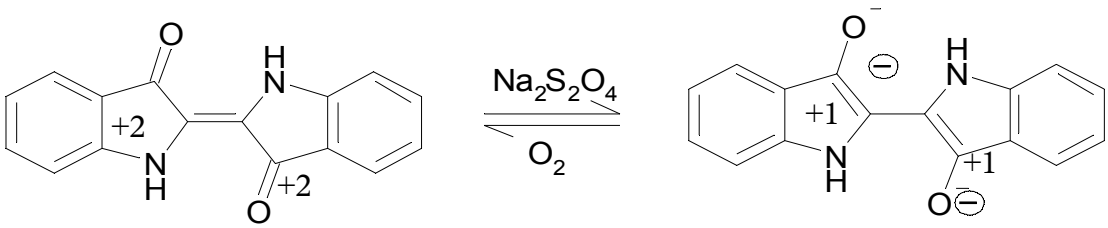
Durchführung:

In das Becherglas gibt man 0,5 g des Indigopulvers, ca. 1 g Natriumhydroxid-Plätzchen, 1 g Natriumdithionit und etwa 100 mL Wasser. Die Mischung wird auf ca. 70° C erwärmt bis sich eine grüne Lösung bildet. In diese Lösung gibt man nun das Textilstück. Nach ca. 1 min nimmt man das Stück Stoff aus der Lösung und lässt es an der Luft trocknen.

Beobachtung:

Das zunächst hellgrün gefärbte Tuch wird verändert an der Luft seine Farbe nach dunkelblau.

Auswertung:



$$\overset{+3}{S_2O_4^{2-}} \rightarrow \overset{+4}{2\ SO_2} + 2\ e^-$$

$$2\ SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$$

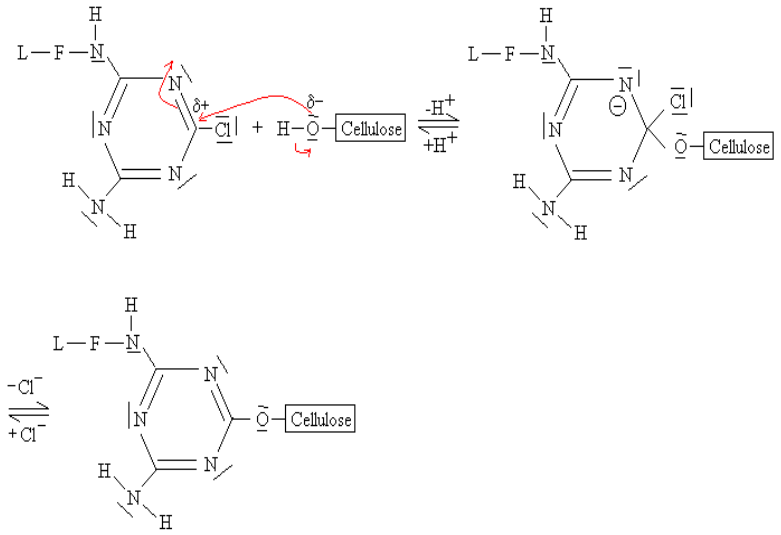
$$H_2SO_3 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_3O^+ + SO_3^{2-}$$

4 http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/farben/farbv_10.htm

Das Indigomolekül wird durch das Natriumdithionit reduziert. Im selben Schritt wird das Natriumdithionit zu Schwefeldioxid oxidiert, welches in wässriger Lösung zu schwefliger Säure wird.
Das Leukoindigo wird im darauffolgenden Schritt durch den Luftsauerstoff reoxidiert.

4.1.4 Reaktivfarbstoffe

Eine andere Methode einen Farbstoff fest auf der Faser zu verankern, besteht darin eine kovalente Bindung zwischen Farbstoff und Faser zu schaffen. Dies kann man mit den sogenannten Reaktivfarbstoffen erzielen. Mit diesen Farbstoffen können sowohl tierische, wie auch pflanzliche und synthetische Fasern gefärbt werden.
Die Funktionsweise dieser Farbstoffe lässt sich anhand des Molekülbaus erklären: Reaktivfarbstoffe besitzen neben dem Chromophor noch eine reaktive Gruppe, den sogenannten reaktiven Anker, mit welchem das Farbstoffmolekül an die Faser gebunden wird, sowie eine weitere funktionelle Gruppe, die dafür sorgt, dass sich der Farbstoff gut lösen lässt. Für die löslichen Gruppen verwendet man häufig Sulfonsäurereste. Als Chromophor dienen meistens Azofarbstoffe, Anthrachinon- oder Phthalocyaninfarbstoffe. Als reaktive Anker verwendet man man meistens chlorierte Triazine oder Vinylsulfonsäuren. Der Triazinanker reagiert unter Abspaltung von HCl mit Hydroxylgruppen des Färbegutes und Ausbildung einer Etherbindung, die Vinylsulfonsäuren addieren sich unter Bildung einer C-C-Bindung an das Färbegut[5].
Als Beispiel für eine solche Reaktiv-Färbung dient die folgende Reaktionsgleichung[6]:



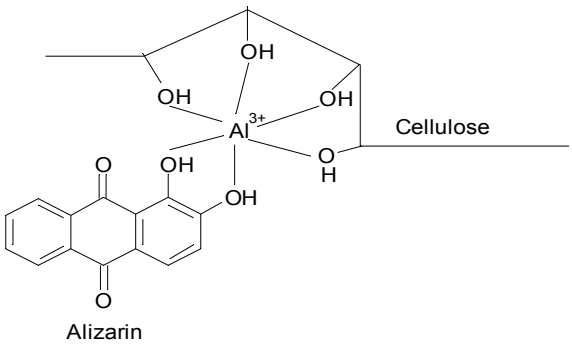
5 Vgl.: http://www.2k-software.de/ingo/farbe/faerben.html
6 http://ruschmidt.de/FarbSite/pages/BBecker/pics/Reak1.gif

4.1.5 Beizenfarbstoffe

Wie zu Beginn erwähnt, ist es nicht möglich, allein mit sauren oder basischen Farbstoffen eine waschechte Färbung auf Cellulosefasern wie Baumwolle oder Viskose zu erzielen. Eine Färbevariante ermöglicht aber eben dies: Setzt man Beizmittel (Metallsalze) zum Färbegut hinzu, fungieren diese als Vermittlersubstanz zwischen Farbstoff und Faser, da die Metallsalzionen sich an die Cellulosefaser binden können und gleichzeitig eine Bindung mit den Farbstoffmolekülen eingehen können. Diese Bindung zwischen Farbstoff, Beizmittel und und Faser nennt man Farblack.

Es handelt sich hierbei jedoch nicht um salzartige Bindungen, sondern um Metallkomplexe:

Das Metallion tritt in Wechselwirkung mit den Hydroxidgruppen von Farbstoff und Faser und bildet so einen farbigen Komplex. Ein Beispiel für dieses Verfahren wäre die Beizenfärbung mit Aluminiumbeize und Alizarin:



4.2 Lebensmittelfarbstoffe

Nach der Devise „Das Auge ist mit“ konsumiert der Verbrauchen am liebsten die Lebensmittel, welche ein appetitanregendes, schön gefärbtes Aussehen aufweisen. Wir ziehen den den fast orangenfarbigen Lachs dem weniger farbigen Lachs vor, weil uns suggeriert wird, diese Wahre sei qualitativ hochwertiger und frischer. Bedenklich ist dabei, dass der Verbraucher an unnatürlich gefärbte Lebensmittel gewöhnt wird und nur noch diese konsumiert, weil die naturbelassenen Produkte als weniger frisch und qualitativ geringwertiger einschätzt, obwohl die künstliche Farbe meist nichts mehr mit dem natürlichen Aussehen der Produkte zu tun hat. Also finden wir fast in allen Speisen, Getränken aber auch in Arzneimitteln künstlich zugesetzte Farbstoffe. Zu erkennen sind diese Nahrungsmittelzusätze an den E-Nummern E 100 – 200. Hinter diesen Kürzeln verstecken sich farbige Substanzen, die natürlichen Ursprungs sind, naturidentisch synthetisiert oder gar komplett synthetisch sind. Ein Beispiel für einen natürlichen Farbstoff wäre das Conchenille, welches tierischen Ursprungs ist. (Es wird vom Weibchen der Conchenille-Laus abgesondert, welche auf Opuntien vor allem in Mexiko gezüchtet wird.) Ein vollsynthetischer Ersatzfarbstoff

wäre das Conchenillerot A. Hierbei handelt es sich um einen Azofarbstoff, der in der Natur nicht zu finden ist. Würde man jedoch im Labor einen Farbstoff synthetisieren, dessen Molekülbau exakt dem eines natürlichen Farbstoffs entspricht, so handelt es per Definition um einen naturidentischen Farbstoff.

Über die gesundheitliche Unbedenklichkeit von Lebensmittelfarbstoffen entscheidet die FAO (**F**ood and **A**griculture **O**rganization of the United Nations) sowie die WHO (**W**orld **H**ealth **O**rganization). Um ein gesundheitliches Risiko soweit wie möglich einzuschränken, wurde der ADI- Wert eingeführt. ADI heißt **A**cceptable **D**aily **I**ntake und gibt Auskunft über die erlaubte Tagesdosis eines Lebensmittelfarbstoffs. Um diese Größe festlegen zu können, werden neue Lebensmittelfarbstoffe im Tierversuch getestet: Die Versuchstiere nehmen ein Leben lang einen bestimmten Lebensmittelzusatzstoff auf, bis gesundheitsschädigende Reaktionen auftreten. Im Anschluss an diese Experimente wird die verabreichte Menge auf die Tagesdosis pro Kg Körpergewicht zurückgerechnet und durch den Sicherheitsfaktor 100 dividiert. So gibt der ADI-Wert an wieviel mg eines Lebensmittelzusatzstoffs pro Kg Körpergewicht ein Mensch ein Leben lang konsumieren kann.

Der Sicherheitsfaktor wird verwendet, um zu vermeiden, dass Unterschiede zwischen tierischem und menschlichem Stoffwechsel den empfohlenen Wert verfälschen.[7]

Ein einfacher und sehr anschaulicher Versuch kann die Allgegenwärtigkeit der Lebensmittelfarbstoffe und deren erzielter Wirkung auf das Konsumverhalten demonstrieren:

D2: Echter oder falscher Lachs?[8]

Geräte:

- 2 Demoreagenzgläser mit Stopfen
- Pipette

Chemikalien:

- Ethanol
- Lachs
- Lachsersatz

7 Vgl.: http://de.wikipedia.org/wiki/Lebensmittelfarbe
8 Vgl.: http://www.experimentalchemie.de/versuch-038.htm

Durchführung:

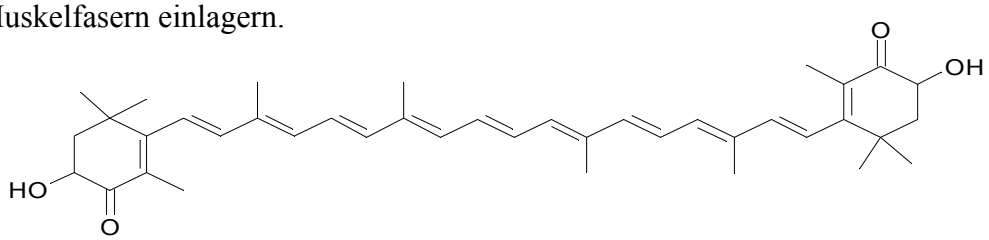
In ein Reagenzglas gibt man etwas zerkleinerten Lachsersatz und in das andere Reagenzglas den echten Lachs. Nun werden beide Proben mit etwas Ethanol überschichtet und kräftig geschüttelt.

Beobachtung:

Die Ethanol-Phase im Reagenzglas, welches den Lachsersatz enthielt, ist orange gefärbt. Die Ethanol-Phase im anderen Reagenzglas ist nach wie vor farblos.

Auswertung:

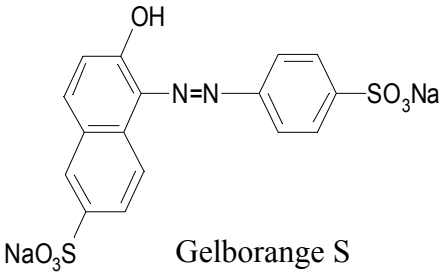
Lachsfleisch ist durch die Einlagerung des Carotinoids Astxanthin rosa gefärbt. Astaxanthin wird von Plankton und bestimmten Algenarten produziert, diese wiederum werden von Krebstiern gefressen. Diese lagern den Farbstoff in den Schalen ab. Da dieses Krebstiere Nahrungsgrundlage für den Lachs darstellen, nimmt natürlich auch dieser wieder das Astaxanthin auf und kann es in seinen Muskelfasern einlagern.



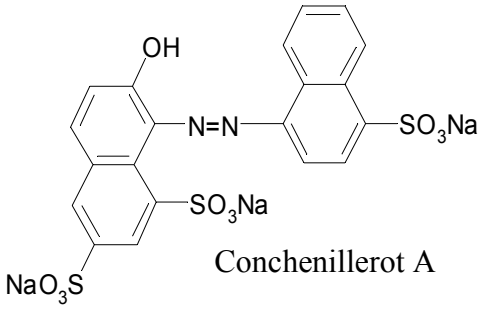
Astaxanthin

Da der Lachsersatz nur äußerlich mit einem Farbstoff behandelt wurde, ist es klar, das bei dieser recht einfachen Extraktionsmethode hier der Farbstoff isoliert werden kann, beim echten Lachs hingegen, wo der der Farbstoff tief im Gewebe eingelagert ist, reicht diese Extraktionsmethode nicht aus, um den Farbstoff zu extrahieren.

Beim Lachsersatz handelt es sich meist um Kabeljau-Filets, welche mit den Lebensmittelfarbstoffen Gelborange S und Conchenillerot A gefärbt werden.



Gelborange S



Conchenillerot A

Bei diesen Farbstoffen handelt es sich um synthetisch hergestellte Azofarbstoffe.

4.3 Funktionelle Farbstoffe

Funktionelle Farbstoffe werden nicht aufgrund einer ästhetischen Eigenschaft verwendet, sondern für die Erfüllung eines bestimmten Zwecks. Erst wenn ein Farbstoff eine wohl definierte Funktion erfüllt kann man von einem funktionellen Farbstoff sprechen. Ein Beispiel für einen solchen funktionellen Farbstoff wäre demnach das Phenolphthalein, welches als pH-Indikator in der Analytik dient.

Des weiteren wäre auch der in der Natur weit verbreitetste Farbstoff, das Chlorophyll, als funktioneller Farbstoff zu nennen, da dieser Farbstoff im Rahmen der Photosynthese die absorbierte Lichtenergie in die Glucose-Produktion einspeist.

Ebenfalls von großer Bedeutung sind die Sensibilisatoren in Fotofilmen. Sie verbreitern das Absorptionsmaximum der Silberhalogenide auf das gesamte Spektrum des sichtbaren Lichts, da die Silberhalogenide ihr Absorptionsmaximum im Wellenlängenbereich von 400 – 500 nm haben. So wird erreicht, dass wir alle Farben des Spektrums fotographisch festhalten können.

Eine weitere Verbindungsklasse der funktionellen Farbstoffe, die uns ebenfalls im Alltag begegnet, wären die photochromen Farbstoffe. Hierbei handelt es sich um Verbindungen, die eine lichtinduzierte reversible Strukturänderung durchlaufen. Durch Licht wird das Molekül eines solchen Farbstoffs in eine isomere bzw. tautomere Form überführt, welche wiederum ein anderes Absorptionsmaximum besitzt als die ursprüngliche Form. Ein Einsatzgebiet für solche Verbindungen wäre die Herstellung von sonnenempfindlichen Brillengläsern. Hierbei werden Silberhalogenide und Kupferhalogenide eingesetzt. Das fein verteilte Silberhalogenid wird durch Lichteinstrahlung homolytisch gespalten, wobei das Spaltungsprodukt ein anderes Absorptionsmaximum besitzt als das Edukt.

Weitere typische Anwendungsgebiete für funktionelle Farbstoffe sind elektronische Farbreproduktionsverfahren, optische Speichermedien und Displays.[9]

Die funktionellen Farbstoffe werden in der Wissenschaft nach den folgenden Eigenschaften klassifiziert:

- Farbstoffe mit lichtabsorbierenden bzw. lichtemitierenden Eigenschaften
- Farbstoffe mit lichtinduzierter Polarisation
- Farbstoffe mit photoelektrischer und photochemischer Aktivität[10]

Ein anschauliches Beispiel für einen solchen funktionellen Farbstoff, der auch in der Schule Verwendung finden kann, ist das Fluoreszein.

9 Vgl.: Fonds der Chemischen Industrie. Farbstoffe und Pigmente. Textheft 15. Frankfurt am Main 1993
10 Prof. Dr. C. Reichhardt. Natürliche, synthetische und funktionelle Farbstoffe. Marburg 2004

Fluoreszein dient in der Analytik als pH-Indikator, in der Medizin und Biologie zur Fluoreszenzmikroskopie sowie zu Diagnose von Hornhautschäden, in der Geologie zur Quellfärbung und in der Schifffahrt zur Seenotrettung.
Die Synthese, dieses pH-abhängigen Fluoreszenz-Farbstoffs ist einfach und lässt sich auch als Schülerversuch durchführen:

V4: Darstellung von Fluoreszein[11]

Geräte:

- Bunsenbrenner
- Reagenzglasklammer
- Schwerschmelzbares Reagenzglas
- Spatel
- Pipette
- UV-Lampe
- Becherglas

Chemikalien:

- Resorcin
- Phthalsäureanhyrid
- Verdünnte Natronlauge

Durchführung:

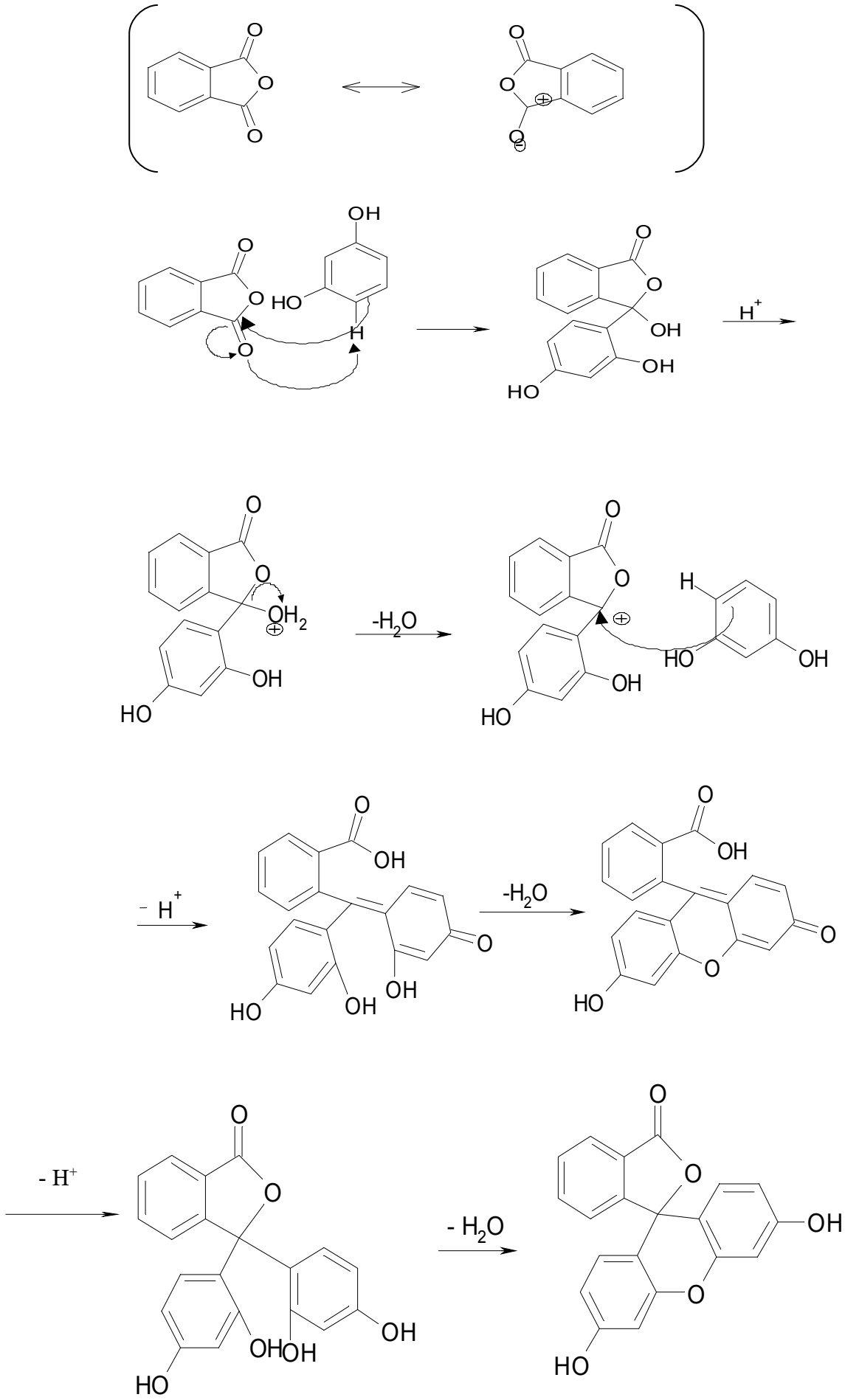
Jeweils eine Spatelspitze Resorcin werden mit einer Spatelspitze Phthalsäureanhydrid in einem Reagenzglas geschmolzen.
Die rote Schmelze löst man nach dem Abkühlen in etwas verdünnter Natronlauge und gibt einige Tropfen in das mit Wasser gefüllte Becherglas. Diese Lösung schaut man sich nun unter der UV-Lampe an.

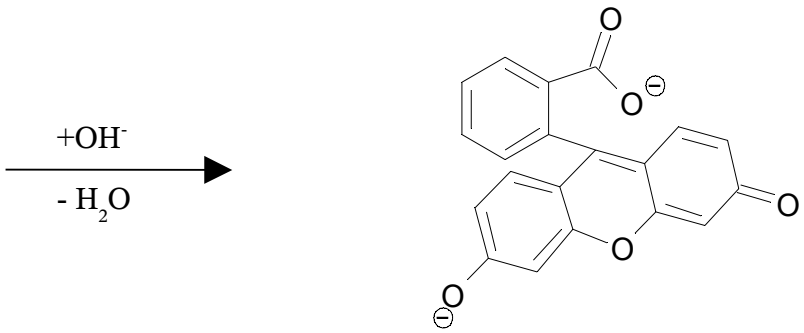
Beobachtung:

Es ist eine deutliche Fluoreszenz sichtbar.

Auswertung:

11 Vgl.: http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/farben/farbv_03.htm


H+
-H2O
- H+
-H2O
- H+
- H2O

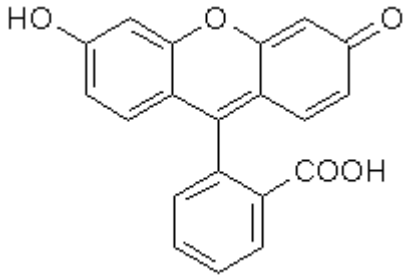


Das Carbonylkohlenstoff-Atom des Phtalsäureanhydrids greift das Resorcin-Molekül im Rahmen einer elektrophilen aromatischen Substitutionsreaktion an. Die π-Elektronen der Carbonylgruppe verschieben sich dabei zum Sauerstoff-Atom. Dieses wiederum kann das abgespaltene Proton des Resorcins aufnehmen, welches durch die Rearomatisierung des Moleküls frei wurde.

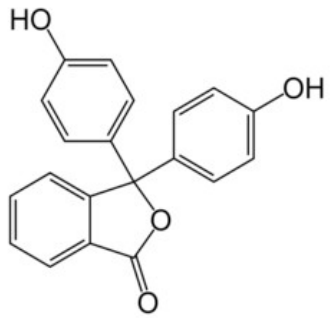
Durch katalytische Protonierung der neu gebildeten Hydroxid-Gruppe kann im Rahmen einer Kondensationsreaktion Wasser abgespalten werden, das dabei gebildete Carbeniumion reagiert nun wieder nach dem Mechanismus der elektrophilen aromatischen Substitution mit einem Resorcin-Molekül. Die benachbarten Hydroxid-Gruppen der Resorcin-Moleküle reagieren nun unter Kondensation zum Endprodukt: Fluoreszein.

Durch das Lösen des Farbstoffs in verdünnter Natronlauge, entsteht das Anion des Moleküls, welches Träger der Fluoreszenz ist. Aufgrund dieser Tatsache kann Fluoreszein als pH-Indikator für undurchsichtige Lösungen verwendet werden, da es im neutralen und sauren seine Fluoreszenzeigenschaft verliert.

Wie aber kommt es zu dieser Fluoreszenzerscheinung? Wie schon im Kapitel „Theorie der Farbigkeit“ erwähnt, zeichnen sich Farbstoffe dadurch aus, dass sie elektromagnetische Strahlung aus dem Bereich des sichtbaren Lichts absorbieren. Sie absorbieren also Energie was wiederum zu einer Elektronenanregung von HOMO zu LUMO führt. Die angeregten Elektronen verweilen jedoch nur für eine bestimmte Zeit in dem energetisch höheren Molekülorbital, und wenn sie wieder in ihren Grundzustand zurückfallen, wird die aufgenommene Energie wieder frei. Diese Energie wird bei normalen Farbstoffen in Form von Schwingungsenergie abgegeben. Einige Moleküle sind aufgrund einer ungünstiger Molekülsterik jedoch nicht in der Lage die gesamte Anregungsenergie in Form von Schwingungsenergie abzugeben, daher können diese Moleküle einen Großteil der aufgenommenen Energie in Form von Strahlung abgeben. Besonders deutlich wird dieses Phänomen, wenn man das Molekülgerüst des Phenolphthaleins mit dem des Fluoresceins vergleicht:



Fluorescein



Phenolphthalein

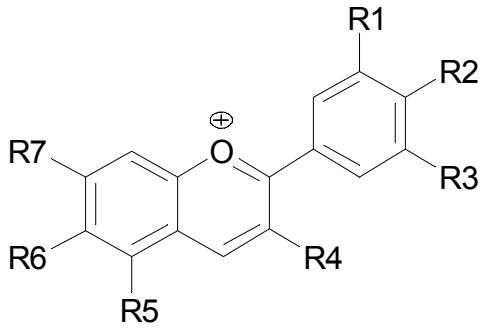
Beim Fluorescein können die Bindungen zwischen dem zentralen Kohlenstoffatom und den Phenylringen nicht rotieren. Wir haben hier ein starr planares Molekülgerüst vorliegen. Hingegen beim Phenolphthalein können die Bindungen zwischen Phenylring und dem zentralen Kohlenstoffatom rotieren.

Jedoch ist die Energie des abgegebenen Lichts immer geringer als die des aufgenommenen Lichts, da auch fluoreszierende Moleküle zu einem geringen Anteil Schwingungsenergie abgeben. Diese Gesetzmäßigkeit beschreibt die Stokes`sche Gesetz: „Das von fluoreszierenden Stoffen wieder emittierte Licht hat eine größere elektromagnetische Wellenlänge, als das vom Stoff absorbierte und dadurch die Fluoreszenz erregende Licht. Beim Selbstleuchten fluoreszierender Stoffe, das durch auftreffendes Licht hervorgerufen wird, ist das wieder ausgestoßene Licht demnach in ein längerwelligen Bereich verschoben.

In manchen Fällen kann es abweichend von dieser grundsätzlichen Regel auch vorkommen, dass das wieder emittierte Licht in seiner Wellenlänge nicht verändert wurde. In diesen Fällen spricht man vom Auftreten einer Resonanzfluoreszenz.“[12]

Eine weitere Klasse funktioneller Farbstoffe, die sich ebenfalls hervorragend für den Chemieunterricht eignen, sind die Anthocyane. Hierbei handelt es sich um Pflanzenfarbstoffe, die hauptsächlich für die Färbung der Früchte und Blüten verantwortlich sind. Ihre Hauptaufgabe besteht darin Insekten anzulocken und die schädliche UV-Strahlung abzuhalten. Des weiteren können diese wasserlölichen Pflanzenfarbstoffe freie Radikale binden. Das Grundgerüst der Anthocyane sieht wie folgt aus:

12 http://de.wikipedia.org/wiki/Stokessche_Regel



Anthocyanidin	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Aurantinidin	H	OH	H	OH	OH	OH	OH
Canidin	OH	OH	H	OH	OH	H	OH
Delphinidin	OH	OH	OH	OH	OH	H	OH
Europinidin	OCH_3	OH	OH	OH	OCH_3	H	OH
Luteolinidin	OH	OH	H	H	OH	H	OH
Pelargonidin	H	OH	H	OH	OH	H	OH
Malvidin	OCH_3	OH	OCH_3	OH	OH	H	OH
Peonidin	OCH_3	OH	H	OH	OH	H	OH
Petunidin	OH	OH	OCH_3	OH	OH	H	OH
Rosinidin	OCH_3	OH	H	OH	OH	H	OCH_3

(Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Anthocyane)

Von den Anthocyanen spricht man, wenn die Reste Hydroxide oder Wasserstoffatome sind. Anthocyanine hingegen sind die Glycoside der Anthocyane, welche die wasserlöslichere und stabilere Form darstellen.

Eine weitere Eigenschaft der Anthocyane, die für die Schule wohl am bedeutendsten ist, stellt die pH-abhängige Färbung dieser Farbstoffklasse dar- Es handelt sich bei den Anthocyanen um natürliche pH-Indikatoren.

Ein schöner Versuch für den Schulunterricht ist das Experiment mit der „Zauberrose“:

V5: Die Zauberrose[13]

Geräte:

- 2 unskalierte Standzylinder
- 2 Uhrgläser

Chemikalien:

- Konz. Ammoniak
- Eisessig
- 1 rote Rose

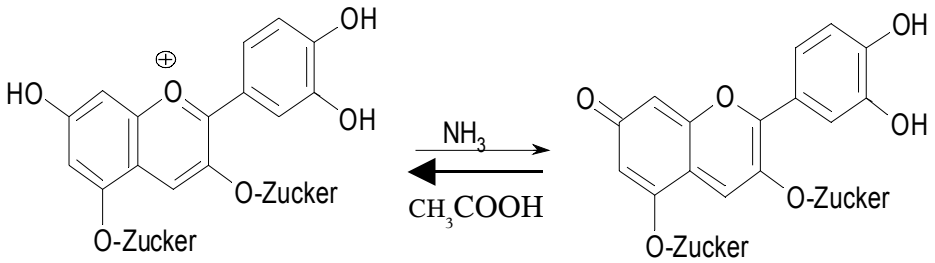
Durchführung:

Man befüllt einen Standzylinder mit etwas konz. Ammoniak und den anderen Zylinder mit etwas Eissessig und verschließt die Gefäße mit den Uhrgläsern. Man schwenkt die Zylinder um eine gesättigte Gasphase im Zylinder zu erhalten. Nun taucht man die Rose zuerst in den mit Ammoniak gefüllten Standzylinder und im Anschlus daran in den mit Eisessig gefüllten Standzylinder.

Beobachtung:

Die Rose verfärbt sich im Ammoniak-Dampf blau und im Eisessig-Dampf wieder rot.

Auswertung:



Cyanin: pH 1- 2 (rot) Chinoide Base: pH 6-7 (blau)

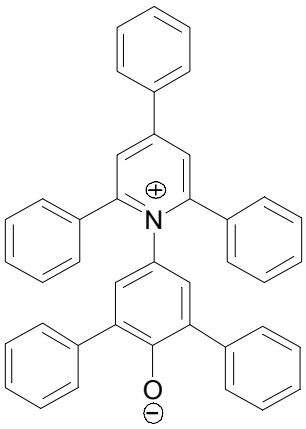
Durch die Deprotonierung der Hydroxidgruppe entsteht ein chinoides System, welches ein anderes Absorptionsmaximum besitzt als das des Anthocyanins.

Diese Deprotonierung ist reversibel, weshalb die Anthocyanine als pH-Indikatoren eingesetzt werden können.

Neben den altbekannten pH-Indikatoren, gibt es auch Indikatoren welche die Polarität von

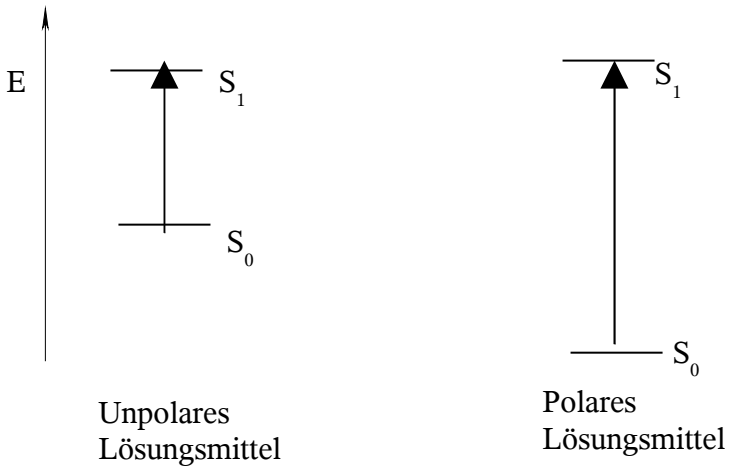
13 Vgl.: http://www.uni-bayreuth.de/departments/ddchemie/experimente/effekt/effekt_rosenzauber.htm

Lösungsmitteln per Farbumschlag anzeigen. Solche Polaritäts-Indikatoren werden solvatochrome Farbstoffe genannt. Ein Beispiel für einen solchen solvatochromen Farbstoff wäre der von Prof. Dr. Reichhardt synthetisierte 2,6-Diphenyl-4-(2,4,6-triphenyl-1-pyridinio)-phenolat-Betainfarbstoff:



2,6-Diphenyl-4-(2,4,6-triphenyl-1-pyridinio)-phenolat

Der Grundzustand dieses Farbstoffs wird in polaren Lösungsmitteln stabilisiert. Daher ist die Anregungsenergie von HOMO zu LUMO sehr hoch. Anders hingegen in unpolaren Lösungsmitteln: hier wird das Molekül nicht gut stabilisiert, weshalb die Anregungsenergie von HOMO zu LUMO deutlich niedriger wird:



Dies hat zur Folge, dass der Farbstoff in einem polaren Lösungsmittel wie Methanol kürzerwlliges Licht absorbiert, als in einem recht unpolaren Lösungsmittel wie Aceton:

D3: Solvatochromie

Geräte:

- Demo-Reagenzgläser

Chemikalien:

- Aceton
- Methanol
- 2,6-Diphenyl-4-(2,4,6-triphenyl-1-pyridinio)-phenolat

Durchführung:

Die Reagenzgläser werden mit den Lösungsmitteln befüllt und mit einer kleinen Menge des Farbstoffs versetzt.

Beobachtung:

Der Methanol-Lösung ist rot und die Aceton-Lösung ist grün.

Auswertung:

Methanol: Der Farbstoff absorbiert grünes Licht (500-600 nm).

Aceton: Der Farbstoff absorbiert rotes Licht (600-700 nm).

Da die Energie der Photonen mit zunehmender Wellenlänge niedriger wird, ist Methanol das bessere und damit polarer Lösungsmittel.

5. Schulische Relevanz

Das Thema Farbstoffe kann, dem hessischen Lehrplan zufolge, mit dem Leistungs- und dem Grundkurs in Klasse 13.2 behandelt werden. Es handelt sich bei diesem Thema um ein Wahlthema, welches im Grundkurs innerhalb von 24 Stunden und im Leistungskurs innerhalb von 43 Stunden abgehandelt wird.

Verbindliche Aspekte des Themas sind:

- Licht und Farbe
- Theorien der Farbigkeit
- Einteilung der Farbstoffe nach Farbstoffklassen
- Synthese von Farbstoffen
- Färbetechniken
- pH-Indikatoren
- Lebensmittelfarbstoffe

Im Rahmen des Vortrags wurden alle aufgezählten Teilaspekte behandelt. Die Versuche die auf diese Aspekte abgestimmt sind, sind allesamt ohne größeren Aufwand in der Schule durchführbar und für Schüler anschaulich und teilweise verblüffend gestaltet. Weiterhin positiv ist, dass die meisten Versuche auch von Schülern durchgeführt werden können. Aufgrund dessen würde sich für die Erarbeitung dieses Themas auch sehr gut ein Stationenlernen anbieten.

6. Literatur

- H. Rampf, S. Schaumann-Eckel. Abiturhilfe Chemie. Organische Chemie Aufbauwissen. Band 681. Mentor. 2001 München
- Fonds der Chemischen Industrie. Farbstoffe und Pigmente. Textheft 15. Frankfurt am Main 1993
- Prof. Dr. C. Reichhardt. Natürliche, synthetische und funktionelle Farbstoffe. Marburg 2004

Internetquellen:

- http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/farben/farbv_01.htm
- http://ruschmidt.de/FarbSite/pages/CAdrian/CAdrian.html
- http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/farben/farbv_10.htm
- http://www.2k-software.de/ingo/farbe/faerben.html
- http://de.wikipedia.org/wiki/Lebensmittelfarbe
- http://www.experimentalchemie.de/versuch-038.htm
- http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/farben/farbv_03.htm
- http://de.wikipedia.org/wiki/Stokessche_Regel
- http://www.uni-bayreuth.de/departments/ddchemie/experimente/effekt/effekt_rosenzauber.htm