



Chemolumineszenz

Vortrag von Andreas Dörfler, SS 2000
überarbeitet von Simone Paff, SS 2009 und Manuela Kallus, SS 2020.

Gliederung:

1	Das Phänomen „Chemolumineszenz“	4
2	Basis für die Chemolumineszenz	4
3	Prinzip der Chemolumineszenz-Reaktion.....	5
4	Ausgewählte Anwendungsbeispiele	6
4.1	Fluoreszenz.....	6
4.2	Chemolumineszenz im Alltag	7
4.3	Aktuelle Beispiele	13
4.3.1	Chemolumineszenz-Immunoassays	13
4.3.2	Chemolumineszenz und Tumorthapie	13

Einstieg 1:

Mehrere Leuchtstoffe, die in Lösungsmitteln (Chloroform, DMF) gelöst sind (Naphthalimid (gelb), Perylenimid (orange), KF 856 (rot), Cumarin 6 (grün) und Bis-MSB (blau)), werden im verdunkelten Raum mit einer UV-Lampe (366nm) bestrahlt. Dadurch wird eine starke Lumineszenz der Verbindungen hervorgerufen.



Abb. 1: Luminophore bei Tageslicht [1]

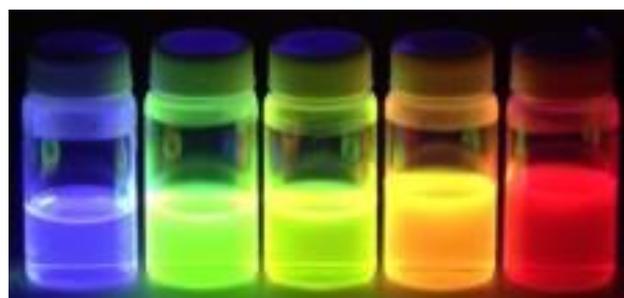


Abb. 2: Luminophore bestrahlt mit UV-Licht [1]

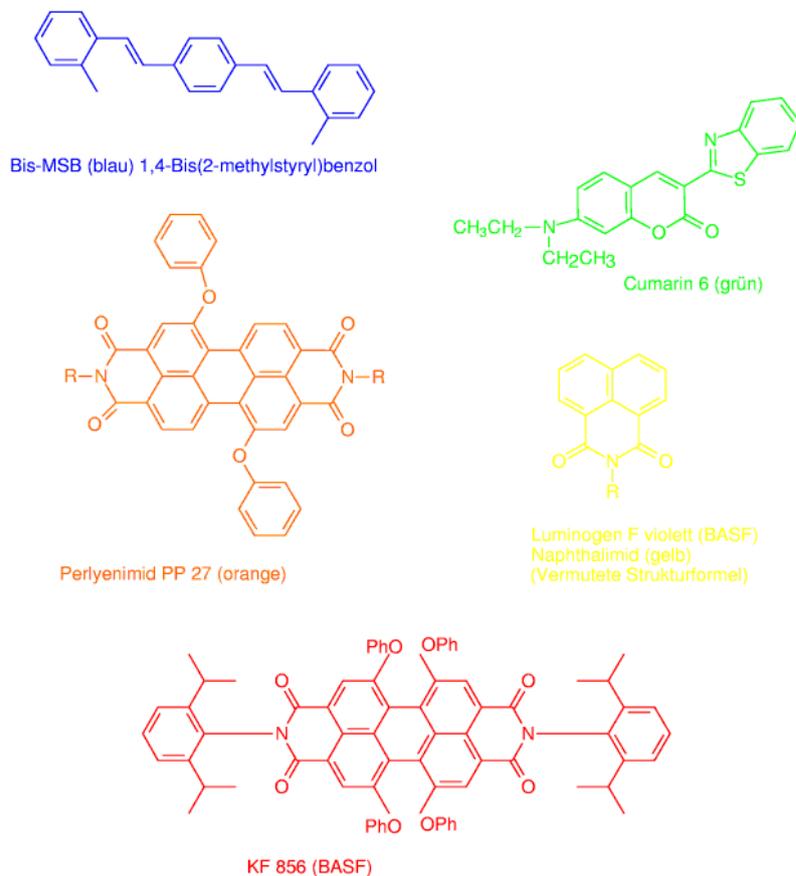


Abb. 3: Strukturformeln der Luminophore [1]

Energieabsorption durch Materie kann zur Emission von elektromagnetischer Strahlung führen. Bewirkt die aufgenommene Energie nicht nur eine Erhöhung des Wärmeverrats, sondern auch die Bildung von angeregten Zuständen, so bezeichnet man deren strahlenden Zerfall allgemein als Lumineszenz.

In manchen Wissenschaftsgebieten wird der Oberbegriff Lumineszenz in die beiden Fälle Fluoreszenz und Phosphoreszenz unterteilt. Auf diese beiden Begriffe wird zu einem späteren Zeitpunkt des Vortrags genauer eingegangen.

Die Lumineszenz-Prozesse lassen sich auch nach Art der Energiezufuhr einteilen. Sie werden unterschieden in:

Photo-Lumineszenz:	Hier wird das Elektron durch optische Anregung (Bestrahlung) in den höheren Energiezustand gebracht.
Elektro-Lumineszenz:	Die Emission von Licht wird durch Anlegen eines elektrischen Felds hervorgerufen.
Thermo-Lumineszenz:	Erhöhung des Energiegehalts eines Elektrons durch thermische Einwirkung.
Radio-Lumineszenz: (Röntgen-Lumineszenz)	Hierbei werden von außen Teilchen in geeignetes Material geschossen, z.B. Elektronen, alpha-Teilchen. Die einfallende radioaktive Strahlung führt dann zur Lumineszenz.
Chemo-Lumineszenz:	Bei dieser Form der Lumineszenz liefert eine chemische Reaktion die Energie, um das Elektron in einen höheren Energiezustand zu heben.

Im Fortlauf des Vortrages wird vor allem auf die Chemolumineszenz eingegangen. Diese und ihr Sonderfall, die Biolumineszenz, werden im Folgenden genauer definiert. Weiterhin werden die Voraussetzungen für eine gut auswertbare Chemolumineszenz und ein allgemeiner Reaktionsverlauf dargelegt. Dieser theoretische Teil wird dann in einigen ausgewählten Beispielen angewendet, wobei mit einer Demonstration zur Lumineszenz/Fluoreszenz zur Chemolumineszenz übergeleitet wird. Außerdem wird der aktuelle Stand der Forschung im Bereich Chemolumineszenz aufgezeigt und Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt.

Einstieg 2:

Trotz völliger Dunkelheit leuchtende bunte Farben? Wie beispielsweise aufleuchtende Spuren in der Kriminalistik, bunte Partyleuchtstäbchen oder flimmernde Leuchtkäfer. Die einen weisen auf Blutspuren hin, die anderen dienen zur Deko oder unterhalten junge Menschen in Nachtclubs und letztere fliegen an sommerlichen Abenden umher.



Abb. 4: Aufleuchtende Blutspuren in der Kriminalistik [2]



Abb. 5: Bunte Knicklichter [3]



Abb. 6: Leuchtender Leuchtkäfer [4]

Bei allen genannten Beispielen liegt Chemolumineszenz vor.

Was nun unter dem Phänomen „Chemolumineszenz“ verstanden wird, in welchem Zusammenhang hierzu die Biolumineszenz steht, inwieweit die Kriminalistik mit dieser Reaktion arbeitet und wie Knicklichter zum Leuchten gebracht werden, wird nun in diesem Vortrag genauer erläutert.

1 Das Phänomen „Chemolumineszenz“

Als Chemolumineszenz oder auch Chemilumineszenz, wird eine mit einer chemischen Reaktion verbundene Lumineszenz bezeichnet, d.h. die Emission von Licht. Meist im sichtbaren Bereich bei Wellenlängen zwischen 400 und 700nm, aber auch von ultraviolettem, eventuell auch von infrarotem Licht. Die Temperatur liegt dabei deutlich unterhalb der Glühtemperatur der beteiligten Substanzen. Man spricht auch von „kaltem Licht“.

Wird derartiges Licht von Organismen mit arteigenen, spezifischen Luminogenen enzymkatalysiert erzeugt, spricht man von Biolumineszenz. Etwa 90 Prozent aller bekannten Tiefseeorganismen leuchten, ihnen dient es als Drohsignal oder zur Anlockung von Beutetieren.



Abb. 7: Laternenfisch (*Photoblepharon palpebratus*) [5]

Siehe auch Links zur Biolumineszenz bzw. Chemolumineszenz:

- [Leuchten um zu leben - Das Phänomen Biolumineszenz](#)
- [Chemoluminescence Homepage](#)

2 Basis für die Chemolumineszenz

Um eine relativ starke, d.h. analytisch gut verwertbare Chemolumineszenz zu erhalten, muss ein System mehreren Ansprüchen genügen:

- der Lumineszenz muss ein exergonischer Prozess zugrunde liegen, der zwischen ca. 160 und 320kJ/mol liefert (z. B. blaues Licht der Wellenlänge 450nm liefert 254kJ/mol (ca. 2,75 Elektronenvolt), grünes Licht der Wellenlänge 500nm liefert 228kJ/mol (ca. 2,48 Elektronenvolt), rotes Licht der Wellenlänge 600nm liefert 190kJ/mol, was ca. 2,07 Elektronenvolt entspricht);
- es muss Atome oder Moleküle enthalten, die sich unter den gegebenen Bedingungen in einen geeigneten elektronisch angeregten Zustand überführen lassen;
- die Fluoreszenz-Quantenausbeute der angeregten Spezies muss möglichst hoch sein. Das Maß für die Effizienz einer chemolumineszenten Reaktion ist die Chemolumineszenz-Quantenausbeute (ϕ_{CL}), d.h. die Anzahl der emittierten Photonen pro reagierendem Molekül:

$$\phi_{CL} = \phi_R * \phi_{ES} * \phi_F$$

ϕ_R = Ausbeute an Reaktionsprodukt

ϕ_{ES} = Ausbeute an Reaktionsprodukt im elektronisch angeregtem Zustand

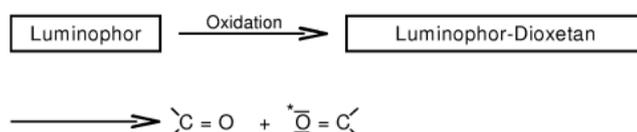
ϕ_F = Fluoreszenzquantenausbeute

Bei der Mehrzahl der starken Chemolumineszenzen handelt es sich um Oxidationsreaktionen unter Beteiligung von Sauerstoff. Deshalb wird auch in den folgenden Ausführungen nahezu ausschließlich darauf eingegangen [nach 15, S. 227].

3 Prinzip der Chemolumineszenz-Reaktion

Bei der Chemolumineszenz wird chemische Energie in elektronische Energie oder seltener in Schwingungsenergie umgewandelt. Dabei wird vorausgesetzt, dass diese Energiefreisetzung auf einmal, d. h. nicht in zahlreichen Stufen, erfolgt. Chemolumineszenz tritt bei zahlreichen chemischen Prozessen auf, in denen energiereiche, in-stabile Zwischenstufen entstehen und sofort wieder zerfallen. "Obwohl die Aufklärung des Reaktionsmechanismus vieler Chemolumineszenz-Reaktionen noch nicht end-gültig abgeschlossen ist, wurde das Konzept der Bildung energiereicher Vierringsysteme (Dioxetane) in vielen Fällen experimentell bestätigt" [15, S. 227].

Allgemeine Reaktionsgleichung einer Chemolumineszenz-Reaktion



Beispiel-Reaktion

Lichterzeugung bei Leuchtkäfern

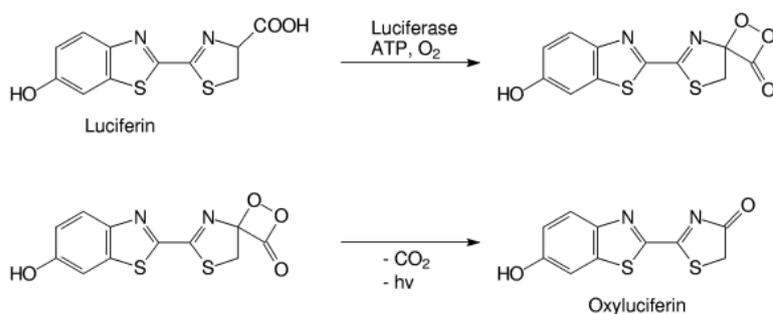


Abb. 8: Allgemeiner Reaktionsmechanismus mit Beispielreaktion (Lichterzeugung bei Leuchtkäfern) [nach 16]

Reaktion von Sauerstoff O₂, Peroxiden R₂O₂, Hyperoxiden O₂⁻, oder Hydroperoxiden RO₂H mit Luminophoren entstehen oft Dioxetane, wie 1,2-Dioxetane oder 1,2-Dioxete, die ihrerseits in zwei Carbonylverbindungen zerfallen. Dabei entsteht eine von ihnen im elektronisch angeregten Zustand [nach 15, S. 227].

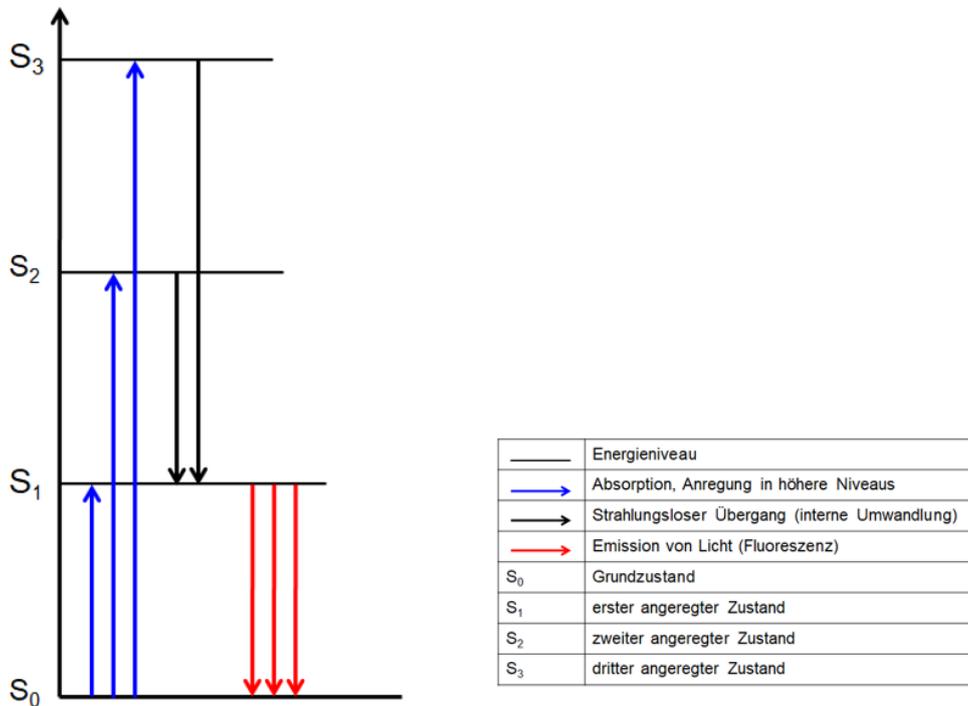


Abb. 9: Vereinfachtes Jablonski-Diagramm mit Legende [nach 6]

Das Bruchstück im elektronisch angeregten Zustand kann durch Abgabe von Energie, in Form eines Lichtquants, in den Grundzustand zurückkehren (S₀). Dabei senden die Moleküle Licht im sichtbaren Bereich des Spektrums aus, das Fluoreszenzlicht. Die Emission von Fluoreszenzlicht erfolgt vom niedrigsten angeregten Zustand aus (S₁). Elektronen, die von höheren Energieniveaus auf darunter liegende fallen, senden dabei also kein Licht im sichtbaren Bereich aus, daher ist dies ein strahlungsloser Übergang [nach 6].

4 Ausgewählte Anwendungsbeispiele

4.1 Fluoreszenz

Versuch 1: Fluoreszenz von Chlorophyll

Ziel: Hierbei werden Chlorophyll-Moleküle (Fotopigmente) elektronisch angeregt. Bei der Rückkehr der Chlorophyll-Moleküle in den Grundzustand wird die elektronische Anregungsenergie in Form roter Lichtquanten abgegeben.

Geräte:	<ul style="list-style-type: none"> • Mörser • Pistill • Schere • Küvette 	<ul style="list-style-type: none"> • Messzylinder 50 ml • UV-Lampe (Bereich 254-366nm) • Filtertrichter mit Faltenfilter
Chemikalien/Material:	<ul style="list-style-type: none"> • Aceton und Methanol • Calciumcarbonat • Seesand • grüne Blätter (Gras, Brennnessel, Spinat) 	

Vorbereitung:	<p>Herstellung einer Rohchlorophyll-Lösung:</p> <p>Es werden ca. 5g Blätter mit einer Schere in kleine Stücke zerschnitten und in einem Mörser mit 30ml Aceton oder Methanol (Lösungsmittel für Chlorophyll) unter Zusatz von ca. 5g Seesand und 1g Calciumcarbonat (dient zur Neutralisation des sauren Zellsaftes) zerrieben.</p> <p>Die so erhaltene Rohchlorophyll-Lösung (sie enthält auch noch Carotinoide und Xanthophylle) wird filtriert und in eine Küvette gefüllt.</p>
Durchführung:	<p>Die mit Rohchlorophyll-Lösung gefüllte Küvette wird im Dunkeln mit UV-Licht (366nm) bestrahlt. Sofort tritt die charakteristische blutrote Fluoreszenz des Chlorophylls auf.</p> <p>Die anderen in der Rohchlorophyll-Lösung vorhandenen Pigmente stören dabei nicht, da sie keine Eigenfluoreszenz zeigen. [nach 14]</p>

Bei dieser in-vitro-Fluoreszenz wird die Anregungsenergie des UV-Lichts vollständig in Form von Wärme und Lichtquanten frei. Bei den lebenden grünen Pflanzen hingegen wird ein Großteil der absorbierten Sonnenenergie für die Fotosynthese genutzt und nur ein verhältnismäßig geringer Anteil in Form von Wärme und Fluoreszenz an die Umgebung abgegeben. Wird die Sonneneinstrahlung so stark, dass eine Pflanze die absorbierte Energie nicht mehr durch Fotosynthese verbrauchen kann, steigt die Chlorophyll-Fluoreszenz merklich an.

4.2 Chemolumineszenz im Alltag

Versuch 2: Luminol-Reaktion

Ziel: Ein in der Schule bekanntes Beispiel für einen Oxidationsprozess, bei dem die Reaktionsenergie nicht als Wärme, sondern ausschließlich als Lichtenergie abgestrahlt wird, ist der Luminol-Versuch („Kaltes Licht“, auch in Campingzubehörgeschäften zu kaufen). Die Reaktion beruht auf der oxidativen Freisetzung von Stickstoff aus Phthalsäurehydrazid (Luminol) durch Einwirkung von alkalischem Wasserstoffperoxid. Diese Reaktion wird durch rotes Blutlaugensalz (Hexacyanoferrat(III)) katalysiert. (Bemerkenswert ist, dass die Lumineszenz nicht nur durch Wasserstoffperoxid, sondern auch durch Ozon ausgelöst werden kann).

Geräte:	<ul style="list-style-type: none"> • Trichter (d=15cm) • Stativmaterial • 3 Standkolben (1 x 1000ml; 2 x 500ml)
Chemikalien:	<ul style="list-style-type: none"> • Luminol (3-Aminophthalsäurehydrazid) • Natronlauge (w=5%) ätzend • Kaliumhexacyanoferrat(III) • Wasserstoffperoxid (w=3%)

Vorbereitung:	<p>Man befestigt den Trichter über dem 1000ml Kolben. In den beiden 500ml Kolben werden folgende Lösungen angesetzt:</p> <p>Lösung A: Es werden 0,05g Luminol in 5ml Natronlauge (w=5%), gelöst und die Lösung anschließend mit 450ml Wasser aufgefüllt. Kräftig mischen.</p> <p>Lösung B: Zu einer Lösung von 0,2g Kaliumhexacyanoferrat(III) in 450ml Wasser, werden 10ml Wasserstoffperoxid (w=3%) hinzugegeben.</p> <p>Bei diesen Angaben handelt es sich um Richtwerte, die ungefähr eingehalten werden sollten.</p>
Durchführung:	<p>Der Inhalt der beiden Kolben wird über den Trichter im 1000ml Kolben zusammengegossen. Sobald die beiden Flüssigkeiten zusammenkommen, tritt eine bläulich-violette Chemolumineszenz ein, die auch noch einige Zeit anhält.</p> <p>Das Leuchten lässt sich durch Zugabe von Kaliumhexacyanoferrat(III) nochmals kurz anregen.</p>

Luminol zeigt in alkalischer Wasserstoffperoxid-Lösung eine schwache, jedoch langanhaltende Chemolumineszenz, deren Intensität durch bestimmte Katalysatoren (z. B. Kaliumhexacyanoferrat(III), Häm) verstärkt wird, allerdings unter gleichzeitiger Verminderung der Abklingzeit. Die intensiv blaue Chemolumineszenz bei der alkalischen Oxidation des Luminols, gehört zu den intensivsten Chemolumineszenz-Erscheinungen, die bis heute bekannt sind.

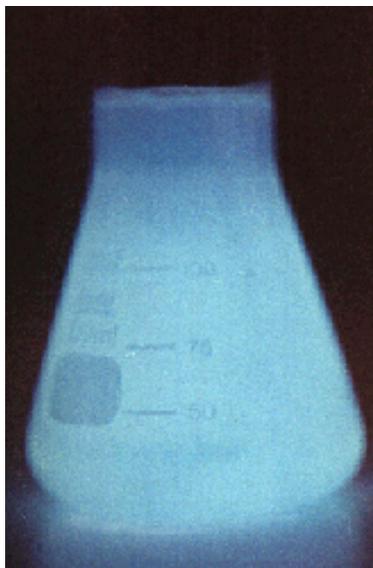
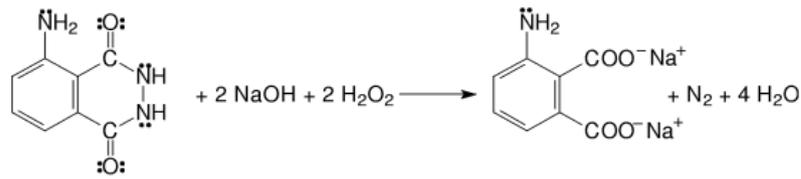


Abb. 10: Lumineszenz des Luminols [1]

Auf Grund dessen ist diese Reaktion bisher auch am umfassendsten untersucht worden. Allerdings ist der Mechanismus der Luminol-Reaktion noch nicht vollständig bekannt.

Gesamtreaktion und Mechanismus der Luminol-Reaktion

Gesamtreaktion



Mechanismus

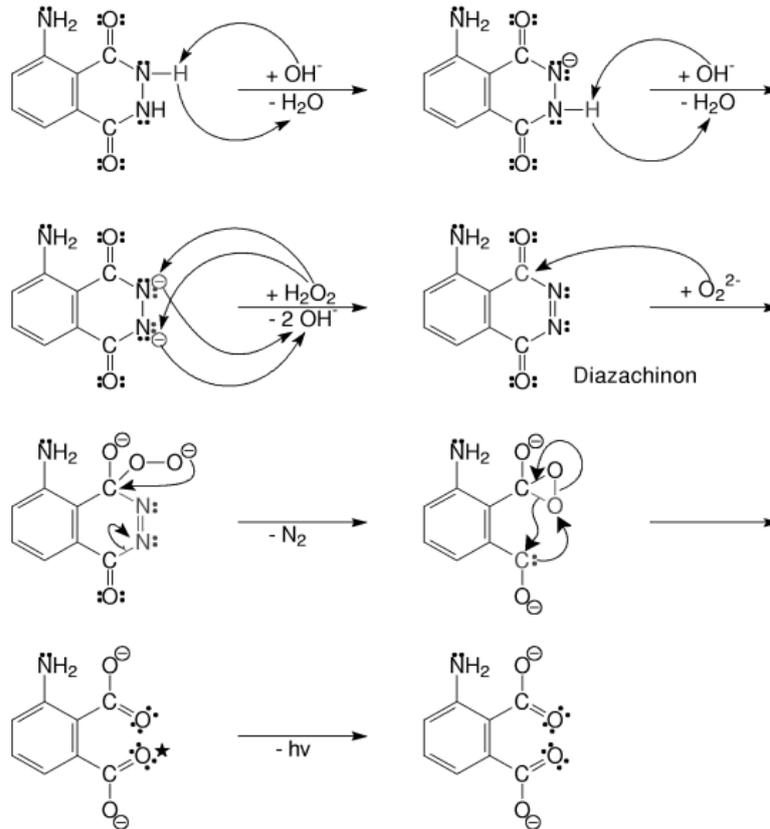


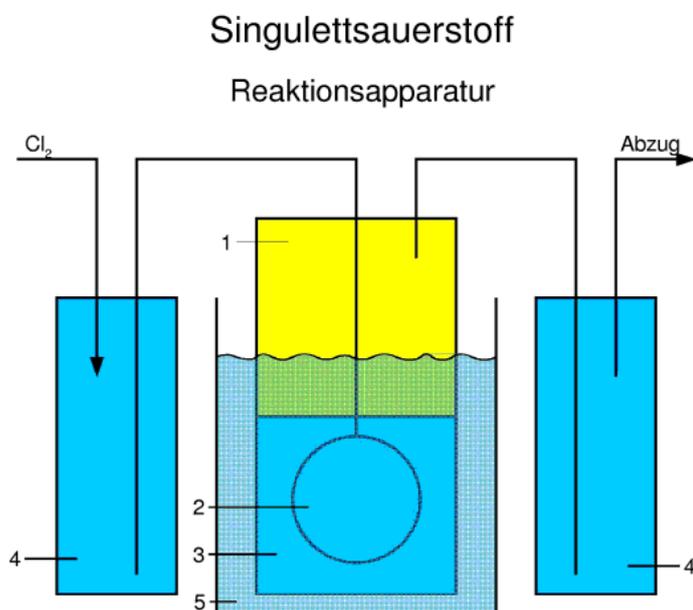
Abb. 11: Vereinfachter Mechanismus der Luminol-Reaktion [7]

Anwendungsmöglichkeiten der Luminol-Reaktion:

- Mit Hilfe des Luminols als Chemolumineszenz-Indikator lassen sich Spuren von Schwermetallen, soweit sie die Luminol-Reaktion katalysieren, nachweisen.
- Auch Blutspuren, z.B. in der Kriminalistik, lassen sich durch das in ihnen enthaltene Hämin-Eisen nachweisen.
- Rettungsboote führen Luminol-Präparate mit sich, die auf das Wasser geworfen, das Boot mit einer nachts weithin sichtbaren Leuchtzone umgeben.

Versuch 3: Singulett-Sauerstoff

Ziel: Der Singulett-Sauerstoff hat verschiedene Eigenschaften, wobei seine faszinierendste die Chemolumineszenz ist. Um sie beobachten zu können, muss der elektronisch angeregte Singulett-Sauerstoff chemisch erzeugt werden. Durch Energieumwandlung wird dann die gespeicherte elektronische Energie als rotes Leuchten sichtbar.



- 1 = Reaktionsgefäß, z. B. Gaswaschflasche 500 ml
2 = Glasfritte (G-3 Porosität)
3 = Reaktionslösung
4 = Sicherheitsvorschaltflaschen (250 ml)
5 = Becherglas (1000 ml) mit Eiswasser

Abb. 12: Reaktionsapparatur [nach 13]

Apparatur:	<p>Am einfachsten verwendet man eine Gaswaschflasche. Das Einleitungsrohr sollte mit einer Glasfritte versehen sein, so dass das Chlorgas fein verteilt wird. Man kann die Apparatur jedoch auch selbst aus einem großen Reagenzglas, einem doppelt durchbohrten Gummistopfen und Glasrohren herstellen.</p> <p>(Problem: Chlor greift Gummi an!).</p> <p>Es ist zu empfehlen, Sicherheitsflaschen vor und hinter der Reaktionsapparatur anzubringen. Außerdem muss für eine gute Ableitung des ausströmenden Chlorgases gesorgt werden.</p>
Chemikalien:	<ul style="list-style-type: none">• Wasserstoffperoxid (w=30%)• Natronlauge (n=4mol/l)• Chlorgas aus der Stahlflasche

Durchführung:

Die beiden Ausgangssubstanzen werden getrennt im Eisbad gekühlt und erst unmittelbar vor dem Versuch unter Eiskühlung vorsichtig vermischt.

VORSICHT! Wasserstoffperoxid zersetzt sich in alkalischer Lösung relativ rasch! Deshalb muss das Reaktionsgefäß gut gekühlt werden.

Die erhaltene Lösung wird jetzt in die gekühlte Reaktionsapparatur gegeben. Im Dunkeln leitet man nun Chlorgas durch die weiterhin gekühlte Lösung (die Reaktion ist stark exotherm!). Dabei kann man ein rotes Leuchten beobachten, das je nach Einleitungsgeschwindigkeit ein bis fünf Minuten anhält. Bei schnellem Einleiten erhält man eine höhere Lichtintensität, die jedoch weniger lange anhält. Die Lichtemission geht dabei von der Oberfläche der Gasblasen aus. Das lässt sich bei sehr langsamem Einleiten sehr gut beobachten. [nach 13]

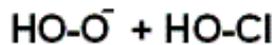


Abb. 13: Reaktionsgleichung für die Chemolumineszenz des Singulett-Sauerstoffs [nach 13]

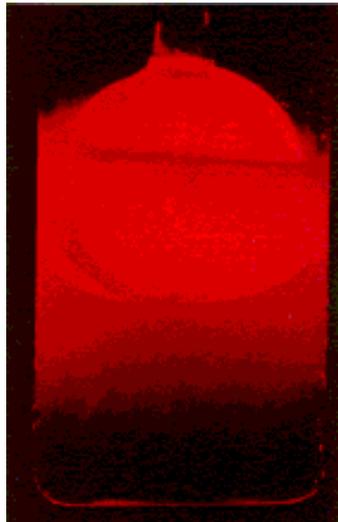


Abb. 14: Lumineszenz des Singulett-Sauerstoffs [13]

Versuch 4: Knicklichter

Ziel: Die Schüler kennen von Feiern oder aus Cocktail-Bars Knicklichter als Party- oder Spaßartikel. Durch konkrete Informationen sollen sie deren Aufbau und die Chemie hinter der Leuchterscheinung kennenlernen. Außerdem sollen sie die Gefahren, die von Knicklichtern ausgehen können, erkennen.

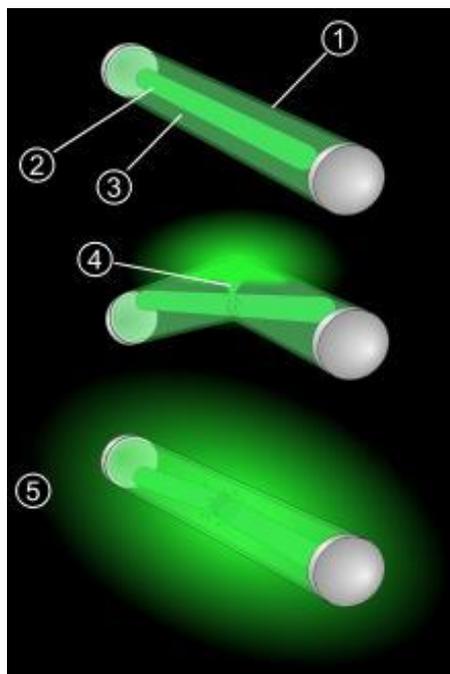


Abb. 15: Aufbau eines Knicklichts [16]; Legende siehe unten.

Aufbau:	Wie in Abbildung 15 zu sehen, besteht das Knicklicht aus: <ul style="list-style-type: none">• einer umgebenden Kunststoffhülle (PVC oder PE) (1)• einem innen liegenden Glasröhrchen (2) in dem sich Wasserstoffperoxid befindet• einem Zwischenraum (3) der mit Chemikalien gefüllt ist (Farbstoff, Oxalsäureester und Lösungsmittel)
Funktionsweise:	Durch das Knicken des Knicklichtes, bricht das Glasröhrchen im Inneren des Kunststoffstabes (4). Das darin enthaltene Wasserstoffperoxid tritt aus und mischt sich mit den Chemikalien aus dem Zwischenraum. Die Reaktion, die das Leuchten hervorruft, kann ablaufen (5).
Reaktion:	Die ablaufende Reaktion ist ähnlich zu der, die beim Luminol-Versuch abläuft (vergleiche Versuch 2). Durch Verwendung verschiedener aromatischer Ausgangsstoffe (Farbstoffe), kann die Farbe, in der das Knicklicht leuchtet, variiert werden (Rubren = gelb, Rhodamin B = rot (vgl. Abb.16 und 17)).

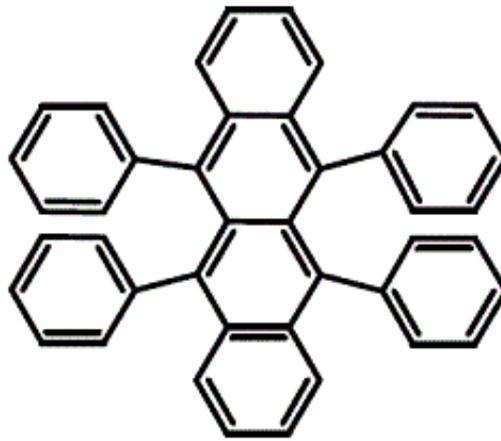


Abb. 16: Rubren [1]

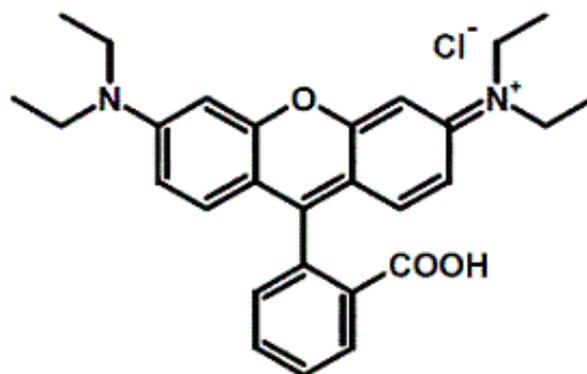


Abb. 17: Rhodamin B [1]

4.3 Aktuelle Beispiele

4.3.1 Chemolumineszenz-Immunoassays

Das Chemolumineszenz-Immunoassay dient zum Nachweis vieler biochemisch oder klinisch-chemisch relevanter Substanzen (Hormone, Eiweiße, Medikamente), die nur in sehr geringen Konzentrationen (Nanomol (10^{-9}) oder Picomol (10^{-12}) pro Liter) in den zu untersuchenden Körperflüssigkeiten (Blut, Harn u. a.) vorliegen. Grundlage dieses Nachweises ist eine Antigen-Antikörper-Reaktion, wobei entweder das Antigen oder der Antikörper mit einer Peroxidase markiert ist. Die Peroxidase reagiert mit einer Signalreagenz (Luminol/Wasserstoffperoxid/Verstärker). Dadurch wird ein Lichtsignal ausgesendet, das wiederum gemessen werden kann.

4.3.2 Chemolumineszenz und Tumorthherapie

Bereits heute stellt die Bestrahlung von Tumorgewebe (Phototherapie) eine praktizierte Alternative zu anderen Tumortherapien dar. Voraussetzung dafür, ist die Anwesenheit eines Sensibilisators (Hämatoporphyrin-Derivate), der die Eigenschaft besitzt, sich nach dem Verabreichen selektiv im Tumorgewebe anzureichern. Die Tumorzellen werden dann einerseits durch die entstehenden Sauerstoffspezies, z.B. Singulett-Sauerstoff, irreversibel geschädigt. Außerdem können durch Wechselwirkungen zwischen Sensibilisator und Biomolekülen toxische Radikale gebildet werden, die das Tumorgewebe ebenfalls schädigen.

Ausblick:

Es werde Licht! Seit dem Aufleuchten der ersten Glühbirne suchen Generationen von Forschern nach weiteren Methoden, mit elektrischer Spannung Licht zu erzeugen. In den vergangenen Jahren wurden organische Substanzen erforscht, mit denen sich bunt leuchtende, hauchdünne und flexible Folien konstruieren lassen. Mit dem Kunststoff Baytron P gelang schließlich der Durchbruch, denn das durchsichtige Material verbessert die Lebensdauer organischer Leuchtdioden (OLED) so sehr, dass Elektronikkonzerne bereits an der Technik für die Farbbildschirme der Zukunft arbeiten: Fernseher werden wie Poster an der Wand hängen oder liegen als Schreibunterlage auf dem Tisch, Laptops werden federleicht und Armaturen, Handys und Uhren präsentieren haufenweise Infos in bunten Leuchtfeldern.

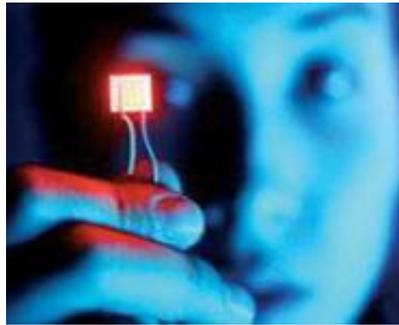


Abb. 18: Leuchtdiode [17]



Abb. 19: Farbdisplay aus OLEDs; in den Gläsern die Ausgangssubstanzen [18]



Abb. 20: OLED Display [19]

Die Forschung im Bereich der Lumineszenz ist, wie Abbildung 21 zeigt, immer schneller vorangetrieben worden. Dabei konnten erhebliche Steigerungen der Lichtausbeute (Lumen/Watt) erzielt werden. Die effizientesten LEDs erreichen zurzeit eine Lichtausbeute von 200Lumen/Watt, der Durchschnittswert liegt allerdings bei ca. 140Lumen/Watt. Ein Ende der Entwicklung ist nicht absehbar, so dass es nicht möglich ist, langfristige Zukunftsprognosen zu erstellen. Allerdings liegt das physikalisch berechnete Maximum, eine Leistung von 100Prozent, bei 350Lumen/Watt [nach 22].

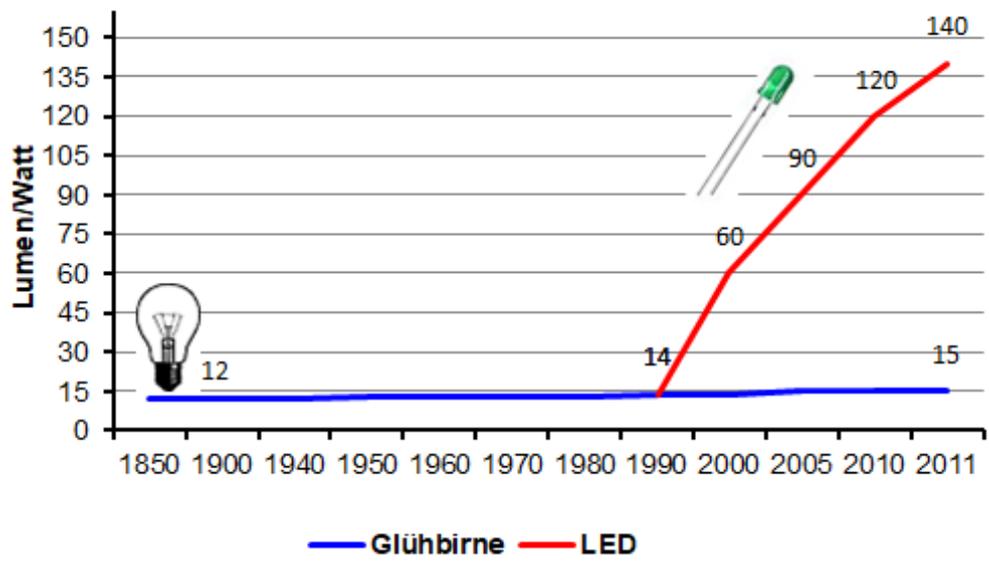


Abb. 21: Entwicklung der Lichtausbeute [nach 21]

Quellen:

1. Eigentum Andreas Dörfler.
2. https://media.springernature.com/original/springer-static/image/art:10.1007%2Fs11298-012-1391-y/MediaObjects/11298_2012_1391_Fig2_HTML.jpg, 04.06.2020.
3. <https://www.lampe.de/magazin/knicklichter-wie-funktionieren-sie/> 04.06.2020.
4. <https://www.gartengnom.net/gluehwuermchen-leuchtkaefer-im-naturgarten/> , 04.06.2020.
5. Link verschollen, 04.06.2020.
6. <http://www.chemie.uni-jena.de/institute/oc/weiss/fluoreszenz.htm> , 18.07.2011.
7. Link verschollen, 04.06.2020.
8. Riedel, E.: Anorganische Chemie, De Gruyter, Berlin 1990.
9. Holleman, A.F., Wiberg, E.: Lehrbuch der Anorganischen Chemie, De Gruyter, Berlin 1995.
10. Dettner, K., Peters; W.: Lehrbuch der Entomologie, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1999.
11. Brandl, H.: Das Phänomen der Chemolumineszenz. Praxis der Naturwissenschaften-Chemie in der Schule, Heft 3, 1980, 65-73.
12. Brandl, H.: Chemolumineszenzreaktionen unter Beteiligung von Singulett-Sauerstoff. Praxis der Naturwissenschaften-Chemie in der Schule, Heft 1, 1993, 24-26.
13. Adam, W., Baader W.: Singulett-Sauerstoff - Chemische Erzeugung und Chemolumineszenz. Chemie in unserer Zeit, Heft 5, 1982, 169-171.
14. Brandl, H.: Das Experiment: Zur Chemolumineszenz von Chlorophyll. Chemie in unserer Zeit, Heft 2, 1986, 63-66.
15. Brandl, H., Albrecht S., Adam W.: Chemilumineszenz-Reaktionen. Chemie in unserer Zeit, Heft 5, 1990, 227-238.
16. <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtstab> , 18.07.2011.
17. www.mensch-einstein.de/mythos/fragen/sequenz_jsp/key=2310.html , 18.07.2011.
18. <http://www.oled.at/projekt-nemo-elf-partner-forschen-an-neuen-oled-materialien> , 18.07.2011.
19. www.oled.beleuchtung-mit-led.de/ , 18.07.2011.
20. <http://de.wikipedia.org/wiki/Luciferin> , 21.07.2011.
21. Link verschollen, 04.06.2020.
22. http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#cite_note-10 , 22.07.2011.