

Was kommt heraus, wenn eine Anorganische Chemikerin und ein Physikalischer Chemiker eine gemeinsame Experimentalvorlesung in der Weihnachtszeit halten? So etwas wie eine Mischung aus Komödie und Tragödie ..., weder Fisch noch Fleisch? Wohl kaum! Entstanden ist ein „erleuchtender“ Streifzug durch die Chemie – von den Quellen des Lichts hin zu Klassikern des Demonstrationsversuchs.

Eine weihnachtliche Experimentalvorlesung Chemie und Licht

BARBARA ALBERT UND JÜRGEN JANEK

Wie kommt man auf die Idee, eine Weihnachtsvorlesung zum Thema „Chemie und Licht“ zu halten?

Die Antwort ist einfach: Es ist in der Chemie gute Tradition, in der Weihnachtszeit eine besondere, öffentliche Vorlesungsstunde (Abbildung 1) zu gestalten. Dabei verlässt man den Rahmen der manchmal trockenen Pflichtvorlesungen und versucht, die eher humorvollen und sinnlichen Aspekte einer Wissenschaft zu vermitteln, die für viele Menschen nicht nur unverständlich, sondern oft auch fremd und angsteinflößend erscheint. Zudem spielt das Thema „Licht“ in der Weihnachtszeit eine besondere Rolle, sei es in der Form von brennenden Kerzen oder dem leuchtenden „Stern von Bethlehem“. Um eine öffentliche Vorlesung nicht zu spröde erscheinen zu lassen, brauchen wir Experimente. Wer aber die Chemie kennt, der weiß, dass nur wenige Experimente zum „Show-Knaller“ taugen. Oft sind die ablaufenden Reaktionen zu langsam, oder aber es passiert schlicht und ergreifend nichts auffällig Sichtbares. Es hat seinen guten Grund, dass sich der Prototyp der chemischen Experimentalvorlesung der Explosion widmet!

Wir wollen uns dem Thema im Sinne des Weihnachtsfestes etwas friedlicher annähern und uns chemischen Lichterscheinungen zuwenden, die nicht immer explosiv verlaufen müssen. Die Demonstration passender Experimente steht im Vordergrund, aber auch der Hintergrund dieser Experimente soll ein wenig „beleuchtet“ werden. Hierbei sind mit Sicherheit nicht alle Versuche für jeden faszinierend. Der Fundus wirklich bühnenfähiger Rezepte ist begrenzt und gehört zum Repertoire vieler Veranstaltungen. Dennoch hoffen wir, dass gerade die Verknüpfung von Theorie und Experiment – sowie der Bezug von Che-



mie zu kulturellen und geschichtlichen Aspekten – im Rahmen einer Weihnachtsvorlesung für Zuschauer und -hörer mit verschiedenen Erwartungshaltungen besonderen Reiz gewinnt. Wir beginnen mit der Frage nach der Identität von „Licht“ grundsätzlich um dann besonders eindrucksvolle chemische Lichterscheinungen vorzustellen.

Menschen und Licht

In einer Zeit, in der elektrisches Licht und dessen fast grenzenlose Verfügbarkeit zu einer Selbstverständlichkeit ge-

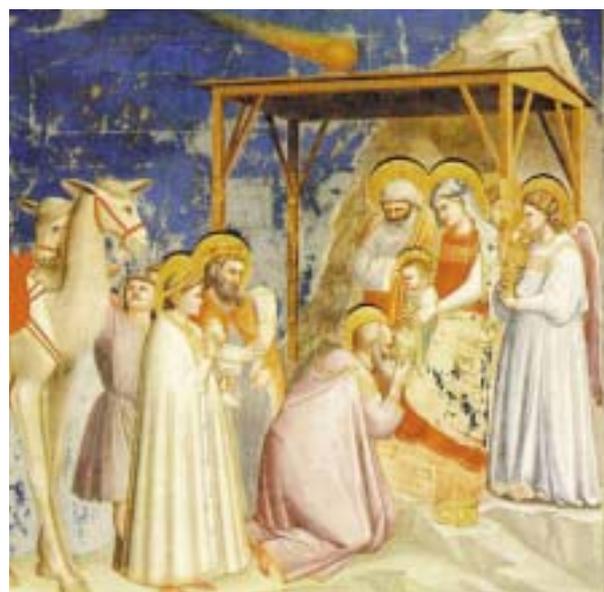


Abb. 2 Gemälde „Die Anbetung durch die Drei Heiligen Könige“ von Giotto (1267-1337); Cappella degli Scrovegni.

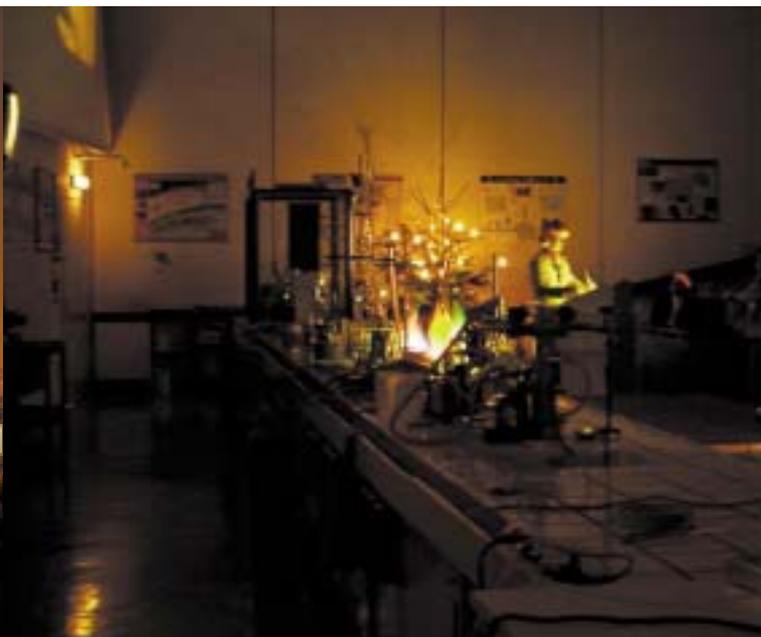


Abb. 1 Weihnachtsvorlesung 2000 im Großen Chemie-Hörsaal der Justus-Liebig-Universität Gießen.

worden sind, bemerken wir die Allgegenwart künstlichen Lichts gar nicht mehr. Nur im Fall eines Stromausfalls stellen wir unsere plötzliche Hilflosigkeit im Dunklen fest. Für unsere Ahnen war natürliches Licht – ausgehend von der Sonne und den Sternen – etwas ganz besonderes. Dementsprechend nimmt die Darstellung des Lichts in allen Kunstformen – besonders natürlich in der Malerei – eine wichtige Rolle ein. Ein wahrer Künstler im Umgang mit Licht war William Turner. In seinem Bild „Licht und Farbe“ kommt dies am Beispiel diffusen Sonnenlichts wunderschön zum Ausdruck. Weihnachtliches Licht in Form des „Sterns von Bethlehem“ findet sich in dem berühmten Fresko von Giotto (Abbildung 2), das die Anbetung des neugeborenen Christus durch die Heiligen Drei Könige darstellt.

Giotto selbst glaubte übrigens, dass der bekannte Halleysche Komet der Stern von Bethlehem gewesen sei. Er drückt dies in seinem Bild durch das Hinzufügen eines Kometenschweifs deutlich aus. Heute gehen wir eher davon aus, dass eine seltene Planetenkonstellation von Jupiter und Saturn – eine dreifache Konjunktion – die Ursache für eine besonders helle Lichterscheinung am Himmel zu Beginn des ersten Jahrtausends gewesen sein könnte [1].

Auch in der Musik gab es immer wieder Versuche, Licht und seine enorme Bedeutung darzustellen. Vielleicht am eindrucksvollsten ist dies Joseph Haydn in „Die Schöpfung“ gelungen. In seiner Vertonung der Schöpfungsgeschichte nimmt die Erschaffung des Lichts musikalisch eine ganz zentrale Rolle ein: Die Chorpassage „Es werde Licht!“ wird dargestellt durch einen atemberaubenden C-Dur-Akkord. So wie wir heute die Allgegenwart von Licht gewohnt sind, sind wir akustisch bereits unempfindlich geworden, so dass wir die Aufregung des Premierenpublikums im Österreich

des Jahres 1798 ob der ungeheuren Tonfolge nicht mehr nachvollziehen können.

Licht = Energie

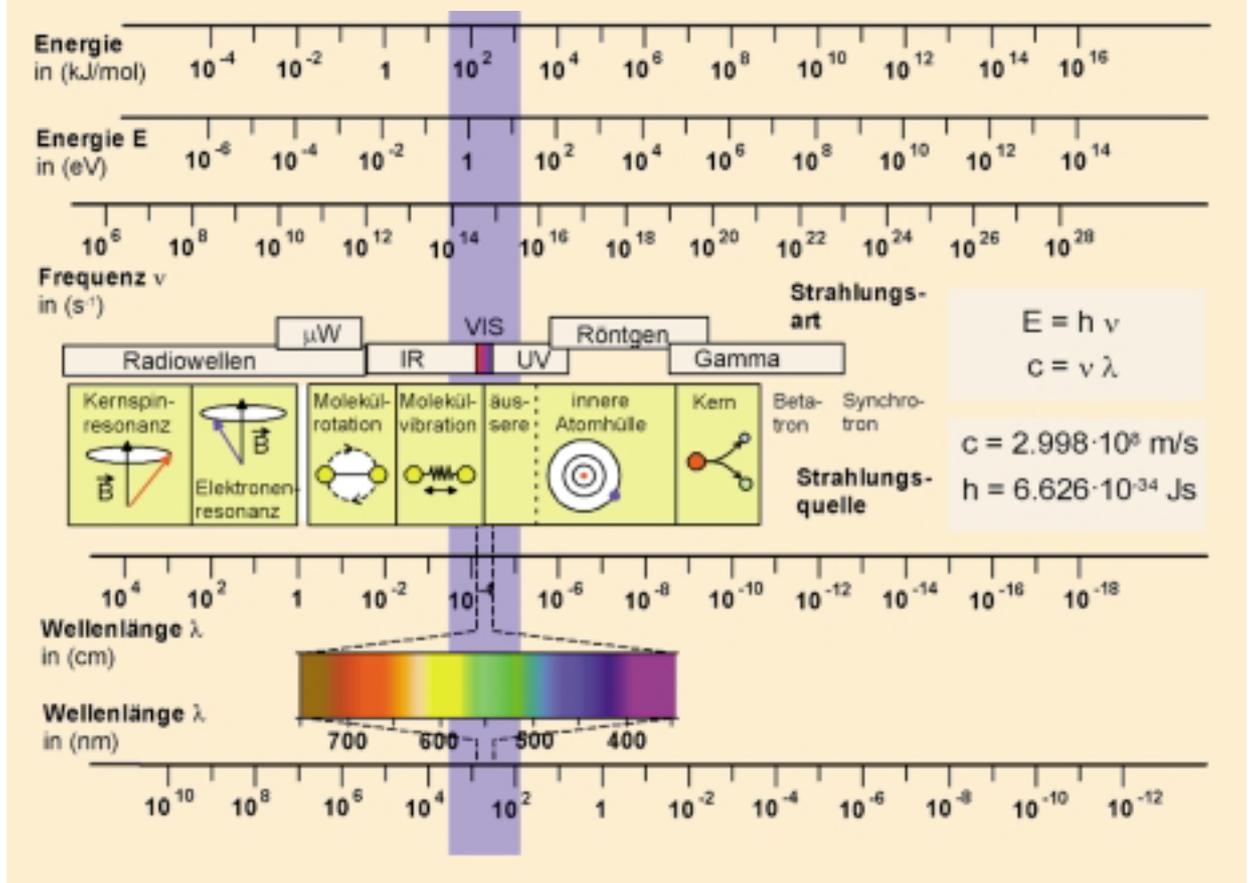
Für unser eher prosaisches Interesse an Licht spielt eine zentrale Rolle, dass Licht nichts anderes als Energie ist. Lichterscheinungen sind in der Chemie ein unverkennbares Indiz für chemische Reaktionen, in deren Verlauf grundsätzlich auch Energie umgesetzt wird. Ein Blick auf einen Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums zeigt dies sehr deutlich. Das sichtbare Licht mit seinen Wellenlängen im Bereich zwischen etwa 380 nm und 780 nm entspricht Energien im Bereich zwischen 1,6 eV und 3,3 eV. Umgerechnet in molare Energien ist dies der Bereich zwischen 154 kJ/mol und 315 kJ/mol. Genau in diesem Bereich liegen die Energien von vielen wichtigen chemischen Bindungstypen (s. Infobox „Licht = Energie“). Entsprechend kann sowohl beim Knüpfen oder beim Brechen chemischer Bindungen sichtbares Licht entstehen oder absorbiert werden.

Wichtig für unser heutiges Verständnis ist, dass Licht aus Quantenteilchen – den Photonen – besteht. Eine Lichtquelle ist daher nichts anderes als eine Quelle von Photonen. Welche Farbe und welche Helligkeit eine Lichtquelle zeigt, hängt von der Energie und der Menge der ausgesandten Photonen ab [2]. In den nachfolgenden Experimenten werden wir eine ganze Reihe verschiedener Lichtquellen kennenlernen, die sich jeweils durch eine ganz besondere Charakteristik der ausgesandten Strahlung auszeichnen. Wir können dabei unterscheiden zwischen „breitbandigen“ Quellen, die Licht (bzw. Strahlung) über weite Wellenlängenbereiche hinweg aussenden, und „dis-



Abb. 3 Kerzenlicht durch Verbrennung organischer Kohlenwasserstoff-Verbindungen.

LICHT = ENERGIE



kreten“ Quellen, die nur ganz bestimmte Wellenlängen emittieren.

„Künstliches“ Licht durch Verbrennung – Kerzen

Die chemische Lichterzeugung mit Hilfe einer Verbrennungsreaktion, die wir als Oxidation bezeichnen, stellt die älteste von Menschen genutzte Lichtquelle dar. Offene Flammen strahlen Licht und Wärme aus (Abbildung 3).

Noch im 19. Jahrhundert waren Kerzen oder Öllampen als Lichtquelle weit verbreitet. Das war nicht immer ungefährlich: So haben weltweit nur einzelne Theaterbauten der Barockzeit überhaupt das Licht des elektrischen Zeitalters erblickt. Der Rest ist der barocken Kerzenpracht, die zur Beleuchtung von Bühne und Zuschauerraum notwendig war, zum Opfer gefallen und verbrannt.

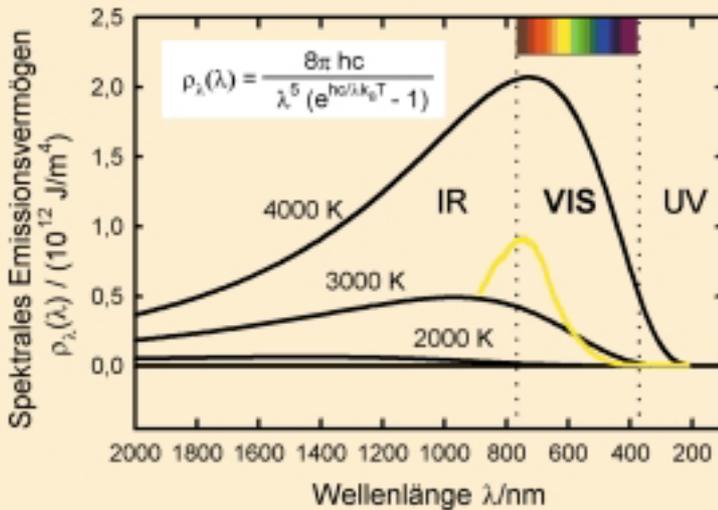
Bis in die Gegenwart hinein verbrennen wir immer noch Paraffin, um mit dem Licht kleiner Kerzen eine besonders romantische Atmosphäre zu erzeugen oder um die Teekanne auf Temperatur zu halten. Das entstehende Licht ist kompliziert zusammengesetzt, und die Erforschung der Chemie von Flammen ist ein wichtiges Gebiet der che-

mischen Kinetik in Gasen [4]. Prinzipiell kann man festhalten, dass aufgrund der hohen Flammentemperatur sowohl ganz bestimmte charakteristische Wellenlängen ausgesandt werden (Abbildung 7) als auch heiße Rußpartikel glühen und Licht aussenden. Bei der Gasflamme des Brunnenbrenners wird der Einfluss der Verbrennungsbedingungen auf die Flammenfarbe sehr schön deutlich: Bei geringer Luftzufuhr beobachten wir eine leuchtend gelbe Flamme, bei intensiver Luftzufuhr wird kaum Licht emittiert.

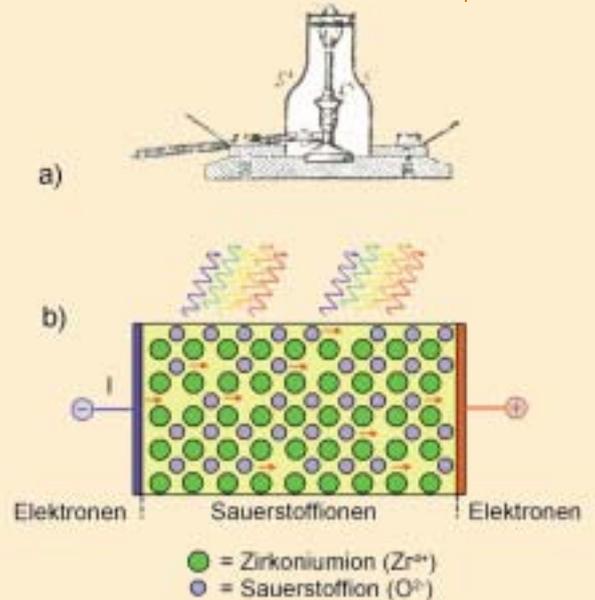
„Künstliches“ Licht – Elektrisches Licht

Ist das Kerzenlicht noch eine ziemlich chemische Angelegenheit, so wurde die Lichterzeugung mit der freien Verfügbarkeit von Elektrizität am Ende des 19. Jahrhundert eher eine Domäne der Physik. Im Zentrum der klassischen elektrischen Lichterzeugung steht schlicht das elektrische Heizen. Und obwohl uns heute das Glühen von Metalldrähten, die von einem großen Strom durchflossen werden, als Alltagsphänomen erscheint, war dessen vollständige Deutung der Beginn einer wissenschaftlichen Revolution – der Beginn der Quantentheorie.

DER SCHWARZE STRAHLER – „THERMISCHE LEUCHTMITTEL“



DIE NERNST-LAMPE UND IHRE DEUTUNG



Stromdurchflossene elektrische Leiter – in der Anwendung fast ausschließlich Metalle – erwärmen sich. Diese Erwärmung, auch als Joulescher Effekt oder Widerstandswärme bezeichnet, beruht auf der Übertragung von kinetischer Energie der bewegten Elektronen auf die im Kristallgitter auf festen Positionen „sitzenden“ Metallatome. Diese werden hierdurch zu stärkeren Schwingungen angeregt, was einer höheren Temperatur entspricht. Bei jeder Temperatur geben die schwingenden Metallatome wiederum Energie in Form von Strahlung an ihre Umgebung ab. Bei hinreichend hohen Temperaturen wird ein Teil dieser Energie auch in Form von sichtbarem Licht ausgesandt. In einem „Schwarzen Strahler“ ist das Strahlungsgleichgewicht zwischen Emission und Absorption eingestellt (s. Infobox). Das resultierende Emissionsspektrum ist charakteristisch für die Temperatur des schwarzen Strahlers und wurde erstmals von Max Planck (Nobelpreis für Physik 1918) theoretisch vollständig gedeutet. Hierzu musste er eine neue Naturkonstante, die heute als Plancksches Wirkungsquantum bezeichnet wird, einführen [4].

Eines der ersten elektrischen Leuchtmittel war die Kohlefadenlampe. Diese hatte zwar ein schönes Licht, war aber extrem empfindlich und teuer, da Kohlefäden bei hohen Temperaturen an Luft verbrennen und die Glaskörper daher aufwändig evakuiert werden mussten. Ein ungewöhnlicheres Leuchtmittel fand der Physikochemiker Walther Nernst (Nobelpreis für Chemie 1920) kurz vor 1900 [5].

Nernst fand bei Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit von farblosen keramischen Materialien (u. a. „Nernstmasse“), dass manche dieser Materialien bei hoher Temperatur (oberhalb 500 – 600 °C) sehr gute Leiter werden. Das war aus physikalischer Sicht ganz merkwürdig:

Diese Materialien waren weder Metalle noch elektronische Halbleiter. Aufgrund dieser Untersuchungen und der nachfolgenden theoretischen Arbeiten von C. Wagner und W. Schottky wissen wir heute, dass der verwendete keramische Leuchtstift ein reiner Ionenleiter ist. Während dieses Material heute als Leuchtmittel bedeutungslos ist, hat das zugrundeliegende Zirkon(IV)-oxid mit einer Dotierung von ca. 10 % Yttrium(III)-oxid als Festelektrolyt enorme Bedeutung in der Sensorik (als Lambda-Sonde) und der Technik der Hochtemperaturbrennstoffzelle. Das Nernstsche Experiment – es nutzt die Beweglichkeit von Sauerstoffionen im Kristallgitter – ist in der Infobox schematisch dargestellt. Eine moderne Nachbildung der ursprünglichen Nernst-Lampe und deren „Entzündung“ ist in Abbildung 4 zu sehen. Nernst selbst sprach von seiner Erfindung als dem einzigen elektrischen Licht, das man „wie eine Kerze anzündet und ausbläst“...

CHLOR-KNALLGAS-REAKTION

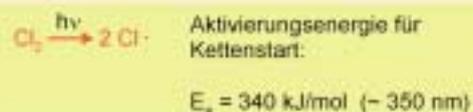
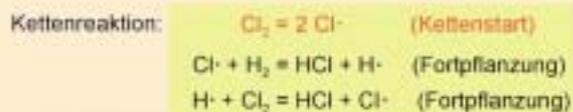
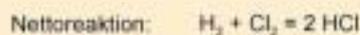
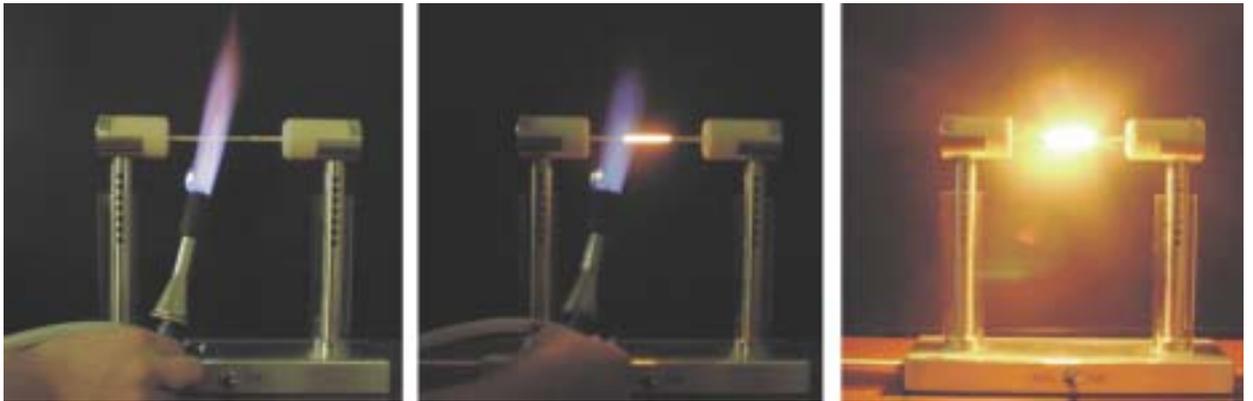


Abb. 4 „Anschalten“ einer nachgebauten Nernst-Lampe mit einem Bunsen-Brenner. Erst wenn der gesamte Stift aus YSZ (Yttrium-stabilisiertes Zirkonoxid) aufgrund einer hinreichend hohen Temperatur ionenleitend geworden ist, kann ein elektrischer Strom fließen. Nach kurzer Zeit brennt die Nernst-Lampe stabil und heizt sich selbst. Durch starkes Pusten kann die Temperatur des Stiftes soweit gesenkt werden, dass der Widerstand deutlich größer wird, die Eigenheizleistung abnimmt und die Lampe erlischt.



Die Nernst-Lampe ist aufgrund der darin ablaufenden Ionenleitung ein hervorragendes elektrochemisches Demonstrationsexperiment. Die in den Jahren um 1900 kommerziell erhältliche Nernst-Lampe war allerdings nur für kurze Zeit ein Erfolg. Nernst meldete ca. 20 Patente im Zusammenhang mit seiner Lampe an. Die AEG verkaufte mehrere 100.000 Stück, bevor Edison mit der wesentlich günstigeren Wolfram-Lampe, die wir auch heute noch nutzen, den Markt eroberte. Wie die Kohlefadenlampe basiert die Wolframfadenlampe wiederum auf der Widerstandsheizung durch bewegte Elektronen.

Auch unsere wichtigste Lichtquelle, die Sonne, ist ein „thermisches“ Leuchtmittel. Die in der Sonne ablaufenden Kernreaktionen halten die Sonnenoberfläche auf einer konstanten Temperatur von ca. 6000 °C. Die Temperaturen im Inneren der Sonne sind allerdings noch wesentlich höher. Charakteristisch für alle „thermischen“ Lichtquellen ist die Aussendung von Photonen ganz verschiedener Energie (Infobox S. 393). Das sichtbare Licht ist nur ein sehr kleiner Bereich des gesamten Strahlungsspektrums. Wie wir im Alltagsleben erfahren, senden alle „thermischen“ Lampen auch IR-Strahlung (Wärme) und UV-Strahlung aus.

Zerlegung von weißem Licht und Photochemie

Da weißes oder nahezu weißes Licht thermischer Lichtquellen immer eine Mischung von Strahlung verschiedener Energie bzw. verschiedener „Farbe“ ist, können die einzelnen Farbbeiträge mit Hilfe der Lichtbrechung isoliert werden. Im Demonstrationsexperiment gelingt dies auf einfache Weise mit einem optischen Prisma. Licht verschiedener Farbe bzw. Energie breitet sich in unterschiedlichen Medien verschieden schnell aus und wird beim Übertritt von einem Medium (z. B. Luft) in ein anderes Medium (Glas) gebrochen, also abgelenkt – und zwar umso stärker, je kleiner die Wellenlänge ist. In einem weiteren Experiment können wir nun zeigen, dass verschiedenfarbiges Licht tatsächlich verschiedenen Energiebeiträgen entspricht. Mangels Sonne in den meisten chemischen Hörsälen empfiehlt es sich, das Licht einer hellen Dia-Lampe mit einer Sammellinse zu fokussieren und mit einem Prisma zu zerlegen).

Im nächsten Schritt versuchen wir, mit Licht eine chemische Reaktion zu zünden (Infobox S. 393). Hierzu füllen wir unter Beachtung der notwendigen Sicherheitsmaßnahmen eine Mischung von Chlor und Wasserstoff, eine Chlor-Knallgasmischung, in ein Reagenzglas mit nicht zu fest sitzendem Stopfen (Abbildung 5). Chlor und Wasserstoff reagieren in einer Kettenreaktion miteinander zur Salzsäure, HCl. Hierzu ist als Startschritt die Spaltung des Chlormoleküls Cl_2 notwendig. Eine Rechnung zeigt, dass rotes Licht mit einer Wellenlänge von 600 nm keine hinreichend energiereichen Photonen bereitstellt. Blaues und UV-Licht sollte hingegen das Chlormolekül spalten können. Genau dies beobachten wir im Experiment: Unter rotem Licht bleibt

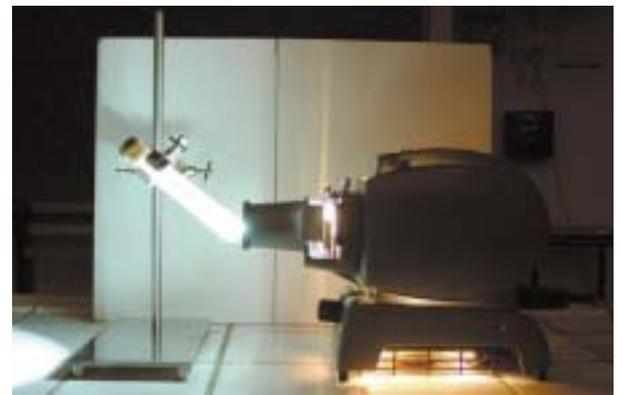


Abb. 5 Knallgas-Reaktion.

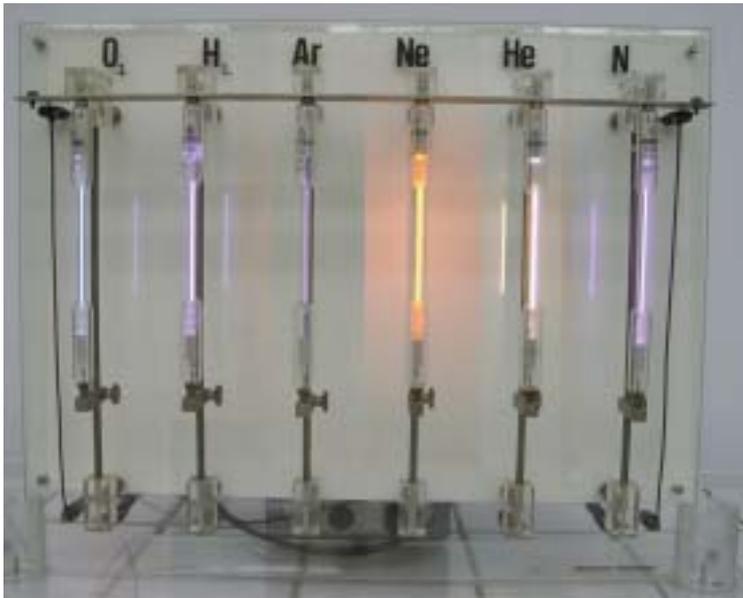


Abb. 6 Gleichspannungsentladungen (ca. 3 kV) in verschiedenen reinen Gasen bei reduziertem Druck. Die Farben der Abbildungen entsprechen nicht exakt dem Originalexperiment. Die Abbildung ist aus einzelnen Fotografien zusammengesetzt.

die Gasmischung lange stabil. Erst bei Bestrahlung mit energiereicherem Licht startet die Reaktion (wichtig: Zusätzlich muss die Intensität des Lichtes groß genug sein). Die Gasmischung reagiert unter starker Energieabgabe und der Stopfen fliegt durch den Hörsaal. Dieses Experiment können wir als Prototyp aller photochemischen Reaktionen, also Reaktionen, die unter Bestrahlung mit Licht ablaufen, verstehen [6].

Musikalisch darf an dieser Stelle Richard Wagner nicht fehlen! Am Ende der Oper „Rheingold“ betreten die mit ihrem eigenen Untergang beschäftigten Götter über eine leuchtende Regenbogenbrücke das neue Walhall. Der Regenbogen als Symbol des Glücks ist eine besonders eindrückliche und faszinierende Erscheinung im Zusammenhang mit der Zerlegung natürlichen Lichtes.

Farbiges Licht einer bestimmten Energie?

Am Beispiel der verschiedenen thermischen Lichtquellen erkennen wir, dass Licht nicht gleich Licht ist, sondern vielmehr eine Mischung von Photonen verschiedener Energie. Außerdem sehen wir, dass chemische Reaktionen mit dem Umsatz von ganz bestimmten Energiemengen bzw. Photonen verbunden sind. Also ist es logisch, zu versuchen, „sortenreines“ oder „diskretes“ Licht möglichst nur einer einzigen Energie bzw. Wellenlänge zu erzeugen.

Hierzu schauen wir uns in ganz stark vereinfachter Form den Aufbau eines Atoms an (Infobox). Wir erkennen, dass der Wechsel von Elektronen zwischen verschiedenen Zuständen in einem Atom oder Molekül immer mit einer Energiedifferenz verbunden ist, die wiederum in Form von sichtbarem Licht ausgestrahlt werden kann.

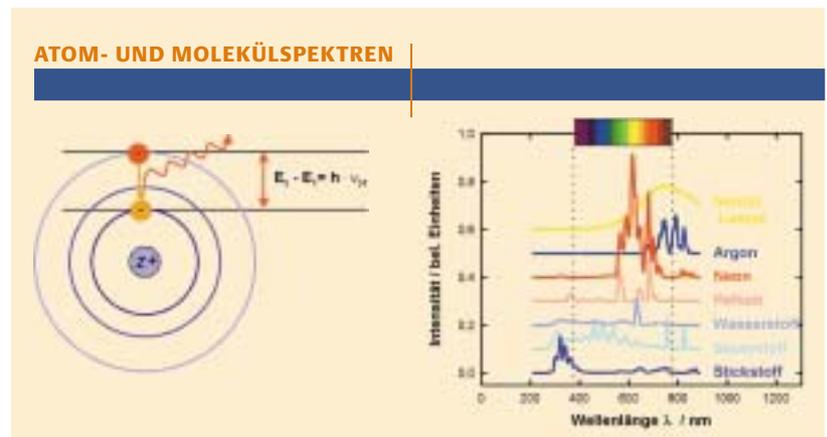


Abb. 7 Bunte Flammen.

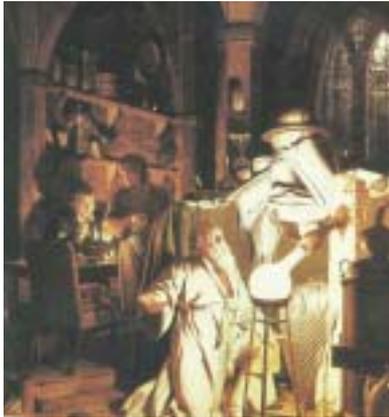
Besonders einfach können wir elektronische Anregungen in Gasen durch Stöße mit freien Elektronen erzeugen. Hierzu füllt man in Glasröhren verschiedene (reine) Gase ab. Wenn wir an die so entstandenen Entladungsröhren eine Spannung im Bereich von etwa 1 kV und höher anlegen, kommt es zu einer Stoßionisation. Die in Gasen immer in geringer Konzentration vorhandenen Ionen und Elektronen werden im elektrischen Feld beschleunigt und erzeugen durch Stöße weitere Ionen. Bei der parallel ablaufenden Wiedervereinigung von Ionen und Elektronen wird Licht frei, das ganz charakteristisch für das betreffende Gas ist. Die entstehenden Linienspektren können als Abbild des inneren Aufbaus der Elektronenhülle verstanden werden [7].

In Abbildung 6 sind nebeneinander die Glimmentladungen in Sauerstoff, Wasserstoff, Argon, Neon, Helium und Stickstoff dargestellt. In der Infobox sind die entsprechenden Spektren abgebildet. Die Unterschiede in den ausgesandten Wellenlängen sind deutlich. Und der Vergleich mit dem Spektrum der Nernst-Lampe als thermischem Leuchtmittel zeigt besonders klar den Unterschied zwischen kontinuierlicher und diskreter Emission. Gelingt es, die Aussendung von bestimmten Photonen besonders stark anzuregen und durch Überlagerung zu stärken, dann haben wir hier einen Laser. Laser-Photochemie ist heute eines der besonders aktiven und modernen Gebiete der Chemie.

Wir können Licht also auf zweierlei Weisen erzeugen: Thermisch – dann entsteht eine Mischung verschiedenfarbigen Lichtes, die allein von der Temperatur des Leuchtmittels abhängt. Als Nebeneffekt entsteht grundsätzlich



> **Abb. 8** „The Alchemist in Search of the Philosopher's Stone“ von Joseph Wright (1734–1794).
[Derby Museum and Art Gallery]



>> **Abb. 9**
Tanzende Feuer.



>>> **Abb. 10**
Feuer im Eisberg.



auch Infrarot-Strahlung, die wir als Wärme wahrnehmen. Oder wir erzeugen Licht unter Nutzung von Elektronenübergängen in Atomen, Molekülen oder Festkörpern, wobei man zu farbreinerem Licht gelangt. Hier spielen Gase und Entladungen besonders im Bereich von Hochleistungsleuchtmitteln eine große Rolle; Festkörper haben eher im Bereich lichtschwächerer Anwendungen eine große Bedeutung (z. B. Leuchtdioden).

Fiat Lux: Licht und kleine Geschichten

Wir wenden uns nun sinnlicheren Seiten chemischer Lichterscheinungen zu. Musik aus „Zarathustra“ von Richard Strauss begleitet das Aufleuchten bunter Flammen in einem dunklen Raum (Abbildung 7). Wie beschrieben, tritt sichtbares Licht oft zusammen mit anderen Energieformen wie Wärme auf: Zum Beispiel beim Verbrennen von „Gesalzene Alkohol“. Bei diesem Experiment werden Natrium- (gelb), Zink- und Magnesium- (weiß), Kupfer- (blau), Strontium- (rotviolett) sowie Lithiumsalze (rot) in Methanol gelöst und angezündet. Die Metallatome werden durch die bei der Verbrennung entstehende Wärme elektronisch angeregt und emittieren Licht bestimmter Wellenlänge und damit bestimmter Farbe. Außerdem verbrennt Borsäuremethylester mit grüner Flamme.

Licht ist lebensnotwendig. Die Photosynthese der Pflanzen, bei der aus Kohlendioxid und Wasser organische Stoffe synthetisiert werden, wäre ohne Licht nicht möglich. Vielleicht ist deshalb Licht für den Menschen schon immer etwas Positives gewesen. In den Religionen, in der Philosophie und in der Literatur wurden und werden Licht und auch Lichtgestalten häufig mit Weisheit und Schönheit gleichgesetzt. Licht, z.B. Sonnenlicht, spielt deshalb in unserer Geschichte seit Jahrtausenden eine besondere Rolle. So war das Charakteristikum der ersten monotheistischen Religion die Verehrung der Sonne Aton durch den ägyptischen Pharaon Echnaton, der von 1364 bis 1347 v. Chr. lebte. Wir sehen ein Relief (Infobox S. 397), auf dem Echnaton nebst Familie die Sonne anbetend dargestellt ist und hören in Gedanken „Walk like an Egyptian“ von den Beatles. Kann uns die Chemie auch einen „Sonnenuntergang“ liefern? Zu „Mirrors“ von Sally Oldfield und be-

leuchtet durch einen Overheadprojektor wirft ein Weihnachtsbaum-Scherenschnitt seinen Schatten auf die Reduktion von Thiosulfat zu elementarem Schwefel. Dieser scheidet sich kolloidal ab und streut das weiße Licht eindrucksvoll (Tyndall-Effekt). Dazu erklingt Echnatons Hymnus an den Sonnenball Aton.

Echnatons Gebet an die Sonne findet sich heute als 104. Psalm in der Bibel. Die Religion, in der die Sonne verehrt wurde, ging jedoch nach seinem Tod wieder unter.

Nicht nur bei den alten Ägyptern, auch bei den alten Griechen waren Lichtgestalten etwas Göttliches. Phosphorus, der Morgenstern, gehörte zum Gefolge der Aphrodite, der griechischen Liebesgöttin. Phosphorus heißt „Lichtträger“. Wegen der besonderen Wohlgestalt von Phosphorus, fand die Liebesgöttin Aphrodite Gefallen an ihm und entführte ihn. Woher hat nun das chemische Element „Phosphor“ seinen Namen? Es leuchtet!

Das Element, das der Alchemist Henning Brandt 1669 (Abbildung 8) durch Einkochen von großen Mengen Urin entdeckte, zeigt an der Luft Lumineszenz. Diese ist eine Leuchterscheinung, die nicht mit der Entwicklung von Wärme verbunden ist, sondern auf bestimmten elektronischen Übergängen beruht. Zu einem Lied von Sally Oldfield („Song of the Lamp“) haben wir die „Phosphorlampe“ von Brandt nachgestellt [14].

Aber: Weißer Phosphor ist nicht nur leuchtend und selbstentzündlich, er ist auch giftig, was man aber früher ignorierte. Er wurde in Zeiten, als Mediziner noch keine Chemie lernen mussten, gegen Koliken, Asthma, Tetanus, Schlaganfall, Gicht, Depression, Epilepsie, Tuberkulose und als Aphrodisiakum eingesetzt – ein klares Zeichen dafür, wie sehr man Licht Wunderwirkung zuschreibt [13]. Die Bedeutung von Phosphor und Phosphorverbindungen für die Menschheit ist eine ambivalente: es gibt eine durch Phosphor verursachte Krankheit, die „phossy jaw“ genannt wird und bei der der Kiefer abstirbt; es gibt aber auch Phosphor enthaltendes Nervengas und Bomben. So wurde Hamburg, die Geburtsstadt des Entdeckers von Phosphor, 1943 durch Phosphorbomben zerstört. Als positiv kann man natürlich die Bedeutung von Phosphor in Düngemitteln, ohne die die Menschheit nicht ernährt werden könnte, einschätzen.



<< **Abb. 11**
Weihnachtsbaum
aus Stahl.



< **Abb. 12**
Wandernder
Feuerball.

Auch gelten Phosphorverbindungen, die als Konservierungsmittel für Lebensmittel, Phosphorverbindungen in feuerfesten Schlafanzügen, in Coca-Cola, in Streichhölzern ... und in rostfreien Korsettstangen verwendet werden, als nützlich.

Brennen kalte Stoffe?

Im Periodensystem der Elemente sieht man, dass die Chemie heute 81 stabile Elemente kennt, aus denen sämtliche Materie, die uns umgibt, aufgebaut ist. Dem griechischen Philosophen Empedokles „ging schon früh ein Licht auf“. Er lebte von 490 bis 430 v. Chr. und kannte nicht 81, aber doch schon vier Elemente: Erde, Wasser, Luft und Feuer. Und Feuer war, natürlich, immer mit Licht, aber auch mit Wärme verbunden. Empedokles dachte da an das Feuer in Öfen, vielleicht noch an das Feuer der Vulkane, der Sonne. Kalte Stoffe brennen ja nach unserer Erfahrung normalerweise nicht. In Abbildung 9 brennt aber ein kondensiertes Gas, das eine Temperatur von -164°C hat. Zu diesem „Tanzenden Feuer“ ertönt „Blinded by the light“ von Manfred Man's Earth Band. Wir entzünden außerdem ein "Feuerwerk mit Eis". Und selbst in festem Trockeneis, das eine Temperatur von -78°C hat, brennt es, wie man in Abbildung 10 sieht. Bei diesen chemischen Reaktionen handelt es sich um Oxidationen, die unter starker Energieabgabe verlaufen.

Und sogar Eisen verbrennt an der Luft! Man stelle sich vor, Eisenbahnschienen würden sich an der Luft plötzlich entzünden. Wenn Eisen fein verteilt ist, passiert genau das. Zur Musik „Aus der neuen Welt“ von Antonin Dvorak verbrennt Stahlwolle (Abbildung 11). Dies ist ein Korrosionsvorgang, eine heterogene Reaktion, wie das uns bekannte allmähliche Rosten, der unter Energieabgabe verläuft. Solche Reaktionen laufen vor allem an den Grenzflächen zwischen den Reaktionspartnern ab, also an der Oberfläche der Stahlwolle, wo diese mit Sauerstoff der Luft in Berührung kommt. Wegen der großen Oberfläche der sehr kleinen Eisenteilchen in Stahlwolle läuft die Reaktion be-

sonders schnell ab, und es wird unter Lichterscheinung viel Energie in kurzer Zeit abgegeben.

Der „Brennende Schneeball“ hingegen ist nur ein Trick! Es brennt Campher, der in Schnee eingebettet wurde. Eine organische Verbindung, Pentan, brennt auch, wenn man den „Wandernden Feuerball“ zündet (Abbildung 12). Dieser Versuch startet mit etwas Verzögerung. Man lauscht der „Carmina burana“ von Carl Orff, während eine Kerze scheinbar harmlos in der Nähe des einen Endes eines meterlan-

HYMNUS

Schön ist Dein Erscheinen im Lichtort
des Himmels,
Du lebender Aton, der von Anbeginn lebst!
Dein leuchtendes Aufgehn im östlichen
Lichtort
Erfüllt alle Lande in Deiner Schönheit;
Du bist groß, glanzvoll, und hoch über
allen Landen,
Deine Strahlen umfassen die Länder bis
zum Rand Deiner Schöpfung!...
Wenn Du morgens im Horizonte aufsteigst,
Als Aton am Tage erglänzend,
So weicht Dir die Finsternis,
Sobald Du Deine Strahlen spendest....
Gehst Du unter im westlichen Lichtort,
Liegt die Erde im Dunkel, als sei sie
erstorben.

**König Echnaton, Königin Nofretete
und eine der Töchter beim Gottes-
dienst vor Aton. Relieffragment von
einer Balustrade der Rampe des
Aton-Tempels. Kalkstein. Kairo, Mu-
seum [11].**





Abb. 13 Tee des Teufels.



Abb. 14 Lichttröhre ohne Strom.

gen, gewundenen Schlauchs brennt und weit entfernt davon ein mit Pentan getränkter Bierdeckel, der sich in einem Trichter am anderen Ende des Schlauchs befindet, ruht. Plötzlich ein Lichtschweif: Es passiert das, was in der Kanalisation abläuft, wenn jemand an einem Ende der Stadt ein organisches Lösungsmittel, z.B. Nitroverdünnung, in den Abguss gibt. Ohne dass etwas vor Ort zu passieren scheint, bricht am anderen Ende der Stadt aber plötzlich ein Feuer aus.

Teuflische Lampen und himmlisches Licht

Der Grieche Empedokles hat diese Art von Feuer wahrscheinlich noch nicht gekannt, obwohl er ein richtig „heller Kopf“ war. Er hat schon damals postuliert, dass Licht sich mit einer endlichen Geschwindigkeit durch den Raum bewegt. Heute wissen wir, dass die Lichtgeschwindigkeit ca. $3 \text{ mal } 10^8 \text{ m/s}$, also 300 Millionen Meter pro Sekunde beträgt. Die Erde ist von der Sonne $1,5 \text{ mal } 10^{11} \text{ m}$, also 150 Milliarden Meter entfernt. Licht von der Sonne braucht also etwa 8 min, bis es bei uns ankommt. Und die Sonne

scheint nicht überall. In der Hölle zum Beispiel kommt das Licht der Sonne nie an. Wie macht der Teufel Licht? Der Teufel, auch Luzifer genannt, hat einen besonderen Trick; er bereitet sich Tee zu (Abbildung 13): In der Hölle ist es ohnehin schon warm. Also macht Luzifer Pfefferminz-Tee ohne Hitze und das Licht des Tees ist ein kaltes Licht, das nicht gekoppelt mit Wärme auftritt. Es resultiert aus der Bildung von elektronisch angeregtem Kohlendioxid bei der oxidativen Zersetzung von Oxalsäureestern. Bei der Relaxation des Kohlendioxids wird die rote Fluoreszenz des in den Pfefferminzblättern enthaltenen Farbstoffs Chlorophyll angeregt.

Übrigens heißt „Luzifer“ auch „Lichtträger“. Luzifer ist der lateinische Name des Morgensterns, griechisch Phosphorus, der bereits erwähnt wurde. Gemäß der Bibel wurde Luzifer zum Licht-Engel. Doch eines Tages benahm er sich unangemessen, indem er sich über Gott zu erheben versuchte, und wurde in die Unterwelt verbannt. Ohne Chemie wäre er „bei Licht besehen“ da unten hilflos gewesen: kein Strom ... Luzifer muss sich chemisch Licht gemacht haben. Er nutzt die Oxidation von Tetrakis(dimethylamino)ethen. Die Titelmusik von „Star Wars“ erklingt, während die chemische Leuchtstoffröhre (Abbildung 14) ihr grünliches Licht verbreitet.

In der christlichen Religion spielen Lichtgestalten eine große Rolle, schließlich sagt Jesus: Ich bin das Licht. Aber nicht nur in der Religion, auch in den Mythen und Märchen hat Licht eine besondere Bedeutung. Die Gebrüder Grimm schrieben um 1830 herum ein Märchen nieder, welches „Das blaue Licht“ heißt. In diesem wird ein Soldat, der einem König lange treu gedient hat, aus dem Dienst in die Finsternis entlassen und macht sich große Sorgen um die Zukunft. Er verdingt sich bei einer Hexe, die ihm die Aufgabe gibt, ein wundersames blaues Licht aus einem Brunnen hervorzuholen. Der Soldat entdeckt die Wunderkraft dieses besonderen blauen Lichtes und gelangt mit der Hilfe des Lichtes zu Reichtum. Noch dazu heiratet ihn die

Wie Luzifer ein gefallener Engel wurde (Jesaja 14):

„Auch du bist kraftlos nun wie wir, du bist uns gleich geworden?“

11 Hinab in die Unterwelt fuhr deine Pracht, das Rauschen deiner Harfen. Auf Moder bist du hier gebettet, Gewürm ist deine Decke.

12 Wie bist du vom Himmel geschmettert, du, der alle Völker versklavte!

13 Du plantest in deinem Herzen: 'Zum Himmel will ich steigen, meinen Thron über Gottes Sterne setzen, auf dem Versammlungsberg im höchsten Norden will ich wohnen.

14 Ich will zu Wolkenhöhen mich erheben, gleich sein dem Allerhöchsten.

15 Doch hinabgestürzt bist du in die Unterwelt, die aller-tiefste Tiefe.“



Abb. 15 Luminol.

„Licht ist Symbol der echten Besonnenheit ...
Licht ist auf jedem Fall Aktion – Licht ist wie Leben,
wirkende Wirkung ...
Licht macht Feuer
Leben ist wie Licht.
Alle Wirkung ist Übergang. Bei der Chemie geht beides
ineinander verändernd über ...“

Königstochter und alles wird gut. „Luminol“ erzeugt blaues und grünes Licht, beruhigend und anregend zugleich. Wieder erklingt die Titelmusik von Star Wars (Abbildung 15).



Abb. 18 Schießbaumwolle.

Dazu passt, was Novalis, ein Dichter der deutschen Romantik, der 1772 „das Licht der Welt erblickte“ und etwa zur Zeit der Gebrüder Grimm lebte, in seinem „Traktat vom Licht“ schreibt (s. linker, unterlegter Text).

Novalis verknüpfte also die Begriffe Licht, Leben und (Al)Che(i)mie. Er erkannte das Wesentliche der Chemie. Chemie ist Veränderung. Veränderungen zu sehen und zu verstehen ist in unser aller Leben essentiell. Weihnachten hat viel mit Licht zu tun. Das christliche Weihnachten, aber auch das jüdische Hanukkah oder heidnische Sonnenwendfeste wie das Luzia-Fest in Schweden sind Lichterfeste. Kerzen und warmer Lampenschein, im ersten Teil dieser Vorlesung bereits besprochen, spielen eine besonders große Rolle. Wir schließen mit chemischen Kerzen zum „Alleluja“ aus „Exsultate jubilate“ von Wolfgang Amadeus Mozart und verbrennen roten, ungiftigen Phosphor und Schwefel in reinem Sauerstoff (Abbildung 17). „Schießbaumwolle“ (Abbildung 18) und „Bengalische Feuer“ leuchten heim.

Fazit

In Carl Orffs Oper „Der Mond“ aus dem Jahr 1939 entdecken vier Männer aus einem Land, in dem es nur Dunkelheit gibt, in einer fremden Welt zum ersten Mal den Mond und fragen „Was ist das für ein Licht?“. Wir wissen heute zum Glück mehr! Da der Mond „kalt“ ist und keine eigene thermische Lichtquelle darstellt, müssen wir erkennen, dass der Mond nur das Sonnenlicht reflektiert. Alle Lichtquellen beruhen entweder auf der kontinuierlichen „thermischen Emission“ von Photonen durch Festkörper bei hohen Temperaturen (analog zum „Schwarzen Strahler“) oder aber auf der Emission ganz bestimmter Photonen, die bei elektronischen Übergängen in Atomen, Molekülen oder Festkörpern ausgesendet werden (Gasentladungslampen, Laser).

Licht kann chemische Reaktionen auslösen: Entweder wird durch den Lichteintrag die Temperatur erhöht und damit die notwendige Aktivierungsenergie zur Verfügung gestellt. Oder aber eine ganz bestimmte Reaktion wird gezielt durch Licht definierter Wellenlänge aktiviert. Das Wechselspiel ist faszinierend und führt bei intensiverer Beschäftigung schnell zu weitergehenden Fragen nach der chemischen Nutzung von Sonnenstrahlung, der Entstehung von Licht in modernen Leuchtdioden oder in Hochdruckentladungslampen.

Zusammenfassung

Dass viele chemische Reaktionen unter Lichterscheinung verlaufen, ist jedem geläufig. Chemische Reaktionen, bei denen es leuchtet, stehen mit einer großen Bandbreite für Demonstrationsversuche zur Verfügung: Wollen wir Explosionen sehen? Flammen? Kaltes Licht? Wir haben uns zu Weihnachten für die ruhigeren Varianten dieser Experimente entschieden, und versucht, durch chemische Leuchterscheinungen hervorgerufene Effekte zum einen zu erklären, vor allem aber assoziativ in Zusammenhänge zu stellen, die auch Nicht-Chemikern eingängig sind.



Abb. 16 Chemische Kerzen – Phosphorflamme.



Abb. 17 Chemische Kerzen – Schwefelflamme.

Summary

At christmas, experimental scientists love to demonstrate to a public auditory the special pleasures of their art. Here, a physical and an inorganic chemist have put together their knowledge and their ideas to create a collection of experiments, explanations, images, music [15] and effects, that was interwoven and subsumed under the title „Chemistry and Light“. A special mixture of theory and experiment was selected to meet the expectations of listeners and spectators of different ages and different backgrounds. Besides the wish to entertain, one main reason for this choice of presentation was to show that historical, social and scientific aspects belong together as well as experiment and theory, and that natural sciences deliberately should be included into the approach of life of everybody. A tremendous pleasure can be gained from observing and understanding changes of matter that are caused by chemical reactions.

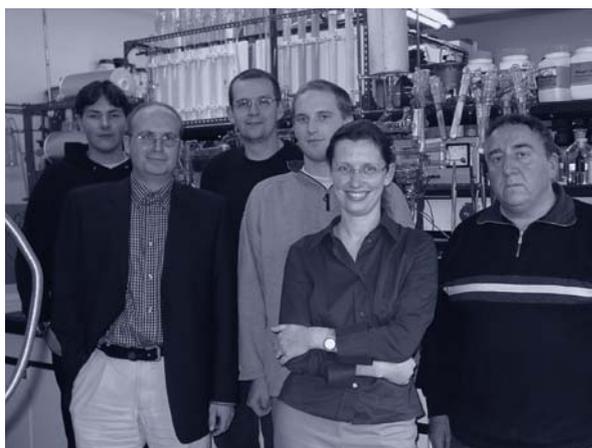
Literatur

- [1] K. Ferrari d'Occhieppo, *Der Stern von Bethlehem in astronomischer Sicht: Legende oder Tatsache?* 2. Aufl., Brunnen-Verlag, Gießen, **1994**.
- [2] G. Wedler, *Lehrbuch der Physikalischen Chemie*, 4. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim, **1997**, S. 104 ff (s. auch weiterführende Literatur in der Physik).
- [3] A. Buschmann, U. Maas, J. Warnatz und J. Wolfrum, *Das Feuer im Computer und im Laserlicht*, Phys. Bl. **1996**, 52 (Nr. 3), 213–218.
- [4] M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, New York, **1966**, S. 10 ff.
- [5] H.-G. Bartel, Gudrun Scholz und Fritz Scholz, *Die Nernst-Lampe und ihr Erfinder*, Z. Chemie 23 (**1983**) 277.
- [6] D. Woehrle, M. W. Tausch, W.-D. Stohrer, *Photochemie: Konzepte, Methoden, Experimente*, Wiley-VCH, Weinheim, **1998**.
- [7] s. Literaturzitat [2]; als Klassiker sei empfohlen: G. Herzberg, *Atomic Spectra and Atomic Structure*, Dover, New York, **1944**; s. auch weitere Bücher von G. Herzberg.
- [8] H. W. Roesky und K. Möckel, *Chemische Kabinettstücke*, 1. Aufl., VCH, Weinheim **1994**.
- [9] F. R. Kreißl und O. Krätz, *Feuer und Flamme, Schall und Rauch*, 1. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim, **1999**.
- [10] G. Wagner, *Chemie in faszinierenden Experimenten*, 5. Aufl., Aulis-Verlag Deubner, Köln, **1984**.
- [11] K. Lange und M. Hirmer, *Ägypten*, 4. Aufl., Hirmer Verlag, München, **1985**.
- [12] <http://www.theochem.uni-duisburg.de/DC/material/lichtsp/info6.html> und die dort zitierte Literatur
- [13] R. J. Huxtable, *Nature* **2000**, 405, 16.
- [14] R. L. Keiter und C. P. Gamage, *J. Chem. Educ.* **2001**, 78, 908.
- [15] Klaus Schneider, *Lexikon Programmusik: Stoffe und Motive*, Bärenreiter-Verlag, Kassel **1999**.

Die Autoren

Barbara Albert, 1966 in Bad Godesberg geboren, studierte Chemie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, promovierte auf einem Gebiet der Anorganischen Festkörperchemie und habilitierte sich 2000 in Anorganischer Chemie. Seit Oktober 2001 ist sie Professorin für Anorganische Chemie – Schwerpunkt Anorganische Festkörperchemie/Materialwissenschaften, an der Universität Hamburg. Sie interessiert sich für die Synthese von neuen Metallboriden mit besonderen physikalischen Eigenschaften und faszinierenden, zum Beispiel durch dreidimensional verknüpfte Polyeder charakterisierte, Strukturen.

Jürgen Janek, 1964 in Bückeberg geboren, studierte Chemie an der Universität Hannover und promovierte bei Prof. Hermann Schmalzried am Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie mit einer Arbeit zur Festkörperkinetik. Er habilitierte sich 1997 in Physikalischer Chemie mit einer Arbeit über die Kinetik von Phasengrenzen in Ionenleitern und ist seit 1999 Professor für Physikalische Chemie an der Justus-Liebig-Universität Gießen. Seine fachlichen Interessen liegen allgemein auf dem Gebiet der Festkörperelektrochemie, speziell der Transportprozesse in ionenleitenden Festkörpern, der Phasengrenzkinetik und der Plasmaelektrochemie.



Die Autoren (B. Albert, 2. von rechts, und J. Janek, 2. von links) bedanken sich besonders bei Wilfried Scheld (rechts), der im Großen Chemischen Hörsaal der JLU Gießen immer wieder kleine Wunder realisiert. Für die praktische Vorbereitung bedanken sie sich außerdem bei Samuel Freistein (links), Petra Grundmann, Christian Jesch, Bjoern Luerßen (3. von links), Georg Mellau, Marcus Rohnke (3. von rechts) und Marielouise Wolff. Werner Ranft und Manfred Zahrt halfen bei der Aufnahme der Bilder.