Quantenchemie farbiger Stoffe mit Heisenberg und Einstein

Günter Baars

1. Zusammenfassung

Das 20. Jahrhundert begann mit einem naturwissenschaftlichen Paukenschlag: Max Planck gab am 14.12.1900 bekannt, dass Stoffe Licht nur mit einer bestimmten Energie aussenden können. Weitere bedeutende Forscher ebneten den Weg zur Entwicklung der Quantentheorie: P. von Lenard, A. Einstein, N.H. Bohr, A. Sommerfeld, L.V. de Broglie, C. Davisson, L. Germer, W. Heisenberg, E. Schrödinger, W. Pauli, M. Born, P.A.M. Dirac, R. Feynman ... Der vorliegende Aufsatz zeigt eine mehrfach praxiserprobte Möglichkeit zur Erarbeitung dieser „Sternstunden" mit Gymnasiasten.

2. Sternstunden auf dem Weg zur Quantentheorie

Mitte des 19. Jh. beschäftigte sich G. Kirchhoff (1824-1887) mit den Eigenschaften der Wärmestrahlung, die von erhitzten Metallen ausgesendet wird. Der Forscher erkannte, dass diese Strahlung aus verschiedenen Frequenzen bzw. Farben zusammengesetzt und unabhängig von den Materialeigenschaften ist. Mithilfe eines erhitzten metallischen Hohlkörpers, aus dem die „schwarze Strahlung" durch eine Öffnung austreten konnte, liessen sich Farbe und Temperatur des Körpers sehr genau bestimmen. Es gelang jedoch nicht, eine Formel zu finden, mit der das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers vorausgesagt werden konnte. Es war Max Planck, dem die Lösung nach jahrelanger Arbeit im Jahr 1900 gelang (Plancksches Strahlungsgesetz; dafür Nobelpreis 1919).

Damit begann der Siegeszug der Quantentheorie, die nicht nur im Theoretischen stehen blieb, sondern auch nach und nach den Alltag der Menschen eroberte. Die Faszination der Materie, die überragenden Leistungen der Forscher, wie auch der Alltagsbezug (Elektronen- und Rastertunnelmikroskopie, Quantenpharmakologie, Laser, Farbigkeit von Stoffen usf.) sind Gründe genug, dieses begeisternde Stück Naturwissenschaftsgeschichte zum Thema des gymnasialen Unterrichts zu machen. Hierbei gilt es, eine geschickte Auswahl zu treffen, die wichtigsten Meilensteine anschaulich darzustellen und den Bogen zur Erlebniswelt der Schüler zu schlagen. Im Folgenden sollen zunächst diese Meilensteine, die mit einer Fülle von Nobelpreisen ausgezeichnet wurden, knapp dargestellt werden, bevor ab Abschnitt 3 der Bogen zum konkreten Unterricht geschlagen wird.

Max Planck (1858-1947)

Max Planck war unsicher, welches Fach er studieren sollte. Der vielseitig Begabte dachte an Musik, Altphilologie oder Physik. Vom Musikstudium wurde ihm abgeraten („wenn Sie schon fragen, studieren Sie etwas anderes") und ebenso von der Physik. Professor Philipp Jolly in München: „In der Physik ist im Wesentlichen schon alles erforscht, und es gibt nur noch einige unbedeutende Lücken auszufüllen" (Hermann, 2000). Zum Glück für die Naturwissenschaften hat sich Max Planck trotzdem für das Studium der Physik entschieden.

Nach jahrelanger Arbeit gelang es ihm, wie bereits erwähnt, das Problem der „schwarzen Strahlung" zu lösen. Damit die Ergebnisse seiner Formel mit den experimentellen Daten übereinstimmten, musste er die Hilfsgrösse *h* einführen, die sich als dritte Naturkonstante neben der Lichtgeschwindigkeit und der Gravitationskonstanten erwies. Für Planck war es damals klar, dass das Licht von den Atomen des Körpers ausgesendet wird, obwohl der atomare Aufbau der Materie damals noch umstritten war. Überraschend und unverständlich war jedoch, dass das Licht von den Atomen nicht kontinuierlich, sondern als konkrete Einheiten ausgesendet wurde. Für die Atome mussten demnach diskrete Zustände existieren, die durch „Quantensprünge" getrennt sind.

Albert Einstein (1879-1955)

Einstein gelangte aufgrund des Fotoeffekts 1905 zur Erkenntnis, dass es neben den Lichtwellen auch noch Lichtteilchen gibt: Welle/Teilchen-Dualismus für das Licht. (Die Energie, die von Licht

auf Elektronen übertragen wird, hängt nicht von der Intensität, sondern von der Frequenz des Lichts ab!).
„Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf grösser und grösser werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganzes absorbiert und erzeugt werden können" (Einstein, 1905; dafür Nobelpreis 1921).

Louis de Broglie (1892-1987)
De Broglie bezog sich auf Einsteins Lichtquanten, als er 1924 in seiner Doktorarbeit „Recherches sur la théorie des Quantes" den Welle/Teilchen-Dualismus auf Materieteilchen übertrug: Alles hat seine Wellenlänge (dafür Nobelpreis 1929); Einführung der Materiewellen. Doch der experimentelle Beweis fehlte noch.

Clinton Davisson (1881-1958) und Lester Germer (1896-1971)
Beide Forscher lenkten 1927 einen Elektronenstrahl auf einen Nickel-Einkristall. Mithilfe des dadurch erzeugten Beugungsmusters konnten sie den Elektronen eine Wellenlänge zuordnen, die exakt mit dem theoretischen Wert von de Broglie übereinstimmte (Nobelpreis für Davisson 1937).

Werner Heisenberg (1902-1976)
Heisenberg gelang 1925 eine mathematische Beschreibung der Atome mithilfe der aus Spektren ermittelten Schwingungsfrequenzen und Amplituden (Intensität), die den Welleneigenschaften der Elektronen entsprechen. Die für den Forscher damals neue Mathematik, die er intuitiv entwickelt hatte, erwies sich als die bereits bekannte Matrizenrechnung (Nobelpreis 1932).

Erwin Schrödinger (1887-1961)
Schrödinger formulierte 1926, ausgehend vom Welle/Teilchen-Modell de Broglies, eine grundlegende Bewegungsgleichung für atomare Teilchen (Schrödinger-Gleichung). Sie besitzt, im Rahmen gewisser Randbedingungen, nur Lösungen für bestimmte Eigenwerte, die die möglichen Energien des untersuchten Systems (z.B. des Wasserstoff-Atoms) liefern (dafür 1933 Nobelpreis). Mit ihr lässt sich u.a. die Amplitude ψ (psi) von Materiewellen berechnen.
Die mathematischen Formulierungen von Heisenberg und Schrödinger führen zu den gleichen Vorhersagen für Elektronensysteme, sind also gleichwertig.

Max Born (1882-1979)
Born deutete die „mathematischen Wellen" von de Broglie und Schrödinger derart, dass das Quadrat der Amplitude ψ (Psi) der Wellenfunktion, die ein Elektron beschreibt, der Wahrscheinlichkeit entspricht, das Elektron in einem bestimmten Raumbereich (Volumenelement dV) anzutreffen (Elektronendichte). Diese Festlegung traf Born in Anlehnung an die elektromagnetische Strahlung, bei der die Wahrscheinlichkeit, ein Photon in einem Beugungsbild anzutreffen, dem Quadrat der elektrischen Feldstärke E (der „Amplitude") direkt proportional ist (Nobelpreis 1954).

3. Quantenchemie als Lehrstück in der gymnasialen Oberstufe

Eine der grössten Errungenschaften des 20. Jahrhundert ist zweifellos, neben der Relativitätstheorie, die Quantenmechanik, die u. a. zu einem vertieften Verständnis in der Wissenschaft Chemie führte. Diese neue, faszinierende Betrachtungsweise der Materie kann und soll Inhalt des gymnasialen Unterrichts sein. Wie aber lässt sich die Überfülle an genialen Entdeckungen („Sternstunden"), wie sie oben anhand der Beiträge zahlreicher Nobelpreisträger beschrieben wurden, mit den Schülern erarbeiten? Eine Möglichkeit dazu bietet die Lehrkunstdidaktik, wie sie von Martin Wagenschein begründet und von Christoph Berg weiterentwickelt wurde: Sternstunden der Menschheit im Unterricht, exemplarisch, genetisch (Weg der Erkenntnisgewinnung) und dramaturgisch.

Das hier vorgestellte Lehrstück bedient sich einer Dramaturgie, wie sie u. a. in vielen Opern zum Tragen kommt. In der Ouvertüre tönen Motive noch unbekannt und unvertraut, aber im Verlaufe der verschiedenen Akte klarer, kräftiger, bekannter und allmählich immer vertrauter, um im Finale nochmals vorgeführt zu werden. Beispielhaft ist dieses Vorgehen im „Tannhäuser“ von Richard Wagner verwirklicht:
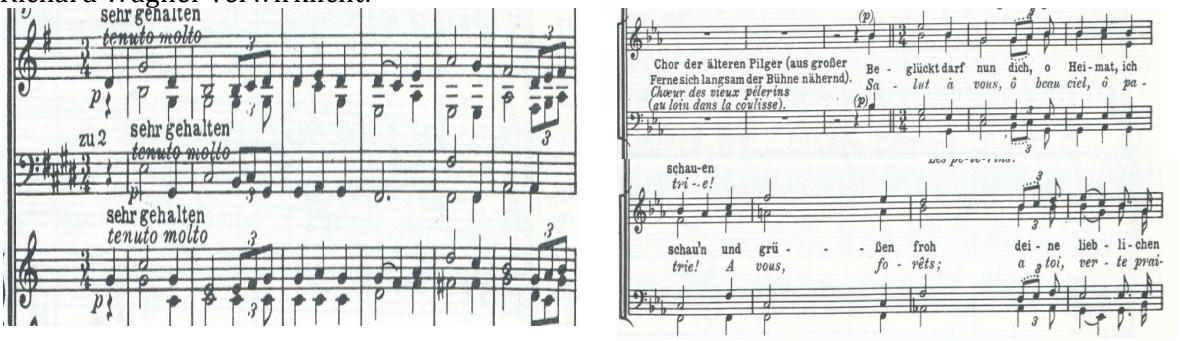
Abb. 1: Ausschnitte aus der Partitur des Tannhäusers, links Ouvertüre und rechts Schluss des 3. Akts (Heimkehr-Chor der älteren Pilger); R. Wagner

Das Lehrstück zur Quantenchemie, das die beschriebenen Sternstunden der Menschheit exemplarisch zum Thema aufzeigt und dabei den Weg der Erkenntnisgewinnung geht (genetisch), wurde mehrere Male an verschiedenen Gymnasien inszeniert. Es bietet den Schülern Gelegenheit, den aufregenden Weg von der Frage nach Elektronenbahnen über die Grundaussagen der Quantenchemie bis zur Modellvorstellung in Bezug auf das Wesen der Farbigkeit von Stoffen zu verfolgen. Das Lehrstück ist bereits in Buchform im hep-Verlag (Bern) erschienen (Baars, 2011a).

Gliederung	Umfang	Inhalt
Ouvertüre	*4 Stunden*	**Existieren Elektronenbahnen?** Diskussion Heisenberg/Einstein; der Tausendblumenteppich und seine Farben; Phenylpolyenale und ihre Farbsalze
I. Akt	*4 Stunden*	**Was schwingt denn da?** Transversal- und Longitudinalwellen; fortschreitende harmonische Wellen; konstruktive und destruktive Interferenz; stehende Wellen; schwingungsfähige Systeme
II. Akt	*5 Stunden*	**Licht: Welle oder Teilchen?** Beugung; Fotoelektrischer Effekt; Photon; Heisenberg und Einstein
III. Akt	*3 Stunden*	**Elektronen: Welle oder Teilchen?** Kathodenstrahlrohr; Linienspektren; Elektronenbeugung; Elektronen mit diskreten Energiezuständen in Atomen; Phenylpolyenale und ihre Farbsalze
IV. Akt	*3 Stunden*	**Der eindimensionale Kasten; das Elektronengas-Modell** Das Elektron im eindimensionalen Kasten; farbige Stoffe und eindimensionaler Kasten; Berechnung der Anregungsenergie
V. Akt	*6 Stunden*	**Das Elektronengas-Modell auf dem Prüfstand** Funktionsweise eines Spektralfotometers; Maximale Absorption von Cyaninen, Phenylpolyenalen und ihren Farbsalzen (experimentell); Cyanine und das Elektronengas-Modell; Polyene und das Elektronengas-Modell; der Korrekturfaktor V_{korr}; Phenylpolyenale, ihre Farbsalze und das Elektronengas-Modell
Finale	*1.5 Stunden*	Phenylpolyenale und ihre Farbsalze; der Tausendblumenteppich und seine Farben; Diskussion Heisenberg/Einstein

Tab. 1: Gliederung des Lehrstücks „Quantenchemie farbiger Stoffe mit Heisenberg und Einstein“

4. Kurzbeschreibung der einzelnen Akte

Ouvertüre (4 Stunden)
Ausgangspunkt ist ein Ausschnitt aus der Autobiografie Heisenbergs (1969). Darin berichtet er über sein Ringen um das Verständnis der Spektrallinien hoch erhitzter Elemente sowie über eine Diskussion mit Einstein über die Frage nach der Existenz von Elektronenbahnen in den Atomen. Die Schüler werden dabei mit zahlreichen neuen Begriffen konfrontiert wie Linienspektren, Frequenz, Amplituden, elektrisches Feld, die nicht abschliessend verstanden werden können. Parallel dazu dient der Tausendblumenteppich aus der Burgunderbeute der Eidgenossenschaft (Schlacht bei Murten, 1476; Historisches Museum Bern) als Studienobjekt zum Phänomen Farben. Diese unterscheiden sich auf der Rück- bzw. Vorderseite des Teppichs deutlich, ohne dass sich dafür eine Begründung finden lässt.
Schliesslich werden Phenylpolyenale und ihre Farbsalze mit einfachen Reaktionen vorgestellt.

Offene Fragen: Welcher Zusammenhang besteht zwischen Elektronenbahnen und Licht, Frequenz, Intensität (Helligkeit, Amplitude) sowie Farben? Weshalb verblassen Farben am Sonnenlicht? Warum verblasst die gelbe Farbe stärker (schneller) als die blaue? Weshalb haben Lewis-Formeln der Moleküle farbiger Stoffe viele konjugierte Doppelbindungen und sehr viele Ringsysteme? Wann sind Stoffe überhaupt farbig und was passiert auf molekularer Ebene der Phenylpolyenale bei Farbveränderungen?

Abb. 2: Phenylpolyenale und ihre Farbsalze (Foto: Roger Deuber)

I. Akt: Was schwingt denn da? (4 Stunden)
Experimentell werden die wichtigsten Phänomene und Begriffe rund um die Wellenlehre erarbeitet. Ziel ist die Erkenntnis, dass schwingungsfähige Systeme nur ganz bestimmte Zustände, stehende Wellen, einnehmen können.

II. Akt: Licht, Welle oder Teilchen? (5 Stunden)
Mithilfe einer Kerze und dem Spalt zwischen zwei Fingern studieren wir das dabei zu beobachtende Beugungsbild. Perfektioniert mit einem Laserstrahl und einer Lochblende erweist sich das Beugungsbild als das Ergebnis konstruktiver und destruktiver Interferenz von Lichtwellen. Ein Beugungsmuster lässt sich nur mit einem Wellenmodell erklären.
Der Fotoelektrische Effekt, demonstriert an einem Zinkblech und einem Elektroskop, führt zum Teilchenmodell des Lichts (Einstein; Nobelpreis). Das Quadrat der Amplitude sagt nicht nur etwas über die Helligkeit (Intensität) von Licht aus, sondern auch über die Wahrscheinlichkeit, ein Photon in einem bestimmten Raumpunkt anzutreffen.

III. Akt: Elektronen, Welle oder Teilchen? (3 Stunden)
Das Kathodenstrahlrohr liefert die Masse und die Ladung eines Elektrons. Die Zerlegung des Lichts von angeregtem Wasserstoff, Helium bzw. Quecksilber mithilfe eines Prismas führt jedoch zur Erkenntnis, dass Elektronen in Atomen nur ganz bestimmte Energiezustände einnehmen können. Ein Atom verhält sich wie ein schwingungsfähiges System, in dem die Elektronen Welleneigenschaften aufweisen. Mit dem Quadrat der Wellenfunktionen (Materiewelle) erhält man die Wahrscheinlichkeit, ein Elektron in einem bestimmten Raumbereich anzutreffen (Max

Born). Prinzipiell hat jedes Teilchen auch Welleneigenschaften, wie de Broglie in seiner Doktorarbeit mit der berühmten Formel $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ postuliert hatte und wie es von Davisson und Germer experimentell nachgewiesen wurde.

IV. Akt: Der eindimensionale Kasten; das Elektronengasmodell (3 Stunden)
Ausgehend von den Lewis-Formeln der Phenylpolyenale und den Welleneigenschaften der Elektronen lässt sich die Frage beantworten, wann Stoffe farbig sind. Liegt die Anregungsenergie von Elektronen, π-Elektronen, im Bereich des sichtbaren Lichts, so kommt es zur Absorption einer bestimmten Wellenlänge (Farbe). Das „Restlicht" wird reflektiert und erzeugt im menschlichen Hirn den Farbeindruck, der der Komplementärfarbe der absorbierten Farbe entspricht.
Mithilfe einfacher Überlegungen und geringem mathematischem Aufwand wird das Modell des eindimensionalen Kastens (Elektronengas-Modell) erarbeitet, mit dem Voraussagen über die Absorptionsenergie, und damit über die Farbe eines Stoffs möglich sind.

V. Akt: Das Elektronengas-Modell auf dem Prüfstand (6 Stunden)
Für die Cyanine, Polyene und Phenylpolyenale werden die Anregungsenergien berechnet und mit den tabellierten (Cyanine, Polyene) bzw. den im Klassenverband gemessenen Werten (Phenylpolyenale) verglichen. Damit erhält man Antworten auf die Frage, wie Moleküle beschaffen sein müssen, damit die entsprechenden Stoffe farbig sind: Grösse des Systems konjugierter Doppelbindungen sowie die Art der Endgruppen in den Molekülen.

Finale (1.5 Stunden)
Spiegelbildlich zur Ouvertüre beginnt das Finale mit dem Farbenreichtum der Phenylpolyenale und leitet dann über zum Tausendblumenteppich und den darauf zu beobachtenden Farbveränderungen. Schliesslich lesen die Schüler nochmals einige Ausschnitte aus dem Disput Heisenberg/Einstein, nun aber mit dem Verständnis, das im Verlaufe dieser Unterrichtseinheit erarbeitet wurde und mit der ursprünglich und inzwischen bestätigten Behauptung von de Broglie, dass „alles seine Wellenlänge" hat.

5. Blitzlichter aus dem Unterricht einer Prima (12. Jahrgangsstufe) des Gymnasiums Bern Neufeld

5.1 Ouvertüre
Wir lesen den Text von Heisenberg.
Manuel unterbricht das Textstudium mit der Bemerkung, dass er sich erinnere, schon etwas über das „Wasserstoffspektrum" gelesen zu haben, das Phänomen hingegen kenne er nicht. Ich entschliesse mich spontan, ein dazu passendes Experiment vorzuführen. Dazu hole ich das nötige Material aus der Chemiesammlung, schliesse die verschiedenen Komponenten zusammen und verdunkle das Unterrichtszimmer.

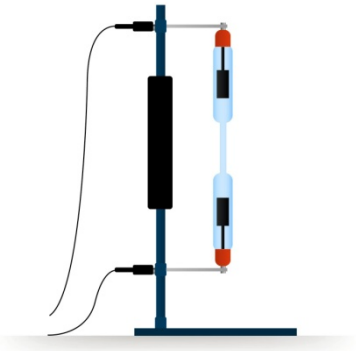

Abb. 3: Wasserstoffröhre.

In einer Glasröhre (Wasserstoffröhre) befinden sich elementarer Wasserstoff sowie zwei Elektroden. Nach dem Anlegen einer Spannung fängt der Wasserstoff in der Röhre zu leuchten an.
Nikolaus erinnert das Phänomen an eine Leuchtstoffröhre, wobei er gleich hinzufügt, dass Elektronen Bahnen wechseln und dabei Licht abgeben. Simon ergänzt, dass Elektronen in den Elektronenschalen umherwandern, und zwar von einem energiereichen zu einem energieärmeren Zustand.
Nun betrachten die Schülerinnen und Schüler bei abgedunkeltem Klassenzimmer das Licht mithilfe eines Handspektrometers, das ein Glasprisma enthält.

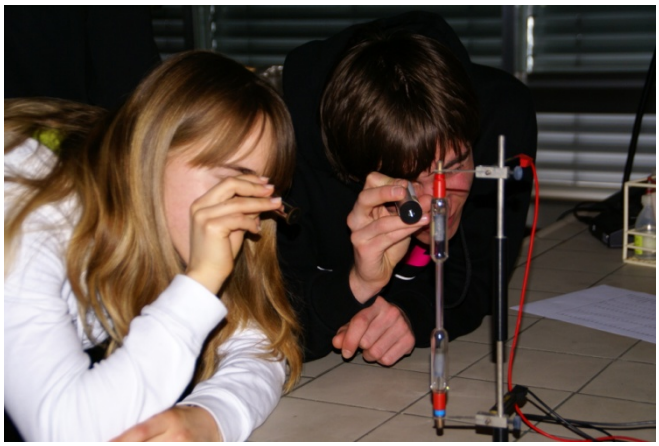

Abb. 4: Analyse des Wasserstofflichts mit einem Handspektrometer.

„Ich sehe nur einige wenige, klar begrenzte Farblinien“, höre ich von einer Schülerin; „das Licht wird gespalten“ fügt Melanie hinzu. „Komisch“, meinen Nikolaus und Kilian, „das Licht des Wasserstoffs ist doch annähernd weiss und müsste demnach alle Farben des Regenbogens enthalten“. Auch Simon findet, dass jedes Licht eine Mischung aller möglichen Farben ist. Er verbessert sich jedoch sofort „nein, nicht aller Farben“. Ohne nähere Erklärungen abzugeben, weise ich darauf hin, dass Licht von heissen Gasen oder Metalldämpfen nicht alle Farben des Regenbogens enthält. Diese Stoffe (Elemente) zeigen ein jeweils charakteristisches Spektrum mit ganz bestimmten Farblinien. Mithilfe derartiger Linienspektren lassen sich z.B. die Elemente eines Sterns bestimmen.

Abb. 5: Linienspektrum des Wasserstofflichts

Der Bericht von Heisenberg erwähnt die „Intensität der Linien im Wasserstoffspektrum“, für die der Forscher die „richtigen Formeln“ finden wollte; dies misslang ihm jedoch: *„Ich geriet in ein undurchdringliches Dickicht von komplizierten mathematischen Formeln, aus dem ich keinen Ausweg fand. Aber bei diesem Versuch befestigte sich in mir die Vorstellung, dass man gar nicht nach Bahnen der Elektronen im Atom fragen dürfe, sondern dass die Gesamtheit der Schwingungsfrequenzen und der die Intensität der Linien bestimmenden Grössen (der sogenannten Amplituden) als ein vollwertiger Ersatz der Bahnen gelten könnte. Jedenfalls konnte man diese Grössen ja direkt beobachten.“* Nachdem wir geklärt haben, dass die Intensität von Licht, vereinfacht ausgedrückt, der Helligkeit entspricht, wenden wir uns der Frage zu, wie die Elektronen von einem Energiezustand zum nächsten gelangen. Heisenberg scheint ja die Existenz von Bahnen abzulehnen! Zuerst müssen wir uns jedoch noch über einige Begriffe klar werden. Die Frequenz ist, wie Luis meint, der „Abstand zwischen Hoch- und Tiefpunkt“. Kilian spricht vom „Abstand zwischen zwei Wellenkämmen“. Désirée klärt die Frage mit der richtigen Antwort: „Die Frequenz gibt die Anzahl Schwingungen pro Zeiteinheit an.“ Simon ergänzt, dass es sich bei den Amplituden um die maximale Auslenkung von Wellen handelt und dass die Begriffe Frequenz, Amplitude und Intensität (Helligkeit) anscheinend zusammengehören. [...]

Abb. 6: Plakat zur Ausstellung „Burgunderbeute“ im Historischen Museum Bern (1994).

Ein an der Wand des Sammlungsraums hängendes Plakat, das anlässlich einer Ausstellung über die Burgunderbeute des Historischen Museums in Bern im Jahr 1994 geschaffen wurde, ist der Ausgangspunkt unserer nächsten Betrachtungen.

Wir studieren nun mithilfe von zwei Diaprojektoren verschiedene Ausschnitte des Teppichs und zwar von der Vorder- wie auch von der Rückseite:

Abb. 7: Tausendblumenteppich; Historisches Museum Bern; links Rückseite, rechts Vorderseite.

[...] Nun betrachten wir die Grüntöne der Pflanzen auf der Vorder- und Rückseite des Teppichs. Miro: „Sie sind praktisch gleich." Nikolaus: „Das Weiss leuchtet nicht mehr so auf der Rückseite." Das Gelächter der Klasse weist Nikolaus darauf hin, dass wir eigentlich bei der Betrachtung der grünen Töne sind! Anna: „Die Grüntöne sind auf beiden Seiten ähnlich, das Gelb ist blasser." Pascal: „ Das Grün ist auf der Vorderseite blasser." Jan: „Auf der Vorderseite ist das Grün etwas blauer." Wir betrachten die Abbildungen nochmals genauer und stellen tatsächlich fest, dass die grünen Töne auf der Teppichvorderseite einen starken Blaustich haben. Einige Schülerinnen und Schüler wissen, dass man beim Grünfärben die Wollfaser zuerst gelb einfärbt und anschliessend blau überfärbt. Die eher blaue Farbe auf der Vorderseite des Teppichs deutet also darauf hin, dass die gelbe Komponente stärker unter der Sonneneinstrahlung gelitten hat als das Blau. Diese Aussage bestätigt sich beim Betrachten der gelben Farbe auf der Vorder- und Rückseite des Teppichs, die auf der Vorderseite sehr stark verblasst ist.
Um nun den Bogen vom Phänomen zur Chemie zu schlagen, schreibe ich die Lewis-Formeln der färbenden Inhaltsstoffe der für den Teppich verwendeten Naturfarbstoffe an die Tafel [...].

5.2 II. Akt
[...] Der Fotoelektrische Effekt wurde mithilfe eines Elektroskops qualitativ demonstriert. Wir versuchen, das Phänomen mithilfe des Wellenmodells von Licht zu verstehen.
Luis erklärt spontan: „Licht kann keine Welle sein, obwohl wir dies bei der Beugungserscheinung gesehen haben." Meine Ergänzung: „Bei diesem Experiment, dem Fotoelektrischen Effekt, scheint das Wellenmodell zur Erklärung der Beobachtungen nicht zu genügen." Lea: „Vielleicht ist die Frequenz zu tief. Vielleicht haben die Elektronen Energie verloren, bis die nächste Anregung von der elektromagnetischen Welle kommt." Verschiedene Stimmen bemerken zu der zuletzt gemachten Aussage von Lea, dass Licht doch immer da sei und keine Pausen mache. Cristina: „Vielleicht ist Licht verschieden zusammengesetzt; eventuell hat es neben der Wellen- auch eine andere Natur." Luis wirft uns das Stichwort hin: „Teilchen." Ich greife den Ball auf: „Wie muss man sich das Loslösen der Elektronen vorstellen, wenn das Licht aus einem Teilchenstrahl besteht?" Jan: „Der Aufprall der Lichtteilchen führt zur Ablösung der Elektronen im Metall. Wenn die Lichtteilchen zu schwach sind, dann kommt es zu keinem Fotoelektronenstrom." Ich vergleiche die Situation mit Tennisbällen, die auf die Wand des Schulzimmers prallen. Diese führen zu keiner Veränderung am Mauerwerk. Nimmt man hingegen Stahlkugeln mit einer hohen Geschwindigkeit (z.B. durch eine Schleuder erzeugt), so wird die Wand in kürzester Zeit zerbröseln. Das Licht muss also bei unserem Experiment als ein Teilchenstrahl betrachtet werden, der je nach Frequenz des Lichts aus Lichtteilchen unterschiedlicher Energie besteht. Haben die Lichtteilchen, die als Photonen bezeichnet werden, eine minimale Energie, so können sie Elektronen des Metalls freisetzen. Andernfalls, wenn die Energie unter diesem Minimum liegt, lassen sich keine Elektronen lösen. Cristina hat den entscheidenden Punkt erkannt: „Die Energie hängt von der Frequenz des Lichts ab." Luis erscheint diese Aussage sehr gewagt und er gibt zu bedenken, dass nach dieser Aussage das Wellenmodell (Frequenz) mit dem Teilchenmodell (Energie von Photonen) vermischt wird [...].

5.3 III. Akt

Das Wasserstoffspektrum

Luis: „Wo Elektronen auf die Wasserstoff-Atome auftreffen, leuchtet es auf.“ Lea ist nicht dieser Ansicht. Cristina glaubt, die richtige Antwort gefunden zu haben: „Durch die Elektronen, die von der Kathode zur Anode fliegen, erhalten die Wasserstoff-Atome mehr Energie und leuchten.“ Ich mache die Klasse darauf aufmerksam, dass wir dem Wesen des Lichts auf der Spur sind und stelle ganz allgemein die Frage, wie denn Licht überhaupt zustande kommt. Désirée: „Elektronen im Atomkern.“ Mein zweifelnder Blick lässt sie unsicher werden und sie verbessert sich: „Durch die Elektronen in der Atomhülle.“ Nikolaus: „Je nachdem, wie hoch die Elektronen in der Hülle angeregt werden, kommt es zu verschiedenem Licht, da es ja verschiedene Elektronenschalen gibt. Die angeregten Elektronen fallen herunter, wobei Energie frei wird.“ Stefanie: „Die Energie wird in Form von Licht frei.“ Luis: „Die Energie, die frei wird, verwandelt sich in Lichtteilchen.“ Meine laut geäusserte Überlegung, wie ich herausfinden kann, welche Energien frei werden, beantwortet Kilian: „Wir können das Wasserstofflicht mit einem Prisma zerlegen, so wie wir das mit dem Lampenlicht gemacht haben.“

Die Schülerinnen und Schüler betrachten nun den leuchtenden Wasserstoff mit einem Handspektrometer.

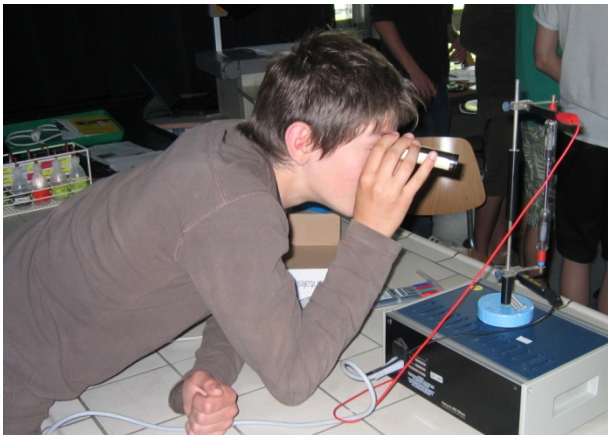

Abb. 8: Untersuchung des Wasserstoffspektrums.

Luis: „Man sieht nur einzelne Farblinien, nämlich Violett, Blau und Rot.“ Cristina: „Ich sehe auch noch eine gelbe Linie.“ Nach einiger Zeit haben alle die richtige Reihenfolge der farbigen Linien gesehen, wobei sich Cristina anscheinend getäuscht hat:

Rot, Grünblau, Blau, Violett

Abb. 9: Linienspektrum des Wasserstofflichts

Ich bitte meine Schüler, die Leuchtstoffröhren des Unterrichtszimmers, die ich eingesschaltet habe, ebenfalls mit dem Handspektrometer zu betrachten. Luis: „Ich sehe das gesamte Spektrum, wobei jedoch einzelne Farblinien hervorstechen: Rot, Grün, Violett.“ Cristina: „Ich sehe neben dem gesamten Spektrum die Linien Blau, Grün, Orange.“ Auch hier geht es einige Zeit, bis wir alle Linien beisammen haben:

Rot, Gelb, Grün, Blau, Violett, Violett

Abb. 10: Linienspektrum des Quecksilberlichts

Wir erörtern jetzt die Unterschiede der Spektren, die wir von einer Lampe, dem Wasserstoffgas und der Leuchtstoffröhre analysiert haben. In der Leuchtstoffröhre befindet sich Quecksilbergas. Bald einmal haben wir erkannt, dass man kontinuierliche Spektren (Lampenlicht, Sonnenlicht, Licht der Substanz am Leuchtröhrenglas) von Linienspektren (Wasserstoff, Quecksilber) unterscheiden muss. Jan erklärt uns, dass jedes Element ein eigenes, charakteristisches Linienspektrum erzeugt, wenn die Atome angeregt werden. „Jedes Element hat in seinen Atomen eine unterschiedlich besetzte Anzahl von Elektronenschalen. Damit sind die Elektronen jedes Mal vom Kern anders gebunden." Auf meine Bemerkung hin, dass es anscheinend kein Problem mit der Vorstellung gibt, Elektronen auf verschiedene Schalen zu befördern, antwortet Benjamin, dass wir die Elektronen als Teilchen ansprechen, die somit auch verschiedene Abstände vom Atomkern einnehmen können. Ich gebe zu bedenken, dass ein Körper jeden beliebigen Abstand von der Erdoberfläche (vom Erdmittelpunkt) haben kann. Ein Elektron sollte sich damit ebenfalls in jedem beliebigen Abstand vom Atomkern aufhalten können. Das ausgestrahlte Licht der Elemente müsste folglich in jedem Fall ein kontinuierliches Spektrum liefern. Luis wendet ein: „Die Elektronen halten sich nur auf bestimmten Schalen auf." Ich bleibe hartnäckig und wiederhole, dass ein Elektron, das wir als Teilchen betrachten, jeden Abstand vom Atomkern einnehmen kann und damit alle möglichen Energien vorkommen müssten. Anna unterbricht die auf meine Ausführungen hin eingetretene Stille: „Die Elektronen bewegen sich in Wellenbewegungen um den Atomkern." Es folgt die gleiche ratlose Stille [...].
„Welche Systeme sind bekannt, die nur ganz bestimmte Zustände einnehmen können?" Katya: „Eine Luftsäule in einem Blasinstrument." Benjamin: „Ein schwingungsfähiges System." Ich füge hinzu, dass dies auch für alle Streichinstrumente, eine Feder etc. gilt. Allmählich erinnern sich meine Schüler an die in der Ouvertüre bereits diskutierten Phänomene und die Folgerungen, die wir daraus gezogen haben. Wenn das Licht von leuchtenden Elementgasen nur aus ganz bestimmten „Farblinien" besteht, dann können die Elektronen nicht jeden beliebigen Energiezustand in einem Atom einnehmen. „Die Naturwissenschaftler kamen in der ersten Hälfte des 20. Jh. zu der überraschenden Überzeugung, dass Atome als schwingungsfähige Systeme zu betrachten sind, in denen die Elektronen (modellmässig) dreidimensionale stehende Wellen um den Atomkern bilden (Materiewellen)", ergänze ich. Licht kommt also dadurch zustande, dass bei Anregung (z. B. durch Elektronen einer Stromquelle) die Elektronen der Atome in höhere Energiezustände übergehen. Anschließend fallen sie jedoch wieder in den Grundzustand zurück und geben bei diesem Übergang jeweils ein Photon im sichtbaren Bereich ab. Je nach der abgegebenen Energie erzeugen dann diese Photonen durch unser Sehorgan den Eindruck von Rot, Blau, Violett etc. Die sichtbaren Farben eines Linienspektrums zeigen uns also die Energiedifferenzen zwischen dem Grundzustand und einem angeregten Zustand der Elektronen.

5.4 Finale

Tausendblumenteppich

Wir wenden uns, wie in der Ouvertüre, nochmals dem Plakat mit dem Tausendblumenteppich zu. Die Wolle des Teppichs wurde mit Naturfarbstoffen aus der Natur gefärbt. Die Schüler wissen noch, dass die Moleküle der Farbstoffe konjugierte Doppelbindungen enthalten. Die Chemiker haben solche Moleküle nachgebaut und können heute durch Variation der Molekülläng e und der Endgruppen praktisch jeden beliebigen Farbton herstellen. Als Beispiel haben wir die Phenylpolyenale kennengelernt und mit ihnen konnten wir die Abhängigkeit der Farbigkeit eines Stoffs experimentell herleiten.
Miro: „Die rote Farbe ist praktisch vollständig verschwunden. Ich glaube, die stammt von einer Flechte, die an Meeresrändern wächst." „Orseille" tönt es aus der Klasse. Adrian erzählt uns, dass die grüne Farbe der Rückseite auf der Vorderseite einen „Blaustich" hat. Dieses Problem scheint die Klasse gelöst zu haben. Von der Komplementärfarbe ist die Rede und davon, dass man einen Grünton aus Naturfarben durch das zweimalige Färben von Wolle erhält. Zuerst werden die Fasern gelb gefärbt und anschließend blau überfärbt. Ein blauer Farbstoff absorbiert gelb, eine Wellenlänge mit geringer Energie (λ: 580-595 nm), während ein gelber Farbstoff Wellenlängen

im Bereich von 435-480 nm aufnimmt. Die energiereichere Strahlung zerstört allmählich die Moleküle (gelbe Farbe), sodass Blau vorherrscht.
Jan: „Diese beiden Abbildungen (Vorder- und Rückseite des Teppichs) bestätigen das, was wir vorher gesagt haben. Die rote Farbe hingegen ist auch auf der Vorderseite noch vorhanden. Ich glaube, dieses Rot stammt von einer europäischen Lausart." Michael: „Auffällig ist auch hier, dass das Gelb sehr stark verblasst ist." Anna: „Anscheinend werden alle Naturfarbstoffe allmählich von der Sonnenstrahlung zerstört. Die Zerstörung geht je schneller vor sich, je energiereicher die elektromagnetische Strahlung ist, die zur Anregung eines bestimmten Farbstoffs gebraucht wird." [...]
Heisenberg/Einstein
„Existieren Elektronenbahnen? Wie beurteilen wir jetzt die Diskussion zwischen Heisenberg und Einstein?" Meine Schülerinnen und Schüler haben den Text vor sich, den wir schon in der Ouvertüre studiert haben. Zitat Heisenberg: *„Die Bahnen der Elektronen im Atom kann man nicht beobachten, aber aus der Strahlung, die von einem Atom bei einem Entladungsvorgang ausgesandt wird, kann man doch unmittelbar auf die Schwingungsfrequenz und die dazugehörigen Amplituden im Atom schliessen."* Jan: „Angeregte Elektronen in einem Atom geben ihre aufgenommene Energie in Form von Licht ab („Strahlung beim Entladungsvorgang"). Dabei gehen sie von einem höheren in einen tieferen Schwingungszustand über. Das abgegebene Licht entspricht der Energiedifferenz zwischen beiden Zuständen." Luis: „Elektronen haben Welleneigenschaften. Deshalb ist es möglich, die Amplituden und die Frequenzen zu bestimmen. Dazu gibt es ja die Wellenfunktionen und die Schrödinger-Gleichung." Da Luis leicht zögert, bekräftige ich, dass die Schrödinger-Gleichung als Werkzeug dient, um die verschiedenen Energien (z.B. des Wasserstoff-Atoms) mithilfe der Wellenfunktionen zu berechnen (vgl. Baars 2011b). Bei den höheren Atomen sind mathematische Näherungsverfahren nötig. Lea: „Wenn wir schon den Elektronen Wellencharakter zuschreiben, die Elektronenbeugung hat uns dies ja bestätigt, dann müssen wir auch von Amplituden und Frequenzen sprechen." Nikolaus: „Amplituden und Frequenzen gehören auch zum Licht. Es existiert also eigentlich kein Gegensatz zwischen Elektronen und Licht. Bei beiden haben wir Wellen- und Teilcheneigenschaften." Mélanie: „Farben haben natürlich auch etwas mit Amplituden und Frequenzen zu tun. Es sind ja elektromagnetische Strahlen." Michael: „In einem Beugungsmuster haben wir von Wahrscheinlichkeiten gesprochen; damit gibt es dort auch keine Elektronenbahnen zwischen Spalt und Beugungsmuster." Simon: „Also kann man solche Bahnen auch nicht für Elektronen in Atomen finden." Pascal: „Der Wechsel von einem Energiezustand in den anderen zeigt sich durch Aufnahme einer bestimmten Energie, z. B. einer Farbe aus dem sichtbaren Licht, oder durch Abgabe von Licht mit ebenfalls bestimmten Energien (Farben: Linienspektren!)." Damit haben wir, die Klasse bestätigt das, Heisenberg zugestimmt: Elektronenbahnen lassen sich nicht beobachten. Wie ein Elektron in einem Atom von einem Energiezustand in einen anderen gelangt, darüber kann keine Aussage gemacht werden. Dies hängt damit zusammen, dass ein Elektron sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften aufweist. Dieses zweideutige Verhalten hat Louis de Broglie in seiner Doktorarbeit, vom Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts ausgehend, auf alle Gegenstände übertragen.

Zufrieden kann ich damit diese Unterrichtseinheit, das Lehrstück „Quantenchemie farbiger Stoffe mit Heisenberg und Einstein", abschließen. Meine Schüler sind nun in der Lage, das Phänomen Farbe zu verstehen, und zwar mithilfe des Molekülbaus, der Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischer Strahlung und Elektronen sowie der grundlegenden Tatsache, dass „Alles seine Wellenlänge hat".

6. Stichwort „Lehrkunstdidaktik"
Die von Hans Christoph Berg und Theodor Schulze ab Mitte der 1980er-Jahre entwickelte Lehrkunstdidaktik (vgl. Berg/Schulze 1995) basiert auf Martin Wagenscheins genetischer Methode und seinen exemplarischen, für die Fächer Mathematik und Physik skizzierten Unterrichtsbeispielen. Sie befasst sich mit wissenschaftlich oder kulturell bedeutenden Ereignissen, welche die Sicht auf Kultur, Kunst und Wissenschaft maßgeblich verändert und beeinflusst haben und bis heute gelten. Im Lehrstückunterricht werden die Schülerinnen und

Schüler in die Ausgangslage früherer Entdecker, Urheber oder Autoren versetzt, von welcher aus sie „nach-entdeckend“ die Wege zu einer Entdeckung, einer Erfindung oder einem geschaffenen Werk im eigenen Lern- und Bildungsprozess erleben (Wildhirt 2008, 63). Ein Lehrstück ist eine in sich geschlossene mehrdimensional oder interdisziplinär angelegte Unterrichtseinheit, die einen vollständigen Lernzyklus umfasst (vgl. Übersicht auf www.lehrkunst.ch). Die Lehrkunstdidaktik ist den bildungstheoretischen Unterrichtskonzeptionen zuzuordnen (Klafki ab 1959; Berg/Gerwig/Wildhirt 2013, 16f), sie ist gleichzeitig tief in den Klassikern der Pädagogik verwurzelt. Lehrstückunterricht ist gleichermaßen erfahrungsorientiert, entdeckungsorientiert und handlungsorientiert (vgl. Wildhirt/Jänichen/Berg 2015).

Literatur

Baars, Günter (2008): *Farbstoffe*. In: Glöckner, Wolfgang; Jansen, Walter; Weißenhorn, Rudolf (Hrsg.): *Handbuch der experimentellen Chemie, Sekundarbereich II, Band 10. Funktionelle Gruppen, Fette, Farbstoffe.* Aulis Verlag AG Deubner. Köln. S. 277ff

Baars, Günter (2010): *Phenylpolyenale.* PdN-ChiS 59 (8), S. 13-19

Baars, Günter (2011a): *Quantenchemie farbiger Stoffe mit Heisenberg und Einstein.* hep-verlag. Bern.

Baars, Günter (2011b): *E-Dossier, Quantenchemie und Chemie farbiger Stoffe.* Online-Ressource: http://www.phbern.ch/e-dossier-quantenchemie0.html

Berg, Hans Christoph; Schulze, Theodor (1995): *Lehrkunst. Lehrbuch der Didaktik.* Luchterhand. Neuwied.

Berg, Hans Christoph (2009): *Die Werkdimension im Bildungsprozess. Das Konzept der Lehrkunstdidaktik.* Band 1 der Reihe „Lehrkunstdidaktik“. hep-Verlag. Bern.

Berg, Hans Christoph; Gerwig, Mario; Wildhirt, Susanne: (2013): *Lehrkunstdidaktik 2013. Weiter auf dem Weg zu einer konkreten und allgemeinen Bildungsdidaktik.* In: Zierer, Klaus (Hrsg.): *Jahrbuch für Allgemeine Didaktik 2013.* Schneider Verlag Hohengehren. Baltmannsweiler. S. 11-31.

Broglie de, Louis (1958): *Licht und Materie.* Fischer Bücherei, 1958

Einstein, Albert (1994): *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.* Gesammelte Publikationen, Sammlung 2: Schriften aus dem Jahr 1905. Albert Einstein-Gesellschaft Bern, Kramgasse 49, 3000 Bern 8.

Fischer, Ernst Peter (2012): *Die Hintertreppe zum Quantensprung, Die Erforschung der kleinsten Teilchen von Max Planck bis Anton Zeilinger.* Fischer Taschenbuch Verlag. Frankfurt/Main.

Hellemans, Alexander; Bunch, Bryan (1990): *Fahrplan der Naturwissenschaften. Ein chronologischer Überblick.* Droemer Knaur. München.

Wildhirt, Susanne; Jänichen, Michael; Berg, Hans Christoph (2015): *Lehrstückunterricht.* In: Wiechmann, Jürgen; Wildhirt, Susanne (Hrsg.): *Zwölf Unterrichtsmethoden. Vielfalt für die Praxis.* Beltz-Verlag. Weinheim. S. 111-128.

Über den Autor

Prof. em. Dr. Günter Baars studierte Chemie, Geografie und Geologie an den Universitäten Bern (CH) und Freiburg/Breisgau (D). Von 1970 bis 2012 war er Fachlehrer für Chemie am Gymnasium Bern-Neufeld sowie ab 1982 Chemiedidaktiker am Institut Sekundarstufe II der Pädagogischen Hochschule Bern. Er ist zudem Honorarprofessor der Universität Bern sowie Autor verschiedener Lehrbücher und zahlreicher Publikationen in Chemiedidaktik. Kontakt: guenter.baars@bluewin.ch