



Schatten einer von drei farbigen Lichtquellen beleuchteten Kreisscheibe

Farbige Schulphysik

Aus anderem Blickwinkel: Claudia Heyme, Schülerin der 11. Jahrgangsstufe, stellt das Projekt „Farbenlehren“ vor. Mit tatkräftiger Unterstützung von Prof. Wolfgang Oehme (Universität Leipzig) und Ingrid Oehme (Gymnasiallehrerin, Leipzig).

Im Rahmen einer Projektwoche des Uhland-Gymnasiums Leipzig entschieden sich 12 Schülerinnen und Schüler der 10. und 11. Jahrgangsstufe für ein Projekt „Newton – Goethe – Ostwald. Drei Farbenlehren aus drei Jahrhunderten“. An allen vier Arbeitstagen waren wir bei den Physikdidaktikern der Universität Leipzig zu Gast. Aufgeteilt in drei Gruppen, versuchten wir dort, uns anhand von Original- und Sekundärliteratur [1, 2,

3] in die Auffassungen und Erkenntnisse dieser drei Gelehrten zum Phänomen der Farben zu vertiefen und ihre Untersuchungsmethoden nachzuvollziehen. Newton war uns aus dem Physikunterricht schon gut bekannt, Goethes Wirken auf diesem Gebiet erstaunte uns, von Ostwald wussten wir nahezu nichts.

Als Ergebnis des Projektes entstanden Dokumentationen, Poster und Experimentieranordnungen, die beim ab-

schließenden Hoffest der Schule überzeugend präsentiert werden konnten.

Newtons farbige Schulphysik

Den Einstieg bildeten die drei Grundversuche Newtons: die Zerlegung weißen Lichts beim Durchgang durch ein Prisma in ein Farbband, die Unzerlegbarkeit der einzelnen Spektralfarben und die Wiedervereinigung des Spektrums mit einer Sammellinse oder einem zweiten Prisma zu Weiß.

Tätigkeit möglichst vieler Schülerinnen und Schüler fördern.

- Projektarbeit sollte immer produktorientiert sein. Solche Produkte können sein:

- selbst hergestellte Substanzen (z. B. hergestellte historische „Waschmittel“ und Seifen),
- Poster über wichtige Arbeitsergebnisse (Überblicke über Seifen und Waschmittel, Reinigungsmittel im Haushalt und Körperpflegemittel, Einteilungen von Seifen, Wasch- und Reinigungsmitteln, Wasch- und Reinigungsverfahren, Pro- und Kontra-Meinungen zu verschiedenen Waschmitteln und Biowaschmitteln etc.),

- entwickelte Geräte- und Experimentieranordnungen,
- Textilproben, die mit unterschiedlichen Waschmitteln gewaschen wurden,
- Veröffentlichungen in der Tagespresse oder in den Fachzeitschriften,
- Gestaltung von Projektstunden für nicht an dem Projekt beteiligte Schülerinnen und Schüler,

- Darstellung von Projektergebnissen im Rahmen von Elternabenden,
- Dokumentation der Projektrealisierung auf Video, im Internet und vieles andere mehr.

- Das Projekt lässt sich durchaus innerhalb der Unterrichtszeit bearbeiten, seine Durchführung sollte allerdings auf die Randstunden gelegt werden, da diese eine flexiblere Zeiteinteilung erlauben.

Arbeitsmaterial für das Projekt

Zur inhaltlichen Ausgestaltung des Gesamtprojektes hat der Autor das Themenheft „Vom Waschen“ verfasst (Volk und Wissen, Berlin 2000, ISBN 3-06-030740-7).

Dieses Schülerarbeitsmaterial wurde für den fachübergreifenden Unterricht in den Naturwissenschaften vorwiegend in den Klassen 9 und 10 von

Mittelschulen, Realschulen, Gesamtschulen und Gymnasien konzipiert. Es ist außerdem geeignet als Ergänzungsmaterial im Chemieunterricht der Sekundarstufe II beim Thema „Waschmittel“, für die Bearbeitung von Projekten im naturwissenschaftlichen Unterricht sowie für die Durchführung von Projekttagen oder Projektwochen unter fachübergreifender Thematik.

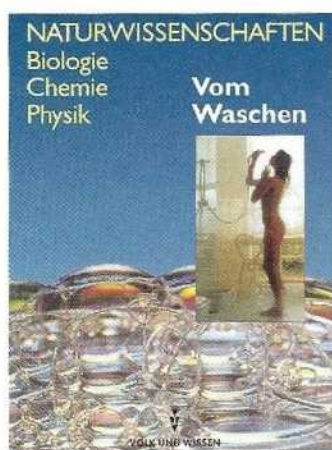
Die fünf Kapitel *Waschen im Wandel der Zeiten, Wasser und Seife – wichtige Partner beim Waschen, Moderne Waschmittel sichern den Wascherfolg, Körperreinigung und Körperpflege, Reinigung im Haushalt* sind in sich geschlossen und können daher unabhängig voneinander, einzeln oder in geänderter Reihenfolge, bearbeitet werden.

Jedes Kapitel beginnt mit motivierenden und problemorientierenden Einstiegen (Text-Bild-Kombinationen), denen Vorschläge für Schülerexperimente und differenziert einsetzbare Aufträge und

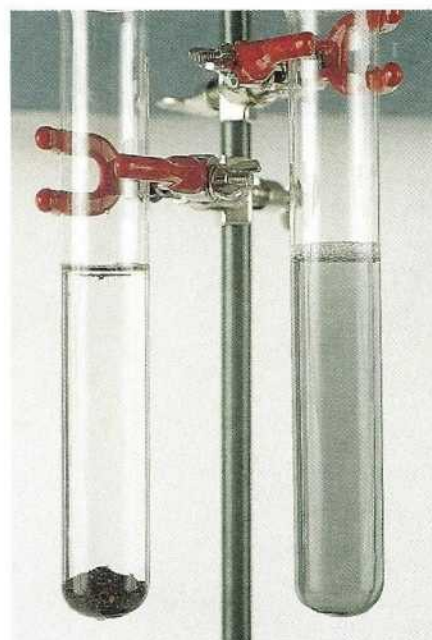
Aufgabenstellungen folgen. Die dargestellten 67 Experimente können von den Schülerinnen und Schülern eigenständig mit an den Schulen vorhandenen oder einfach zu beschaffenden Mitteln durchgeführt werden. Fragen des Arbeitsschutzes und der Gefahrstoffverordnung wurden exakt beachtet.

Jedes Kapitel beginnt mit motivierenden und problemorientierenden Einstiegen, denen Vorschläge für Schülerexperimente und Aufträge und Aufgabenstellungen folgen.

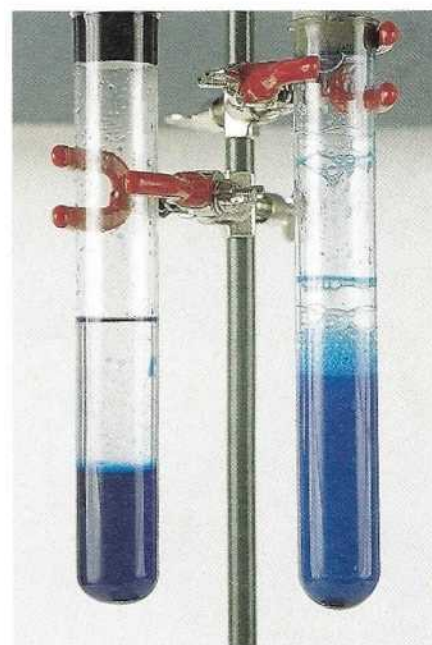
Die vorgeschlagenen Experimente sind den anschließenden Bild-Textinformationen zugeordnet. Diese Texte und etwa 140 Abbildungen bieten umfangreiche Informationen aus dem Alltags- und Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler, aus den verschiedenen Fachdisziplinen sowie interessante historische Bezüge. Eben-



Themenheft *Vom Waschen* (siehe auch S. 26 f.)



Schmutz in Wasser (links) und Schmutz in Seifenlösung (rechts; Suspension)



Öl in Wasser (links) und Öl in Seifenlösung (rechts; Emulsion)

so enthalten ist eine Fülle praktischer Ratschläge, z. B. Pflegehinweise für ausgewählte Textilien, Tipps zum umweltschonenden Waschen und zur Körper- und Haarpflege sowie Hinweise zum Umgang mit Reinigungsmitteln im Haushalt.

Mit seinen inhaltlichen Anregungen und der schülergerechten Gestaltung ist das Themenheft „Vom Waschen“ der ideale Begleiter zum hier vorgestellten Projektvorschlag.



Claudia Heyme,
Schülerin der 11. Jahr-
gangsstufe,
Uhland-Gymnasium
Leipzig



Dr. Wolfgang Oehme,
Professor für Didaktik
der Physik,
Universität Leipzig



Ingrid Oehme,
Physik- und Mathe-
matiklehrerin,
Uhland-Gymnasium
Leipzig

Im letztgenannten Experiment wurde zusätzlich zwischen Prisma und Schirm ein Spiegel eingefügt, der einen Teil des Spektrums ausblendete und dieses Licht auf einen zweiten Schirm warf [4]. Am Spiegel vorbeigehendes und von ihm reflektiertes Licht bilden ein Komplementärfarbenpaar. Verwendet man zwei Spiegel, die von beiden Seiten in das Spektrum hineingeschoben werden, so erscheint Purpurrot als Überlagerung des ausgeblendeten blauen und roten Bereichs des Spektrums. Es entsteht auch auf dem anderen Schirm, wenn mit einem kurz nach dem Prisma eingefügten dünnen Stab der grüne Spektralbereich aufgefangen wird. Purpurrot ist also die Komplementärfarbe zu Grün. Als weitere Paare ergaben sich insbesondere: Gelb – Violett, Orange – Blaugrün. Goethe sah diesen physikalischen Zusammenhang allerdings in einem ganz anderen Licht.

Farbmischung und Körperfarben

Ausgehend von der additiven Farbmischung durch Überlagerung farbiger Lichter auf einer weißen Fläche und dem Restlicht nach Durchlaufen zweier oder dreier Farbfilter (subtraktive Farbmischung) wurden Querverbindungen gesucht. Die paarweise Überlagerung der Grundfarben der additiven Farbmischung ergab, von geringen Abweichungen abgesehen, stets eine Grundfarbe der subtraktiven Farbmischung. Das nach Durchlaufen zweier Farbfilter verbleibende Restlicht ergab entsprechend Grundfarben der additiven Farbmischung. Die Beziehung dieser sechs Grundfarben sind auch im Goethe'schen Farbkreis wiederzufinden.

Übereinanderliegende Farbpigmente ergeben eine subtraktive Mischfarbe. Wie reagieren solche Mischungen auf Beleuchtung mit verschiedenfarbigem

Licht? Dazu wurden unterschiedliche Farbkartons mit verschiedenfarbigem Licht beleuchtet. Während ein weißer Kartonstreifen stets die Farbe des verwendeten Lichts annahm, erschienen die anderen Streifen nur dann hell, wenn sie mit dem Licht beleuchtet wurden, das ihrer Farbe im weißen Licht entsprach. Anderenfalls wirkten sie farbig verändert oder erschienen schwarz. Die Körperfarbe hängt also von den Farbpigmenten und der Beleuchtung ab. Damit wurden unsere Kenntnisse zu Komplementärfarben erweitert und, wie sich später herausstellte, Grundlagen für das Verständnis von Wilhelm Ostwalds Theorie der Farbpigmente gelegt.

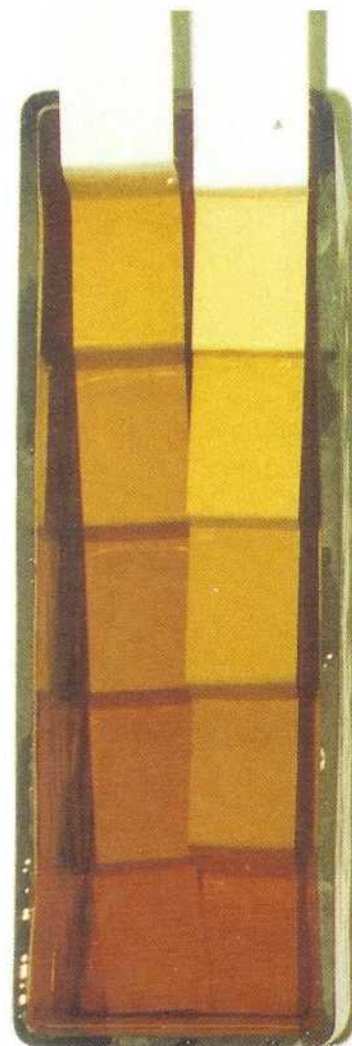
Erstmals farbige Schatten

Wir studierten die Schatten eines Körpers bei zwei weißen bzw. zwei gleich- oder verschiedenfarbigen Lichtquellen. Danach wurden rotes, grünes und blaues Licht eingesetzt. Die paarweise Überlagerung der Farbflächen führte wieder zu den Grundfarben der subtraktiven Farbmischung, die Überlagerung aller drei ergab nahezu Weiß. Je nach Position des undurchsichtigen Körpers entstanden Schattenbilder, deren Farbe durch die Überlagerung jeweils zweier Lichter entsteht, so wie auch im Randbereich unserer Fläche. Alle Schatten waren durch die Gesetze der additiven Farbmischung und die geradlinige Ausbreitung des Lichts erklärbar. Begeisterung rief das Schattenbild eines Blumenstraußes hervor.

Goethes Farbeffekte

Goethes systematisches Studium von Schwarz-Weiß-Grenzflächen mit Prismen ließ uns an unserer Schulweisheit zweifeln. Beim Blick auf die Umwelt durch verschiedene Prismen entstanden an Hell-Dunkel-Übergängen lebhafte Farberscheinungen. Um die sub-

jektive Betrachtung durch objektive Darstellungen zu ergänzen, fertigten wir nach Goethes Vorlagen Schablonen für die Schreibfläche des Tageslichtprojektors an. Mit einem vor dem Objektivkopf befestigten Geradsichtprisma konnten gelb-rote und violett-blaue Farbränder gemeinsam studiert werden. Höhepunkt war die Gegenüberstellung der Spektren für einen etwa 1 cm breiten Steg und einen gleich breiten Spalt. In beiden Spektren dominierten drei Farben: Der Steg führte zu Gelb, Purpurrot und Blaugrün, der



Farbtreppe-Versuch zu Goethes Harmonie der Farben

Spalt zu Grün, Violett und Orange. Die vertrauten Komplementärfarben standen einander direkt gegenüber. Hier hatten wir die Elemente des Goethe'schen Farbkreises vor uns.

In ein zylindrisches Glasgefäß füllten wir mit Milch oder Seife getrübbtes Wasser und betrachteten im abgedunkelten Raum sowohl das mit dem Tageslichtprojektor projizierte durchgehende rötliche Licht als auch das vor dunklem Hintergrund seitlich austretende bläuliche Licht. Dies machte uns Goethes Auffassung vom Urphänomen der Farben verständlich.

Für den polemischen Teil der Goethe'schen Farbenlehre, in der er sich ablehnend und abfällig gegen Newton äußerte, fehlte uns die Zeit. Aber wir verstanden, dass sich Goethes Auffassung vom Werden der Farben und der Unteilbarkeit des weißen Lichts nicht mit einem Weiß als fest vorgegebenes Gemisch aus verschiedenen Farben vereinbaren lässt.

Standen Goethes Farbefekte beim Betrachten von Schwarz-Weiß-Grenzen mit dem Prisma tatsächlich im Gegensatz zu Newtons Optik? Dazu untersuchten wir nochmals die Farberscheinungen bei verschiedenen Spaltbreiten im weißen bzw. einfarbigem Licht [5]. Wir erkannten, dass sich bei großer Spaltbreite die einzelnen Lichtanteile des weißen Lichts überlagern. Im mittleren Bereich entsteht deshalb Weiß, an den Enden erscheinen rot-gelbe bzw. blau-violette Farbsäume. Die Breite des weißen Zentrums nimmt mit der Spaltbreite ab und weicht bei schmalen Spalt dem nicht mehr überdeckten Grün.

Wiederum farbige Schatten
Goethes Schilderung farbiger Schatten regte uns an, seine Versuche im Labor nachzuvollziehen. Jetzt sollten zwei farbige Schatten bei nur ei-

ner farbigen Quelle entstehen. Das Ergebnis war eindeutig. Beleuchteten wir einen undurchsichtigen Körper gleichzeitig mit einer weißen und einer farbigen Lichtquelle, so entstanden ein Schatten in der Farbe der Lichtquelle und einer in ihrer Komplementärfarbe. Ähnliches ergab sich, wenn das Farbfilter ausgetauscht wurde. Auch andere Projektmitarbeiter waren beeindruckt. Wir waren auf den Spuren einer der größten Leistungen Goethes, der als Erster diese Erscheinung dem Empfinden des gesunden Auges zuordnete!

Farbige Nachbilder

Im leicht abgedunkelten Raum wurde mit einer auf dem Tageslichtprojektor liegenden Farbfolie eine Farbfläche an einer weißen Wand erzeugt, etwa 30 Sekunden intensiv betrachtet und

dann das Gerät abgeschaltet. Nach etwa 10 Sekunden erschien das Gebilde wieder, jetzt jedoch in der Komplementärfarbe.

Goethe und die Harmonie der Farben

Abbildungen zu Goethes Harmonielehre der Farben [1] regten uns an, zum Pinsel zu greifen. Neben seinem Farbkreis entstanden Zweiklänge der Komplementärfarben, der übernächsten Farben des Farbkreises mit zwei Goethe'schen bzw. zwei Newton'schen Farben, „charakterlose“ Zweiklänge benachbarter Farben des Farbkreises, Goethes Temperamentrose und sein Farbtetraeder zur Symbolisierung der Seelenkräfte. Sogleich wurde das Farbmempfinden der Mitstreiter getestet.

Um Goethes Vorstellung von der Steigerung des Gelb zum Orange und des Blau zum Violett zu ergründen, bogen wir aus weißen Aluminiumstreifen Stufenleitern mit gleich bleibender bzw. sich jeweils verdoppelnder Stufenhöhe. Zwei Treppen unterschiedlicher Bauart stellten wir in einen Glastrog mit angefärbtem Wasser. Dabei zeigten sich gleichmäßig abgestufte Farbübergänge nur bei den Treppen mit zunehmender Stufenhöhe. Das gleiche Phänomen sollte uns später wieder begegnen.

Und was sagt Ostwald?

Aus dem Studium von Ostwalds Farbfibel [2] entsprangen zwei Arbeitsrichtungen: Farbkreis und Farbharmone sowie Grauleiter und quantitatives Farbdreieck. Der von uns zur Vereinfachung auf 12 Felder reduzierte Farbkreis Ostwalds bildete die Basis für Komplementärfarbenpaare, aber auch so genannte Dreiklänge und Vierklänge sowie Teilharmonien.

Um uns Elemente der quantitativen Farbtheorie Ostwalds zu erschließen, folgten wir seiner Empfehlung, zunächst die empfindungsgemäße Grauleiter zu verstehen. Dazu machten wir uns mit dem Weber-Fechner'schen-Gesetz der Akustik vertraut, wonach die Empfindungsstärke proportional dem Logarithmus der Reizstärke wächst. In unsere Sprache



Versuche mit Kreisscheiben zu Ostwalds Farbtheorie

übersetzt bedeutet dies, dass die Grauleiter nicht durch gleich bleibende Abstufungen des Weiß- bzw. Schwarzanteils entsteht. Welche Abfolge ist geeignet?

Wir gehen der Sache auf den Grund

Für die Untersuchungen wurden Kreisscheiben angefertigt und mittels Motor in so schnelle Rotation versetzt, dass auch für zusammengesetzte Zonen ein einheitlicher Grauton entstand. Bei weißen und schwarzen Scheiben, die jeweils nur einen schmalen zusätzlichen Sektor Schwarz oder Weiß enthielten, zeigte sich, dass die Zumischung von Weiß zu Schwarz wesentlich größere Empfindungsänderungen bewirkt als der umgekehrte Fall. An Kreisscheiben mit fünf Zwischenstufen zwischen Weiß und Schwarz wurde dieses Erkenntnis geprüft und umgesetzt. Nur eine Kreisscheibe mit systematischer Halbierung des Weißanteils ergab bei Rotation eine empfindungsgemäß gleichmäßige Abstufung.

„Reagenzglas-Farborgeln“ mit entsprechenden Abstufungen des Anteils angefärbten und reinen Wassers zeigten das gleiche Ergebnis. Eine Lochschablone mit 2 x 4 Feldern und der Lochzahl 1, 22, 43, 64 in der oberen Reihe (Differenz 21) bzw. 1, 4, 16, 64 in der unteren Reihe (Faktor 4) ließ uns ein Licht aufgehen. Sie wurde auf



Präsentation der Projektergebnisse zu Newtons Farbenlehre

die Schreibfläche des Tageslichtprojektors gelegt, mit einer Mattscheibe abgedeckt und unscharf abgebildet. Nur für die untere Zeile ergab sich eine empfindungsgemäß gleichmäßige Lichttreppe. Für die obere Zeile erschien bereits das zweite Feld so hell, dass kaum noch eine Steigerung empfunden wurde. Spätestens hier war allen Beteiligten die Beziehung zur Mathematik klar: arithmetische und geometrische Folgen!

Unsere an der Grauleiter gewonnenen Erkenntnisse nutzten wir, um Farbscheiben anzufertigen, die einen kontinuierlichen Übergang von Weiß zu Vollfarbe bzw. Schwarz zu Vollfarbe vermitteln. Damit sind die drei Seiten des quantitativen Farbdreiecks gefunden und die Ostwald-Koordinaten erkannt: Weiß-, Schwarz-, und Vollfarbenanteil.

Ausklang

Wir waren stolz, mit großer Selbstständigkeit in Neuland vorgestoßen zu sein. Ein Höhepunkt war der Vortrag auf der MNU-Landestagung Sachsens im Oktober 1999. Mit unseren Postern und Grundanordnungen lockten wir die Zuhörer an. Jede Gruppe führte ihre wichtigsten Experimente vor und kommentierte sie, ein Betreuer übernahm die Moderation und Zusammenführung.

Natürlich blieben auch Fragen und Wünsche offen. So hätten wir gern noch den berühmten Ostwald'schen Farbkegel mit der Grauleiter als Achse erarbeitet. Auch blieb keine Zeit, das Goethe-Nationalmuseum in Weimar und die Ostwald-Gedenkstätte in Großbothen zu besuchen. Das wird unbedingt nachgeholt, denn zur Führung haben wir jetzt eigene Experten!



Literatur

- [1] Goethes Farbenlehre, ausgewählt und erläutert von R. Matthaei, Otto Meier Verlag, Ravensburg 1998
- [2] W. Ostwald: Die Farbenfibel, Verlag Unesma GmbH, Leipzig 1917
- [3] W. Ostwald: Die Farbenlehre
 1. Buch, Mathetische Farbenlehre, Verlag Unesma GmbH, Leipzig 1918
 2. Buch, Physikalische Farbenlehre, Verlag Unesma GmbH, Leipzig 1918
- [4] Physikalische Schulexperimente, Band 2, Optik/Kernphysik/Elektrizitätslehre, hrsg. von H.-J. Wilke, Volk und Wissen Verlag, Berlin 1999
- [5] E. Buchwald: Fünf Kapitel Farbenlehre, Physik Verlag, Mosbach/Baden 1957



Präsentation der Projektergebnisse zu Goethes Farbenlehre