

3. Faradays Kerze

3.1 Die Bedeutung des Themas für den naturwissenschaftlichen Unterricht

Der Geist ist kein zu füllendes Behältnis, sondern ein anzuzündendes Feuer. (Plutarch)

Man suche nur nichts hinter den Phänomenen, sie sind selbst die Lehre. (Goethe)

Der einfachste Versuch, den man selbst gemacht hat, ist besser als der schönste, den man nur sieht. (Faraday)

Nicht gleich zu Anfang sollte „Physik“ als ein gesondertes „Fach“ da sein, auch nicht in der „Höheren Schule“. Aus einer Naturlehre, die noch auf das Ganze blickt, sollten sich erst allmählich und notwendig die einzelnen Gebiete Biologie, Physik, Chemie entfalten. (Wagenschein)



Abbildung 1: Die Klasse baut den Kerzenkreislauf auf

3.1.1 Wagenscheins Hinweis

Faradays Kerze ist ein Musterbeispiel exemplarischer Lehrkunst: Im Mittelpunkt steht ein einziger – alltäglicher – Gegenstand, der Licht und Wärme ausstrahlt, zu Ruhe und Besinnung einlädt und dabei eine Menge Fragen aufwirft: Was ist mit der Kerze los, wenn sie verbrennt? Was ist eine Flamme? Woher kommt das Leuchten? Was verbrennt hier eigentlich? Was ist überhaupt Verbrennung? Die Lehrkunstdidaktik ist durch einen Hinweis Wagenscheins auf das Thema gestoßen. In seinem Buch „Die pädagogischen Dimensionen der Physik“ zeigt er auf, welche unterschiedliche naturwissenschaftliche Themenkreise Faraday anspricht und in wie viele Richtungen man von hier aus noch weiter fortschreiten könnte. Er schreibt: Bei Michael Faradays „Naturgeschichte einer Kerze“¹

„ (...) strahlen die physikalischen (und auch chemischen) Erfahrungen aus von einem einzigen Ding.

Noch dazu ist dieses Ding eine *Kerze*: Sie zieht die Blicke an, sie macht die Augen rund und sammelt die Köpfe um sich, sie erregt das Nachdenken in ihnen auf eine eigentümliche sanfte Weise und beschenkt uns mit Verbindungen zur ganzen Physik (des Vordergrundes). FARADAYS *Kerze* sollte jeder Lehrer kennen!

Was alles in ihr steckt! Das Handwerk des Kerzenziehens, der Anreiz, selber eine zu machen, die drei Aggregatzustände des Waxes: fest, als Vorrat unten in der Kerzenmasse bereitstehend, flüssig zubereitet in dem kleinen See, der oben auf der Kerze schwimmt mit seinem praktischen kleinen Außen-Wall, und das „Gas“, drinnen in der Flamme. Man meint erst, sie sei ein „Ding“, oben aufgesetzt wie ein Blatt, eine feuriges. Aber das ist sie nicht; wenn man genauer hinblickt: sie ist ein „Prozess“, ein Vorgang, ein Geschehnis. Denn die Kerze verbrennt ja, verzehrt sich, wie man sieht. Wo bleibt sie? Folgen wir dem Brennstoff: Flüssig geworden, saugt er sich in dem Docht hoch (wie macht er das?); und um den Docht herum und über ihm steht dann der geheimnisvolle blaue dunkle Raum, der Kern der Flamme. Was ist darin? Man kann „es“ (...) abzapfen durch ein Röhrchen und am Ende des Röhrchens entzünden: es ist ein „Gas“, das brennt, es kommt aus dem Docht, und es brennt also außen, da wo die Luft ist. Aber wo bleibt es?

Hier zweigt Chemie ab, ein „Einstieg“ in sie eröffnet sich; ich lasse sie beiseite (bei FARADAY findet man vieles dazu), denn auch Physik ist ja noch lange nicht fertig: Was tut die Luft dabei, die das Äußere brennen macht? Raucht man eine Zigarette dazu, oder betrachtet man den Schatten der Kerze im Sonnenlicht (...), so *sieht* man ihre Strömung, dieselbe, die jeder Ofen um sich herum in Gang bringt, und der Wassertopf in sich, der auf dem Herd steht. Woher die Strömung, wer ruft die Luft herzu? Die Kerze selber: „Wärme steigt auf“ (aber warum?). Sie macht die Strömung, aber sie braucht sie auch, damit immer neue Luft an sie heran kann, denn die Luft „verbraucht sich“ wie in jedem Feuer. – Was für eine zweckmäßig kleine Maschine eine solche Kerze ist! Einmal entzündet, erhält sich der Betrieb dieser kleinen Gasfabrik und regelt sich von selbst. Die Gas-Zunge oben, in-

¹ Faraday, Michael: Naturgeschichte einer Kerze. Buck, Peter (Hg.). Reprinta historica didactica. Bd. 3. Franzbecker, Hildesheim 2. Aufl. 1980

dem sie verbrennt, gibt Wärme; dieselbe Wärme schmilzt das Wachs. Im Docht steigt das flüssige Wachs „von selbst“ auf (wirklich, von selbst?), und oben erzeugt die Verbrennungs-Wärme den Luftstrom, den die Flamme zum Leben wieder braucht. Zwei Aufgaben hat sie und löst sie zugleich: den Brennstoff schmelzen, verdampfen, bereit machen, und die Brennluft heranholen. Dazu die dritte, die uns die wichtigste ist: Sie leuchtet ihr warmes Licht. Sie lockt uns hinein in die Optik. –

Nicht die Sonne des Alltags, nicht das blendende elektrische Licht, sondern ihr, der Kerze, doch auch schon künstliches Licht im dunklen Zimmer ist der beste Führer: Wie die Schatten tanzen und dadurch auf sich aufmerksam machen, wie die Dinge widerstrahlen, wie das Licht sich verliert, eine Höhle macht in die Dunkelheit, ohne scharfe Wände, wie es also draußen immer dunkler wird: und warum eigentlich? Läuft das Licht sich müde? Saugt die Luft es auf, so wie das Wasser im Sande verrinnt? Oder ist es nur, weil es immer weiter sich öffnen muss, weil es sich verdünnt, verteilt, auseinanderstrahlt? „Strahlen“ – gibt es sie? Kann man sie zählen? ...

Genug; brechen wir ab, und sagen wir es trocken, was alles in ihr steckt: Chemie, Verbrennung, Physik, Aggregatzustände und ihre Umwandlung durch die Wärme. Kapillarität, Wärmeströmung und Wärmestrahlung, Auftrieb, Luftdruck, Optik: Schatten, Beleuchtungsstärke. (...)

Aber die Kerze führt auch aus der Physik wieder heraus: Die Flamme ist kein Ding, sie ist ein Prozess. So wie der Fluss, die Fontäne, der Wirbelwind (der im Herbst als rasselnder Turm welcher Blätter auf dem Acker vor dem Waldrand sichtbar steht), die Kumuluswolke (die das Kind lange für eine Art Federbett hält oder – wie auch viele Erwachsene vermutlich lebenslang – für ein wassergefülltes schlauchartiges „Ding“). – Aber auch der Organismus, „wir selbst“, unsere Körper sind nicht „Körper“, sondern Prozesse. – Dabei aber ist die Kerze kein biologischer Prozess. Denn sie kann vieles nicht, was die Organismen können. Das Entscheidende kann sie nicht. – So ist die Kerze auch insofern eine Leuchte, als sie uns hineinführt in die Physik und wieder hinaus. (...) Es fällt nicht leicht, der Kerze noch ein zweites, ebenso glückliches Beispiel derselben Art zur Seite zu stellen.“²

So Wagenschein 1962. Und tatsächlich: Die Nachschrift der sechs „Lectures on the Chemical History of a Candle“, die Michael Faraday in den Weihnachtsferien 1860/61 gegen ein geringes Eintrittsgeld für die Londoner Jugend gehalten hat, findet sich in erstaunlich vielen Bücherschränken der Kolleginnen und Kollegen – ob Chemiker oder nicht.

3.1.2 Faradays Kerze in der Lehrkustdidaktik

Theo Schulze hält Faradays Vorlesungen für „eine ausgezeichnete Einführung in die Chemie und in naturwissenschaftliches Denken überhaupt“, weil Faraday darin „an einem einzigen, einfachen, allgemein bekannten und für jedermann verfügbaren Gegenstand entlang einen Weg aufweist, der vom nachvollziehenden Herstellen und aufmerksamen Hinsehen über zahlreiche Experimente bis zu grundlegenden chemischen Erkenntnissen und darüber hinaus zur Einsicht in umfassendere kosmologische Zusammenhänge führt.“

Für den Unterricht braucht es eine gründliche Umgestaltung von Faradays Vorlage, zu groß ist die Stofffülle, zu wenig begleitend die Lehrerrolle, zu gering dementsprechend die Möglichkeit der Lernenden, Wege eigenständig zu finden und selbst zu gehen. Es muss Raum geschaffen werden für die eigene produktive Findigkeit und für eigene Experimente der Schülerinnen und Schüler.

Seit Mitte der 1980er Jahre wird die *Kerze* in der Lehrkustdidaktik diskutiert und Faradays Vorlage zumeist für den Chemieunterricht dialogisch nachgestaltet und ausprobiert.³ Aus der großen Zahl der an die 100 Experimente, die Faraday vorführt, wurden die wichtigsten ausgewählt. Durch den ständigen Bezug auf das Phänomen und die einfachen Experimente, die man auch zu Hause fortsetzen kann, ist die Thematik in die Erlebniswelt der Kinder bzw. Jugendlichen eingebunden. Die Inhalte des Lehrstücks lassen sich entlang der grundlegenden Fragen weitgehend selbständig finden, im Schülerheft selbständig beschreiben und mit Zeichnungen illustrieren. Die Mehrdimensionalität des Gegenstands schafft Möglichkeiten für phi-

² Wagenschein 1962/1995, S. 203ff.; nahezu vollständig zitiert in Berg/Schulze 1995, S. 286f.

³ Publiziert sind: Klein/Langenbach in Berg/Gideon/Rumpf, 1986, S. 566-570; Buck und Klein in Berg 1990, S. 46-56 und 67-75, Sperrle und Döttling-Vogt in Berg/Gerth/Pothast, 1990, S.177-190, Theophel in Berg/Schulze 1995, Aeschlimann 1999, Rohde 2003. – Als Manuskript liegt vor: Johannsen 1990.

losophische, religiöse, ästhetische Fragestellungen, Betrachtungsweisen und Gestaltungen. Faradays *Kerze* ist in der Lehrkunst längst zum „Klassiker“ geworden, über 40 Inszenierungen aller Schulstufen liegen bereits vor, ich selbst habe die *Kerze* ab 2000 in den Jahrgangsstufen 5, 6 und 7 vorwiegend im fachverbundenen Unterricht Biologie und Deutsch, im Wahlpflichtunterricht Naturlehre und im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht in der Haupt-, Real- und Gymnasialstufe unterrichtet.

3.1.3 Faradays Kerze im Anfangsunterricht

„Die Kerze“ ist kein typisches Lehrplanthema, die Mehrdimensionalität des Gegenstands fügt sich schlecht in die Fächerung des Schulsystems. Allerdings nutzen viele Schulen die Möglichkeit, integrierte Naturlehre-Themen im Rahmen von Projektwochen o.ä. anzubieten. Wo integrierte Naturlehre unterrichtet wird (in einigen deutschen Bundesländern vor allem auf der Hauptschulstufe, in der deutschsprachigen Schweiz im Primarbereich und im Kanton Luzern auch im Sek.1-Bereich), eignet sich das Thema hervorragend zur Einführung in die drei Hauptdisziplinen. Einige Bundesländer (darunter Hessen) sind dazu übergegangen, das Integral der drei Fächer (Physik, Chemie, Biologie) als „Einführung in das naturwissenschaftliche Experimentieren“ in den Jahrgangsstufen 5 und 6 fakultativ anzubieten oder in einen Wahlpflichtbereich (meist in den höheren Jahrgängen der Sekundarstufe 1) zu verlagern. Die Popularität der *Kerze* als Unterrichtsthema ist in den vergangenen fünf Jahren deutlich gestiegen, nicht zuletzt, so mein Eindruck, durch diverse Publikationen aus dem Umkreis der Lehrkunstdidaktik.

Im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht kann es nicht bloß darum gehen, ein additives ‚Wissenshaus‘ zu errichten: zunächst Biologie, die Lehre von den Lebewesen, später Physik, die Lehre von den Körpern und wie sie sich zueinander verhalten, alsdann Chemie, die Lehre von den Stoffen usw. – Die Schülerinnen und Schüler gehen gespannt auf die Naturlehre zu und wollen möglichst umfassend erleben, was die Naturwissenschaften alles leisten können. Daher ist es sinnvoll, zum Einstieg ein Thema zu wählen, das seine Fühler in alle drei Schulfächer streckt. Für einen Einstieg, der bei Verbrennungserscheinungen ansetzt, spricht: Das Feuer begeistert, es ist eine der ältesten Kulturleistungen, mit der Zivilisation eng verbunden, es zeigt in einem „Brennpunkt“ wesentliche physikalische, chemische und ökologische Prozesse (wenn auch nicht, wie Faraday meint, *alle* Gesetze).

3.2 Inszenierung: Faradays Kerze 1992

Aus den zum Großteil veröffentlichten Unterrichtsdurchführungen der 90er Jahre von Hartmut Klein, Ortwin Johannsen und Ueli Aeschlimann greife ich als Grundlage für die Fragestellung dieser Arbeit den Unterrichtsbericht von Eberhard Theophel heraus, der im Lehrkunst-Band 1995 über seinen Unterricht mit Schülern einer 9. Klasse in der Kestner-Gesamtschule in Wetzlar berichtet⁴ und deshalb in der Öffentlichkeit am stärksten zur Kenntnis genommen wurde.

3.2.1 Kompositions- und Inszenierungsübersicht

In der folgenden Tabelle ist Eberhard Theophels Inszenierung des Kerzenlehrstücks im Überblick dargestellt. Die Textgliederung seines Berichts richtet sich nach den verfügbaren Zeitgefäßen (sechs Doppelstunden). Die Akt-Bezeichnungen sind von mir nachträglich gesetzt, ebenso die Szeneneinteilung. Auf Theophel gehen die Lektionstitel zurück, die den Hauptszenen der geschilderten Doppelstunde entsprechen.

⁴ Theophel in: Berg/Schulze 1995, S. 288-304

Einstieg		1. Akt			2. Akt	3. Akt	Abrundung
Betrachten der brennenden Kerze		Was brennt?			Warum leuchtet die Kerzenflamme?	Was entsteht bei der Verbrennung?	Kerzenkreislauf
Zeit. Doppelstunde	„Szenen“	Flammensprung Dampfiges Wachs	Der Blick in das Innere der Kerzenflamme	Wachsdampf aus der Kerzenflamme	Feuerwerk und leuchtender Ruß	Aus Ruß wird Kohlendioxid	Feuerwasser und Kerzenkreislauf
		Betrachten der brennenden Kerze Flammensprung dampfiges Wachs	die Aggregatzustände Rußringe Blick ins Innere mit einem Drahtnetz Flammentanz Die Kapillarwirkung des Dochts	Wachsdampf lässt sich ableiten und entzünden Erzeugen einer Tochterflamme	Rußnachweis in der Kerzenflamme Der Flammenschatten im Licht Feuerwerk verschiedener Pulver Welche Bedeutung hat die Luft?	Kohlendioxidnachweis Wortgleichung und Formelschreibweise Steht der Kohlenstoff im Kerzenwachs in einer Verbindung mit einem anderen Stoff?	Wassernachweis mit Becherglas und selbst entwickelter Kühlfalle Wortgleichung und Formelschreibweise Kerzenkreislauf

Abbildung 2: Kompositions- und Inszenierungsübersicht: Eberhard Theophel 1992

3.2.2 Zusammenfassung. Eine exemplarische Einführung in die Chemie in der 9. Klasse der Kestner-Gesamtschule Wetzlar

Theophel schildert einen 12-stündigen Wahlpflichtunterricht Chemie der integrierten Jahrgangsstufe 9, der parallel zum zweistündigen Pflichtunterricht verläuft und Gelegenheit zur Vertiefung bietet. Am Ende bilanziert der Lehrer: „Wünschenswert, man könnte die sechs Doppelstunden an sechs Tagen der Woche unterrichten; der inhaltliche Zusammenhang bliebe daher gewahrt, der Spannungsbogen würde nicht überdehnt.“

Erste Doppelstunde. Der Flammensprung – dampfiges Wachs

Eine neue Unterrichtseinheit wird eröffnet, mehr wissen die Schülerinnen und Schüler zu Beginn nicht. Haushaltskerzen, Kerzenständer und Streichhölzer werden verteilt, die vertraute Kerzenflamme wird betrachtet und beschrieben und an der Wandtafel gezeichnet. Nun erfährt die Klasse von Michael Faraday und seinen Weihnachtsvorlesungen und stimmt sich so auf eine Vielzahl interessanter chemischer Untersuchungen ein. Die Schüler sehen eine kurze Demonstration des Flammensprungs und probieren ihn alsbald im Wettbewerb um den weitesten Sprung selbst aus. Beim Spiel mit der Flamme klärt sich, dass es nur der Wachsdampf sein kann, der aus dem Docht entweicht, sich entzünden lässt und die Flamme wieder zurück zum Docht bringt. Wirklich? Die Probe zeigt es: Festes Wachs wird in einer Eisenschale erhitzt, bis es schmilzt. Bald steigt dichter Wachsdampf auf, der brennende Holzspan zündet den Nebel, die lodernden Flammen werden mit einem Deckel erstickt. Der Demonstrationsversuch zeigt festes Wachs, flüssiges Wachs und Wachsdampf, und alle drei Aggregatzustände finden sich in der Kerze wieder: fest als Kerzenkörper, flüssig im Wachs-„Schüsselchen“ am oberen Kerzenrand in der Nähe des Dochts und gasförmig ...? Irgendwo in der Flamme muss das Gas sein, die innen „teilweise hohl“ erscheint. – Ein quer in die Flamme gehaltener Holzspan zeigt nur an den Rändern Brandspuren. Die Klärung dieser Frage wird auf die nächste Doppelstunde vertagt, die Ergebnisse werden im Heft samt Zeichnung festgehalten.

Zweite Doppelstunde. Der Blick in das Innere der Kerzenflamme

Eine Kerze samt zugeordneten Aggregatzuständen wird zur Anknüpfung an die bisherigen Erkenntnisse an die Tafel gezeichnet. Woher kommt das gasförmige Wachs, der Wachsdampf? Dort, vom Docht kommend, müsse das Wachs durch die Hitze der umgebenden Kerzenflamme verdampfen. Also unsichtbarer Kerzendampf? Es gäbe, so der Hinweis, vergleichbare Vorgänge; so z. B., wenn Dampf aus dem Wasserkessel austrete. Zunächst sei er unsichtbar, dann bilde sich Nebel.

Es ist Zeit, die vermuteten Vorgänge in der Kerzenflamme experimentell zu hinterfragen. Ein Blatt Filterpapier, von oben kurz mitten in die Flamme gehalten, zeigt in der Mitte einen unversehrten Fleck, rundherum die Brandspuren der leuchtenden Flamme. Man müsste in die Flamme hineinsehen können. Ein Drahtnetz, langsam in die Flamme bis auf den Docht herabgesenkt, lässt einen Blick von oben in den Hohlraum zu. Gleichzeitig sieht man Kerzendampf entweichen, riecht ihn auch. Und: Er brennt tatsächlich. Wachs kommt aus dem Docht und verdampft. Er wird entzündet und zarte Flämmchen schweben einige Zentimeter oberhalb des Drahtnetzes. Der Hohlraum enthält den unsichtbaren Wachsdampf.

Neue Fragen tauchen auf: Warum verbrennt der Wachsdampf nicht direkt am Drahtnetz? Weil dieses die Wärme ableitet und den Wachsdampf in direkter Nähe abkühlt. Anwendungsbeispiele wie das Prinzip der Davy'schen Sicherheitslampe verdeutlichen das Phänomen.

Nebenbei angefallen ist auch die Beobachtung, dass schwarzer Qualm entweicht, sobald man das Drahtnetz in den leuchtenden Teil der Flamme hält. Nicht beantwortet aber ist die Frage, wie das Wachs im Docht nach oben steigen kann. Wird es etwa durch die Hitze nach oben gezogen? Wie kommt das Wasser von den Baumwurzeln bis zu den Blättern? Begriffe wie Haarröhrchen und Kapillaren werden hervorgeholt. Die Aussagen sind experimentell zu überprüfen: An verschiedenen dünnen Röhren ist zu beobachten, dass Wasser am Rande nach oben steigt, je dünner, desto höher (Haarröhrchenprinzip). In Textilgewebe, zu beobachten an der Saugwirkung des Handtuchs, in Baumwollfäden, im Kerzendocht gibt es Kapillaren. Stellvertretend für geschmolzenes Wachs werden unterschiedliche Materialien in Heizöl getaucht; nach kurzer Zeit lässt sich Heizöl am oberen Ende des Dochts anzünden. Selbst ein Stück Tafelkreide lässt sich als Docht verwenden.

Dritte Doppelstunde. Wachsdampf aus der Kerzenflamme

Der im Flammenzentrum entstehende Wachsdampf muss sich ableiten und auffangen lassen. Die Schülerinnen und Schüler erhitzen und biegen Glasröhrchen, um durch sie Wachsdampf in einen Erlenmeyerkolben abzuleiten. Dicht über dem Docht, im Hohlraum, kann er abgezapft werden. Wie ein dichter Nebel, eine träge Flüssigkeit, sinkt er aus dem Glasrohr auf den Boden des Erlenmeyerkolbens und quillt seitlich wieder nach oben. Die Schüler sind begeistert bei der Sache, sie zeigen sich gegenseitig ihre Versuche.

Ein mit Wachsdampf gefüllter Kolben wird mit der Öffnung an die Brennerflamme gehalten. Eine schwach-blaue Flamme schlägt in den Kolben hinein und verbrennt den Wachsdampf. Eine Wachsschicht bleibt an der inneren Glaswand haften. Leitet man Wachsdampf aus dem Hohlraum im Flammeninneren durch ein gerades Röhrchen schräg nach oben, kann eine kleine Tochterflamme neben der größeren Hauptflamme entzündet werden.

Bei beiden Versuchsanordnungen setzt sich an dem in die Flamme eintauchenden Ende des Glasröhrchens Ruß ab. Man kann ihn auch aus der Flamme ableiten, wenn das Röhrchen oberhalb des Hohlraums in den leuchtenden Teil der Kerze eintaucht; dort, wo auch das Drahtnetz in der Kerzenflamme schwarzen Qualm verursachte. Er lässt sich, so die Ergebnisse der Schülerversuche, weniger schön auffangen als der weiße Kerzendampf, und eine Tochterflamme will auch nicht gelingen. Zwei verschiedene Stoffe aus einer Flamme; der eine brennbar, der andere anscheinend nicht? Einer weiß wie die Kerze, einer rußschwarz?

Das verwundert, doch zunächst werden die Versuche und bisherigen Erkenntnisse schriftlich festgehalten.

Vierte Doppelstunde. Feuerwerk und leuchtender Ruß

Ruß aus dem leuchtenden Teil der Kerzenflamme! Man kann ihn sichtbar machen: Eine weiße Porzellanschale in die Kerzenflamme gehalten, überzieht sich mit einer dicken Rußschicht. Dass sich der Ruß tatsächlich im leuchtenden Teil der Kerze befinden muss, lässt sich mit einem verblüffenden Experiment belegen: Die Kerzenflamme, mit dem Lichtstrahl eines Diaprojektors angeleuchtet, wirft einen Schatten. Das Zentrum bleibt hell, dort befindet sich unsichtbarer Wachsdampf; der leuchtende Kranz aber wirft einen Schatten. Hier also ist der Ruß dem Licht im Wege. Noch etwas lässt sich beobachten und wird später aufgegriffen: Flimmernde Luft oberhalb der Kerze malt ein Bild des aufsteigenden Luftstroms.

Ist es der Ruß, der die Kerzenflamme zum Leuchten bringt? Eine Analogie zum Gasbrenner fällt auf: Bei stärkster Luftzufuhr zeigt sich die nicht leuchtende Flamme ohne Rußspuren. Verbrennt der Ruß hier vollständig, während er bei geringerer Luftzufuhr nur verglüht? Verglüht die Kerzenflamme also nur, weil sie so wenig Luft bekommt? Die Show beginnt: Im abgedunkelten Raum bläst der Lehrer verschiedene Metallpulver in die Flamme, sie leuchten in unterschiedlichen Farben, doch keine leuchtet wie die Kerzenflamme. Feste Stoffe, in die Brennerflamme gebracht, verbrennen oder verglühen, so folgert die Klasse. Zur Probe wird Ruß (Kohlenstoff) in die nicht leuchtende Brennerflamme geblasen. Sie nimmt die Färbung der Kerzenflamme an. Es ist tatsächlich Ruß, der der Flamme ihre warm leuchtende Farbe gibt.

Bleibt die Frage nach der Bedeutung der beobachteten Luftströmung: Zuviel pustet die Flamme aus, eine brennende Kerze, in einen sauerstoffgefüllten Zylinder getaucht, leuchtet eine Weile mit greller Flamme auf. Einen Einfluss auf die Flamme hat die Luft, aber keinen in der vermuteten Richtung.

Fünfte Doppelstunde. Aus Ruß wird Kohlendioxid

Außerhalb der Flamme ist Ruß nicht mehr nachweisbar. Es taucht die Frage auf: Was passiert mit dem leuchtenden Ruß in der Flamme? Vermutlich verbrennt er, dazu braucht er Luft, die an der Kerze entlang hoch streicht und sich mit angefeuchteten Fingern spüren lässt. Fast nebenbei findet sich nun auch eine Erklärung für das Wachs-„Schüsselchen“. Eine heiße Flamme, die von oben das Wachs zum Schmelzen bringt, trifft auf den aufsteigenden, kühlenden Luftstrom, der einen festen Rand stehen lässt. Stört man dieses Gleichgewicht, beginnt die Kerze zu tropfen.

Ist es denkbar, dass die Verbrennung von Ruß keine Spuren hinterlässt? Asche ist jedenfalls nicht zu sehen! Man erinnert sich, dass bei Verbrennungsvorgängen Oxide entstehen. Es müsste also gasförmiges, unsichtbares Kohlendioxid entstehen. Aus der Stahlflasche in Kalkwasser eingeleitetes Kohlendioxid als Nachweismittel zeigt die Wirkung. Auch Atemluft, durch Kalkwasser geleitet, färbt dieses milchig trüb.

Nebenbei wird das Prinzip der Wasserstrahlpumpe erarbeitet und hier angewendet. Die chemischen Reaktionen *Oxidation des Kohlenstoffs* und *Nachweis des Kohlenstoffdioxids* werden als Wortgleichungen und in der Formelschreibweise formuliert. Zu klären bleibt, warum der Wachsdampf nicht schwarz ist wie Ruß. Ein Gemisch mit Ruß kommt nicht in Frage, sonst wäre die Kerze zumindest grau. Sollte noch ein weiterer Stoff in Verbindung mit dem Kohlenstoff verbrennen?

Sechste Doppelstunde. Feuerwasser und Kerzenkreislauf

Wachs, eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und ... ? Wenn Kohlenstoff in der Kerzenflamme verbrennt, dann müsste auch dieser andere Stoff verbrennen. Nachzuweisen wäre er dann auch als Verbrennungsprodukt, also in einer chemischen Verbindung mit Sauerstoff. Da auch dieses Oxid nicht sichtbar ist, genauso wenig wie das Kohlendioxid, müsste es sichtbar gemacht werden.

Hier hilft nur der konkrete Nachweis: Ein großes, trockenes Becherglas ist über die Flamme zu halten. Es beschlägt. Das könnte Wasser sein. – Wasser aus der Kerzenflamme? Die Apparatur zum Nachweis von Kohlendioxid wird zur Kühlfalle umfunktioniert. Das U-Rohr wird in ein großes Becherglas mit Eiswasser gestellt. Die Kerze verbrennt unter dem Trichter, die Verbrennungsgase werden wiederum durch das U-Rohr gesaugt. An den Wänden des U-Rohrs bilden sich tatsächlich Wassertropfen, die sich allmählich am Boden zu einer kleinen Wasserpfütze sammeln. Ist dies auch wirklich Wasser? Genau wie mit Leitungswasser färbt sich weißes Kupfersulfat auch mit dem verflüssigten Verbrennungsprodukt blau. Bei der Verbrennung entsteht tatsächlich Wasser!

Wenn Wasser ein Verbrennungsprodukt, also ein Oxid ist, dann muss der Ausgangsstoff Wasserstoff sein, schlussfolgern die Schülerinnen und Schüler. Wachs entpuppt sich also als Verbindung aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Die entsprechende Wort- und Formelgleichung und die Zeichnung der Kühlfalle folgen. Abschließend wird in Anlehnung an Faraday der Kerzenkreislauf entwickelt und dargestellt: Die Verbrennung von Kohlenstoff und Wasserstoff zu Kohlendioxid und Wasser mit dem dazu notwendigen Sauerstoff werden als Teil des Stoffwechsels des großen Ökosystems Erde im Gegensatz zur Photosynthese im Schaubild festgehalten.

3.2.3 Kompositionsanalyse

(1) Validierung durch die Lehrstückkomponenten

Einen Überblick über die kritischen Momente der Inszenierung gibt die folgende Tabelle:

Momente der Inszenierung	Prüfkriterien	Bezug zur Methodentrias	Kritische Punkte der Inszenierung
Die brennende Kerze wird beobachtet, beschrieben und gezeichnet. Während des gesamten Unterrichts ist die Kerze präsent.	reizvolles Phänomen	exemplarisch	Die Schülerinnen und Schüler betrachten die Kerze von Beginn an aus physikalisch-chemischer Perspektive. Dies ist aufgrund des fixen Fächerplans selbstverständlich, schade allerdings, dass die Mehrdimensionalität der Betrachtung von vornherein eingeschränkt ist. – Doch nicht zu stark: Theopel lässt hinreichend Zeit zum gründlichen Beobachten, Fragen Experimentieren, Nachforschen, Prüfen, Analysieren und Erkenntnis sichern. Die Ökologie kommt bei Theopel eindeutig zu kurz: Hier baut er zu sehr auf Vorwissen, das er in die abschließende Betrachtung des Kohlenstoffkreislaufs integriert.
Was brennt? Warum leuchtet die Flamme? Was entsteht bei der Verbrennung?	organisierende Sogfrage(n)	Sokratisch, genetisch, dramaturgisch	Der Sog in Richtung stofflicher Analyse ist von Beginn an gegeben und an das Phänomen gebunden: Zunächst wird der Brennstoff gesucht, zweitens das Leuchten der Flamme zu erklären versucht, später der Frage nachgegangen, woran es liegt, dass keine „Spuren“ des Kohlenstoffs zurückbleiben und der Wachsdampf nicht schwarz sei – damit wird die Frage nach den Verbrennungsprodukten beantwortet, die aufgrund der Beobachtungen nahezu selbst von den Schülerinnen und Schülern gefunden wird (Man sieht ja nicht, dass <i>etwas entsteht</i> .) - Theopel lässt nicht locker; teils – so mein Eindruck – stellt er die Fragen, teils die Schüler. Deutlich treten die drei zentralen Fragestellungen hervor, welche die Teilhandlungen evozieren. Es fehlt allerdings ein übergeordneter Handlungszusammenhang für das ganze Lehrstück. Man ahnt nicht, dass am Ende ein ganzes Weltbild entstehen würde.

Jeder hat eine Kerze vor sich, der Aufforderungscharakter zum genauen Studieren ist gegeben. Plenums- und Einzelarbeit ergänzen einander im klassischen Lehrgang.	Ich- /Wir-Balance	genetisch	Die Sozialformen richten sich nach dem Unterrichtsaufbau. Die Handlungsorientierung ist hoch: Auf Demonstrationen folgen zumeist die eigenen Experimente, Experimente werden zum Teil entwickelt und ausprobiert, die Erkenntnisgewinnung geübt, die Eigenaktivität gewährleistet. Bei allem ist Vorsicht geboten. An einer Stelle werden sogar die notwendigen Materialien bearbeitet (Biegen der Glasröhrchen zum Ableiten des Wachsdampfes), so dass die Schülerinnen und Schüler insgesamt einen realistischen Eindruck von der Vorgehensweise der Naturforschung erhalten. Alles wird sorgfältig notiert. – Leider fehlen im Bericht die wörtlichen Schülerbeiträge. Die Anteile Einzelner, ihre Kooperation untereinander, ihre Motive und Motivation bleibt daher undeutlich. Die kulturgenetische Dimension (Was ist eine Kerze? Woher kommt sie? Welche Veränderungen hat sie durchgemacht? Wie kann man selbst möglichst gute Kerzen machen?) und die Metakommunikation über Erkenntnisformen, Einbezug Faradays etc. ist nur ansatzweise berücksichtigt.
Konzentration auf das Beobachtbare. Teilerklärungen führen zu neuen Untersuchungen.	Dynamisch entfaltete Handlung	Genetisch, dramaturgisch	Die Entfaltung der Handlung ist durch die „ansteckende“ Wirkung des Gegenstands selbst gegeben, organisch schreitet die Handlung entlang der beobachtbaren Erscheinungen voran. Faraday ist nicht in die Handlungsdynamik eingebunden.
Die Kategorien bilden sich sukzessive und werden sachgerecht bezeichnet.	Kategorialer Aufschluss	exemplarisch, genetisch	Allmählich bildet sich eine Vorstellung über die wesentlichen Prozesse der Kerzenverbrennung heraus, die im großen Kerzenkreislauf mündet. Hier folgt der Unterricht dem Bildungsgang Faradays in weiten Passagen. Theophel legt Wert darauf, dass sich begriffliche Vorstellungen in den Köpfen der Schülerinnen und Schüler bilden – er ist sparsam mit vorgegebenen Begriffen und folgt hierin den Spuren Wagenscheins genau. An einer Stelle kritisiert er sich selbst, dass der Begriff „Hohlraum“ für das dunkle Flammenzentrum „zu früh“ ⁵ (d.h. vor der eigentlichen Überprüfung) gesetzt wurde – dies zeugt von hoher Aufmerksamkeit und Sorgfalt.
„Alle im Weltall wirkenden Gesetze ...“	Originäre Vorlage	„exemplarisch“	Der Titel Theophels, ein Zitat aus Faraday ⁶ , nimmt Bezug auf die Vorlesungen, auf die in der ersten Doppelstunde hingewiesen wird. Die Bezüge sind insgesamt vielfältig, bleiben aber unerwähnt.
–	Werk-schaffende Tätigkeit	genetisch, exemplarisch	Die Dimension des Werkschaffens fehlt.
Bild des Kerzenkreislaufs	Orientierendes Denkbild	exemplarisch	Abschließend wird der Kerzenkreislauf entwickelt und gezeichnet. Theophel nimmt dazu eine etwas indifferente Haltung ein und bezeichnet die „symbolische“ Darstellung Faradays, worin der Kohlenstoffkreislauf „als Wechselwirkung zwischen Tier und Pflanze“ beschrieben wird und „in den er auch die Kerze mit einbezieht“, als „wenig effektiv“ – er übernimmt sie trotzdem ⁷ .

Abbildung 3: Kritische Punkte der Inszenierung Theophels

(2) Validierung durch die Lehrstückkomponenten

Die Tabelle zeigt, dass in Hinblick auf die Methodentrias nur wenige zu optimierende Punkte in Theophels Inszenierung finden. Ortwin Johannsen, der das Lehrstück seit Beginn kennt, sagte im Anschluss an eine gemeinsame Kerzen-Präsentation an der Glockssee-Schule in Hannover 2004: „Es ist so schön zu sehen, wie stabil der Kerzengrundriss doch geblieben ist.“ Die Lehrstückkomponenten legen weitere Optimierungspunkte frei:

Bezogen auf das *Exemplarische*: Die Fachlichkeit und der Sachbezug sind im Lehrstück durchgängig gegeben. Lediglich die Bedeutung der grünen Pflanzen im Kohlenstoffkreislauf kommt bei Theophel zu kurz. Durch einen geeigneten Photosyntheserversuch könnte das Gegenüber der Verbrennungsprozesse gezeigt werden, um zu vermeiden, dass die Schülerinnen

⁵ Theophel in Berg/Schulze 1995, S. 293

⁶ Faraday, Kerze, S. 25

⁷ Theophel in Berg/Schulze 1995, S. 302

und Schüler auf Vorkenntnisse zurückgreifen müssen, über die sie eventuell nicht verfügen. Die Mehrdimensionalität des Phänomens ist daher nicht voll entfaltet. Dies liegt vor allem am Unterrichtsbeginn, der direkt auf die analytische Betrachtungsweise zusteuert.

Potenzielle fundamentale Fragen bleiben auch im weiteren Verlauf des Unterrichts im Hintergrund, das moderne Naturwissenschaftsverständnis von der Massen- und Energieerhaltung wird als gegeben betrachtet – die zugrunde liegende philosophische Frage, ob aus etwas nichts werden kann, bleibt eine Andeutung: „Zurück zum Kohlenstoff. Ist es denn denkbar, dass seine Verbrennung keine Spuren hinterlässt? Asche ist jedenfalls nicht zu sehen.“ Hier muss Theopel auf Vorwissen aus der 8. Klasse zurückgreifen: „Man weiß, dass bei Verbrennungsprozessen Oxide entstehen.“⁸ Inwieweit man diese „Vertikaldimension“ des Exemplarischen von Seiten des Lehrers thematisiert, offenlegt oder als Schülerfrage zulässt, liegt nicht zuletzt in der persönlichen Haltung und im Geschmack der Lehrperson – hierin unterscheidet sich das Verständnis von Theopel und Faraday.

Bezogen auf das *Genetische*: Theopel betont an mehreren Stellen, dass ihm das Sokratisch-Genetische am Herzen liegt. Entsprechend macht er wenige Vorgaben, legt Wert darauf, dass Bildungsprozesse in Gang kommen und die Fragen von den Jugendlichen selbst gefunden werden. Die drei wesentlichen Fragen des Lehrstücks rufen die leitenden Handlungen hervor, sie sind echte Sogfragen. Über den Diskurs in der Klasse erfahren wir leider sehr wenig, daher ist die Frage nach der Ich-Wir-Balance nicht hinreichend zu klären. Die Kulturgenese des Gegenstands ist nicht entwickelt. Hier bietet es sich an, Kerzen selbst herzustellen und gegebenenfalls zu untersuchen, welche Eigenschaften eine gut brennende Kerze auszeichnet. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Werkdimension den vorgegebenen engen Zeitrahmen zum Opfer fiel.

Bezogen auf das *Dramaturgische*: Hinter den für Theopel zentralen Prinzipien tritt das Dramaturgische zurück. Eine übergreifende Fragestellung fehlt, das am Ende gezeichnete Denkbild kommt ein wenig unvermittelt, es bahnt sich nicht an, dass die Kerze am Ende einen Platz im Kreislauf der Stoffe finden würde. Das Denkbild lässt sich daher nicht in jeder Hinsicht nur aus dem im Lehrstück neu Gelernten entwickeln. An dieser Stelle tritt ein bislang noch nicht sorgfältig bearbeitetes Problemfeld zu Tage, das m.E. einer unterrichtsdramaturgischen Lösung bedarf:

Faraday vertritt die naturphilosophische Richtung der Dynamiker, der etliche Naturwissenschaftler der Romantik anhängen (u.a. Ohm). Nach deren Verständnis stellt die Natur nicht nur eine Welt bloßer Erscheinungen dar, die in der Hauptsache dem materiell zerlegbaren Prinzip von Ursache und Wirkung unterworfen sind. Die Natur ist vielmehr ein lebendiges, organisches und komplexes System, in dem gegensätzliche Kräfte wirken, die nach Wiedervereinigung streben.

Die Dynamik der Unterrichtshandlung (ich erinnere an Wagenschein: „Die Kerze ist ein Prozess.“) ist wesentlich an die Prozesshaftigkeit der Verbrennung selbst gebunden. Für Faraday kein Problem: Er schließt mühelos am Ende seiner Vorlesung die Kerze in die kosmische Betrachtung ein. Für heutige Schülerinnen und Schüler, denen das materiale Naturwissenschaftsverständnis der Aufklärung näher liegt und die geübt sind in der Elementar-Chemie, die nach Ausgangs- und Endprodukten sucht, mag das überraschend wirken. Man kommt so leicht nicht auf die Idee, die Verbrennung einer Kerze mit dem weltweiten Kreisen der Stoffe in Verbindung zu bringen. So entsteht gegen Ende des Unterrichts womöglich ein Bruch sowohl der Denk-, Findungs- und Erklärungsprozesse als auch des Weltverständnisses, wenn nicht die *Möglichkeit* der Wiederbegegnung der Stoffe und die zu Grunde liegenden Wirkkräfte im Vorfeld der Unterrichtshandlung mit bedacht sind. Diesen Bruch verspürt auch Theopel, und er findet seinen Ausdruck im Unbehagen, auf die „Symbolhaftigkeit“ und „in-

⁸ ebd., S. 299

effiziente Prosaik“ einer an Faraday angelehnten Darstellung des Kerzenkreislaufs zurückgreifen zu müssen.

Fazit und Vorblick. Ich betrachte Theophels Unterrichtsdurchführung insgesamt als gelungen. Wesentliche Merkmale des Lehrstückunterrichts sind auch nach heutigem Konzeptstand erreicht. Der wichtigste Ansatz für die Optimierung liegt m. E. im letztgenannten kritischen Punkt, der größere Auswirkungen auf eine neue Komposition hat: Das Lehrstück bedarf einer übergeordneten Fragestellung, die einen Bogen über die Teilhandlungen spannt und dadurch die Möglichkeit zur Entdeckung des Kohlenstoffkreislaufes durch die Schülerinnen und Schüler vom Beginn her öffnet. Dies ist m. E. durch eine bewusste und durchgängig sich erweiternde Inszenierung des Phänomens sowie durch stärkeren Einbezug der Vorlage (Faraday als Lerner und Lehrer) in die Handlung erreichbar.

3.3 Fokus. Michael Faraday. Ein Modell für das Lernen und Lehren?

Peter Buck gibt in seiner „Kurzen Biografie Michael Faradays“⁹ einen wertvollen Hinweis, der für den Lehrstückunterricht fruchtbar gemacht werden kann: Faraday stand im vierten Lehrjahr einer siebenjährigen Buchbinderlehre bei dem französischen Emigranten Ribeau und hatte ein Werk zu binden, das damals reißenden Absatz fand und das, so Buck, „Faraday förmlich verschlang“: Isaac Watts’ „The Improvement of the Mind“. Es leitet die Leserschaft dazu an, „wie man das Lernen lernen könne.“¹⁰ Faraday beherzigte die Ratschläge des Autors, richtete in der Buchbinderei ein kleines Labor ein und begann mit ersten Experimenten zur Elektrizität.

Zwei Aspekte sollen an dieser Stelle beleuchtet werden. Erstens: Worum geht es in dem Buch und wer ist sein Autor, der auf Faraday so maßgeblich gewirkt hat? Und zweitens: Inwiefern könnte das Lernen und Lehren Faradays als Modell für die Unterrichtshandlung fruchtbar gemacht werden?

(1) Isaac Watts und „The Improvement of the Mind“¹¹

Isaac Watts wird heute vor allem als Hymnenautor gefeiert. Er wurde am 17. Juli 1674 in Southampton geboren und war der älteste Sohn von neun Kindern eines Kleiderhändlers und einer hugenottischen Edelfrau. Da der Vater wegen seiner religiösen, nonkonformen Ansichten zweimal eingekerkert worden war, blieb dem Sohn der Zugang zu den Universitäten in Oxford oder Cambridge verwehrt. Er wurde zum Prediger ausgebildet und in Logik, in den alten Sprachen und in Theologie unterrichtet. Nach Abschluss seiner akademischen Ausbildung begann er Hymnen zu komponieren und avancierte zum „Vater der englischen Hymnody“. Sein Werk umfasst ca. 750 Lieder, darunter auch einige für Kinder,¹² die zum Teil heute noch im methodistischen Hymnenbuch in aktivem Gebrauch sind. Die lutherische Kirche Missouri gedenkt seiner am 25. November. Watts starb am 25. November 1748.

Neben seiner sehr erfolgreichen Tätigkeit als Hymnenschreiber verfasste Watts etliche Arbeiten auf dem Gebiet der Logik. Sein zu Lebzeiten erfolgreichstes Werk „Logic, or The Right Use of Reason in the Enquiry After Truth With a Variety of Rules to Guard Against Error in the Affairs of Religion and Human Life, as well as in the Sciences“, das 1724 publiziert wurde und die Themen *Vorstellung*, *Urteil*, *Argumentation* und *Methode* abhandelt, erlebte 20 Editionen. Die Abhandlung galt über 100 Jahre lang als Standardtext der Logikausbildung an

⁹ Buck in Faraday, Kerze 1980, S. 12-23

¹⁰ ebd., S. 13

¹¹ Dictionary of National Biography, 08.09.2007, ohne Jg..

¹² Am bekanntesten unter den „Divine Songs for Children“ ist das Lied Against Idleness And Mischief“ („gegen Nutzlosigkeit und Unfug“), das Lewis Carroll in „Alice im Wunderland“ im Gedicht „How Doth the Little Corcodile“ parodierte.

den Universitäten Oxford, Cambridge, Havard und Yale. 1741 wurde das Werk überarbeitet, ergänzt, mit Herausgeberkommentaren versehen und neu betitelt: „The Improvement of the Mind.“ Es gelangte 1809 in die Hände Faradays.¹³

„The Improvement¹⁴ of the Mind“¹⁵ ist in folgende Hauptteile gegliedert:

- (1) Über die Bedeutung, den Verstand zu entwickeln
- (2) 16 allgemeine Regeln zur Entwicklung des Verstandes
- (3) Fünf Mittel oder Methoden, den Verstand zu entwickeln
- (4) Der sokratische Weg der Disputation
- (5) Mehrere kleine Kapitel zu Strategien der Verstandesschulung schliessen sich an: Gedächtnistraining, Ratschläge zur Aufmerksamkeitssteigerung, über das Zerlegen von Informationen in Begründungen und Wirkungen, Strategien zur Gedächtniskapazitätserweiterungen, spezielle Ratschläge in Bezug auf einzelne Wissenschaftsgebiete.

In der Einleitung warnt der Autor die Leserschaft vor übertriebener Wissbegierde und fordert sie stattdessen dazu auf, ihrer Verpflichtung nachzukommen, das Verstehen zu schulen:

„No man is obliged to learn and know every thing. This can neither be sought nor required; for it is utterly impossible. Yet all persons are under some obligation to improve their own understanding. Otherwise, it will be a barren desert, or a forest overgrown with weeds and brambles.“¹⁶

Watts unterscheidet fünf Methoden der Verstandesschulung: „There are five eminent means or methods, whereby the mind is improved in the knowledge of things, and these are observation, reading, instruction by lectures, conversation and meditation; which last in a most peculiar manner, is called study.“¹⁷

Anschließend erläutert Watts die Methoden. Dabei sind folgende Punkte wichtig:

- Die Beobachtung schließt die Empfindung (sensation) mit ein.
- Durch das Lesen macht der Mensch Bekanntschaft mit „all the learned world.“¹⁸
- In der Unterweisung zeigt der Lehrer Theoreme oder Probleme und führt Gedanken- und praktische Experimente durch (showing, demonstration).¹⁹
- Die Unterhaltung findet in der Form des Diskurses statt. Manchmal – im Unterricht – verläuft sie einseitig, häufig jedoch profitieren beide Seiten („but frequently the profit is mutual“).²⁰

¹³ Die Ausgabe von Watts 1855, auf die ich mich beziehe, ist im Internet frei zugänglich (Watts 1855). Es handelt sich um ein Exemplar der Stanford University Libraries. Sämtliche Zitate entstammen dieser Ausgabe. Es ist mir ein Anliegen, die Sprache Watts' auch im barocken Original erklingen zu lassen (Übersetzungen S.W.).

¹⁴ „Improvement“ meint *das Fortschreiten, die Entwicklung* und zugleich *die Veredelung*. Für die Übersetzung ist der neutrale Ausdruck „Entwicklung“ gewählt.

¹⁵ Der englische Ausdruck „Mind“ wird umfassender gebraucht als die deutsche Bezeichnung „Verstand“. Er umfasst die Bedeutungen *Sinn, Verstand, Gemüt* und *Gedächtnis*.

¹⁶ Watts 1855, S. 17. „Niemand ist verpflichtet, alles zu wissen. Dies kann weder angestrebt noch gefordert werden; denn es ist schlichtweg unmöglich. Doch alle stehen unter einer Verpflichtung, ihr Verstehen zu entwickeln. Im andern Fall wird es zu einer unfruchtbaren Wüste oder zu einem mit Unkraut und Brombeerhecken überwucherten Wald.“

¹⁷ ebd., S. 37. „Es gibt fünf ausgezeichnete Mittel oder Methoden, wodurch der Verstand fortschreitet im Wissen über die Dinge, dies sind die Beobachtung, das Lesen, die Unterweisung durch Vorträge, das Gespräch und das Nachdenken, das in einer sehr speziellen Art Studium genannt wird.“ – Das Nachdenken umfasst also auch das Planen und Überlegen.

¹⁸ ebd., S. 38

¹⁹ ebd., S. 39

²⁰ a.a.O.

- Das Nachdenken bzw. das Studium hat besonderes Gewicht: „Meditation or study includes all those exercises of mind, whereby we render all the former methods useful for our increase in true knowledge and wisdom. (...) It is by meditation, that we compare the various ideas (...) that we fix in our memory, whatsoever we learn, and form our own judgment of the truth or falsehood, the strength or weakness, of what others speak or write.“²¹

Keine der fünf Methoden darf jedoch vernachlässigt werden, denn: „Each of these five methods has its peculiar advantages; whereby they assist each other: and its peculiar defects, which need to be supplied by the others' assistance.“²² Die Beobachtung steht bei Watts an vorderster Stelle: Sie legt das Fundament für alle Kenntnisse, sie ist Wissen aus erster Hand, wir können in jedem Moment unseres Lebens dieses Wissen erwerben.²³

Unter den Vorteilen des Gesprächs ist ein modern anmutender Vorschlag zum internen Austausch unter Freunden herauszuheben: „When we converse familiarly with a learned friend, we have his own help at hand, to explain to us every word and sentiment, that seems obscure in his discourse, and to inform us of the whole meaning.“²⁴ – In Experten-Novizen-Gesprächen, in der Einrichtung von Lernpartnerschaften findet Watts' Vorschlag einen Niederschlag.

Buck zitiert in seiner Kurzbiographie Faradays die zusammenfassende Warnung Watts' zum wissenschaftlichen Vorgehen: „Seien Sie nicht zu hastig, auf ein paar speziellen Beobachtungen, Erscheinungen und Experimenten weitreichende Theorien aufzubauen.“²⁵

Für das wissenschaftsgemässe Arbeiten schlägt Watts vor: “It is necessary, that we should, as far as possible, lay up our daily new ideas, in a regular order, and arrange our mental acquisitions under proper heads (headlines). (...) When we take in any fresh ideas, occurrences and observations, we should dispose of them in their proper places, and see how they stand and agree with the rest of our notions of the same subject.“²⁶

Immer noch „frisch“ erscheint eine Passage, in der Watts auf die Bedeutung einer umfassenden Betrachtung eines bedeutenden Gegenstandes eingeht, in der eine Fragestellung gesucht und geprüft wird, um zielstrebig zur Lösung zu gelangen: “In determining a question, especially when it is a matter of difficulty and importance, do not take up with partial examination; but turn your thoughts on all sides to gather in all the light you can, toward the solution. Take time, and use all the helps that are to be obtained.“²⁷ – Die Nähe zu den Reflexionsinstrumenten *Reisetagebuch* und *Lernjournal* ist unverkennbar.

²¹ Watts 1855, S. 39. „Das Nachdenken oder das Studium schließt all jene Verstandesübungen mit ein, durch die wir die vorigen Methoden nutzbar machen für das Wachstum wahrer Kenntnisse und der Weisheit. (...) Durch Nachdenken vergleichen wir unterschiedliche Ideen (...), verankern wir im Gedächtnis, was auch immer wir lernen, und formen wir unser eigenes Urteil hinsichtlich Wahrheit oder Falschheit, Stärke oder Schwäche dessen, was andere sagen oder schreiben.“

²² ebd., S. 40. „Jede dieser fünf Methoden hat spezielle Vorteile; wodurch sie einander assistieren: Und jede hat spezifische Nachteile, die ergänzt werden müssen durch die Hilfe der anderen.“

²³ a.a.O.

²⁴ ebd., S. 44: „Wenn wir uns privat mit einem gelehrten Freund unterhalten, haben wir dessen eigene Hilfe zur Hand, uns jedes Wort und Gefühl zu erklären, das in seinen Ausführungen unklar erscheint, und uns über die ganze Bedeutung zu informieren.“

²⁵ ebd., S. 58; vgl. Buck in Faraday 1980 S. 13 mit Bezug auf S. 118 der Ausgabe von 1809. Hier wiedergegeben in der Übersetzung Bucks.

²⁶ ebd., S. 159. „Es ist nötig, dass wir – soweit wie möglich – unsere täglichen neuen Ideen in eine regelmäßige Ordnung bringen und unsere geistigen Erwerbungen unter genau passenden Überschriften anordnen. (...) Sobald wir frische Ideen, Ereignisse und Beobachtungen hinzufügen, sollten wir sie ihrem eigenen Ort zuweisen und prüfen, wo sie stehen und ob sie mit dem Rest unserer Ansichten zum gleichen Thema übereinstimmen.“

²⁷ ebd., S. 188. „Wenn es darum geht, eine Frage festzulegen, besonders wenn es sich um eine schwierige und wichtige Angelegenheit handelt, dann beginne nicht mit Teiluntersuchungen; sondern richte dein Denken nach allen Seiten und lasse so viel Licht hinein, wie du kannst, um zur Lösung zu gelangen. Nimm dir Zeit und nutze alle Hilfe, die du erlangen kannst.“

(2) Michael Faraday – Modell für das Lernen und Lehren?

In zwei Interviews – wahrscheinlich in den Jahren 1862-63 durchgeführt²⁸ – hält Faraday Rückblick auf sein Leben als Forscher und Lehrer. Faraday schildert darin sein Selbstverständnis als nahezu autodidaktischer „Natural Philosopher“: „I do consider myself a philosopher of natural phenomena. (...) I am selftaught, being without benefit of formal schooling. As a boy I was schooled in the rudiments of reading, writing and mathematics. (...) Fortunately many books of a scientific nature came to me. (...) I compiled interesting extracts and sketches into notebooks for the purpose of study.“ Dann zeigt er seinem Gesprächspartner sein erstes Notizbuch: „The Philosophical Miscellany“, in dem Faraday sämtliche Ereignisse aus Kunst und Wissenschaften notiert hatte, die er in Zeitungen, Zeitschriften, Magazinen oder sonstigen Veröffentlichungen fand, in der Absicht sich zu amüsieren und eine Anleitung zu gewinnen, in „the world of science“ Eingang zu finden. Das Notizbuch aus dem Jahr 1809 war „inspired by Dr. Watt’s writings on self improvement and the unity of moral philosophy and the scientific method.“ Wie Watts geht Faraday von der Beobachtung aus: „I was never able to make a fact my own without seeing it.“ Learning by doing hatte für ihn oberste Priorität: „For the more I did the more I learned.“ Faraday erinnert sich im Verlauf des Gesprächs an einen peinlichen Fehler, der ihm bei der Phosphor-Analyse unterlaufen war. Und wieder nimmt er Bezug auf Watts: „Accepting of Dr. Watt’s teachings on the importance of accurate determination of facts, I henceforth repeated time and time again (...) my analysis until there could be no doubt of error.“ Auf die Frage nach seiner Wissenschaftsphilosophie antwortet Faraday im Sinne Watts: „Our prejudices are what we must at all times take notice and strive to avoid their entanglements. The man who wishes to advance in understanding of nature should never fix such obstacles in his way.“²⁹

Bereits erheblich ermüdet aufgrund des Gesprächs, beantwortet Faraday eine letzte Frage, worin seine Hoffnungen bestünden, ein Vermächtnis für zukünftige naturwissenschaftliche Studien zu hinterlassen. Erstaunlicherweise erwähnt er zuerst seine Vorlesungen, speziell die für die Jugend, dann erst seine wissenschaftliche Leistung, er gibt dem Antimaterialismus den Vorzug und äußert zuletzt seine Hoffnungen, dass die Jahrtausende alte Kluft zwischen der materiellen und der spirituellen Weltsicht überwunden und Gedankenfreiheit gewährt werde. Im Original:

„My lectures, especially the Juvenile Lectures and Christmas Lectures from which I derived so much pleasure, are a legacy to the popularizing of science for future curious minds and those who shall guide them. For myself, I would hope to be remembered with respect for the ideas I have put forth not just for my ability as analyst; but to be viewed properly as a theoretician of chemical and physical phenomena of matter. My theory of electrolysis; my ideas on electromagnetism and fields of force I shall leave to others to ponder and refine. I give forth the bold idea of antimaterialism; breaking the unanimous hold of millennia on matter that says its consideration must be either material or spiritual; giving freedom to thought.“

Fazit. Das Wissenschaftsethos und die Redlichkeit Faradays, die Fähigkeit, sich bescheiden zu können, die Umsicht und Vielseitigkeit seiner Betrachtungen, die hervorragende Quellenlage bezüglich des eigenen Lernprozesses sowie die Nachvollziehbarkeit der Aspekte, die Faraday als Forscher und Lehrer wichtig waren, sind nach meiner Auffassung gewichtige Gründe, Faraday dramaturgisch als Modell des Lernens und Lehrens in den Lehrstückunterricht einzubeziehen. Folgende Punkte lassen sich m.E. didaktisch leicht umsetzen:

²⁸ Ealy/Komp, 1992, o.S.. Das erste Interview wurde von dem Journalisten H. Marryat der Londoner *Times* durchgeführt, das zweite Interview trägt die Initialien NPM. Sämtliche Zitate sind dem Interviewtext entnommen. (Quelle ohne Seitenangaben).

²⁹ „Unsere Vorurteile sind es, die wir jederzeit beachten müssen im Bestreben, ihre Verwicklungen zu vermeiden. Der Mensch, der im Verständnis der Natur voranschreiten möchte, sollte sich niemals solche Hindernisse in den Weg legen.“

1. Von Watts übernommene Aspekte:
 - Nutzung möglichst vielfältiger Lernkanäle
 - Primat der wiederholten Beobachtung vor der Theoriebildung
 - Möglichst symmetrische Diskursführung (und -moderation)
 - Integration vielfältiger metakognitiver Strategien mündlicher und schriftlicher Art.
2. Von Faraday eingebrachte Aspekte:
 - Lernheft als vielseitiges „Tagebuch“ führen, worin alles Wissen, alle Ideen individueller und offizieller Art notiert werden.
 - Die *Kerze* nicht materialistisch, sondern dynamisch unterrichten, d.h. insbesondere auf den „Kerzenprozess“ achten und auf die Wirkkräfte, die diesen Prozess verursachen.
 - „Die Lehrkraft lernt mit.“³⁰

3.4 Neuinszenierung 2004

3.4.1 Kompositions- und Inszenierungsübersicht

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über meine Lehrstückinszenierung. Die wesentlichen Veränderungen der Komposition gegenüber Theophels Inszenierung sind hellgrau hervorgehoben. Der zeitliche Aufwand beträgt insgesamt 21,5 Stunden (gegenüber 12 Stunden)!

Ouvertüre Erste Begegnung mit der Kerze	I. Akt: Was brennt?	II. Akt: Was ist los ³¹ in der Flamme?	III. Akt: Kerze. Wohin – woher?	Finale
3 Stunden	5 Stunden	Etwas mehr als 6 Stunden	Etwas mehr als 5 Stunden	2 Stunden
Kerze. Woher – Wohin?	Der Flammensprung	Schwarzer Ruß aus weißer Kerze?	Versuchsaufbau zur Photosynthese	Familienabend in drei Akten
Erinnerungs- kerzen	Forschend fragen mit Faraday	Die Flamme im Licht	Die Kerzenreihe schließt sich zum Kreis	
	Brennt der Docht oder das Wachs?			
Erzählung aus - Michael Faradays Leben	Blick ins Innere der Flamme und Flamm- mentanz	Das Feuerwerk	Aufsatz zum Ker- zenkreislauf	
		Verwandlungen!?		
	Die Aufgabe des Dochts	„Feuerwasser“ aus der Flamme	Schaffen, Abbilden, Aufräumen	
Wachsdampf sam- meln und entzünden				
Das Erlöschen der Flamme	Woher kommt das Wasser – wohin verschwindet der Ruß?			
		Kohlendioxid aus der Flamme		
Hausaufgaben				
Text. Wie entsteht eine Kerze?	Protokoll Flamm- sprung (Prot.)	Reflexion. Kann es sein, dass aus etwas nichts wird?	Vorbereitung Familienabend	
Nacherzählung. Michael Faraday	Prot. Blick ins Inne- re und Flammentanz	Prot. Die Kerze im Licht		
		Prot. Wasser sam- meln		

Abbildung 4: Kompositions- und Inszenierungsübersicht Faradays Kerze 2004

3.4.2 Unterrichtsbericht. Faradays Kerze im Anfangsunterricht am Gymnasium Michelstadt

Einleitung

Unserem Kerzenunterricht ging ein Eltern- und Schülerbrief voraus mit folgendem Wortlaut:

Michelstadt, Donnerstag, 1. Dezember 2004

Liebe Eltern, liebe Schülerinnen und Schüler der Klasse 5b

In den kommenden beiden Wochen bis zu den Weihnachtsferien werden wir uns in allen Fächern, die ich in der Klasse erteile, mit Kerzen beschäftigen. Hierzu einige Hinweise:

- **Kleidung:** Ich bitte darum, nicht die neuesten Kleider anzuziehen. Wir werden auch mit Kerzen experimentieren, es besteht die Gefahr von Brand- oder Wachsflerken.
- **Experimentieren zu Hause.** Es ist möglich, dass Ihr Kind zuhause mit Kerzen experimentieren will. Es wäre schön, Sie könnten dies erlauben, und zwar unter folgenden Voraussetzungen: Experimentiert werden soll nur in unmittelbarer Nähe zu einem Waschbecken, am besten direkt neben der Spüle in der Küche. Es soll nur unter Aufsicht experimentiert werden.
- **Material:** Wir benötigen dazu einige Materialien (Hefte, Plakate, Verbrauchsmaterial ...). Es wäre schön, Sie könnten Ihrem Kind den Betrag von 2 Euro dafür in den kommenden Tagen mitgeben. Dieser Beitrag ist freiwillig!
- **Beurteilung:** Die mündliche Beteiligung am Unterricht fließt zu 20% in die mündliche Beurteilung des Halbjahreszeugnisses im Fach Biologie ein.

Die schriftliche Leistung ersetzt die dritte Deutscharbeit (von fünf Arbeiten des 5. Schuljahres) zum Thema „Gegenstands- und Verlaufsbeschreibung“ (schulinterne Vereinbarung der Deutschfachschaft zur Aufsatzerziehung für die Jahrgangsstufen 5/6). Anstelle eines Aufsatzes wählen die Kinder selbst drei (von ca. 12) Beschreibungen aus, die sie bewertet haben wollen. Für die Beschreibungen werden überwiegend in der Schule Notizen angefertigt, die anschließend (zuhause oder in der Schule) zum vollständigen Text ausgearbeitet werden. (Nebeneffekt: Wir üben uns im Protokollieren).

Die fachliche Qualität der mündlichen und schriftlichen Beiträge leistet einen 20%-Beitrag zur Qualifikation im Experimentalunterricht (mit sehr gutem/gutem/mit Erfolg teilgenommen/teilgenommen).

- **Vereinbarung:** Bitte unterzeichnen beide, ein Elternteil und das Kind, die Kenntnisnahme dieses Briefes.
- **Ein Letztes:** Halten Sie sich/haltet Ihr euch bitte vorsichtshalber den Abend des letzten Schultages frei: Donnerstag, den 22. Dezember. Man weiß ja nie ... – Ich hoffe, bis dahin sind die wesentlichen Vorbereitungen für das bevorstehende Weihnachtsfest getroffen.

Eine fröhliche Adventszeit wünscht
mit freundlichem Gruß und herzlichem Dank

Susanne Wildhirt

Kenntnisnahme: Eltern _____ Kind _____

Mittwoch, 7. Dezember 2004, eine Stunde

Am Mittwochmorgen, den 7. Dezember, begrüßen wir uns auf dem Flur des Naturwissenschaftstrakts unseres Gymnasiums. Ich bin Klassenlehrerin der 5b, kenne die 15 Mädchen und elf Jungen seit einem knappen halben Jahr und unterrichte sie in Deutsch und Biologie und einstündig im Experimentalunterricht. Außerdem steht uns eine Klassenleiterstunde zur Verfügung, so dass wir uns neun Stunden pro Woche sehen. Für die letzten beiden Wochen vor den Weihnachtsferien habe ich durch Tausch und in Absprache mit den Biokollegen einen

³⁰ Zitat Schaufelberger, in: Berg/Wildhirt 2004, S. 81

³¹ Der Titel – eine kleine Reminiszenz an Wagenschein

kleinen Biologieraum für unseren Kerzenunterricht reservieren können. Deutlich hat sich in den letzten Wochen gezeigt, dass die Kinder in alte Cliques zurückfallen, die sich weitgehend mit den fünf Herkunftsklassen aus der Grundschulzeit decken. Um die alten Seilschaften zu durchbrechen und den Gemeinschaftsgeist der Klasse zu fördern, habe ich beschlossen, jetzt neue Lernpartnerschaften bilden zu lassen. Folgendes sollte bei der Tandembildung berücksichtigt werden: Ein lebhafteres und ein ruhiges Kind bilden ein Gespann, Schüler mit Sprachproblemen bekommen ein Deutsch-Ass zugewiesen, es soll möglichst viele gemischte Paare geben, da im Moment die Gefahr besteht, dass die Mädchen zu dominant werden und in zwei größere und drei kleine Splittergruppen zerfallen. Noch im Flur bilden sich die Pärchen.

Ouvertüre. Erste Begegnungen mit der Kerze

1. Kerze. Woher – wohin?

Gespannt beziehen die Kinder pärchenweise den Biosaal und bemerken sofort die vier unterschiedlich großen Bienenwachskerzen, die der Größe nach in einer Reihe auf dem Lehrerpult stehen. Draußen ist es noch dunkel, und warmes Licht breitet sich aus, als ich die Kerzen nach und nach anzünde. Die Umgebung wirkt einladend, und spontan werden erste Eindrücke geschildert:

Vullnet: „Oh, ist das gemütlich hier.“ Nadine: „Es ist schön im Dunkeln und riecht gut.“ Sebastian: „Kerzen sind schön, sie geben warmes Licht, das passt gut zur Vorweihnachtszeit.“ Lea: „Ich mag Kerzen viel lieber als elektrisches Licht, sie geben einen hellen Schein“ – sie formt mit beiden Händen die Aura um die Kerzenflamme. Christina: „Kerzen riechen gut. Ich zünde oft Kerzen an zuhause.“ Natalie: „Als Sie die Kerzen eben angezündet haben, war die Flamme bei der großen Kerze zuerst ganz klein. Der Docht war noch so lang. Jetzt sind bei allen Kerzen die Flammen gleich groß.“ Maik: „Die kleinste Kerze wird zuerst verbrannt sein. Die anderen brennen noch länger. Ich glaube, dass die kleine am Ende der Stunde weg ist.“ Benjamin: „Nein, das dauert länger als eine Stunde“. Adrian hat eine große Armbanduhr: „Ich stoppe die Zeit, bis sie verbrannt ist.“ – Wir messen die Länge der kleinsten Kerze und des Dochtes. Anschließend wiegen wir sie mit einer einfachen Briefwaage³².

Dominik: „Wir müssen daheim immer den letzten Rest der Kerze aus dem Leuchter kratzen. Sie verbrennt nicht ganz.“ S.W.: „Hat jemand schon einmal beobachtet, dass eine Kerze ganz herunterbrennt?“ Anne: „Ja, wir lassen am Weihnachtsbaum die Kerzen immer ganz ausbrennen. Dann bleibt nichts mehr übrig außer einem kleinen Stummel Docht.“ S.W.: „Sind wir uns einig, dass alle brennenden Kerzen irgendwann verschwunden sind, wenn sie völlig ungestört brennen können?“ (*Breite Zustimmung*). Benjamin: „Manchmal kippt ein Docht um, dann ertrinkt die Flamme im flüssigen Wachs. Aber wenn alles gut geht, ist nichts mehr übrig von dem Wachs.“ Lehrerin: „Wir vermuten, dass dies bei unseren Kerzen genauso sein wird. Es dauert also unterschiedlich lange, bis die vier Kerzen verbrannt sind. (*Nicken.*) Was dann?“ Jennifer: „Wir können doch immer eine Kerze nachrücken. Wenn die kleinste weg ist, zünden wir eine neue an.“ Felix: „Ich habe am Sonntag solche Kerzen auf dem Weihnachtsmarkt gesehen.“ Sebastian: „Das sind Bienenwachskerzen. Man merkt das, weil sie so gut riechen. Sie sind aber teurer als andere Kerzen.“

³² Natürlich könnte man auch die genaueren schulüblichen Waagen einsetzen, mit denen sich bis auf 1/100stel Gramm genau wiegen lässt, um die Brenndauer einer Kerze genauer zu ermitteln (vgl. Schmidkunz 2004, S. 21-23). Es geht hier jedoch nur um die ungefähre Schätzung des Wachsverbrauchs. Wir begnügen uns daher mit möglichst alltäglichen Utensilien, die sich in den meisten Haushalten finden lassen und doch zu qualitativ aussagekräftigen Ergebnissen führen, ohne zu viele unbekannte Größen und Geräte einsetzen zu müssen. Die Brenndauer einer Kerze ist abhängig von der Zusammensetzung des Wachses, dem Kerzendurchmesser, der Masse und der Qualität und Dicke des Dochtes sowie von der Vollständigkeit der Verbrennung. 10 Gramm unserer im Unterricht verwendeten 100%-Bienenwachskerzen (Durchmesser 2 cm, Dochtstärke 2 mm) brannten 100 Minuten (dies entspricht der Kerzenkörperlänge von 2,5 cm), abzüglich der Masse des Dochtes.

Ich stelle eine weitere Kerze auf den Tisch neben die größte brennende Kerze. Sie wird nicht angezündet. „Ja, das sind Kerzen vom Weihnachtsmarkt.“ Nachdenklich Patrycja: „Woher kommen die Kerzen eigentlich? Ich meine, wer macht sie?“ Henriette zögernd: „Die Bienen stellen das Wachs her und bauen damit Waben. Dann füllen sie sie mit Honig.“ S.W.: „Das stimmt, Henriette. Die Bienen haben an der Unterseite ihres Leibes Wachsdrüsen. Aus ihnen ‚schwitzen‘ sie das Wachs heraus, um die Waben bauen zu können. Wenn die Kammern voll sind, verschließen sie sie mit einer dünnen Wachswand.“

Ich hole eine ausgeschleuderte Bienenwabe hervor. „Hier seht ihr eine Bienenwabe. Auf der Vorder- und der Rückseite kann Honig eingelagert werden. Auf jeder Seite sind etwa 500 Wachsellen, in denen Honig für die Brut und Pollen als Wintervorrat für das ganze Volk eingelagert wird. Auch den Honig stellen die Bienen her. Ungefähr zwei Gläser Honig können aus einer Wabe gewonnen werden. Um ein Glas Honig (ich zeige ein 500-Gramm-Glas voller Honig) zu bekommen, fliegen die Bienen – alle Flugstrecken, die sie gemeinsam zurücklegen, zusammengenommen – insgesamt einmal um die Erde.“ Die Kinder staunen. „Das Wachs der Wabe wird nach dem Schleudern eingeschmolzen und gereinigt, und daraus bekommt der Imker die Mittelwände als Bauhilfe für die Bienen, die daraus neue Waben bauen.“ Ich projiziere einige Fotos auf den Hellraumprojektor: Den Unterleib einer Biene mit Wachsplättchen, Wabenkammern voller Honig und solche voller Pollen, Wachsdeckelchen für die Kammern, ein Bild von einem Volk, das gerade erst mit dem Wabenbau begonnen hat, so dass man die Bauhilfe noch gut erkennen kann.

Anne: „Mein Opa hat Bienen. Ich helfe ihm manchmal beim Schleudern. Er kratzt zuerst die dünnen Vorderwände mit einer Gabel ab, dann kann der Honig rausfließen.“ Sebastian: „Der Rest wird rausgeschleudert. In die Schleuder passen acht Waben gleichzeitig. Unten ist ein Abfluss, da kommt ein Eimer drunter, und der Honig kann reinfließen, wenn die Schleuder gedreht wird.“ Maik: „Aus den Wänden habe ich schon Kerzen gerollt. Das geht ganz einfach. Man wickelt einfach den Docht ein.“ Jana: „Ich habe schon Kerzen gegossen auf einer Freizeit, aber das war kein Bienenwachs.“

Ich stelle eine gegossene und eine gedrehte Bienenwachskerze auf den Tisch und fahre fort: „Diese hier haben wir zuhause hergestellt.“ Melis ist nun auch dabei: „Machen wir das auch mal? Ich habe noch nie Kerzen gemacht.“ – „Natürlich“, ist meine schlichte Antwort. Es stellt sich heraus, dass nur vier Kinder eigene Erfahrungen mit der Kerzenherstellung haben. „Nun aber zurück zum Wachs. Was brauchen die Bienen, um Honig und Wachs herzustellen?“ Die Frage ist schnell beantwortet. Es ist Nektar, „der kommt von den Bäumen und Blüten. Wenn die Bienen Nektar sammeln, bringen sie auch den Pollen von einer Blume zur nächsten. Sonst könnten gar keine Früchte entstehen. Äpfel oder Birnen zum Beispiel gibt es nur, wenn die Bienen zum Nektarsammeln kommen.“ (Christina). Mich freut, wie vielseitig die Kinder Bezüge herstellen: „Schön. Wir sehen, wie wertvoll und wichtig die Bienen sind. Deshalb sind sie auch geschützt und wir müssen aufpassen, dass die Bienen immer alles bekommen, was sie zum Leben brauchen.“ Lea: „Bienen mögen gerne die Obstbäume, den Klee, die Bienenweide ...“

Ich hole eine Topfpflanze unter dem Tisch hervor: „Hier ist eine Lavendelpflanze aus unserem Garten. Die mögen die Bienen gerne als Futterpflanze.“ Ich stelle die Pflanze auf den Tisch neben die Wabe. S. W.: „Und die Pflanzen, von denen sich die Bienen ernähren, brauchen die auch irgendetwas?“ Cemre: „Ja, klar, Wasser und Erde.“ Benjamin: „Und Licht zum Wachsen, und Wärme.“ Cemre: „Licht und Wärme kommen von der Sonne.“ Natalie: „Und Luft brauchen sie noch.“ Ich stelle vier Gläser neben den Blumentopf, eins voller Erde, eins mit Wasser, und zwei, in denen ich unter vereinzelterm Kichern Luft und Licht „einfange“.

Christian: „Erde, Wasser, Licht – ... äh, Luft...“ – er blickt auf die große Reihe, die sich inzwischen gebildet hat – jetzt wissen wir, woher alles kommt, damit es Kerzen gibt.“ Khang: „Echt irre!“

„Gut, dann schauen wir jetzt mal hier zur anderen Seite.“ Ich zeige auf die kleinste brennende Kerze: „Diese Kerze ist schon ganz schön klein. Benjamin hat vorhin ja gesagt, dass sie irgendwann ganz verschwunden sein wird – wenn sie ungestört brennen kann.“ Maik: „Weil sie *ver*-brennt.“ S.W.: „Das ist doch eine merkwürdige Erscheinung, wenn zuletzt einfach alles weg ist ...?!“

Stille kehrt ein. Die Kinder schauen auf das Pult mit den vielen Notwendigkeiten darauf, die es braucht, um Kerzen herzustellen. Madlene meint schließlich nachdenklich: „Das liegt am Feuer, denn wenn die Kerze vorher ausgepustet ist, passiert nichts mehr.“ Christopher: „Es *entsteht* dabei aber auch etwas, nämlich Kohlendioxid. Das ist auch in den Auspuffgasen der Autos.“ Cemre: „Der Christopher weiß immer schon alles. *Ich* seh nur, dass die kleine Kerze bald weg ist. Die anderen werden auch kleiner, und das liegt jedenfalls daran, dass die Flamme da ist.“³³ Ich: „Um zu prüfen, ob Christopher Recht hat, und um zu sehen, was bei der Verbrennung alles passiert, scheint es also notwendig zu sein, dass wir untersuchen, wie die Flamme brennt, damit wir herausfinden können, was mit der Kerze beim Brennen passiert, wie und wohin sie verschwindet.“ Viele nicken. „Darum kümmern wir uns in der kommenden Zeit bis Weihnachten ...“. Die Hausaufgabe lautet: „Schreibe auf, wie eine Bienenwachskerze hergestellt wird und was es dazu alles braucht. Schreibe diesen Text sauber auf die zweite Seite eures neuen Kerzenheftes.“ (Die Hefte teile ich aus).

Es hat schon geklingelt, aber kaum jemand verlässt den Saal. Die meisten versammeln sich um den Tisch, begutachten die handgefertigten Bienenwachskerzen und die Bienenwabe und unterhalten sich weiter über die Kerzen.³⁵



Abbildung 5: Nach der ersten Stunde
– anhaltendes Interesse an der Kerzen-Reihe

Wie entsteht eine Kerze?

Jeder weiß, dass die Fabrik die Kerzen macht. Ich weiß, wie! Die Bienen schwitzen das Wachs aus ihren Drüsen und bauen damit Waben. Man braucht ungefähr 500 Bienen für eine Wabe. Die Bienen fliegen im Sommer ca. einmal um die Erde für ein Glas Honig. Den Honig bekommen sie aus dem Nektar von den Blumen und setzen ihn in die Waben. Der Imker schleudert ihn heraus und dann kann man ihn essen. Die Blumen aber brauchen auch viel, Erde, Luft, Wasser und Sonne, um zu leben. Aus den Waben werden die Kerzen gemacht. Die Fabrik besorgt sich die Waben von den Imkern und schmilzt sie. Wenn es (*das Wachs, S.W.*) flüssig ist, schwimmt der Dreck oben drauf. Anschließend kann man das Wachs säubern. Dann wird das Wachs in ein großes Gefäß gefüllt und die Kerze mit einem Baumwolldocht Stück für Stück gezogen oder gegossen. Nun verkauft die Fabrik die Kerzen an Geschäfte, die Geschäfte an uns. Dann haben wir es gemütlich, bis die Kerze weg ist.

Madlene³⁴

³³ Cemre führt zurück zur Sache, schiebt das ihn „verdunkelnde Wissen“ (Wagenschein) zu meiner Überraschung einfach weg. Auch die anderen nehmen keinen Bezug auf Christophers Aussage, sichtlich sind sie von der Ungeheuerlichkeit der Möglichkeit, dass „alles weg“ sein könnte, viel stärker beeindruckt als von dem schnellen (Teil-) Ergebnis, das keine Lösung des *Problems* ist, sondern nach eigener Überprüfung drängt.

³⁴ *Jeweils am Ende einer Szene* füge ich aufgrund der besseren Übersicht ein bis zwei Schülertexte in den Bericht ein (Rechtschreibfehler korrigiert). Im Unterricht verfahren wir normalerweise so, dass jeweils *zu Beginn* des Tages die Lernpartner ihre Texte austauschen und gegenseitig korrigieren, eine kleine Rückmeldung und Anregungen zur Überarbeitung geben, die anschließend sofort eingearbeitet werden. Dies dauert normalerweise zwischen 10 und 15 Minuten, je nach Textlänge. Ich habe dadurch Zeit, bei Unklarheiten zu helfen und Fragen aufzugreifen, die eventuell mehrere haben.

³⁵ Diese Stunde ist ausführlich geschildert, um den Unterschied zwischen einer Lehrstück-Ouvertüre und einem Advance Organizer, der nach Diethelm Wahl (mündlich, 20.9.2006) 10 bis 15 Minuten nicht überschreiten sollte, zu markieren. Eine Lehrstück-Ouvertüre bindet die Schülerinnen und Schüler in ein sokratisches Gespräch

2. Erinnerungskerzen

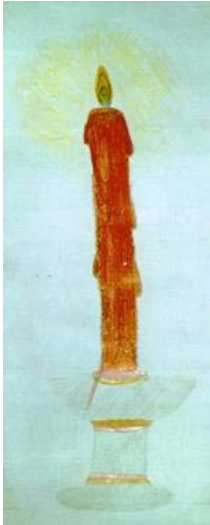


Abbildung 6
Jennifers erste Heft-
seite

Heute erhalten die Schülerinnen und Schüler zunächst den Auftrag, die erste Heftseite zu gestalten, indem sie aus der Erinnerung heraus eine brennende Kerze möglichst genau zeichnen. Sie legen großen Wert darauf, die Flammenfarben genau wiederzugeben. Fast alle erinnern sich an die Flammenaura und versuchen, auch diese zu zeichnen. Die unterschiedlichen Zonen der Flamme werden erkannt: Der hell scheinende äussere Bereich, der aus dem Blau der Flammenrundung emporsteigt, der dunklere Saum und die grau-braune Zone des Flammeninneren entstehen in den Heften. Nachbarn helfen und ergänzen die eigene Zeichnung, und am Ende, nach rund zehn Minuten, wird der Wunsch laut, die Zeichnung durch Beobachtung am Original zu überprüfen.

Rasch sind die Kerzen verteilt und in Ständer gesteckt. Die Kinder sollen die Kerze beim Anzünden genau betrachten und im Heft ihre Beobachtungen festhalten. Anschließend ist Gelegenheit, die Kerzenzeichnung zu überarbeiten. Es ist sehr ruhig in den nächsten zehn Minuten, alle versuchen genau zu beschreiben, was sie sehen. Als die ersten ihre kurzen Texte vorlesen, bleibt die Konzentration erhalten, denn jeder ist gespannt, welche Worte die anderen gefunden haben. Anne beschreibt, wie der Docht anfängt zu glitzern, dann oben schwarz wird und sich langsam zu krümmen beginnt. Laura findet heraus, dass in einer Mulde sich das Wachs verflüssigt und außen ein Rand stehen bleibt, „wo es kühler ist und die Flamme nicht so gut hinkommt“. Die Mulde heißt bei anderen Kindern „Trichter“ (Mike) oder „Krater“ (Dominik), Anna findet den Vergleich zum See mit seinem Ufer.

Die meisten kurzen Texte weisen auf genaue Beobachtung hin und zeigen, wie viel Mühe es bereitet, Beobachtungen in eigene Worte zu fassen. Christian hat sich eine Frage aufgeschrieben und beantwortet: „Was passiert, wenn ich eine Kerze anzünde? – Der Docht wird oben schwarz und biegt sich. Am Ende ist er glühend heiß. Am Anfang ist die Flamme sehr klein und blau, innen dunkel orange und am Ende (außen) gelb. Das Wachs fließt in einen kleinen Teller. Die Flamme wird größer. Oben flimmert sie. In der Mulde sammelt sich flüssiges Wachs.“ Sebastian ergänzt: „Der Docht ist an der Spitze rot, wenn er aus der Flamme herausragt. Das flüssige Wachs ist kurz darauf unterhalb des Dochtes in einem Wachssee.“



Abbildung 7
Jennifer und Anna-Sophia beim genauen Be-
trachten der Flamme, nachdem die Erinnerungs-
kerze gezeichnet ist.

3. Erzählung aus Michael Faradays Leben

Nachdem die eigenen Aufzeichnungen im Heft ergänzt sind, ist es nun an der Zeit, den Kindern Richtschnur und Anleitung zu geben für ihre Beobachtungen an und mit der Kerze. Dazu eignet sich m. E. nichts besser als eine kurze Erzählung aus Faradays Biographie. Kinder dieser Altersstufe lernen gerne am Vorbild, und Faraday als Autodidakt ist für sie besonders interessant, da er ihnen Raum gibt zum eigenen Erforschen, sie anregt, wie man das Forschen

dokumentieren und dann auf seinem Gebiet sehr erfolgreich werden kann. Im Schein der Kerzen bitte ich die Kinder gut zuzuhören, um nachher eine eigene Geschichte aus der Erzählung zu verfassen, und beginne, aus Faradays Leben zu erzählen:

„Wir schreiben das Jahr 1860 und befinden uns in London. Es ist Vorweihnachtszeit, und wenn ihr durch die Straßen wandert, steigt euch gelegentlich der Duft nach frischem Gebäck in die Nase, vermischt mit den Rußflöckchen der Schornsteine. Es ist nasskalt – wie immer hier um diese Jahreszeit. Einige Kinder sind unterwegs. Sie haben schon Ferien und sind auf dem Weg zu einer Vorlesung der Royal Institution. Solche Vorlesungen gibt es heute noch, und wer da hinging, war genauso gespannt wie ihr, wenn ihr zum „Herr der Ringe“ ins Kino geht. Auf dem Programm stand damals das Thema: „Die Naturgeschichte einer Kerze“, und die Vorlesungen hielt ein Mann namens Michael Faraday. Aus sechs Veranstaltungen bestand diese Vorlesung, und man konnte alles über die Kerze erfahren, was damals in der Wissenschaft bekannt war, woher sie kommen, was mit ihnen geschieht, wenn sie verbrennen, wie sie verbrennen ... – das alles. Die Kinder durften vorne sitzen, die Erwachsenen hinten, und es kamen so viele, dass es eng wurde in den Straßen Londons und die Kutschen, mit denen manche zur Vorlesung gebracht wurden, nur noch in einer Richtung fahren konnten. So wurde die Einbahnstraße erfunden ...

Michael Faraday war nicht irgendwer, sondern ein berühmter Mann. Eigentlich berühmt war er aber gerade dadurch, dass er sich mit der Elektrizitätslehre und dem Magnetismus beschäftigte, den ersten Dynamo und den ersten Elektromotor baute, Transformatoren entwickelte, Gesetze fand, die in der Physik gelten, und vieles mehr. Wenn wir also den Lichtschalter anknipsen, sprühen uns sozusagen immer Faradays Funken entgegen. Wenn wir beim Gewitter im Auto sind, sind wir recht gut vor einschlagenden Blitzen geschützt, weil wir in einem Faraday'schen Käfig sitzen, dessen Wirkung er entdeckt hatte. Ohne ihn käme kein einziger Laut aus dem Radio. Trotzdem fand er sogar als berühmter alter Mann noch die Kerze so interessant, dass er darüber lehrte und immer wieder an Weihnachten die Vorlesungen für die Kinder hielt. Am Anfang sagt er auch, warum: (ich schlage das Büchlein auf, lege mir „Faradays Fliege“³⁶ an und lese ganz langsam): „Die Naturgeschichte einer Kerze wählte ich schon bei einer früheren Gelegenheit zum Thema meines Vortrags, und stände die Wahl nur in meinem Belieben, so möchte ich dieses Thema wohl jedes Jahr zum Ausgang meiner Vorlesungen nehmen, so viel Interessantes, so mannigfache – *also vielseitige* – Wege zur Naturbetrachtung im Allgemeinen bietet sie dar. – *Fast* – alle im Weltall wirkenden Gesetze treten darin – *also in der Kerze* – zu Tage oder kommen dabei wenigstens in Betracht, und schwerlich möchte sich ein bequemerer Tor zum Eingang in das Studium der Natur finden lassen.“³⁷ (Das Zitat habe ich auf einen blauen Karton geschrieben, den ich nun an der Rückwand des Biosaals aufhänge.)

Da alle sehr gespannt zuhören, kann ich in der Erzählung weiterfahren, jetzt ohne Fliege: „Eigentlich hatte Faraday keine günstigen Voraussetzungen berühmt zu werden. Sein Vater war Schmied, die Familie war arm. Michael wurde 1771 geboren, als Jugendlicher ging er bei einem Buchbinder in die Lehre, die damals sieben Jahre dauerte. Er war allerdings sehr geschickt, er konnte sogar seine Schuhe selbst herstellen. Häufig las der junge Mann die Bücher, die er binden musste. Eines Tages las er ein Buch von einem Autor namens Isaac Watts. Es hieß: „The Improvement of the Mind“, übersetzt: „Die Verbesserung des Verstandes“. Darin stand eine Anleitung, wie man seinen Verstand gut schulen kann. Faraday befolgte die Ratschläge. Er interessierte sich sehr für Physik und Chemie, und sein Chef erlaubte ihm, ein Labor in der Buchbinderei aufzubauen. Er experimentierte viel und schrieb, wie das Buch ihm empfahl, alle Beobachtungen seiner Experimente genau auf. Im Buch stand auch, dass alle Ideen und Fragen zu den Experimenten aufgeschrieben werden sollen und dass man nicht so

³⁶ Es hat sich inzwischen bewährt, eine Fliege an einen Haarreif zu klammern. Der Reif kann schnell angelegt werden und führt nicht zu Verzögerungen.

³⁷ Faraday, Kerze, S. 25. Ergänzungen kursiv S.W.

schnell Erklärungen aus einer einzigen Beobachtung ableiten, sondern lieber alles nochmals gründlich anschauen und überdenken soll. Das hat Faraday gemacht. Sein Chef, Herr Riebeau, war bald sehr stolz auf ihn und machte es möglich, dass Faraday eines Tages Eintrittskarten für Vorlesungen geschenkt bekam, die der berühmte Professor Humphry Davy, der auch Leiter der Royal Institution war, hielt. Als dieser sich später die Augen bei einem Experiment verletzt hatte, erinnerte er sich an Faraday, und Faraday wurde für kurze Zeit sein Schreiber. Leider gab es in diesem Labor keine Arbeit für Faraday, der inzwischen seine Lehre beendet hatte. Da kam es zu einer Rauferei, in die ein Labordiener der Royal Institution verwickelt war. Der wurde entlassen, und Faraday wurde an seiner Stelle Labordiener. Er machte seine Arbeit so gut, dass er auf eine Europareise mitgehen durfte, und wurde danach Assistent und schließlich Professor. Endlich konnte er nach Leibeskräften forschen, experimentieren und Vorlesungen halten. Die Weihnachtsvorlesungen hielt Faraday noch als alter Mann, als er sonst nicht mehr arbeiten und nicht mehr gut sehen konnte – so wichtig waren sie ihm. Und nebenbei war er bis kurz vor seinem Lebensende auch Prediger in einer kleinen Gemeinde. Er starb 1867, sieben Jahre nach seiner letzten Weihnachtsvorlesung. In diesem Büchlein (ich zeige es nochmals) sind alle Vorlesungen von einem Zuschauer aus dem Publikum aufgeschrieben worden.“ Die Hausaufgabe besteht darin, einen Text über Faradays Leben zu schreiben. Einige Stichworte habe ich als Gedächtnisstütze auf Karteien geschrieben, die abholbereit auf dem Lehrerpult liegen:

Schreibe eine Erzählung aus dem Leben Michael Faradays. Folgende Stichworte helfen dir dabei: geboren am 22. September 1791 in einem Dorf bei London – Buchbinder – Isaac Watt – The Improvement of the Mind – Labor – Einladung zu Humphry Davys Vorlesung an der Royal Institution – Labordiener – Forschungsassistent – 1827: Professor – Weihnachtsvorlesungen – Elektrizitätslehre – gestorben am 25. August 1867 in London.

Du kannst gerne das Zitat Faradays aus der ersten Weihnachtsvorlesung in deinen Text einbauen.

Bis zum Ende der Stunde werden Notizen für die Erzählung über Faradays Leben angefertigt.

Das Leben von Michael Faraday

Michael Faraday wurde am 22. September 1791 in einem Dorf in der Nähe von London geboren. Sein Vater war Schmied. Da die Familie arm war, machte Faraday eine Buchbinderlehre, die sieben Jahre lang dauerte. Er band nicht nur die Bücher ein, sondern las sie auch. Eines der Bücher hieß „The Improvement of the Mind“. Dieses Buch ging um das Lernen. Man konnte folgende Schritte machen:

1. Scharf und genau die Sache beobachten.
2. Ein Buch führen, in dem man die Ideen aufschreiben und nachlesen kann.

In seinem Labor in der Buchbinderei führte er viele Versuche durch. Er beschäftigte sich auch mit den Forschungen der Elektrizität und machte eine Lehre über diese.

Eines Tages bekam er eine Einladung zur Vorlesung von Herrn Davys an der Royal Institution. Davy lud ihn zu einer Forschungsreise nach Europa ein. Faraday nahm das Angebot an. Davy ging natürlich mit ihm und machte ihn später zum Labordiener und zu seinem Forschungsassistenten am Institut. 1827 wurde Michael Professor. Eines Tages hielt er eine Weihnachtsvorlesung für die Jugend. Eine Mitschrift davon gibt es noch. Er hatte keine Zeit, großartig „Guten Tag“ zu sagen, so kam er damals direkt zur Sache:

Die Naturgeschichte einer Kerze wählte ich schon bei einer früheren Gelegenheit zum Thema meines Vortrags, und stände die Wahl nur in meinem Belieben, so möchte ich dieses Thema wohl jedes Jahr zum Ausgang meiner Vorlesungen nehmen, so viel Interessantes, so mannigfache Wege zur Naturbetrachtung im Allgemeinen bietet dasselbe dar. Alle im Weltall wirkenden Gesetze treten darin zu Tage oder kommen dabei wenigstens in Betracht, und schwerlich möchte sich ein bequemer Tor zum Eingang in das Studium der Natur finden lassen.

Seine Vorlesungen waren immer bis auf den letzten Platz besetzt. Die Kinder sassen vorne. Durch Faraday kam auch die erste Einbahnstrasse der Welt zustande, weil die Kutschen so sehr drängelten und die Strassen vor dem Vorlesungssaal verstopft waren. Also gings irgendwann nur noch one way weiter. Faraday erfand auch viele Sachen, wie zum Beispiel den „Faradayschen Käfig“, das ist eine Umhüllung eines Raumes mit Blech oder Maschendrahtzaun. Ein geschlossener Kraftwagen bei Gewitter ist auch ein Faradayscher Käfig. Er schützt hierdurch die Insassen bzw. den Inhalt vor Blitzschlag oder Strom. Dann folgte Erfindung über Erfindung: Es hat einen Elektromotor gebaut und mit Elektromagneten gearbeitet. Faraday war auch Kirchenprediger. Er starb am 26. August 1867 in London.

Christina

I. Akt. Was brennt?

1. Der Flammensprung

„Folgen wir nun ein wenig den Spuren Michael Faradays“, beginne ich nach der kleinen Pause, lege mir Faradays Fliege um und lese aus der Naturgeschichte: „Damit ihr mich recht versteht, will ich Euch ein ebenso niedliches wie einfaches Experiment zeigen. Wenn ihr eine Kerzenflamme vorsichtig ausbläst, seht ihr ...“³⁸ – ich puste die Kerze aus, halte ein brennendes Streichholz in die aufsteigende Fahne weißen Nebels über dem Docht, die Flamme



Abbildung 8

Erst gut üben, dann messen: Neun Zentimeter schaffen Sebastian und Christian

teilt sich, ein Flämmchen springt hinunter und entzündet die Kerze von Neuem: Wir sind mit-tendrin in Faradays Kerzenvorlesungen. Sogleich versuchen die Schüler, den Flammensprung selbst zu erzeugen. Es wird ziemlich laut, Erfolgsmeldungen gibt es da und dort, ich muss überall hin kommen und bestätigen, dass „es klappt“. Tipps werden von Tisch zu Tisch weitergegeben, wie man einen besonders weiten Sprung schaffen kann. Das dauert! Schließlich werden Geodreiecke aus den Mäppchen gekramt, um den Abstand zwischen Streichholz und Docht zu messen. Mir geht bei der

Beobachtung dieser Szene ein Satz von Martin Wagenschein durch den Kopf: „Beobachtung – Sie weiß noch nichts vom Experiment, sie greift nicht ein. Am Anfang ist sie reine Hingebung. Aber

zunehmend wählt sie aus, und ihre Aufmerksamkeit nimmt zu an Gedanken. Zuletzt beginnt sie zu messen“³⁹. Den weitesten Sprung schaffen Dominik und Cemre: rund 14 cm. Sie kommen nach vorn und führen allen das Experiment vor. Dominik legt Faradays Fliege an und beginnt sofort zu erklären:

„Man muss das Streichholz in den weißen Rauch⁴⁰ halten. Nebendran klappt es nicht. Wenn man zu lange wartet, ist der Rauch weg. Dann geht es auch nicht. Ich puste ruckartig, schnell und möglichst fest.“⁴¹ Nach einem weiteren erfolgreichen Versuch ergänzt Cemre: „Wir warten, bis sich der Wirbel beruhigt hat und der Rauch gleichmäßig hochsteigt, erst dann darf man das Streichholz hineinhalten.“ Hier zeigt sich die Bedeutung der Fliege: Sie konzentriert nicht nur, sondern regt an zur Metakognition: An die Seite der Intuition tritt die Reflexion, sie hilft, sich des eigenen Tuns bewusst zu werden und die Gedanken zu äußern.⁴²

Wir versuchen nun möglichst genau, Regeln für den Flammensprung zusammenzustellen. Es dauert ein Weilchen, bis das Phänomen versprochen ist. Viele Kinder kreisen um die Sache und kommen zunächst nicht auf den Kern, ich merke, dass ich mich mit Gewalt zurückhalten muss, nicht einzugreifen. Längst meldet sich niemand mehr, inzwischen gibt es ein richtiges Gespräch, in dem erstaunliche Dinge auftauchen: dass die Flamme von oben nach unten gelangt, nicht umgekehrt (denn oben ist die Luft doch wärmer), dass plötzlich zwei Flammen

³⁸ Faraday, Kerze, S. 43

³⁹ Wagenschein 1975, S. 37

⁴⁰ Ich korrigiere die ungenaue Begrifflichkeit „Dampf“, „Rauch“, „Gas“, „Qualm“ erst ab der achten Unterrichtsstunde gemäß der Wagenschein-Regel: Muttersprache vor Fachsprache“. Die Chemiker nennen ein Gemisch aus Gas und Flüssigkeit Nebel. Dampf und Gas sind chemisch gesehen dasselbe. In der Alltagssprache wird „Dampf“ meist im Sinne von „Nebel“ gebraucht.

⁴¹ Entgegen Faraday, er bläst mit lange anhaltendem Atem (Faraday, Kerze, S. 43) – Gerade nicht!

⁴² Es wäre lohnend, die Funktion der Requisiten unter dem Aspekt der Metakognition genauer zu untersuchen und für die Lehrstückdramaturgie geltend zu machen.

vorhanden sind, wo vorher nur eine war (– was beim Kerzenanzünden eigentlich auch passiert; man kommt so leicht nicht auf dieses Problem), kurz: Die Verwirrung steigt.

Schließlich formuliert Clemens als erster *genau*, was passiert: „Die Flamme gelangt *zum Docht* und bleibt dort.“ Und Maik: „Man muss das Streichholz *direkt* in die weiße Rauchfahne halten. Ansonsten gibt es *gar keinen* Sprung.“ Die Kombination beider Beobachtungen beschreibt den ganzen Vorgang: „Der weiße Rauch ist eine Leiter für die Flamme. Er klettert ganz schnell vom Streichholz zum Docht“ (Jana). Jasmin schlussfolgert: „Wenn man das Streichholz in den weißen Dampf hält, nimmt er einen Teil der Flamme mit und verbrennt den Dampf langsam bis nach unten zum Docht. Der Dampf ist wie eine Zündschnur und führt die Flamme zum Docht hinunter. Der Docht hält die Flamme dann fest und der Dampf ist verschwunden.“ Die Mitschüler honorieren diesen Beitrag mit zustimmendem Nicken und einzeltem Beifall. Dass die meisten den Vergleich mit der Zündschnur – auf den ich bislang nicht gekommen bin – gut finden, sieht man daran, dass er in vielen Heften später zu lesen ist.⁴³

Der Flammensprung wird noch einmal geübt – er funktioniert nun noch besser. Schließlich wird der Versuch samt Zeichnung im Heft dokumentiert.⁴⁴

Versuch. Der Flammensprung

Zuerst muss man die Kerze anzünden und sie ein bisschen stehen lassen, dann ein Streichholz anzünden und die Kerze ruckartig ausblasen. Sofort danach hält man das Streichholz genau in den Dampf, wenn er gerade hoch geht, und dann passiert es: Die Flamme springt vom Streichholz auf den Docht und die Kerze brennt wieder. Das gelingt aber nur, weil der Rauch diese „Leiter“ herunter springt. Man kann auch sagen: Der Dampf zieht die Flamme zum Docht. Sie verbrennt den Rauch wie eine Zündschnur. Das Streichholz bleibt aber trotzdem an und brennt weiter.

Henriette

Ein niedliches Experiment. Der Flammensprung

Eine Kerze brennt. Ich nehme ein Streichholz und brenne es ebenfalls an.

1. Dann halte ich das Streichholz über die Kerze und puste sie kurz, aber kräftig aus, so dass der Rauch schön gleichmäßig nach oben gleitet.
2. Ich muss das Streichholz in den Rauch halten und darf die Kerze nicht zu lange auslassen, weil sonst der Rauch vergeht.
3. Der Rauch leitet die Flamme vom Streichholz zum Docht. Danach ist der Rauch verschwunden. Er wirkt also wie eine Zündschnur.
4. Die Kerze ist wieder an.

Laura

Freitag, 9. Dezember, Doppelstunde

2. Forschend fragen mit Faraday

Faradays Methode bei seinen Forschungen hilft uns zu guten Versuchsbeschreibungen. Jasmin schildert zu Beginn der Stunde noch einmal Faradays Experiment: „Wenn ich eine Kerze

⁴³ Ich schildere diese Szene so ausführlich, weil sich hier repräsentativ für die meisten Unterrichtsgespräche zeigt, dass die Kinder sehr darauf angewiesen sind, sich sprachlich der Bilder und Vergleiche zu bedienen. Die genaue Begrifflichkeit verengt häufig die Beobachtung und reduziert das Phänomen auf einen – den meist vorgegebenen „entscheidenden“ – Gesichtspunkt. Dazu Wagenschein 1975, S. 20: „Lassen wir die Kinder nachdenken und ausreden. Zwingen wir uns selbst zum Schweigen. Hören wir zuerst nie auf das, was einer sagt, sondern lauschen wir auf das, was er meint.“

⁴⁴ Ich hänge unterdessen an die Rückwand des Biosaals zur Erinnerung großformatige Bilder unserer bisherigen Stationen auf: Die Zeichnung unserer Kerzenreihe und eine Erinnerungskerze, Faraday in der Weihnachtsvorlesung und eine Zeichnung des Flammensprungs.

nehme, sie anzünde, ein bisschen warte und sie dann schnell auspuste und darauf achte, dass der Docht zu mir zeigt, steigt eine weiße Rauchfahne hoch, die ich mit einem brennenden Streichholz anzünden kann. Dann springt die Flamme vom Streichholz zum Docht über, wenn es gut geht, acht bis zehn Zentimeter weit oder weiter.“

Jennifer meldet sich: „Moment, Jasmin hat mehrere Sachen erzählt. Einmal, was man braucht, dann, was man machen muss, und was passiert.“ „Prima, wir nennen den ersten Teil den Versuchsaufbau, damit sind die Voraussetzungen und die Hilfsmittel gemeint, und das, was man sehen kann, nennen wir die Beobachtung – die müssen wir dann beschreiben“. Ich notiere beide Begriffe untereinander an die Tafel, und Christopher, ein cleverer Junge, ergänzt sofort: „Man muss aufpassen, dass man nicht eigene Vermutungen dazuerfindet.“ Adrian kann das nur bestätigen: „Ich habe gestern geschrieben, dass die Kerze tropft, nachdem man sie angezündet hat, aber das stimmte gar nicht. Ich habe das nur *erwartet*, aber die Kerze brannte gleichmäßig. Sie haben mich gleich darauf hingewiesen, dass ich das wegstreichen soll. Nun weiß ich, warum.“ Anna: „Darf man das gar nicht schreiben, was man denkt? – Und: Wohin kommen dann unsere Fragen und Ideen?“

„Wenn deine Ideen oder Fragen genau zu dem Versuch passen, dann schreibe sie unter die Beschreibung deiner Beobachtung. Mach am besten ein Kästchen ins Heft, nimm eine andere Farbe und schreibe deine Fragen und Ideen in diese Ideenkiste.“ Christopher kehrt beharrlich zur Ausgangsfrage zurück: „Es fehlt aber noch, was wir mit dem Versuch herausgefunden haben.“ Ich frage zurück: „Richtig. Hat jemand Vorschläge?“

Etliche Schüler melden sich. Melis: „Mit einem Feuerzeug kann man auch den Flammensprung erzeugen. Ich habe es zuhause ausprobiert.“ Jennifer: „Kerzen kann man aus Erdöl herstellen. Das stand in unserem Lexikon. Vielleicht besteht der weiße Rauch aus Erdöl oder aus Erdgas.“ Ich: „Das ist möglich. Wir *wissen* allerdings bislang nur, dass der weiße „Rauch“ irgendetwas mit der ausgepusteten Kerze zu tun hat und einige Kerzen aus Bienenwachs hergestellt werden können – also nicht unbedingt aus Erdöl gemacht werden. – Schreib deine Vermutung, woraus eure Haushaltskerzen hergestellt werden, also am besten in eine „Ideenkiste“ unter die Beschreibung. – Wieder ist es Christopher, der betont: Es fehlt aber noch, was *passiert*. Das muss noch unbedingt unter die Beschreibung.“ Ich nicke und notiere das Stichwort „Ergebnis“ an die Tafel, und damit ist klar: Die „Ideenkiste“ muss ganz am Ende der Versuchsbeschreibung samt Ergebnis stehen. Nun sammeln wir einige Ideen systematisch und finden so auch die entscheidende Idee zum Weiterforschen. Natalie formuliert sie: „Können wir herausfinden, woher dieser Dampf kommt?“ Sebastian meldet sich zögernd und sagt bedächtig, ohne zu ahnen, dass er die eigentliche „Sogfrage“ des physikalischen Akts formuliert: „Der weiße Rauch muss ein Dampf sein – weil er hochsteigt; und er kommt vom Docht. Ich vermute, dass er aus der Kerze kommt.“ Seine Vermutung findet großen Anklang. Dass der „Dampf“ vom Docht der Kerze herkommt, haben alle gesehen. Lea fährt fort: „Aber wir wissen noch nicht, was für ein Dampf das ist. Wie kommt er dorthin?“ Vermutungen werden geäußert, dass er mit dem Kerzenkörper zu tun habe, weil dieser bei der Verbrennung immer kleiner wird.

Wir notieren Sebastians Idee: „Der weiße Rauch brennt. – Aber: Woher kommt er? Ich glaube, er kommt vom Wachs, weil die Kerze weniger wird, wenn sie brennt. Aber er kann auch vom Docht kommen, weil der weiße Rauch von dort kommt. Wir wissen nicht genau, ob das stimmt.“

3. Brennt der Docht oder das Wachs?

Was also brennt? Fünf Kinder behaupten, der Docht sei für das Brennen der Kerze verantwortlich. Das ist nahe liegend, denn der Docht hält die Flamme. Umgekehrt: Das Wachs kann eigentlich nicht brennen, denn sonst würde die ganze Kerze in Flammen stehen. Das behaupten Khang und Adrian. Sie kommen nach vorn, Adrian hält den langen Baumwolldocht mit einer Klammer und weit von sich gestrecktem Arm in die Höhe, Khang zündet ihn am oberen

Ende an. Der Docht glüht jedoch nur langsam vor sich hin und erlischt schließlich. Rätseln. – Also doch das Wachs. Einige vermuten, Wachs müsse heiß und flüssig werden wie im Wachssee, bevor es brennen kann. Der Versuch dazu ist rasch gefunden: In einem kleinen Töpfchen wird festes Wachs über einer Bunsenbrennerflamme erhitzt und geprüft, ob sich flüssiges Wachs entzünden lässt.

Warnungen, „Ahs“ und „Ohs“ begleiten den Versuch. Enttäuschung macht sich breit, als auch flüssiges Wachs nicht brennt. Erst als sich langsam eine weiße Wolke über dem Töpfchen bildet, zuerst schwach, bald gut für alle sichtbar, ruft Sebastian: „Das Wachs kocht!“ Ein strenger Geruch breitet sich im Raum aus. Unbeirrt versuche ich, die Wolke anzuzünden. Zuerst kräuselt sich der Wachsdampf stark und wirbelt umher. Maik behauptet, dass sich diese Wolke niemals anzünden lassen würde – solche Wolken sind beim Flammensprung oft genug durch ungeschicktes Pusten entstanden. „Sie können der Flamme keine Form geben“, vermutet er klug und weist darauf hin, dass wir geduldig warten müssen, denn „es pufft schon, wenn Sie das Streichholz in das Gas halten.“ Ich warte also, bis sich eine gleichmäßige weiße Nebelfahne gebildet hat, halte das brennende Streichholz hinein. Unter Jubel betrachten wir ein munter züngelndes Flammenmeer im Töpfchen und schildern die Beobachtungen. Daraufhin verfasst jeder eine Versuchsbeschreibung.

Brennt der Docht oder das Wachs?

1. Der Docht? Der Docht brennt nicht, denn er glüht nur. Wir haben ihn mit einer Klammer festgehalten und ihn angezündet, aber das war nicht sehr spannend.

2. Das Wachs? Festes Wachs brennt nicht. Also haben wir das Wachs in einem Töpfchen erhitzt und flüssig gemacht und dann versucht anzuzünden. Das hat aber nicht geklappt. Aber dann haben wir etwas gewartet und es hat plötzlich gedampft. Dann konnten wir das Wachs anzünden und hat es angefangen zu brennen durch die Hitze. Es gab wunderschöne Flammen im Töpfchen. Das Wachs ist also der Brennstoff der Kerze, aber nur, wenn es gasförmig ist.

Meine Idee: Und der Dampf muss in der Kerze sein. Wie kann man ihn sehen?

Khang

Auf einem Plakat skizziere ich inzwischen eine brennende Kerze und beschrifte den festen Wachskörper, den flüssigen Wachssee und die Flamme, versehen mit einem Fragezeichen. Irgendwo dort muss Wachsdampf sein. Anschließend diktiere ich folgende Zusammenfassung: Wachs kann drei verschiedene „Zustände“ einnehmen: fest, flüssig, gasförmig. Die Chemiker bezeichnen sie als Aggregatzustände. Sie sind von der Temperatur des Stoffes abhängig. Bei der Verbrennung einer Kerze kommen alle drei Aggregatzustände vor: Der Wachskörper ist fest, der Wachssee, der sich von Uferrand zu Uferrand erstreckt und in dessen Mitte eine kleine „Dochtinsel“ herausragt, ist flüssig.“

Laura formuliert unsere Frage: „Wo in der Kerze ist gasförmiges Wachs, das wir beim Auspusten der Kerze und beim Flammenmeer als Brennstoff gesehen haben?“ Jennifer hat eine Idee: „Eigentlich müsste das Gas mitten in der Kerzenflamme sein.“ – Anne fordert: „Wir müssten in die Flamme hineinschauen können ...“

4. Blick ins Innere der Flamme und Flammentanz

Nach der kleinen Pause spinnt Cemre Annes und Jennifers Gedankengänge weiter: „Der Dampf muss in der Nähe des Dochtes zu finden sein, weil es dort raucht.“ Anne präzisiert ihre Forderung: „Wir müssten die Flamme aufschneiden können.“ Vullnet versucht es mit einer Schere, doch nichts ist zu sehen. „Vielleicht hilft ein Glas“, schlägt er vor. Mit einer feuerfesten Glasscheibe lässt sich kurz in die Flamme schauen, dann beschlägt sie schnell und man kann nichts mehr sehen. Aber die Idee ist gut, und ein unverzinktes Drahtnetz hilft schließlich weiter. Alle bekommen ein solches Gitter, halten es irgendwie in die Flamme, zuletzt quer, so dass sie den Hohlraum der Flamme über dem Docht erkennen können.

Mitunter, wenn die Kinder das Gitter zu hoch halten, rußt es fürchterlich, doch bald erkennen alle beim Tiefer-Halten in den Flammenkern den weißen Wachsnebel, der inmitten der becherförmigen, hohlen unteren Flammenhälfte emporsteigt und sich sogar entzünden lässt.



Abbildung 9: Die Flamme tanzt!

Nach einigen Fehlversuchen führen Sebastian und Anne das Experiment erfolgreich vor: Bis Zweiundzwanzig können wir zählen, so lange tanzt die frisch entzündete Flamme in der Wachsnebelfahne über dem Gitternetz. (Sebastian hat es abgelehnt, Faradays Fliege umzubinden, weil er befürchtet, dass der Versuch misslingt!).

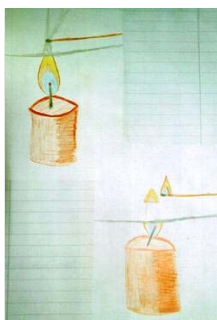
In der nächsten Viertelstunde finden die beiden zwar zahlreiche Nachahmer, doch nicht alle schaffen den Flammentanz. Dazu braucht es viel Geschick und vor allem eine ruhige Hand, und manche

nehmen ein Drahtgitter mit nach Hause, um dort zu trainieren. Anschließend beschreiben die Kinder den Versuch im Heft. Dabei klärt sich auch die Frage, warum die Flamme nicht direkt über dem Drahtgitter weiterbrennt: Es leitet die Hitze der Flamme nach aussen ab. Erst oberhalb des Gitters, wo sich die Hitze sammelt, ist es heiß genug, dass der Dampf sich wieder entzünden lässt. Dieser Versuch soll als Hausaufgabe so beschrieben werden, dass Faraday zufrieden wäre.

In der Flamme

Wenn man ein gitterförmiges Netz an dem Rand festhält und es dann tief in die Flamme einer brennenden Kerze hält, steigt weißer Dampf auf. Wenn das gelingt, zündet man ein Streichholz an und hält es über das Netz. Daraufhin tanzt eine kleine Flamme in der Luft über dem Netz. Bewegt man das Gitter auf und ab, hüpf die kleine Flamme. Man stoppt mit dem Netz die Flamme und kann sehen, dass die Flamme innen hohl ist. Wenn man das Gitter oben in die Flamme hält, erscheint dunkler Rauch. Es bleibt Ruß auf dem Gitter zurück.

Anna-Sophia



Die Flamme aufschneiden

Man hat früher mit Scheren versucht, die Flamme aufzuschneiden, um hineinzusehen und den Wachsnebel zu suchen. Doch es scheiterte. Bis die Menschen es mit einem Sieb probiert haben – natürlich nicht aus Plastik. Man kann auch ein Drahtgitter nehmen. Das haben wir ausprobiert, und es klappte.

Ergebnis: Man kann den Dampf sehen.

Aber wir dachten doch, dass es nur funktioniert, wenn die Kerze ausgepustet wird, denn nur dann kommt auch der Dampf. Aber dadurch, dass wir die Flamme praktisch durchgeschnitten haben, haben wir den Dampf gesehen. Und wenn man es geschickt macht, kann man ihn anzünden und dann kann die Flamme für eine kurze Zeit schweben.

Aber Vorsicht: Der Dampf des Waxes ist weiß. Verwechsle niemals den schwarzen Rauch mit dem weißen Dampf. Der schwarze Rauch entsteht, wenn du das Sieb nicht in den Kern der Flamme hältst, sondern direkt auf die Flamme. Dann tanzt die Flamme nicht. Dann kann es aber passieren, dass das Sieb anfängt zu brennen.

Christopher

Montag, 12. Dezember, Doppelstunde

5. Die Aufgabe des Dochts

Im Morgengrauen leuchten unsere vier Kerzen und geben das einzige Licht, als die Kinder und vor allem Jana neugierig in den Bioraum kommen. Sie war die letzte Woche krank und für sie schildern die anderen Station um Station unsere bisherigen Versuche. Dabei helfen die kolorierten Wandbilder: Zur Erinnerungskerze, dem Portrait von Michael Faraday und dem Bild vom Flammensprung ist das Flammenmeer im Töpfchen und die Darstellung von einer über dem Drahtgitter tanzende Flamme hinzugekommen. Nahtlos können wir anknüpfen: „Wir haben festgestellt, dass das Wachs in seinem gasförmigen Zustand brennt. Wozu aber braucht die Kerze den Docht? – Er brennt ja nicht!“ Christian meint, dass wir beim Flammensprung schon hätten erkennen können, dass der Docht eine einzelne Flamme festhalten kann und sie formt wie ein „schönes Blatt“ (Patrycia) oder ein „fallender Wassertropfen“ (Christina).

Die eigentliche Funktion des Dochts kann von Schülerinnen und Schülern dieser Jahrgangsstufe vielleicht nicht gefunden werden. Ich simuliere in einem kleinen Modellversuch seine Kapillarwirkung: In ein mit Methylenblau gefärbtes Becherglas voll Wasser halte ich eine Glaskapillare. Sofort steigt die Flüssigkeit in der Kapillare einen knappen Zentimeter über die Oberfläche der Flüssigkeit im Becherglas hinauf. Das Handtuch, das mit der einen Seite in die wassergefüllte Spüle getaucht wird und an der anderen Seite herunterhängt, fängt gleich an zu tropfen. Ein Blick mit der Lupe genügt und die Kinder finden schnell den Zusammenhang: Der Docht besteht aus mehreren miteinander verdrehten Baumwollfäden, die kleine Zwischenräume enthalten. In diesen steigt das flüssige Wachs „in kleinen Portionen“ (Cemre) nach oben zur Flamme, die so heiß ist, dass das Wachs verdampfen kann, damit es verbrennt.

Die Kinder beschreiben den Versuch daraufhin allein oder zu zweit:

Mit einem Modell kann man die Kapillarwirkung des Dochts zeigen: Ein dünnes Röhrchen muss man in ein Glas voll gefärbtes Wasser tauchen. Beobachtung: Die Flüssigkeit in dem Röhrchen steigt zirka einen Zentimeter über die Oberfläche von der Flüssigkeit im Glas empor. Oder man nimmt ein Handtuch und eine Schüssel Wasser. Dann saugt sich das Handtuch mit Wasser voll. Genauso steigt im Docht flüssiges Wachs empor.

Der Docht hält die Flamme und glüht. Er saugt sich mit Wachs voll, es wird gasförmig und kann brennen.

Clemens

Natalie empfindet die Kombination von Wachs und Docht nunmehr als „geniale Erfindung“, und Sebastian hat im Internet gefunden: „Bereits in Ägypten hat man Kerzen hergestellt. Es gibt sie seit zirka 2400 Jahren.“ Nadine ist von dem Zusammenwirken von Wachs und Docht so fasziniert, dass sie zuhause mit ein paar Kindern einer eigenen Frage nachgeht. Sie haben ihr Experiment selbständig durchgeführt und protokolliert:

Welche Kerze lässt sich am besten anzünden?

Der Docht von neuen Kerzen hat an der Spitze Wachs hängen. Wir haben uns gefragt, warum, und ausprobiert, was am besten ist:

1. Der Docht hat kein Wachs an der Spitze.
2. Der Docht hat viel Wachs an der Spitze.
3. Der Docht hat ein wenig Wachs an der Spitze.

Glücklicherweise haben wir solche drei verschiedenen Kerzen gefunden. Am schnellsten gebrannt hat die Kerze Nr. 3, die ein bisschen Wachs hatte. Wir konnten nur bis drei zählen, bei den anderen beiden bis neun oder zehn. Wenn die Kerze brennt und ihr pustet sie irgendwann aus, könnt ihr den Docht anfassen. Ihr werdet merken, dass er hart geworden ist. Das liegt daran, dass der Docht sich mit Wachs vollgesaugt hat. Ihr müsst euch das so vorstellen: Dadurch, dass am Anfang ein bisschen Wachs am Docht war, konn-

te er mit seiner Hilfe brennen. Nun wird das Wachs des Kerzenkörpers heiß und flüssig und der Docht saugt sich mit Wachs voll. Der Docht besteht aus sehr vielen Fäden, und zwischen den Fäden befinden sich Hohlräume. Sie sind sehr klein. In den Hohlräumen befindet sich das flüssige Wachs. Je kleiner die Hohlräume sind, umso mehr saugt sich der Docht voll. Das haben wir in der Schule ausprobiert: Wir haben drei Glasröhrchen getestet. Es gab eines, das hatte einen großen Hohlraum, eines mit einem mittelgroßen und eines mit einem ganz kleinen. Das Glasröhrchen mit dem kleinsten Hohlraum hat sich am meisten mit einer gefärbten Flüssigkeit vollgesaugt. Das nennt man die Kapillarwirkung des Dochts.

Nadine und Christopher

6. Wachsdampf sammeln und entzünden

„Haben eigentlich alle deutlich erkannt, dass der „Dampf“ aus dem Inneren der Flamme hochsteigt?“ frage ich nach der Pause. Christian: „Nicht wirklich. Wir haben zwar gesehen, dass er aufgestiegen ist, man kann auch sehen, dass der Wachssee sich ein bisschen bewegt und Teil-



Abbildung 10

Dominik und Cemre freuen sich, dass der Versuch, eine Tochterflamme zu erzeugen, gut gelingt.

chen zum Docht hin schwimmen. Wir können *vermuten*, dass der Dampf in der Flamme steckt, aber ganz sicher bin ich mir nicht.“ Asli: „Es wäre schön, wenn wir den Wachsdampf irgendwie aus der Flamme herausholen könnten“ – „mit einem Staubsauger“, witzelt Sebastian, und alles lacht. Dominik ernsthaft: „Vielleicht geht das mit einem Glasröhrchen – wenn es nicht zerspringt in der Hitze.“ Ich reiche ihm ein solches zehn Zentimeter langes Röhrchen, er hält es schräg in die Flamme. Als langsam weißer Nebel im Röhrchen nach oben steigt und herausquillt, steht Cemre schon mit einem brennenden Streichholz neben ihm und versucht

den Nebel zu entflammen. Tatsächlich: Ein kleines Tochterflämmchen brennt nun am Röhrchenausgang, und Dominik vermag es etliche Atemzüge lang am Leben zu erhalten. (Dominik lehnt Faradays Fliege nicht ab. Er erklärt, wie man das Glas am besten halten muss, damit der Wachsdampf ununterbrochen nach oben steigen kann.) Die Röhrchen werden schnell verteilt zum Üben im Erzeugen von Tochterflammen.

Dampfleiter

Wir haben ausprobiert, ein Glasröhrchen in den Kern der Flamme zu halten. Ihr fragt euch bestimmt, wieso wir das machen. Wir wollen eine andere Art versuchen, um zu beweisen, dass der Dampf des Wachses sich im Kern der Flamme befindet. Das Reinschauen war ein Beweis. Jetzt kommt der zweite Beweis: Nachdem wir ein Glasröhrchen schräg in die Flamme gehalten haben, steigt das gasförmige Wachs oben raus. Auch dies haben wir probiert anzuzünden, und es funktioniert.

Clemens



Abbildung 11: Der Wachsdampf wird gesammelt und fließt in den Erlenmeyerkolben.

Benjamin möchte den Wachsdampf gerne sammeln, weiss aber nicht wie. Wenn man ein Becherglas über die Flamme hält, so geht sie nach einiger Zeit aus. Clemens hat schliesslich eine Idee: Man könnte ein Gefäß an das Röhrchen-Ende anbringen. Ich übergebe ihm einen Erlenmeyerkolben und ein gebogenes Glasröhrchen, das er mit dem oberen Ausgang in das Flammenzentrum hält. Im Kolben sammelt sich

allmählich Wachsnebel. Nach und nach kommen die Kinder nach vorn, schauen ihm über die Schulter und sehen den Nebel wie Milch in den Kolben fließen und darin Wellen schlagen. Wir klären den Begriff „Fluidum“, während sich der Kolben füllt. Dann kippt Clemens, der von den anderen aufgefordert wird zu prüfen, ob der Nebel brennt, den Inhalt mutig unter gespannter Aufmerksamkeit in die Kerzenflamme. Mit leisem Zischen schießt eine Stichflamme aus dem Kolben, und der Junge zuckt erschrocken zurück. Zurück bleibt ein dünner weißer Wachsbelag auf der Innenseite des Kolbens, der sich mit einem Holzstab abkratzen lässt – eine gute Gelegenheit, die Begriffe „kondensieren“ und „erstarren“ einzuführen und zu erläutern, dass die Chemiker unter „Nebel“ ein Gas-Tröpfchen-Gemisch verstehen, der unserem landläufigen Begriff von „Dampf“ entspricht. Lange Zeit dachte man, Wachsdampf würde resublimieren, also direkt vom gasförmigen in den festen Zustand übergehen. Dies ist nicht der Fall. Er kondensiert, allerdings so schnell, dass wir es nicht sehen können. Zu sehen ist nur der erstarrte Wachs-Niederschlag an der Becherglas-Innenseite.

Anschließend beschreiben die Schülerinnen und Schüler den Versuch im Heft.⁴⁵

Der Nebelkolben

Ein krummes Röhrchen kann man in ein Glas halten, das andere Ende in die Kerzenflamme. Durch das Röhrchen steigt der Nebel in das Glas. Zunächst muss man den Nebel in das Glas laufen lassen, das dann so aussieht, als ob eine weiße Flüssigkeit in das Glas laufen würde. Wenn das Glas drei viertel voll gelaufen ist, muss man das Röhrchen von dem Glas entfernen. Es muss eine brennende Kerze bereitstehen, dann muss man das Glas mit der Öffnung zu der Flamme halten. Dann brennt der Wachsdampf für einen kurzen Moment im Glas, danach erlischt er aber sofort.

Adrian

Der Dampffluss

Jetzt wollen wir versuchen gasförmiges Wachs einzufangen. Man kann es mit Glas einfangen. Wir haben versucht, ein Becherglas über die brennende Kerze zu stülpen. Aber die Kerze ging aus, weil sie keine Luft mehr hatte. Dann haben wir ein gebogenes Glasröhrchen in die Mitte der Flamme gehalten. Am anderen Ende der Röhre muss ein Erlenmeyerkolben sein, der den Wachsdampf auffängt. Das sieht so aus, als ob ein Dampffluss in den Erlenmeyerkolben fließt. Nach einer Weile wird der Wachsdampf zu festem Wachs. Aber davor kann man den Wachsdampf anbrennen. Es gibt eine schöne Flamme aus dem Erlenmeyerkolben.

Henriette

Wir sammeln Wachsdampf mit Röhrenleiter in ein Glas

Versuch: Wir wollten Dampf einfangen. Man braucht dazu eine Kerze, ein kleines gebogenes Glasrohr, einen Becher oder Erlenmeyerkolben und eine Klammer.

Man muss die Klammer an dem Glasrohr befestigen und daran kann man es festhalten. So verbrennt man sich nicht. Jetzt muss man das Glasrohr in die Flamme halten und den Becher an die andere Seite des Rohres schräg halten. Beobachtung: Man kann gut sehen, wie der Dampf im Rohr hochsteigt und wie er schwer und weiss wie ein Wasserfall aus dem Rohr rausdrängt und in den Becher fließt. Das nennt man Fluidum. Wachsdampf fließt wie ein Fluss in den Erlenmeyerkolben. Wir zünden ihn mit einem langen Kaminstreichholz an und es gibt eine schöne Flamme im Kolben. Dabei setzt sich etwas Wachsdampf an den kalten Glaswänden des Gefäßes ab und wird wieder festes Wachs. Der Beweis dafür ist, dass man mit einem Stäbchen in das Wachs etwas reinkratzen kann. Das Wachs hat die gleiche Farbe wie die Kerze: orange.

Ergebnis: Die Aggregatzustände kann man umdrehen. Aber wir haben kein flüssiges Wachs gesehen, das Wachs kondensiert viel zu schnell.

Cemre

⁴⁵ Es sind hier vier Beispiele von sehr guten bis schwachen Schülerinnen und Schülern gewählt.

Wird dampfförmiges Wachs wieder festes Wachs?

1. Wir brauchen: Ein Glasrohr, Streichhölzer, eine brennende Kerze und einen Erlenmeyerkolben.
2. Wir halten das Röhrchen in das Flammenzentrum. Den Dampf, der am anderen Ende herauskommt, leiten wir in den Erlenmeyerkolben. Dort läuft er dadurch, dass er abkühlt, runter wie ein Wasserfall und sammelt sich dort drinnen (lat. fluidum: das Fließende). Nun wissen wir aber noch nicht sicher, ob das auch Wachsdampf ist. Also zünden wir ihn an und tatsächlich: er brennt. Nun, wenn er aufgehört hat zu brennen, wird der Rest kalt und setzt sich am Rand des Glases als eine dünne Schicht ab. Zum Beweis, dass dies wieder festes Wachs ist, nimmt man einfach ein Stäbchen und kratzt sie ab. Es hat die gleiche Farbe wie unsere Kerze: honigfarben.
3. Dampfförmiges Wachs wird also wieder festes Wachs, wenn es abkühlt.

Anne

7. Das Erlöschen der Flamme

„Warum brennt der Nebel im Röhrchen beim Sammeln nicht?“, hat Jana als Frage in ihrem Heft formuliert und gibt sie weiter an die Klasse. – Christopher antwortet direkt: „Weil im Röhrchen zu wenig Luft ist, da kann er nicht brennen.“ Kurzerhand verdunkle ich den Raum völlig, um zu zeigen, was alle schon vielfach beobachtet haben: Ich stülpe ein großes⁴⁶ Becherglas über die Kerze, woraufhin die Flamme langsam schmaler und dunkler wird, bis sie nach einiger Zeit zu flackern beginnt. Es wird wiederum dunkler im Raum. Die Flamme wird wie von unsichtbarer Hand vom Docht nach oben gezogen, begleitet von einer schwachen Spur züngelnden Nebels, dann verlischt sie. Jetzt ist es ganz dunkel im Raum, und ebenso still. Adrian meint schließlich fast flüsternd: „Feuer muss man ersticken, es brennt nur, wenn frische Luft da ist.“ In die nachdenkliche Stimmung hinein ertönt der Schulgong und der Unterricht ist für heute zu Ende – diesmal ohne Hausaufgaben.

Vullnet ergänzt später im Heft die Versuchsbeschreibung kurz und bündig:

Das Ersticken der Flamme

Wir haben über eine brennende Kerze ein Glas gestülpt.
 Beobachtung: Nach kurzer Zeit erlischt die Flamme und es steigt Nebel auf.
 Ergebnis: Die Flamme kann ohne frische Luft nicht existieren.

II. Akt. Was ist los in der Flamme?

Heute wechselt unsere Betrachtungsweise. Bislang stand der Brennstoff, das Wachs mit seinen Aggregatzuständen, im Zentrum des Unterrichts. Nun beginnen wir danach zu fragen, was *wird*, wenn etwas verbrennt, nach den Produkten also. Damit ändert sich auch die dramaturgische ‚Figur‘: Zum Thema wird nun die Flamme selbst, was sie aus dem Brennstoff macht, wenn sie brennt. Damit ist der Punkt des Kerzenprozesses erreicht, wo „die Chemie abzweigt“ (Wagenschein, s. S. 220). Hier muss daher eine deutliche Zäsur gesetzt werden, in der die Veränderung des Blickwinkels von den Schülerinnen und Schülern nachvollzogen werden kann, denn noch nie zuvor hatten sie es mit Verwandlungsprozessen der Chemie zu tun. Sie sind es bislang gewohnt, additiv zu denken (wenn Eins und Eins zusammenkommen, ergibt es Zwei und nicht ein völlig anderes – unsichtbares – Drittes). Wenn die Fragehaltung sich ändert, kann es möglicherweise gelingen, dass Kinder den Aufweis der Ausgangsstoffe der chemischen Reaktion einfordern und nach Produkten der Verbrennung fragen, um so ein möglichst lückenloses Bild von der ‚Leistung‘ der Kerze zu gewinnen.

⁴⁶ Wagenschein gibt im großen Spüreisen den Hinweis darauf, die Phänomene möglichst Raum ergreifend zu inszenieren.

Ich bin sehr gespannt, ob dies in der Kürze der Zeit mit den knappen Hinweisen auf Faradays Tipps zur Erforschung und Dokumentation seiner Experimente gelingen kann.

Entscheidend ist meiner Meinung nach nicht, ob die Schülerinnen und Schüler nun weiterhin organisch-genetisch die entsprechenden Experimente entwickeln können, sondern vielmehr, ob in ihnen ein Bedürfnis entstanden ist dafür, die „Erschließungslücken“ zu klären, und mir ist bewusst, dass dies gewisse Vorinformationen durch die Lehrerin unverzichtbar macht. So wird auch für mich dieser zweite Akt des Lehrstücks eine ungewisse Angelegenheit; ich bin aber fest überzeugt, dass er später bedeutsam sein wird, um den Kreislauf des Kohlenstoffs und des Wasserstoffs schließen zu können.

Dienstag, 13. Dezember, knapp zwei Stunden

1. Schwarzer Ruß aus weißer Kerze?

Wer heute zunächst fehlt, sind die Kinder. Sie tröpfeln nach und nach mit mehr als einer viertelstündigen Verspätung in den Biosaal. Ich erfahre, dass eine sehr schwierige Arbeit geschrieben wurde, die nicht zu bewältigen war in der vorgesehenen Zeit. Nun sind sie erschöpft. Naja. Wir öffnen die Fenster und singen einen allen bekannten Kanon, der zum Thema passt.⁴⁷ Anschließend sind die Kinder einigermaßen bereit, einem kleinen Versuch Faradays zu folgen („er“ hat als Erkennungszeichen seine Fliege angelegt), mit dem sich an die Erkenntnisse der letzten Stunden anknüpfen lässt.

Ich halte ein Stück weißen Karton horizontal dicht oberhalb des Dochts mitten in die Kerzenflamme, zähle bis drei und ziehe ihn schnell und möglichst waagrecht wieder heraus. Ein schöner Rußring ist entstanden, den ich den Kindern zeige. Schon schnellen die Finger nach oben, und Madlene erläutert den Versuch: „Das sind Brandspuren. Sie sind dort zu sehen, wo die Flamme brennt. Im Zentrum brennt sie nicht, weil die Flamme innen hohl ist. Dort ist der weiße Dampf. Die Flamme sieht, wenn man hineinschaut, aus wie ein Becher oder eine Tulpe.“ Alle stellen auf kleinen Karteikärtchen Rußringe her und stecken sie vorsichtig in Briefcouverts, die sie ins Heft kleben.

Inzwischen hat die Kerze uns wieder in ihren Bann gezogen, die Klassenarbeit scheint verdaut. Die Hände der meisten Kinder sind schwarz geworden. Schwarz wie ...? – Das ist „selbstverständlich“ Ruß (Maik), wir haben ihn bereits mehrmals gesehen. Wann? Als schwarzer Rauch ist er aufgestiegen beim Blick ins Innere der Flamme, und zwar immer dann, wenn wir das Drahtgitter nicht weit genug ins Flammenzentrum gehalten haben, sondern ein wenig höher. Nach dem Versuch mussten die Drahtgitter mit einer Bürste so lange geschrubbt werden, bis die Rußspuren beseitigt waren. Es steht fest: Wenn wir den Verbrennungsprozess stören, indem wir etwas in die Flamme hineinhalten, dann rußt es. Oder wenn der Docht zu lang ist, oder wenn die Kerze im Wind steht, oder ... – Auch die Glasröhrchen, die wir ins Flammenzentrum gehalten haben, sind schwarz geworden. Nichts Ungewöhnliches also – „verdunkelndes Wissen“ (Wagenschein).

Das Phänomen muss also nochmals verschärft werden: Sebastian hält eine Porzellanschale schräg in die Flamme. Alle haben es erwartet, dass Russ sich daran absetzt. Wir nehmen eine rote Kerze, eine blaue. Immer dasselbe: Schwarzer Ruß setzt sich ab, der sich sogar sammeln lässt. Bald ist ein Häufchen beisammen, das wir vorsichtig in ein kleines Gläschen schütten. Endlich taucht eine Frage auf, die eigentlich niemand mehr erwartet angesichts der Alltäglichkeit der Beobachtung: „Müssten Kerzen nicht eigentlich schwarz sein oder wenigstens grau, wenn Ruß darin ist?“, fragt Asli zögerlich. Schließlich Christian: „Und Wachsnebel nicht auch?“ Eigentlich ist das *doch* seltsam ...

⁴⁷ „Mache dich auf und werde Licht, denn dein Licht kommt.“ – Die Kinder sind es gewohnt, Lieder, Kanons und Gedichte passend zum Jahreskreis oder Thema bei mir einzuüben.

2. Die Flamme im Licht

Im hellen Licht eines Diaprojektors kann der Schattenriss einer brennenden Kerze auf einer Leinwand abgebildet werden. Nach der Pause versammeln sich die Kinder dicht vor einer Leinwand, um die Projektion der brennenden Kerze im dunklen Saal zu betrachten. Deutlich sind auf der Leinwand der Kerzenkörper und der Docht zu erkennen. Während der nächsten halben Stunde brüten wir darüber, was es sonst noch alles zu entdecken gibt. Christopher deutet sehr schnell die dunklen Schleifen, welche entlang der Flamme empor flimmern und sich kurz oberhalb wirbelnd vereinigen, als Bild der Luftströmung, die er mit dem Flimmern der aufsteigenden warmen Luft über dem heißen Asphalt eines Sonnentages vergleicht. Sebastian fügt hinzu: „Das ist wie bei der Sauna. Oben ist es heißer als unten. Die warme Luft strömt nach oben.“ Christina versteht jetzt, warum der Wachssee ein Ufer hat: „Schuld daran ist die kühle Luft, die von unten her aufströmt.“ Dazu bildet sie mit Zeigefinger und Daumen einen Ring um die Kerze am oberen Rand des Wachskörpers der brennenden Kerze. „Man merkt das; hier unten kann ich mich nicht verbrennen, da ist es ziemlich kühl. Weiter oben verbrenne ich mir die Finger.“ Sie zieht schleunigst die Hand wieder zurück. Es klärt sich auch die Flammenform: Die warme und immer wärmer werdende aufsteigende Luft zieht die Flamme nach oben.

Größere Schwierigkeiten bereitet es, im Bild der Flamme das hell Durchscheinende des Flammenkerns zu erklären. Und noch erstaunlicher ist, dass auf der Leinwand ein deutlich erkennbarer Schatten zu sehen ist, den der Flammenmantel wirft. Intensiv wird geknobelt und schließlich eine Spur gefunden: „Wenn ich meine Finger projiziere, dann scheint das Licht des Diaprojektors durch die Abstände meiner Finger. Wo die Finger sind, ist das Bild dunkel.“ (Nadine). Und wieder ist es Christopher, der diesen Ansatz zur Überlegung führt: „Dort, wo das Bild dunkel ist, muss etwas Festes in der Kerze sein, sonst wäre kein Schatten da.“ Das leuchtet ein, und Anna findet: „Vorhin haben wir doch die Ringe gemacht und Ruß gesammelt. Da, wo es hell war, ist Dampf. Den sehen wir hier nicht.“ Sie deutet auf die Stelle auf der Leinwand, wo in der Flamme das dunkle Zentrum ist. Mit einer dünnen Nadel können wir den Flammenkern und das Bild des Kerns leicht identifizieren. „Da blieb auch das Papier hell, weil es da nicht brennt.“ Cemre: „Genau. Nur außen herum“, er hält die Nadel in den Flammenmantel der Kerze, und alle starren auf sein Bild, „da brennt es.“ Dominik spinnt Christophers Gedanken von vorher weiter: „Wenn es *etwas* geben kann, das fest ist, dann muss es der Ruß sein. Kann es sein, dass dort, wo die Flamme am hellsten leuchtet, Ruß ist?“ Er schaut mich unsicher an. – Anna hält das Porzellanschälchen schräg in die Flamme. Das Bild flimmert und schwarze Schwaden steigen auf. Offenkundig hat Dominik Recht. Es bleibt gerade noch Zeit für ein paar Notizen für die Hausaufgabe, und schon klingelt es zum Ende der Stunde. Wie wird es morgen weitergehen?



Der Schatten der Flamme

Man nimmt einen Diaprojektor und leuchtet damit eine Flamme an die Wand. Man dunkelt den Raum ab und stellt die Kerze vor den weißen Hintergrund. Da sieht man den Schatten von Kerze und Docht sowie einen Schatten genau außen, wo der Flammenrand ist. Das ist wahrscheinlich Ruß. Wenn man mit einem Gegenstand eine Flamme stört und sich dabei das Schattenbild anschaut, sieht man richtige Rußschwaden auf der Leinwand aufsteigen. Den Ruß sieht man, weil es ein Stoff ist. Er ist pulverisiert. Wenn wir außerhalb der Flamme das Schattenbild anschauen, bemerkt man, dass es um die Flamme herum weiße feine Linien gibt. Das ist warme Luft, die an der Flamme entlang aufsteigt und die Flamme formt. Unten ist die Luft noch kühler (da ist ja auch kein Feuer), was gut ist, weil dann der Wachssee nicht ausläuft. Links, rechts, vorn und hinten treffen sich die Luftströme oberhalb der Flamme und bilden einen Strudel. Hier ist kein Ruß mehr zu sehen.

Meine Frage: Was macht der Ruß in der Flamme?

Lea

Ein Schattenbild der Kerze

Dazu braucht man: Eine Kerze, einen Diaprojektor und eine Leinwand.

Versuchsbeschreibung: Zuerst zündeten wir eine Kerze an, die wir dann vor den Diaprojektor stellten. Im Schattenriss der Kerze sahen wir die Kerze und den Docht. Frische Luft zieht von unten nach oben und wirbelt. Wo sie wirbelt, ist dann sehr heiße Luft. Entlang der Flamme ist der Luftstrom zu sehen. Er macht die Flammenform. Da, wo die Kerzenflamme am hellsten leuchtet (im Flammenmantel), sieht man ebenfalls einen Schatten.

Ergebnis: Dort sind feste Körper, die einen Schatten erzeugen. Er stammt von Rußteilchen, die in der Flamme sind.

Ich denke, der Ruß muss aus der Kerze kommen.



Jennifer

Mittwoch, 14. Dezember, eine Stunde

3. Das Feuerwerk

Was „macht“ der Ruß in der Flamme? Um das zu sehen, bräuchten wir eine Flamme, deren Bild keinen Schatten auf die Leinwand wirft. Gibt es das? Im Schein des Diaprojektors können wir sehen, dass eine Bunsenbrennerflamme unter starker Luftzufuhr tatsächlich kein Bild erzeugt. Und: Diese Flamme leuchtet auch nicht. Wir greifen Nadines gestrigen Gedanken wieder auf: Feste Teilchen – ihre Finger – ergeben einen Schatten. Ich habe einige Pulver mitgebracht, die ich nacheinander in die nicht-leuchtende Bunsenbrennerflamme puste, und ein kleines Feuerwerk beginnt. Zuerst ein wenig Kupferpulver: Die Flamme leuchtet unter jubelndem Applaus intensiv grün auf. Als nächstes Eisenstaub: Rot glühende Funken sprühen umher und erinnern die Schüler an Schweißarbeiten. Die grellgelbe Stichflamme des Aluminiumpulvers blendet fast. Schließlich Kohlenstaub: Er leuchtet gelborange auf und wird sogleich mit der Färbung der Kerzenflamme identifiziert. Auf Drängeln der Kinder wiederhole ich, weil's so schön war, das ganze Feuerwerk noch einmal.



Abbildung 12
Kupfer färbt die Flamme grün.

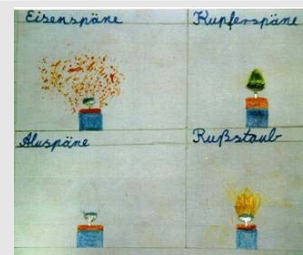
Laura hat eine Vermutung. Sie erinnert an unser gestern gesammeltes Rußhäufchen und schlägt vor, es ebenfalls in die Flamme zu pusten. Gesagt, getan, und die Flamme leuchtet ebenso gelborange wie der Kohlenstoff. Ruß *ist* Kohlenstoff, ein Element. Ruß ist der Träger der Leuchtkraft der Kerzenflamme. Und weiter: Kohlenstoff muss also in der Kerze sein, aber in anderer Weise, denn sonst gäbe es keine weißen Kerzen. Die Kinder beschreiben den Versuch im Heft und fertigen Zeichnungen dazu an.

Das kleine Feuerwerk

Dazu braucht man: Kupferspäne, Aluminiumspäne, Eisenspäne, Rußstaub, einen Bunsenbrenner und Röhrchen.

Zuerst zündet man den Bunsenbrenner an und stellt ihn auf nicht-leuchtende Flamme ein. Danach nimmt man ein Röhrchen und taucht es in ein Gefäß mit den Spänen oder den Rußstaub. Die Späne oder der Staub bleiben am Röhrchen haften. Anschließend bläst man sie in die Flamme des Bunsenbrenners. Bei den Kupferspänen sieht man eine schöne grüne Flamme. Bei Alu leuchtet ein kurzes, grelles Licht auf wie bei einem Fotoblitz. Eisenspäne leuchten wie eine Wunderkerze, und es entstehen rot-orange Funken. Bei Rußstaub sieht die Flamme warm goldgelb aus wie bei der Kerze. Ein tolles Feuerwerk.

Also färbt Ruß die Kerzenflamme und verglüht.



Jana

Beim Herumgehen stelle ich fest, dass Christopher ganz intensiv damit beschäftigt ist, in ein „Ideenfenster“ seine Gedanken zu formulieren. Ich reiche ihm Faradays Fliege und Christopher liest vor:

Es ist erstaunlich, dass man den Ruß in der Flamme nicht sieht. Normal gedacht müsste die Flamme auch ein bisschen schwarz sein, denn Ruß ist ja auch schwarz. Aber die Flamme ist zum allergrößten Teil orange, nicht auch nur ein bisschen schwarz. Oberhalb und neben der Flamme ist überhaupt kein Ruß mehr. Der Ruß kann also nichts anderes sein als unser verbrennendes Wachs. Das gasförmige Wachs dringt mit Hilfe des wärmer werdenden Luftstroms nach oben, dabei wird es glühend heiß und verbrennt. Der Ruß muss dabei erst entstehen und muss also, bevor er verbrennt, die Flamme schön orange aufleuchten lassen. Unser Ergebnis ist also, dass Ruß normalerweise total verbrennt.

Aber das kann doch nicht sein, dass er dann einfach weg ist, oder?

Christopher

4. Verwandlungen?!

Es ist schon erstaunlich: Gerade Christopher, der zu Beginn des Kerzenunterrichts so sicher wusste, dass bei der Verbrennung CO₂ und Wasser entstehen, ist nun nachdenklich geworden. Zeit für eine kleine Reflexion des Ganzen. Ich beginne: „Wir haben den Weg des Wachses vom festen Kerzenkörper bis zum gasförmigen Gasdampf verfolgt und viele Experimente dazu gemacht. Damit beschäftigt sich die Physik. Die Chemiker hingegen beobachten, wie sich die Stoffe verwandeln. Man nannte die Chemiker früher auch „Scheidekünstler“, weil sie es sind, die Stoffe voneinander trennen können und sie dann verwandeln in Stoffe mit völlig neuen Eigenschaften. Sie tun das sehr oft mit Hilfe des Feuers. Und bei der Kerze können wir genau sehen, an welcher Stelle die Chemie beginnt ...“ Einige werden unruhig, melden sich und übernehmen das gegenseitige Aufrufen: „Mitten im Feuer“, „im Flammenmantel“, „dort, wo Ruß ist, also Kohlenstoff“, „im Flammenmantel“, „wo die Flamme orange aufleuchtet“, „wo der Kohlenstoff verglüht“, „wo die Flamme heiß ist“, lauten die Antworten. Auch der Zusammenhang mit dem Luftstrom, der an der Flamme entlang streicht und zur Verbrennung nötig ist, wird hergestellt, und die Erkenntnis wird allmählich in ihrer ganzen Tragweite deutlich, als Khang sagt: „Am Ende ist der Ruß *verschwunden*.“ „Das heißt doch“, so Laura, „dass am Ende nichts ist. Das kann doch nicht sein, dass aus Etwas *Nichts* wird? – Oder?“

„Wenn ihr wollt“, so beschließe ich die Stunde etwas früher, „dann fasst eure Gedanken, die ihr jetzt habt, in ein Bild, oder in ein Gedicht, in eine Frage oder einen Spruch. Es gibt heute keine Hausaufgabe, wenn ihr etwas machen wollt, dann freiwillig.“

Nachdenklich werden die Sachen eingepackt, manche unterhalten sich leise. Maik notiert in sein Heft spontan ein kleines Gedicht, das er mir beim Herausgehen grinsend zeigt:

Der Denker

Es denkt ein Philosoph,
 der ist bestimmt nicht doof:
 „Dass nichts aus etwas wird,
 das kann doch wohl nicht wahr sein,
 sonst wär die ganze Welt bald
 winzig klein.

Maik

Donnerstag, 15. Dezember, Doppelstunde

5. Feuerwasser aus der Flamme

Der Gedanke, dass aus etwas nichts wird, ist in der Tat von existenzieller Bedeutung. Zu Beginn der Stunde vergegenwärtigen wir uns, dass Ruß in der Flamme zuallererst *entsteht*. Ich füge der Kerzenreihe, die samt Bienenwabe, Lavendeltopf und den vier Gläschen voller Wasser, Erde, Luft und Licht seit der ersten Stunde auf dem Lehrerpult aufgebaut ist, eine Porzellanschale mit Ruß hinzu. Angesichts dieser Reihe und der Überlegungen am Ende der letzten Stunde denken wir nun fieberhaft darüber nach, dass es auch außerhalb der Flamme so sein könnte, dass etwas Neues entstehe – dass Ruß möglicherweise nur ein Zwischenprodukt der Verbrennung darstelle. In Zeiten des Internets lässt sich eine Beunruhigung sofort beseitigen: Etliche Kinder haben unter dem Stichwort „Verbrennung“ bei Google nachgeschaut, dort schnell eine Antwort gefunden, so dass sie heute mit dem Ergebnis aufwarten: Ja, bei der vollständigen Verbrennung entsteht Kohlendioxid und Wasser. – Doch können wir das auch nachweisen?

Klar ist, dass wir außerhalb der Flamme schauen müssen: Wasserdampf lässt sich bestimmt nachweisen mit einer Glasplatte, die schräg in geringem Abstand über die Flamme gehalten wird und beschlägt. Der Versuch gelingt leicht⁴⁸ – genauso sieht es aus, wenn wir eine Fensterscheibe anhauchen. – Der erste Bezug zwischen Kerze und Mensch ist hergestellt.

Ich verschwinde kurz in die Biosammlung und kehre mit einer Versuchsanordnung zurück, die ich auf meinem Experimentierwagen bereits aufgebaut habe und die es zunächst zu verstehen gilt: Eine neue Kerze steht unter einem Trichter, der über Gummischläuche mit einem U-Rohr verbunden ist. Das U-Rohr wiederum ist über einen Schlauch an eine Wasserstrahlpumpe und diese an den Wasserhahn angeschlossen. Zwei Stative halten die Apparatur.

Mit wenigen Hilfen können die Schüler die Funktionsweise der Wasserstrahlpumpe erklären.⁴⁹ Allen ist klar, dass das U-Rohr ein Reservoir darstellt – wirklich für Wasser? Sollte es sich in den Luftwirbeln über der Kerze befinden und mit dem Trichter einzufangen sein? Madlene vermutet eher Rußspuren, weil die Flamme auch in der Umgebung leuchtet. Weil man oberhalb der Flamme nichts mehr sieht, es aber dort sehr heiß ist, könnte jedenfalls etwas Gasförmiges dort sein. In diesem Fall, was immer dort geschehe, sei dann eine Kühlung an-

⁴⁸ Es dünkt mich schwierig, das Experiment zum Wassernachweis mit Schülerinnen und Schülern der fünften Jahrgangsstufe zu entwerfen, anspruchsvoll, aber leistbar hingegen, die Funktionsweise der Wasserstrahlpumpe nachzuvollziehen.

⁴⁹ Anfangs meinen die meisten, das Wasser aus dem Hahn werde auch ins U-Rohr und anschließend zur Kerze geleitet, so dass die Flamme gelöscht würde. Sebastian, der das nicht einsieht, vergleicht den unter Druck ins Becken spritzende Wasserstrahl mit der Wirkung eines fahrenden Schiffes auf dessen Heckseite: Dort ist durch die Vorwärtsbewegung weniger Wasser, es wird verdrängt, so dass ein Sog entsteht; deshalb bilden sich wirbelnde Wasserwellen, die wieder dorthin streben. Jennifer führt den Gedankengang weiter: Die Kerzenflamme müsste durch die Sogwirkung hoch in die Öffnung gezogen werden. Diese These wird durch eine kurze Probe mit der Kerze sofort bestätigt.

gebracht, um „etwas Gasförmiges flüssig werden zu lassen und aufzusammeln“ (Cemre)⁵⁰. Ich hole in der Sammlung ein Wasserbecken, schüttele etliche Eiswürfel hinzu und tauche das U-Rohr hinein. Die Kühlfalle ist hergeleitet. Danach wird die Kerze entzündet und durch Aufdrehen des Wasserhahns der Versuch gestartet. Schon nach ein paar Minuten sammeln sich im Reservoir ein paar durchsichtige Tropfen, und das U-Rohr ist völlig beschlagen.

In der Zwischenzeit ist Gelegenheit, sich Gedanken zu machen darüber, ob und falls ja, wie wir einen Kerzen-Elternabend gestalten wollen. Der Plan ist rasch gefasst: Ja, wir wollen. Die Kinder beschließen, alle unsere Experimente vorzuführen, und legen fest, dass Anna, die klar und deutlich sprechen kann, als „Michael Faraday“ verkleidet den Abend moderieren soll. Dazu wird es Plätzchen und Weihnachtstee geben. Anschließend gestaltet jedes Kind eine Einladungskarte für die Eltern und Großeltern.

Nach einer guten Stunde müssen wir den Versuch abbrechen: Der Schenkel des U-Rohrs ist voller Flüssigkeit. Wir messen nach: aus nur 4 cm Länge einer Haushaltskerze haben wir 15 ml Flüssigkeit gewonnen. Erstaunlich: viel mehr Flüssigkeit als das Volumen des verbrannten Waxes einnimmt. Und: Das soll wirklich Wasser sein? In wenigen klitzekleinen Flöckchen schwimmt Ruß an der Oberfläche, die Flüssigkeit ist leicht gelblich verfärbt. Christian kichert: „Das wäre ja dann echtes Feuerwasser!“ Doch *genau* wissen wir das nicht. Ich montiere das U-Rohr ab und schüttele den



Abbildung 13: Ist das wirklich Wasser?
Laura kann's kaum glauben.

Inhalt in ein Fläschchen. Es riecht ein wenig nach Wachs und Ruß. Vullnet fordert beharrlich einen Wassernachweis. Wasser kocht bei ca. 100⁰

Celsius. Wir erhitzen die Hälfte unserer Probe und messen nach: Es *ist* Wasser. Bleibt noch eine Frage: Stammt das Wasser tatsächlich aus der Verbrennung – nicht etwa aus der die Kerze umgebenden Luft, die ebenfalls durch den Sog der Wasserstrahlpumpe den Trichter passiert hat? Ein kleiner Versuch überzeugt Nadine, die die Frage gestellt hat: Wenn wir den Trichter in die Luft halten (ohne Kerze) und an die Kühlfallenapparatur anschließen, so beschlägt das U-Rohr nicht. Unser gewonnenes Wasser ist tatsächlich „Feuerwasser“, das mitten in der Hitze der Flamme entstanden ist. Quod erat demonstrandum!

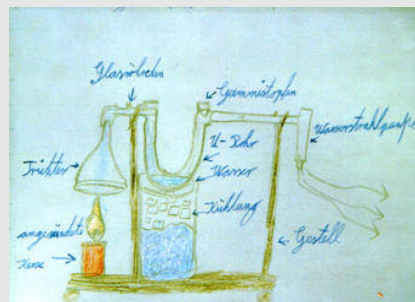
⁵⁰ Ich schätze diese Überlegungen der Schüler in ihrer Qualität sehr hoch ein: Sie zeigen, dass sie sich ganz auf Phänomen und Problem eingelassen haben und bereits mit den Aggregatzuständen umgehen können.

Das Feuerwasser

Man braucht zum Versuch eine brennende Kerze, ein Stativ, einen Trichter, ein Glasröhrchen und ein U-Rohr, eine Wasserstrahlpumpe und ein Gefäß mit kaltem Wasser und Eiswürfel.

Die Kerze lässt man unter dem Trichter brennen und das Gefäß mit kaltem Wasser und den Eiswürfeln stellt man unter das mit Stopfen verschlossene U-Rohr, so dass es ins Wasser eingetaucht ist. Die Wasserstrahlpumpe wird dann am Ende des Glasröhrchens befestigt und am Wasserhahn angeschlossen. Das macht man, damit die heisse Luft über der Kerze angesaugt und durch das U-Rohr gekühlt wird, um zu gucken, ob in der Luft etwas drin ist, das flüssig werden kann. Die Flamme der Kerze muss ruhig brennen, dann geht es besser. Die Flamme der Kerze beschlägt sofort mit Dampf den Trichter, also muss was Flüssiges aus der Flamme kommen.

Ergebnis: Nach einer Stunde haben wir aus einer ca. 4 cm langen Haushaltskerze ca. 15 ml Wasser eingesammelt. Es riecht etwas russig, aber es ist wirklich Wasser. Wenn die Kerze verbrennt, kommt am Ende also echtes Wasser raus, das beim Verbrennen entsteht.



Natalie

Freitag, 16. Dezember, Doppelstunde

6. Woher kommt das Wasser – wohin verschwindet der Ruß?

Die Kinder bemerken sogleich beim Hereinkommen, dass unser Fläschchen „Feuerwasser“ zur „Woher – Wohin“-Reihe hinzugekommen ist.

Ich greife unser Ergebnis vom Vortag auf: „Wir haben gestern etwas Seltsames festgestellt. Bei der Verbrennung *entsteht* Wasser. Es kann nicht aus der Luft stammen, das haben wir gesehen. Es kann aber auch nicht aus dem Kerzenwachs stammen, denn sonst würde sich Wachs im Wasser auflösen.“ – „Es gibt sogar Schwimmkerzen“, wirft Nadine ein, kommt nach vorn und schüttet zur Demonstration den Wachssee ihrer brennenden Kerze kurzerhand in ein Becherglas mit Wasser, das ich ihr assistierend reiche: Das flüssige Wachs zischt beim Abkühlen, verfestigt sich und schwimmt darauf.

Ich fahre fort: „Danke, Nadine! Dazu kommt noch etwas Seltsames: Wir haben gestern sehr viel mehr Wasser gewonnen, als in der Kerze hätte sein können, denn sonst hätte das verbrannte Kerzenstück viel größer sein müssen. Richtig?“ (*Nachdenkliches Nicken*).“ Ich fordere die Schülerinnen und Schüler auf, zu zweit in einem Ideenfenster Überlegungen zu sammeln, was da los sei. Nach einigen Minuten sind sie soweit. Mehrere Kinder haben die einzig verbleibende Möglichkeit zur Lösung des Problems gefunden: Ein Stoff, der Wasser bilden kann – ein „Wasser-Stoff“ – und ein anderer, der aus der Luft stammen muss, treffen in der Hitze der Flamme aufeinander, um den völlig „neuen“ Stoff Wasser zu bilden. Verantwortlich dafür kann nur die frische Luft sein. Ich führe die Bezeichnung „Sauerstoff“ nun offiziell und parallel zur früheren Bezeichnung „Feuerluft“ ein, ohne die „nichts brennt.“⁵¹ Erstaunlich: Ein völlig neues Ding entsteht, wenn zwei Stoffe miteinander chemisch verbunden sind. Wir halten sämtliche Überlegungen graphisch an der Tafel fest: Ich zeichne eine brennende Kerze, von deren Flamme aus ein Pfeil wegführt, den ich mit *Wasser* beschrifte. In den Kerzenkörper trage ich *Wasser-Stoff* ein. Die meisten Kinder kennen bereits die chemische Formel für Wasser, und verweisen nun darauf:

⁵¹ Die meisten Schüler kennen den „Sauerstoff“ schon, besonders Christopher hat ihn bereits mehrfach erwähnt. Scheele, sein Entdecker, bezeichnete ihn als „Feuerluft“. Lavoisier soll ihm den lateinischen Namen Oxygenium (Säurebildner) gegeben haben, weil er fälschlicherweise annahm, dass er in allen Säuren enthalten und für deren charakteristische Eigenschaften verantwortlich sei (Römpp, Chemie-Lexikon, S. 4003). Die deutsche Bezeichnung „Sauerstoff“ ist zudem irreführend, er müsste „Sauermacherstoff“ heißen.

nung an der Wandtafel ins Heft übertragen und der Versuch im Heft beschrieben. Alle werden in dieser Stunde fertig, so dass die Hausaufgabe entfällt.



Abbildung 15

Auch die Atemluft enthält Kohlendioxid

Nachweis von Kohlendioxid aus der Flamme

Wir haben drei Waschflaschen mit Kohlendioxid gefüllt. Eine war mit reinem Kohlendioxid aus der Gasflasche gefüllt. Eine andere haben wir mit Kohlendioxid aus der Kerze gefüllt. Die dritte haben wir mit Raumluft gefüllt, die vierte mit Lauras Atem. In jede Flasche haben wir zuvor Kalkwasser (Kalziumhydroxid) geschüttet. Ergebnis: Die erste, zweite und vierte Flasche sahen gleich aus, nämlich das Kalkwasser wurde milchig trüb. Nur die dritte Flasche mit der guten Luft ist klar geblieben. Also entsteht bei der Verbrennung und der Atmung Kohlendioxid.

Patrycia

III. Akt. Kerze: Wohin – woher?

1. Versuchsaufbau zur Photosynthese

Es bleibt noch eine Viertelstunde Zeit, um einen Photosyntheseversuch aufzubauen. In drei Literflaschen fülle ich etwas Wasser, in die dritte stecke ich zusätzlich einen Zweig Kirschlorbeer. Die erste Flasche wird verdeckelt, in ihr ist neben Wasser die Umgebungsluft des Raumes. In die zweite Flasche tauche ich einen an einem gebogenen Aludraht befestigten brennenden Kerzenstummel und verschließe die Flasche mit einem eingekerbten Deckel. Wir zählen bis sieben, dann erlischt die Flamme. Die Kerze wird rasch entfernt und die Flasche fest verschlossen. In der zweiten Flasche befindet sich jetzt neben dem Wasser Kohlendioxid. Mit der dritten Flasche verfahren wir genauso. Maik, Jennifer und Jana beschriften die Flaschen und stellen sie ans Fenster.⁵⁴ Weil es so dunkel ist an diesem Tag, bestrahle ich sie zusätzlich mit einer UV-Lampe. Es klingelt, während die letzten Notizen zum Versuchsaufbau gemacht werden, und ich entlasse die Klasse in den Musikunterricht.

Montag, 19. Dezember, Doppelstunde

2. Die Kerzenreihe schließt sich zum Kreis

Der Photosyntheseversuch ist nicht ganz einfach, ich hoffe, die Pflanze hat über Nacht ausreichend Sauerstoff produziert. Doch wir starten zunächst nicht mit dem Versuch, denn gleich zu Beginn der Stunde meldet sich Laura und sagt: „Es stimmt doch, dass die Tiere, die Menschen und alles, was verbrennt, Sauerstoff aus der Luft braucht. Wir verbrauchen die gute Luft und machen daraus schlechte.“ Ich gehe hinüber zum Tisch, auf dem unsere Kerzenreihe aufgebaut ist. Auch Christopher und Dominik sind inzwischen unruhig geworden und rutschen auf dem Stuhl hin und her. Laura fährt fort: „Wir haben *auch* gesagt, dass die Pflanzen Wasser brauchen. Und sie brauchen *auch* Luft, oder?“

Die Zeit für unseren Photosyntheseversuch ist gekommen. Ich: „Vullnet, weißt du noch, was in dieser ersten Flasche ist?“ „Wasser und Luft“, lautet die Antwort. „Gut. Wenn ich nun eine brennende Kerze hineinhalte, was wird passieren?“ Melis: „Sie brennt ein bisschen, dann geht

⁵⁴ Dieser Photosyntheseversuch, den Dirk Rohde zuerst ins Lehrstück aufgenommen hat (Rohde 2003, S. 155), gelingt gut, wenn man geeignete Pflanzen dafür findet. Die Blätter sollten nicht hitzeempfindlich und nicht allzu sehr im Wachstum begriffen sein. Zur Spätherbst- und Winterzeit habe ich die besten Erfahrungen mit Kirschlorbeer gemacht.

sie aus.“ – Anne: „Sie brennt *sieben* Sekunden. Das war gestern bei der zweiten Flasche auch so, und beide Flaschen sind gleich groß.“ „Super. Und was passiert in der zweiten?“ Melis wieder: „Sie geht sicher aus.“ Wir halten die Kerze hinein, und ehe wir uns versehen, ist die Flamme erloschen. „Hui, das ging schnell, alle Luft ist weg“, kommentiert Asli. „Warum ist in der ersten und zweiten Flasche eigentlich Wasser?“, fragt Christian. Cemre: „Damit in allen Flaschen alles gleich ist.“ – Ich weiter: „Nun zur dritten Flasche: Was meint ihr, was passiert, wenn wir dorthinein eine brennende Kerze halten?“ Die Klasse ist geteilter Meinung: „Die Kerze geht bestimmt gleich aus“, meinen die die einen, „weil die gute Luft ja verbrannt ist durch die Kerze“ (Melis), andere, die schon wissen, dass Pflanzen die Luft „säubern“, sind der Überzeugung, dass die Kerze in dieser Flasche ein wenig brennen wird, bevor sie erlischt ... – Wir überprüfen die Vermutungen, tauchen die Kerze in die Flasche hinein und zählen ... fünf, sechs, sieben – erst dann wird die Flamme kleiner und verschwindet. Für das Protokoll ist jetzt keine Zeit, der Hefteintrag wird auf einen späteren Zeitpunkt verschoben.

Die Kerze brennt im Glas

Man braucht drei Flaschen. In der ersten Flasche ist Frischluft und Wasser. In der zweiten Flasche haben wir Kerzenluft und Wasser. In der dritten Flasche ist eine Pflanze, Kerzenluft und Wasser drin. In der ersten Flasche brennt die Kerze sieben Zähler lang. In der zweiten Flasche brannte die Kerze drei Zähler lang. In der dritten brannte die Kerze fast acht Zähler lang. Diesen Versuch haben wir gemacht, weil wir wissen wollten, in welchen Zuständen die Kerze in einem Glas eine Weile lang brennen kann. In der dritten Flasche konnte die Kerze so gut brennen, weil die Pflanze die Kerzenluft einatmet und sie dann zu Sauerstoff verarbeitet, den die Kerze zum Brennen unbedingt braucht.

Anna-Sophia

Jetzt hingegen wollen die Kinder weiter überlegen: „Es stimmt also, dass wir nicht leben könnten, wenn es keine Bäume mehr gibt?“, meint Sebastian. Lea: „Ja, deshalb ist es ja auch so schlimm, wenn so viel Wald abgeholzt wird.“ Ich führe die Begriffe *Pyrolyse* und *Photosynthese* ein und schreibe sie an die Tafel. Dominik muss zurückgehalten werden, er wollte Sebastian vorhin schon ins Wort fallen. Endlich ist er dran: „Ich finde gut, was Lea vorhin gesagt hat. Unsere Reihe ist eigentlich nicht so gut. Von den Flaschen (er geht zu mir und zeigt auf die Kalkwasser-Waschflasche und das „Feuerwasser“) müsste es auf der anderen Seite wieder zurückgehen zu den Pflanzen.“ Ich: „Mhm, das musst du uns genauer zeigen. Also lasst uns hinuntergehen in den Multiraum, und dann zeig, was du meinst.“ Die Schüler schnappen sich die Utensilien vom Tisch und sausen hinunter. Leider ist der Multiraum gerade belegt, wir müssen ausweichen in den Eingangsbereich des Neubaus, wo die Klasse sich im Kreis aufstellt und die Reihe wieder aufbaut. Dominik und Lea ordnen die Gegenstände nach ihrer Idee an, und im Nu stehen sie in gleichmäßigen Abständen im Kreis.

Ich habe die Bilder aus dem Biosaal schnell von der Wand mit hinunter genommen, die die Schüler nun um den Kreis herum in der Reihenfolge der Versuchsdurchführungen an der passenden Stelle anordnen. Besonders gut gefällt mir, dass sie Faraday und die Erinnerungskerze in die Mitte legen: Beide passen nirgendwo anders hin, sie werden intuitiv als Ausgangspunkt und Zentrum unseres Unterrichts wahrgenommen. Während dieser Phase verläuft der Unterricht in Ruhe und ganz von selbst, ich brauche nicht in das Geschehen eingreifen. Die Bilder werden herumgereicht, man macht einander Platz zum Auslegen und wird sich rasch einig über die Anordnung.

Die Klasse überlegt nun spontan, was sich in ihrer Vorstellung durch die neue Aufstellung verändert hat. Die meisten äußern bruchstückhaft ganz positive Empfindungen, irgendwie finden sie es einfach schön, dass die Kerze in einem Kreis mit anderen Dingen steht, dass sie hinein genommen ist in die großen Zusammenhänge der Welt. Benjamin: „Mir kommt es nicht vor wie ein Kreis, sondern eher wie ein Rad. Es läuft immer rund herum. Je mehr Kerzen brennen, umso mehr Wasser ist da und verbrauchte Luft. Umso mehr Pflanzen müssen die Luft wieder frisch machen.“ Ich: „Und was ist es, das dem Rad den Schwung gibt, dass es immer weiterläuft?“ – Henriette: „Die Kerzen, indem sie brennen.“ Christian: „Und die Son-

ne, denn sie gibt den Pflanzen das Licht zur Photosynthese.“ Cemre witzelt: „Eigentlich müssten wir eine Sonne über den Lavendel hängen!“ Adrian nestelt in seinen Hosentaschen herum. Er hat die Streichholzschachtel eingesteckt und zündet nun andächtig die Kerzen an. Nach der kleinen Pause treffen wir uns wieder im Bioraum.



Abbildung 16: Die Klasse hat den Kerzenkreislauf selbst gefunden und ist mächtig stolz. Im Zentrum ein Bild von Faraday, eingerahmt von einer Kerze und einer Pflanze. Die Kinder haben die anderen Bilder bei den entsprechenden Protagonisten des Kreises platziert.

3. Schülertexte zum Kerzenkreislauf

In der zweiten Stunde schreiben die Schülerinnen und Schüler einen freien Aufsatz zum Kerzenkreislauf. Dafür ist die ganze Stunde Zeit. Zuvor bekommen alle ein kleines Blatt ausgeteilt mit einem Zitat aus Faradays sechster und letzter Vorlesung, das zunächst gemeinsam gelesen und später in das Heft eingeklebt wird.⁵⁵

Kerze

Alles fängt mit der Kerze an. Die Kerze braucht frische Luft, verarbeitet sie aber zu schlechter, zu Kohlendioxid. Die Pflanze braucht die schlechte Luft, verarbeitet diese aber zu guter. So ist es ein Kreislauf der Kerze. Die gute Luft braucht die Kerze zum Brennen, aber auch wir Menschen und Tiere brauchen sie zum Atmen. So wird sie wieder schlechte Luft, die wiederum die Pflanze braucht. So wären wir wieder am Anfang. Das hätte ich nicht gedacht, aber nach so vielen Experimenten kommt es einem gar nicht mehr unlogisch vor.

Clemens

⁵⁵ Faraday, Kerze, S. 191. Jennifer (s.u.) hat das Zitat in ihren Text eingebaut. Ich habe wiederum Schülertexte aus drei Leistungsbereichen ausgewählt.

Kerze. Woher? Wohin?

Es war einmal ein Junge, der wollte wissen, woher die Kerze kommt und wohin sie geht. Da fiel ihm ein, dass sie erst gestern Kerzen gekauft hatten. Er holte die Packung und las: „Echtes Bienenwachs“. Sofort ging er zum Imker und fragte ihn, was das heißt. Der Imker antwortete: „Das liegt daran, dass die Bienen den Nektar in Drüsen zu Honig und Wachs machen. Dieser kommt in die Wabe, und wenn genug in der Wabe ist, schleudere ich sie. Unten kommt dann der Honig raus und man kann aus den Waben Kerzen machen. Weißt du, von was die Blumen den Nektar machen?“ „Nein, sagen Sie es mir bitte“, antwortete der Junge. „Also, was brauchen die Blumen zum Leben?“, fragte der Imker. „Luft, Sonne, Wasser und Erde!“ „Ganz genau. Aber weißt du auch, was mit der Kerze passiert?“ „Nein. Gut, dass Sie fragen. Ich hätte es nämlich fast vergessen, das zu fragen“, sagte der Junge. „Wenn die Kerze brennt, wird sie immer kleiner und das Wachs schmilzt, verbrennt es. Vielleicht bleibt auch mal ein kleiner Docht-Stummel übrig. Es entstehen zwei Gase: Wasserdampf und Kohlendioxid, das die Pflanzen zum Leben wieder brauchen“, erzählte der Imker. Wird dann durch die Pflanzen auf unserer Erde wieder zu frischer Luft. So entsteht ein ewiger Kreislauf, der durch die Sonne angetrieben wird.“ „Danke für die Information!“, ruft der Junge und hüpft aus dem Gartentürchen. „Tschüß!“, ruft der Imker und geht wieder an die Arbeit, aber da ist der Junge schon längst wieder weg.

Benjamin

Der Kerzenkreislauf

Die Pflanzen brauchen Licht und Wärme, kohlendioxidhaltige Luft, Erde und Wasser zum Leben. Die Bienen fliegen zu den Blumen, um sich den Nektar aus den Blumen zu holen und in den Höschen Pollen einzusammeln. Nun fliegen sie wieder zurück zur Wabe, die sie selbst mit dem Nektar gemacht haben, den sie auf dem Weg zur Wabe zu Honig verarbeiteten. Die Imker klauen den Bienen die Waben, schleudern den Honig aus und verkaufen sie an die Fabrik, die sie dann zu Kerzen macht. So und jetzt ist die Frage: „Wohin verschwindet eine brennende Kerze?“ Das feste Wachs wird durch die Hitze der Flamme flüssig und bildet einen Wachssee. Der Docht saugt sich mit dem flüssigen Wachs voll. Das Wachs wird dampfförmig. Es ist im Flammenzentrum. Das dampfförmige Wachs verbrennt und wird zuerst zu Ruß. Der Ruß ist ein Zwischenprodukt der Verbrennung. Der Ruß ist nur dort, wo es am hellsten leuchtet. Der Ruß macht, dass die Flamme leuchtet. Der Flammenmantel hockt wie ein Regenbogen über dem Flammenzentrum. Am Rand der Flamme ist der Ruß nicht mehr zu sehen. Er ist verschwunden. Aber bei der Verbrennung entsteht aus den Wasserstoffen, die in der Kerze schon drin waren, und aus dem Sauerstoff aus der Luft Wasser. Bei der Verbrennung der Kerze entsteht aus Kohlenstoff, das ist der Ruß, in der Flamme mit dem Sauerstoff aus der Luft zusammen Kohlendioxid. Dies nennen die Chemiker Pyrolyse, es ist ein griechisches Wort und bedeutet „Feuer-Scheidung“. Die „neuen“ Stoffverbindungen brauchen die Pflanzen zum Leben. Das Kohlendioxid atmen die Pflanzen ein und erzeugen bei dem Verarbeiten des Kohlendioxids Sauerstoff und Blätter, Äste und Früchte. Dies nennt man Photosynthese (das Wort ist ebenfalls ein gr. Wort und heißt „Licht-Verbindung“). So passiert es auch jede Sekunde auf der Erde. Das Kohlendioxid, was alle Lebewesen ausatmen und die Abgase der Fahrzeuge oder Flugzeuge werden von den Bäumen gereinigt. Wir machen es genau anders herum. Wir atmen Sauerstoff ein, den die Bäume ausgeatmet haben, und Kohlendioxid aus. Die Kerze macht es genau wie wir, nur dass sie verbrennt und wir atmen und verdauen. So verläuft der Kreislauf der Kerze. Michael Faraday hat es am Ende der Vorlesung so erklärt:

Und so sehen wir denn Alles sich regen zu dem einen großen Werke, die beiden lebendigen Reiche der Schöpfung einander dienstbar zu machen. Alle Bäume, Sträucher und Kräuter der Erde nehmen Kohlenstoff auf; sie nehmen ihn durch die Blätter aus der Luft, in die wir und alle Thiere ihn in Gestalt von Kohlenluft entsendet haben, und sie wachsen und gedeihen darin. Gebt ihnen ganz reine Luft, wie sie uns am dienlichsten ist – sie werden dahinwelken und absterben; gebt ihnen Kohlenluft, und sie werden wachsen und sich wohlbe finden. Alle Kohle im Holz und in den Pflanzen stammen aus der Atmosphäre, welche die Kohlenluft aufnimmt, die uns schädlich, jenen aber nützlich ist – was dem Einen den Tod brächte, dem Andern bringt es Leben. Und so sehen wir Menschen uns abhängig nicht nur von unseren Nebenmenschen, sondern abhängig von aller Mitkreatur, sehen uns mit dem All der Schöpfung zu einem großen Ganzen verbunden durch die Gesetze, nach denen jedes Glied zum Heile der anderen lebet und webet und schafft.

Jennifer

Dienstag, 20. Dezember, und Mittwoch, 21. Dezember, insgesamt drei Stunden

4. Schaffen, Abbilden, Aufräumen

Faradays Kerze nähert sich dem Ende. Von Anfang an habe ich mir vorgestellt, dass wir zuletzt Kerzen ziehen und das Lehrstück umfassend in einem Gemeinschaftsprodukt abbilden würden, wie Reichwein dies mit seinem „schaffenden Schulvolk“ noch viel deutlicher praktiziert hat – von dieser Arbeit würden alle am Ende eine DIN-A 3-Farbkopie erhalten, mit der sie ihr Kerzenheft einbinden, die sie aufhängen oder in ihr Heft einlegen können. Wie es ungefähr aussehen soll, habe ich gestern mit denjenigen überlegt, die ihren Aufsatz fertig gestellt hatten: Es soll ein Gemeinschaftsbild werden, an dem alle mitmalen können, die wollen. Ich habe nach den Vorstellungen der Kinder für heute das Plakat vorbereitet, indem ich Rahmen als „Platzhalter“ für die sieben „Mitspieler“ des Kreislaufs entsprechend der Größenverhältnisse vorgegeben habe: Für die vier brennenden Kerzen, einen Rußring, eine Kalkwasser- und eine „Feuerwasser“-Flasche, Platz für Pflanzen, Bienen und die Wabe. Alles soll im Kreis angeordnet werden, das Klassenfoto und ein Bild von Faraday sollen ins Zentrum des Kreises eingeklebt werden.

Zu Beginn des Unterrichts finden die Schülerinnen und Schüler einen Brief vor, den ich auf ihre Arbeitsplätze gelegt habe. Damit sollen die restlichen Arbeiten organisiert werden, die uns in den verbleibenden drei Schulstunden beschäftigen werden:

Liebe Klasse 5b

am Mittwoch endet unser Unterricht über Faradays Kerze. Einige Aufgaben sind noch zu erledigen, die ihr zum Teil an Stationen ausführen könnt. Sobald eine Station gerade frei ist, könnt ihr sie zu zweit besetzen. Die übrige Zeit arbeitet bitte an euren Plätzen – alleine oder zu zweit. Achtung: Teile dir die Zeit gut ein. Aufgaben 1 - 4 sind Pflicht, müssen aber nicht zuerst gemacht werden.

Aufgaben

1. Hinterlasse deinen Arbeitsplatz sauber. Entferne alle Wachsreste, reinige ein paar Porzellanschälchen oder Kerzenständer sowie ein paar Glasröhrchen. Die restlichen Streichhölzer ergänze mit anderen zusammen zu vollen Schachteln und gib alles wieder bei mir ab.
2. Vervollständige dein Heft. Es fehlen eventuell noch Versuchsbeschreibungen zum Kalkwasserversuch und zum Photosyntheseversuch. Achte darauf, dass die Zeichnungen vollständig sind, und ergänze gegebenenfalls. Zeichne zum Photosyntheseversuch die drei Flaschen mit Inhalt und beschrifte sie. Achtung: Eine Zeichnung unterstützt die Beschreibung, sie ersetzt sie nicht!
3. Markiere mit einem Sternchen die drei Versuchsbeschreibungen, die du beurteilt haben willst. Gib dein Heft am Mittwoch oder spätestens am Donnerstag in Religion ab.
4. Melde dich bei mir für ein Experiment an, das du am Elternabend vorführen willst. Manche Versuche müssen zu zweit oder dritt durchgeführt werden – besprecht das miteinander. Kläre mit mir, was du dazu brauchst. Ich helfe gerne, wenn du nochmals üben willst.
5. Du kannst heute und morgen in der ersten Stunde an einer der drei bereitgestellten Herdplatten eine Kerze ziehen. Achte darauf, dass das Wachs die richtige Temperatur hat (das Wachs muss dickflüssig sein). Dochte liegen in einem Kästchen neben den Herdplatten.
6. Du kannst heute und morgen in der ersten Stunde einen Kerzenständer in Porzellan gießen. Die genaue Anleitung liegt auf dem Materialtisch. Sprich dich mit fünf Kindern ab, wann ihr gießen wollt, die Anleitung gilt für sechs Kerzenständer. Beachtet die Trockendauer. Sobald der Ständer ganz durchgetrocknet ist (24 Stunden), kann er bemalt werden (Wasserfarben). Wir können uns am Donnerstag in der zweiten großen Pause vor der Kunstscheune zum Lackieren treffen. Trag dich in die beiliegende Liste ein, wenn du kommen willst.
7. Du kannst an unserem Plakat malen. Wir stellen es während der Schulweihnachtsfeier am Freitag in der Aula aus. Arbeite also sehr sorgfältig daran. Besonders gute Zeichner sollten sich an die schwierige Aufgabe heranwagen, eine Biene, die Wabe oder eine Pflanze zu zeichnen. Du findest Bücher vor mit Abbildungen zur Anregung. Wenn du eine Kerze zeichnen willst, orientiere dich noch einmal an einer brennenden Flamme. Achtung: Geh sorgsam mit dem Plakat um, es ist unser Original! Zeichne ausschließlich mit Buntstiften und drück nicht zu fest auf! Möglichst alle sollten sich am Zeichnen beteiligen. Sprecht euch also gut ab, wer was macht.
8. Du kannst eine Kurzbeschreibung am Notebook tippen, die auf das Plakat geklebt werden soll. Die besten Beschreibungen werden ausgesucht. Diese beiliegende Liste muss möglichst rasch vollständig werden, damit ich weiß, in welcher Reihenfolge der Computer besetzt werden kann.

Viel Erfolg wünscht euch Susanne Wildhirt

Der Brief wird in Ruhe durchgelesen, wir klären offene Fragen und dann geht's los. Am Ende der drei Stunden haben alle eine eigene Kerze gezogen, die Tische sind geputzt, der Boden gekehrt und die Wachsflecken entfernt. Auch das Plakat ist rechtzeitig fertig geworden. Eine Jungengruppe hat das Layout übernommen. Ich bin froh, dass wir alles geschafft haben, denn die vermeintlich letzte Doppelstunde am Donnerstag ist Schüler-Vollversammlung, und wir hätten keinen zeitlichen Spielraum mehr vor unserem Elternabend.



Abbildung 17: Denkbild malen



Abbildung 18: Kerzen ziehen

Donnerstagabend, 22. Dezember

Finale. Unsere Weihnachtsvorlesung

Unser Elternabend findet im Foyer statt. Nicht nur Eltern sind gekommen, auch Geschwister, Tanten, einige Großeltern und ein Hund. Insgesamt sind wir 72 Personen. Ein Novum am GyMi. In der Mitte stehen sechs Tische aneinander gerückt, darauf steht alles, was wir heute Abend brauchen werden. Die Angehörigen sitzen im Umkreis an kleineren Tischen, darauf stehen Gebäck und Teekannen. Jeder hat selbst einen Becher mitgebracht. An den Wänden hängen die großformatigen Kerzenbilder und Plakate mit Fotos aus dem Unterricht zur Nachbestellung.



Abbildung 19
Links: Anna-Sophia „Faraday“, rechts Maik

Anna-Sophia hat als Michael Faraday den Konfirmationsanzug ihres Bruders an, die Haare sind nach hinten gestylt, die Fliege ragt unter dem Jackett hervor. In ihren Händen hält sie ihr Kerzenheft, das sie durch den Abend leitet. Zu jedem Versuch hat sie mit Bleistift die Namen jener Mitschülerinnen und -schüler notiert, die das Experiment demonstrieren. Sie eröffnet die Show mit Faradays Eingangszitat. Es folgt Maik, der anhand unseres Plakats einen Überblick über den Kerzenkreislauf gibt, anschließend leitet er über zu den einzelnen Experimenten. Nach jedem Akt gibt es eine kleine Zwischenmusik der Kinder mit Geigen und Flöten.

Einige Details des Abends möchte ich erwähnen:

Clemens ist mit einem riesigen gläsernen Gurkenglas erschienen. Es ist sehr schwer und größer als jedes bis dahin gesichtete Becherglas. Seine Aufgabe ist es, das Ersticken der Flamme vorzuführen. Es ist mäuschenstill, während er den unspektakulären Versuch zeigt. Alle starren gebannt auf die kleiner werdende Flamme, es wird ganz allmählich dunkler im Raum, bis zuletzt gar nichts mehr zu sehen ist (außer das beleuchtete Schild für den Notausgang).

Benjamin ist extra zum Frisör gegangen, um seine Haare ganz kurz schneiden zu lassen. Er war zu sehr besorgt, dass sein Aluminium-Feuerwerk die Haare versengen könnte. Mit einer Sonnenbrille „bewaffnet“ führt er das Experiment durch.



Abbildung 20
Benjamins Feuerwerk

Nach dem letzten Experiment wage ich es, mit allen gemeinsam den Kanon: „Mache dich auf und werde Licht“ einzustudieren. Es klappt sogar vierstimmig und will gar nicht mehr enden. Zuletzt ergreift Anna-Faraday noch einmal das Wort und zitiert Faradays Schlussworte, die sie gründlich vorzulesen geübt hat: „Und so wünsche ich euch denn zum Schluss unserer Vorlesung, dass Ihr Euer Leben lang den Vergleich mit einer Kerze bestehen möget, dass Ihr wie sie eine Leuchte sein möget für Eure Umgebung, dass Ihr in allen Euren Handlungen die Schönheit einer Kerzenflamme widerspiegeln möget, dass Ihr in treuer Pflichterfüllung Schönes, Gutes und Edles wirket für die Menschheit.“⁵⁶

3.4.3 „Und das Beste war, dass sie sich wieder treffen.“ Ein Feedback nach drei Monaten

Wir hatten vor den Weihnachtsferien nicht mehr die Zeit, gemeinsam Rückschau zu halten. Da mich die Frage der Nachhaltigkeit von Lehrstücken interessiert, hole ich drei Monate später ein Feedback ein, in dem Gelegenheit gegeben ist, sich individuell zu äußern. So kann ich dem Lernprozess nochmals nachgehen und das Wichtigste aufschreiben. Der Feedback-Bogen nach Brünger⁵⁷ bietet den Vorteil einer sehr differenzierten Rückmeldung, lässt sich tabellarisch darstellen und sowohl bilanzierend als auch in Einzelaussagen auswerten. Ich habe das Verfahren aufgegriffen und leicht variiert, um herauszufinden, was die Schülerinnen und Schüler am deutlichsten in Erinnerung behalten haben.

(1) Zunächst erfolgt eine freie Assoziation ohne inhaltliche Vorgaben. Am 22. März 2005 bitte ich die Klasse, innerhalb kürzester Zeit (fünf Minuten) alle Stichworte zum Kerzenunterricht aufzuschreiben, die ihnen in den Sinn kommen, kombiniert mit einer Beobachtung, einem weiteren Stichwort, einer kurzen Erklärung oder einer Fragestellung. Ich gebe den Kindern drei Beispiele aus anderem Zusammenhang als Modell:

Seeigel – Wirbelloses Tier (zuordnen)
Bauchatmung – So atmen Sänger (erklären)
Kiemen – Wie atmen Fische? (eine Frage beantworten)

Stichworte, die ohne Kontext genannt werden, bleiben unberücksichtigt. Alle Paarungen, die von mindestens fünf Kindern genannt wurden, sind in die Tabelle aufgenommen. Die Erwähnung in der Tabelle folgt dem Unterrichtsaufbau. Grau unterlegt sind Experimente oder Phä-

⁵⁶ Faraday, Kerze, S. 195

⁵⁷ Brünger 2005, S. 56ff

nomene, aus denen die Sogfrage für die nachfolgende Unterrichtssequenz resultiert. In der folgenden Tabelle ist das Ergebnis dargestellt:

Stichwort – Zuordnung zu einem Themenkreis	Häufigkeit	Zuordnung
Kerze – woher kommt sie?	21	Ouvertüre
Kerze zeichnen – sieht anders aus als gedacht/ist leicht/Flammenzentrum fehlt	5	
Michael Faraday – Forscher/Lehrer/ Weihnachtsvorlesung	16	
Flammensprung – weißer Wachsdampf/Brennstoff/gasförmiges Wachs	14	I. Akt
Wachstopf – Flammenmeer/gasförmiges Wachs brennt/Sorge, die Schule brennt/Dampf steigt hoch/lässt sich anzünden	5	
Wachs brennt – nicht der Docht/Docht oder Wachs?/Brennstoff	23	
Docht – brennt nicht/glüht/kein Brennstoff/hält die Flamme	10	
In die Flamme schauen – Flamme ist (innen) hohl, Schale, Wachsdampf entweicht	9	
Dampf – lässt sich sammeln/kann mitten aus der Flamme geleitet werden	11	
Ruß – leuchtet/ist schwarz/in der Flamme/Zwischenprodukt der Verbrennung	20	II Akt
Luftstrom/heiße Luft/Sauerstoff – braucht die Flamme zum Brennen/strömt/um die Flamme herum	18	
Aluminium/Kupfer/Feuerwerk – grell/grün/verschiedene Farben	5	
Wasser/“Feuer“-Wasser – aus der Flamme/Verbrennungsprodukt/entsteht	12	
Kerze – verbraucht Sauerstoff/verbrauchte Luft/ähnlich Mensch	9	
Pflanzen – Gegenspieler zur Kerze/stellen Sauerstoff her/reinigen die Luft/Gleichgewicht/Photosynthese	11	III. Akt
(Kerzen-) Kreislauf/Stoffkreislauf/Kreis bauen – Immer/braucht Pflanzen/Sonne/immer so/geben und nehmen	14	
Schluss – Plakat malen/am Computer schreiben/Kerzen	7	
Elternabend – Experimente/Aufführung/mit Faraday/Demonstration/Aufregung	15	Finale

Auswertung. Aus allen fünf Bereichen werden Unterrichtssequenzen erinnert. Nahezu alle Beobachtungen werden im Kontext erwähnt. Daraus kann man schließen, dass die Unterrichtseinheit gesamthaft in Erinnerung geblieben ist. Auffällig ist, dass fast die ganze Klasse die Eröffnungsszene („Woher kommt die Kerze?“) vergegenwärtigt. Dies spricht eindeutig für diese Ouvertüre. 23 bzw. 20 der 25 Kinder⁵⁸ erwähnen außerdem die zentralen Fragestellungen bzw. Eröffnungsszenen des zweiten bzw. dritten Aktes. Demgegenüber fallen die 11 Erwähnungen der Photosynthese als Gegenüber der Pyrolyse, der zentralen Erkenntnis des dritten Aktes, deutlich ab. Ich vermute, dass die Ursache in der Vorgabe des Photosynthese-Versuches liegt. Hier gab es keine explizite bzw. prägnant herausgearbeitete Fragestellung (etwa: „Welche Bedeutung haben die Pflanzen für das Brennen der Kerze?“). Hingegen findet der selbst gefundene Kerzenkreislauf ebenso häufige Erwähnung wie der Flammensprung (14), Faradays spannendes Eingangsexperiment. Und: Beide Versuche werden nahezu so häufig genannt wie der Elternabend (15). Insgesamt bestätigt die Tabelle meinen Eindruck von der inneren Logik (dem „roten Faden“) des Lehrstückaufbaus, da keine „Ausfälle“ (Nichterwähnung) zentraler Themenbereiche zu verzeichnen sind.

⁵⁸ Ein Kind ist dauerhaft erkrankt und hat nicht an der Auswertung teilgenommen.

(2) Im zweiten Schritt vergegenwärtigen wir uns den Erkenntnisprozess. Aus den Äußerungen der Schülerinnen und Schüler stelle ich den Feedback-Bogen zusammen, der am darauf folgenden Tag ausgefüllt wird (20 Minuten Zeit). Der Bogen ist so aufgebaut, dass die Möglichkeit besteht, eigene Bemerkungen, Anregungen und Kommentare einzubringen. Am Ende ist Platz für ein generelles Feedback und sonstige Meinungen, die in den anderen Feldern nicht untergebracht werden können. Das Feedback ist tabellarisch dargestellt.⁵⁹

Faradays Kerze <i>Bemerkungen und Anregungen der Klasse 5d</i>	
<p>Erste Begegnungen mit der Kerze</p> <p>Wir haben uns überlegt, woher die Kerzen kommen und wohin sie verschwinden, wenn sie verbrennen. Wir haben eine Kerze aus der Erinnerung gezeichnet und den Forscher Michael Faraday kennen gelernt.</p> <p><i>Ich fand das Projekt sehr interessant, weil ich viel gelernt habe. Ich hätte mir früher nie so richtige Gedanken gemacht, wohin die Kerze verschwindet. Aber was ist der Brennstoff der Kerze? In der Projektzeit wurde mir viel klar.</i></p> <p>1. Was brennt: Der Docht oder das Wachs? – Die physikalische Kerze</p> <p>Wir haben ein erstes Experiment Faradays durchgeführt – den Flammensprung – und nach dem Brennstoff der Kerze gefragt. Der Docht schied aus und wir haben die Spur des Wachses verfolgt. Dabei haben wir festgestellt, dass festes und flüssiges Wachs nicht brennen können, sondern nur dampfförmiges Wachs – erinnere dich an das Flammenmeer. Ein Blick ins Innere der Flamme zeigt, dass sie hohl ist und Wachs Dampf enthält, den man auf einem Gitter anzünden kann, so dass eine Flammenspitze darauf tanzen kann. Der Wachs Dampf lässt sich sogar ableiten und sammeln. – Aber dies alles nur, wenn die Kerze brennt. Wenn sie keine Frischluft hat, erstickt sie.</p> <p><i>Die Flamme wird vom Docht aufrecht gehalten. Der Docht steigt sich mit den flüssigen Wachs voll und das flüssige Wachs entswickelt sich dann zu dampfförmiges Wachs. Ich fand das toll, weil ich immer gedacht habe, das der Docht brennt und nicht das Wachs.</i></p> <p>2. Was passiert in der Flamme? – Die chemische Kerze</p> <p>Eine Flamme enthält Ruß (Kohlenstoff). Das stellen wir fest, wenn wir einen Gegenstand in die Flamme halten. Er färbt sich schwarz. Wir haben ihn sogar als Schatten im starken Licht einer Projektorlampe an der Flammenspitze gesehen, ihn abgekratzt und in eine nicht-leuchtende Flamme gepustet: Sie färbt sich genauso wie die Kerzenflamme. Außerhalb der Flamme ist hingegen kein Ruß. Er stammt ursprünglich aus der Kerze, obwohl diese nicht schwarz ist, er ist kurzzeitig da und verglüht schließlich, heiß und leuchtend, mitten im Feuer. Nichts bleibt?</p> <p><i>Der Ruß entsteht in der Flamme. Nämlich es entsteht vom verbrennen des dampfförmigen Wachs. Der Ruß hockt dann wie ein Regenbogen auf das dampfförmige Wachs. Ich konnte mir nicht vorstellen, das aus etwas Nichts werden kann. Mir gefiel die chemische Kerze.</i></p> <p>– Doch. Wir haben gesehen, dass über der Flamme ein Glas beschlägt und sich dort heiße Luftwirbel bilden. Mit einer Wasserstrahlpumpe haben wir bei der Verbrennung entstandenes Wasser und Kohlendioxid nachgewiesen. Darüber haben wir lange nachgedacht: Wasserstoff und Kohlenstoff („Rußstoff“) müssen in der Kerze Partner sein. Im Feuer scheiden sich die beiden und suchen sich jeweils einen neuen Partner – den Sauerstoff. Beide verschwinden mit ihrem neuen Partner und ganz anderen Eigenschaften in die Luft und heißen Kohlendioxid</p>	<p>und Wasser. Das nennt man „Feüerscheidung“ (Pyrolyse). Und: Wir Menschen „verbrennen“ langsam die Kohlenwasserstoffe unserer Nahrung mithilfe des Sauerstoffs und atmen dabei ebenfalls Wasser und Kohlendioxid aus.</p> <p><i>Bei der chemischen Kerze habe ich auch andere Wörter kennen gelernt wie zum Beispiel das Wort Pyrolyse. Ich fand es toll mal dem Schatten der Flamme der Kerze zu sehen und das in einer kleinen Flamme so viel passiert hätte ich nicht gedacht.</i></p> <p>3. Kerze: Wohin – woher? – Die ökologische Kerze</p> <p>Am Ende haben wir uns überlegt, dass die Pflanzen, die ja Sauerstoff bilden (das wusste jede und jeder von euch), das Wasser aus der Kerze brauchen und ebenso die „verbrauchte“ Kerzenluft. Also machen die Pflanzen genau das Gegenteil von Kerzen und Menschen und Tieren: Mithilfe des Sonnenlichts verbinden sich Wasserstoff und Kohlenstoff aus dem Wasser und dem Kohlendioxid miteinander (Photosynthese) zu Kohlenwasserstoffen, die die Pflanzen zum Wachsen und Leben brauchen. Dabei scheiden sie frischen Sauerstoff aus. Die Kerze befindet sich also mitten in einem Kreislauf des Gebens und Nehmens, in dem nichts verloren geht.</p> <p><i>Das man von einer Kerze Wasser sammeln kann hätte ich nie im Leben gedacht, weil ja Feuer von Wasser gelöscht wird. Ichja, früher hatte ich gedacht, was es an der Flamme blau ist, ist es am heißesten.</i></p> <p>Finale</p> <p>Wir haben ein gemeinsames Plakat zur Erinnerung gemalt, und jeder hat es in sein Heft gezeichnet. Jeder hat eine Kerze gezogen. Zuletzt haben wir die Eltern eingeladen und ihnen „Faradays Kerze“ präsentiert. Mancher hat den Eltern den selbst gegossenen Kerzenständer und die eigene Kerze geschenkt.</p> <p><i>Mir hat es Spaß gemacht eine Kerze selber zu machen, die ich auch mit Eltern geschenkt habe. Den Abend fand ich sehr schön. Die Weihnachtslieder mitzubringen fand ich eine gute Idee.</i></p> <p>Platz für weitere Bemerkungen und Anregungen. Was war dir an dieser Unterrichtseinheit besonders wichtig? Was war besonders lehrreich?</p> <p><i>Mir hat der Unterricht sehr gut gefallen. Ich finde es sehr gut, das wir für jede Frage durch Experimente antworten und neue Fragen zuordnen hatten.</i></p> <p style="text-align: right;">Vielen Dank!</p>

⁵⁹ Orthographie- und Zeichensetzungsfehler sind in der Tabelle korrigiert.

Name	Ouvertüre	I. Akt: Was brennt?	II. Akt: Was passiert in der Flamme?		III. Akt: Kerze: Wohin – woher?	Finale	Weitere Bemerkungen und Anregungen
			Zwischenprodukt Ruß	Endprodukte Wasser/ Kohlendioxid			
Jennifer	Ich fand das Projekt sehr interessant, weil ich viel gelernt habe. Ich hatte mir früher nie so richtige Gedanken gemacht, wohin die Kerze verschwindet oder was der Brennstoff der Kerze ist. In der Projektzeit wurde mir viel klar.	Die Flamme wird vom Docht aufrecht gehalten. Der Docht saugt sich mit dem flüssigen Wachs voll und das flüssige Wachs entwickelt sich dann zu dampfförmigem Wachs. Weil ich immer gedacht habe, dass der Docht brennt und nicht das Wachs.	Der Ruß entsteht in der Flamme. Nämlich es entsteht vom Verbrennen des dampfförmigen Wachses. Der Ruß hockt dann wie ein Regenbogen auf dem dampfförmigen Wachs. Ich konnte mir nicht vorstellen, dass aus etwas nichts werden kann. Mir gefiel die chemische Kerze.	Bei der chemischen Kerze habe ich auch andere Wörter kennen gelernt wie zum Beispiel das Wort Pyrolyse. Ich fand es toll, mal den Schatten der Flamme der Kerze zu sehen, und dass in einer kleinen Flamme so viel passiert, hätte ich nicht gedacht.	Dass man von einer Kerze Wasser sammeln kann, hätte ich nie im Leben gedacht, weil ja Feuer von Wasser gelöscht wird. Ach ja, früher hätte ich gedacht, wo es an der Flamme blau ist, ist es am heißesten.	Mir hat es Spaß gemacht, eine Kerze selber zu machen, die ich auch meinen Eltern geschenkt habe. Den Abend fand ich sehr schön. Die Weihnachtslieder mit rein zu bringen fand ich eine gute Idee.	Mir hat der Unterricht sehr gut gefallen. Ich finde es sehr gut, dass wir für jede Frage durch Experimente antworten und neue Fragen gefunden hatten.
Anonym A	Ich fand das Thema sehr gut, weil es Spaß gemacht hat, alles zu erforschen und ganz viel über die Kerze zu wissen.	Die Experimente haben mir sehr gefallen.	Der Ruß färbt die Sachen schwarz. Es bleibt nichts übrig.	Kohlenstoff und Wasserstoff sind in der Kerze zusammen. Wasserstoff und Sauerstoff ergibt Kohlendioxid.	Wir Menschen atmen Sauerstoff von Pflanzen und Bäumen ein. Aber die Kerze (erg. macht) genau das Gegenteil (erg. wie die Kerze).	Ich fand die Kerzenführung sehr schön, weil auch andere Leute über die Kerze lernen konnten.	Besonders lehrreich fand ich, dass wir ein bisschen über die Natur gelernt haben und über die Kerze
Anonym B	Das fand ich sehr interessant und vor allem habe ich viel darüber gelernt. Die Hauptsache war aber: Ich hatte sehr viel Spaß dabei.	Wir haben lange herumgerätselt, ob das Wachs oder der Docht brennt. Das war ziemlich spannend.	Da haben wir uns auch sehr lange gefragt: Wo geht eigentlich der Ruß hin? Dann sind wir aber zu der Schlussfolgerung gekommen: Er verflüht einfach. Da war auf jeden Fall sehr viel Prickelndes dabei.	Da musste man sich sehr viel merken und da konnte man sehr schnell alles durcheinander bringen. Auf jeden Fall hat es Spaß gemacht.	Dazu gibt es wenig zu sagen. Es hat auf jeden Fall viel Spaß gemacht.	Das Experiment hat sehr sehr viel Spaß gemacht.	Es war mir besonders wichtig, viel Spaß zu haben. Ich fand eigentlich alles sehr lehrreich. Dass wir so viel gelernt haben, dass verdanken wir alles unserer sehr organisierten und sehr netten Lehrerin.
Anonym C	Faraday hat uns bei der Kerze sehr gut am Anfang geholfen. Das fand ich toll.	Das fand ich sehr lehrreich und es wurde nie langweilig.	Der Ruß ist am Flammenmantel, und wenn man die Flamme bewegt, rußt sie.	Die Pflanzen und Bäume atmen Kohlendioxid ein und Sauerstoff aus, sonst würden wir ersticken. Deshalb haben wir auch immer wieder Sauerstoff zum Einatmen.	Die Sache fand ich nicht so gut, weil es ein bisschen kompliziert war.	Das Kerzenziehen war sehr gut und sie hat auch gut gebrannt.	Es war gut, dass die Stunden Deutsch und Bio dazu genutzt wurden. Es hat mir auch wegen Cemres Sticheflamme sehr viel für die Regel: „Mit Feuer spielt man nicht“ gebracht.

Name	Ouverture	I. Akt: Was brennt?	II. Akt: Was passiert in der Flamme?		III. Akt: Kerze: Wohin – woher?	Finale	Weitere Bemerkungen und Anregungen
			Zwischenprodukt Russ	Endprodukte Wasser/ Kohlendioxid			
Henniette	Wir haben die Zeit gestoppt, wie lang eine kurze Kerze brennt, bis sie unten am Ständer erlischt.	Die drei Versuche fand ich sehr interessant.	Diesen Versuch mit dem Diaprojektor habe ich nicht ganz verstanden.	Bei dem Versuch mit der Wasserstrahlpumpe wurde mir nicht ganz klar, was man da lernen sollte.	Den Kreislauf fand ich das beste bei der Kerze. Es wunderte mich, dass die Kerze auch in einem Kreislauf ist.	Das Kerzenziehen hat Spaß gemacht. Aber auch den Kerzenständer (erg. zu) ziehen hat Spaß gemacht.	Ich fand den Kerzenkreislauf am lehrreichsten. Aber alles hat mir viel Spaß gemacht.
Laura	Wir haben die Zeit gestoppt, wie lang eine 3 cm lange Kerze verbrennt.	Bei dem Flammenmeer hatte ich das Gefühl, dass etwas verbrennen könnte. Diese Versuche fand ich sehr interessant.	Wir haben auch Eisenspäne, Aluminium und Kupfer in die nicht-leuchtende Flamme gepustet.	Ich war bei dem Versuch nicht da, aber ich finde ihn interessant.	Wir haben diesen Kreislauf aufgestellt und dazu unsere Versuchsbilder hingelegt.	Ich hatte Angst, dass ich etwas Falsches sage.	Es hat Spaß gemacht.
Cemre	Er (erg. Faraday) hat uns alles über die Kerze beigebracht. Er hat mit uns fast drei Wochen lang gearbeitet und uns über seine Abenteuer erzählt. Es war schön, ihn kennen zu lernen.	Sie (die Kerze) braucht Sauerstoff, um brennen zu können. Man darf sie nicht ersticken. Jeder braucht Sauerstoff, auch wir Menschen.	Der Ruß kommt aus der Kerze, weil der Wachs dampf sich in Ruß verwandelt und unsichtbar weg geht.	Wenn wir ans Fenster ausatmen, dann beschlägt es auch. Wir sind wie eine Kerze, wir verbrennen, und darum ist es nicht so kalt für uns. Wir brauchen Sauerstoff zum Atmen.	Die Kerze verbrennt und macht noch eine Runde im Kreislauf. So können wieder neue entstehen	Manche, z.B. ich habe mein Finger verbrannt und es hat mir aber noch Spaß gemacht und manche Kinder hatten Angst, weil sie die Treppe alleine im dunklen Gebäude hoch gehen wieder wegzubringen.	Es war gut, dass Sie Bto und Deutsch zusammen getan haben. Darum haben wir nicht so viel aufbekommen.
Asli	Ich fand es ganz gut, es hat mir auch sehr Spaß gemacht. Weil ich ja auch vieles über Faraday gelernt habe und über die Kerze	Ich fand den Flammen-sprung sehr gut, und als ich es auch meinen Eltern vorgeführt habe, waren sie sehr überrascht, und dies fand ich deshalb gut. Und davor, als wir nicht wussten, dass gasförmiges Wachs brennt, habe ich es gar nicht gedacht, dass es so ist. Der Flammentanz sah sehr schön aus.	Dieses Experiment sieht ganz unglaublich aus, aber wenn man es weiss, dann kommt es einem ganz normal vor.	Als erstes habe ich es nicht so ganz kapiert, aber danach ist mir das klar geworden. Ich hatte das Ganze gar nicht gewusst und bin sehr glücklich, dass ich das alles gelernt habe.	Also ich fand das sehr interessant.	Das mit dem Kerzenziehen und mit dem Plakat hat sauuviel Spaß gemacht. Und ich war ein bisschen traurig, dass wir schon mit dem Thema fertig waren. Und ich konnte an dem Abend, wo wir alles vorgeführt haben, nicht dabei sein, und das fand ich traurig.	Mir war sehr wichtig, dass ich alles kapierte und gut mitmachen konnte und auch viel lerne, und das habe ich auch erreicht. Aber ich habe mich nicht so oft gemeldet, das fand ich schade, weil ich mir meistens unsicher war. Ansonsten hat mir das sehr viel Spaß gemacht. Ich hätte nie gedacht, dass ich mal so viel Interessantes über die Kerze lerne.

Name	Ouvertüre	I. Akt: Was brennt?	II. Akt: Was passiert in der Flamme?		III. Akt: Kerze: Wohin – woher?	Finale	Weitere Bemerkungen und Anregungen
			Zwischenprodukt Russ	Endprodukte Wasser/ Kohlendioxid			
Jana	Von Faraday haben wir viel gelernt. Das fand ich toll.	Das Flammenmeer fand ich besonders spannend.	Wo wir den Ruß in die Flamme gepustet haben, fand ich sehr gut.	Diese Versuche haben sehr viel Spaß gemacht.	Ich fand es toll.	Der Abend war Spitze.	Zum Schluss war die Zeit fast zu knapp. Die Versuche waren interessant und lehrreich.
Nadine	Gut war das Ganze. Es hat mir alles super toll gefallen. Nur vielleicht etwas genauer erklären, woher die Kerze kommt. Und beim Faraday habe ich mir nicht alles behalten können.	Sehr, sehr super, super gut war das Herausfinden, „was brennt, der Docht oder das Wachs?“ Da vielleicht noch etwas genauer erklären.	Gefiel mir gut. Nur das mit dem Ruß, er ist da, dann wieder nicht, das war etwas kompliziert. Die Chemie fand ich nicht so interessant.	Diese Versuche waren schwer, denn man hat sie dauernd verwechselt, den Kohlenstoff, den Wasserstoff und den Sauerstoff. Sonst fand ich es so naja gut, weil es auch schwierig war zu kapieren.	Es war sehr gut und spannend, wie lange die Kerze jeweils brennt. Es war gut zu verstehen.	Sehr, sehr, sehr, sehr, sehr super gut, mit dem Kerzenziehen, Plakat malen und natürlich der Kerzenständer. Was ganz toll war, war der Elternabend und was wir vorgeführt haben.	Was ich am besten von allem fand, wie man mit der Kerze so viele tolle, spannende und aufregende Versuche machen kann. Was lehrreich war: Warum das gasförmige Wachs brennt und warum die Kerze im Glas brennt und warum die Kerze....
Anna-Sophia	Ich fand das Zeichnen der Kerze und vor allem das Beobachten sehr interessant. Es hat mir sehr viel Spaß gemacht. Ich fand das Aufsatz-Schreiben über Michael Faraday etwas langweilig, aber als ich dann mehr über ihn wusste, war es irgendwie auch interessant. Lustig fand ich immer das mit der Fliege an Faraday.	Das Experiment „der Flammensprung“ fand ich sehr interessant. Ich habe mich zuhause schon immer gefragt, wie das funktioniert. „Brennt der Docht oder das Wachs?“ Das herauszufinden hat mir sehr, sehr viel Spaß gemacht.	Dass, wenn man einen Gegenstand in die Flamme hält, er rußt, habe ich schon gemerkt, aber warum, habe ich mich noch nie gefragt. Es ist doch ein WAHNSINN, genau, dort, wo es am hellsten in der Flamme ist, ist der schwarze, dunkle Ruß! Herauszufinden, wie das sein kann, war sehr interessant.	Ich konnte es erst nicht glauben, dass aus der Kerze Wasser kommt. Aber als wir dann das Wasser gesammelt haben und festgestellt haben, dass es Wasserstoff gewesen ist, konnte ich es mir schon besser vorstellen. Es hat mir Spaß gemacht.	Auch wenn ich schon viel davon wusste, hat es mir Spaß gemacht.	Das Plakat zu malen hat mir sehr viel Spaß gemacht. Es hat alles, was wir über die Kerze gelernt haben, noch mal zusammengefasst. Das Kerzenziehen hat mir auch richtig viel Spaß gemacht. Als wir die Eltern eingeladen haben, um alles, was wir gelernt haben, zu präsentieren, war es lustig und gemütlich, mit allen Freundinnen noch mal zusammen zu sitzen. Meine Eltern haben sich sehr über den Kerzenständer und die selbst gemachten Kerzen zu Weihnachten gefreut.	Ich habe nichts aussetzen, es war alles sehr lehrreich. Wenn ich jetzt eine Kerze angucke, betrachte ich sie anders als vorher, ich weiß genau, was bei der Verbrennung passiert.... Ich fand das Projekt lustig und lehrreich.

Name	Ouvertüre	I. Akt: Was brennt?	II. Akt: Was passiert in der Flamme?		III. Akt: Kerze: Wohin – woher?	Finale	Weitere Bemerkungen und Anregungen
			Zwischenprodukt Ruß	Endprodukte Wasser/ Kohlendioxid			
Christopher	Ich fand den Unterricht gut, denn wir haben viel über Michael Faraday gelernt. Wir haben uns mit seinem ganzen Leben beschäftigt, das fand ich gut.	Auch diese Stunden fand ich schön, denn früher dachte ich, dass der Docht brennt.	Diese Stunde fand ich echt gut.	Diese Stunde fand ich nicht so toll.	Diese Stunde fand ich ein bisschen gut.	Das fand ich am tollsten!!! Es hat Spaß gemacht, die Kerzen zu ziehen. Aber die Idee, die Eltern einzuladen, war am besten.	Es war eine sehr gute Idee, in der Adventszeit sich mit Kerzen zu beschäftigen. Ich hätte nie gedacht, dass man aus einer Kerze so viel lernen kann.
Anne	Ich fand es sehr interessant, als wir erfahren haben, wie die Kerze entsteht und wohin sie geht. Die Kerze zu zeichnen fand ich etwas schwierig, weil ich vorher nicht darauf geachtet habe.	Den Flammensprung fand ich super, und auch das Flammenmeer hat mich sehr fasziniert. Der Blick in die Flamme war eines meiner Lieblingsexperimente.	Den Versuch mit dem Diaprojektor fand ich toll. Das Experiment mit dem Bunsenbrenner war mein absolutes Lieblingsexperiment.	Diesen Versuch fand ich nicht so interessant. Aber lehrreich war er trotzdem.	Diese Stelle fand ich super lehrreich.	Das Plakatmalen war toll, aber ich fand es unfair, dass Melis die Überschrift nochmal etwas kleiner geschrieben hat. Ich fand nämlich, dass es davor schöner aussah (ich will mich nicht selbst loben, aber ich fand es wirklich!)	Besonders wichtig fand ich, dass man leise und aufmerksam war und das hat, finde ich, auch super geklappt. Lehrreich fand ich eigentlich alles. Vielen Dank, dass Sie so etwas Spannendes und Aufregendes mit uns gemacht haben.
Natalie	Ich fand es gut, dass wir uns mit der Kerze beschäftigt haben. Früher fand ich eine Kerze unbedeutend, und jetzt weiß ich, wie es wirklich ist. Sie ist spannend.	Wenn man eine brennende Kerze auspustet und ein brennendes Streichholz in den Dampf hält, geht die Kerze wieder an. Der Dampf ist wie eine Zündschur. Mir hat das Experiment gut gefallen.	Der Ruß befindet sich in der Kerze. Wenn er verbrennt, dann leuchtet er. Er befindet sich im Flammenmantel der Kerze. Mich hat die chemische Kerze auch interessiert.	Wir Menschen sind so ähnlich wie eine Kerze, wir verbrennen unsere Nahrung. Bei der Kerze heißt es Verbrennung und bei uns Menschen atmen Sauerstoff aus und Kohlendioxid ein, bei uns Menschen und bei der Kerze ist es andersherum.	Die Kerze entsteht von den Bienen, weil die Bienen das Kerzenwachs herstellen. Ich fand das interessant, wie alles zusammenhängt.	Wir haben alle Experimente den Eltern vorgeführt, die wir in der Schule gemacht haben. Ich habe die selbst gemachte Kerze meiner Mama und meinem Vater zu Weihnachten geschenkt. Mir hat's Spaß gemacht, die Kerze zu machen. Ich fand den Abend schön.	Ich fand es sehr gut, weil ich mit viel Spaß lernen konnte. Ich fand es gut, dass wir Experimente durchgeführt haben, das hat mir viel Spaß gemacht. Ich habe sehr viel über die Kerze gelernt. Ich fand den Unterricht toll.
Melis		Den Flammensprung fand ich voll cool! Weil es unser erster Versuch war, aber es gab Interessantes!	Bei diesem Versuch habe ich das mit dem Kohlenstoff nicht so gut kapiert. Jetzt weiß ich, was in der Wunderkerze brennt.	Diesen Versuch fand ich voll interessant.	Diesen Versuch fand ich gut.	Das Kerzenziehen hat mir am meisten Spaß gemacht.	Was ich nicht so gut fand: Wenn wir die Versuche nicht selber machen konnten. Was mir besonders wichtig war, dass ich bei allem mitkam. Vielen Dank!

Name	Ouvertüre	I. Akt: Was brennt?	II. Akt: Was passiert in der Flamme?		III. Akt: Kerze: Wohin – woher?	Finale	Weitere Bemerkungen und Anregungen
			Zwischenprodukt Ruß	Endprodukte Wasser/ Kohlendioxid			
Clemens	Ich habe viel über die Kerze erfahren.	Wir haben ein Glas über die Kerze getan und nach kurzer Zeit war der Sauerstoff aufgebraucht und die Kerze ging aus. Der Doch alleine brennt nicht und das kalte Wachs brennt auch nicht, nur zusammen brennen sie schön.	Ich fand interessant, wie wir den Ruß gesammelt hatten.	Es hat viel Spaß gemacht, wie wir das Wasser gesammelt haben.	Es war interessant, wie die Kerze so lange gebrannt hat in der Flasche mit den Pflanzen.	Es war richtig schön, den Eltern unsere Experimente vorzuführen	Aber manchmal fand ich es langweilig.
Khang	Ich fand es gut, dass wir mal etwas anderes gemacht haben und es hat mir Spaß gemacht, mit der Kerze rumzuspielen. Mir hat auch eigentlich alles gefallen.	Die Experimente, die wir gemacht haben, (erg. haben) mir sehr gefallen. Aber mir hat etwas nicht gefallen, dass sie gefährlich sein können. Aber es hat mir trotzdem gefallen.	Doch der Ruß ist nur ein Zwischenprodukt der Flamme.	Wenn wir Wasser und Kohlendioxid ausatmen, dann atmet der Baum das Kohlendioxid ein und wir bekommen neuen Sauerstoff	Wir haben ja den Kreislauf aufgestellt und haben noch die Bilder, die Sie gemacht haben, dazu geordnet, und es war nicht so schwer.	An dem Abend waren ich und meine Eltern nicht da und deshalb kann ich nicht sagen, wie der Abend für mich wäre, aber ich glaube, wenn ich da (erg. gewesen) wäre, hätte es mir gefallen.	Was für mich eigentlich wichtig war, dass es Spaß gemacht hat und man etwas lernen konnte. Es war eigentlich ziemlich alles lehrreich und das aller lehrreichste war, dass man nicht einfach mit Feuer spielt.
Sebastian		Ich fand den „Flammensprung“ gut, weil ich ihn selber machen (als Faraday vorführen) durfte.	Ich kann dazu nichts sagen (war wieder krank).	Ich fand es interessant, weil ich hatte vorher gedacht, der Mensch ist völlig anders als die Kerze, wenn sie verbrennt.	Das fand ich nicht so toll, weil ich es zuerst nicht so gut kapiert habe.	Ich fand es gut mit der Aufführung Ich fand nicht so gut, dass ich was sagen musste, weil Christian sich nicht traute und weil ich dann stotterte (das war mir peinlich)	Ich fand gut, dass wir viele Experimente gemacht haben. Mir war besonders wichtig, dass ich jetzt mehr über die Kerze weiß.
Benjamin	Michael Faraday war sehr interessant. Und die Idee mit der Erinnerungskerze war auch gut.	Der Flammensprung war ein gutes erstes Experiment. Und ich staunte, dass man die Kerze ohne Schere zerschneiden kann.	Ich fand das mit dem Ruß nicht so interessant. Aber das mit der Wasserstrahlpumpe war umso interessanter.	Wo wir das mit der Feuer-scheidung gemacht haben, das war wirklich wichtig.	Gut fand ich, dass Sie uns erklärt haben, dass die Pflanzen genau das Gegenteil machen wie wir.	Den gemachten Kerzenständer fand ich total super!! Und den Elternabend auch.	Es war ein sehr schöner Unterricht. Das war mal eine Abwechslung.
Anonym D	Es ging.	Das Experiment fand ich gut.	Das mit dem Ruß und dem Schatten habe ich nicht so gut gefunden, aber das mit dem Ruß und dem Reinpusen habe ich gut gefunden.	Das ging.	Den Kerzenkreislauf habe ich nicht so gut gefunden.	Das habe ich gut gefunden.	Mir war wichtig, dass wir was über die Kerze gelernt haben.

Name	Ouvertüre	I. Akt: Was brennt?	II. Akt: Was passiert in der Flamme?		III. Akt: Kerze: Wohin – woher?	Finale	Weitere Bemerkungen und Anregungen
			Zwischenprodukt Ruß	Endprodukte Wasser/ Kohlendioxid			
Christina	Ich fand es mitten drin, denn Sie haben den Lebenslauf sehr gut nachgespielt. Jedoch war es ein bisschen langweilig nachzuerzählen.	Die Flamme ersiekte, weil sie keine Frischluft mehr hatte. Dieser Versuch war etwas langweilig, weil ich mir denken konnte, dass die Flamme ausgeht.	Genau nichts bleibt! Wir waren alle sehr gespannt, was passiert, denn dies konnten wir noch nicht wissen. Ich war sehr gespannt auf das Ergebnis	Mir war zuerst nicht klar, als wir den Versuch mit dem Saugen gemacht haben, warum es dann milchig wurde. Dann habe ich die Waschflasche genau angeschaut, dann habe ich es kapiert.	Der Kreislauf hat mich sehr interessiert, denn ich wusste nur, dass die Kerzen von Bienen kommen.	Die Aufführung fand ich sehr schön. Doch dass sich Cemre beim Wachs-dampf-Sammeln und Entzündungen der Finzen verbrannt hat (...)	Besonders wichtig war mir, dass jeder zusammenarbeitet.
Adrian	Ich fand es sehr interessant.	Ich war überrascht, dass die Flamme innen hohl ist und der Docht nicht brennt.	Ich fand das mit der nicht leuchtenden Flamme gut, aber das mit dem Projektor habe ich nicht gesehen, da war ich krank.	Dass wir Wasser ausatmen, habe ich nicht gewusst bis zum Experiment.	Diese Entdeckung fand ich interessant.	Ich fand die Eltern einladen eine gute Idee und es hat mir Spaß gemacht.	Der ganze Unterricht war interessant. Mehr fällt mir nicht ein, was besser zu machen ist.
Jasmin	Ich fand interessant, wie wir herausgefunden haben, woher sie kommt und wie sie entsteht. Außerdem sollten wir eine Kerze zeichnen als Erinnerung.	Hier fand ich das mit dem Wachs toll, weil ich nämlich gar nicht wusste, dass flüssiges und festes Wachs nicht brennen konnte.	Ich fand das cool, weil ich gerne Gegenstände ins Feuer halte, wo sie schwarz werden.	Wir haben das genau gesehen und das fand ich lustig.	Fand ich toll.	Ich fand das mit dem Kerzenziehen so toll.	Man denkt, die Kerze ist nur so ein normaler Gegenstand, dabei ist sie interessant.
Patrycja	Ich halte sehr viel von Michael Faraday. Ich fand es gut.	Wir haben zu der Frage auch viele Versuche gemacht und die Versuche haben viel Spaß gemacht. Ich fand es super.	Ich fand es mit dem Ruß auch gut. Und manchmal war es sogar richtig interessant.	Das mit den Stoffen war das, wo ich am meisten gelernt habe. Ich fand es auch super gut.	Ich habe viel Neues gelernt.	Das Kerzenziehen und der Auftritt vor den Eltern hat mir am meisten Spaß gemacht.	Jetzt habe ich über die Kerze sehr viel gelernt. Und ich fand es gut, dass wir nicht so viele Hausaufgaben gekriegt haben.
Vullnet	Ich fand das sehr interessant.	Wir haben lange gerätselt, bis wir die Lösung gefunden haben.	Das fand ich sehr interessant.	Das fand ich nicht so interessant.	Das fand ich sehr spannend.	Das fand ich gut.	Die Experimente auszuprobieren war sehr, sehr gut. Besonders wichtig war, dass wir etwas Physik und etwas Chemie gemacht haben. Ich habe eigentlich fast alles neu dazugelernt. Z.B., dass Wasserstoff und Kohlenstoff einen neuen Partner kriegen, den Sauerstoff, und das Beste war, dass sie sich wieder treffen.

Auswertung

1. Gesamteindruck

- Nahezu alle Schülerinnen und Schüler geben ein positives Gesamturteil ab.
- Der „Spaßfaktor“ nimmt die vorherrschende Bedeutung innerhalb der Einschätzung der Unterrichtsqualität ein (vereinzelt bei Jennifer, Clemens, Natalie, Laura, Asli, Adrian, Anna-Sophia, vorherrschend bei Anonym B und Khang).
- Einige (5) Kinder äußern sich wenig differenziert (Anonym D, Christopher, Jana, Adrian, Ausnahme in der Spalte „eigene Bemerkungen“) und das lapidare Urteil von Benjamin: „Das war mal eine Abwechslung.“⁶⁰
- Viele (17) Kinder geben an, sehr viel gelernt bzw. erfahren zu haben, jetzt viel oder mehr zu wissen: Jennifer, Anonym B, Anonym C, Anonym D, Christopher, Anne, Natalie, Jana, Anna-Sophia, Nadine, Asli, Vullnet, Anonym A, Clemens, Sebastian, Patrycja (besonders bezogen auf die chemische Kerze), Khang (hat „etwas“ gelernt).
- Etliche (6) Kinder stellen Beziehungen zwischen der Verbrennung und der Atmung her (Anonym A, Anonym C, Khang, Benjamin, Natalie und Cemre).

2. Emotionale Einzelaussagen

- Der Unterricht ist spannend und aufregend (Anne).
- Die Kerze ist spannend (Natalie).
- Es war „nie langweilig“ (Anonym C).
- Es war „manchmal langweilig“ (Clemens).

3. Erstaunliches und Spannendes

- Der Docht brennt nicht (Jennifer, Clemens, Christopher, Adrian).
- Die Flamme ist innen hohl (Adrian).
- „Es ist doch WAHNSINN, genau dort, wo es am hellsten in der Flamme ist, ist der schwarze, dunkle Ruß.“ (Anna-Sophia).
- „Genau nichts bleibt. (...) Wir waren alle sehr gespannt auf das Ergebnis.“ (Christina)
- Etwas wird nichts?! (Jennifer)
- Wasser soll aus der Kerze kommen? – Wasser löscht doch Feuer (Jennifer).
- Die Kerze ist „auch in einem Kreislauf“ (Henriette).
- Der Photosyntheseversuch ist spannend (Nadine).

4. Aussagen zur Methode

- Das Lange-Herumrätseln im I, und II, Akt wird als spannend bzw. „prickelnd“ empfunden (Anonym B),
- Herauszufinden was brennt, „war super“ und „hat Spaß gemacht“ (Nadine, Anna-Sophia),
- Es gab aufregende Versuche (Nadine),
- Jennifer merkt positiv an, „dass wir für jede Frage durch Experimente antworten und neue Fragen gefunden hatten“.
- Anonym A hält es für gut, „alles zu erforschen und ganz viel über die Kerze zu wissen.“

⁶⁰ Eine enttäuschende Bilanz, verglichen mit den weitgehend differenzierten Rückmeldungen, die Hans Brünger von seinen Oberstufenschülern erhalten hat. Allerdings muss eingeräumt werden, dass die Kinder das Feedback-Geben als Instrument der Sicherung der Unterrichtsqualität bislang kaum kennen. Ich habe bereits mehrmals Feedback eingeholt, andere KollegInnen, die in der Klasse unterrichten, verwenden es nach Aussage der Kinder nicht. Auch in der Selbsteinschätzung sind die Kinder (noch?) weitgehend ungeübt.

5. Aussagen zu Schwierigkeiten

- Die Betrachtung der Flamme im Licht wurde nicht ganz verstanden (Henriette)
- Ruß als Zwischenprodukt der Verbrennung ist schwierig zu verstehen (Melis)
- Man kann die Stoffe miteinander verwechseln (Nadine).

6. Aussagen zur Erinnerungskerze

- Das Zeichnen war schwierig, weil zuvor nicht beachtet (Anne).
- Das Zeichnen ist interessant (Anna-Sophia, Jasmin) bzw. eine „gute Idee“⁶¹ (Benjamin).

7. Aussagen zur Figur Michael Faraday

- Positiv über Faradays Hilfe äußern sich Anonym C und Christopher.
- Von Faraday gelernt zu haben wird als gut bzw. spannend empfunden. (Jana, Cemre)
- „Ich halte sehr viel von Michael Faraday.“ (Patrycja)
- Faradays Fliege ist „lustig“. (Anna-Sophia)
- „Er hat uns alles über die Kerze beigebracht. Er hat mit uns fast drei Wochen lang gearbeitet und uns seine Abenteuer erzählt. Es war schön, ihn kennenzulernen.“ (Cemre)⁶²
- Michael Faradays Lebenslauf wurde „sehr gut nachgespielt.“ (Christina)
- Selbst als Faraday mit dem Flammensprung vor der Klasse aufzutreten war „gut“. (Sebastian)
- Indifferente bis negative Urteile werden über den Faraday-Aufsatz abgegeben: Zunächst als „langweilig“ empfunden, wurde es interessanter, als man mehr über ihn wusste (Anna-Sophia), Christina empfand die Nacherzählung als langweilig, Nadine konnte nicht alles behalten.

8. Aussagen zum Kerzenkreislauf

- Der Pflanzenversuch war interessant (Clemens),
- Interessant ist, wie alles zusammenhängt (Natalie),
- Der Kerzenkreislauf war am lehrreichsten (Henriette) bzw. „das Beste“ (Henriette).
- Der Kreislauf ist nicht so schwer (Khang).
- Der Kreislauf ist kompliziert (Anonym C, Sebastian, der allerdings zuvor krank war).
- Fehlerhaft: Als Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff wird Kohlendioxid genannt (Anonym A) – ein singulärer Fall.
- „... und das Beste war, dass sie sich wieder treffen.“ (Vullnet)

9. Aussagen zum Finale

- Das Kerzenziehen wird von etlichen (9) Kindern positiv hervorgehoben (Jennifer, Anonym C, Christopher, Anna-Sophia, Henriette, Asli, Jasmin, Nadine, Patrycja), drei Kinder verschenken die Kerze (Jennifer, Anna-Sophia, Natalie).
- Zum Denkbild äußern sich vier Kinder positiv: Nadine, Henriette, Asli, Anna-Sophia. Beim Malen gab es eine Auseinandersetzung (Anne). Das Plakat „hat alles noch einmal zusammengefasst“ (Anna-Sophia).
- Einen eigenen Kerzenständer herzustellen erwähnen fünf Kinder positiv (Benjamin, Nadine, Anna-Sophia, Henriette, Asli).

⁶¹ Sie stammt nicht von mir: Ich habe sie von Christoph Berg übernommen, er wiederum von Lichtwark, dem früheren Museumspädagogen der Kunsthalle Hamburg.

⁶² Cemre verschätzt sich hier: Es waren genau zwei Wochen, hinzu kam der Elternabend.

- Die Aufführung bezeichnen neun Kinder als schön/toll/spitze (Jennifer, Anonym A, Christopher, Clemens, Nadine, Anna-Sophia, Jana, Adrian, Christina). Zwei (von zwei) Kindern bedauern ihr Fehlen (Khang, Asli). Gemischte Gefühle, bezogen auf einzelne Ereignisse, äußern vier Kinder (Sebastian, Laura, Christina, Cemre). Anonym A hebt hervor, dass „auch andere ... lernen (konnten).“

10. Weitere Bemerkungen und Anregungen

- Etwas widersprüchlich zu ihren übrigen Aussagen findet Nadine, manchmal sollte besser erklärt werden.
- Als nicht so gut empfand Melis, „wenn wir die Versuche nicht selber machen konnten“.
- Khang und Anonym C spielen zukünftig besser nicht mit Feuer – obwohl das am schönsten ist ... (Khang).
- Christopher hält die Kerze für ein „gutes Thema in der Adventszeit.“
- „Besonders wichtig war mir, dass jeder zusammenarbeitet.“ (Christina).
- „Besonders wichtig fand ich, dass man leise und aufmerksam war“ (Anne).
- Anonym B hielt den Unterricht für „sehr gut organisiert“.
- Anonym C und Cemre halten es für eine „gute Idee, Deutsch und Bio zu kombinieren“.
- Als positiv empfanden Cemre und Patrycja: „Wir haben nicht so viel aufbekommen“.
- Asli und Melis war wichtig, alles verstanden zu haben bzw. „mitzukommen“.

Bilanz

Ad 1 u. 2: Das Feedback deckt sich im Wesentlichen mit meinen eigenen Eindrücken. Die Klasse hat während des Unterrichts konstant, interessiert und freudig gearbeitet, viel gelernt und Ergebnisse von überdurchschnittlicher Qualität geliefert.

Ad 3 und 4: Den Äußerungen ist zu entnehmen, dass offenkundig in jeder Phase des Unterrichts spannende Beobachtungen und erstaunliche Erkenntnisse stattgefunden haben. Allerdings sind die Aussagen nicht sehr konkret, was wahrscheinlich auf die geringe Erfahrung mit Feedbacks und auf den zeitlich großen Abstand zum Unterricht zurückzuführen ist. Das „lange Herumrätseln“ im I. und II. Akt war allem Anschein nach richtig „dosierte“ und kein blindes Suchen, sondern ein spannender Prozess. (Ich habe mich gefreut, wie einlässlich die Klasse sich mit dem Kerzenprozess auseinandergesetzt hat, und habe ebenfalls keine „Durchhänger“ wahrgenommen.)

Ad 5: Der Schwierigkeitsgrad des Unterrichts weist ein hohes Maß an Passung auf. Äußerungen, etwas nicht verstanden zu haben, halten sich sehr in Grenzen. Neben den unter Punkt 5 genannten Schwierigkeiten bemerken zwei Schülerinnen, die normalerweise eher Probleme haben mit dem Schulstoff, gut mitgekommen zu sein – m.E. ein Beleg für die Comenianische Trias: omnes omnia omnino.

Ad 6: Das Zeichnen der Erinnerungskerze hat sich m.E. sehr bewährt. Anne hat aus der Schwierigkeit, sie richtig zu zeichnen, schnell gelernt. Sie war daraufhin eine der aufmerksamsten Beobachterinnen. Benjamin schaut anscheinend sogar hinter die Kulisse des Methodischen.

Ad 7: Dass sich der Einbezug Michael Faradays als „Lehrer“ kognitiv wie emotional sehr bewährt hat, zeigen die vielfältigen Erwähnungen durch die Kinder. Eine Ausnahme bildet der von Christina, Nadine und Anna-Sophia erwähnte Aufsatz über Faraday. Diese Aufgabe wurde als eher lästig betrachtet. Ich halte es zwar weiterhin für unverzichtbar, Informationen über Faraday schriftlich festzuhalten, denkbare Alternativen wären ein kleines Portrait oder ein Informationsblatt (vor allem, wenn der Unterricht lediglich von den naturwissenschaftlichen Fächern abgedeckt wird). Wahrscheinlich würde ich beim nächsten Mal an dieser Stelle etwas abkürzen, ein Kurzportrait jedoch vorziehen.

Ad 8: Der Kerzenkreislauf wird relativ häufig erwähnt. Positive Äusserungen überwiegen. Schwierigkeiten hängen mit einer Erkrankung im Vorfeld und einer Verwechslung zusammen. Die Inszenierung der jederzeit präsenten und kontinuierlich erweiterten Kerzen-Reihe (Ouverture), die zuletzt für alle sichtbar zum Kreis geschlossen werden konnte (III. Akt), ist ursächlich mit der (Nach-) Entdeckung des Kreislaufs verbunden. Die Eröffnungsszene des Lehrstücks hat sich m. E. sehr bewährt.

Ad 9: Der Elternabend, in dem die Kinder – neben allen Ängsten, Missgeschicken und Peinlichkeiten – sich als wirksame Darbietende erleben konnten, wird sehr häufig positiv erwähnt. Bezogen auf das Werkschaffen würde ich in Zukunft auf eine solche halböffentliche ‚Werk-aufführung‘ nicht verzichten wollen, ebenso wenig auf das Kerzenziehen. Ein eigenes Denkbild im Heft hingegen ist ausreichend. Auf ein Gemeinschaftsbild kann verzichtet werden.

Ad 10: Nahezu befremdend ist Patrycjjas und Cemres Eindruck, wenige Hausaufgaben bekommen zu haben: Innerhalb von zwei Wochen haben die Kinder (in der Schule und zuhause) ein Doppelheft mit Aufsätzen, Ideen, Versuchsbeschreibungen und Zeichnungen gefüllt. Die Aufgaben wurden weitgehend als selbstverständliche und konsequente Erkenntnissicherung wahrgenommen, eine ‚Abarbeitungsmentalität‘ war nicht spürbar (Ausnahme: in ein paar Fällen der erwähnte Faraday-Aufsatz). – Zu Melis: Dass sämtliche Experimente von den Schülerinnen und Schülern demonstriert werden können, hat der Elternabend gezeigt, hingegen können im Unterricht leider nicht alle Versuche von allen durchgeführt werden.

3.4.4 „Geistesblitze“

Die Kerze – ein alltägliches Wunder

Drei Schülerinnen aus der Klasse haben sich auch über den Unterricht hinaus mit der Kerze beschäftigt und am regionalen Schulwettbewerb „Geistesblitze“ teilgenommen. Ihr besonderer Beitrag bestand darin, einige weiterführende Experimente durchgeführt und den Flammensprung mit der Digitalkamera eingefangen zu haben. Die Dauer eines ihrer Flammensprünge aus 7 cm Höhe betrug 0,4 Sekunden.⁶³



Die Kerze - Staunen über ein alltägliches Wunder: So hieß das Projekt, mit dem Anna S. Knapp sowie Jennifer und Natalie Witulla vom Gymnasium Michelstadt beim Wettbewerb „Geistesblitze - Junge Odenwälder forschen“ im Fachgebiet Chemie einen ersten Platz erreichten. Zum Bericht.

Mit großem Erfolg nahmen Schülerinnen und Schüler von der 5. bis zur 13. Klasse des Gymnasiums Michelstadt an dem Wettbewerb "Geistesblitze – junge Odenwälder forschen" der Odenwaldstiftung teil, einer regionalen Variante des Wettbewerbs „Jugend forscht“.

Die drei Mädchen aus der Klasse 5 (!) fanden ein Unterrichtsprojekt so interessant, dass sie zu Hause auf eigene Faust weiterforschten: Die Vorgänge im Inneren einer Kerze wurden Schritt für Schritt problematisiert, experimentell untersucht und dokumentiert. Dabei konnten die Schülerinnen sogar photographisch dokumentieren, wie (und wie schnell) eine Flamme von einem brennenden Holzstab über das dampfförmige Wachs zu einer gerade erloschenen Kerze zurückspringt. Ein erster Platz in der Sparte Chemie war verdienter Lohn für die Anstrengungen.

1. Preis Chemie für "Die Kerze": Natalie Witulla, Anna-Sophia Knapp und Jennifer Witulla (von links) mit Landrat Horst Schnur, Wettbewerbsleiter Hans Göbel und dem Vorsitzenden der Odenwaldstiftung Hermann Braun.



Präsentation des Projektes "Die Kerze": Staunen über ein alltägliches Wunder während der Abschlussveranstaltung des Wettbewerbs Geistesblitze im Juni 2005.“

Quelle: >GyMi Online [Startseite](#) > [Fachschaften](#) > [Naturwissenschaften und Mathematik](#) > - [Fachübergreifende Berichte](#) > Wettbewerb Geistesblitze 05: Erfolgreiche Naturwissenschaftler; besucht am 11.06.2005

⁶³ Fotos der Folgeseite: Richard Knapp. Zeitungsartikel: Odenwälder Heimatzeitung, 11.6.2005



3.5 Auswertung

3.5.1 Kompositionsanalyse

(1) Validierung des Lehrstücks durch die Methodentrias

Exemplarisch

Das Lehrstück über die Kerze steckt voller rätselhafter Phänomene: Die Kerze selbst ist das Phänomen, das die Schülerinnen und Schüler persönlich anstrahlt, sie strahlen zurück mit Neugier, Staunen und Fragen gegenüber dem, was sie schon wissen, halb wissen oder vielleicht gar nicht wissen. Es bleibt in der Hand und im Fingerspitzengefühl der Lehrenden, das Vermögen, die Ausdauer und Bereitschaft der Schülerinnen und Schüler einzuschätzen: ob sie die Produkte der Verbrennung nachweisen oder aufzeigen, wie weit sie Seitengebiete des Themas (etwa die Kulturgeschichte der Kerze und der Feuerbeherrschung, die religiöse Kraft der Kerzensymbolik, die physikalischen Gesetze der Optik, die literarische Dimension, die wir aus Märchen und Gedichten kennen) zum Tragen kommen lassen wollen oder nicht. Auf der „horizontalen“, fachlichen Ebene gilt in jedem Fall: An der Kerze müssen Hypothesen entwickelt und geprüft und mit ihr Experimente aufgebaut und durchgeführt werden. Doch sollte sich das Lehrstück nicht weiter vom Phänomen entfernen, als dessen Licht leuchtet. Es gibt – zumindest für den Anfangsunterricht – eine natürliche Phänomengrenze, die allerdings auch Wagenschein und Faraday gelegentlich überschritten haben. Faraday selbst weist gleich zu Beginn auf die exemplarische Ausstrahlungskraft der Kerze hin, wenn er von den in Betracht kommenden „im Weltall wirkenden Gesetze(n)“ spricht.⁶⁴

Und nebenbei strahlt die Kerze auch in die „Vertikale“: Übergeordnete Lebensfragen treten zu Tage, wenn in der Flamme die Ausgangsstoffe zu Endprodukten der Verbrennung werden. Denn: „Gibt es in dieser Welt etwas ganz Anderes, Neues, und wenn ja, wann und wo tritt es auf?“ Oder: „Nichts geht verloren!“, lautet eine tiefe Erkenntnis des Kerzenunterrichts, die Lehrerinnen wie Schüler ergreift. Oder: „Wenn ich weiß, dass ich selbst ein Teil der Natur bin und von ihr abhängt wie sie von mir, wie verhalte ich mich zur Erde und ihren Ressourcen?“ Die Kerze hilft, die eigene Stellung in der Natur zu verstehen. Wie die Kerze sind wir durch die Pyrolyse eingebunden in den Kohlenstoffkreislauf, wir stehen gemeinsam mit ihr, indem sie Kohlenwasserstoffverbindungen (Kohlenhydrate) verbrennt und wir sie veratmen, den grünen Pflanzen gegenüber, die aus den Verbrennungsprodukten in der Photosynthese wieder neue Kohlenwasserstoffe herstellen. – In den Worten und Überzeugungen⁶⁵ des Dynamisten Faraday lautet die Botschaft des Exemplarischen (wie von Anna-Faraday auf dem Elternabend mitgeteilt): „Und so sehen wir Menschen uns abhängig nicht nur von unseren Nebenmenschen, sondern abhängig von aller Mitkreatur, sehen uns mit dem All der Schöpfung zu einem großen Ganzen verbunden durch die Gesetze, nach denen jedes Glied zum Heile der anderen lebet und webet und schafft.“⁶⁶

Genetisch

Viel Menschheitswissen ist im Kerzen-Exempel versammelt: Von den Erfahrungen des Kerzenziehens der Ägypter über Priestleys Photosynthese-Versuch bis zu de Lavoisiers Sauerstoff-Theorie. Das Schöne daran ist, dass diese kulturgenetischen Erkenntnisse von den Kindern in ureigene, individualgenetische Fragestellungen verwandelt werden und ihre Erkenntnisse gleich denen der Forscher wachsen und sich ‚einwurzeln‘. Denn sie beobachteten mit den gleichen Fragen wie die Kinder die Kerze und fanden heraus, dass Wachsdampf um den

⁶⁴ Faraday, Kerze, S. 23

⁶⁵ Dass diese nicht „out“ sind, belegt beispielsweise das 2006 in Cambridge gegründete Faraday Institute for Science in Religion, das kreative Ansätze in den Naturwissenschaften fördert. Vgl. Meier-Rust 2007

⁶⁶ Faraday, Kerze, S. 191

Docht herum verbrennt, dass der dabei entstehende aufsteigende Luftstrom die Flamme mandelartig formt und im Docht das flüssige Wachs empor gesogen wird, dass Ruß die Flamme warmgelb aufleuchten lässt und Wachs mit Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser verbrennt. Der Bildungsprozess gestaltet sich organisch. Je nachdem, an welcher Frage die Kinder gerade stehen, kommen sie in ein produktives Suchen, Finden und kritisches Prüfen und nehmen dadurch Einfluss auf den Unterrichtsverlauf.

Michael Faraday, Autodidakt auf dem Gebiet der Chemie, praktiziert in seinen Weihnachtsvorlesungen selbst einen genetischen Unterrichtsstil. Genetisch ist auch seine Forschungspraxis, welche er in den Vorlesungen und auch an anderer Stelle immer wieder reflektiert: „Als Experimentator fühle ich mich verpflichtet, mich durch das Experiment in die neue Gedankenbahn leiten zu lassen, die es hervorruft und rechtfertigt; ich bin befriedigt, weil das Experiment gleich der Analyse, wenn es richtig interpretiert wird, zur vollen Wahrheit führen muss; ich glaube auch, dass es seiner Natur nach anregender für neue Gedankenfolgen und neue Auffassung der Naturkräfte ist.“⁶⁷ – Im Kerzenlehrstück können die Schüler daher hervorragend lernen, wenn sie von Faraday selbst angeleitet werden, neue Gedankenbahnen, die durchaus auch in die falsche Richtung gehen können, einzuschlagen und auszuprobieren, um das naturwissenschaftliche Forschen zu lernen, sofern der „Prüfstein der Wahrheit“ des Beobachtbaren und des induktiven Denkens erkenntnisleitend für das Handeln ist und bleibt. In der *Kerze* sind das individualgenetische und das kulturgenetische Prinzip eng miteinander verflochten.

Die Auswahl der Experimente im Kerzenlehrstück ist in den verschiedenen Inszenierungen bislang nahezu identisch. Es gibt ein paar Pflicht- und ein paar Kür-Versuche, auch die Reihenfolge der Phasen wechselt je nach Fragehaltung der Schülergruppe. Allen ist gemeinsam: Der Arbeitsprozess vollzieht sich vom ersten Experiment an – dem Flammensprung – bis zum Ende des Unterrichts genetisch. Dazu gehört allerdings auch, den Schülern beim Bahnen der Kletterwege zu helfen und gegebenenfalls Sicherungen einzupflocken. Es gibt eine solche Gefahrenzone an der Stelle, wo die direkte Betrachtungsweise der Physik zur chemischen Analyse wechselt, die ungewohnt ist und voller Überraschungen steckt. Hier hilft das explizite Innehalten und die bewusste Konzentration auf das Verschwinden des Rußes zum Aufbau einer „neuen“ Fragehaltung beim Wechsel von der gewohnten additiven Denkweise (auch der Physik) zum Verwandlungsdenken der Chemie im Übergang vom I. zum II. Akt. – Diese Zäsur leitet über zum Dramaturgischen.

Dramaturgisch

Das Lehrstück setzt direkt beim Phänomen ein: Mehrere unterschiedlich weit abgebrannte brennende Kerzen stehen auf dem Tisch. Erscheinungen werden deutlich und die Frage wird aufgeworfen: Woher kommen eigentlich die ganzen neuen Kerzen, wenn wir ständig so viele abbrennen, und was wird aus ihnen, werden sie zu Nichts? Im sokratischen Gespräch wird zuerst die Richtung des „Woher?“ verfolgt, der Produktionsprozess der Kerze zum Wachs, zur Bienenwabe, zu den Pflanzen bis hin zu den Grund-Elementen der Antike. Erst im zweiten Schritt wird der Unterrichtsprozess in die andere Richtung eröffnet mit der Frage, wohin die Kerze verschwindet, wenn sie verbrennt. – Es drängt sich auf, einer solchen Frage experimentell nachzugehen. Der Aufbau einer Kerzenflamme wird untersucht, dem Verbrennungsvorgang vom schmelzenden Wachs bis zu den Verbrennungsgasen nachgegangen und das Verhältnis zwischen ihnen und der Pflanzenwelt herausgearbeitet. Versuchsdurchführungen, mündliche und schriftliche Schilderungen der Beobachtungen, Fragen und Knobeln nach den Gründen und neue Ideen für neue Versuche wechseln einander ab. Die Lerngruppe entwickelt und führt viele Versuche selbst durch, hinterfragt so lange, bis der „Kerzenkreislauf“ als eindruckliche Figur klar geworden ist: Von der Pflanzen-Blüte zur Biene zur Kerze zur Flamme zur Luft zur Pflanze zur Blüte ...

⁶⁷ Faraday, zitiert in Thompson 1965, S. 186

Lange gab es keine Ouvertüre im Kerzenlehrstück. Es begann mit dem Demonstration des Flammensprungs, den Faraday als „ebenso niedliches wie einfaches Experiment“⁶⁸ zeigt: Ein in die Wachsdampffahne einer gerade ausgepusteten Kerze gehaltenes brennendes Streichholz bringt die Kerze wieder zum Brennen. An diesem Experiment lässt sich leicht die Frage entwickeln, was eigentlich brennt – der Docht oder das Wachs?! Und sofort sind alle mittendrin im Prozess der physikalischen Kerze, entdecken die Aggregatzustände, die unterschiedlichen Zonen der Flamme, usw. Dirk Rohde hat zuerst die Frage: „Kerze: Woher? – Wohin?“ zu Beginn des Unterrichts gestellt, im sokratischen Gespräch zuerst die Richtung des „Woher?“ verfolgt und dann auf das zu untersuchende „Wohin?“ gerichtet.⁶⁹ Von dort aus entwickeln sich die Teilhandlungen der Fragestellungen für die drei Akte im Zentrum des Lehrstücks. Die Ouvertüre ist in meiner Inszenierung weiter ausgebaut: Die „Mitspieler“ des Kerzenprozesses bleiben während des Unterrichts präsent in einer Reihe sichtbar für alle stehen und schließen sich zuletzt, wenn die Frage der Endprodukte geklärt ist, zum Kreislauf zusammen.

Die Lehrstück-Dramaturgie folgt der Konzeption eines zugleich runden und öffnenden Schlusses: Ende des dritten Aktes fokussieren sich die Anfangsfragen und können von nun wissenden Schülerinnen und Schülern beantwortet werden, wenn sie am Ende das Kohlenwasserstoff-Drama miterleben, worin das Woher und das Wohin einander begegnen. Sie erkennen, dass die Kerze zu Kohlendioxid und Wasser wird, und beides brauchen – neben Sonnenlicht und Erde – die Pflanzen zum Leben. So schließt sich der „Kerzenkreislauf“, der den Schülerinnen und Schülern als Figur vor Augen steht und abschließend im Heft (und gegebenenfalls auf einem Plakat) gezeichnet werden kann – getragen von der Gewissheit, dass „nichts verloren geht“. Das heißt: Ein dramaturgisch durchgestaltetes Lehrstück erfordert eine Ouvertüre.

Kerzenouvertüre und Finale entsprechen Brechts offenem Theater: Auch und gerade wenn am Ende des Unterrichts die Sachfragen geklärt sind, ist das anfängliche Staunen über seinen Gehalt noch erhalten und wird von den Schülerinnen und Schülern weitergegeben an die interessierte Schulöffentlichkeit.

(2) Validierung des Lehrstücks durch die Lehrstückkomponenten

Phänomen

Die mehrdimensionale Wahrnehmung des Phänomens Kerze in der Inszenierung einer Reihe unterschiedlich abgebrannter Kerzen steht am Beginn („Baden im Phänomen“) und mündet in der übergeordneten Leitfrage „Kerze: woher – wohin?“⁷⁰ Das Lehrstück verfolgt eine Spur, die Faraday selbst gelegt hat. Zu Beginn der zweiten Vorlesung sagt er: „Ihr wisst ja: eine Kerze, die da vor uns brennt, verschwindet gänzlich, wenn sie ordentlich fortbrennt, ohne im Leuchter eine Spur von einem Rückstand zu lassen – gewiss eine höchst merkwürdige Erscheinung.“⁷¹ Dieser Erscheinung wird sukzessive nachgegangen, bis sie am Ende enträtselt ist. Dabei ist das Phänomen durchgängig Unterrichtsgegenstand.

⁶⁸ Faraday; Kerze, S. 43

⁶⁹ Rohde 2003, S. 135

⁷⁰ Bereits Rohde 2003, S. 133 eröffnet so den Unterricht. Allerdings führt er die Kerzen-Reihe nicht zum Kreis zusammen. Bei Johannsen 1990 ist die Kerzenreihe schon integraler Bestandteil des III. Akts.

⁷¹ Faraday 1980, S. 54f.

Leitfrage und Sogfragen

Indem die Frage nach dem „Woher“ der Kerze den Schülerinnen und Schülern sinnlich vor Augen steht, kann die Reihe über die höchste brennende Kerze hinaus ergänzt werden und im Sinne Wagenscheins das Problembewusstsein für das „Wohin“ erzeugen, das daraufhin zum eigentlichen Gegenstand des Kerzenlehrstücks wird: „So wie ein Segel gestellt werden muss, damit es vom Wind auch gefasst wird, so ist die Frage gestellt, wenn die Kinder vom Sog des Problems ergriffen sind.“⁷² Die Leitfrage spannt den Handlungsbogen über die Dauer des gesamten Unterrichts, die Teilfragen „Was brennt?“, „Was passiert in der Flamme?“ und „Kerze: wohin – woher?“ sind die Sogfragen der Handlungseinheiten (bzw. Lernaufgaben) der drei Akte.

Ich-Wir-Balance

In die Interaktion tritt neben den einzelnen Schülerinnen und Schülern die Figur Faradays in den Diskurs ein. Die Lehrerin ist selbst Teil der „Forschergemeinschaft“ und sorgt als Organisatorin, Beraterin und Moderatorin für den geregelten Verlauf des Unterrichts. Das *Ich* des Einzelnen äußert sich beispielsweise in der Wahl eines persönlichen Lieblingsversuchs, im Vorzeigen und Nachmachen, in der eigenständigen Formulierung von weiterführenden Fragestellungen (Ideenfenster), in der persönlichen Heftführung und im eigenen Beitrag auf dem Elternabend. Dabei erfährt der Kinderglaube an die Stabilität der Welt eine Umbildung. Die Gemeinschaft aller ist in den sokratischen Plenumsgesprächen und in der gemeinsamen Auf-führung am deutlichsten.

Originäre Vorlage

Faradays „Naturgeschichte einer Kerze“ ist Ersatz für eine fehlende originäre Vorlage. Faraday fungiert als Vermittler der relevanten Forschungsergebnisse, nicht als Entdecker. Hier besteht gegebenenfalls Nachholbedarf durch Einbezug de Lavoisiers, Priestleys und Boyles (der Paradigmenwechsel vom substanziellen zum prozeduralen Denken). Die Weihnachtsvorlesung ist insofern originär, als sie von den Kindern für den Elternabend reinszeniert und zur Aufführung gebracht wird.

Dynamisch aus der Urszene entwickelte Handlung

Mit der Wahl der Vorlage hängt zusammen, dass die Handlung nicht aus einer Urszene, sondern direkt aus dem Phänomen dynamisiert und entfaltet wird. Der Handlungsrahmen ist durch die übergeordnete Leitfrage der Ouvertüre gegeben, durch die der Spannungsbogen aufgebaut wird, der bis zum Finale durchträgt. Faraday als Lehrer ist ein spannendes Modell für das eigene Lernen. Ein biographisches Interesse an Faraday ist nicht relevant für die Entfaltung der Handlung. Das Fortschreiten der Handlung ist mit dem Wechsel der Figuren in jedem Akt verbunden. Im ersten Akt steht das Wachs (und damit die Physik), im zweiten die Flamme (die Chemie) und im dritten Akt der Kohlenstoffkreislauf (die ökologische Bedeutung) im Zentrum. Die vorgeschlagenen und durchgeführten Experimente führen die Handlung in Abhängigkeit von den Ergebnissen in innerer Logik weiter. – Dramatisch werden die Experimente in ihrer Wirkung auf die Schülerinnen und Schüler erlebbar. Die Spannungsmomente sind unterschiedlicher Art: Wie wird das Experiment enden? Gelingt es? Wie kann es gelingen? Was braucht es dazu? Welches Experiment braucht es überhaupt zur Lösung des Problems? – Die Abfolge der einzelnen Experimente ist nicht der dramaturgischen Gesamtgestaltung des Lehrstücks unterworfen, vielfältige Varianten der Szenenabfolge innerhalb der Akte sind denkbar. Einzige Requisite des Kerzenlehrstücks ist „Faradays Fliege“.

⁷² Wagenschein 1990, S. 252

Kategorialer Aufschluss

(1) *Bildung* schließt Momente des dialektischen Denkens ein. Der Gegenstand offenbart nur „im Ganzen“ und vom Ganzen aller auftretenden Bestimmungen her seine Bedeutung und erhellt das Ganze.⁷³ Bildung heißt daher einerseits *eine dingliche und geistige Wirklichkeit wird für einen Menschen erschlossen* und andererseits *ein Mensch wird für seine Wirklichkeit erschlossen*.⁷⁴ Der kategoriale Aufschluss ist gelungen, sofern „ein Grundsachverhalt der ihn umgebenden Wirklichkeit (...) ihm (dem Schüler, Anm. S.W.) in angestrengtem Bemühen einsichtig geworden“ ist.⁷⁵ Bezogen auf das Kerzenlehrstück lauten Klafkis Prüfkriterien des Kategorialen wie folgt:

- Repräsentanz für grundlegende Sachverhalte: Die Kerze repräsentiert einen Bestandteil des Kohlenstoffkreislaufs als Schlüssel zum Verständnis zyklischer Lebensvorgänge.
- Gegenwarts- und Zukunftsbedeutung: Die Kenntnis von Verbrennungsvorgängen ist von zentraler Bedeutung für das chemische Grundverständnis und für den sachgerechten Umgang mit Ressourcen, das Denken in Kreisläufen prägt zunehmend unser Weltbild.
- Vergangenheitsbedeutung, sofern sie die Gegenwart transparent macht: Kerzen als Energiequellen fanden und finden vielfältigen Gebrauch bei Festlichkeiten, zur Erzeugung stimmungsvoller Atmosphäre im privaten Bereich, in religiösen Riten, bei Minenarbeiten. Die heutigen Verfahren zur Kerzenherstellung haben sich gegenüber früher kaum verändert.
- Wirklichkeitsbezug: Die Kerze ist ein alltägliches Phänomen, das zur eingehenden Betrachtung auf vielfältige (mehrdimensionale) Weise reizt.
- Durchdringbarkeit zum Fundamentalen: Die Kerze ist wie alle Körper und Stoffe der belebten und unbelebten Natur ständigen Verwandlungsprozessen unterworfen, in denen nichts verloren geht. Neben den naturwissenschaftlichen Erkenntnissen kommt daher im Lehrstück auch die philosophisch-religiös-ästhetische Sinndimension zum Tragen: Die Lernenden leuchten diese Sinndimension des Lerngegenstandes für sich persönlich aus und können – müssen aber nicht – über das sinnlich Wahrgenommene hinaus Position beziehen (vgl. Maiks Gedicht S. 254 oder Vullnets Anmerkung S. 272).

(2) *Wissenschaftsbezug und Prägnanz*: Im Lehrstück *Faradays Kerze* können grundlegende Phänomene der belebten und unbelebten Natur beobachtet, analysiert und miteinander gedanklich verknüpft werden. Physikalische, chemische und biologische Aspekte beleuchten die drei Bezugswissenschaften in einer Thematik.

Vordringlich werden im Lehrstück einfache chemische Grundlagen vermittelt: Die Verbrennung einer organischen Verbindung mit Hilfe von Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser. Damit ist die Chemie als Wissenschaft in ihrem Kernbereich erfasst, beschäftigt sie sich doch generell mit dem Aufbau und den Umwandlungen von Stoffen. Speziell führt das Kerzenlehrstück zur organischen Chemie der Kohlenstoffverbindungen.

Seit Ende des 18. Jahrhunderts ist bekannt, dass zur Verbrennung Sauerstoff benötigt wird. Antoine de Lavoisier gelang es, den Verbrennungsprozess qualitativ und quantitativ durch die Umsetzung der beteiligten Stoffe zu erklären, nachdem Robert Priestley den Sauerstoff entdeckt und de Lavoisier ein Experiment von Cavendish nachgestellt hatte, in dem Wasserstoff und Sauerstoff in einem abgedichteten Gefäß mittels eines elektrischen Funkens zu Wasser „verbrennt“. De Lavoisier fand daraufhin, dass das Gewicht des Wassers dem Gewicht der Ausgangsstoffe entsprach.⁷⁶ Um diese sich der direkten Beobachtung entziehenden Nachwei-

⁷³ Klafki 1959, S. 39

⁷⁴ Ebd., S. 43

⁷⁵ Ebd., S. 40

⁷⁶ Strube 1986, S. 20

se der Verbrennungsprodukte vorzubereiten und sie in Verbindung zum organischen Ausgangsstoff zu betrachten, wird im Lehrstück zunächst das Augenmerk auf das verbrennende Wachs und die dazu nötige Luft gerichtet. Vor allem der Kerzenkörper und die Flamme werden auf ihre Zustände hin genau untersucht: die Form und Farbe der Flamme, Aspekte der Wärmelehre, die drei Aggregatzustände des Wachses, die Kapillarität des Dochts. Erst danach wird der Verbrennungsprozess chemisch analysiert.

Ausgehend von der etwa hundert Jahre jungen Wissenschaft der Ökologie hat sich in den Naturwissenschaften die Erkenntnis durchgesetzt, dass Stoffe innerhalb von Ökosystemen und sogar weltweit kreisen. Insbesondere für die chemische Verbindung Wasser und die chemischen Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor und Schwefel, aus denen sich die belebte Natur vornehmlich zusammensetzt, kann man die ständige Umwandlung in biochemischen Stoffkreisläufen verfolgen. Die erdumlaufenden Elemente erscheinen als Ionen und Verbindungen in Gestein und Boden, in Wasser und Luft und auch in den Lebewesen. Der Kohlenstoffkreislauf ist neben dem Wasser ein weiterer Universalschlüssel zu den Lebensvorgängen.

(3) *Kräftebildung und Sachverhalt-Methoden-Kongruenz*: Die Kräftebildung stellt ein „Aktualitätsprinzip“ dar, das nicht zuletzt im Zusammenhang mit der Lösung der so genannten „Schlüsselprobleme“ der Welt von Klafki eingefordert wird. Das Kerzenlehrstück hat einführnden Charakter und leistet im zweiten und dritten Akt hinsichtlich der Sensibilisierung für Fragen des ökologischen Gleichgewichts grundlegende Elementarbildung. Implizit vermittelt es die notwendige Einsicht und die gegebene Verantwortlichkeit der Menschen, mit (Roh-)Stoffen sorgsam umzugehen, Kohlendioxid nicht im Übermass durch unkontrollierte Verbrennungsvorgänge in Haushalt, Verkehr und Industrie freizusetzen und damit die Lebensgrundlagen zu zerstören. Dies geschieht nicht im normativen Appell oder durch Darstellung eines ausser Kontrolle geratenen Ökoystems, sondern konstruktiv im Nachweis eines gelingenden Gleichgewichtszustands zwischen Pyrolyse und Photosynthese durch das an Robert Priestley angelehnte Photosynthese-Experiment.

Das Lehrstück fordert und fördert das aktive Erschließen: Besonders im ersten Akt lernen die Schülerinnen und Schüler, relevante Fragen angesichts des Gegenstands aufzuwerfen, zu entwickeln und selbst Experimente zur Überprüfung der Hypothesen durchzuführen, zu analysieren, auszuwerten, zu diskutieren und zu reflektieren. „Forschen, wie die Forscher forschen“, ist hier das authentische Leitmotiv für vielfältige Selbstwirksamkeitserfahrungen. Die Kerzenbetrachtung kann eine Direktive geben für künftige Naturbeobachtungen. Sie kann helfen, andere Verbrennungsvorgänge zu analysieren und zu deuten. Dies gilt für die Anorganische Chemie (Metalle reagieren mit Sauerstoff zu Metalloxiden, z.B. indem sie rosten) ebenso wie für die Organische Chemie (z.B. je mehr Kohlenstoffatome bei der Verbrennung vorhanden sind, umso unvollständiger verbrennt der Stoff). Dies gilt ebenso für die physikalischen wie für die biologischen Erkenntnisse aus dem Kerzenunterricht. Der Kohlenstoffkreislauf als zentrale Kategorie des Lehrstücks fördert das Denken in größeren Zusammenhängen.

Klafki⁷⁷ fordert den korrelativen Bezug von Inhalt und Methode. D.h. methodische Bildung ist integraler Bestandteil jeder bildenden Aneignung geistiger Inhalte. Die Lerngruppe klettert den Weg der Erforschung des Gegenstands in weitgehend selbsttätigem Erforschen. Hierbei hilft das Modell Faradays im Unterricht. Für das Kerzenlehrstück ist es ein besonderer Glücksfall, dass Faraday selbst, ein Autodidakt auf dem Gebiet der Chemie, die Anleitung zum Forschen durch seine eigene Herangehensweise direkt überliefert, indem er sie in den Vorlesungen und auch an anderer Stelle immer wieder reflektiert: „Als Experimentator fühle ich mich verpflichtet, mich durch das Experiment in die neue Gedankenbahn leiten zu lassen, die es hervorruft und rechtfertigt; ich bin befriedigt, weil das Experiment gleich der Analyse, wenn es richtig interpretiert wird, zur vollen Wahrheit führen muss; ich glaube auch, dass es

⁷⁷ Klafki 1959, S. 41

seiner Natur nach anregender für neue Gedankenfolgen und neue Auffassung der Naturkräfte ist.⁷⁸

Im Kerzenlehrstück können die Schüler m. E. unter Anleitung Faradays gut lernen, neue Gedankenbahnen einzuschlagen und auszuprobieren, um das naturwissenschaftliche Forschen zu lernen, sofern der Prüfstein der Realprozesse erkenntnisleitend für den Unterricht ist und bleibt. Auf diese Weise kann es gelingen, durch das im *Kerzenunterricht* Gelernte ein „neues Organ“ naturwissenschaftlichen „Sehens im jungen Menschen wach (zu rufen, S.W.), dass es ihn für Einsichten und Verantwortungen aufschließt, die er bisher nicht zu erfahren und zu erfassen vermochte.“⁷⁹

Fundamentale Erkenntnisse	Grundfragen und Grundlagen von Mensch und Welt			
	Die Kerze als Bestandteil des Kohlenstoffkreislaufs ist ein Schlüssel zum Verständnis zyklischer Lebensvorgänge. Sie zeigt exemplarisch die naturwissenschaftliche und weltanschauliche Erkenntnis, dass Elemente Verwandlungsprozessen unterworfen sind, in denen nichts verloren geht. Das Denken in Kreisläufen prägt zunehmend unser Weltbild.			
Kategorialbildung	Die Verbrennungsvorgänge und ihre zentrale Bedeutung für das chemische Grundverständnis und den sachgerechten Umgang mit Ressourcen kennen lernen und erfahren. Sich über Verwandlungs- und Rückverwandlungsfähigkeiten der Stoffe wundern.			
	Bildung ist wechselseitige Erschließung von Mensch und Welt: Der Kohlenstoffkreislauf ist ein Beispiel für Stoffkreisläufe insgesamt. Zentraler Einblick in den Verbrennungsprozess (und tlw. in die Verbrennungstheorie Lavoisiers) Chemie als Wissenschaft der Stoffe und Stoffumwandlungen verstehen Analyse und Synthese chemischer Verbindungen Verbrennungsvorgänge sind Oxidationsprozesse Experimentieren ist ein Schlüsselprozess zum Verstehen			
den vier historischen Bildungstheorien zugeordnete Teilaspekte	Objektive Bildung	Klassische Bildung	Funktionale Bildung	Methodische Bildung
	Aggregatzustände $C_6H_{12} + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$ Atmung/ Verbrennung ist eine Reaktion mit Sauerstoff Photosynthese Kohlenstoffkreislauf Die zentrale Bedeutung des Kohlenstoffkreislaufs für Lebensvorgänge	Michael Faraday hat wesentliche naturwiss. Vorgänge im alltäglichen Gegenstand der Kerze für ein breites Publikum zugänglich gemacht Dem Alltagsgegenstand Kerze nachgehen	Die Vorstellungskraft schulen Ideen haben, konkretisieren, methodisieren und umsetzen Vertrauen in die Überprüfbarkeit von naturwissenschaftlichen Ereignissen gewinnen Denken in Kreisläufen	Induktive Verfahren des Erkenntnisgewinns: Beobachten Hypothesen bilden Experimentieren Protokollieren Austauschen und Verhandeln Forschen „wie Faraday“
	Materiale Bildung		Formale Bildung	

Abbildung 21
Bildungsaspekte im Lehrstück *Faradays Kerze*

⁷⁸ Thompson 1965, S. 186

⁷⁹ Klafki 1959, S. 43, in Analogie zu Hermann Heimpeles Geschichtsunterrichtsbeispiel

Werkschaffende Tätigkeit

Das zentrale Werk ist der von den Schülerinnen und Schülern durchgestaltete Elternabend im kulturauthentischen Setting der Weihnachtsvorlesungen. Untergeordnete Werke sind die Herstellung einer Kerze und eines Kerzenständers sowie das persönliche Kerzenheft.

Grundorientierendes Denkbild

Pflanzen, Tiere und Menschen sind ein Teil des Kerzenkreislaufs – die Menschen stehen in Verantwortung für das Ganze. Am Ende des Unterrichts wird die Frage nach dem „Wohin?“ der Kerzenreihe durch den Zusammenschluss zum Kreis geklärt. Dabei helfen die Gefäße, in denen die Zwischen- und Endprodukte der Verbrennung aufbewahrt werden: In klarer Dramaturgie und dem Prägnanz-Kriterium gemäß kann so Station um Station der Unterrichtsverlauf abgebildet werden.

(3) Vergleich der Inszenierung Theophels (1992) mit der Neuinszenierung (2004)

Die Inszenierungen von Theophel und mir unterscheiden sich am deutlichsten in Bezug auf das Dramaturgische. Diese beschränkt sich in Theophels Inszenierung vor allem auf die geschickte erkenntnisleitende Auswahl der Experimente. Faraday wird im Unterricht vorgestellt, jedoch nicht in die Handlung einbezogen. Der Lehrgang ist daher streng exemplarisches-gestaltet. Die Teilfragen (Sogfragen) der drei Akte kristallisieren sich deutlich heraus. An zwei Stellen wirkt sich die Beschränkung auf die Chemie der Kerze meines Erachtens nachteilig aus:

- Das Phänomen wird tendenziell eindimensional untersucht, d.h. der Horizont jeglicher Fragestellungen ist perspektivisch begrenzt. Theophel versucht, ein Erstaunen hinsichtlich des verschwindenden Rußes hervorzurufen, doch bleibt dieses Bemühen nahezu rhetorischer Art.⁸⁰ Eine übergreifende Fragestellung für die Handlungsdynamik des Lehrgangs fehlt. (Dieser kritische Aspekt ist weniger in der Gestaltung des Unterrichts als in den schulischen Rahmenbedingungen zu suchen. Im Gegenteil: Theophel versucht eine möglichst umfassende Phänomenbetrachtung und ist grundsätzlich sehr aufgeschlossen gegenüber der Mehrdimensionalität des Gegenstands.)
- Zweitens: Durch die fehlende Thematisierung der Photosynthese der grünen Pflanzen als Gegenkraft zu Verbrennungsprozessen muss Theophel das Faraday'sche Denkbild von der wechselseitigen Abhängigkeit der Lebewesen allein aus dem Exemplarischen entwickeln. Hier tut sich bezogen auf die Inszenierung des Phänomens zu Beginn des Unterrichts (nur *eine* brennende Kerze) eine Lücke zwischen dem Erkenntnispotenzial der Lernenden und den Anforderungen des Themas auf. Der Kerzenkreislauf kann so nicht entwickelt, sondern nur exponiert werden. Theophel fühlt sich dabei nicht wohl (s. S. 227f.), der Vorlage gegenüber jedoch vermutlich verpflichtet, den Kreisschluss zu wagen.

Die Umstände gestalten sich in der Inszenierung 2004 einfacher: Das Thema kann mehrperspektivisch betrachtet werden, ein größeres Zeitkontingent steht zur Verfügung, durch Fächerverbindung kann der Unterricht nahezu zur Epoche gebündelt werden. Dadurch lassen sich dramaturgische Gestaltungsoptionen leichter realisieren. Sie sind jedoch auch auf die Bedingungen der üblichen Lektionsverteilungen im Stundenplan transferierbar.

⁸⁰ Vgl. „Asche ist jedenfalls nicht zu sehen.“ Theophel, E. in: Berg/Schulze 1995, S. S. 254

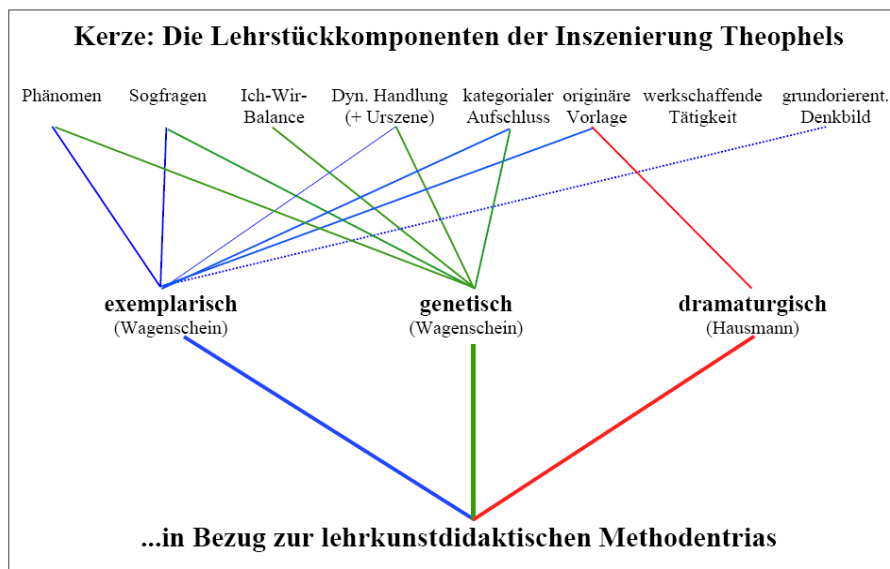


Abbildung 22. Die *Kerzen*-Komposition weist 1992 (1995) bereits ein hohes Entwicklungsniveau auf. Die drei (Teil-)Sogfragen der Akte werden direkt aus dem Phänomen entwickelt und sämtliche Kategorien von der Lerngruppe erschlossen. Durch das Genetische entwickelt sich die Handlung dynamisch, allerdings nahezu ohne Bezug auf Faraday. Die Ich-Wir-Balance ist ein Ergebnis der vorherrschenden sokratischen Gesprächskultur. Aus dem Bericht lässt sich der Anteil der Lernenden am Findungsprozess der relevanten Fragestellungen allerdings nicht eindeutig ablesen. Das Dramaturgische ist auf die geschickte Auswahl der Faraday'schen Experimente beschränkt. Das Werkschaffen fehlt noch vollständig. Das Denkbild des Kerzenkreislaufs ist von Faraday übernommen. Weil eine übergeordnete Fragestellung – die das Dramaturgische initiieren könnte – fehlt, wirkt die Exposition des Denkbildes etwas „aufgesetzt“ und kann nicht genetisch entwickelt werden. Die Prinzipien des Exemplarischen und Genetischen sind stark entwickelt. Die Vorlage begründet die Auswahl des Themas und ist daher auch mit dem Exemplarischen verbunden.

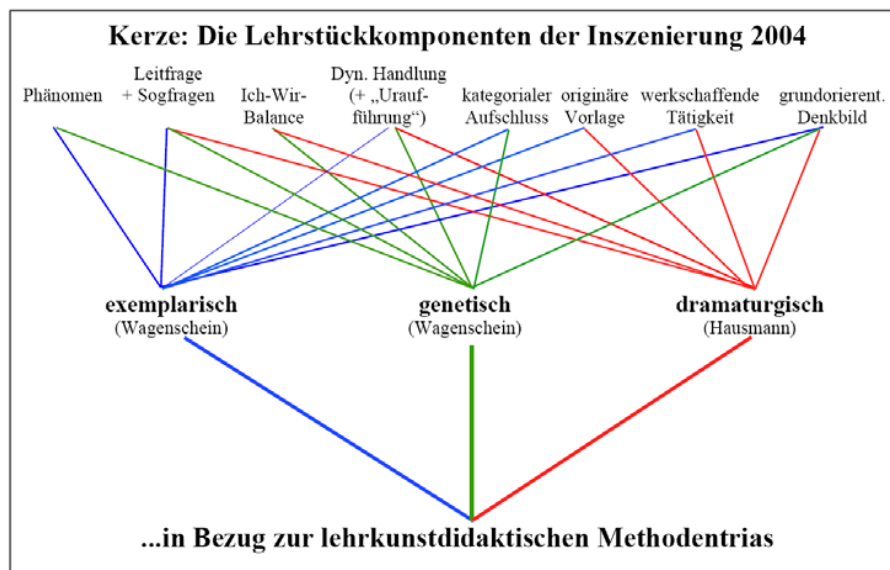


Abbildung 23. In der Neuinszenierung sind die drei Prinzipien der Methodentrias vielfältig realisiert. Die Dramaturgie der Phänomeninszenierung zu Beginn (*Kerzenreihe*) evoziert die übergeordnete Leitfrage. „Kerze, woher – wohin?“ und schafft eine genetische Verbindung zu den drei Teilfragen (Sogfragen) der Akte I – III. Dadurch gewinnt am Ende des Unterrichts das Denkbild die Qualität einer Grundorientierung. Das Werkschaffen ist (noch?) nicht mit dem Genetischen verbunden (anders als beispielsweise bei der *Himmelsuhr*). Dies erklärt sich dadurch, dass die Fragestellungen des zweiten und dritten Aktes nur im Ansatz von den Schülerinnen und Schülern gefunden werden können und dramaturgisch evoziert werden. Selbständig allerdings schließen die Schülerinnen und Schüler die *Kerzenreihe* zum Kreis (daher die Verbindung zum Genetischen neben dem Dramaturgischen). Der Einbezug der Figur Faradays als Modell stellt die enge Verbindung vom Dramaturgischen zu den Sogfragen, zur Vorlage und zum Denkbild her. Faraday fungiert nicht als Urheber (daher fehlt die Urszene), sondern als Vermittler. Seine „Uraufführung“ der Weihnachtsvorlesungen spiegelt sich wieder in der Werkaufführung der Kinder am Elternabend und in der Hineinnahme Faradays ins Denkbild.

(4) Hinweise zum Unterrichtsaufbau

Für *Faradays Kerze* 2004 ergibt sich folgendes Kompositionsmuster:

Kompositionsmuster	Ouvertüre Erste Begegnung mit der Kerze	I. Akt: Was brennt?	II. Akt: Was passiert in der Flamme?	III. Akt: Kerze: Wohin – woher?	Finale Familienabend
Phänomen					
Sogfrage					
Ich-Wir-Balance					
Dyn. Handlung (mit Urszene)					
Kategorialer Aufschluss					
Originale Vorlage					
Werkschaffende Tätigkeit					
Denkbild					

Abbildung 24. Die Komposition des Kerzenlehrstücks ist insgesamt ausgewogen und hinsichtlich der acht Lehrstückkomponenten weitgehend entwickelt. Das Phänomen steht von Beginn an im Zentrum, in den Akten I – III werden physikalische, chemische und biologische Teilaspekte des Phänomens eingehend untersucht. Diese kommen im Finale wieder zusammen. Die zentrale Sogfrage erhebt sich aus dem Phänomen. Zunächst, im ersten Akt, umfasst sie das Ganze der Kerze, später fokussiert sie auf die Flamme, im dritten Akt auf die Bedeutung der Verbrennungsvorgänge im ökologischen Zusammenhang. Die Fragestellungen kommen erst im Finale zusammen. Die Ich-Wir-Balance ist zunächst in der starken Interaktion des sokratischen Eröffnungsgesprächs gegeben sowie in der Herstellung einer eigenen Beziehung zum Gegenstand der Kerze durch das eigene Beobachten und Zeichnen. Aufgrund des Lehrervortrags über Faraday erreicht die Lehrstückkomponente zu Beginn nicht ihren Höhepunkt, sondern erst am Ende, wo die Lehrerin sich auf die Organisation des Elternabends zurückzieht und die Schülerinnen und Schüler die Gestaltung eigenständig in die Hand nehmen. Die Handlung entwickelt sich zunächst direkt aus der Inszenierung des Phänomens und entfaltet sich in den drei Akten genetisch. Die Handlung setzt in der Ouvertüre ein („Wohin geht die Kerze, wenn sie verbrennt?“), noch ehe die Sogfrage des ersten Akts gefunden ist („Verantwortlich für das Verbrennen ist die Flamme – was brennt eigentlich?“). Eine Urszene fehlt (noch). Faraday als Lehrer und Modell vertritt den/die Urheber Lavoisier, Boyle, Priestley u.a. Der kategoriale Aufschluss baut sich kontinuierlich über die einzelnen Unterrichtssequenzen auf. Durchgängig wird an der Aufschlüsselung der Leitbegriffe gearbeitet, zunächst beschränkt auf das Methodische der genauen Beobachtung. Im ersten Akt stehen die Aggregatzustände des Waxes im Zentrum, im zweiten Akt der Begriff des Elements und das Phänomen Ruß als Zwischenprodukt der Verbrennung, im dritten Akt werden die Einzelerkenntnisse zum Kerzenkreislauf ineinandergefügt, abgebildet und rückbesinnend reflektiert. Die Vorlage Faradays und seine Person sind in der Ouvertüre, im ersten Akt und am Ende am stärksten einbezogen, im zweiten und dritten Akt ist sie eher Begleiter. An einem Werk, dem eigenen Kerzenheft, wird von Beginn bis zum Ende gearbeitet. Hinzu kommen die Herstellung des Kerzenständers und vor allem der eigenen Kerze (sie soll gut brennen, daher kommen die Erkenntnisse aus dem Unterricht hierbei teilweise zum Tragen) im dritten Akt. Eindeutiger Höhepunkt des Werkschaffens ist die Aufführung der *Kerze* auf dem Elternabend. Das den Erkenntnisprozess abbildende Denkbild hat zunächst Begleitungsfunktion. Es ist von Beginn an bedacht, indem die Kerzenreihe aufgebaut und Schritt um Schritt erweitert wird. Produziert wird es jedoch (anders als bei den *Fabeln*) erst am Ende, wenn sich im dritten Akt die Reihe zum Kreis zusammenfügt und sich die Erkenntnisse der Teilhandlung zur Weltorientierung integrieren.

3.5.2 Faradays Kerze: Die Lehrstückgestalt⁸¹

Lehridee

Die Flamme fasziniert jeden Menschen, der Umgang mit dem Feuer ist eine der ältesten Kulturleistungen, mit jeder Zivilisation innig verbunden, und das Feuer zeigt viele wesentliche physikalische und chemische Prozesse. Dieser Meinung war auch Michael Faraday. Als einer der berühmtesten naturwissenschaftlichen Forscher und Vortragsredner aller Zeiten führte er Jugendliche anhand einer brennenden Kerze in dieses Thema ein: „Stände die Wahl nur in meinem Belieben, so möchte ich dieses Thema wohl jedes Jahr zum Ausgang meiner Vorlesungen nehmen, so viel Interessantes, so mannigfache Wege zur Naturbetrachtung im Allgemeinen bietet dasselbe dar. Alle im Weltall wirkenden Gesetze treten darin zu Tage oder kommen dabei wenigstens in Betracht, und schwerlich möchte sich ein bequemerer Tor zum Eingang in das Studium der Natur finden lassen.“ Mit diesen Worten begrüßte Michael Faraday im Jahr 1861 die Kinder, die seine Weihnachtsvorlesungen zur „Naturgeschichte einer Kerze“ besuchten. Wir nehmen den didaktischen Geniestreich Faradays auf, die Kerze zum Mittelpunkt einer Einführung in die Naturwissenschaften zu wählen. Eine Mitschrift seiner Experimentalvorlesung ist erhalten geblieben⁸² und dient als Vorlage. 150 Jahre später folgen wir seiner Lehridee, greifen aus seinen rund 100 Experimenten zentrale Versuche heraus und gestalten den Unterricht für unsere heutigen Anforderungen. Immer wieder tauchen Fragen auf, die den Weitergang bestimmen, führen von einem Versuch zum nächsten, von Szene zu Szene, von Akt zu Akt. Zu allen Überlegungen, Informationen, Ideen und Experimenten fertigen die Kinder im Verlauf des Unterrichts Zeichnungen und Texte an, die im eigenen Schülerheft einen lebendigen Eindruck ihres Lernprozesses wiedergeben.

Ouvertüre

1. Vier Bienenwachskerzen, die bereits unterschiedlich lange gebrannt haben, stehen zu Beginn in einer Reihe auf dem Pult und spenden das einzige Licht im Raum. Unter der Leitfrage: Kerze: woher – wohin? wird zunächst festgestellt, woher das Wachs eigentlich kommt: Wir gelangen zu den Bienenwaben und dem Wachs, das Arbeitsbienen aus Segmenten ihres Unterleibs schwitzen, während sie von Blüte zu Blüte fliegen, trinken und mit Pollen und Nektar bepackt zurück zum Stock fliegen, um Nahrung zu bringen und weitere Waben zu bauen. Also stammen die Waben ursprünglich von den Bienen, und der Baustoff dafür von den Pflanzen! – Brauchen die Pflanzen eigentlich auch etwas, um Nektar liefern zu können für die Bienen, für die Waben, für die Kerzen? Sie brauchen Nährstoffe, Regenwasser oder Tau, Sonnenenergie und Kohlendioxid, aus denen die Kerze im Ursprung hervorgeht. Stellvertretend für diese ungeheure Stofffülle werden auf dem Pult schließlich aufgebaut: eine Wabe, eine Bienenweide und vier Gefäße mit Wasser, Erde und – eher symbolisch – mit Licht und Luft.

Wenden wir uns der anderen Seite unserer Kerzenreihe zu, so stellen wir fest, dass die kleinste Kerze bald erloschen sein wird. Wohin geht eine Kerze, wenn sie verbrennt? Wird sie, so wie es scheint – nichts? Um dieser Frage nachgehen zu können, müssen wir zunächst eine brennende Kerze genau betrachten. Denn das Brennen ist offensichtlich verantwortlich dafür, dass eine Kerze immer kleiner wird und bald ganz verschwindet. Bleibt wirklich gar nichts von ihr übrig? Dieser Frage spüren wir gemeinsam mit Michael Faraday in den kommenden Unterrichtsstunden nach.

2. Wissen wir eigentlich genau, wie eine brennende Kerze aussieht? Wir versuchen sie aus unserer Erinnerung heraus zu zeichnen und vergleichen, sobald jeder seine eigene Kerze auf dem Schülerpult stehen und entzündet hat, unsere Vorstellung mit der Realität: Auf dem Docht sitzt die Flamme in Form einer Mandel, warm gelb-orange leuchtet der Flammenman-

⁸¹ Sämtliche Zeichnungen S.W. Abbildung 3 aus: Müller, Jahrtausendturm 1999, S. 78f.

⁸² Faraday, Kerze, Zitat S. 25

tel, dunkelbraun erscheint der Flammenkern, umgeben ist die Flamme von einer Aura warmen Lichts. Beim näheren Hinsehen erkennen wir, dass der Flammenmantel in Dochnähe auf einem dicken blauen Mantelsaum sitzt, der im oberen Bereich dünner wird, in ein dunkles Orange übergeht und zur Spitze hin sich wieder verbreitert.

3. Schließlich machen wir uns vertraut mit Michael Faraday und seiner Forscherleistung, seiner Forschungsmethode, die Modell wird für unsere Vorgehensweise, und vor allem mit der Mitschrift seiner Weihnachtsvorlesungen, die uns helfen soll, die Kerze besser zu verstehen.



1. Kerze: Woher – Wohin?



2. Die Erinnerungskerze



3. Faradays Weihnachtsvorlesung über die Kerze

I. Akt. Was ist los in der Flamme?

4. Als dann führen wir mit Faraday ein erstes Experiment durch, das uns mitten hinein führt in die spannende Frage nach dem Brennstoff einer Kerze: den Flammensprung. Wenn eine Kerze ausgepustet wird, entweicht dem Docht eine weiße Nebelfahne, die sich mit einem brennenden Streichholz wieder entzünden lässt. Ein Flämmchen springt vom Streichholz zum Docht herab, und wieder brennt die Kerze. Der Flammensprung hat die Suche nach dem Brennstoff initiiert. Im Verlauf des Unterrichts betrachten wir die Kerze weiterhin physikalisch und identifizieren dabei der Wachsdampf als das eigentlich Brennbare. Er wird im Hohlraum um den Docht lokalisiert, wohin er gelangt, weil er flüssig vom Wachssee durch Kapillaren im Docht angeliefert und durch die Hitze inmitten der Flamme in den gasförmigen Zustand versetzt wird. Die Schülerinnen lernen die Aggregatzustände des Wachses kennen, schlagen die allermeisten Versuche selbst vor und führen sie eigenständig durch.

5./6. Was also brennt – der Docht? – das Wachs? Die Verfechter der Dochttheorie entzünden einen nagelneuen Baumwoll-Docht. Entgegen ihrer Erwartungen glimmt er nur ein wenig vor sich hin und erlischt, weil ihm die Nahrung fehlt. Also muss es das Wachs sein, das brennt. Der Kerzenkörper jedoch brennt nur oben am Docht, denn sonst würde ja die ganze Kerze in Flammen stehen. Erst wenn wir das feste Wachs erhitzen, es zuerst flüssig und schließlich dampfig wird, lässt es sich entzünden. Ein Flammenmeer bildet sich im siedenden Wachs aus einem Tiegel über dem Bunsenbrenner.



4. Der Flammensprung



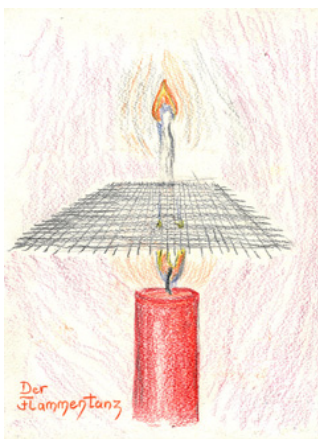
5. Die Aufgabe des Dochts



6. Das Flammenmeer

7. Den festen Zustand des Waxes finden wir im Kerzenkörper, den flüssigen im kleinen Wachssee, der sich unterhalb der heißen Kerzenflamme am oberen Rand des Kerzenkörpers gebildet hat. Aber wo befindet sich in der Kerze dampfiges Wachs? – Man müsste hineinschauen können ins Flammeninnere. Wieder hilft Faraday und zeigt einen Trick, wie das gelingen kann: Mit Hilfe eines unverzinkten Drahtgitters, das knapp oberhalb des Dochtes waagrecht in die Flamme gehalten wird, lässt sich die Flamme quer „aufschneiden“. Ein Flammenkelch ist unterhalb des Gitters zu sehen, und aus seinem hohlen Zentrum, dem Flammenkern, entweicht weißer Wachs Dampf, der sich oberhalb des Gitters sogar anzünden lässt. Eine Flämmchenspitze tanzt über dem Gitter auf und ab, wenn wir es leicht bewegen, sie wird beim Aufsteigen blässer, lässt sich wieder aufs Gitter zurückholen und ist im nächsten Moment entfliegen.

8./9./10. Der Dampf aus dem Inneren der Flamme muss also der Brennstoff der Kerze sein. Stimmt das wirklich? Wenn wir ihn einsammeln, können wir feststellen, ob es sich tatsächlich um Wachs handelt. Dies gelingt auf zweifache Weise: kurzzeitig durch ein kleines Glasröhrchen, mit dem man den Dampf ableiten und am Ende anzünden kann, so dass eine kleine Tochterflamme entsteht, und nachhaltiger mithilfe eines Versuchs, dessen Aufbau auf dem Titelbild seiner „Naturgeschichte“ zu sehen ist: mit einer Dampfleitung, die vom Flammeninneren über ein am Stativ befestigtes Glasrohr zu einem großen Kolben führt, der sich allmählich mit fließendem weißen Nebel füllt und anschließend über einer brennenden Kerze ausgeschüttet wird. Eine Stichflamme erhebt sich über der Kerze, und im Kolbeninneren bleibt eine dünne weiße Wachsschicht zurück. Doch weder im Kolben noch in der Glasleitung hat der Wachs Dampf gebrannt, sondern lediglich an der frischen Luft. Ihm fehlt in den Glasgefäßen der Luftsauerstoff, ohne den jede Flamme „erstickt“.



7. Der Flammertanz



8. Die Tochterflamme



9. Wachsdampf sammeln



10. Erlöschen der Flamme

II. Akt. Was ist los in der Flamme?

Nun steht die Kerzenflamme im Mittelpunkt. Die Schülerinnen und Schüler lernen Ruß als Zwischenprodukt, Wasser und Kohlendioxid als Endprodukte des Verbrennungsprozesses kennen und begegnen zum ersten Mal der Chemie, derjenigen Wissenschaft, die grundlegende Verwandlungen von Stoffen analysieren kann.

11. Schon beim Flammentanz kann man beobachten, dass schwarzer Ruß aus der Flamme entweicht, wenn wir das Gitter in den Flammenmantel halten statt in den Flammenkern. Auch unsere Glasröhrchen sind am Ende voller Ruß. Die Kerze wird zum Rußen gebracht, und wir stellen fest: Sobald eine Flamme beim Brennen gestört wird, rußt sie. Das ist alltäglich: Jeder kennt rußende Kerzen – aber die Beobachtung ist uns in ihrer Merkwürdigkeit dennoch kaum bewusst. Wie kommt das – schwarzer Ruß aus einer weißen Kerze? Wir probieren verschiedenfarbige Kerzen aus, um uns richtig klar zu machen, dass die Kerze eigentlich schwarz oder zumindest grau sein müsste. Und weiter: Sobald die Flamme wunderschön mandelförmig und ungestört brennen kann, ist der Ruß wieder verschwunden! Ruß, das heißt elementarer Kohlenstoff, muss also bei der Verbrennung kurzzeitig entstehen. Der Kerzenwachsdampf muss sich beim Brennen verwandeln, Ruß als völlig neuer Stoff muss wohl dabei entstehen. Er ist weder vorher noch nachher zu finden, sondern nur in der Flamme selbst.

12./13. Wir betrachten die Projektion einer brennenden Kerze im Licht eines Diaprojektors: Ein am Flammensaum aufsteigender Luftstrom formt die Flamme, erhitzt sich dabei und bildet an der Flammenspitze einen deutlich sichtbaren Wirbel. Nun finden wir zur Lösung des erstaunlichen Phänomens: Der wachsdampferfüllte Flammenkern, dort, wo die Flamme dunkel ist und kein Licht gibt, erscheint im Flammenbild auf der Leinwand hell. Der Flammenmantel jedoch, der am hellsten strahlt, wirft in der Projektion einen dunklen Schatten. Dort müssen sich feste Teilchen befinden, die kein Projektorlicht durchlassen. – Ruß? Unsere Vermutung wird durch ein Feuerwerk bestätigt: Nacheinander werden Aluminiumstaub, Eisen- und Kupferspäne in die nichtleuchtende Bunsenbrennerflamme gepustet. Sie leuchten weißgelb, rot und grün. Erst wenn Ruß oder Kohlenstaub in die Flamme gepustet wird, leuchtet die Bunsenbrennerflamme im warm-orangen Farbton unserer Kerzenflamme.

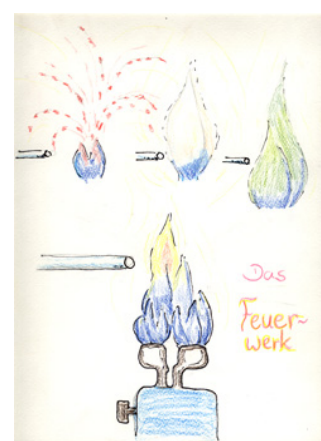
Ruß also ist Träger der Leuchtkraft, er glüht in der Flamme und spendet dabei Wärme. Ruß ist verbrennender Wachsdampf, der aus der Kerze stammt und sich auf dem Weg durch die heiße Flamme grundlegend verwandelt. Am Flammenrand, wo er mit dem aufsteigenden Luftstrom in Berührung kommt, verschwindet er im Verglühen. Er ist ein echtes „Zwischenprodukt“ der Verbrennung, denn er lässt sich lokalisieren auf die helle Zone des Flammenmantels zwischen Wachsdampf im Flammenkern und Luftstrom jenseits des Flammensaums. Im Leuchten und Wärmen verschwindet die Kerze. Endgültig? Nichts bleibt mehr? – Hier empfiehlt sich ein Innehalten, während dessen alle ihre Gedanken zum Ausdruck bringen, in Form eines Gedichts, eines Essays oder eines Bildes.



11. Schwarzer Ruß aus weißer Kerze!



12. Die Projektion der Flamme



13. Das Feuerwerk

Es zeigt sich, dass uns Menschen unwohl ist bei dem Gedanken des Verschwindens von Stoffen aus der Welt. Er hat etwas existentiell Bedrohliches an sich, er lässt uns keine Ruhe, sondern provoziert weitere Fragen, auch wenn die physikalischer Beobachtung offenkundig scheint. Wir müssten noch genauer – vielleicht anders – experimentieren können, um herauszufinden, ob unser bisheriges Untersuchungsergebnis wirklich stimmt. Alle haben die heißen Luftwirbel über der brennenden Kerze in der Flammenprojektion beobachtet. Könnte man diesen Wirbel über der Flamme irgendwie einfangen und analysieren?

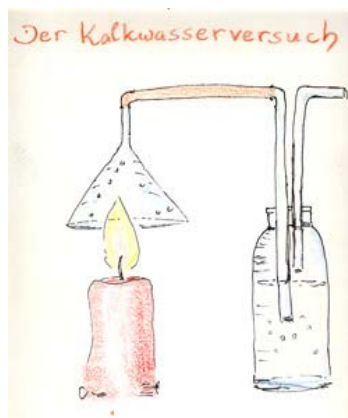
14. Wenn man ein feuerfestes Glas schräg über die Flamme hält, beschlägt es sofort. Wieder hilft uns Michael Faraday, diesmal mit einer komplizierteren Apparatur, bei der chemischen Analyse der Verbrennungsprodukte: Durch eine Wasserstrahlpumpe gelingt es, die heiße Luft oberhalb der Kerze abzusaugen. Wir leiten sie durch ein U-Rohr, das mit Eiswasser gekühlt wird, damit es besser beschlagen kann (Kühlfälle). Nach ein paar Minuten sammelt sich eine klare Flüssigkeit im U-Rohr. Nach einer Schulstunde ist das U-Rohr nahezu voll. Voll was? – Es riecht ein bisschen rußig, was keinen verwundert, ansonsten sieht es aus wie trübes Wasser. Wasser? (Es ist tatsächlich Wasser. Faraday erbringt in der dritten Vorlesung einen einfachen Wassernachweis mit dem gerade entdeckten Kalium, das in Gegenwart von Wasser mit violetter Flamme tanzend und zischend verbrennt. Sehr einfach lässt sich das Wasser auch durch Erhitzen nachweisen. Es hat die gleiche Siedetemperatur wie Hahnenwasser) – Unglaublich! Normalerweise löscht man doch Feuer mit Wasser, hier gewinnen wir in der Luft über der Flamme Wasser mitten aus dem Feuer! Echtes „Feuerwasser“!

15. Für das Erschließen des zweiten Endproduktes der Verbrennung, des Kohlendioxids, haben die in der chemischen Betrachtung noch unerfahrenen Schülerinnen und Schüler keinerlei Anhaltspunkt. Wieder hilft Michael Faraday und führt uns dazu einen Versuch vor: Der heiße Luftstrom über der Flamme wird in eine Waschflasche geleitet, die mit Kalkwasser (der Lauge Calciumhydroxid) gefüllt ist, welche sich sofort milchig-trüb verfärbt. Dasselbe passiert, wenn wir unsere Atemluft durch die Lösung leiten oder wenn wir reines Kohlendioxid hindurchleiten. Frische Luft jedoch trübt die Flüssigkeit nicht (oder besser kaum und erst nach längerer Zeit). Bei der Verbrennung entsteht also ein zweites Neues: „Kohlenluft“, d.h. Kohlendioxid, zu dem der Ruß beim endgültigen Verbrenen wird.

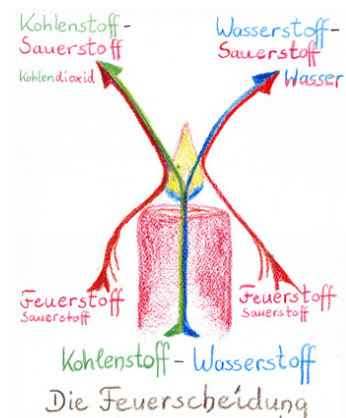
16. Die Kerze ist weder schwarz, noch riecht sie anders als nach Wachs, noch lässt sie sich auswingen. Und doch stammen der Ruß und kurz darauf die Kohlenluft und das Wasser in irgendeiner Weise aus dem Kerzenwachs. Ursprünglich fest miteinander verbunden, sind Kohlenstoff und Wasserstoff in der Hitze des Feuers voneinander geschieden worden. Beide, der Kohlenstoff und der Wasserstoff, haben in der Flamme einen neuen Partner gefunden, jeder für sich den vorbeiströmenden Sauerstoff, und entweichen nun als „Kohlenluft“ (oder Kohlendioxid) und „Feuerwasser“ über der Flamme hinaus in Welt. – Die Chemiker nannte man früher „Scheidekünstler“, weil sie die Kunst verstehen, Stoffverbindungen zu trennen und völlig andere Stoffverbindungen mit neuen Eigenschaften zu analysieren oder gar herzu-



14. „Feuerwasser“



15. „Kohlenluft“



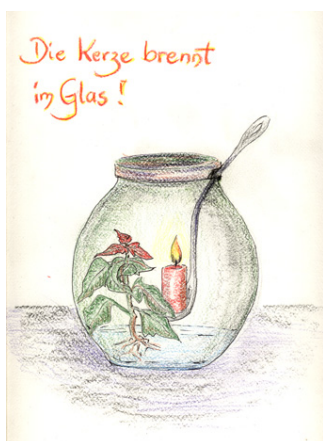
16. Die Feuerscheidung

stellen. Ein Gefäß mit Ruß, ein Fläschchen „Feuerwasser“ und eine Waschflasche mit Kalkwasser stellen wir in die Kerzenreihe auf dem Pult neben die längst verlöschte kleinste Kerze.

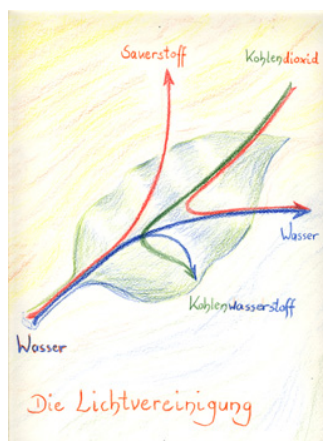
III. Akt. Kerze. Wohin – woher?

17./18. Am Ende des Unterrichts findet der Verbrennungsprozess der Kerze sein Gegenüber in der Photosynthese der grünen Pflanzen. Die Pflanzen brauchen Wasser, das sich in der Atmosphäre sammelt, auf die Erde regnet und durch die Wurzeln zum Wachsen aufgenommen werden kann. Und sie brauchen Kohlenluft, um im Sonnenlicht frische Luft zu produzieren. Das zeigt ein einfacher Versuch: Eine Kerzenflamme, die in ein mit Kohlenluft gefülltes Glas gehalten wird, erlischt sofort. In einem mit Frischluft gefüllten Glas brennt sie einige Sekunden lang. Und sie brennt genauso lange in einem Glas, in dem eine grüne Pflanze einen Tag in der Sonne und im Wasser stand und das zuvor mit Kohlenluft gefüllt wurde. Die Feuerscheidung – Pyro-Lyse – und die Lichtverbindung – Photo-Synthese – der grünen Pflanzen sind über den Wasser- und den Kohlenstoffkreislauf miteinander verbunden. Beide Prozesse bilden ein wertvolles und sensibles Gleichgewicht zwischen Geben und Nehmen, das der Mensch nicht über Massen strapazieren darf.

19. Ein Blick auf unsere Kerzenreihe zeigt: Am vorderen Ende stehen die grünen Pflanzen, die Erde, Wasser, Licht und Luft zum Leben brauchen. Die Kerzenflamme gibt den Pflanzen „Feuerwasser“, das als Regen auf die Erde fällt, und „Kohlenluft“, die sie durch ihre Blätter aufnehmen, zum Leben. Die Pflanzen bilden daraus neue Kohlenwasserstoffverbindungen: Kohlenhydrate – Blätter, Sprosse, Wurzeln – die für unser Leben Nahrungs-, Licht- und Wärmequellen sind, und „frische“ Luft, den Sauerstoff, der uns atmen und die Kerze brennen lässt.



17. Pflanzen verwandeln kohlendioxidreiche Luft in sauerstoffreiche Luft



18. Die Lichtverbindung im grünen Blatt



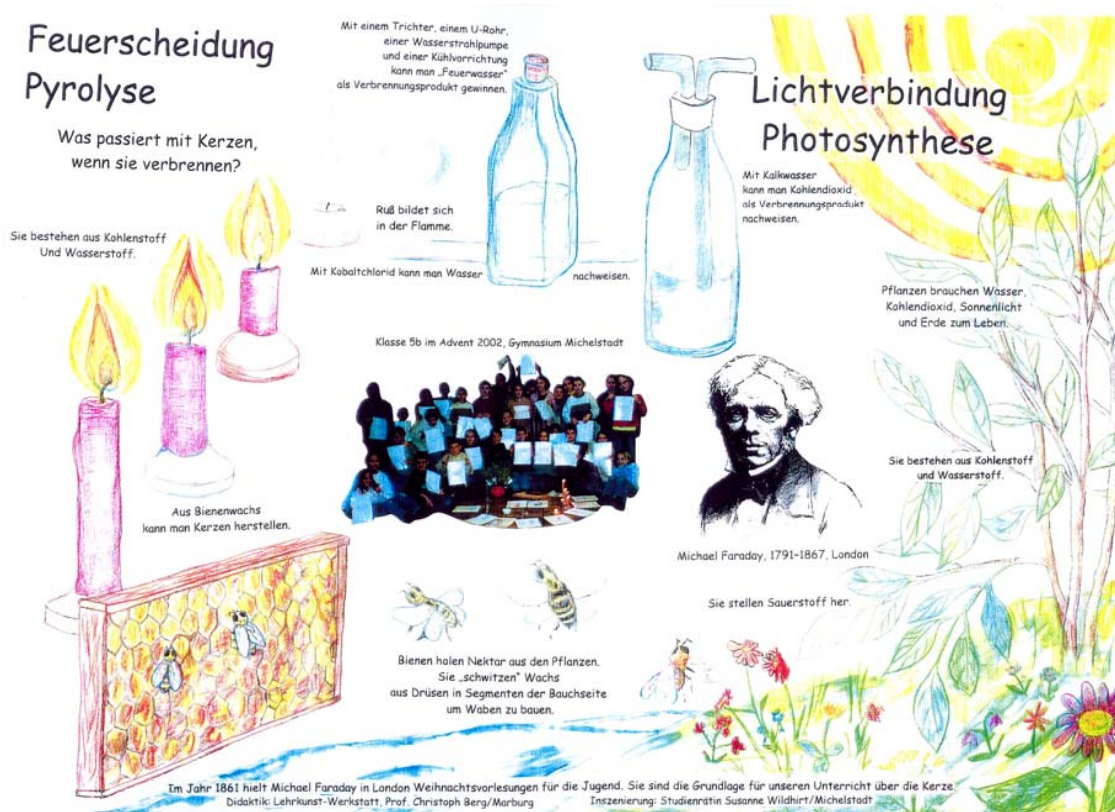
19. Die Kerze im Kreislauf der Welt

Wir bauen die Kerzenreihe um zu einem Kreis, dessen Lauf die Kraft der Sonne in Schwung hält. In dessen Mitte spricht Faraday zu den Schülern: „Und so sehen wir denn Alles sich regen zu dem einen großen Werke, die beiden lebendigen Reiche der Schöpfung einander dienstbar zu machen. Alle Bäume, Sträucher und Kräuter der Erde nehmen Kohlenstoff auf; sie nehmen ihn durch die Blätter aus der Luft, in die wir und alle Tiere ihn in Gestalt von Kohlenluft (orig.: „Kohlensäure“) entsendet haben, und sie wachsen und gedeihen darin. Gebt ihnen ganz reine Luft, wie sie uns am dienlichsten ist – sie werden dahinwelken und absterben; gebt ihnen Kohlenluft, und sie werden wachsen und sich wohlbe finden. Alle Kohle in diesem Stück Holz, ebenso wie in allen Pflanzen, stammt aus der Atmosphäre, welche die Kohlenluft aufnimmt, die uns schädlich, jenen aber nützlich ist – was dem Einen den Tod brächte, dem Andern bringt es Leben. Und so sehen wir Menschen uns abhängig nicht nur von unseren Nebenmenschen, sondern abhängig von aller Mitkreatur, sehen und mit dem All

der Schöpfung zu einem großen Ganzen verbunden durch die Gesetze, nach denen jedes Glied zum Heile der anderen lebet und webet und schafft“.⁸³

Finale

20. Das Kerzendrama ist abgeschlossen. Wir blicken zurück auf rund 20 Stunden intensiver Auseinandersetzung mit der Kerze und haben dabei einen weiten und tiefen Einblick in drei Naturwissenschaften gewonnen. Zuletzt versuchen wir, den Unterricht in seinen Erkenntniswegen und Resultaten abzubilden in Form eines Denkbildes zur Erinnerung. Während die einen das Plakat malen, verfassen die anderen kleine Texte oder Untertitel dazu. Wieder andere räumen auf oder helfen dabei, eine Ausstellung aufzubauen oder eine Präsentation für die Nachbarklasse oder die Eltern vorzubereiten. Und jeder nimmt am Ende eine gezogene Kerze und einen gegossenen Kerzenständer mit nach Hause. Der Unterricht endet womöglich mit Faradays besinnlicher Betrachtung der Kerzensymbolik: „Und so wünsche ich Euch denn zum Schluss unserer Vorlesung, dass Ihr Euer Leben lang den Vergleich mit einer Kerze bestehen möget, dass Ihr wie sie eine Leuchte sein möget für Eure Umgebung, dass Ihr in allen Euren Handlungen die Schönheit einer Kerzenflamme widerspiegeln möget, dass Ihr in treuer Pflichterfüllung Schönes, Gutes und Edles wirket für die Menschheit.“⁸⁴



20. Denkbild zum Kerzenlehrstück

⁸³ Faraday Kerze, S. 191f.

⁸⁴ Ebd., S. 195

3.6 Erfahrungen und Ratschläge für KollegInnen

Das Kerzenlehrstück ist als „Klassiker“ seit den 90er Jahren rund 40 Mal unterrichtet worden. Der erste Akt lässt sich mit Primarschülerinnen und Schülern der Jahrgangsstufen 1-4 durchführen, für die 5.-9. Klasse liegen zahlreiche Erfahrungen mit dem gesamten Lehrstück vor. Eine Oberstufen-Kerze ist in Planung. Die neue Ouvertüre hat sich in allen Jahrgangsstufen bislang bewährt. Ich blicke auf vier Durchführungen in den Jahrgangsstufen 5-7 am Gymnasium, im integrierten Unterricht der Förderstufe und an der Hauptschule zurück. Die Klassengrößen betragen 28, 31 und 34 Kinder und waren für die Durchführung unerheblich. (Allerdings steigt der Aufwand für Zwischenrückmeldungen, die sich durchweg sehr bewährt haben, weil die Texte individuell verfasst und eigene Fragestellungen und Ideen verfolgt wurden.) Folgende Erfahrungen möchte ich gerne weitergeben:

- **Grundlegendes.** Die Kerze zu enträtseln ist ein motivierendes Unternehmen, sobald die verdunkelnden Selbstverständlichkeiten durchbrochen werden können, die mit der Alltäglichkeit des Gegenstands, den bereits erfolgten – zumeist ungenauen – Beobachtungen sowie mit den (meist vorhandenen) Vorkenntnissen um die Reaktionsgleichung der Kohlenhydrat-Verbrennung verbunden sind. Je weiträumiger die Anfangsfragen in der Ouvertüre gestellt oder gefunden werden, umso fruchtbarer und persönlicher gestaltet sich der Zugang zum Thema, umso höher ist dauerhaft die Schülerinnen- und Schüleraktivität.
- **Inszenierungszeitraum und –dauer.** Jahreszeitlich passt die *Kerze* sehr gut in die Vorweihnachtszeit: Die Tage sind dunkel, so dass vor allem im ersten Akt gut experimentiert werden kann, ohne dass der Raum künstlich verdunkelt werden muss. In der Natur herrscht Einkehr, und auch die Kinder konzentrieren sich ruhiger und genauer auf den Gegenstand als in den übrigen Jahreszeiten. Nicht umsonst wählte auch Faraday das Thema für die ansonsten betriebsame Vorweihnachtszeit. Einige mir bekannte Inszenierungen begannen kurz vor den Weihnachtsferien und wurden im neuen Jahr weitergeführt. Für diesen Fall empfehle ich eine kurze wiederholende Experimentierphase der Versuche zum Wiedereinstieg nach den Ferien, um den Handlungsbogen erneut zu spannen. Die Unterrichtsdauer hängt im Wesentlichen von dem Alter der Schülerinnen und Schüler ab: Bei den Größeren kann stärker gestrafft werden als in der beschriebenen Durchführung. Minimal dauert die Inszenierung des Ganzen m.E. 12 Lektionen, maximal 24. Auf bewusstes Anknüpfungen an Vorwissen würde ich generell verzichten. Es kommt von selbst zum Tragen (eventuell kennt die Lerngruppe die Wasserstrahlpumpe oder die Kühlfalle etc.), wenn nicht, so stört die Erinnerung an bekannte Phänomene oder Themen (eventuell die Atmung, andere Oxidationsvorgänge etc.) eher den genetischen Prozess, als dass sie ihm dienlich wären.
- **Die Figur Faradays.** Nach meiner Auffassung sollte Faraday auf alle Fälle in die Durchführung integriert werden. In meiner ersten Inszenierung habe ich wie Theopel von Faraday erzählt – für den weiteren Verlauf spielte er keine entscheidende Rolle mehr. Das Auftreten Faradays wirkte sich in den späteren Inszenierungen sehr positiv aus: Die Schülerinnen und Schüler interessieren sich für seine Biographie, stöbern unaufgefordert in Lexika oder im Internet zuhause oder während der Pausen weiter, interessieren sich für das Faraday-Büchlein, finden eine Briefmarke oder einen Pfundnotenschein mit seinem Portrait usw. Zitate Faradays können leicht und organisch in den Unterricht eingebaut werden, ohne künstlich zu wirken. Die Durchführung gestaltet sich insgesamt authentisch. Ein weiterer Aspekt kommt hinzu: Die Lehrperson wird Teil der Forschungs- und Bildungsgemeinschaft im Gespräch um die Kerze. Auch als Modell für das eigene Beobachten, Fragen und Forschen wirkt Faraday intensiv. Manche übernehmen seine Fragehaltung, die sich in den eigenen Texten später wieder findet. Das noch ungeübte individuelle Protokollieren wird speziell bei Jüngeren sehr erleichtert, die Zeichnungen sind besser. Ein Phänomen – m.E. das wichtigste – kommt hinzu, das ich immer wieder sowohl bei Kindern im Unterricht als auch bei Erwachsenen in der Aus- und Weiterbildung

(Studierenden, KursteilnehmerInnen, TeilnehmerInnen bei Impulsveranstaltungen) beobachtet habe: Die kreisende Fliege Faradays konzentriert nicht nur auf die Rolle der Person, die einen Versuch eventuell gerade demonstriert, sondern sie regt darüber hinaus die Lernreflexion erheblich an. Wer die Fliege hat, beginnt beim Vormachen ganz selbstverständlich und unaufgefordert zu sprechen: darüber, was er/sie gerade tut, warum so und nicht anders, warum diese Art der Durchführung besonders erfolgreich ist, welche Versuchsbedingungen herrschen müssen, welche Idee relevant ist, welche Ergebnisse erwartet werden, etc.⁸⁵ Dies mitzuerleben ist äußerst spannend für alle Beteiligten. Und: Es braucht nichts weiter als eine Fliege.

- **Dramaturgische Schlüsselstellen.** Die *Kerze* bekommt eine Eigendynamik, wenn sie zur Aufführung gebracht wird. Bei der Gestaltung einer (halb-) öffentlichen Kerzenpräsentation kann sich die Lehrerin/der Lehrer auf die Kinder oder Jugendlichen verlassen. Vertrauensvorschuss ist hier ein wesentlicher Faktor für die Gemeinschaftsbildung und für Selbstwirksamkeitserfahrungen. Und: Die Eltern freuen sich, wenn sich ihnen ein Fenster auftut für den Einblick in die herrschende Unterrichtskultur mit Werkstattcharakter. Damit den Schülerinnen und Schülern eine solche Werkaufführung möglichst eigenständig gelingen kann, ist es notwendig, im Unterricht an bestimmten Stellen die Akzente klar zu setzen. (Wo befinden wir uns gerade? Um welche Frage geht es? Was haben wir genau beantwortet durch dieses Experiment?) Insbesondere an den Aktgrenzen gilt es sorgfältig die Erkenntnisse zu sichern und neue Aspekte für den Weitergang klar herauszupräparieren. (Wichtig ist dies insbesondere beim Übergang von der physikalischen zur chemischen Perspektive, d.h. zwischen dem I. und II. Akt).
- **Heftführung.** Es ist besonders lernwirksam, wenn zu Beginn des Unterrichts ein neues Themenheft verfügbar ist. Es dient als ‚Spielwiese‘ und Instrument für das Formulieren eigener Ideen und Vermutungen, als Protokollheft für die gesicherten Erkenntnisse und sauberen Durchführungen, als Skizzenheft für Entwürfe und Zeichnungen (die am besten in unterschiedlichen Farben gezeichnet und geschrieben werden) – als den eigenen Lernprozess abbildendes Lernjournal für alles.
- **Einpassung in den schulischen Kontext.** Es ist günstig, wenn der Kerzenunterricht immer im selben Raum stattfinden kann, wo es die Möglichkeit gibt, die Materialien aufzubewahren. Das Umhertragen von gerade ausgepusteten Kerzen am Ende einer Lektion ist mühsamer als die Raumplanung im Vorfeld.
- **Fächerverbindung.** Nach meiner Auffassung ist es gut, wenn die Kerze in einer kleinen Epoche durchgeführt werden kann. Eine Kombination einer Naturwissenschaft (es muss nicht Chemie sein) mit Deutsch empfiehlt sich daher insbesondere für die jüngeren Jahrgänge. Für die Jahrgangsstufen 7-9 (10) ist die Fächerverbindung nicht unbedingt erforderlich. Eventuell bietet die Schule die Option, das Lehrstück im Wahlbereich zweistündig durchzuführen. Der Handlungszusammenhang reißt leichter, wenn sich die Durchführung über mehr als vier bis fünf Wochen in dosierten Miniportionen erstreckt. Besonders günstig ist die Platzierung in der integrierten Naturlehre.
- **Materialkiste.** Sofern das Kerzenlehrstück fester Bestandteil des eigenen Unterrichtsrepertoires ist, empfehle ich, alles Material zur Durchführung in einer Kiste aufzubewahren. Dazu gehört:

⁸⁵ Dieser Effekt sollte m.E. näher untersucht und für die Lehrstückdramaturgie insgesamt geltend gemacht werden.

Grundausrüstung

Ein Kerzenheft pro Schüler/in
 Halb so viele Kerzenständer wie Schülerinnen und Schüler der Lerngruppe
 Dito: Haushaltskerzen
 Dito: Schälchen für Streichhölzer
 Dito: Unterlage
 Massig Streichhölzer
 Ein bis mehrere Eimer Wasser für den Notfall
 Zeichenpapier
 Kleber
 Schere
 Fliege am Reif (kann an einen Haarreif angeheftet werden, ist auch mit Reif erhältlich)

Für den Lehrertisch

Drei bis vier unterschiedlich weit abgebrannte Bienenwachskerzen in Kerzenständern
 Eine Haushaltskerze für die Durchführung der Experimente
 Kaminstreichhölzer

Ouvertüre

Eine neue Bienenwachskerze
 Bienenwabe
 Bienenweidepflanze
 Vier gleiche Gläser, gefüllt mit Erde, Wasser, „Luft“, „Licht“
 Bild von Faraday
 Buntstifte
 Zeichenpapier

I. Akt:

Eventuell Lineal (Flammensprung)
 Gefärbtes Wasser im großen Becherglas, Handtuch (Kapillarwirkung des Dochtes)
 Bunsenbrenner oder Gasbrenner (Flammenmeer)
 Emailtöpfchen mit etwas Bienenwachs, Deckel, gegebenenfalls Experimentierklammern (Flammenmeer)
 Halb so viele unverzinkte Drahtgitter (Hasenstallgitter, lässt sich mit der Schere schneiden) wie Schülerinnen und Schüler der Lerngruppe
 Glasröhrchen (Apotheke, Schulversand), Glasschneider, Pfeifenputzer, kleine Wäscheklammern (Tochterflamme)
 Eventuell feuerfeste Glasplatte
 Gebogenes Glasröhrchen, Erlenmeyerkolben, gegebenenfalls Stativ (Wachsdampf sammeln)
 Großes Becherglas (Ersticken der Flamme)

II. Akt

Verschiedenfarbige Kerzen, Porzellanschälchen, Bunsenbrenner oder Gasbrenner (Schwarzer Ruß aus unterschiedlich farbigen Kerzen)
 Diaprojektor, Leinwand (Flammenform und Rußnachweis in der leuchtenden Flamme)
 Strohhalme o.ä., Kohlenstaub, Kupferspäne, Magnesiumspäne, Eisenspäne ... (Feuerwerk)
 U-Rohr, Wasserstrahlpumpe, kleines Aquarium, Eiswasser, Gummischläuche, Stativ, Trichter, verschließbares Fläschchen oder Glas (Feuerwasser-Sammeln)
 3-4 Waschflaschen (Schulversand), kleine CO₂- Gasflasche, Trichter, Gummischlauch, Kalkwasser, eventuell Wasserstrahlpumpe (Kohlendioxidnachweis)

III. Akt

3 Liter-Wasserflaschen aus Glas mit Deckel
 1 kleine Kerze, an Draht montiert
 1 grüne Pflanze (gut geeignet: Kirschlorbeer)
 Etwas Wasser für alle Flaschen
 Eventuell Pflanzenwachstums-Glühbirne (Sonnenlicht-Glühbirne) für trübe Tage

Finale:

Plakat
 Wasserfarben oder Buntstifte oder andere Farben
 Material zum Kerzenziehen
 Material zum Kerzenständer-Gießen: Ich empfehle Porzellangussmasse, Formen, eventuell Lack (es gibt ökologisch vertretbare Lackierungen, die dauerhaft halten.)
 Alle oben genannten Materialien.

- **Das Denkbild.** Das Denkbild entsteht zuletzt, wenn alle Erkenntnisse zusammengekommen sind. Es empfiehlt sich, in einer Teilgruppe oder im Plenum die Gestaltung des Denkbildes festzulegen. Falls keine Ausstellung oder Aufführung geplant ist, kann auf ein gemeinschaftliches Bild (von der ganzen Klasse oder in Gruppenarbeit gestaltet) verzichtet werden. Im eigenen Heft sollte es nicht fehlen. Die Schülerinnen und Schüler sind nahezu selbständig fähig, ein sachgemäßes Denkbild zu entwerfen, das den Kerzenkreislauf darstellt. Dabei sollte beachtet werden, dass der Mensch in den Kreislauf einbezogen ist (dies entspricht Faradays Auffassung und ist sachlich angemessen, indem es die Sensibilität des ökologischen Gleichgewichts und die Verantwortlichkeit des Umgangs mit Ressourcen aufzeigt).
- **Selbsttätigkeit und Partizipation.** Ich empfehle für die Dauer der Epoche feste Lernpartnerschaften zu bilden. Die wechselseitige Abhängigkeit für das Gelingen von Experimenten ist relativ hoch. Nach meiner Erfahrung arbeitet jeder mit jedem zusammen. Falls eine ungerade Schülerzahl vorhanden ist, neige ich persönlich eher dazu, mit einem Kind gemeinsam zu arbeiten als eine Dreiergruppe zu bilden. Konstruktive Partizipation ist immer gefragt und erwünscht. Der Schüler-Anteil an der Festlegung des Weitergangs im Lernprozess ist tendenziell sehr hoch. Darüber hinaus wird von jedem erwartet, für die eigene Kerze (vor allem für deren gleichmäßiges Brennen), für den Arbeitsplatz und den Raum Sorge zu tragen.
- **Ermittlung der Qualität der Lernergebnisse.** Zur Überprüfung des Gelernten eignen sich einfache Wissenstests, die Beurteilung des Heftes und die mündliche Beteiligung am Unterricht. Daneben können die Selbst- und Sozialkompetenzen vielfältig beobachtet und mitgeteilt werden. Besonders gute Erfahrungen habe ich mit der Kombination aller Optionen gemacht.