

Peter Stettler
Swiss Science Center Technorama

Irritation im naturwissenschaftlichen Unterricht

Einleitung

„Was muss ein Lehrer/eine Lehrerin können?“ Diese beinahe existentielle Frage hat der bekannte Erziehungswissenschaftler Horst Rumpf anlässlich eines seiner legendären Vorträge gestellt und sogleich selbst beantwortet: „Er/sie muss einen Anfang setzen können, in dem Irritation Platz greift. Was heisst das? Wenn ein Selbstverständliches seine Selbstverständlichkeit verliert, wenn ein Alltägliches, zunächst als selbstverständlich Hingenommenes fragwürdig wird, wenn man wirklich hinguckt und sagt: Das kann doch nicht wahr sein. Wenn das gelingt, dann ist eigentlich alles gewonnen.“

Irritation, Einstieg und exemplarischer Unterricht

Irritationen, wie sie Horst Rumpf beschreibt, haben in einem nach gängigen Maximen geplanten Unterricht wenig Platz. Da glaubt man, zuerst die Grundbegriffe durchnehmen zu müssen. Dann vom Einfachen zum Komplexeren, Stufe für Stufe hinauf, ab und zu einige Beispiele oder ein lustiges Experiment – und viele Übungsaufgaben. Dagegen ist ja grundsätzlich nichts einzuwenden. Nur ist das nicht der einzige Weg, Physik zu unterrichten.

Martin Wagenscheins Konzept vom exemplarischen Unterricht ist eine Absage an die Illusion der Vollständigkeit eines Lehrplans, erschöpft sich aber keineswegs im „Mut zur Lücke“. Wagenschein versteht unter exemplarischen Lehren:¹

Je tiefer man sich eindringlich und inständig in die Klärung eines geeigneten Einzelproblems eines Faches versenkt, desto mehr gewinnt man von selbst das Ganze des Faches.

Und²:

Das Einzelne, in das man sich hier versenkt, ist nicht Stufe, es ist Spiegel des Ganzen – Mundus in Gutta.

Man steigt also nicht „von unten“ in einen Themenkreis, sondern durch einen geeigneten Einstieg nach dem Motto³:

Das Seltsame fordert uns heraus, und wir fordern ihm das Einfache ab.

Also Irritation als Einstieg. Nach gründlicher Auseinandersetzung mit dem gewählten „Exempel“ im sokratischen Unterrichtsgespräch kommen dann die Grundbegriffe, deren es für das Verständnis der Sache bedarf, quasi von selbst zur Sprache. Das soll am Beispiel „Wie sieht das Licht aus?“ verdeutlicht werden.

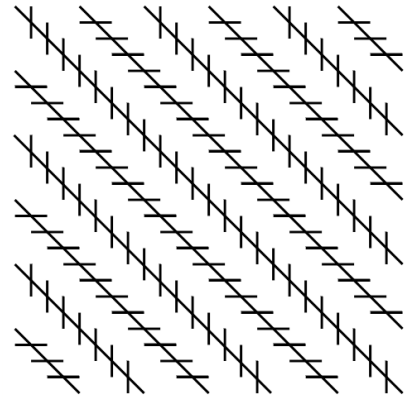
Irritation ist mehrdimensional

Mal abgesehen von Irritationen über gewisse Verhaltensmuster oder schwer nachvollziehbare Erlasse im heutigen Bildungsbetriebs unterscheide ich zwei Typen von Irritationen, was an den zwei folgenden Zeichnungen dargestellt werden soll:

¹ MARTIN WAGENSCHHEIN: *Naturphänomene sehen und verstehen*, Stuttgart: Klett 1980, S. 183

² MARTIN WAGENSCHHEIN: *Verstehen lehren*, Weinheim 1989: Beltz, 8. Aufl, S. 32.

³ *Verstehen lehren*, S. 35.



Die Zeichnung links kann nach einigem, manchmal recht langem Suchen plötzlich völlig anders interpretiert werden. Die Wahrnehmung kippt augenblicklich, ohne Zwischenphasen und ganzheitlich, und man sieht, was das Bild eigentlich darstellen soll. Dieser Eindruck bleibt, auch wenn das Bild – wie in unserem Fall – auf dem Kopf steht. Es ist fast nicht mehr möglich, das ursprüngliche Chaos zu sehen. Das Sehen der intendierten Gestalt ist ein irreversibler Vorgang, durchaus zu vergleichen mit dem Messprozess in der Quantenmechanik.

Auf dem zweiten Bild (Zöllnersche Täuschung) können wir die Parallelität der Linien nachmessen. Aber kaum ist der Masstab weg, stellt sich die Täuschung hartnäckig wieder ein.

Die beiden Wahrnehmungstypen sind komplementär. Vieles, was im Unterricht als Anlass zu Irritationen geeignet ist, liegt zwischen diesen beiden Extremen. Für den „hartnäckigen“ Fall folgendes Beispiel aus meiner lebenslänglichen Lernbiographie:

Maschine mit Granit



Mein Lieblingsexponat am TECHNORAMA steht in der Abteilung „Mathematik“: Ein Granitblock und darauf ein Getriebe mit Motor, sonst nichts. Eine Maschine also, die keinen technischen Zweck hat, und doch von ganz anderer Art ist als die Maschinen von Tinguely. Der altertümliche Motor dreht mit 200 U/min. Auf seiner Achse sitzt eine Schnecke, und diese treibt ein Zahnrad mit 50 Zähnen an. Dieses braucht, wie eine einfache Rechnung zeigt, 15 Sekunden für eine Umdrehung. Auf dessen Achse sitzt wieder eine Schnecke, die wieder ein Zahnrad mit 50 Zähnen antreibt. Das zweite Zahnrad braucht nun schon 12.5 Minuten für eine Runde und das dritte über 10 Stunden. Das Getriebe hat 12 gleiche Stufen. Und das letzte Zahnrad ist fest im Granit verschraubt. Der erste Impuls war auch bei mir: Nachrechnen. Also jedes Zahnrad läuft 50 mal langsamer als die Schnecke, welche es antreibt. Das Übersetzungsverhältnis des ganzen Getriebes ist also 50 hoch 12. Das letzte Zahnrad hat also eine Umlaufdauer von 2.3 Billionen Jahren. Das ist beinahe das 200-fache des von den Kosmologen berechneten Alters des Universums. Ich habe dann aber noch weiter gerechnet:

Die beiden Schrauben sitzen je in einem Abstand von 1 cm vom Drehzentrum des letzten Zahnrades. Wenn ich für das Exponat eine Betriebsdauer von 50 Jahren mit täglich 7 Stunden (und freiem Montag) annehme, so ergeben sich 12.5 Jahre effektive Betriebsdauer. In dieser Zeit verschieben sich die Schrauben, mit denen das letzte Zahnrad im Granit verankert ist, um $4 \cdot 10^{-13}$ Meter, also um ein Promille des typischen Abstands der Atome in einem Kristallgitter. Das Einschrauben des letzten Zahnrades ist also bestens gerechtfertigt.

Was soll daran irritierend sein? Es ist doch alles klar.

Meine Irritation ist hier von einer anderen Art. Es ist keine Initiations-Irritation, denn jedes Mal wenn ich sehe, wie das Motörchen munter seine 200 Umdrehungen pro Minute dreht und ich dann das festgeschraubte Zahnrad anschau, habe ich das Gefühl, dass es gelegentlich würgen müsste. Die Drehzahl wird abnehmen und bald wird sich das charakteristische Geräusch eines verklemmten Getriebes einstellen. Der Mann muss kommen und die Sache nachregulieren, und das tut er ja bestimmt auch jeden Abend.

Dieses absurde Getriebe transzendiert meinen Erfahrungshorizont. Physiker staunen kaum noch über „exotische“ Sachverhalte aus den Welten der Galaxien oder Elementarteilchen. Dieses Getriebe aber ist ein Ding aus einer recht groben technischen Welt, eine Sache für Automechaniker. Aber dieses Getriebe in seinem Granitgehäuse zwingt uns, gedanklich einerseits alle Zeitdimensionen der Kosmologie zu überschreiten und andererseits zu Bewegungen von der Grössenordnung von thermischen Kristallgitterschwingungen zu gelangen, und das nicht mit 10 hoch weissenichtwievielen Zahnrädern, sondern gerademal mit zwölfen. Das irritiert mich nachhaltig.

Irritation ist subjektiv und genau sowenig lehrbar wie Wahrnehmen und Verstehen. Aber wie diese kann sie begünstigt werden. Das Gelingen ist Glücksache, was folgende Episode zeigt: Als ich einmal mit meinen Kindergarten-Studentinnen der PHZH im TECHNORAMA war, gab ich ihnen den Auftrag, je ein Exponat zu suchen, welches sie persönlich interessiert und ein anderes, das zu einem Experiment für die Vorschulstufe anregen könnte. Ich stand wieder versunken bei meinem Getriebe und winkte zwei Studentinnen herbei: „Schauen Sie doch mal: Das hier wäre mein Exponat“. Keine Reaktion. So versuchte ich – pädagogisch völlig stümperhaft – die Sache so konzis wie möglich zu erklären. Da hob die eine die Brauen, senkte die Mundwinkel, zuckte mit den Schultern, liess ein „phhm“ vernehmen, drehte sich auf dem Absatz und verschwand, und die Kollegin eiligst hintendrein. Ich fand sie dann alle bei den grossen Seifenblasen.

Wie sieht das Licht aus?

Bei Sonnenschein im Frühsommer eignen sich natürlich die Sonntaler als Einstieg in die Optik: Die hellen, ovalen Flecken unter dem Blätterdach der Bäume⁴.

Dann und wann bin ich aber an Stelle eines Naturphänomens mit der „Urfrage“ in die Optik eingestiegen: Was ist Licht?⁵ Dazu werden Lexika oder Wikipedia befragt, die alle vorlaut verkünden: „Licht ist der sichtbare Teil der elektromagnetischen Strahlung...“. Wird wohl so sein, aber versteht man das? Da drängt sich eine einfachere Frage auf: Wie sieht das Licht

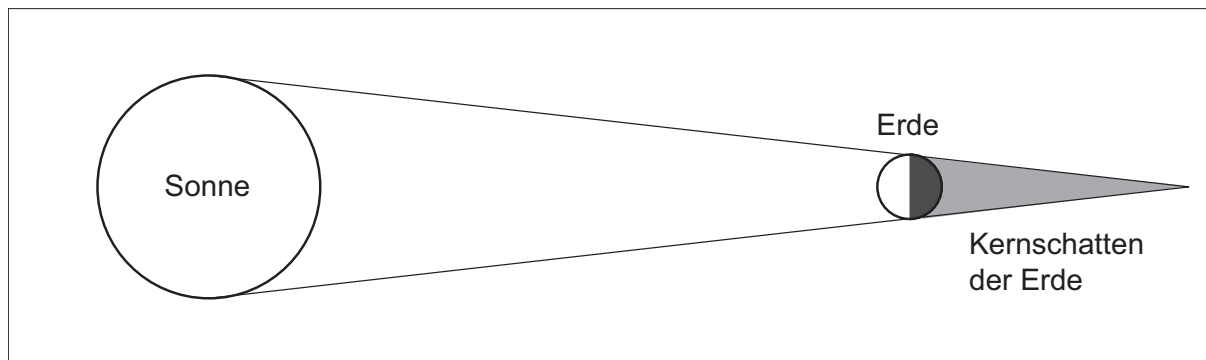
⁴ MARTIN WAGENSCHNEIDER: *Die pädagogische Dimension der Physik*, Braunschweig 1962: Westermann, 3. Aufl., S. 217.

PETER STETTLER: *Wie erleben Jugendliche Physik? – Aufsätze im Physikunterricht*, Neue Sammlung 21, (1981), S. 246-262.

H. JOACHIM SCHLICHTING: *"Sonntaler fallen nicht vom Himmel"*, *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* MNU 48/4, S. 199-207 (1995).

⁵ PETER STETTLER: *«Im Wasser Flamme»* in: ROGER ERB & JOHANNES GREBE ELLIS (Hg.): *Alles, wovon sich der Mensch ernstlich einlässt, ist ein Unendliches – Physikdidaktische Miniaturen*, Berlin 2011: Logos, S. 191 ff.

aus? Typische Lehrerfrage: Hell, natürlich. Dann pflegte ich schweigend folgende Zeichnung an die Tafel zu zeichnen (zunächst ohne die Beschriftung „Kernschatten“):



Was und wo Tag und Nacht sind, ist klar – allzu klar. Oft muss man sokratisch etwas stacheln: Was sieht man, wenn man irgendwo im „grauen“ Gebiet – man nennt es den Kernschatten der Erde – steht? Die Sterne, den Mond, die Planeten. Und das Licht der Sonne, von dem wir ja auch umgeben sind? Was sieht man von dieser gewaltigen Lichtfülle? Dass man davon gar nichts sieht, erstaunt fast alle und schockiert manche sogar: Das Licht ist überhaupt nicht hell, sondern unsichtbar. Nach den ersten Gesprächen über das Licht kann die Skizze aber auch auffordern, über die eingezeichneten Lichtstrahlen zu sprechen: Wenn man Licht nicht sehen kann, dann kann man wohl auch die Strahlen nicht sehen. Diese erweisen sich als nichts anderes, als geometrische Konstruktionen, die dabei helfen, sich die Wege des Lichts besser vorstellen zu können. Wenn dann später von Lichtwellen und Photonen die Rede ist, verstehen die Schülerinnen und Schüler, dass es sich auch dabei um an der Mechanik orientierte Vorstellungen handelt: Erfundenes, nichts Gefundenes. Denn Licht ist nichts Mechanisches. Irritation kann Wissenschaftsverständnis fördern.

Das umgekehrte Köpfchen⁶

Material:

- Rasier- oder Schminkspiegel, auf der Vorderseite: Hohlspiegel, auf der Rückseite: ebener Spiegel, etwa 15 cm im Durchmesser.

Vorversuche

- Setzt dich an einen Tisch und lege den Rasier- bzw. Schminkspiegel mit der ebenen Seite oben auf den Tisch.
- Betrachte dich zuerst im *ebenen Spiegel* aus einer Entfernung von ca. 30 cm. Wo befindet sich das Spiegelbild? – Auf der Spiegelebene? – Oder in einem Spiegelraum unter dem Spiegel? Wenn ja: Wie weit ist dein Spiegelkopf von der Spiegelebene entfernt? Das festzustellen gelingt besser, wenn du dir vorstellst, dass der Spiegel ein rundes Fenster wäre, durch das man in eine andere Welt blickt.
- Betrachte dich nun im *Hohlspiegel* aus derselben Entfernung. Lass dir Zeit. Achte aber darauf, wo sich dein vergrößerter Kopf im Spiegelraum befindet. In gleicher Entfernung wie der vom ebenen Spiegel gespiegelte Kopf? – Näher als dieser? Das wäre ja logisch, denn was näher ist, erscheint grösser. – Oder etwa weiter entfernt? Dann wäre es der Kopf eines Riesen. Die räumliche Tiefe kannst du besser feststellen, wenn du den Kopf etwas hin- und her bewegst.
- Fällt dir auch etwas hinsichtlich der Form des vergrößerten Spiegelkopfes auf?

⁶ Viele der hier angebotenen Experimente stammen aus dem Kurs „Licht uns Sehen“, der für Lehrpersonen der Sek-I-Stufe schon 2 mal am Technorama angeboten wurde und möglicherweise gegen Ende Jahr wieder angeboten wird; siehe www.technorama.ch/schule

- Formuliere deine Beobachtungen möglichst exakt.

Das Spiegelköpfchen

- Hänge den Hohlspiegel auf Augenhöhe an eine Wand, oder stelle ihn auf ein Regal im Büchergestell.
- Der Spiegel sollte genau vertikal hängen (bzw. stehen), sodass du dich aus einer Entfernung von ca. 3 Meter gut sehen kannst, ohne dass du dich bücken oder auf die Zehen stehen musst.
- Du siehst nun deinen Kopf verkleinert – und „auf dem Kopf“.
- Die Aufgabe ist es nun, herauszufinden, wo im Raum dieses Spiegelköpfchen „hängt“. Dazu musst du dir viel Zeit nehmen und möglichst vergessen, was sein darf und was nicht. Starre den Spiegelkopf längere Zeiten an, einäugig und zweiäugig. Bewege dabei den „richtigen“ Kopf leicht hin und her.
- Bewege Dich nun in Richtung Hohlspiegel. Wie verändert sich dabei der Spiegelkopf hinsichtlich Grösse und Lage im Raum.
- Da gibt es eine kritische Distanz zwischen dir und dem Hohlspiegel. Versuche zu beschreiben, was dort geschieht.

Blick durch eine Vogelfeder

Das Phänomen

Voraussetzung: Sonnenschein und ein belaubter Baum, eine Vogelfeder.

- Suche einen Standplatz, von dem aus der grösste Teil der Sonne durch die Blätter des Baumes abgeblendet ist. Das durch die Blätter blitzende Licht sollte nicht allzu stark blenden.
- Blicke durch die Fahne der Vogelfeder auf den grell leuchtenden Zipfel der Sonne. Lass dir Zeit.
- Versuche, das Phänomen in einem inneren Dialog exakt zu beschreiben.
- Variation der Beobachtungsbedingungen:
 - Variiere den Abstand zwischen Auge und Feder.
 - Drehe die Feder um verschiedene Achsen (senkrecht zur Fahne, dann auch um den Schaft).
- Wie wird das farbige Phänomen durch diese Variationen verändert?

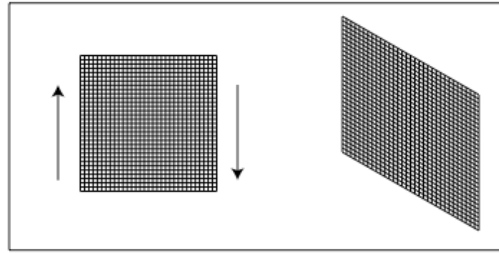
Schlechtwetter- oder Schulstubenvariante

Gleicher Versuch mit Blick auf eine Kerzenflamme durch die Fahne einer Vogelfeder.

1. Variation: Blick durch Vorhangstoff

- Nimm ein Stück eines transparenten und fein gewobenen Stoffes⁷.
- Halte das gespannte Stoffstück vor dein Auge. Betrachte eine Kerzenflamme aus einigen Metern Distanz durch dieses Stoffstück.
- Halte den Stoff auch mal so, dass aus den Quadraten zwischen den Fäden Rhomben entstehen:

⁷ Stoffresten: Feine Stoffe, die halb transparent sind. Die Stoffe sollten regelmässig gewoben sein (3 bis 6 Fäden pro mm). Am besten probiert die Lehrperson die Stoffe bereits im Warenhaus aus: Man schaut durch den gespannten Stoff auf eine möglichst kleine Lichtquelle und prüft diesen auf seine Eignung als 2-dim. Beugungsgitter.



- Welchen Einfluss hat diese Verzerrung auf das farbige Muster?
- Wenn du noch ein feiner oder vielleicht auch gröber gewobenes Stück Stoff zur Verfügung hast. Wiederhole den Versuch mit einem anderen Stoff.
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Abstand der farbigen Nebenflämmchen und dem Abstand der Fäden des gewobenen Stoffes? („Je ... , desto ...“).
- Beschreibe das Experiment wieder so genau wie möglich in deinem Lernjournal.

2. Variation: die einfachste Anordnung (Urphänomen)

Wir betrachten nun die Kerzenflamme durch einen einzigen dünnen Spalt. Einfacher geht es nicht mehr. Daher nennen wir das Phänomen *Grund-* oder *Urphänomen*.

Dazu brauchst du einen ca. 20 cm langen und ca. 5 cm breiten Streifen aus schwarzem Papier, einen Cutter und eine Unterlage aus Holz.

- Schneide mit dem Cutter einen ca. 3 cm langen Schnitt in das schwarze Papier quer zur Längsrichtung des Streifens.
- Zünde die Kerze an und lösche das Licht. Das Zimmer sollte so verdunkelt sein, dass du noch gut siehst, was du machst, dass aber die Kerze die einzige auffällige Lichtquelle ist.
- Halte den schwarzen Papierstreifen horizontal so vor das eine Auge, dass du die Kerzenflamme durch den Spalt sehen kannst.
- Der schwarze Papierstreifen ist lang genug, dass er das andere Auge verdeckt. So musst du dieses nicht schliessen und kannst die Kerzenflamme durch den Spalt entspannt mit einem Auge betrachten. Lass dir Zeit, die Erscheinung genau zu beobachten.
- Drehe das Papier mit dem Spalt auf diese und jene Weise. Achte darauf, wie sich die Erscheinung dabei verändert.
- Beschreibe das Experiment wieder so genau wie möglich in deinem Lernjournal.

Versuche mit einer „Pinhole“ Lochblende

Material und gemeinsame Vorbereitung für alle 3 folgenden Versuche:

- Karte aus schwarzem, mattem Papier, A7
- Stecknadel
- Stich mit der Stecknadel ein kleines Loch in die Mitte der Karte. Vergewissere dich aber zuerst, ob das Loch nicht schon vorhanden ist.

1. eine billige Lupe

Das Papier mit dem kleinen Loch kann als Lupe dienen. Damit kann man zum Beispiel abschätzen, wieviele Fäden pro Millimeter im Stoff des vorhergehenden Versuchs gewoben sind.

Der Versuch erfordert eine gute Beleuchtung.

- Ein weisser Stoff wird auf ein schwarzes Papier gelegt, ein schwarzer auf ein weisses.
- Darauf legt man einen Massstab mit Millimeter –Einteilung
- Nun kann man die „Loch-Lupe“ wenige Zentimeter über den Stoff halten und durch das kleine Loch blicken. Ohne die Loch-Lupe könnte man aus dieser geringen Distanz weder die Fäden noch den Massstab scharf sehen.

2. meine Pupille

- Setz dich vor eine helle, weisse Wand oder vor ein Fenster, durch das du den Himmel siehst. Es darf aber nie in die Nähe der Sonne geschweige denn direkt in die Sonne geblickt werden.
- Verdecke das linke Auge mit der linken, hohlen Hand.
- Halte die Karte so dicht wie möglich vor das Auge bzw. unmittelbar vor die Brille.
- Achte diesmal nicht auf den Inhalt des hellen Kreises, sondern auf den Rand.
- Nimm die Hand vom linke Auge, verdecke es sogleich wieder, dann wieder auf – zu –... usw.
- Variante: Schliesse und öffne das rechte Auge (d.h. das Auge, welches durch das Löchlein blickt) abwechslungsweise.
- Achte dabei stets auf die Grösse des Löchleins, das du mit dem rechten Auge siehst.
- Nach diesem Versuch weisst du, dass der Kreis, den du siehst, nicht das kleine Loch in der schwarzen Karte sein kann, denn dieses bleibt ja immer gleich gross. Also: Was siehst du wirklich in diesem Versuch?

Erscheinungen, deren Ursachen im Auge selber liegen, nennt man *entoptisch*.

3. Sehen wir verkehrt⁸? (Der Versuch von Brack)

Material:

- die Lochblende aus schwarzem Papier mit dem Stecknadelloch
- ein Streichholz

1. *Vorversuch:*

- Verdecke das linke Auge mit der linken, hohlen Hand.
- Halte die Karte mit dem kleinen Loch so dicht wie möglich vor das Auge bzw. unmittelbar vor die Brille.
- Halte den Kopf des Streichholzes ganz nahe vor das kleine Loch. Merk dir genau, was du siehst (vergl. Versuch: die billige Lupe).

2. *Vorversuch:*

- Verdecke das linke Auge mit der linken, hohlen Hand.
- Halte die Karte mit dem kleinen Loch so dicht wie möglich vor das Auge bzw. unmittelbar vor die Brille.
- Schliesse und öffne die Augen ganz langsam. Achte auf die Wimpern.

Versuch von Sir William Brack⁹:

- Halte die Karte mit der linken Hand etwa 10 cm vor das rechte Auge.
- Halte das Streichholz mit der rechten Hand unmittelbar vor das rechte Auge, und zwar so nahe, dass es die Wimpern berührt. Für Brillenträger: Zwischen Brille und Auge.
- Bewege das Streichholz langsam und vorsichtig hin und her sowie auf und ab.
- Achte dabei stets auf das kleine Loch.

Schatten und Antischatten

Material und Vorbereitung:

- Glühfaden-Lampe mit Glaskolben, durch den der Glühfaden zu sehen ist (also kein matter Kolben)¹⁰.
- Lampenfassung mit Griff, Kabel, Schalter und Stecker (Baumarkt)
- evt. Stativ für die Lampenfassung
- Karton, A4

⁸ PETER STETTLER: *Sehen wir verkehrt?* In: JOHANNES GREBE-ELLIS & FLORIAN THEILMANN (Hg): *open eyes 2005: Ansätze und Perspektiven der phänomenologischen Optik*. Berlin 2006: Logos, S. 203-214.

⁹ SIR WILLIAM BRAGG: *Die Welt des Lichts*, Vieweg, Braunschweig 1935, S.38 & 39.

¹⁰ Alte Glühlampen kann man beziehen bei B. Hickel, Schoffelgasse 8, 8001 Zürich.

- Acrylglasplatte, etwa A4 (Baumarkt)
- In die Mitte des Kartons wird ein dreieckiges Loch geschnitten¹¹, Seitenlänge ca. 5 mm.
- Das ausgeschnittene dreieckige Kartonstücklein wird in die Mitte der Acrylplatte geklebt.
- weisses Papier

1. Versuchsserie

- Zuerst wird das weisse Papier bündig an den Karton mit dem dreieckigen Loch gelegt.
- Der Karton mit dem Papier dahinter wird ins Licht der Lampe gehalten:
Wie zu erwarten, wird das dreieckige Loch hell und scharf auf das Papier abgebildet.
- Nun wird das Papier hinter dem Karton langsam vom Karton entfernt. Das Abbild wird unscharf.
- Bei weiterer Entfernung ändert sich die helle Gestalt auf dem Papier.
- Die Entfernungen Lampe-Karton und Karton-Papier werden variiert. Wie ändert sich dabei die Lichtgestalt auf dem Papier?
- In allen Phasen wird ab und zu der Karton um die Achse des Lichtstrahls gedreht.
- Dann wird die Lampe um die Achse des Lichtstrahls gedreht.

2. Versuchsserie

Die Versuchsserie wird mit der Acrylglasscheibe, auf der das kleine dunkle Dreieck klebt, wiederholt. Sie ist also genau komplementär zur ersten Versuchsserie.

Variante im Ablauf der Versuchsserie

Nach dem Motto „Irritation“ könnte man auch wie folgt vorgehen: Die Lampe wird an der Decke aufgehängt wie in einer alten Stube. Das weisse Papier liegt am Boden. Die Acrylglas-Scheibe mit dem dunklen Dreieck so dazwischenhalten, dass das dunkle Abbild des Glühfadens auf dem Papier erscheint. Was ist da los?

Erklärung

Natürlich liegt bei der ersten Versuchsserie das Stichwort *Camera Obscura* auf der Zunge. Und natürlich kann man auch die zweite Versuchsserie mit Lichtstrahlen erklären.

Ich empfehle hier aber ein Verfahren aus der phänomenologischen Optik, einer „Optik der Bilder“. Diese ist komplementär zur modellorientierten Optik. Sie fragt nicht: Was ist Licht? Wie wird es erzeugt? Wie breitet es sich aus? usw., sondern: Was sehen wir? Die phänomenologische Optik macht damit ernst, dass Licht unsichtbar ist und konzentriert sich auf das, was man sehen kann. Damit würde man die Camera Obscura mit dem „Schlüssellochprinzip“ erklären: Wenn ich durch ein Schüsselloch in ein Zimmer (eine *Camera*) schaue, muss ich mich ducken, um die höheren Teile des Zimmers zu sehen, usw.

Die dunkle Abbildung des Glühfadens ist – physikalisch gesprochen – der Halbschatten des dunklen Dreiecks (nicht des Glühfadens) auf der Acrylglas-Platte.

Hilfreich bei unseren Versuchsserien ist das „Ameisenprinzip“: Man stelle sich vor, was eine Ameise sehen würde, welche übers Papier kriecht und dabei zum kleinen, hellen Loch, oder eben zum kleinen, dunklen Dreieck schaut. In aller Ausführlichkeit und mit ergänzenden Variationen der hier geschilderten Versuche hat dies der Physik-Didaktiker Johannes Grebe-Ellis neulich geschildert¹².

¹¹ Ein dreieckiges Loch ist nicht nur leichter mit einem Cutter auszuschneiden; es erlaubt auch den Einfluss der Drehung des Kartons bzw. der Acrylglasscheibe zu untersuchen.

¹² JOHANNES GREBE-ELLIS: *Wie sieht der Schatten einer Fliege aus?* In: ROGER ERB & JOHANNES GREBE-ELLIS (Hg.): *Alles, worin sich der Mensch ernstlich einlässt, ist ein Unendliches – Physikdidaktische Miniaturen*, Berlin 2011: Logos, S. 55–68.