

„Im Wasser Flamme“

(Zur Dispersion)

1. Dass farbige Lichter in farblosen durchsichtigen Dingen spielen und aufglänzen, diese Erscheinung kennen wir von den Tropfen, die nach dem Regen in den Büschen oder als Tau im Grase hängen, aus Edelsteinen, aber auch aus geschliffenem Glas und den Eiskristallen der glitzernen Schneedecke, vom Regenbogen, den Seifenblasen, dem Marienglas und sogar aus einem Abfall der Technik: den glänzenden Farbringen auf den Ölflecken der Asphaltstraßen.

Geheimnisvoller als die sogenannten „Körperfarben“, (die – wie das Grün eines Blattes oder das Rot einer Blüte – uns gegenständlich vor Augen stehen, so dass wir sie dem Körper selbst zurechnen), wirken diese Farben in einer eigenen Weise anregend, indem sie uns überraschend einen verborgenen Reichtum verkünden, der in dem reinen Weiß, das sie aufweckt, beschlossen sein muss. Sie versprechen dem Forschenden tiefe Aufschlüsse und geben sie auch.

2. Allerdings sind hier zwei in der Tiefe verschiedene Vorgänge noch zusammengefasst. Aber schon dem Kinde lässt sich das Trennende zeigen: ein Teil dieser Farberscheinungen ist gebunden an sehr dünne Blättchen des farblosen Materials, verspricht also Aufschlüsse, die ins Kleine führen. Der andere hat es gerade gern, wenn das Licht dicke Schichten durchläuft. Die Farben der dünnen Schichten wird man einer späten Betrachtung vorbehalten müssen. Die „Dispersion“ dagegen, die „Farben-Zerstreuung“, wird schon auf den ersten Stufen des Naturlehre-Unterrichts ein Hauptanziehungspunkt sein; keinesfalls darf sie fehlen, sie gehört zum Grundgefüge der Physik. Aber sie muss auch hineingefügt sein in diesen Zusammenhang, und sie muss herausgelesen werden aus der Natur¹.
3. Man kann sich leicht davon überzeugen, dass fast alle Laien des Glaubens sind, die Farbenzerstreuung sei eine Wirkung, die nur dem „Prisma“ zukomme. Die Dispersion ist für sie nicht eigentlich eine Naturerscheinung, sondern die Leistung eines Apparates. Was in ihm vorgeht, ist dunkel geworden, die Erinnerung hat nur das Ergebnis bewahrt.

Die Ursache für die Einbürgerung dieser falschen und unklaren Vorstellung liegt vermutlich darin, dass Lehrbücher und Lehrgänge, wohl unter dem Eindruck von Newtons Vorbild, die eindrucksvolle Erscheinung des Farbenbandes gleich zum ersten Male aus dem Prisma hervorgehen lassen, und zwar, soweit ich sehe, fast ausnahmslos und immer schon². Da sich der Schüler das, was er sieht, weit stärker einprägt als die Erläuterungen des Lehrers, so ist es verständlich, dass schließlich das Prisma und nicht die Brechung als der verantwortliche Faktor in der Erinnerung übrig bleibt.

Nun ist aber Newtons Vorbild methodisch nicht maßgebend, da er nicht für Anfänger schrieb. Auch fällt es gar nicht schwer, mit einfachsten Mitteln und eindrucksvoll genug, die Farbenzerstreuung im Zusammenhang mit nur einer Brechung beobachten zu lassen und vorzuführen.

4. Dass wir dafür sorgen, dass der Schüler das Richtige erfasst, ist selbstverständlich. Mehr als diese informatorische Pflicht des physikalischen Unterrichts liegt uns heute seine erzieheri-

¹ Die nun folgenden Abschnitte sind der unveränderte Abdruck des Aufsatzes „Dispersion ohne Prisma“; Unterrichtsblätter für Mathematik und Naturwissenschaften, 1936, S. 97-100.

² Neben heute verbreiteten Lehrbüchern habe ich Tyndall, Das Licht (1870) durchgesehen und einige um 1800 gebräuchliche Werke, darunter die von Lichtenberg herausgegebenen Anfangsgründe der Naturlehre des J. Chr. P. Erxleben (6. Aufl., Göttingen 1794), in der sich geradezu die Überschrift „Die Farben des Prisma“ findet.

sche Aufgabe am Herzen. Sie ist, wie ich glaube, daran gebunden³ dass er die Naturnähe auf strengste bewahrt, das Urphänomen in seiner ganzen schlichten Eindringlichkeit an den Anfang oder in den Mittelpunkt stellt und aus ihm organisch und gründlich das Abstrakte wie das Technische heraus wachsen lässt. Nur so erreichen wir die beiden großen, sich ergänzenden Bildungswerte der Naturwissenschaft: einerseits die zur Bescheidenheit zwingende Ehrfurcht vor der Natur und andererseits jenes stolze, Freude und Tatkraft erweckende Gefühl, das eigenes Forschen belohnt. Vor allem wegen dieses Zusammenhanges möchte ich hier auf die Einführung der Dispersion als ein Beispiel hinweisen. An ihm wird eine Vorstufe deutlich, die wir in vielen Fällen aus Eile und aus wissenschaftlicher Gewöhnung übersehen, die uns aber besonders wichtig sein muss, wenn es uns nicht allein um den Inhalt des Wissens zu tun ist, sondern darum, dass es mit dem Gesamtwesen des Lernenden und seinem ursprünglichen Verhältnis zur Natur in inniger Verbindung bleibt.

5. Die durch eine einzige Brechung hervorgerufene Farbenzerstreuung ist in der Natur nicht auffällig, wenigstens bei uns nicht. Wenn man aber z. B. an der dalmatinischen Küste schwimmt, so sieht man schräg durch die Oberfläche in sehr ruhiges, kristallklares und durchsonntes Wasser gegen einen hellen, löcherigen und zerklüfteten Kalkgrund, auf dem scharfkantige Pflanzen wachsen. An der Grenze der Schatten sieht der Schwimmende farbige Säume. Sie sind umso deutlicher und breiter, je tiefer unter der Meeresoberfläche die schattenwerfenden Riffe und Pflanzen liegen. Ganz instinktiv und schnell lernt er die Tiefe und damit die Gefährlichkeit einer ihm entgegenragenden Felsnadel nach der Farbigkeit ihrer Spitze zu beurteilen.

Wenn man einmal darauf aufmerksam geworden ist, kann man auch bei uns diese Erscheinung leicht nachmachen. Im Freien, bei gutem Tageslicht, genügen eine Wassertonne mit dunklem Boden und ein helles Steinchen darin. Es ist günstig, wenn das Auge nah an die Wasseroberfläche herangeht und schräg gegen sie blickt.

6. In die wissenschaftliche und Lehrbuch-Literatur ist diese Beobachtung, wie es scheint, wenig eingedrungen. Ich fand nur in O. Hahns *Freihandversuchen*⁴ einen Hinweis auf eine beiläufige Bemerkung Boltzmanns aus seinem Vortrag über Kirchhoff. Er erwähnt dort „das schon im Altertume beobachtete Phänomen, dass ein in tiefem, sehr klarem Wasser fallender Kiesel einem umgekehrten Flämmchen ähnelt, indem er oben blau, unten rot gefärbt scheint“.

Die Erwartung, dass gerade Goethes Spürsinn für das Urphänomen diese einfachste Dispersionserscheinung gesucht und gefunden haben muss, findet sich in seinen optischen Schriften bestätigt. Unter „Nachträge zur Farbenlehre; neue: Einteilung; physischen Farben; 11“⁵ findet sich der kleine Aufsatz „im Wasser Flamme“. Goethe beschreibt hier, was er, einer Notiz von Agricola und Buffon nachgehend, an dem klaren und tiefen Teich bei Tennstedt in Thüringen beobachten konnte, wenn er einen hellen Kalkstein hineinwarf. „Wenn aber ein weißer untersinkt, so zeigen sich an ihm prismatische Ränder, und zwar weil er als helles Bild auf dunklem Grunde, er sinke noch so tief, immer durch die Refraktion dem Auge entgegengehoben wird, unten gelbrot und gelb, oben blau und blaurot; und so zittert diese Erscheinung als ein umgekehrtes Flämmchen in die Tiefe.“ Goethe erinnert sich eigener früherer Versuche: 1792

³ Zur Begründung verweise ich auf meine Aufsätze in der „Erziehung“ VIII (1933), 5, S. 273 u. IX (1934), 4, S. 177, und in der Zeitschr. f. mathem. u. naturwiss. Unterricht LXVI (1935) I, S. 15. - Diese Arbeiten sind nachgedruckt in dem Sammelband „Ursprüngliches Verstehen und exaktes Denken“ (Bd. I) Stuttgart 1965, 2. Aufl. 1970, S. 15-43.

⁴ O. Hahn: *Freihandversuche*, Bd. III, Berlin 1912, S. 212.

⁵ Ludwig Boltzmann: *Populäre Schriften*, Leipzig 1905, S. 59.

nutzte er die Campagne in Frankreich dazu aus, vor Verdun in einen mit klarem Wasser gefüllten Erdkessel „kaum beschädigte“ weiße Teiler zu werfen, die ihm „die freundliche Feldküche“ überließ, um an ihnen dasselbe Phänomen sich vorzuführen, das er 1816 in Tennstedt wiederholen konnte. - Der liebenswürdige Aufsatz zeigt Goethe in seiner ganzen Universalität als Historiker, Geologen, Botaniker und Physiker.

„Zum Versuch erhoben“, finden wir diese Beobachtungen wieder in dem Abschnitt „Über die Farbenerscheinungen, die wir bei Gelegenheit der Refraktion gewahr werden“ (Handschriftlich 1793)⁴⁶ „Man nehme ein Gefäß, das breiter als hoch ist ... Wir legen in das ... Gefäß mit Wasser ein schwarz angestrichenes Blech, in dessen Mitte eine zirkelrunde weiße Fläche im Durchschnitt ungefähr einige Zoll gemalt ist.... Wir bewegen uns dergestalt von dem Gefäße hinweg, dass wir in einer schiefen Richtung nach der Fläche sehen, so erblicken wir bald eine Farbenerscheinung, und zwar so, dass der nächste Rand der weißen Fläche uns gelb und gelbrot erscheint, der entgegengesetzte Rand aber mit einer blauen Farbe eingefasst ist.“ (Abb. 1, nach einer Figur Goethes. Gelbrot ist durch waagerechte, Blau durch senkrechte Schraffierung ersetzt)⁷.

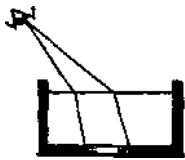


Abbildung 1

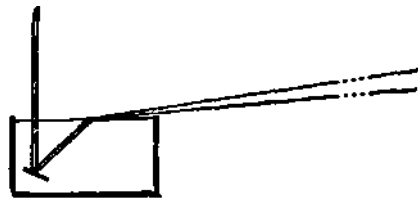


Abbildung 2

Für einen dem goethischen entsprechenden objektiven Versuch ist es nur nötig, dem Strahl nach der Brechung, innerhalb des zweiten Mediums also, einen hinreichend langen Auslauf zu geben, damit seine farbigen Teile genügend weit divergieren können. Es genügt dazu (Abb. 2) der bekannte einfache Apparat, mit dem man Brechung und Totalreflexion für den Übergang von Wasser in Luft vorzuführen pflegt: Aus dem Bündel paralleler Strahlen, das die Lampe verlässt, wird durch einen Spalt (ich wählte 5 mm mal 32 mm) ein Lichtband ausgeblendet. (Es ist wichtig, die Randstrahlen so weit mit abzublenden, dass der Strahl in einigen Metern Abstand auf einem Schirm keine farbigen Ränder mehr als Wirkung der chromatischen Aberration erkennen lässt.) Die Lampe wird so gestellt, dass der Strahl senkrecht, also ungebrochen, in die bis zum Rand mit Wasser gefüllte Wanne fällt, wo er den drehbaren Spiegel trifft, der nun als die eigentliche, im Wasser untergebrachte Lichtquelle gelten kann. Das von ihm ausgehende Lichtbündel wird einmal gebrochen, durchläuft einige Meter weit die Luft und erzeugt auf einem weißen Schirm im verdunkelten Zimmer ein Spektrum, das für diesen Vorversuch völlig ausreicht. Durch geeignete Wahl des Schirmabstandes und der Breite des Bündels lässt es sich einrichten, dass bei fast streifendem Austritt dieses Spektrum keine weiße Mitte mehr hat und alle Farben auffällig und deutlich erkennen lässt

8. Ein Lehrgang, der vom Natürlichen ausgehend das Urphänomen der Dispersion in den Mittelpunkt stellen und das Prisma organisch vorbereiten will, könnte etwa so aussehen:

Entweder man beginnt mit dem Auffallenden: dem Regenbogen und den farbig glänzenden Tautropfen, erkennt darin als wesentlich die Brechung, als günstig die weitere Verfolgung des gebrochenen Strahles und kommt damit auf den Versuch von Abbildung 3.

⁶ Goethe, a.a.O., S. 407, 408 (Ziffern 9, 24, 25).

⁷ Goethe, a.a.O., Bilderaanhang Tafel 26.

Oder man stellt an den Anfang das Urphänomen selbst, in seiner nicht auffallenden, aber doch natürlichen Form: die farbigen Ränder des hellen Steins im klaren Wasser. Im Schulraum zeigt das deutlich schon eine bis zum Rand gefüllte längliche Wanne, auf deren mit schwarzem Papier ausgelegten Boden ein kleines Stückchen Kreide liegt von oben mit abgeblendeter Lampe stark beleuchtet⁸ – Diese Erscheinung wird vereinfacht durch den Übergang vom hellen Körper zur Lichtlinie oder zum Lichtpunkt: ein schmaler Streifen rein weißen Papiers (etwa

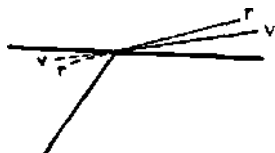


Abbildung 3

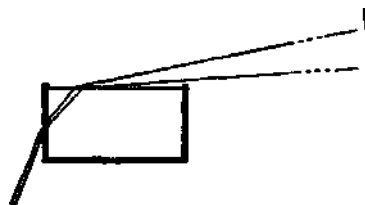


Abbildung 4

0,5 mm breit) , der auf eine schwarzlackierte, noch klebende Glasplatte gedrückt ist und wie die Kreide betrachtet wird, erscheint zu einem engen Spektrum erweitert, in dem Weiß fehlt. Hieraus lässt sich der Strahlengang (Abb.4) vermuten. Der Wunsch, ihn zu prüfen, führt wieder auf das Experiment von Abbildung 3.

Woher die Farben? Der Anfänger sucht nach einem Farbstoff, der das weiße Licht so färbt, wie er dem Wasser seine Farbe mitgibt, das ihn durchfließt. Die Antwort, dass nicht ein Stoff, sondern ein Vorgang sie erzeugt, kommt aus einer genaueren Betrachtung und Variation des Versuches, die im engen Raum des Prismas nicht möglich wäre: die Farben lassen ihren räumlichen Ursprung im Knickpunkt des Strahles erkennen und verbreitern ihr Band in demselben Maße, in dem (mit dem Einfallswinkel) die Brechung zunimmt. Also ist es die Brechung, die sie hervorruft. Die letzte Klärung der Herkunft der Farben (die ja geschieht durch die physiologische Auskunft, dass die Summe aller Farben als Weiß empfunden wird, und die physikalische, dass die einzelnen Farben verschieden stark gebrochen werden) wird man bis hinter die Erfindung des Prismas zurückschieben. Auf das Prisma selbst führt der Wunsch nach stärkerer Auffächerung, als streifender Austritt des Strahles sie geben kann. Das gelingt durch zweimalige Brechung in derselben Richtung. Die neue Brechung muss vor die schon betrachtete gelegt werden (Abb. 4). Nun ist es praktischer, Glas statt Wasser zu wählen, das Prisma ist fertig, und damit ist die Versuchsanordnung erreicht, mit der man im allgemeinen zu beginnen pflegt.

⁸ Sehr schön geht es mit einem selbst-leuchtenden Objekt. Eine kleine 6 Volt-Einfadenlampe, wie man sie in Autos benutzt, wird, wasserfest an den Zuleitungsdrähten verkittet, in die Wanne versenkt und leuchtet nun gehoben und farbig aus dem Wasser. Lässt man sie langsam aufglühen, so beobachtet man die Entfaltung des Spektrums, von der im Abschnitt III des nächsten Kapitels die Rede ist

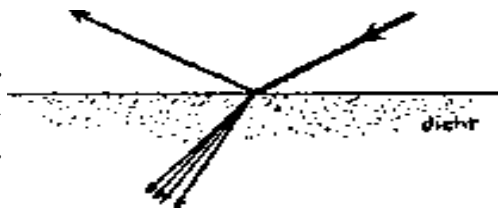
Wärme – Licht

1. Der Zusammenhang zwischen Wärme und Licht, hergestellt durch die dunkle Wärmestrahlung, ist als Glied des Grundgefüges der Erscheinungen so wichtig wie jedes andere. Da er in der Fülle des Stoffes leicht unbeachtet bleibt (nicht an sich, aber als Bindeglied) wird im folgenden ein verbindender Gedankengang skizziert.

Auf die experimentelle Seite soll in diesem Fall nicht eingegangen werden.

I.

2. Das Urphänomen der Dispersion sei vorausgesetzt.
3. Licht, das auf einen undurchsichtigen Körper trifft, geht, soweit es nicht zurückgeworfen wird, als Licht verloren. Dafür verwandelt es sich in Wärme, es wird „absorbiert“, kurz: es wärmt.
4. Aus 2. und 3. entsteht die Frage, ob farbiges Licht in gleichem Maße wärmt wie weißes? Natürlich muss man das an einem schwarzen Körper prüfen, da er allein alle Farben absorbiert (sonst wäre er nicht schwarz). Das Ergebnis ist die bekannte Kurve der Energieverteilung im Spektrum.



- Es fällt dem Nachdenklichen auf, dass sie an den beiden Enden nicht auf Null absinkt, sondern sozusagen in der Luft abbricht. Ein Wink, nun
5. das geschwärzte Thermometer auch neben das Rot, außerhalb des Farbenbandes, zu halten (und ebenso neben das Violett, was uns aber hier nicht interessieren soll). Ein dunkles, aber wärmendes „Licht“, „Ultrarot“, ist damit gefunden. Der Lernende glaubt, etwas ihm völlig Neues und Seltsames vor sich zu haben.

II.

6. Nun beginnt eine selbständige Fragestellung aus ganz anderer Richtung vorzustößen. Der Blick wendet sich jetzt auf die Lichtquelle. Das ist ein Körper in Weißglut (und zwar, wie wir hinzufügen müssen, im festen oder flüssigen Zustand, nicht gasförmig.) Es liegt nahe zu fragen: wie sah das Spektrum aus, bevor er in Weißglut kam? Wie hat es sich während des Anheizens entwickelt? Welches ist seine Geschichte? Man prüft das am besten mit einer Einfaden-Lampe (einer Glühlampe mit langem gerade gestrecktem Leuchtfaden). Sie wird mit Hilfe eines Vorschaltwiderstandes langsam geheizt. Wir sehen, was wir ohnehin von jedem Ofen wissen, dass die Rotglut der Weißglut vorausgeht; und danach erwarten wir auch für das Spektrum das Richtige: es entfaltet sich von Rot her.

III.

7. Nun ist es Zeit, I und II, im besonderen 5. und 6., im Denken nahe beieinander zu bringen. Da Rot nicht der Anfang ist, da das Spektrum sich aber von Rot her entrollt, so muss es wohl ursprünglich aus dem Ultrarot kommen. Der Versuch (das Thermometer durchsucht den Raum

des Spektrums und den Raum daneben, während der Faden der Lampe heißer und heißer wird) bestätigt, dass das Spektrum aus dem Ultrarot her über Rot weg sich ausbreitet.

IV.

8. Dies ist nun wieder zu konfrontieren mit etwas Einfachem, Alltäglichem und Bekanntem. Der überheizte Ofen, der ins rote, womöglich ins weiße Glühen gerät, ist ja vor der Rotglut auch schon strahlend tätig; das ist die Ausgabe der dunklen Wärmestrahlung, die wir alle kennen und die ja die eigentliche Aufgabe eines Ofens ist. Damit wird das geheimnisvolle Ultrarot mit einem Male als ein alter Bekannter entlarvt: es ist die dunkle Wärmestrahlung, die zuerst da war, dann immer dageblieben ist und nun bei der Brechung sich neben die sichtbare Strahlung aussortiert hat. Der Versuch bestätigt auch ausdrücklich: solange die Glühlampe noch gar nicht leuchtet, sondern nur heiß ist, nur Ofen, wird ihr dunkles „Licht“ vom Prisma schon an die richtige Stelle geleitet, an dieselbe, neben welche nachher, in der Glut, das Rot sich angliedern wird.