

Inge Finkbeiner / Hans Rebmann

**Zum Anfangsunterricht in Physik
an der Waldorfschule**

Als Manuskript gedruckt durch die Pädagogische Forschungsstelle
beim Bund der Freien Waldorfschulen

Stuttgart 1989

1. Auflage

Alle Rechte vorbehalten.
Auch der teilweise Abdruck ist nicht gestattet.

Wortlaute von Rudolf Steiner: Alle Rechte bei der
Rudolf Steiner-Nachlaßverwaltung, Dornach/Schweiz

Der Abdruck der Wortlaute Rudolf Steiners erfolgt mit freundlicher
Genehmigung der Rudolf Steiner-Nachlaßverwaltung.

Umschlaggestaltung: Lotte Boelger-Kling
Druck: H. Krauß GmbH & Co., Holderäckerstraße 6, 7016 Gerlingen

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
Vorwort	5	
 Teil I – Pädagogischer Teil		
Allgemeine pädagogische Gesichtspunkte	7	
Das zweite Jahrsiebt	7	
Zur Autorität	10	
Zur Methodik im Physikunterricht	12	
Zum Lehrplan	16	
Literatur	18	
Allgemeine Hinweise und Erfahrungen	19	
 Teil II – Physikalischer Teil		
6. Klasse		
Akustik	21	
Wärme	31	
Optik	31	
Elektrizität	39	
Magnetismus	45	
Allgemeines zur Physik in der 6. Klasse	47	
7. Klasse		
Wärme	49	
Optik	51	
Mechanik	57	
Akustik	63	
Elektrizität und Magnetismus	63	
8. Klasse		69

Zum Anfangsunterricht in Physik an der Waldorfschule

Vorwort

In ihrer Art vorzügliche Lehrbücher zur Einführung in die Physik gibt es viele. Sie legen meistens die Physik als Ausgangspunkt zugrunde und versuchen, dieselbe mit oft beachtlichem methodischen und didaktischen Geschick den Schülern nahe-zubringen. Der Ausgangspunkt des vorliegenden Buches ist ein anderer. Im Mittel-punkt steht das Kind und seine Entwicklungsgesetze, wie sie der Pädagogik der Waldorfschulen zugrunde liegen. Ein gewisses Maß an Kenntnis dieser Grundsätze ist eine Voraussetzung dazu, daß das Buch mit Gewinn gelesen und benützt werden kann. Nach diesen Grundsätzen wird die Physik in der geeigneten Form dazu verwendet, die Entwicklung des Kindes in einer gesunden Weise zu fördern – ein für den Fachphysiker ungewohnter Gedanke.

In der Waldorfpädagogik gibt es kein Rezept für den Unterricht. Was notwendig und richtig ist, muß jeweils an den Kindern abgelesen werden. Das vorliegende Buch soll daher nur als Wegweiser dienen und als Anregung einen Weg beschreiben, der vielfach mit Erfolg begangen wurde. Das Buch ist daher auch kein Experimentierbuch im üblichen Sinne, sondern beschränkt sich meistens auf gangbare, bekannte Versuche, für welche die notwendigen Geräte normalerweise in jeder Schule vorhanden sind. Aus diesem Grunde wurde auch auf Abbildungen verzichtet, ebenso auf historische Schilderungen, von wenigen Ausnahmen abgesehen. Solche können, meist in vorbildlicher Form, jedem modernen Lehrbuch entnommen werden. – Da der in der Unterstufe unterrichtende Lehrer an Waldorfschulen auf dem Gebiet der Physik meist Laie ist, wird für die Durchführung der Versuche vorausgesetzt, daß ihm ein erfahrener Kollege – aus der Unter- oder Oberstufe – helfend zur Seite steht und ihn mit allen notwendigen Handgriffen und was sonst noch zu beachten ist, vertraut macht. Es findet sich in dem Buch daher nur selten ein Hinweis, worauf bei einem Versuch besonders geachtet werden muß. Da die Sammlungen, Erfahrungen und Unterrichtseinrichtungen von Schule zu Schule sehr verschieden sind, sind in dem physikalischen Teil leere Seiten eingeschossen, auf welchen der Lehrer seine besonderen Unterrichtsergebnisse, Versuche, historische Daten usw. festhalten kann.

Da es sich bei diesem Anfangsunterricht zunächst noch um keine Fachphysik im strengen Sinne handelt und derselbe meistens, wie schon erwähnt, von einem Laien erteilt wird, wurde auch auf die übliche Fachsprache verzichtet. Der Fachmann wird daher manches ungewohnt, manches vielleicht sogar unverständlich finden und die scharfen Definitionen der Physik vermissen. Diese bleiben der Oberstufe vorbehalten; ein Kind auf der Unterstufe kann mit ihnen noch nichts anfangen. Es kann sie höchstens auswendig lernen. Auf der Unterstufe soll der Physikunterricht nur Erscheinungen, Vorgänge und Einrichtungen ins Bewußtsein heben, die die Kinder teilweise schon lange kennen.

Der Unterricht in der 6. Klasse wird in dem Buch ausführlicher besprochen, weil hier die Abweichung von den üblichen Darstellungen am größten ist. Später, in der 7. und 8. Klasse, wird dann die Annäherung an das gewohnte Physikbuch immer stärker.

In dem Buch finden sich zwei Teile: Im ersten Teil werden allgemeine pädagogische Grundlagen und Erfahrungen beschrieben; der zweite Teil enthält den eigentlichen Gang durch die Physik.

Teil 1

Pädagogischer Teil

Allgemeine pädagogische Gesichtspunkte

Pädagogische Maßnahmen wurden in der Vergangenheit aus einem mehr oder weniger gesunden Instinkt und aus Tradition heraus geboren. Beide sind in unserer Zeit verlorengegangen. Eine Erziehung ist heute nur durch bewußtes Lenken der kindlichen Entwicklungsschritte möglich. Der Waldorfpädagogik liegen die menschenkundlichen Erkenntnisse Rudolf Steiners zugrunde. Im folgenden wird nun das aus den pädagogischen Kursen Rudolf Steiners zusammengestellt, was hinführt zum Hauptteil des Buches, dem Physikunterricht der Unterstufe.

Zur allgemeinen Vorbereitung des Lehrers gehört der Rat, den Rudolf Steiner in „Meditativ erarbeitete Menschenkunde“¹⁾ den Waldorfllehrern gegeben hat. Er faßt ihn in drei Schritten zusammen. Der erste Schritt ist das Studium der Menschenkunde, der zweite das meditative Verstehen, damit der dritte Schritt, das Erinnern im Unterricht, folgen kann. Das wird dann ein schöpferisch-schaffendes Erinnern mit den Kindern sein.

Zu diesem aktiven Bemühen um die Menschenkunde kommt das Bemühen um den jeweiligen Unterrichtsstoff. „Es fällt einem nämlich, wenn man gut vorbereitet ist, alles mögliche ein“²⁾. Und so kann aus intensiver Vorbereitung Pädagogik zur lebendigen Kunst im Augenblick des Unterrichtens werden, wogegen sich ungenügende Vorbereitung bis in die Disziplin hinein negativ auswirkt.

Das zweite Jahrsiebt

Das zweite Jahrsiebt ist die eigentliche Lernzeit. Was in ihr versäumt, verfrüht oder verfehlt wird, hat seine nachteilige Wirkung auf das ganze weitere Leben des Menschen. Seine Seele verlangt in jedem Lebensalter etwas Bestimmtes. Weiß das der Erwachsene nicht und gibt er dem Kinde etwas anderes, dann reagiert es in einer seine Entwicklung hemmenden Weise. Alles Erziehen und Unterrichten soll also danach streben, für das spätere Leben physisch gesunde, seelisch freie und geistig klare Menschen zu bilden. Ein hohes Ziel³⁾! Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, sich nach den Entwicklungsschritten des Kindes zu richten und ihm das zu geben, was es unbewußt haben will und was es braucht⁴⁾.

Die Unterrichtsfächer sind nicht um ihrer selbst willen da, sondern als Erziehungsmittel in der Hand des Lehrers, um die gesunde Entwicklung des Kindes zu fördern. Wie im ersten Jahrsiebt der physische Leib des Kindes seine besondere

Pflege braucht, so im zweiten Jahrsiebt der ätherische oder Bildekräfteleib. Mit dem Zahnwechsel hat er seine aufbauende Tätigkeit abgeschlossen und wird nun frei, so daß seelische Qualitäten sich bilden können. Bild, Rhythmus und Autorität (im Sinne von autoritas) sind die drei Zauberworte für dieses Lebensalter.

In den Vorträgen über „Die gesunde Entwicklung des Leiblich-Physischen als Grundlage der freien Entfaltung des Seelisch-Geistigen“⁵⁾ beleuchtet Rudolf Steiner die Entwicklung des Kindes besonders intensiv von der leiblichen Seite her. Wie nach jedem Jahrsiebt jedesmal ein Wesensglied frei wird und für eine weitere seelisch-geistige Entwicklung zur Verfügung steht, so ergreift die werdende Individualität ihren physischen Leib schrittweise von oben nach unten. Die ersten gestaltenden Kräfte gehen vom Kopf aus. Im zweiten Jahrsiebt spielt der Atem und sein Rhythmus eine wichtige Rolle und mit dem Atem das ganze Muskelsystem. Die Muskeln in ihrem inneren Wachsen sind dem rhythmischen System zugewandt, und dieses ist wiederum vom Seelischen abhängig. So greifen wir Lehrer, wenn wir alles Rhythmische in unserem Unterricht pflegen, bis in das Wachstum der Muskeln ein.

Gegen das 12. Jahr hin wird das anders. Die Entwicklung erfaßt jetzt auch das Knochensystem. Die Muskeln fügen sich der Mechanik und Dynamik des Skeletts ein. „Wir machen da den wichtigen Übergang vom weichen System des Menschen zum ganz harten System, das sich ... wie ein objektives Hebelsystem in die Welt hineinstellt“⁵⁾. Und das Skelett wiederum paßt sich der Außenwelt an. Erst jetzt hat der Mensch seinen Leib ganz ergriffen und kann sich auf eine neue Art in die Außenwelt hineinstellen. Indem das Kind sich nun in seinem Knochensystem erlebt, erwacht in ihm die Fähigkeit, abstrakt zu denken. Gegen das 12. Jahr hin ist der Zeitpunkt gekommen, mit den naturwissenschaftlichen Fächern, darunter Physik, zu beginnen.

In den Vorträgen „Die Kunst des Erziehens aus dem Erfassen der Menschenwesenheit“⁶⁾, in Torquay gehalten, geht Rudolf Steiner von einer dreifachen Gliederung des zweiten Jahrsiebts aus, in der sich die seelische Reife des Kindes vollzieht. So spielt in das Alter von 7 bis 9 1/3 Jahren die Nachahmung aus dem ersten Jahrsiebt herein. Das Kind unterscheidet sich noch nicht deutlich als Subjekt von der objektiven Umgebung, alles hat noch einen einheitlichen Charakter. Es empfindet die Dinge noch „seelisch“: Mit Geschichten, in denen die Sterne, die Bäume, die Tiere, ja selbst die leblosen Dinge miteinander sprechen und sich menschenähnlich verhalten, kommt man diesem Bedürfnis entgegen. Naturwissenschaftliche Erklärungen sind dabei nicht angebracht, ja sie wären sogar schädlich⁷⁾.

Im zweiten Abschnitt bis gegen das 12. Lebensjahr entfalten sich vor allem die Kräfte des rhythmischen Systems⁶⁾. Wendet sich der Lehrer an diese, durch bildhaften Unterricht und im Sprechen von Gedichten, ermüdet er die Kinder am wenigsten. Jetzt kann das Kind zwischen Seelischem und Lebendigem unterscheiden⁸⁾, und man wird mit Schilderungen aus der Tier- und Pflanzenwelt das Kind in richtiger Weise fördern.

Erst im letzten Drittel des zweiten Jahres lernt das Kind Seelisches, Lebendiges und Totes unterscheiden⁶). Jetzt können behutsam physikalische Erscheinungen gezeigt und besprochen werden. Denn das Leblose, Tote wird mit dem erwachsenen Intellekt begriffen.

Verlangt man zu früh scharf konturierte Begriffe, eigenes Urteil, Definitionen, so werden seelische Kräfte beansprucht, die der Leib noch gar nicht freigegeben hat und die dem Kind noch nicht zur Verfügung stehen. Man schwächt damit die Natur des Kindes und legt sogar Krankheitskeime für das weitere Leben. Die abstrakt gewonnenen Erkenntnisse der Naturwissenschaften aufgrund des Prinzips von Ursache und Wirkung, die zu früh an das Kind herangebracht werden, zehren an den Lebenskräften, bringen die Atmung in Unordnung und führen im Alter in die Sklerose⁹). Das Kind ist, bevor es innerlich seine Knochen ergreift, noch kausalitätsblind¹⁰).

Kausalitäten erfassen, Begriffe unterscheiden, eigene Urteile bilden sind Tätigkeiten des Astralleibes. Frei für die Erziehung sind aber erst physischer Leib und Ätherleib. Der Astralleib steckt „noch in der physischen Natur des Kindes drinnen“¹¹). Deshalb prägt zu frühes selbständiges Urteilen des Heranwachsenden dasjenige „in sein Fleisch ein“, was sich nur „in seine Seele“ einprägen sollte. „Lassen wir zu früh urteilen, urteilt der Leib sein ganzes Leben hindurch.“ Auch beim Erwachsenen wird dann das Urteil vom leiblichen Befinden abhängig bleiben und nicht objektiv werden können. Ein wankelmütiger, im Urteil unsicherer Mensch ist die Folge.

Aber noch ein weiteres kommt hinzu: Der astralische Leib ist nicht nur der Träger des Urteils, sondern auch der Liebe. Diese aber erwacht in ihrer individuellen Form erst mit der Geschlechtsreife. Urteilt der Mensch mit freigewordenem Astralleib, dann ist einem gesunden Urteil auch stets etwas von der Kraft der Liebe, des Wohlwollens beigemischt, selbst bei einem kritischen Urteil. „Fügen Sie dem Kind die Untat zu, es zu früh kritisieren zu machen, es zu früh auf Ja und Nein abzustimmen, dann stopfen Sie dieses Ja und Nein, diese Kritik in den Ätherleib hinein“¹²). Wirkt der freigewordene Ätherleib bei dem Urteil mit, dann droht eine weitere Gefahr, denn er ist nicht wohlwollend, sondern seiner Natur nach auflösend, er ist ein Kräfteleib, kein Gefühlsleib.

Wie viel heutzutage gerade gegen dieses Entwicklungsgesetz gesündigt wird, können wir auf Schritt und Tritt beobachten. Wie lieblos und verurteilend sprechen Erwachsene oft über andere Menschen, und das vor den Ohren der Kinder! Das prägt sich tief ein und fordert zur Nachahmung heraus. Auch in dem falsch verstandenen „Freilassen der Kinder“ werden diese viel zu früh um ihr eigenes Urteil gefragt. – Hat man aber ein gesund empfindendes Kind vor sich, kann man beglückt erleben, daß es das tun möchte, was der Erwachsene will. Und das ist in diesem Alter das einzig Richtige. Daraus ergibt sich, daß der Erwachsene für das Kind urteilen muß.

Der Erwachsene handelt beim Volksschulkind dann richtig, wenn er ihm nicht nur das Eigenurteilen erspart, sondern wenn er auch sein Urteil nicht in eine abstrakte, sondern in eine bildhafte Form faßt. Er soll eine Sache charakterisieren, das heißt von verschiedenen Seiten beschreiben. Dabei kommt man wie von selbst zum Bild, das umso farbiger wird, je lebhafter die einzelnen Wesen ihre Eigenart zeigen. Der Lehrer wirkt durch eine solche Darstellung unmittelbar auf das Gefühl des Kindes und begründet ein im Gemüt wurzelndes Verstehen. Nur wenn ein Kind eine Sache zuerst mit dem Gefühl aufgenommen hat, wird sie so tief in seiner Seele verankert, daß sie später richtig mit dem Verstand begriffen werden kann.

Das gilt auch für den Physikunterricht. Da fordert Rudolf Steiner die Lehrer auf, allen Unterricht „in temperamentvoller Weise mit Gefühlsmäßigem zu begleiten“¹³), ihn zu „durchspicken“ mit leise Humorvollem und wiederum Traurigem, mit Spannung und Entspannung, denn die Gefühlsregungen beim Unterricht sind die besten Erinnerungshilfen.

Hat man dem Kind in der Volksschulzeit gefühlsdurchtränkte Bilder und Gleichnisse über Naturzusammenhänge gegeben und werden die Begriffe nicht zu scharf umrissen, können sie mitwachsen, weil sie noch lebendig gefühlt werden. Dann ist das Kind zum richtigen Zeitpunkt in der Lage, die Zusammenhänge zu erfassen, denen das Prinzip von Ursache und Wirkung zugrunde liegt. Es ist von entscheidender Bedeutung, daß man durch bildhaften Unterricht das Interesse der Kinder wach erhält. Dieses Interesse bewirkt in der Seele ein feines Lustgefühl, das dann im Leibe eine leichte Drüsenabsonderung zur Folge hat, wie Rudolf Steiner anschaulich beschreibt¹⁴). Diese wiederum kann die Salze auflösen, die durch übermäßige Gedankenbildung entstanden sind. Durchzieht aber Langeweile den Unterricht, bleiben Salze ungelöst im Körper und wirken schädigend.

Die Dinge greifen ineinander. Haben wir uns bemüht, eine Sache nicht abstrakt, sondern möglichst bildhaft den Kindern nahezubringen, so erleben sie das Bild als Wohltat und unbewußt als der aufnehmenden Seele adäquat. Reden wir in trockener Weise, so kann das Kind nicht lange zuhören. „Sehen Sie, was das autoritative Verhältnis untergräbt, ist die einseitige Intellektualität“¹⁵).

Zur Autorität

Wie das Kind im ersten Jahrsiebt die Welt nachahmen will, so will es aus seiner Natur heraus im zweiten Jahrsiebt eine Autorität neben sich haben, die ihm sagt, was es tun soll¹²). Es liegt im innersten Bedürfnis des Kindes, sich nach einer selbstverständlichen, verehrten Autorität zu richten. Was die geliebte Autorität für wahr, schön und gut hält, das hält auch das Kind für wahr, schön und gut. Durch die Augen des Erwachsenen sieht es die Welt. Dessen Urteil übernimmt es und gewinnt dadurch Halt und Sicherheit. Das Kind nimmt eine Sache auf, weil es den Lehrer liebt, nicht weil es die Sache unbedingt verstanden hat. Das Verstehen kommt später. Eine selbstverständliche, nicht erzwungene Autorität

muß der Lehrer in der Volksschulzeit für das Kind sein. Ja, wir müssen diese Zeit, in der das Kind sich nach Autorität „sehnt“, nützen und „es soweit bringen, daß wir unsere Autorität von der Geschlechtsreife an nicht mehr anzuwenden brauchen“¹⁶). Denn im dritten Jahrsiebt verlangt der junge Mensch die Gründe für eine Sache und wird leicht „rebellisch“, wenn er diese nicht einsehen kann.

Es ist ein Irrtum, zu meinen, die Freiheit werde begründet, wenn man das Kind schon recht früh freiläßt. Ein freier Mensch mit selbständigem Urteil wird man dadurch, daß man als Kind von der Hand eines geliebten Erwachsenen ruhig und sicher geführt worden ist. Unter diesem Schutz stärken sich die Seelenkräfte. Muß man als Kind diese Autorität entbehren, dann sucht man sie als Erwachsener in irgendeiner Weise immer noch und kommt leicht in die Abhängigkeit eines stärkeren Willens.

Wie wird der Lehrer nun die „geliebte Autorität“? Wer selbst unentwegt ein Lernender bleibt, hält seine Seele so regsam, daß Begriffe, Gefühle und Wille beweglich bleiben – und so Lebendiges auf Lebendiges wirkt. Der Funke der Begeisterung springt von uns auf die Kinder über, wenn wir aus innerem Interesse neue Erkenntnisse errungen haben. „Wenn wir bloß aus Pflicht heraus erziehen und unterrichten, dann wirken wir anders auf das Kind, als wenn wir mit innerer Wärme, mit Begeisterung an demjenigen hängen, was wir ihm zu vermitteln haben“¹⁷).

Ein wichtiges Gesetz, das für kranke wie für gesunde Kinder gilt, beschreibt Rudolf Steiner im Heilpädagogischen Kurs¹⁸): Stets wirkt auf ein Wesensglied des Kindes das nächsthöhere des Lehrers. Gesundend prägen sich also gute Gewohnheiten des Erwachsenen in den physischen Leib des Kindes ein, Gefühle und Begeisterung für eine Sache in seinen Ätherleib. Das erkennende, tätige Ich des Lehrers formt am Astralleib des Jugendlichen. Es gilt auch hier: „Jede Erziehung ist Selbsterziehung“, d. h. das Kind wird sich an uns erziehen, indem wir uns selbst erziehen. Stehen wir nicht mit durchsäuerter, gelangweilter Seele vor den Kindern, sondern strahlen Frische und Freundlichkeit aus, dann vermögen sie den Stoff, den wir ihnen vermitteln, auch anzunehmen¹⁹). Sie müssen einen Lehrer haben, den sie lieben können⁸). Nur so dringt das Neue, das sie lernen sollen, tief genug in ihre Seelen ein. Von dem persönlichen Verhältnis des Lehrers zum Schüler wird dessen Gemüts- und Willensbildung abhängen. Wir müssen uns liebenswert machen, damit uns das Kind aus seinem natürlichen Bedürfnis nach Autorität anerkennen kann²⁰).

Nicht nur in bezug auf den Stoff soll der Lehrer ein Lernender sein, sondern ebenso in bezug auf die Kinder. In dem Pädagogischen Kurs in Arnheim sagt Rudolf Steiner²¹): „Menschenkenntnis kann nur erworben werden, wenn die Menschenliebe – also hier die Liebe zum Kinde – zur werktätigen Gesinnung wird.“ – Zu der werktätigen Gesinnung gehören einige wichtige Eigenschaften, die sich der Lehrer, wenn er noch nicht darüber verfügt, in Selbstdisziplin anerkennen muß: Kein Lehrer kann auf die Dauer segensreich wirken, der im Umgang mit den Kindern Unterschiede macht. Er darf kein Kind bevorzugen oder benachtei-

ligen, er muß versuchen, alle mit gleicher Sympathie zu umfassen! Ein gerechter Lehrer wird als Autorität anerkannt werden, ebenso ein konsequenter Lehrer. Er darf nicht eine Maßnahme, die er heute getroffen hat, morgen wieder aufheben. Das alles verlangt prüfendes Vorausdenken, Geistesgegenwart und Phantasie. Auch muß er von Fehlern, die er an den Kindern rügt, selber frei sein, sonst erkennen sie ihn innerlich nicht an. Es ist wohl kaum nötig, zu erwähnen, daß der Lehrer sich zutiefst der Wahrheit verpflichtet fühlen muß. – Ist es notwendig, einen Schüler vor der Klasse besonders hervorzuheben, sei es lobend, sei es tadelnd, so bedenke man, daß Kinder dieses Alters in der Vorpubertät auf jegliche Herausstellung besonders empfindlich reagieren. Taktgefühl und Humor sind dabei zwei gute Berater.

Zur Methodik im Physikunterricht

Für die Methode des Physikunterrichts sind uns von Rudolf Steiner einige Hilfen gegeben worden. Beginnt man in der 6. Klasse mit der ersten Epoche, so lebt in den Kindern schon lange die freudige Erwartung darauf. Das Unbekannte oder Halbbekannte mit Spannung und Neugierde zu erwarten, ist ein guter Boden, den der Lehrer durch seine gelegentlichen Hinweise auf dieses neue Fach schon etwas vorbereitet hat. Nun kommt er dem Verlangen der Kinder entgegen. Das heißt aber nicht, daß er jetzt ganz „wissenschaftlich“ wird und aus dem Buch vor den Kindern doziert.

Das physikalische Lehrbuch, so wie es aus der heutigen Naturwissenschaft heraus geschrieben ist, eignet sich noch nicht für dieses Lebensalter. Erst für Schüler ab 18 Jahre kann es ohne Schaden verwendet werden. Begriffe aus dem Lehrbuch „halten die Seele klein“¹⁹⁾. Die Lehrbücher können dem Unterrichtenden als Wissensvermittler dienen. Er steht dann vor der Aufgabe, den Stoff nach menschenkundlichen Gesichtspunkten umzuformen. Durch das vorliegende Buch wird versucht, dem Lehrer diese Arbeit zu erleichtern und Ergebnisse der Wissenschaft in methodisch-menschenkundlichem Aufbau zu entwickeln. Dabei ist zu bedenken, daß das intellektuelle Wissen immer noch vorsichtig dosiert werden muß und daß, obwohl das kausale Denken nun möglich wird, weiterhin auch Gefühl und Wille zu ihrem Recht kommen müssen.

Auch nach dem 12. Lebensjahr bleibt das Fühlen ein überaus wichtiger Faktor im Unterricht. Denn es ist – wie schon erwähnt – gerade das Gefühl der wichtigste Erinnerungsträger, weil sich alle Vorstellungen in Gefühlsregungen verwandeln¹³⁾. Wollen wir etwas erinnern, so holen wir aus dem Bereich des Fühlens die Vorstellungen herauf und nehmen sie innerlich erneut wahr. Der Unterricht sollte niemals beim bloß intellektuellen Vermitteln stehen bleiben und sich auch nicht im „trivialen Anschauungsunterricht“ verlieren, was „die Seele verödet“, sondern stets das Gefühlsmäßige mit einbeziehen. So ist auch für den Physikunterricht notwendig, „daß das Kind, während man unterrichtet, eben immer auch Gefühlsregungen hat“¹³⁾.

Am unmittelbarsten entwickelt das Kind Gefühle, wenn man auf den Zusammenhang mit dem Menschen kommt. Soviel wie möglich sollten wir auch im Physikunterricht äußere Vorgänge an den Menschen anknüpfen. „Warum sollen wir nicht von der Wärmeerscheinung zum Fieber übergehen können?“¹³). Dadurch erlebt das Kind, daß der Mensch zur Welt gehört und deren Gesetze auch in ihm auftreten. Das Anknüpfen an den Menschen ist insofern auch eine Erinnerungshilfe, als „das Kind gar nichts vorstellen kann, was auf den Menschen Bezug hat, ohne ein Gefühl damit zu verknüpfen ... Bei dem Allerobjektivsten ist es am allerleichtesten möglich, auf den Menschen hinzulenken, weil wirklich die ganze Welt im Menschen zu finden ist“¹³). Es gibt ein Gefühl, das besonders im Physikunterricht entwickelt werden kann, das ist das Staunen. Ist es nicht zum Staunen, daß durch die kleine Öffnung der Camera obscura ein umgekehrtes Bild auf der Leinwand entsteht? Oder daß ein wohlklingender Ton eine ebene, schöne Form bei den Chladnischen Klangfiguren hervorbringt, ein unreiner Ton dagegen eine chaotische Form? Oder daß die Erde ohne Draht den elektrischen Strom weiterleitet²²)? Und wieviel Beispiele zum Staunen enthält die Farbenlehre! Naturgesetze ebenso im großen Kosmos wie im kleinen Experiment, wie im Menschen zu entdecken, kann in dem Jugendlichen ein Gefühl des Vertrauens in die Ordnung der Welt hervorrufen. Das Erlebnis ist wichtig, daß Ich und Welt nicht auseinander fallen, daß keine Kluft entsteht zwischen natürlicher und menschlicher Weltordnung²³).

Finden wir dazu noch Gedichte, die diesen Zusammenhang in künstlerischer Form ausdrücken und die gemeinsam rezitiert werden, so ahnen die Kinder, wie hinter allen Erscheinungen große Gesetze walten, und ein an das Religiöse grenzendes Gefühl kann sich einstellen.

Aber auch die humorvolle Seite soll im Physikunterricht zu ihrem Recht kommen. Rufen doch oft schon die Experimente selber große Heiterkeit hervor! Ob wir mit einem blanken, biegsamen Blech durch die Reihen der Klasse gehen und den konkaven und konvexen Spiegel mit seinen Verzerrungen erleben lassen, oder ob die Kinder mit Hilfe eines Fadens und zwei Joghurtbechern quer durch die Klasse miteinander „telefonieren“, oder ob sie sich mit einem alten Morseapparat lustige Texte zumorsen, oder ob sie mit Leichtigkeit den zufällig in die Klasse kommenden Hausmeister mit dem Flaschenzug hochziehen – für Gefühlserlebnisse ist reichlich Gelegenheit!

Ein weiteres wichtiges Prinzip ist folgendes²⁴): Trotz der Bewußtlosigkeit beim Schlafen sind die Wesensglieder des Menschen äußerst rege und beschäftigen sich intensiv mit den Ereignissen des Tages. Was da an Fragen stehen geblieben ist, wird in der Nacht weitergeführt, und zwar in einer ganz anderen Welt und unter ganz anderen Umständen als am Tage. Rudolf Steiner berücksichtigt diese Tatsache auch für den Unterricht. Die Kinder sollten über das Neuaufgenommene nicht am gleichen Tag bis zum physikalischen Gesetz geführt werden, sondern es erst durch die Nacht tragen. Andernfalls entstünde in ihnen ein automatenhaftes Lernen, das sich nicht mit dem ganzen Menschen verbinden kann. Deshalb sollte der Physikunterricht in drei Schritten erfolgen:

Da haben wir zunächst auf dem Versuchstisch einige Apparate aufgebaut, mit denen wir Experimente vorführen wollen. Die Kinder sind an den Versuchen meistens sehr interessiert; es ist spannend, Neues zu erleben. Mit allen Sinnen sind sie beteiligt. Hauptsächlich das Auge verfolgt aufmerksam den Ablauf des Geschehens. Die Seele muß dabei den Vorgang mit Verständnis begleiten, Wahrnehmungen mit Begriffen verbinden, Schlüsse ziehen usw. Weil der Mensch beim Schlüssebilden vor allem sein Willenssystem benützt, d. h. vom Körperlichen aus gesehen dies mit seinem Stoffwechsel-Gliedmaßensystem tut, wobei das Urteilen und Vorstellen halbbewußt nebenher läuft²⁴), so ergreift diese Art des aufmerksamen Wahrnehmens beim Experimentieren den ganzen Menschen. Nun ist die menschliche Organisation zu schwach, für längere Zeit als Ganzes beansprucht zu werden. Die Kinder geraten zu sehr außer sich. Deshalb muß auf den ersten Schritt des Experimentierens ein zweiter Schritt folgen, der nicht den ganzen Menschen, sondern vor allem das rhythmische System benützt.

Das geschieht, indem man nun die Geräte beiseite läßt und mit den Kindern zusammen das unmittelbar Erlebte erinnernd noch einmal durchgeht, „Revue passieren läßt“. Es sind hauptsächlich Vorstellungen und Urteile, mit denen wir das Wahrgenommene befestigen. Die Kinder kommen durch die erinnernde Tätigkeit wieder zur Ruhe. Nun tragen sie, neben vielen anderen Tageseindrücken, diese Physikstunde durch den Schlaf. Dabei strömt das, was der ganze Mensch wahrgenommen, der rhythmische Mensch erinnert und geurteilt hat, in den Kopf hinauf und erzeugt dort Bilder von dem Aufgenommenen. Mit diesen „Photographien im Kopf“²⁴) bekommen wir die Kinder am nächsten Tag in die Schule herein. Auf diese Bilder muß der Lehrer nun Rücksicht nehmen. Er versucht, zusammen mit den Kindern im Erinnern an den vorigen Tag, die Vorstellungen zu ordnen, zu durchdenken und die Gesetzmäßigkeiten aus den Experimenten herauszuarbeiten. Erst wenn diese denkerische Tätigkeit, die mehr den Kopf beansprucht, zu einem gewissen Abschluß gekommen ist, können neue Experimente vorgeführt werden. Würde man die mitgebrachten Bilder unberücksichtigt lassen und gleich weiter experimentieren, so würden sich die Vorstellungen chaotisieren, anstatt sich zu festigen. Es ist für das spätere Leben des Kindes von entscheidender Bedeutung, ob der Erzieher im Einklang mit den Lebensvorgängen und dadurch gesundmachend gewirkt oder gegen diese und dadurch Krankheiten veranlagt hat. In dieser Beziehung hat der Lehrer sein Verantwortungsgefühl ständig zu vergrößern und zu vertiefen.

Zwar braucht das Gefühl der Kinder auch nach dem 12. Lebensjahr Nahrung, aber ihr Wille muß jetzt, je älter sie werden, umso stärker auf die Lebenspraxis hingelenkt werden.

Alle Versuche sollten, wie schon erwähnt wurde, möglichst vom Leben ausgehen und wiederum in die Praxis des Lebens einmünden. Dieses Vorgehen entspricht ganz dem Bedürfnis der 12–14jährigen, vor allem der Knaben. So kann man die Wärmelehre beispielsweise damit beginnen, daß die Türe vom warmen Klassenzimmer zum kalten Flur etwas geöffnet und eine brennende Kerze oben und unten

in den Spalt gehalten wird. Oben weist die Kerzenflamme nach außen, unten nach innen. Es strömt also unten kalte Luft nach innen, oben warme Luft nach außen. Der „fußkalte“ Boden ist damit anschaulich gemacht²²). Auch beim Hebel sollte man nicht vom Hebelgesetz ausgehen, sondern von der Waage und erst allmählich zum abstrakten Gesetz überleiten. Hat man gar Gelegenheit, die Kinder auf einer Wippe im fröhlichen Experimentieren ihre Gewichte sich gegenseitig austarieren zu lassen, dann haben sie das Hebelgesetz zuerst an ihrem Körper erlebt, bevor sie es mit den Gedanken als Gesetz erfassen. Fängt der Lehrer mit der Abstraktion an, so wird das Kind leicht müde, wogegen es nicht müde wird, wenn man vom Leben ausgeht⁶). Das ist das Gesunde am Unterricht, daß Tun und Denken, Eigentätigkeit und Betrachten sich abwechseln in rhythmischer Folge und so sich das Gleichgewicht halten. Wenn Rudolf Steiner im allgemeinen fordert: „Jeder einzelne Gegenstand sollte dazu verwendet werden, das Kind hineinzuführen in eine Anschauung über das praktische Leben“²⁵), so bietet sich der Physikunterricht dafür geradezu an. Gehen wir bei der Akustik vom Musikalischen aus, so kommen wir in der 8. Klasse beim Verständnis der einzelnen Musikinstrumente an. Die Wärmelehre läßt die Kinder nicht nur das Windrädchen, sondern auch die Warmwasserheizung und die Strömung des Golfstromes verstehen. Ist in der Optik das Brennglas der Ausgangspunkt, dann werden die Kinder leicht begreifen, wie konkave und konvexe Linsen wirken, wie Fernrohr, Photo- und Projektionsapparat funktionieren. Darüber hinaus entdecken sie beim Auge eine ähnliche Gesetzmäßigkeit. Die Versuche mit den unsichtbaren Kräften des Magnetismus und der Elektrizität führen zum Verständnis für Kompaß und Elektromotor und andere praktische Geräte.

„Wir sollten nicht unterlassen, aus den physikalischen, naturgeschichtlichen Begriffen, die wir gewonnen haben, heraus das Kind einzuführen in den Gang wenigstens ihm naheliegender Betriebssysteme“²⁶): So werden wir, innerlich folgerichtig, einschlägige Betriebe mit unserer Klasse besichtigen, z. B.: eine Spinnerei, eine Glasbläserei oder ein Wasserwerk. Die Kinder sehen, wie Bestecke gestanzt, Stuhlbeine gedreht, wie Leder hergestellt wird, oder wie Schuhe gemacht werden. Sie lernen dabei verschiedene Berufe und das Leben in einem Betrieb kennen. Rudolf Steiner schlägt vor, die Eindrücke bei solchen Betriebsbesichtigungen in einem Heft von den Kindern festhalten zu lassen²⁶). So bleibt dem jungen Menschen das Gefühl, er habe einmal etwas von der Arbeitswelt erfahren. Dieses Kennenlernen seiner technischen und wirtschaftlichen Umgebung gibt ihm im späteren Leben Sicherheit. Ist ihm dieses Fadenschlagen zur Lebenspraxis in seiner Jugend nicht ermöglicht worden, so beschleicht ihn, wenn er als Erwachsener technische Einrichtungen benützt, Unsicherheit, Verwirrung, Nervosität, weil er die Vorgänge dabei nicht einmal anfänglich durchschauen kann. „Wir sind nicht zum geringen Grund gerade aus diesen Ursachen heraus ein nervöses Geschlecht geworden“²⁵).

Es gilt für den Lehrer, Rudolf Steiners dringenden Rat stets im Bewußtsein zu haben: „Sie müssen das Kind anleiten, nur solche Dinge zu denken, die auch im Leben vorhanden sind... Darin besteht das Ur-Urübel unseres Unterrichts, daß

sich so vieles von der Wirklichkeit entfernt²⁶). Daß der richtig geführte Physikunterricht auf der anderen Seite das Bedürfnis nach sozialen und ethisch-religiösen Fragen weckt, ist eine oft erlebte Erfahrung. Aus den Polaritäten erwächst ein gesunder Rhythmus im Unterricht. „Das ist das Sonderbare, daß die richtige Erziehung des Intellekts auf die Aktivierung des Willens, die richtige Erziehung des Willens auf die Aktivierung des Intellekts wirkt²⁵).

Nicht nur das Religiöse, sondern auch die Kunst wird vom Wesen des jungen Menschen als Gegengewicht zum naturwissenschaftlichen Unterricht gefordert. Wie zu einer Waage sollte der gesamte Unterricht werden²⁷).

Auf der einen Seite werden die Schüler in den naturwissenschaftlichen Fächern zur „Prosa“ des Lebens, zur Praxis geführt, auf der anderen Seite sollen Kunstverständnis, sowie religiöse und moralische Vertiefung ihre Seelenkräfte ins Geistige hineinlenken. So kann ein gesundes Gleichgewicht entstehen.

Alle drei Seelenkräfte im Menschen bedürfen der Pflege. Erst wenn zum Denken Gefühls- und Willenskultur hinzukommen, kann eine Erziehung gedeihlich werden. Die Einheit von Denken, Fühlen und Wollen, von Wissenschaft, Kunst und Religion sollte angestrebt werden, um den ganzen Menschen zu fördern.

Zum Lehrplan

„Für die pädagogisch-didaktische Praxis braucht man wirkliche Menschenkenntnis²⁸). Und es ist möglich, wenn man den ganzen Menschen nach Leib, Seele und Geist voll erkennt, für jedes Lebensalter des Kindes aus der kindlichen Natur selber den Lehrplan, die Lehrziele abzulesen.“

Immer wieder macht der Klassenlehrer die Erfahrung, in welcher überraschender Weise der Lehrplan zu den jeweiligen Altersstufen paßt und wie eine Antwort auf unausgesprochene Fragen ist. Es ist sogar möglich, manches, was im ersten Jahrsiebt verfehlt worden ist, im zweiten Jahrsiebt noch auszugleichen²⁹). Selbstverständlich wird man um Kompromisse bei der Einhaltung des Lehrplans nicht ganz herumkommen, besonders in den höheren Klassenstufen. Der Lehrer der Unterstufe ist in dieser Beziehung noch verhältnismäßig frei.

Es ist eine menschenkundliche Gesetzmäßigkeit, daß mit dem 12. Jahr die Kinderseele für das Verständnis des Leblosen, für das Experiment, für Vorgänge, die durch Ursache und Wirkung geregelt werden, reif wird. In den Lehrplanvorträgen vom September 1919 gibt Rudolf Steiner³⁰) unter anderem für den Physikunterricht folgenden Aufbau:

„Wir beginnen den Physikunterricht, indem wir die Akustik herausgebären lassen aus dem Musikalischen. Also Sie knüpfen durchaus die Akustik an die musikalische Tonlehre an und gehen dann über zur Besprechung der physikalisch-physiologischen Beschaffenheit des menschlichen Kehlkopfes.“ Von Optik, Wärmelehre, Magnetismus und Elektrizität sollten die Grundbegriffe eingeführt werden, die in der 7. Klasse erweitert werden. Als neues Kapitel in dieser Klasse kommt die

Mechanik dazu, also das Wichtigste von Hebel und Rad, von Welle und Flaschenzug, von Walze und Schraube und von der schiefen Ebene. Alle bekannten Gebiete werden in der 8. Klasse wiederholt, erweitert und vor allem in ihrer praktischen Anwendung gezeigt. Neu hinzu kommt die Hydraulik mit Auftrieb, Druck und Seitendruck bis hin zum Archimedischen Prinzip. Der physikalische Unterricht soll durch die Aerodynamik und damit zusammenhängend durch Klimatologie, Barometer- und Witterungskunde abgeschlossen werden. Caroline von Heydebrand stellt die Fachgebiete der Physik ebenso dar. Sie betont zusätzlich, daß in der 6. Klasse der Übergang vom Künstlerischen zum Wissenschaftlichen zu berücksichtigen sei.

Mit diesen Hinweisen sind die einschlägigen Stellen aus den Vorträgen Rudolf Steiners noch lange nicht erschöpft. Wenn sie als Anregung zum Eigenstudium betrachtet werden, haben sie ihren Zweck erfüllt.

LITERATUR

- 1) „Meditativ erarbeitete Menschenkunde“, Stuttgart 1920, 3. Vortrag, GA 302
- 2) „Die pädagogische Praxis vom Gesichtspunkt geisteswissenschaftlicher Menschenerkenntnis“, Dornach 1923, 6. Vortrag, GA 306
- 3) „Erziehungsfragen im Reifealter“, Stuttgart 1922, 1. Vortrag, GA 304
- 4) „Die geistig-seelischen Grundkräfte der Erziehungskunst“, Oxford 1922, 8. Vortrag, GA 305
- 5) „Die gesunde Entwicklung des Leiblich-Physischen als Grundlage der freien Entfaltung des Seelisch-Geistigen“, Dornach 1921/22, 11. Vortrag, GA 303
- 6) „Die Kunst des Erziehens aus dem Erfassen der Menschenwesenheit“, Torquay 1924, 7. Vortrag, GA 311
- 7) „Die gesunde Entwicklung des Leiblich-Physischen als Grundlage der freien Entfaltung des Seelisch-Geistigen“, Dornach 1921/22, 10. Vortrag, GA 303
- 8) „Die pädagogische Praxis vom Gesichtspunkte geisteswissenschaftlicher Menschenerkenntnis“, Dornach 1923, 3. Vortrag, GA 306
- 9) „Drei Vorträge über Volkspädagogik“, Stuttgart 1919, 1. Vortrag, GA 192
- 10) „Anthroposophische Pädagogik und ihre Voraussetzungen“, Bern 1924, 5. Vortrag, GA 309
- 11) „Die Erneuerung der Pädagogisch-Didaktischen Kunst durch Geisteswissenschaft“, Basel 1924, 11. Vortrag, GA 301
- 12) „Die pädagogische Praxis vom Gesichtspunkt geisteswissenschaftlicher Menschenerkenntnis“, Dornach 1923, 5. Vortrag, GA 306
- 13) „Menschenerkenntnis und Unterrichtsgestaltung“ (Ergänzungskurs), Stuttgart 1921, 1. Vortrag, GA 302
- 14) „Menschenerkenntnis und Unterrichtsgestaltung“, Stuttgart 1921, 4. Vortrag, GA 302
- 15) „Erziehungsfragen im Reifealter“, Stuttgart 1922, 2. Vortrag, GA 302
- 16) „Die gesunde Entwicklung des Leiblich-Physischen als Grundlage der freien Entfaltung des Seelisch-Geistigen“, Dornach 1921/22, 13. Vortrag, GA 303
- 17) „Die Erneuerung der Pädagogisch-Didaktischen Kunst durch Geisteswissenschaft“, Basel 1920, 3. Vortrag, GA 301
- 18) „Heilpädagogischer Kurs“, Dornach 1924, 2. Vortrag, GA 317
- 19) „Geistige Wirkenskräfte im Zusammenleben von alter und junger Generation“, Stuttgart 1922, 9. Vortrag, GA 217
- 20) „Die Erneuerung der Pädagogisch-Didaktischen Kunst durch Geisteswissenschaft“, Basel 1920, 7. Vortrag, GA 301
- 21) „Der pädagogische Wert der Menschenerkenntnis und der Kulturwert der Pädagogik“, Arnheim 1924, 1. Vortrag, GA 310
- 22) „Erziehungskunst Methodisch-Didaktisches“, Stuttgart 1919, 8. Vortrag, GA 294
- 23) „Die gesunde Entwicklung des Leiblich-Physischen als Grundlage der freien Entfaltung des Seelisch-Geistigen“, Dornach 1921/22, 16. Vortrag, GA 303
- 24) „Menschenerkenntnis und Unterrichtsgestaltung“ (Ergänzungskurs), Stuttgart 1921, 3. Vortrag, GA 302
- 25) „Die Erneuerung der Pädagogisch-Didaktischen Kunst durch Geisteswissenschaft“, Basel 1920, 14. Vortrag, GA 301
- 26) „Erziehungskunst Methodisch-Didaktisches“, Stuttgart 1919, 12. Vortrag, GA 294
- 27) „Gegenwärtiges Geistesleben und Erziehung“, Ilkley 1923, 12. Vortrag, GA 307
- 28) „Das Wesen der Anthroposophie“, Elberfeld 1922, GA 80
- 29) „Allgemeine Menschenkunde als Grundlage der Pädagogik“, Stuttgart 1919, 1. Vortrag, GA 293
- 30) „Lehrplan-Vorträge“, Stuttgart 1919, 1. Vortrag, GA 295

Allgemeine Hinweise und Erfahrungen

Um den ersten Physikunterricht an Waldorfschulen tauchen immer wieder die gleichen Fragen auf und eine Reihe von allgemeinen Erfahrungen, von welchen einige nachfolgend angesprochen seien.

Auf Elternabenden wird oft durch Eltern mit naturwissenschaftlichen oder technischen Kenntnissen nach dem Sinn und Hintergrund dieses ersten Physikunterrichtes gefragt. Man wird sie beruhigen mit dem Hinweis auf die Oberstufe, wo er in die gewohnte Form einmündet, und ihnen auseinandersetzen, daß dies angesichts der Entwicklungsstufe ihrer Kinder jetzt noch nicht richtig wäre. Bei einem Physikunterricht nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten und systematischem Aufbau wären die Kinder überfordert. Daher beginnt die Physik hier nicht mit der Mechanik, zu deren wirklichem Verständnis die Kinder noch nicht herangereift sind (siehe pädagogischer Teil), sondern mit einem dem Erlebnisbereich des Kindes näheren Gebiet, wie Akustik, Wärmelehre oder Optik. Das Kind soll bei diesem Unterricht nur Phänomene, Vorgänge und Einrichtungen in das Bewußtsein heben, die es vielleicht schon lange kennt. Alles Theoretische muß vorläufig ferngehalten werden.

Langsam soll das Kind in dieser Physik erleben, daß es in seiner Umgebung ein Gebiet gibt, das man verstehen und durchschauen kann, und nach und nach dafür ein Gefühl entwickeln, daß es sich dabei um das Tote, Unbelebte in seinem Umkreis handelt. Anfangs haben die Kinder noch keine Distanz zu dem im Unterricht Erlebten, weil sie noch nicht intellektuell reagieren und diese Erlebnisse erst durch die Führung des Lehrers verarbeitet werden. Deshalb zieht dieser zunächst auch keine scharfe Grenze zwischen der belebten und der unbelebten Natur.

Der Klassenlehrer wird sich bei der Vorbereitung des ersten Physikunterrichtes das methodische Mittel der wiederholten Ankündigung der neuen Epoche nicht entgehen lassen, so daß die Kinder diesen Unterricht mit Spannung erwarten, eine Spannung, die der Lehrer voller Erwartung mit den Kindern teilt. Auf diese Weise wird ihre Gefühlswelt in gesunder Weise angesprochen. – Da der Lehrer auf dem Gebiet der Physik meistens kein Fachmann ist, muß er sich von einem auf diesem Gebiet erfahrenen Kollegen helfen lassen, wie schon im Vorwort betont wurde. Ist dies ein Oberstufenlehrer, so wäre es ideal, wenn dieser auch auf irgendeinem Gebiet der Unterstufe praktische Unterrichtserfahrung hätte, um bei seinen Beratungen den spezifischen Anforderungen der Altersstufe der Kinder entsprechen zu können. – Als Oberstufenlehrer sollte er nicht allzu engherzig sein, wenn ein Experiment auf der Unterstufe vorgeführt wird, von dem er meint, es müsse der Oberstufe vorbehalten bleiben. Sehen die Kinder ein Experiment erneut, so erleben sie dasselbe völlig anders, denn sie haben sich inzwischen neue Fähigkeiten erworben und sich ein großes Stück weiterentwickelt. Es ist sogar gut, wenn auf der Unterstufe bei den Kindern ein leises Gefühl dafür geweckt wird, daß sie jetzt noch nicht alles verstehen und durchschauen können, sondern noch vieles dazuler-

nen müssen. So ist es auch nicht schlimm, wenn der Klassenlehrer einmal etwas nicht weiß und bei der Antwort auf ein Nachfragen und bis auf den nächsten Tag vertrösten muß. Die Kinder wissen gut, daß er auf diesem Gebiet selbst ein Lernender ist. – Auch soll sich der Klassenlehrer nicht beunruhigen, wenn es in seiner Klasse Kinder gibt, meist sind es Buben, die mit Fachausdrücken um sich werfen und damit ihr großes Interesse an der Physik bekunden. Erfahrungsgemäß liegen hier keine zusammenhängende Fachkenntnisse vor und keine Übersicht, so daß der Lehrer meistens sehr leicht zeigen kann, daß es noch viel zu lernen gibt. Es trägt aber viel zur Belebung des Unterrichts bei und bindet diese vorausstrebenden „Fachleute“ in den gemeinsamen Gang des Unterrichtes ein, wenn der Lehrer sie als Helfer und Mitakteure am Experimentiertisch bei seinen Versuchen einsetzt. Manche Buben leisten dabei Vorzügliches, und die ganze Klasse kann davon lernen.

Auf eine Gefahr muß der Lehrer, besonders bei der Mechanik und der Elektrizitätslehre, achten: Es darf die Klasse nicht in einen intellektuell wachen, „fachkundigen“ und einen desinteressierten, trägen Teil, der glaubt, das alles nicht verstehen zu können, zerfallen. Die strenge Fachsprache soll der Lehrer mindestens anfangs möglichst vermeiden und, wo er irgend kann, vom alltäglichen Leben ausgehen. Zu seiner Vorbereitung sind ältere Physikbücher viel besser, denn er hat, bildlich gesprochen, einen Acker vorzubereiten, auf welchem dann das auf der Oberstufe Gepflanzte in gesunder Weise aufwachsen kann.

Sitzen die Kinder endlich im Physiksaal, so möchten sie die Experimente mit den geheimnisvollen Geräten, die überall herumstehen, möglichst intensiv erleben. Daher ist es gut, wenn die Apparate und Versuchseinrichtungen möglichst robust und groß sind. Daß sich der Lehrer vor dem Unterricht mit diesen Geräten gründlich vertraut gemacht hat, braucht wohl nicht besonders betont zu werden; nur so kann er sich mit seinen Kindern zusammen freuen, wenn die Experimente gelingen. Gerade die gründliche Vorbereitung vermag bei ihnen ein Gefühl hervorzurufen von der Sicherheit und Exaktheit, die ein Charakteristikum der Physik sind. Die eigene Arbeit der Kinder sollte sich noch darauf beschränken, das Erlebte mündlich und schriftlich, auch mit Hilfe von Zeichnungen, wiederzugeben. Bei diesen Versuchsbeschreibungen sollen sie sich darin üben, einen Vorgang genau zu schildern und dabei das Wesentliche herauszufinden. Der zusammenfassende Text muß hingegen noch von dem Lehrer diktiert werden. – Der Oberstufenlehrer wird dankbar sein, wenn er dann seine Arbeit auf einer genauen Schilderung dessen aufbauen kann, was auf der Unterstufe behandelt worden ist.

Ein betrübliches Kapitel ist meistens der Zustand der Sammlung der Unterstufenphysik. Oft sind Geräte nicht mehr gebrauchsfähig oder haben sich gar in andere Sammlungen verirrt. Ohne einen verantwortlichen Betreuer wird dies nie anders werden. Er muß dafür sorgen, daß alle Geräte in Ordnung sind und ihren festen Platz haben. Nur so ist ein befriedigender Unterricht möglich.

Teil II

Physikalischer Teil

6. Klasse

Akustik

Das klassische Gebiet, mit welchem der Unterstufenlehrer seinen Unterricht der Physik beginnen kann, ist die Akustik. Hier hat das Kind schon Erfahrungen verschiedenster Art gesammelt, und diese gilt es nun in das Bewußtsein heraufzuholen.

Es wäre angesichts der Pädagogik, wie sie die Waldorfschule vertritt, nicht richtig, wenn man in der Akustik mit den mechanischen Bewegungsvorgängen, den Schwingungen, beginnen würde. Auf diese wird später eingegangen. Man beginne vielmehr mit einem großen Griff, mit einem universellen Gesetz, für welches das Kind in diesem Alter noch ein unmittelbares Verständnis hat: Das Kind soll verstehen lernen:

Durch den Ton erfahre ich etwas über den äußeren oder inneren Zustand eines tönenden Gegenstandes oder Wesens.

Der Lehrer wird die verschiedensten Gegenstände, die auf dem Experimentiertisch stehen oder aufgehängt sind, durch Klopfen, Reiben, Streichen zum Tönen bringen. Sehr bewährt haben sich Metallplatten gleicher Größe, aber aus verschiedenen Materialien, zu denen man Platten aus Glas, Holz, Kunststoffen oder Pappe dazunehmen kann. Eine große Überraschung ist hierbei immer das Anschlagen der Bleiplatte! Nimmt man von derselben Kupfertafel zwei Platten, läßt eine davon unbearbeitet und hämmert die andere, so ist der Klangunterschied beim Anschlagen der beiden Platten erstaunlich. Parallelen zu Menschen, die vom Schicksal „gehämmert“ wurden, liegen nahe.

Unterschiede im Ton verschiedener Holzsorten bei gleichen Abmessungen der Klötzchen oder Brettchen, die nebeneinander aufgehängt sein müssen, sind auffallend. Trocknet allerdings das Holz im Laufe der Zeit aus, so werden die Klangfarben einander immer ähnlicher.

Alte Milchflaschen, soweit man sie noch auftreiben kann, ungleich hoch mit Wasser gefüllt und aufgehängt, geben Töne in verschiedener Höhe ab. Man kann sie auf eine Tonleiter einstimmen und eine Melodie auf ihnen spielen.

Einen besonders schönen Ton erzeugt ein mit einem feuchten Finger am Rande kreisförmig geriebenes, gestieltes Weinglas. Füllt man mehrere Gläser verschieden hoch mit Wasser, kann man auf ihnen wie auf einer Glasharmonika spielen.

Ein Ei, dessen Schale gesprungen ist, klingt, wenn man es leicht anklopft, anders als ein heiles Ei. Dasselbe gilt für zwei Kaffeetassen, eine mit einem Sprung, die andere ohne einen solchen. Am besten gelingt dieser Versuch, wenn die Tassen aufgehängt werden.

Man soll bei diesem Anfangsunterricht der Physik nicht sich ängstlich auf die unbelebte Natur beschränken. Den Unterschied zwischen der unbelebten-physikalischen und der belebten Natur macht sich das Kind erst langsam bewußt. Daher sollen hier auch die verschiedensten Tierstimmen, besonders Vogelstimmen, behandelt werden. Aus ihnen läßt sich vieles vom Wesen des betreffenden Tieres heraushören.

Als eine Krönung des hier verfolgten Prinzips bespricht man die menschliche Stimme, aus deren Ton man auf den inneren Zustand eines Menschen, auf seine Stimmung wie Zorn, Trauer, Freude, Enttäuschung, Gleichgültigkeit, Herzlichkeit schließen kann.

Bei all diesen Tönen, Geräuschen und Lauten sollen sich die Kinder lebhaft äußern, was sie dabei empfinden und was ihnen als Besonderes auffällt.

Der nächste Schritt bei der Einführung in die Akustik ist nun das Bewußtmachen des Zusammenhanges von Ton und Schwingung. Eine schwierige Sache und gefährliche Klippe!

Zunächst wird man den Kindern zeigen, wie sich an den verschiedensten tönenden Gegenständen Schwingungen nachweisen lassen: Eine Stimmgabel, die angeschlagen worden ist, spritzt, ins Wasser gehalten, Wassertropfen weit umher; berührt man sie mit der Zunge, spürt man deutlich die Schwingungen. An einer Cello-, besser noch an einer Kontrabaß-Saite, sieht man gut, wie sie beim Anstreichen schwingt. Durch einen sicher befestigten kleinen Papierreiter kann man diesen Vorgang noch besser sichtbar machen. Spricht oder singt man in ein über den Mund gespanntes Seidenpapier, spürt man auf den Lippen deutlich die zugehörigen Schwingungen. In dem geriebenen Weinglas erkennt man die Schwingungen gut an der Kräuselung der Wasseroberfläche. Versieht man eine Stimmgabel mit einer Spitze aus einem Stück Draht und fährt damit, nachdem man sie angeschlagen hat, an einer berußten Glasplatte entlang, so sieht man danach im Ruß eine feine geschlängelte Linie, eine Spur und eine Aufzeichnung der Schwingung. Ein fest eingespannter Stahlstab wird angerissen: Die Schwingungen sind gut zu sehen, dazu ist ein meist sehr tiefer Ton zu hören.

Nun ist die Frage, wie Schwingung und Ton zusammenhängen. Was müssen die Kinder verstehen lernen?

Hält man sich an die heute übliche Darstellung dieses Zusammenhanges, so heißt es in einer mehr oder weniger kaschierten Formulierung in den Physikbüchern:

Die Schwingung, das ist der Ton. Man meint damit, daß man das Wesen des Tones erfaßt hat, wenn man die zugehörige Schwingung beschreiben kann. Der Ton selbst ist dabei nur eine subjektive Empfindung des Menschen, die schließlich nach komplizierten Vorgängen im Hörorgan und im Gehirn für das Bewußtsein entsteht. Objektiv sind allein die Schwingungen.

Würde man dies als Lehrer dem Unterricht zugrunde legen, hätte man den Kindern ein wichtiges Element für eine materialistische Weltauffassung nahegebracht: „Die Schwingung ist der Ton“, ist bereits Theorie und nicht mehr der reine ursprüngliche Sachverhalt. Nimmt man den Inhalt dieses Satzes ernst, dann darf man kein Konzert mehr besuchen, und es ist sinnlos, Musik zu machen. Es sind ja nur Schwingungen, die hinter den Darbietungen eines Orchesters zu suchen sind, und der Zuhörer hat durch sein Ohr die Illusion, als seien diese etwas ganz anderes.

Was man den Kindern auf dieser Stufe nahebringen kann, soll sich auf das unmittelbar Erlebbar beschränken, denn die Physik der Unterstufe ist zu einem guten Teil auch eine Erziehung zur exakten Sinneswahrnehmung. So wird man dem Kind nicht beibringen: „Die Schwingung ist der Ton“, sondern wahrheitsgemäß stehen bleiben bei der Aussage: Wir hören keine Töne ohne Schwingungen.

Es ist hier vielleicht für den Lehrer ganz hilfreich, wenn er den anthroposophisch-goetheanistischen Aspekt des Verhältnisses von Ton und Schwingung für sich zur Verfügung hat. Er kann dann anders sprechen und muß sich nicht auf die materialistische Anschauung beschränken:

Der Ton ist eine geistige Entität. Wir können diese, so wie wir als Menschen organisiert sind, nicht direkt wahrnehmen. Um uns im Raum müssen erst bestimmte Bedingungen vorliegen, ehe der Ton von uns wahrgenommen werden kann. Und diese räumlichen Bedingungen sind eben die Schwingungen (mit all den nachfolgenden komplizierten Vorgängen im Ohr und den weiteren Organen). Sie holen gewissermaßen den Ton in die physische Welt herein. Sie wirken wie ein Ventil, das den Ton in das menschliche Bewußtsein einläßt oder wie ein Pferd, das den Reiter heranträgt. Die Physiker (und die Physiologen) untersuchen also die materiell-physischen, räumlichen Bedingungen, die notwendig sind, damit die geistige Entität Ton, z. B. eine Beethovensymphonie, in uns wahrnehmbar wird. Das Musizieren ist ein „magischer“ Vorgang! Und unter diesem Aspekt kann der Physiker wieder guten Gewissens in ein Konzert gehen!

Selbstverständlich ist dies auch Theorie und gehört nicht in den Unterricht der Unterstufe. Erst auf der Oberstufe ist das Verständnis für solche Probleme herangewachsen.

Der nächste Schritt macht den Kindern klar, daß ein tiefer Ton mit „langsamen“ Schwingungen verbunden ist, die man u. U. fast noch mit dem Auge verfolgen kann, während zu hohen Tönen „rasche“ Schwingungen gehören.

Zeichnet man die Rußkurven, wie sie vorher beschrieben wurden, einer großen und einer kleinen Stimmgabel auf, so sieht man deutlich den Unterschied. Ein fliegender Maikäfer mit seinen verhältnismäßig langsamen Flügelschlägen brummt mit einem tiefen Ton, eine Stechmücke stört unseren Schlaf mit einem hohen, durchdringenden Ton. Ihre Flügel bewegen sich viel „rascher“ als beim Maikäfer. Dasselbe gilt bei einem Vergleich vom Kontrabaß mit einer Geige, einer Baßtuba mit einer Trompete, einer großen Orgelpfeife mit einer kleinen. Ein Elefant trompetet mit einem tiefen Ton, bei einer Maus hört man einen hohen, piepsenden Ton. Auf dem Monochord kann man zeigen, daß ein Ton umso höher klingt, je kürzer die Saite ist.

So kann man sagen: Im allgemeinen gibt ein kleiner Gegenstand einen hohen Ton mit schnellen Schwingungen von sich, ein großer Gegenstand einen tiefen Ton mit langsamen Schwingungen.

Die Formulierung „schneller“ und „langsamer“ Schwingungen ist nicht exakt. Ein Physiker würde protestieren. Aber was ist hier wichtiger, der Entwicklungsstatus des Kindes oder die Physik? Mit einer exakten Definition könnte ein Kind in diesem Alter noch gar nichts anfangen. Sie kann auf der Oberstufe leicht nachgeholt werden. Deshalb sollte hier auch der Begriff „Frequenz“ vermieden werden.

Was als nächstes den Kindern ins Bewußtsein gerückt werden muß, ist die Erscheinung der Schallgeschwindigkeit!

Der Ton braucht Zeit, um sich im Raume auszubreiten.

Schon auf dem Turnplatz der Schule kann man das erleben, indem sich die Klasse an einem Ende desselben aufstellt, während am anderen Ende eine Blechplatte oder ein Brett auf die Erde geworfen wird. Man sieht deutlich, daß das Blech oder Brett einen Augenblick früher auf dem Boden liegt als man den Ton hört. Ob man den Versuch mit Hilfe einer Feuerwaffe vorführen kann, muß der Klassenlehrer entscheiden. Bekannt ist diese Erscheinung auch bei einem Holzhacker, den man in einiger Entfernung auf den Spaltklotz schlagen sieht, während der Ton erst einen Moment später zu hören ist. Das Echo an einer Felswand kann hier besprochen werden; ebenso das Zählen zwischen Blitz und Donner, wobei man, durch das Dividieren der gezählten Zahl mit drei, vielleicht sogar auf die Schallgeschwindigkeit zu sprechen kommen kann in der Form, daß man sagt: Der Schall braucht 3 Sekunden, um einen Kilometer zu durchheilen.

Was den Kindern weiter klar werden muß, das ist, daß die Schwingungen des Tones einen Stoff brauchen, um sich auszubreiten, auch wenn dieser so fein ist wie die Luft. Der stofffreie Raum allein genügt dazu nicht. Hierher gehört der bekannte Versuch mit der elektrischen Klingel oder dem Wecker, die unter einer Glasglocke hängen, aus welcher Luft abgepumpt wird: Man hört die Klingel kaum mehr, so wenig wie das Ticken des Weckers.

Daß sich die Schwingungen des Schalls in festen Stoffen und in Flüssigkeiten schneller und besser ausbreiten als in der Luft, kann man beim Baden in einem freien Gewässer feststellen: Man schlägt zwei größere Steine halb über und halb

unter der Oberfläche des Wassers aufeinander. Man hört dann in einiger Entfernung den Schall unter Wasser deutlich früher als über dem Wasser, wenn man ein Ohr im Wasser und das andere Ohr außerhalb desselben hält. Hängt man einen Stahlstab in der Mitte eines Stückes Schnur auf und stopft sich die freien Enden derselben in beide Ohren, so klingt der Stab wie eine große Glocke, wenn man ihn anstößt. Einen fahrenden Zug hört man schon von ferne, wenn man das Ohr an die Schienen legt. Indianer hörten Pferdegetrappel schon von weitem, wenn sie das Ohr an die Erde preßten. Während ein Hämmern im Keller eines großen Hauses nicht weit hörbar ist, wird es sofort im ganzen Haus vernehmbar, wenn es an der Wasserleitung oder den Heizungsrohren geschieht. Das Schnurtelefon ist ein weiteres Anwendungsbeispiel. Die Kinder haben also gelernt:

Die Tonschwingungen brauchen einen Stoff, Luft (oder ein anderes Gas), Flüssigkeit oder feste Stoffe, um sich ausbreiten zu können. In festen Körpern und Flüssigkeiten werden sie besser weitergeleitet als in der Luft.

Die nächste Erscheinung, die die Kinder kennen lernen sollen, ist die Resonanz. Auf einem Bichord (das also mit zwei Saiten bestückt ist) läßt sich das leicht zeigen, wenn beide Saiten gleich gestimmt sind und nur eine angestrichen wird. Faßt man die angestrichene Saite an, so daß sie nicht mehr schwingen kann, so hört man die andere Saite deutlich klingen. Dasselbe läßt sich mit zwei gleichgestimmten Stimmgabeln zeigen. Singt man mit einem auf- und absteigenden Ton in eine Glasglocke, wie sie für elektrische Beleuchtungskörper verwendet werden, so spürt man bei bestimmten Tönen deutlich, wie der Kolben und die in ihm enthaltene Luft mitschwingen. Bekannt ist sicher auch, daß Soldaten nicht im Gleichschritt über eine Brücke marschieren dürfen. Das Mitschwingen von Fensterscheiben beim Vorbeifahren von schweren Fahrzeugen auf der Straße ist den Kindern wohlbekannt und sie lernen jetzt, diese Erscheinung richtig einzuordnen. Hier lassen sich noch viele andere Vorgänge gleichgestimmter Dinge oder Lebewesen anfügen, so daß, einer Anregung Rudolf Steiners folgend, die Resonanz in der Akustik als Sonderfall eines viel allgemeineren Prinzips erkannt wird. Wie weit dies möglich ist, muß der Klassenlehrer wissen.

Jedem Körper sind bestimmte Schwingungen „eingepägt“, die besonders leicht in ihm zum Mitschwingen angeregt werden können.

Den Abschluß der Akustik in der 6. Klasse und einen Höhepunkt derselben bildet die Vorführung der Chladnischen Klangfiguren. Dabei kann man nochmals zurückgreifen auf einen Teil des bisher behandelten Stoffes. Der Klassenlehrer muß wissen, welche Erkenntnisse, Überlegungen und Betrachtungen (z. B. der Ton als gestaltende Kraft) er noch an die Klangfiguren anschließen kann.

Dieser erste Unterricht in der Akustik kann durchaus eine Woche dauern und damit einen Schwerpunkt in der Epoche darstellen. In den nächsten Jahren kann dafür die Akustik in ihrer Bedeutung für die Physikepoche etwas zurücktreten.

Es sei nochmals betont, daß die Akustik nicht unbedingt am Anfang des Physikunterrichtes stehen muß. Der Lehrer hat hier völlige pädagogische Freiheit.

Wärme

Das nächste Gebiet, das im Anfangsunterricht der Physik in der 6. Klasse behandelt werden kann, ist die Wärmelehre. Man kann sie, als Ausgleich für die ausführliche Darstellung der Akustik, sehr kurz abhandeln, man kann sich auf ein einziges Prinzip beschränken. Haben die Kinder dasselbe erfaßt, so haben sie mehr von dem Wesen der Wärme verstanden, als ihnen die ganze übrige Wärmelehre vermitteln kann. Das Prinzip lautet:

Wärme belebt, verändert die Welt; Kälte erstarrt, schafft feste Formen.

Kaltes Öl tropft nur langsam durch ein Loch im Boden einer Blechbüchse, heißes Öl tropft sehr schnell oder rinnt sogar in einem Strahl durch, je nach Größe der Öffnung und der Öllart. Heißes Wasser ist beweglicher als kaltes. Dies zeigt man an einer Glasröhrenspirale, an deren oberem Ende ein Trichter befestigt ist. Gießt man jeweils die gleiche Wassermenge in den Trichter und stoppt die Zeit ab, die das Wasser zum Durchlaufen durch die Glasröhre braucht, so zeigt das heiße Wasser deutlich seine größere Beweglichkeit durch eine kürzere Durchlaufzeit. Das Grundprinzip zeigen auch das Auftauen eines Stückes Eis und anschließend das Verdampfen des entstandenen Wassers; ebenso das Schmelzen und das darauf folgende rasche oder langsame Abkühlen von Metallen, z. B. von Blei.

Hier oder schon als Einleitung können besprochen werden: Der Gegensatz von Sommer und Winter, ebenso von Äquator und Polarregion, das Verhalten von wechselwarmen und eigenwarmen Tieren, das Fieber beim Menschen, das Kochen und Backen von Speisen, das Waschen im kalten oder im aggressiveren heißen Wasser, das Schützen vor dem Verderb bei Nahrungsmitteln im Kühl- oder Gefrierschrank.

Man kann diese Erscheinungen als einen Kampf zwischen der Wärme und den Formen und Gestalten in der Welt darstellen. Das Thema Ausdehnung durch Wärme verschiebt man besser auf die 7. Klasse, denn es ist der Feind jeder lebendigen Auffassung der Wärme.

Optik

Wieder beginnt man mit einem großen Gesichtspunkt:

Licht macht den Menschen innerlich reich, in der Finsternis verarmt er innerlich.

Man führt hierzu die Kinder in einen völlig dunklen Raum, z. B. in einen Keller. Hoffentlich erlaubt das die Disziplin in der Klasse! Dort hat man eine (am besten nicht mattierte) Glühlampe auf einem großen Tisch aufgestellt, deren Helligkeit durch einen vorgeschalteten Widerstand reguliert werden kann. Zunächst ist der Raum und ebenso die Glühlampe völlig dunkel. Man sieht nichts. Dann beobachtet man, wie die Glühfäden der Lampe schwach aufleuchten; die Umgebung derselben ist noch nicht zu erkennen. Bei stärkerem Aufleuchten sieht man den Tisch, auf

dem die Glühbirne steht und dann, bei noch größerer Helligkeit, die ersten Umstehenden und schließlich ist der ganze Raum hell erleuchtet. Bei sich steigender Helligkeit sind es immer mehr Wahrnehmungen, die wir haben können, und es kommen uns immer mehr Anregungen aus unserer Umgebung zu.

Das Experiment stellt einen künstlichen Sonnenaufgang dar, an den man bei der Besprechung natürlich erinnert.

In der geeigneten Form wird der Lehrer über den blinden Menschen sprechen und darauf hinweisen, daß er viel schärferinhört und tastend fühlt als Sehende.

Und nun bespricht man einen Teil der „Taten und Leiden“ des Lichtes in der Welt, nämlich das Verhalten des Lichtes gegenüber der Stoffeswelt.

Man kann dazu zunächst eine Fensterscheibe zu einem Drittel mit Pappe abdecken, das mittlere Drittel mit Seidenpapier bekleben und das untere Drittel als normale Fensterscheibe belassen. Die übrigen Fenster verdunkelt man am besten.

Die Stoffe können sich dem eindringenden Licht auf drei Arten entgegenstellen:

1. Der Stoff bleibt so gut wie unsichtbar, man sieht die Gegenstände hinter dem Stoff durch diesen hindurch. Es entsteht nur ein ganz schwacher, kaum bemerkbarer Schatten.
2. Der Stoff selbst ist sichtbar; man sieht nichts hinter dem Stoff. Es entsteht ein Halbschatten.
3. Der Stoff läßt kein Licht hindurch, man sieht ihn nicht. Es entsteht ein schwarzer Schatten, Finsternis.

Beispiele für die erste Art des Verhaltens von Licht und Stoff sind: außer Glas, die Luft, viele Kunststoffe, manche Kristalle, Wasser und andere Flüssigkeiten. Alle diese Stoffe zeigen aber dieses Verhalten nur bei mehr oder weniger starken Schichten. Wasser z. B. läßt in einer Tiefe von 200 m kein Licht mehr durch.

Die zweite Art des Verhaltens zeigen neben Papier wiederum viele Kunststoffe, viele Mineralien, Flüssigkeiten, wie z. B. Milch, trübes Wasser, dann nicht zu dichte Textilstoffe, dünne Wachsschichten, Wolken in der Luft.

Die dritte Art zeigt sich vor allem bei Steinen, Holz, Metallen und wiederum manchen Kunststoffen.

Ob man all das nominalistisch durch die Begriffe „durchsichtig, durchscheinend und undurchsichtig“ verabstrahieren will, oder sich das für eine spätere Wiederholung aufspart, muß wiederum der Lehrer entscheiden.

Anschließend soll ausführlich der Schatten auf einer Kugel und der Schatten, den sie auf einen Schirm wirft, besprochen werden. Man macht die Kinder auf den Eigenschatten aufmerksam und zeigt die Schattenveränderungen auf dem Schirm, wenn die Lichtquelle näher und ferner rückt und wenn sie groß und klein ist. Besonders wichtig ist, daß die Kinder das Unscharfwerden der Schattenränder beim Größerwerden der Lichtquelle erleben. Besprochen werden soll weiter die Sonnen- und Mondfinsternis und im Modell gezeigt werden. Man hüte sich davor,

diese Erscheinungen mit geometrischen Mitteln, durch Zeichnen von Geraden und Kreisen, zu erklären. Dieses Abstrahieren ist Aufgabe der Oberstufe. Hier soll nur der wirklich sichtbare Anblick dieser Vorgänge aufgezeichnet werden. – Reizvoll ist es, sich den Schatten eines Menschen an verschiedenen Orten der Erdoberfläche und bei wechselnden Sonnenständen vorzustellen. – Ebenso reizvoll ist es, den Schatten anzusehen, den eine Kugel oder ein anderes Objekt auf verschiedene andere Gegenstände, einen Würfel, einen Krug, ein Buch, einen Aufbau von einem Modellbaukasten wirft. – Hierher gehört ferner das Vorführen von Schattenspielen aller Art, ebenso kann man die Sonnenuhr besprechen.

Es ist gut, an dieser Stelle den Kindern klar zu machen, daß man Gegenstände nur sieht, weil sie Schatten werfen. Sie wären völlig unsichtbar, wenn das Licht völlig ungestört, ohne Schatten (und ohne Reflexion), durch sie hindurchginge. Ob man anhand der Geschichte Adalbert von Chamisso's „Peter Schlemihl“ auf den Schatten als etwas Charakteristisches unserer Welt eingehen will, muß der Lehrer entscheiden.

Der nächste Schritt untersucht die Frage: Wie verhält sich das Licht, wenn es auf die Oberfläche eines Gegenstandes, eines Stoffes fällt? Wieder sind drei verschiedene Möglichkeiten zu unterscheiden:

1. Man sieht die Lichtquelle, die Umgebung des Gegenstandes oder das eigene Gesicht; aber alles an einer anderen Stelle, als es sich wirklich befindet. Den Gegenstand selbst sieht man nicht. Man nennt ihn einen Spiegel.
2. Man sieht den Gegenstand, auf den das Licht fällt, aus jeder Richtung. Er kann dabei farbig oder ohne bestimmte Farbe sein, z. B. grau.
3. Der Gegenstand ist in seinen Einzelheiten nur schwer zu erkennen. Er ist schwarz.

Zur Untersuchung der ersten Erscheinung läßt man ein Lichtbündel auf einen Spiegel fallen. Man sieht nun durch das auf seinem Weg abgelenkte, gespiegelte Licht einen leuchtenden Lichtfleck an der Decke oder Wand. Vorher war dort kein Licht. Man kann den Weg des Lichtes durch Zigarettenrauch sichtbar machen. Der Spiegel lenkt das Licht ab.

Besonders schön ist dieser Versuch, wenn man als Spiegel ein blankes Metallblech benutzt und zunächst den scharfen Fleck an der Decke beobachtet. Sodann bearbeitet man die Stelle, an der das Licht auf das Metallblech fällt, mit Schmirgelpapier: Diese Stelle leuchtet immer stärker auf und der Fleck an der Decke verbreitert sich rasch, wird immer undeutlicher und lichtschwächer und geht schließlich in einer allgemeinen schwachen Helligkeit unter. Man hat jetzt den Übergang einer Erscheinung der ersten Art in eine solche der zweiten Art erlebt.

Diese Erscheinung zweiter Art zeigt man beispielsweise mit Papier, auf welches man Licht fallen läßt. Ob man hier schon auf Farben aufmerksam machen will, indem man auch farbiges Papier benützt, muß man von Fall zu Fall entscheiden.

Die dritte Erscheinung kann man studieren, indem man Licht auf schwarzen Samt fallen läßt. Besser noch an einer Schachtel, die innen mit diesem Samt ausgelegt

ist und bei der das Licht durch eine Öffnung in das Innere einfallen kann. Die Öffnung sieht pechschwarz aus. Diese Erscheinung kann man auch an einem entfernten Haus entdecken, dessen Fenster offen stehen. Die Fensteröffnungen sehen schwarz aus und erst in der Nähe kann man Einzelheiten im Inneren des Hauses unterscheiden.

Über den Spiegel gibt es viel zu erzählen. Er ist ein Muster an Selbstlosigkeit. Als beleuchteter Gegenstand tritt er ganz zurück. Man sieht die spiegelnde Oberfläche kaum, dafür gibt er seine Umgebung unverfälscht wieder, abgesehen von dem Vertauschen von links und rechts. Er täuscht einen Raum vor hinter seiner Oberfläche, der so gar nicht vorhanden ist. In Spiegelgalerien und manchen Ladengeschäften wird dies bewußt ausgenützt.

Hierher paßt gut die Erzählung von Narziß, der sein Bild im spiegelnden Wasser sieht und darüber seine Umgebung völlig vergißt. Durch nichts ist er von seinem Spiegelbild abzubringen, bis seine Freunde auf die Idee kommen, dasselbe zu stören, indem sie Wellen im Wasser erzeugen.

Als Vorbereitung auf den Hohlspiegel kann man den Zerrspiegel vorführen; am einfachsten, indem man eine spiegelnde Blechplatte auf verschiedene Arten biegt und beobachten läßt, wie sich dabei das Spiegelbild verändert. Der Versuch erregt große Heiterkeit.

Ebenso reizvoll sind alle Versuche mit mehrfacher Spiegelung. Der Malerspiegel – zwei Spiegel in einem Winkel von 90° aufgestellt – zeigt das eigene Gesicht ohne Seitenvertauschung. Es gelingt nur schwer, mit seiner Hilfe einen geraden Scheitel zu ziehen. – Zwei Spiegel, unter 60° aufgestellt, spiegeln eine dazwischensiehende Kerze 5mal. Es ist dies das Grundprinzip des Kaleidoskops. – Zwei parallel aufgestellte Spiegel, die einander gegenüberstehen, spiegeln die Kerze unzählige Male, und man sieht eine lange Reihe von Kerzen, die sich in der Ferne verliert. – Wie man mit einem Taschenspiegel das Sonnenlicht ablenken kann, wissen die Kinder sehr genau!

Nun ist weiter einzugehen auf die Brechung des Lichtes. Man läßt ein möglichst paralleles Lichtbündel auf die Oberfläche des Wassers in einem Aquarium fallen. Das Wasser ist leicht getrübt, z. B. mit Magermilch. Einen Teil des Lichtes läßt man außen an der Aquariumwand entlang streichen, der andere Teil dringt in das Wasser ein. Man sieht deutlich, wie die beiden Lichtanteile Wege in zwei verschiedenen, voneinander abweichenden Richtungen durchlaufen. Man zeigt dann diese Erscheinung bei verschiedenen Einfallswinkeln auf die Wasseroberfläche. – Beim Durchsetzen einer dicken Glasscheibe wird das Licht bei schrägem Einfall parallel versetzt. Den Lichtweg mache man mit Zigarettenrauch sichtbar. – Besonders stark ist die Ablenkung des Lichtes, wenn es durch ein Prisma fällt, z. B. ein Glasprisma oder ein Wasserprisma. Man entdeckt dies auch beim Durchblicken durch dasselbe. Ob man hier schon auf die farbigen Ränder eingeht und die Farbenlehre anschließt, muß der Lehrer entscheiden. Zum Kapitel Brechung gehört hier noch der Anblick eines Stabes, der zur Hälfte im Wasser steckt: Er ist scheinbar an der Oberfläche des Wassers abgeknickt.

Was zur Farbenlehre zu sagen ist, soll bei der 7. Klasse besprochen werden.

Zum Abschluß der Optik der 6. Klasse wird man die Camera obscura vorführen. Wenn es der Physiksaal erlaubt, dann ist es am besten, man verdunkelt ihn so gut als möglich und bringt an einer geeigneten Stelle der Verdunkelung ein Loch an. Ihm gegenüber im Klassenzimmer hängt man ein weißes Tisch Tuch auf und sieht auf ihm die äußere Umgebung, auf dem Kopfe stehend. Führen einige Kinder draußen Bewegungen aus, so wirkt dies besonders erheitend auf die Klasse.

Man hüte sich wiederum davor, durch Zeichnungen mit geometrischen Geraden, Strahlen, die Camera obscura zu „erklären“. Dies wäre auf dieser Stufe verfrüht und sollte der Oberstufe vorbehalten bleiben. Viel wichtiger ist es, durch eine variable Öffnung in der Verdunkelung zu zeigen, wie bei einer großen Öffnung ein verschwommenes Bild, ein nicht identifizierbarer Lichtfleck entsteht; wie dann bei kleiner werdender Öffnung allmählich ein unscharfes, undeutliches Bild der äußeren Umgebung immer besser erkennbar wird. Und wie schließlich bei einer kleinen Öffnung die Umgebung scharf und gut sichtbar wird; aber das Bild wird immer lichtschwächer und verschwindet zuletzt in die Dunkelheit.

Die Kinder werden, mit etwas Anleitung vom Lehrer, sicher mit Begeisterung selbst eine Camera obscura herstellen und mit ihr die mannigfaltigsten Erfahrungen sammeln.

Elektrizität

Für die Einführung der Elektrizität gibt es kein allgemeines Prinzip, das jenem bei den bisher behandelten Gebieten entsprechen würde. Die Elektrizität ist zunächst der Menschennatur gegenüber fremd. Von elektrischen Vorgängen in unserer Umgebung bemerken wir normalerweise nichts.

Gerade bei der Elektrizitätslehre droht eine Klasse auseinanderzufallen: Ein Teil der Klasse lehnt die Elektrizität mehr oder weniger instinktiv ab (oft auch der Lehrer!) oder hat es schwer, mit deren abstrakten Vorstellungen zurecht zu kommen. Ein anderer Teil hingegen ergreift geradezu mit Begeisterung dieses Kapitel der Physik und kann davon nicht genug bekommen. Der Lehrer muß beiden Gruppen gerecht werden und die Elektrizität als eine Erscheinung hinstellen versuchen, die in unserem Leben zu einer Selbstverständlichkeit geworden ist und mit der zusammenzuleben man unbedingt lernen muß.

Die erste Bekanntschaft mit der Elektrizität auf der Unterstufe wird man durch klassische Experimente aus der Elektrostatik vermitteln.

Man führt den geriebenen Hartgummistab und Glasstab vor und zeigt, wie sie kleine Papierschnipselchen anziehen; wie sie, an einem Faden leicht drehbar aufgehängt, sich gegenseitig anziehen oder abstoßen. Eine größere Blechbüchse, isoliert aufgestellt und am Rande mit einem leichten angeklebten Seidenpapierstreifen versehen, verändert sich unwahrnehmbar, wenn man den geriebenen Hartgummistab an ihr abstreicht. Nur das Seidenpapier wird abgespreizt und zeigt

ist und bei der das Licht durch eine Öffnung in das Innere einfallen kann. Die Öffnung sieht pechschwarz aus. Diese Erscheinung kann man auch an einem entfernten Haus entdecken, dessen Fenster offen stehen. Die Fensteröffnungen sehen schwarz aus und erst in der Nähe kann man Einzelheiten im Inneren des Hauses unterscheiden.

Über den Spiegel gibt es viel zu erzählen. Er ist ein Muster an Selbstlosigkeit. Als beleuchteter Gegenstand tritt er ganz zurück. Man sieht die spiegelnde Oberfläche kaum, dafür gibt er seine Umgebung unverfälscht wieder, abgesehen von dem Vertauschen von links und rechts. Er täuscht einen Raum vor hinter seiner Oberfläche, der so gar nicht vorhanden ist. In Spiegelgalerien und manchen Ladengeschäften wird dies bewußt ausgenützt.

Hierher paßt gut die Erzählung von Narziß, der sein Bild im spiegelnden Wasser sieht und darüber seine Umgebung völlig vergißt. Durch nichts ist er von seinem Spiegelbild abzubringen, bis seine Freunde auf die Idee kommen, dasselbe zu stören, indem sie Wellen im Wasser erzeugen.

Als Vorbereitung auf den Hohlspiegel kann man den Zerrspiegel vorführen; am einfachsten, indem man eine spiegelnde Blechplatte auf verschiedene Arten biegt und beobachten läßt, wie sich dabei das Spiegelbild verändert. Der Versuch erregt große Heiterkeit.

Ebenso reizvoll sind alle Versuche mit mehrfacher Spiegelung. Der Malerspiegel – zwei Spiegel in einem Winkel von 90° aufgestellt – zeigt das eigene Gesicht ohne Seitenvertauschung. Es gelingt nur schwer, mit seiner Hilfe einen geraden Scheitel zu ziehen. – Zwei Spiegel, unter 60° aufgestellt, spiegeln eine dazwischenstehende Kerze 5mal. Es ist dies das Grundprinzip des Kaleidoskops. – Zwei parallel aufgestellte Spiegel, die einander gegenüberstehen, spiegeln die Kerze unzählige Male, und man sieht eine lange Reihe von Kerzen, die sich in der Ferne verliert. – Wie man mit einem Taschenspiegel das Sonnenlicht ablenken kann, wissen die Kinder sehr genau!

Nun ist weiter einzugehen auf die Brechung des Lichtes. Man läßt ein möglichst paralleles Lichtbündel auf die Oberfläche des Wassers in einem Aquarium fallen. Das Wasser ist leicht getrübt, z. B. mit Magermilch. Einen Teil des Lichtes läßt man außen an der Aquariumwand entlang streichen, der andere Teil dringt in das Wasser ein. Man sieht deutlich, wie die beiden Lichtanteile Wege in zwei verschiedenen, voneinander abweichenden Richtungen durchlaufen. Man zeigt dann diese Erscheinung bei verschiedenen Einfallswinkeln auf die Wasseroberfläche. – Beim Durchsetzen einer dicken Glasscheibe wird das Licht bei schrägem Einfall parallel versetzt. Den Lichtweg mache man mit Zigarettenrauch sichtbar. – Besonders stark ist die Ablenkung des Lichtes, wenn es durch ein Prisma fällt, z. B. ein Glasprisma oder ein Wasserprisma. Man entdeckt dies auch beim Durchblicken durch dasselbe. Ob man hier schon auf die farbigen Ränder eingeht und die Farbenlehre anschließt, muß der Lehrer entscheiden. Zum Kapitel Brechung gehört hier noch der Anblick eines Stabes, der zur Hälfte im Wasser steckt: Er ist scheinbar an der Oberfläche des Wassers abgeknickt.

Was zur Farbenlehre zu sagen ist, soll bei der 7. Klasse besprochen werden.

Zum Abschluß der Optik der 6. Klasse wird man die Camera obscura vorführen. Wenn es der Physiksaal erlaubt, dann ist es am besten, man verdunkelt ihn so gut als möglich und bringt an einer geeigneten Stelle der Verdunkelung ein Loch an. Ihm gegenüber im Klassenzimmer hängt man ein weißes Tischtuch auf und sieht auf ihm die äußere Umgebung, auf dem Kopfe stehend. Führen einige Kinder draußen Bewegungen aus, so wirkt dies besonders erheiternd auf die Klasse.

Man hüte sich wiederum davor, durch Zeichnungen mit geometrischen Geraden, Strahlen, die Camera obscura zu „erklären“. Dies wäre auf dieser Stufe verfrüht und sollte der Oberstufe vorbehalten bleiben. Viel wichtiger ist es, durch eine variable Öffnung in der Verdunkelung zu zeigen, wie bei einer großen Öffnung ein verschwommenes Bild, ein nicht identifizierbarer Lichtfleck entsteht; wie dann bei kleiner werdender Öffnung allmählich ein unscharfes, undeutliches Bild der äußeren Umgebung immer besser erkennbar wird. Und wie schließlich bei einer kleinen Öffnung die Umgebung scharf und gut sichtbar wird; aber das Bild wird immer lichtschwächer und verschwindet zuletzt in die Dunkelheit.

Die Kinder werden, mit etwas Anleitung vom Lehrer, sicher mit Begeisterung selbst eine Camera obscura herstellen und mit ihr die mannigfaltigsten Erfahrungen sammeln.

Elektrizität

Für die Einführung der Elektrizität gibt es kein allgemeines Prinzip, das jenem bei den bisher behandelten Gebieten entsprechen würde. Die Elektrizität ist zunächst der Menschennatur gegenüber fremd. Von elektrischen Vorgängen in unserer Umgebung bemerken wir normalerweise nichts.

Gerade bei der Elektrizitätslehre droht eine Klasse auseinanderzufallen: Ein Teil der Klasse lehnt die Elektrizität mehr oder weniger instinktiv ab (oft auch der Lehrer!) oder hat es schwer, mit deren abstrakten Vorstellungen zurecht zu kommen. Ein anderer Teil hingegen ergreift geradezu mit Begeisterung dieses Kapitel der Physik und kann davon nicht genug bekommen. Der Lehrer muß beiden Gruppen gerecht werden und die Elektrizität als eine Erscheinung hinstellen versuchen, die in unserem Leben zu einer Selbstverständlichkeit geworden ist und mit der zusammenzuleben man unbedingt lernen muß.

Die erste Bekanntschaft mit der Elektrizität auf der Unterstufe wird man durch klassische Experimente aus der Elektrostatik vermitteln.

Man führt den geriebenen Hartgummistab und Glasstab vor und zeigt, wie sie kleine Papierschnipselchen anziehen; wie sie, an einem Faden leicht drehbar aufgehängt, sich gegenseitig anziehen oder abstoßen. Eine größere Blechbüchse, isoliert aufgestellt und am Rande mit einem leichten angeklebten Seidenpapierstreifen versehen, verändert sich unwahrnehmbar, wenn man den geriebenen Hartgummistab an ihr abstreicht. Nur das Seidenpapier wird abgespreizt und zeigt

damit an, daß etwas anders geworden ist. Der geriebene Glasstab hebt beim Abstreichen zunächst die Wirkung des Hartgummistabes wieder auf, denn der Ausschlag des Seidenpapiers geht zurück. Setzt man dann aber das Abstreichen des Glasstabes fort, dann spreizt sich das Papierfähnchen erneut ab.

Lädt man die vorhin schon benützte Blechbüchse erneut auf und stellt daneben eine zweite, isoliert, ungeladen und mit Papierstreifen versehen, so kann man „elektrische Ladung“ von der ersten Büchse durch einen isolierten „Löffel“ auf die zweite übertragen. Der „Löffel“ wird besonders „voll“, wenn er an den äußeren Kanten der ersten Büchse gefüllt wird. Aus dem Inneren derselben kann man keine „Ladung“ entnehmen; die Elektrizität sitzt also außen an der Büchse. Das Experiment muß großes Staunen erregen, auch wenn außer der Bewegung der Papierfähnchen und des „Löffels“ nichts zu sehen ist.

Befestigt man viele lange Seidenpapierstreifen an einem isolierten Stiel, so kann man sie durch wiederholtes Berühren mit dem geriebenen Hartgummi- oder Glasstab zum Abspreizen bringen. Es entsteht ein „Struwelpeter“ und man hat damit ein einfaches Anzeigeinstrument für die elektrische Aufladung. Der Schritt zum Elektroskop ist nun leicht.

Es ist gut, wenn man zunächst nicht von dem abstrakten + (plus) und – (minus) bei der Elektrizität spricht, sondern am Anfang lieber die Ausdrücke Glaselektrizität (+) und Hartgummielektrizität (–) benützt. Die Elektrizität zu durchschauen, macht ohnedies vielen Kindern, denen abstraktes Denken noch schwerfällt, Schwierigkeiten, weshalb man hier besonders behutsam vorgehe. Auch sollte sich der Klassenlehrer nicht allzu sehr beeindrucken lassen, wenn einige besonders interessierte Buben mit Ausdrücken wie Volt, Ampère oder Watt um sich werfen: Es zeigt sich immer wieder, daß ein zusammenhängendes Wissen, das allein einen sachgemäßen Gebrauch dieser Begriffe sichert, noch nicht vorhanden ist.

Die eben beschriebenen elektrostatischen Versuche sind mitunter recht schwierig im Unterricht vorzuführen. Während sie bei der Vorbereitung tadellos funktionierten, mißlingen sie gerne durch die starke Luftfeuchtigkeit bei der Anwesenheit der Klasse wegen mangelnder Isolation. Erwärmt man die Geräte durch einen elektrischen Strahler, bevor man sie benützt, gelingen die Versuche auch im Unterricht.

Um zu zeigen, daß es Stoffe gibt, auf denen sich die Elektrizität leicht verschieben läßt, und andere, die die Elektrizität festhalten, zieht man einen beiderseits isoliert eingespannten Draht aus Kupfer oder Eisen und eine Seidenschnur durch den Physikraum, hängt an einem Ende ein Elektroskop an und streicht am anderen Ende einen geriebenen Glas- oder Hartgummistab ab, dann spreizen sich beim Kupfer- und Eisendraht die Elektroskopblättchen sofort, bei dem Seidenfaden jedoch nicht. Erst nach einem Befeuchten des Fadens schlägt auch hier das Elektroskop aus, meist recht träge.

Man wird nochmals auf die Gefährlichkeit der Elektrizität zu sprechen kommen, indem man zunächst eine nicht geladene Leydner Flasche vorweist, die überall gefahrlos zu berühren ist. Lädt man sie dann mit einer Influenzmaschine oder mit einem Bandgenerator auf, so kann man einen respektablen Entladungsfunken erzeugen. Lädt man die Leydner Flasche nur schwach auf und bildet durch die Klasse hindurch eine Kette der Schüler, indem jeder seine beiden Nachbarn an den Händen festhält, und der erste den äußeren Belag der Leydner Flasche anfaßt, während der letzte einen Schlüssel in die Hand nimmt und sich der Verbindung mit dem inneren Belag (meist einem Metallstab mit aufgesetzter kleiner Kugel) langsam nähert, so entlädt sich die aufgespeicherte elektrische Ladung durch die Kette der Kinder. Der Erfolg ist immer durchschlagend, und das Ende des Unterrichtes sollte nicht allzu ferne liegen! Vorsicht vor zu starker Aufladung und bei empfindlichen Kindern!

Was durch diese Versuche herausgearbeitet werden sollte, sind folgende Gesetzmäßigkeiten der Elektrizität:

Es gibt zwei verschiedene Arten von Elektrizität:
„Glaselektrizität (+) und „Hartgummielektrizität“ (-)¹²).

Ungleichnamige elektrische Ladungen ziehen sich an und wollen sich ausgleichen; gleichnamige elektrische Ladungen stoßen sich ab und wollen sich möglichst weit ausbreiten.

Es gibt Stoffe, auf denen läßt sich die Elektrizität leicht verschieben. Man nennt sie elektrische Leiter. Es gibt andere Stoffe, auf denen läßt sich die Elektrizität so gut wie gar nicht oder nur sehr schlecht verschieben. Man nennt sie Isolatoren.

Wegen der gegenseitigen Abstoßung gleichnamiger Ladungen sitzt die Elektrizität außen an Leitern; das Innere eines leitenden Gefäßes enthält keine Elektrizität.

An Spitzen und Kanten eines leitenden Gegenstandes sammelt sich die Elektrizität besonders stark.

Die elektrische Aufladung von Gegenständen nimmt man nicht wahr, daher ihre Gefährlichkeit.

Bei dieser ersten Einführung in die Elektrizitätslehre ist es am besten, man legt das Hauptgewicht auf das Herausarbeiten der Polarität der beiden Elektrizitätsarten und deren Ausgleich. Der Unterklassenlehrer darf seine Kinder immer darauf hinweisen, daß sie zu all diesen Erscheinungen auf der Oberstufe mehr erfahren und dort zu noch tieferen und umfassenderen Einsichten kommen werden.

Bei der Vorbereitung gerade der elektrischen Versuche versichere sich der Anfänger der Mithilfe eines erfahrenen Lehrers.

Magnetismus

Der Magnetismus ist mit den modernen magnetischen Legierungen gut und eindrucksvoll vorzuführen.

Man zeigt, am besten mit einem kräftigen Hufeisenmagneten, wie dieser kleinere und größere eiserne Gegenstände anzuziehen vermag. Großes Staunen entsteht, wenn eine Menge Büroklammern oder Nägel aus einer Schachtel an dem Magneten hängen bleiben und herausgezogen werden können. Ein Magnet, der unter einer Bank bewegt wird, zieht einen Nagel, der auf der Bank liegt, mit sich. Dasselbe kann man an einer Glasscheibe oder einem Heft zeigen. Außer Eisen durchdringt die magnetische Wirkung alle landläufigen Stoffe.

An einem drehbar aufgehängten Stabmagneten zeigt man, daß dieser von dem einen Ende eines anderen Magneten angezogen, von dem anderen Ende dagegen abgestoßen wird. Es gibt zwei Arten von Magnetismus.

Den Magnetismus nehmen wir, ähnlich wie die Elektrizität, nicht direkt wahr.

Zwei frei drehbar aufgehängte Stabmagnete in gleicher Höhe, die sich beim Drehen noch nicht berühren, stellen sich in die gleiche Längsrichtung ein. Man kommt jetzt auf den Kompaß zu sprechen und seine Eigenschaft, daß seine Nadel annähernd nach Norden weist. Jetzt kann man bei dem nach Norden weisenden Ende der Kompaßnadel vom Nordmagnetismus, beim anderen Ende vom Südmagnetismus sprechen.

Man zeigt nun weiter, wie man die Wirkung des Magneten in seine Umgebung sichtbar machen kann: Auf eine Glasscheibe oder ein Brett streut man Eisenfeilspäne und hält einen Magneten darunter. Die Eisenfeilspäne ordnen sich in charakteristischen Kurven, je nach der Form und Stellung des Magneten. Diese Kurven scheinen von einem Zentrum zu einem anderen zu verlaufen. Man nennt diese „Pole“. Jetzt kann man von einem Nordpol und einem Südpol des Magneten sprechen und von einem dieselben verbindenden Magnetfeld.

Eine kleine Magnetnadel in ein solches Feld gestellt, dreht sich in die Richtung der Feldkurve („Feldlinie“) an dieser Stelle. Man kann nun die Magnetnadel des Kompasses nochmals betrachten, die sich in die Richtung des Feldes des riesigen Erdmagneten an dem betreffenden Ort einstellt. Die Mißweisung des Kompasses kann nun gut erklärt werden.

Man kann abschließen, indem man auf die großen Kräfte hinweist, die man mit Hilfe des Magnetismus ausüben kann: Auch die kräftigsten Buben vermögen einen handtellergroßen modernen Magneten nicht von seiner eisernen Unterlage abzureißen.

Allgemeines zur Physik in der 6. Klasse

Die zeitliche Einteilung der Epoche wird man etwa folgendermaßen vornehmen: Akustik 6 Tage, Wärme 3 Tage, Optik 6 Tage, Elektrizität 4 Tage, Magnetismus 3 Tage, also insgesamt etwa 3 1/2 Wochen. Man kann die Epoche mit einigem Geschick auf 3 Wochen kürzen, besser sind aber 4 Wochen.

Das Hauptheft muß noch vorgeschrieben oder diktiert, ebenso die Zeichnungen von der Tafel abgezeichnet werden. Zu selbständigen Darstellungen mit der nötigen Exaktheit und dem Herausarbeiten der Hauptsache sind nur ganz wenige Kinder befähigt. Was von den Kindern geleistet werden kann, ist die Beschreibung des einen oder anderen Experimentes. Eine gute solche Darstellung eines Kindes kann in das Hauptheft von allen übernommen werden.

7. Klasse

In der 7. Klasse wird man das in der 6. Klasse Veranlagte wieder aufnehmen und ein Stück weiter an unsere gegenwärtige Welt heranführen. Im Mittelpunkt der Physikepoche steht jetzt die Mechanik, die in der vorhergehenden Klasse noch nicht behandelt worden ist.

Mit welchem Gebiet man beginnen soll, diese Frage hängt ganz von der Situation der Klasse ab und muß von Fall zu Fall vom Lehrer entschieden werden. Man kann gleich mit der Mechanik beginnen oder auch eines oder zwei der anderen Gebiete vorwegnehmen. Der Umfang des Unterrichtsstoffes ist größer und die Schwierigkeiten wachsen, so daß man sehr überlegt und konzentriert arbeiten muß, um in vier Wochen alles bewältigen zu können.

Hier sei angenommen, der Klassenlehrer habe sich entschlossen, seinen Physikunterricht mit der Wärmelehre wieder aufzunehmen.

Wärme

In der 6. Klasse haben die Kinder die Wärme als belebendes, verwandelndes Element kennengelernt. Daran muß einleitungsweise wieder erinnert werden.

Man kann jetzt die Erscheinungen der Ausdehnung durch die Wärme einführen als ein noch unentschiedener Kampf zwischen den Stoffen und deren Formen einerseits und der Wärme andererseits.

Am besten beginnt man mit der Ausdehnung der festen Körper durch Erwärmen. Das bekannte Experiment mit der Kugel und dem Ring gehört hierher. Man macht aufmerksam auf Dehnungsfugen an Gebäuden, auf das stärkere Durchhängen von Hochspannungsleitungen im Sommer, auf das Lösen von festsitzenden Glasstopfen an Glasflaschen durch Erwärmen des Flaschenhalses, auf die mittelalterliche Methode, Felsen zu sprengen, indem diese durch ein Feuer erhitzt werden, auf Dehnungsschleifen an Rohrleitungen für warme und kalte Flüssigkeiten oder Gase. Dazu gibt es noch viele Experimente, die im Physiksaal vorgeführt werden können, wie z. B. den Bolzensprenger. Auch ein Modell eines Bi-Metallstreifens gehört hierzu. Seine technische Anwendung kann erst später erklärt werden.

An einem Kolben mit Steigrohr, der mit Wasser gefüllt ist, zeigt man die Ausdehnung von Flüssigkeiten. Ob man dabei – später – auf das seltsame Verhalten des Wassers zu sprechen kommt – es zieht sich beim Abkühlen zuerst zusammen (bis 4°), dehnt sich dann bei weiterem Abkühlen wieder aus (bis 0°) und dehnt sich nochmals erheblich beim Gefrieren –, bleibt der Entscheidung des Klassenlehrers vorbehalten. Jedenfalls aber muß man auf die Entwicklung des Thermometers zu sprechen kommen: Die Frühstadien einer Temperaturanzeige bei Galilei und Otto von Guericke können von den Kindern noch nicht voll durchschaut werden wegen der Luftdruckabhängigkeit. Das kann auf der Oberstufe nachgeholt werden. Aber die Thermometer von Fahrenheit müssen besprochen werden, da sie nicht mehr vom Luftdruck abhängen und die – das war das wichtige Neue –, bei gleiche

7. Klasse

In der 7. Klasse wird man das in der 6. Klasse Veranlagte wieder aufnehmen und ein Stück weiter an unsere gegenwärtige Welt heranführen. Im Mittelpunkt der Physikepoche steht jetzt die Mechanik, die in der vorhergehenden Klasse noch nicht behandelt worden ist.

Mit welchem Gebiet man beginnen soll, diese Frage hängt ganz von der Situation der Klasse ab und muß von Fall zu Fall vom Lehrer entschieden werden. Man kann gleich mit der Mechanik beginnen oder auch eines oder zwei der anderen Gebiete vorwegnehmen. Der Umfang des Unterrichtsstoffes ist größer und die Schwierigkeiten wachsen, so daß man sehr überlegt und konzentriert arbeiten muß, um in vier Wochen alles bewältigen zu können.

Hier sei angenommen, der Klassenlehrer habe sich entschlossen, seinen Physikunterricht mit der Wärmelehre wieder aufzunehmen.

Wärme

In der 6. Klasse haben die Kinder die Wärme als belebendes, verwandelndes Element kennengelernt. Daran muß einleitungsweise wieder erinnert werden.

Man kann jetzt die Erscheinungen der Ausdehnung durch die Wärme einführen als ein noch unentschiedener Kampf zwischen den Stoffen und deren Formen einerseits und der Wärme andererseits.

Am besten beginnt man mit der Ausdehnung der festen Körper durch Erwärmen. Das bekannte Experiment mit der Kugel und dem Ring gehört hierher. Man macht aufmerksam auf Dehnungsfugen an Gebäuden, auf das stärkere Durchhängen von Hochspannungsleitungen im Sommer, auf das Lösen von festsitzenden Glasstopfen an Glasflaschen durch Erwärmen des Flaschenhalses, auf die mittelalterliche Methode, Felsen zu sprengen, indem diese durch ein Feuer erhitzt werden, auf Dehnungsschleifen an Rohrleitungen für warme und kalte Flüssigkeiten oder Gase. Dazu gibt es noch viele Experimente, die im Physiksaal vorgeführt werden können, wie z. B. den Bolzensprenger. Auch ein Modell eines Bi-Metallstreifens gehört hierzu. Seine technische Anwendung kann erst später erklärt werden.

An einem Kolben mit Steigrohr, der mit Wasser gefüllt ist, zeigt man die Ausdehnung von Flüssigkeiten. Ob man dabei – später – auf das seltsame Verhalten des Wassers zu sprechen kommt – es zieht sich beim Abkühlen zuerst zusammen (bis 4°), dehnt sich dann bei weiterem Abkühlen wieder aus (bis 0°) und dehnt sich nochmals erheblich beim Gefrieren –, bleibt der Entscheidung des Klassenlehrers vorbehalten. Jedenfalls aber muß man auf die Entwicklung des Thermometers zu sprechen kommen: Die Frühstadien einer Temperaturanzeige bei Galilei und Otto von Guericke können von den Kindern noch nicht voll durchschaut werden wegen der Luftdruckabhängigkeit. Das kann auf der Oberstufe nachgeholt werden. Aber die Thermometer von Fahrenheit müssen besprochen werden, da sie nicht mehr vom Luftdruck abhängen und die – das war das wichtige Neue –, bei gleicher

Temperatur alle den gleichen Wert anzeigten. Fahrenheit „eichte“ seine Thermometer noch mit der Bluttemperatur des Menschen, indem er sie seinem Gehilfen in den Mund steckte und auf der Skala dabei 96° F festlegte (heute 98°). Der Gefrierpunkt des Wassers lag bei 32° F, da 0° die tiefste Temperatur war, die er beobachtet hatte: es war der kälteste Tag im Winter 1717. Fahrenheit glaubte, dies sei die tiefstmögliche Temperatur überhaupt! Wahrscheinlich benutzte er auch den Siedepunkt des Wassers – er lag bei 212° F –, um seine Thermometer zu eichen, hielt dies aber offensichtlich geheim.

Die Fahrenheitskala wird noch heute in den englisch sprechenden Ländern benützt.

Die Skala nach Celsius benützt den Gefrierpunkt des Wassers (0°) und den Siedepunkt desselben (100°) als Grundlage. Es ist hier der Ort, etwas einzugehen auf das Dezimalsystem, das sich fast überall durchgesetzt hat. Ebenso kann man den Kindern klar machen, daß unsere Maßsysteme von Menschen geschaffen wurden und oft eine lange Entwicklung durchgemacht haben (und oft immer noch durchmachen), ehe sie die heutige Form annahmen.

Die Ausdehnung von Gasen zeigt man an einem luftgefüllten Glaskolben mit angeschlossenem U-Rohr, in dem sich ein Tropfen gefärbten Wassers befindet. Schon durch Anlegen der warmen Hände bewegt sich der Wassertropfen.

Daß erwärmte Luft leichter ist als kalte und deshalb nach oben steigt, weiß jedes Kind, das aufsteigenden Rauch beobachtet hat. Ein Heißluftballon zeigt das gut, wenn er an die Decke des Physikraumes steigt. Ein solcher Ballon kann leicht durch die Kinder selbst mit passenden Seidenpapierbahnen hergestellt werden. Der frei fliegende Ballon stellt einen effektvollen Abschluß des Kapitels Wärme in der 7. Klasse dar.

Optik

Die Optik bereitet erfahrungsgemäß oft erhebliche Schwierigkeiten im Unterricht.

Auch hier wird man an die Darstellungen und Erlebnisse in der 6. Klasse erinnern, insbesondere nochmals an die Brechung. Am Prisma wurde letztes Jahr vor allem auf die Ablenkung des Lichtes aufmerksam gemacht. Die dabei entstehenden Farbränder wurden nur nebenbei erwähnt. Sie werden jetzt in den Mittelpunkt der Betrachtung gerückt.

Mit einem Prisma in der Hand jedes Kindes werden die verschiedensten Stellungen ausprobiert und alle möglichen Objekte betrachtet. Am Fensterkreuz läßt sich wohl am besten zeigen, wie auf der einen Seite gelb-orange, auf der anderen Seite blau-violett erscheint. Dreht man das Prisma herum, so werden die Farben ausgetauscht. An einem sich keilförmig verengenden Spalt entdeckt man, wie beim Berühren des Gelb auf der einen Seite und dem Blau auf der anderen Seite Grün entsteht. Macht man dasselbe mit einem schwarzen Keil auf hellem Untergrund, so entdeckt man das Pfirsichblüt, wenn sich Violett und Orange berühren.

Bevor man den Farbkreis anzeichnet, kann man noch auf die farbigen Schatten und auf die physiologischen Nachbilder eingehen. Wie weit man dann noch auf künstlerische Fragen zu sprechen kommt, ist wieder in die Entscheidung des Klassenlehrers gestellt. Jedenfalls sollte herausgearbeitet werden, daß auch bei den Farben Gesetzmäßigkeiten bestehen, die man durchschauen kann.

Hier, auf der Unterstufe, darf Goethes Farbenlehre ruhig dominieren und den Kindern in der geeigneten Form nahe gebracht werden.

Das nächste Kapitel behandelt die Abbildungen durch Linsen. Man benützt dazu eine positive (konvexe) Linse von etwa 50 cm Brennweite. Auf einer einfachen optischen Bank – z. B. einem auf der schmalen Seite stehenden Brett von 4 bis 5 m Länge, auf dem Reiter verschoben werden können –, steht in der Mitte die Linse. Links steht ein helles Objekt, eine Kerze, eine markierte Glühlampe oder ein hell beleuchtetes Glasbild, z. B. ein Dia; rechts von der Linse ein Schirm zum Auffangen eines Bildes. Steht der Schirm etwa 1 m (der doppelten Brennweite der Linse) von der Linse entfernt und nähert man jetzt das helle Objekt aus möglichst weiter Entfernung langsam von der anderen Seite her der Linse, so taucht, aus unscharfen, verschwommenen Konturen heraus, auf dem Schirm ein scharfes Bild des Objektes auf. Das Bild steht auf dem Kopf, ist aber gleich groß wie das Objekt. Es steht ebenfalls etwa 1 m von der Linse entfernt, nur auf der anderen Seite derselben. Die Stellungen von Schirm und Objekt markiert man, ebenso jene der Linse, die unverändert in der Mitte stehen bleibt. Nun verschiebt man das Objekt weiter von der Linse weg und versucht, mit dem Schirm wieder ein scharfes Bild zu bekommen: Man stellt fest, daß er näher zur Linse hingerrückt werden muß. Das auf dem Kopf stehende Bild ist jetzt kleiner als das Objekt. Nimmt man ein sehr weit entferntes Objekt, das schon außerhalb des Physikraumes liegt, z. B. die Sonne, so stellt man fest, daß jetzt der Schirm gerade in der Mitte zwischen dem markierten Punkt und der Linse steht. Auch diesen Punkt markiere man und nenne ihn zunächst ruhig „Sonnenpunkt“, und erst dann, wenn man die Linse als Brennglas vorgeführt hat, kann man ihn „Brennpunkt“ nennen. Auch bei sehr viel näher liegenden Gegenständen, z. B. bei benachbarten Gebäuden, muß der Schirm kaum merklich aus dem Brennpunkt herausbewegt werden, um ein scharfes Bild zu erhalten.

Bewegt man das Objekt von dem zuerst markierten Punkt aus in Richtung auf die Linse zu, so muß man, um auf dem Schirm ein scharfes Bild zu erhalten, diesen von der Linse wegbewegen. Das Bild wird jetzt größer als das Objekt und steht immer noch auf dem Kopf. Auch hier erreicht man schnell eine Grenze: Nähert sich das Objekt der Mitte zwischen dem zuerst markierten Punkt und der Linse, so muß man den Schirm sehr weit hinausrücken, rasch reicht der Raum nicht mehr aus. Das Bild wird dabei zwar immer größer, aber dafür auch immer lichtschwächer.

Die beiden zuerst markierten Punkte, die sog. Gegenpunkte, nenne man auf der Unterstufe lieber Gleichgewichtspunkte. Von ihnen immer wieder ausgehend, wiederhole man die Bewegungen von Objekt und Schirm und die dabei zu beobach-

tenden Eigenschaften des Bildes so oft, bis die Kinder sich diesen wichtigen Sachverhalt gut eingepägt haben.

Inzwischen wird bestimmt ein Kind gefragt haben, was denn passiert, wenn das helle Objekt noch näher an die Linse heranrückt als bis auf die halbe Entfernung des Gleichgewichtspunktes. Der Schirm auf der anderen Seite der Linse findet keinen Platz mehr, wenn ein scharfes Bild entstehen soll. Er muß immer weiter und weiter hinausgerückt werden, wenn sich das Objekt dem kritischen Halbierungspunkt nähert. Passiert das Objekt diesen Punkt, geht mit dem Bild eine erstaunliche Verwandlung vor sich: Es zeigt jetzt genau entgegengesetzte Eigenschaften wie bisher: Bis jetzt konnte das Bild auf einem Schirm aufgefangen werden, jetzt nicht mehr. Bisher konnte das Bild auf dem Schirm von vielen beliebigen Richtungen aus gesehen werden, jetzt muß man in Richtung des Objektes auf die Linse sehen. Bisher entstand das Bild unabhängig vom Auge, jetzt muß das Auge mit einbezogen werden, wenn man ein Bild sehen will. Bisher waren Objekt und Bild auf die zwei Seiten der Linse verteilt, jetzt tritt Bild und Gegenstand (Objekt) auf der gleichen Linsenseite auf, wobei ersteres nur örtlich sichtbar ist. Bisher stand das Bild auf dem Kopf, jetzt steht es aufrecht.

Die Linse wirkt jetzt als Lese-, Floh- oder Vergrößerungsglas. Die konkave Linse zu besprechen erübrigt sich, das kann auf der Oberstufe nachgeholt werden. Hier genügt ein Hinweis bei der Besprechung des Hohl- und Buckelspiegels:

Es empfiehlt sich nämlich, erst jetzt auf die gekrümmten Spiegel einzugehen. Da sich das Schirmbild und der Gegenstand auf der gleichen Seite des Spiegels befinden, ist das Zusammenspiel beider schwieriger zu durchschauen und für den Schüler zuerst verwirrend. Wenn er aber das gegenseitige Verhalten von hellem Objekt und dem Bild auf dem Schirm bei der konvexen Linse verstanden hat, fällt es ihm nicht schwer, jetzt auch den Hohlspiegel zu durchschauen, der sich genauso benimmt wie die konvexe Linse. Besonders einleuchtend ist hier das den Gleichgewichtspunkten der Linse entsprechende Verhalten des Hohlspiegels: Objekt und Schirm stehen jetzt nebeneinander, das Bild ist ebenso groß wie das Objekt, steht aber auf dem Kopf. Auch das Verhalten des Hohlspiegels beim Hereinrücken des Objekts in den Raum zwischen Spiegel und Brennpunkt (Sonnenpunkt) entspricht jenem der konvexen Linse: Wurde diese dabei zum Vergrößerungsglas (Flohglas), so wird in diesem Falle der Spiegel zum Rasierspiegel mit einem vergrößerten, aufrechten und nur unter der Mitwirkung des Auges sichtbarem Bild.

Diese Versuche mit dem gewölbten Spiegel lassen sich am schönsten vorführen, wenn der Spiegel auf beiden Seiten versilbert ist. Dann kann man auf der einen Seite alle Experimente mit dem Hohlspiegel zeigen, wie das eben beschrieben wurde. Das Objekt steht schließlich am Spiegel und man sieht dahinter ein gleich großes aufrechtes Bild. Denkt man sich jetzt den Gegenstand (Objekt) durch den Spiegel hindurchgewandert, so wird aus dem Hohlspiegel ein Buckelspiegel. Läßt man nun das Objekt vom Spiegel wegwandern, so sieht man in ihm ein immer

kleiner werdendes, aufrechtes Bild, das scheinbar hinter dem Spiegel steht und schließlich im Brennpunkt verschwindet.

Man kann nun zurückgreifen und zeigen, daß sich die konkave Linse ebenso verhält wie der Buckelspiegel. Erfahrungsgemäß wird man aber nur selten soweit kommen und kann dann die Konkavlinse und den Buckelspiegel ohne Schaden der Oberstufe zur Besprechung überlassen.

Alle diese Experimente sollen sich nur auf die reine Anschauung und Beschreibung des gegenseitigen Verhältnisses von Objekt und Bild beschränken. Irgend welche Hilfsmittel aus der Geometrie gehören nicht zu dieser Altersstufe; das wird erst in der 12. Klasse nachgeholt. Ebenso soll man vermeiden, im Sinne der geometrischen Optik von „Strahlen“ zu sprechen oder gar solche zu zeichnen. Sie stellen eine Abstraktion dar, die auf der Unterstufe mehr verschleiern als enthüllen würde, worauf Rudolf Steiner immer wieder hinweist.

An der Optik erleben Lehrer wie Kinder deutlich, wie – im Vergleich zur 6. Klasse – jetzt bedeutend höhere Anforderungen an beide gestellt werden.

Mechanik

Die Mechanik – sonst Grundlage im Aufbau der Physik – tritt erst in der 7. Klasse zu den bereits behandelten Gebieten neu hinzu. Was den Kindern bei den zu besprechenden einfachen mechanischen Geräten immer wieder zum Erlebnis werden muß, ist das Grundprinzip, daß man auch mit schwachen Kräften eine schwere Arbeit verrichten kann, vorausgesetzt, man bringt dazu die notwendige Ausdauer auf.

Als erstes nehme man sich den Hebel und die Hebelgesetze vor, am besten, indem man von der Waage ausgeht. Man benötigt dazu eine größere Anzahl gleicher Gewichte (sie müssen nicht geeicht sein), sowie einige, die das 2-, 3- oder 4fache des Grundgewichtes wiegen. Ferner braucht man einen zweiarmigen Waagebalken, der links und rechts vom Drehpunkt durch Kerben oder Aufhängeösen in gleiche Abschnitte eingeteilt ist.

Jetzt hängt man links und rechts vom Drehpunkt in gleichem Abstand gleiche Gewichte an: Die Waage ist im Gleichgewicht.

Nun zeige man, daß das Gleichgewicht auch auf andere Weise hergestellt werden kann. Beispielsweise bleibe die eine Seite wie eben beschrieben; auf der anderen Seite verdopple man den Abstand vom Drehpunkt und halbiere dafür das Gewicht. Wieder herrscht Gleichgewicht. Nun kann man auch die andere Seite verändern, z. B. den Abstand vom Drehpunkt halbieren, dafür das Gewicht verdoppeln. Entsprechend muß beim Verdreifachen des Abstandes das Gewicht gedrittelt werden usw.

Die Kinder werden bald die zugrunde liegende Gesetzmäßigkeit herausfinden:

$$\text{Gewicht} \times \text{Abstand links} = \text{Gewicht} \times \text{Abstand rechts.}$$

Nun kommt man auf das Ungleichgewicht zu sprechen. Das Produkt aus Gewicht und Abstand auf der einen Seite ist größer als auf der anderen Seite. Während sich beim Gleichgewicht ein Ruhezustand einpendelt, tritt beim Ungleichgewicht Bewegung auf. Man kann diesen Vorgang also dazu benutzen, eine Last zu bewegen.

An einem großen, kräftigen Waagebalken hänge man einen schweren Stein, den kein Kind direkt hochheben kann. An diesem Waagebalken entwickle man die Ausdrücke „Lastarm“ und „Kraftarm“. Nun zeige man, daß sich der Stein ohne große Anstrengung heben läßt, wenn nur der Kraftarm genügend lang gemacht wird. Die Kraft eines vielleicht gar nicht sonderlich starken Schülers reicht aus, um den Stein zu heben. Dabei soll gut sichtbar werden, daß die Hand des Schülers einen wesentlich größeren Weg zurücklegen muß als der Stein. Auch mit einer kleinen Kraft kann man eine große Last heben. Die Last wird gehoben, wenn das Produkt aus Kraft \times Kraftarm größer wird als jenes aus Last und Lastarm.

Was die Kinder vor der Besprechung der vielen Anwendungen des Hebels noch erfassen müssen, ist der Unterschied zwischen einem zweiarmigen und einem einarmigen Hebel. Bei dem soeben benutzten großen Waagebalken kann man den Stein auch auf die andere Seite des Drehpunktes hängen, so daß jetzt Last und Kraft auf der gleichen Seite liegen. Hier wird der Unterschied zwischen Lastarm und Kraftarm besonders anschaulich, ebenso der kleine Weg der Last und der größere der Kraft.

Nun ist der Weg frei für die Besprechung der vielen Anwendungen des Hebels: Zange, Brecheisen, Schere (mit ständig größer werdendem Lastarm), Nudelpresse, Spaten, Pumpschwengel, Bolzenschneider (Doppelhebel), Briefwaage (veränderlicher Kraftarm!), Schraubenzieher, Wippe, Hebelmechanismen beim Klavier und der alten Schreibmaschine, Katapult (Lastarm groß, Kraftarm klein!), Arm mit Bizepsmuskel (dto.), Schraubenschlüssel, altes Weichenstellwerk bei der Eisenbahn, Schlüssel, Büchsenöffner.

Es ist reizvoll, den Kindern die Hausaufgabe zu stellen, selbständig noch nicht erwähnte Anwendungen des Hebels zu entdecken. Erstaunlich, was da alles noch zusammenkommt!

Als Nächstes kann man das Wellrad besprechen. Auch hier gibt es an der Kurbel einen Kraftarm und an der Welle einen Lastarm, der gleich dem Halbmesser der Welle ist. Auch hier muß das Produkt aus Kraft \times Kraftarm größer sein als jenes aus Last und Lastarm, wenn sich die Last nach oben bewegen soll. Eindrucksvoll ist das Wellrad, wenn man wahlweis eine Welle mit verschiedenen Durchmesser benützen kann: Je größer der Durchmesser der Welle ist, desto schwerer läßt sich die Last emporwinden. Auch hier sieht man gut den viel größeren Weg an der Kurbel im Vergleich zur Bewegung der Last.

Das nächste mechanische Gerät, das vorzuführen ist, ist der Flaschenzug. Am schönsten ist es, wenn man einen solchen im Physikraum aufhängen kann und die Kinder selbst mit ihm eine schwere Last (z. B. den Lehrer!) hochheben können.

Auch hier sieht man gut, wie die Kraft zwar erheblich kleiner ist als die Last, aber dafür muß sie auch einen viel größeren Weg zurücklegen als die Höhe, um welche die Last emporgehoben wurde. Es wäre ganz einfach, hier und bei den anderen Geräten das quantitative Gesetz für Last und Lastweg bzw. Kraft und Kraftweg abzuleiten. Das ist aber auf dieser ersten Stufe des Physikunterrichtes nicht nötig. Theorie ist Angelegenheit der Mechanik in der 10. Klasse.

Das Prinzip des Flaschenzuges wenden die Kinder tagtäglich an, wenn sie Schnürstiefel anziehen und die Schnürsenkel festziehen.

Nun kann man die Schraubenpresse besprechen, die früher als Kopierpresse und als Obstpresse viel in Gebrauch war. An den Knebeln der Presse wirkt eine verhältnismäßig kleine Kraft auf einem kreisförmigen Weg. Der Stempel der Presse wird mit einer viel größeren Kraft, aber sehr langsam, vorwärtsgetrieben. Man kann mit dieser Kraft Steine zertrümmern, eine Holzsäule abknicken, ein kleines Haus- oder Automodell flach drücken und so die große Kraft am Stempel demonstrieren. Wenn es die Zeit erlaubt, kann man noch eingehen auf die mittelalterliche Art der Buchherstellung mit der Schraubenpresse. „Presse“ und „drucken“ erinnern noch an jene von der Buchdruckerei längst aufgegebenen Anwendungen der Schraube zur Erzeugung großer Kräfte.

Die nächste mechanische Einrichtung, die es zu besprechen gilt, ist die schiefe Ebene. An einem Modell kann man zeigen, daß auch hier mit einer kleinen Kraft eine viel größere Last hochgezogen werden kann, wenn man einen langen Weg nicht scheut: Ein kleiner Wagen wird mit einem geeigneten Kraftmesser (Federwaage) angehoben, so daß er in der Luft schwebt. Man merkt sich an der Markierung, wie weit die Feder gereckt wurde (der Kraftmesser muß nicht geeicht sein). Hierauf setzt man den Wagen auf eine schiefe Ebene und zieht ihn an der Federwaage hoch: Diese zeigt eine wesentlich geringere Ausreckung an ihrer Skala. Man kann also den Wagen auch mit einer kleineren Kraft hochziehen als durch direktes Hochheben seines Gewichtes.

Die schiefe Ebene wird in der Praxis viel angewendet: Nicht nur bei der Schrotleiter (Ladebalken) zum bequemen Laden eines Wagens mit Fässern, sondern bei jeder Bergstraße, die in Serpentinaen oder auf großen Umwegen am Bergabhang emporführt; bei Wanderwegen, die im Zick-Zack hochführen; bei Eisenbahnlinien, die u. U. in Kehrtunnels langsam an Höhe gewinnen (z. B. bei der berühmten Gotthardlinie in der Schweiz); bei dem modernen Dachdecker, wo die Dachplatten über eine schiefe Ebene hochgezogen werden. Auch hier entdecken die Kinder noch manche Anwendung des Prinzips der schiefen Ebene auf eigene Faust.

Das letzte Kapitel in der Mechanik der 7. Klasse erinnert wieder an das erste, den Hebel, nämlich die Übersetzung an Rädern durch Riemen oder Zahnräder.

Auch hier zeigt man, wie man durch eine kleine Kraft bei schnellen Umdrehungen eine langsame Umdrehung mit großer Kraft erzeugen kann. Man müßte hier eigentlich von Untersetzung sprechen. Vom Fahrrad mit Gangschaltung kennt das jeder. Oft möchte man aber auch den umgekehrten Fall haben: Eine relativ große

Kraft erzeugt bei einer langsamen Umdrehung eine rasche Bewegung mit kleiner Kraft. Beispiele dazu sind: das alte Mühlrad, die Windmühle und das durch eine Feder oder ein Gewicht angetriebene Uhrwerk alter mechanischer Bauart.

Hier, bei dem Kapitel Mechanik, weicht man von dem Grundsatz „Praktische Anwendungen möglichst erst in der 8. Klasse“ ab und führt die einzelnen Prinzipien bis zu den praktischen Einrichtungen fort. In der Mechanik ist das leichter, weil sie in vielen Fällen den Kindern schon bekannt sind und kein langer Weg dazu notwendig ist, außerdem kommen diese eben besprochenen mechanischen Grundprinzipien in dieser Form in der 8. Klasse nicht mehr vor.

Akustik

Während die Akustik in der 6. Klasse meistens eine dominierende Rolle spielt, tritt sie in der 7. Klasse etwas in den Hintergrund, sowohl zeitlich wie inhaltlich.

Es ist in der 7. Klasse der Zusammenhang von Ton und Zahl, der herausgearbeitet werden muß: An einem Monochord zeigt man, daß bei einer Halbierung der Saitenlänge die Oktave des Grundtones erklingt. Erstaunlich ist nun, daß auch die anderen Intervalle, die in unserer Musik auftreten, durch Saitenlängen nach einfachen Zahlenverhältnissen der Grundlänge zu erzeugen sind. Bei diesen Brüchen treten nur Nenner mit den Zahlen 1 bis 6 auf, sowohl bei der Dur-Tonleiter wie auch bei der Moll-Tonleiter. Beim Hören von Musik wird unbewußt gerechnet! Daß statt der Saitenlängen auch die Frequenzverhältnisse genommen werden könnten, ist Sache der Oberstufe. Was noch besprochen werden muß, das sind die Obertöne eines jeden Tones. Man kann sie teilweise hörbar machen, indem man einen leichten, ca. 60 bis 100 cm langen Kunststoffschlauch von 1 bis 3 cm Öffnung im Kreise herumschleudert. Je nachdem wie rasch man den Schlauch herumdreht, sind verschiedene Obertöne zu hören. Man kann sie auch auf dem Monochord erzeugen, durch Saitenlängen von $1/2$, $1/3$, $1/4$, $1/5$ usw. der ursprünglichen Länge. Die einzelnen Obertöne schwingen bei jedem Ton mit, aber von Instrument zu Instrument in verschiedener Stärke. Dies gibt die Klangfarbe des Instrumentes und der Stimmen.

Elektrizität und Magnetismus

Dieses letzte Kapitel in der Physik der 7. Klasse wird von den „Experten“ unter den Kindern – meistens sind es Buben – mit Spannung erwartet.

Zunächst wird man das in der 6. Klasse Erarbeitete wieder heraufholen: Die durch Reibung erzeugten beiden Elektrizitätsarten: Hartgummi- und Glaselektrizität, das Auf- und Entladen der Leydener Flasche, die Gesetze der elektrischen Polarität und den Unterschied von Leiter und Nichtleiter für Elektrizität, die man selbst direkt nicht wahrnehmen kann, was sie so gefährlich macht.

Ob man nun die reizvolle Geschichte der Entdeckungen von Galvani und Volta erzählt oder ob man gleich mit der Vorführung einer Volta-Batterie beginnt, muß

der Lehrer entscheiden, je nach Situation und der Zeit, die ihm noch zur Verfügung steht.

Galvani war ja Anatom. Er entdeckte durch „Zufall“, daß präparierte Froschschenkel bei der Entladung einer Leydner Flasche zusammenzucken. Er experimentierte mit vielen Anordnungen und Varianten derselben, denn er war der festen Überzeugung, dem Geheimnis des Lebens auf der Spur zu sein. Dabei kam er auf den Gedanken, daß ein solches Froschschenkelpaar auch zucken mußte, wenn eine elektrische Entladung durch einen Blitz erfolgt. Um dies nachzuprüfen, hängte er während eines Gewitters die Froschschenkel an einen kupfernen Haken an das eiserne Geländer seines Balkons. Zu seinem Erstaunen bemerkte er, daß die Froschschenkel auch ohne Blitz zusammenzuckten, und zwar jedes Mal, wenn sie, durch Wind und Regen hin- und herbewegt, an eine Geländerstrebe anstießen.

Der Kollege Galvanis, Volta, war Physiker, und erkannte rasch, daß Galvanis Entdeckung nichts mit dem Geheimnis des Lebens zu tun hatte, sondern daß durch die Berührung von zwei verschiedenen Metallen, hier Kupfer und Eisen, in dem Regenwasser eine elektrische Wirkung entsteht, die dann durch das Zucken der Froschschenkel angezeigt wird. Daraus entwickelte er dann das „Volta-Element“: Kupfer und Zink in verdünnter Schwefelsäure.

Versucht man mit einer Batterie eine Leydner Flasche aufzuladen, so stellt man fest, daß sie gegenüber der Influenzmaschine oder dem Bandgenerator viel zu schwach ist. Es gibt keine Funkenbildung. Auch das bisher benützte Elektroskop schlägt nicht aus. Es wäre jetzt verlockend, den Begriff der elektrischen Spannung einzuführen. Man überläßt das aber besser der Oberstufe. Wohl aber empfiehlt es sich, jetzt statt Glas- und Hartgummi-Elektrizität die Bezeichnungen + und – einzuführen und vom elektrischen Strom zu sprechen:

Eine geladene Leydner Flasche ist nach dem Überspringen des Entladungsfunken „leer“. Die beiden entgegengesetzten elektrischen Ladungen haben sich ausgeglichen. Eine Batterie (oder Element) hat die Eigenschaft, daß sie unter bestimmten Bedingungen die Polarität aufrechterhält und ständig neue Elektrizität nachliefert. Man muß dazu den Ausgleich der Ladungen erschweren, z. B. durch einen langen dünnen Draht. Da man die Elektrizität nicht wahrnehmen kann, entlehnt man bei anderen, sichtbaren Vorgängen Namen für die elektrischen, unsichtbaren.. Man spricht in diesem Falle von einem elektrischen „Strom“ durch den Draht. Man denkt also an etwas ähnliches wie eine Flüssigkeit, die durch ein Rohrsystem fließt. Dieser Ersatzname hat sich ganz allgemein eingebürgert, so daß jedermann von einem „elektrischen Strom“ spricht, obwohl nichts Strömendes wahrzunehmen ist.

Der elektrische „Strom“ hat nun zwei wichtige Wirkungen (eine dritte ist erst auf der Oberstufe verständlich): Er erzeugt Wärme und Magnetismus.

Die Wärmewirkung zeigt man am besten an einem mehrere Meter langen Eisen- oder Kupferdraht (0,1 bis 0,25 mm Durchmesser), den man isoliert zwischen zwei Stativen ausspannt und mit Papierfähnchen behängt. Den Draht schließt man über

einen geeigneten Regulierwiderstand an die Steckdose an. Letztere hat, wie die Batterie, die Eigenschaft, ständig die zwei Elektrizitätsarten nachzuliefern, also einen „Strom“ aufrechtzuerhalten, nur sehr viel kräftiger als jene. (Daß sie meistens Wechselstrom liefert, spielt in diesem Zusammenhang keine Rolle.)

Steigert man nun die Stromstärke auf immer größere Werte, so hängt der Draht immer stärker durch: Durch die zunehmende Erwärmung dehnt er sich immer stärker aus. Geht man mit der Stromstärke zurück, so vermindert sich auch das Durchhängen des Drahtes.

Steigert man schließlich die Stromstärke auf noch höhere Werte, so fangen die Papierfähnchen an zu rauchen und fallen brennend ab. Bei noch größerer Stromstärke fängt der Draht an zu glühen und brennt endlich durch.

Der Versuch ist höchst eindrucksvoll und spannend.

Hängt man an die Volta-Batterie (mit mehreren hintereinander geschalteten Elementen) ein kleines Lämpchen, so leuchtet dies (kurzzeitig) auf. Die Wärmeentwicklung des elektrischen Stromes ist so groß, daß der feine Draht im Lämpchen hell aufglüht.

Die magnetische Wirkung des Stromes zeigt man an einer Spule mit einer durchgehenden Öffnung in der Mitte. Vor dieser Öffnung hängt ein Eisenbolzen an einer Feder. Schließt man nun die Spule je nach Größe an eine Batterie oder Steckdose an, so wird der Bolzen mit Gewalt in die Spule hineingezogen. Beim Abschalten der Spule hüpfet der Bolzen wieder heraus.

Die magnetische Wirkung des Stromes läßt sich auch mit einer Magnethöhle oder einem Kompaß nachweisen, die sich in der Nähe der Spule befinden. Eine günstige Lage dazu muß man ausprobieren.

8. Klasse

In der 8. Klasse soll alles, was die Kinder bisher in der Physik gelernt und sich erarbeitet haben, bis zu den, den Kindern meist wohlbekanntesten Geräten und Einrichtungen des täglichen Lebens weitergeführt werden. In der Mechanik und teilweise in der Wärmelehre ist dies schon in der 7. Klasse geschehen.

In der **Akustik** kann man beispielsweise die Orgel besprechen. An einer solchen läßt man die verschiedenen Register erklingen und erinnert an die Obertöne und die davon abhängige Klangfarbe. Oder man bespricht verschiedene Instrumente eines Orchesters und läßt sich deren Klangmöglichkeiten vorführen.

Die elektrischen Musik-Instrumente und deren Problematik gehören auf die Oberstufe.

In der **Optik** greift man zurück auf die Versuche mit der konvexen Linse und dem gegenseitigen Verhältnis von Gegenstand und Bild. Ist der Gegenstand in der Nähe des Brennpunktes, so ist das Bild weit entfernt von der Linse. Es ist groß und steht auf dem Kopf. Dies ist das Prinzip des Projektionsapparates. – Ist das Objekt, der Gegenstand, weit weg, so entsteht ein umgekehrtes, kleines und scharfes Bild in der Nähe des Brennpunktes. Dieses gegenseitige Verhältnis liegt dem Photoapparat zugrunde.

Um das astronomische Fernrohr erklären zu können, erzeugt man erst ein umgekehrtes, möglichst großes Bild des weit entfernten Gegenstandes. Dazu müssen die Gleichgewichtspunkte der Linse möglichst weit auseinander liegen, d. h. die Brennweite groß sein. Dieses Bild fängt man zunächst mit einer Mattscheibe auf. Nun betrachtet man das Mattscheibenbild mit einer stark vergrößernden Lupe. Sodann zeigt man, daß die Mattscheibe gar nicht nötig ist. Man kann mit der Lupe auch das frei in der Luft schwebende Bild der ersten Linse anschauen. Die Welt steht bei diesem Fernrohr zwar noch auf dem Kopf, aber das Prinzip ist auch auf der Unterstufe durchschaubar. Ob man noch darauf eingeht, daß man durch eine dritte Linse, zwischen den beiden anderen, das Bild umkehren kann und so ein „terrestrisches“ Fernrohr mit aufrechtem Bild bekommt, diese Frage muß der Lehrer entscheiden.

Da sich ein Hohlspiegel wie eine Buckellinse benimmt, benützen die Astronomen für ihre Fernrohe anstelle der ersten Linse oft einen solchen Spiegel. Über die Vorteile eines solchen Fernrohres erfahren die Schüler Näheres auf der Oberstufe.

Das galileische Fernrohr, den Operngucker zu besprechen ist für diese Stufe zu kompliziert; auch hier muß man auf die Oberstufe vertrösten.

Auch das Mikroskop kann man in der 8. Klasse schon ein wenig verstehen: Das einfache Mikroskop, wie es Leuvenhook benützte, war eine stark gekrümmte und damit stark vergrößernde Linse, die als Lupe wirkte. Das zusammengesetzte Mikroskop besteht, ähnlich wie das Fernrohr, aus zwei konvexen Linsen (Buckellinsen). Die erste Linse entwirft bereits ein vergrößertes Bild des Gegenstandes, da dieser in der Nähe des Brennpunktes liegt. Dieses schon vergrößerte Bild wird

nun, wie beim Fernrohr in der Luft schwebend, durch die zweite Linse, die wieder als Lupe wirkt, nochmals vergrößert.

In der **Mechanik** steht in der 8. Klasse die Hydraulik im Vordergrund.

Man beginnt am besten mit den kommunizierenden Röhren und deren gemeinsamer Wasseroberfläche. Daran schließt sich die klassische Wasserversorgung eines Ortes mit Wasserturm oder Hochbehälter an. Hierher gehört auch die (theoretische) Höhe eines Springbrunnens sowie der artesische Brunnen.

Dann kann man zum archimedischen Prinzip übergehen, wobei man sich durchaus an die klassische Anekdote um die neue Krone für den Tyrannen von Syrakus halten kann. Angeblich ging Archimedes die Lösung des Problems im Bade auf: Um festzustellen, ob der Goldschmied bei der Herstellung der neuen Krone ehrlich war, hängte Archimedes die Krone an eine Waage und brachte sie durch einen Barren aus purem Gold, der ebenso schwer war wie der für die Krone zur Verfügung gestellte, ins Gleichgewicht. Nun ließ er Krone und Barren in Wasser eintauchen. Die Waage soll jetzt nicht mehr im Gleichgewicht gestanden haben: die Krone stand höher als das pure Gold. Archimedes schloß daraus, daß der betrügerische Goldschmied einen Teil des Goldes der Krone durch Silber von gleichem Gewicht ersetzt hatte. Das Volumen der Krone wurde dadurch etwas größer als jenes des reinen Goldes, weil Silber bei gleichem Gewicht wie Gold etwas mehr Raum braucht. Die Krone verdrängte beim Eintauchen daher mehr Wasser, wurde infolgedessen scheinbar etwas leichter als das pure Gold.

Jetzt kommt man auf das Schwimmen von Gegenständen zu sprechen und schließlich auf das spezifische Gewicht, das man auf dieser Stufe auf das gleiche Volumen Wasser bezieht

Nun muß man die Erscheinung des Druckes im Wasser und dessen Ausbreitung nach allen Richtungen besprechen. Die exakte Definition des Druckes ist auf dieser Stufe noch nicht nötig, das bleibt der 10. Klasse vorbehalten. Die landläufige Vorstellung genügt zunächst, denn unter Druck kann sich jedes Kind etwas vorstellen. Taucht man im Wasser tiefer und tiefer, so drückt das Wasser immer stärker. Versieht man ein Glasrohr an einem Ende mit einer Gummimembran, so ist deutlich zu beobachten, daß diese umso stärker eingebeult wird, je tiefer man das Rohr eintaucht.

Auch die Luft drückt, je tiefer man in sie eingetaucht ist, allerdings viel schwächer als das Wasser. Auf einem hohen Berg drückt sie also weniger als am Meer. Man vergleicht einen unbekanntenen Druck mit dem Druck der Luft über uns auf Meereshöhe. Letzteren nennt man 1 Atmosphäre (1 at).

Im Wasser, wo der Druck sehr viel rascher zunimmt, ist er 10 m unter der Oberfläche bereits um 1 at gestiegen; dort herrscht also schon der doppelte Druck wie an der Oberfläche.

In einen durchsichtigen Plastikschlauch von etwa 12 m Länge füllt man gefärbtes (und möglichst ausgekochtes) Wasser ein. Er ist an einem Ende geschlossen und

wird an diesem Ende an einem genügend hohen Gebäude hochgezogen. In das untere offene Ende drückt die Luft hinein. Sie vermag das Wasser im Schlauch etwa 10 m hochzudrücken, dann herrscht Gleichgewicht. Und wenn das Schlauchende höher als 10 m hochgezogen wird, entsteht oben ein luftleerer (besser luftverdünnter) Raum. Das Wasser kann durch die Luft nicht höher gedrückt werden. Könnte man den Schlauch über längere Zeit beobachten, so würde man feststellen, daß das Wasser nicht immer gleich hoch steht. Die Druckhöhe desselben schwankt etwas. Der Grund hierfür ist der veränderliche Luftdruck. Das Wasser in dem Schlauch zeigt also Luftdruckschwankungen an, es ist ein Barometer. Einiges mehr darüber erfahren die Kinder durch die Wetterkunde in der Wärmelehre.

Dieses Experiment mit einer Glasröhre und Quecksilber vorzuführen, empfiehlt sich nicht, da der Umgang mit Quecksilber einiges experimentelles Geschick erfordert und in einem Klassenraum nicht ungefährlich ist. Daß die spezifisch wesentlich schwerere Quecksilbersäule von dem Luftdruck nicht so hoch gedrückt werden kann wie Wasser, muß natürlich besprochen werden. Man kann aber ein fertiges altes Quecksilberbarometer vorzeigen und den Stand der Quecksilbersäule einige Zeit verfolgen lassen.

Einen Abschluß der Mechanik mag die Besprechung der Saug- und Druckpumpe und eventuell der hydraulischen Presse bilden.

In der **Wärmelehre** kann man die Einrichtung und die Funktion der Warmwasserheizung des Schulgebäudes besprechen. Die wichtigen Stellen derselben sollen dazu aufgesucht und erklärt werden. Über die sparsame Verwendung der Heizwärme sollte schon auch gesprochen werden.

Ein weiteres Kapitel, das man auf eine einfache Grundlage reduzieren muß und nur elementar darstellen kann, ist die Wetterkunde. Das Zustandekommen des Passatwindes können die Kinder im Prinzip verstehen, ebenso haben sie in der Mechanik einiges über den Luftdruck gehört, so daß sie jetzt in den Grundzügen erfassen können, was ein Hoch und was ein Tief im Wettergeschehen bedeutet.

Ebenso kann anklingen die Rolle der Meeresströmungen und ihr Einfluß auf das Klima. Das bewährte Beispiel hierzu ist der Golfstrom und der mit ihm verbundene Labradorstrom.

Zu dem Thema **Elektrizität** und **Magnetismus** muß man zunächst wiederum auf das in der 7. Klasse Gelernte zurückgreifen und an den elektrischen Strom und seine Wärmewirkung sowie den ihn begleitenden Magnetismus erinnern. Die Wärmewirkung zeigt man, außer der schon besprochenen Glühlampe, an dem Elektrokoher, der elektrischen Heizsonne – alte Geräte sind dabei viel anschaulicher als moderne, wenn auch technisch und im Gebrauch weniger sicher –, an dem Wärmeteil des „Föns“, an einem elektrischen Bügeleisen mit seinem Bimetallkontakt im Thermostaten, an einem Waffeleisen und an weiteren Geräten, die sich sonst noch auftreiben lassen.

Die magnetische Wirkung des Stromes zeigt man an einem alten Morseapparat, den man sicher noch irgendwo findet, und bespricht dazu das Morsealphabet. Sodann erklärt man die elektrische Klingel, wobei man auf die Selbstunterbrechung des Stromes den Hauptwert legt.

Bleibt noch Zeit, so kann man einen schönen Abschluß finden, wenn man den einfachen Elektromotor behandelt mit Kommutator und Doppel-T-Anker. Das Grundprinzip genügt hier vollauf. Die Stromerzeugung durch Induktion kann erst auf der Oberstufe besprochen werden, in der 8. Klasse ist es noch zu früh.

Man sollte schließlich nicht versäumen, erneut darauf hinzuweisen, daß all das Behandelte auf der Oberstufe weitergeführt und die Klasse noch viel Neues kennenlernen wird, was auf dieser Stufe zu besprechen noch nicht möglich ist.

