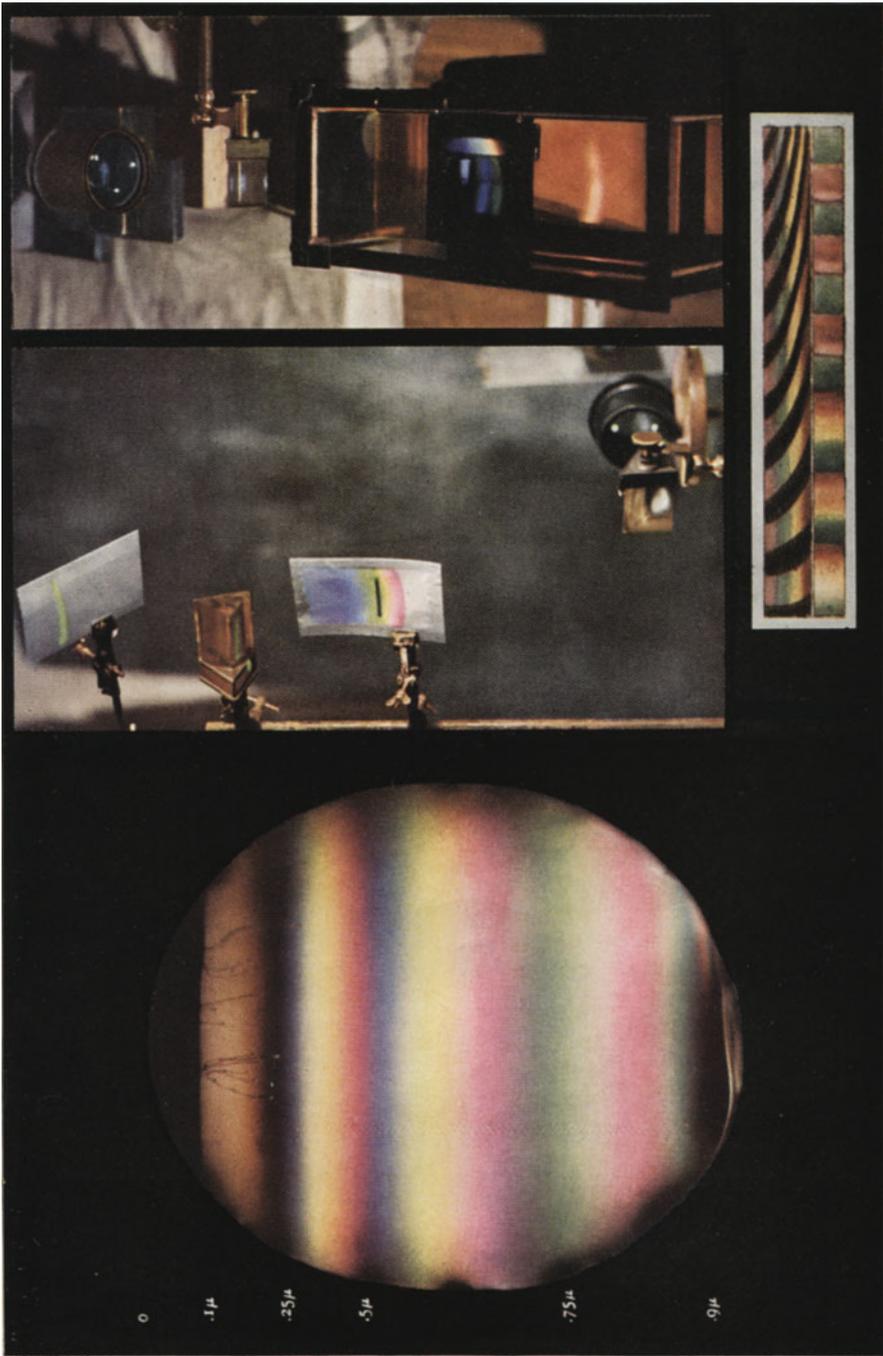


TAFEL I



<p>A. Dieses Bild eines Seifenhäutcheus stammt von dem verstorbenen Sir James Dewar; die Skala am Rande links zeigt die Dicke des Häutcheus an verschiedenen Stellen. Ein „μ“ ist ein Zehntausendstel Zentimeter. (S. 113.)</p>	<p>B. Eine Farbenphotographie, die eine Wiederholung des Versuchs von Newton im Laboratorium zeigt. Das Licht von der Lampe in der rechten unteren Ecke geht durch einen waagerechten Spalt und fällt dann auf ein Prisma. Hierdurch entsteht ein Spektrum auf der unteren der beiden Milchglas-scheiben, die von dem Stativ gehalten werden. Diese Scheibe hat eine schlitzenförmige Öffnung, durch die ein Teil des grünen Lichtes hindurchgeht und auf ein zweites Prisma fällt. Die grünen Strahlen werden abgelenkt und treffen die obere Scheibe, es erfolgt aber keine weitere Auflösung, und die Strahlen bleiben grün. (S. 66 und 69.)</p>	<p>C. Diese Farbenphotographie entstand dadurch, daß ein rechteckiger Behälter mit Wasser, in dem Eosin und Aeskulin aufgelöst waren, von oben her photographiert wurde. Das Licht von der Lampe geht durch die Linse, die man oben im Bilde sieht, und wird durch das Prisma in Farben zerlegt und auf die Oberfläche des Wassers gelenkt. Einen Teil dieses Spektrums sieht man auf einem Schirm rechts unmittelbar über der Wasseroberfläche. Dort wo das Spektrum auf die Wasseroberfläche selbst trifft, werden die kürzeren Wellen absorbiert und durch Licht von etwas größerer Wellenlänge ersetzt. Das Aeskulin färbt resazitblau und das Eosin gelblichgrün. Man sieht die beiden Finoreszenzbanden links von dem hellen Spektrum. In der Mitte darüber ist ein blauer Fleck, der von einer Reflexion an der Wand des Behälters herkommt und nichts mit der Erscheinung zu tun hat. Die längeren Wellen gehen durch die Flüssigkeit hindurch und erzeugen einen rötlichgelben Fleck auf dem Boden des Behälters. (S. 176.)</p>
	<p>D. Dieses Bild ist einer handgemalten Abbildung aus dem Buche von Young, <i>Natural Philosophy</i>, entnommen. Die senkrechten Streifen des unteren Teiles stellen die Interferenzfarben eines Seifenhäutcheus dar, dessen Dicke von links nach rechts (in dem eigentlichen Versuch von oben nach unten) zunimmt. Der obere Teil des Bildes zeigt, was man sieht, wenn der untere Teil mit Hilfe eines Prismas, dessen Kante waagrecht steht, in ein Spektrum auseinandergelogen wird. Die bläulichen Flecken links z. B. (die man für rein blau halten) ergeben ein Spektrum, dem das Rot fehlt. Neben dem Blau ist Gelb, das in ein Spektrum auseinandergelogen wird, das alle Farben außer Violett enthält, usw. Die schwarzen Stellen werden zu kontinuierlichen gekrümmten Bändern ausgezogen. (S. 112.)</p>	

Sir William Bragg

Die Welt des Lichtes

(The Universe of Light)



Aus dem Englischen übersetzt von
Günter Nagelschmidt

Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1935

110 Abbildungen im Text und 26 Tafeln

ISBN 978-3-663-00361-8 ISBN 978-3-663-02274-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-02274-9

Alle Rechte vorbehalten

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1935

Vorwort

Die neuesten Fortschritte der Physik haben besonders deshalb die Beachtung so weiter Kreise gefunden, weil die fesselnden Probleme, zu denen sie führen, von hervorragender Seite dargestellt worden sind. Ich wollte zur rechten Würdigung dieser neuen Erkenntnisse dadurch etwas beitragen, daß ich einen kurzen Überblick über die älteren Forschungen gebe, von denen die heutige Entwicklung ausgegangen ist. Die Experimente und Überlegungen von Newton und Huygens, Young und Fresnel, Crookes und Thomson und vieler anderer Forscher in Vergangenheit und Gegenwart haben die Wege gebahnt, die zu der heutigen Stellung führen; nur dann können wir die Bedeutung dieser Stellung richtig beurteilen, wenn wir etwas von dem Gelände kennen, über das der Weg zu ihr geführt hat.

Das Leitmotiv meines Buches ist der alte Kampf zwischen den zwei Theorien über das Licht, der so außerordentlich stark zur Entwicklung der Physik beigetragen hat, nämlich zwischen der Wellentheorie und der Korpuskulartheorie. Beide sind auf immer mit den Namen von Newton und Huygens verbunden. Jede von ihnen galt für eine bestimmte Zeit als die einzig richtige; aber heute endet der Streit auf ebenso unerwartete wie bezeichnende Weise, wir müssen Hypothesen miteinander vereinigen, von denen man früher glaubte, daß sie sich gegenseitig ausschlossen. Man sieht daran, wie gefährlich es sein kann, Vorstellungen unseres Geistes zu allzufesten Glaubenssätzen werden zu lassen. Noch wird es uns schwer, zu verstehen, wie beide Theorien gleichzeitig zutreffen können, aber wir müssen versuchen, es zu verstehen, weil so viele überzeugende Gründe für jede von ihnen sprechen. Wir werden zu dem Schluß gezwungen, daß Dinge, die wir heute nicht begreifen können, uns vielleicht später einmal klar sein werden, nicht nur infolge der Bereicherung unseres Wissens, sondern auch dadurch, daß unser Geist in neue Gedankengänge eingeführt wird.

Sicher werden die Forschungen einer künftigen Zeit, die von einer Vereinigung beider Theorien ausgehen werden, ebenso frucht-

bar sein wie die vergangener Zeiten, die von dem Streit der beiden lebten und dauernd neue Anregung bekamen.

Licht im eigentlichen Sinne des Wortes ist nur ein enger Ausschnitt aus einem viel größeren Gebiet von Erscheinungen, nämlich dem von Strahlung im allgemeinen, aber die Gesetze der Optik gelten im ganzen großen Bereich, und die Arbeit der Pioniere hat eine größere Bedeutung, als sie selbst damals wußten. Die Wellenlängen des Lichtes liegen zwischen engen Grenzen, aber die Gesetze der Wellenbewegung gelten von den ungemein kleinen Wellen der Röntgenstrahlen bis zu den längsten Radiowellen, und auch die Forschungen, die sich des Lichtes bedienen, haben einen ungeheuren Bereich; sie umfassen die weiten Räume der Astronomie und die winzigen Strukturen der Kristalle, deren komplizierter Aufbau dem direkten Bereich unserer Augen nicht zugänglich ist und auf beiden Gebieten findet man eine Fülle der interessantesten Erscheinungen.

Und noch mehr; Strahlungen, die offensichtlich korpuskularer Natur sind wie die Schauer von Elektronen, Atomen und Protonen, die wir heute so leicht in unseren Laboratorien erzeugen können, gehorchen, wie man neuerdings gefunden hat, in gewissem Maße denselben Gesetzen wie das Licht. Die Ausdrücke Welle und Korpuskel entsprechen eher verschiedenen Betrachtungsweisen als verschiedenen Dingen. Mit einem Wort: das Licht beherrscht die ganze Physik und eigentlich alle Naturwissenschaften. Die Untersuchung seiner verschiedenen Formen und Eigenschaften ist mit der Entwicklung der Physik aufs engste verknüpft, und auch die faszinierenden Entdeckungen unserer Tage sind eine direkte Folge hiervon. Das Ganze ist eine lange Geschichte, und dieses Buch soll einen kurzen Abriß der früheren Kapitel geben, so daß die späteren besser gewürdigt werden können.

Der Titel dieses Buches ist der gleiche wie der einer Reihe von Vorlesungen, die ich Weihnachten 1931 in der Royal Institution gehalten habe. Solche Vorträge werden alljährlich seit mehr als 100 Jahren für eine Hörschaft veranstaltet, die hauptsächlich der Jugend entstammt; Faraday selbst hat nicht weniger als 19mal diese Weihnachtsvorlesungen gehalten. Die Einfachheit und Klarheit seiner Ausführungen und der Versuche, mit denen er sie begleitete, waren besonders „einer jugendlichen Hörschaft angepaßt“, um uns des Ausdrucks zu bedienen, der noch heute jedes Jahr in der Ankündigung erscheint. Seine Nachfolger ver-

suchten, es ihm gleichzutun. Die Weihnachtsvorlesungen im Jahre 1931 waren daher von vielen Experimenten begleitet, von denen einige alt, andere etwas neueren Datums sind. Ich habe sie in diesem Buche verwendet, aber ihre Beschreibung und die Überlegungen, die an sie anknüpfen, gehen natürlich viel weiter, als dies während der Vorlesungen möglich oder angebracht gewesen wäre.

Ich möchte die Gelegenheit benutzen, vielen meiner Freunde zu danken, die mir bei den Abbildungen zu diesem Buche geholfen haben. Mr. Thorne Baker hat die meisten Farbenphotographien aufgenommen, ohne die ein Buch über das Licht den Hauptreiz verliert. Die Tuschezeichnungen verdanke ich meiner Tochter Mrs. Alban Caroe. Professor C. T. R. Wilson hat mir erlaubt, einige seiner Aufnahmen mit der Nebelkammer zu reproduzieren. Die Ultrarotphotographie einer Landschaft verdanke ich Messrs. Ilford Ltd. Professor A. Fowler und Dr. W. M. Smart haben mir freundlicherweise Spektralaufnahmen und Professor Andrade Beugungsbilder zur Verfügung gestellt. Die Zeichnung auf S. 103 entstand auf Anregung von Dr. W. T. Astbury. Die meisten Photographien von Versuchsanordnungen sind in der Royal Institution von Mr. W. J. Green und seinem Assistenten Mr. K. Bridger gemacht worden.

Ich habe versucht, weitere Hinweise an den betreffenden Stellen des Buches zu machen.

W. H. Bragg.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Was ist Licht?	1
Die Wellentheorie des Lichtes. Versuche mit Wasserwellen. Reflexion. Die Streuung des Lichtes. Die seitliche Ausbreitung eines Lichtstrahls. Wie entstehen Bilder? Reflexion an gekrümmten Flächen. Das Sehen. Sehen mit zwei Augen. Lochbilder. Schimmer. Der Zauberspiegel.	
Auge und Sehen	29
Warum es auf der Netzhaut kein Durcheinander gibt. Das Bild, das von einer Linse entworfen wird. Das Auge als optischer Apparat. Optische Fehler des Auges und ihre Beseitigung. Vergrößerung. Mikroskop und Fernrohr. Astigmatismus. Optische Täuschungen. Optisches Beharrungsvermögen. Allgemeines über die Brechung von Licht. Totalreflexion.	
Farbe	66
Das Spektrum der Farben. Die Eigenschaften des Lichtes. Der Bereich der Wellenlängen. Die Wirkung von Farbstoffen. Wie das Auge auf Farben reagiert. Farbentäuschungen. Farberscheinungen bei Linsen.	
Die Entstehung der Farben	87
Das Prinzip der Resonanz. Die Schwingungen der Atome und Moleküle. Chlorophyll. Die Farben der Blumen. Farbstoffe. Beugung. Interferenz.	
Die Farben des Himmels	114
Die selektive Streuung des Lichtes. Streuung durch Moleküle. Die Farbe des Meeres. Höfe um Sonne und Mond.	
Die Polarisisation des Lichtes	128
Die Eigenschaften des Lichtes. Huygens' überraschende Beobachtung. Die Beobachtungen von Malus. Die transversalen Schwingungen von Young und Fresnel. Polarisisation und Kristallstruktur. Die Polarisisation des Himmelslichtes.	
Das Licht der Sonne und der Sterne	156
Die Entfernungen der Sterne. Die Geschwindigkeit des Lichtes. Die Analyse des Sternenlichtes. Spektralanalyse und Sterne. Das Spektrum der Sonne. Die Bewegungen der Sterne zur Erde hin und von ihr fort. Unsichtbare Strahlung. Fluoreszenz. Die Entladung von Elektrizität durch ultraviolettes Licht.	
Die Röntgenstrahlen	179
Der Versuch von Laue.	
Welle und Korpuskel	200
Der lichtelektrische Effekt. Die Wilsonsche Nebelkammer. Photonen und Elektronen. Elektronenbeugung.	

Was ist Licht?

Das Licht bringt uns Kunde von der Welt. Von Sonne und Sternen kommt es zu uns und verrät uns ihr Dasein und ihre Lage, zeigt uns ihre Bewegungen, ihren Aufbau und noch viele andere interessante Dinge. Es kommt aber auch von den Gegenständen unserer näheren Umgebung, und mit seiner Hilfe finden wir uns in dieser Welt zurecht; es gibt uns die Möglichkeit, uns an Farben und Formen zu erfreuen, und wir benutzen es, um Nachrichten und Gedanken auszutauschen. Wir sind voll berechtigt, den Sinn des Wortes Licht so weit zu fassen, daß es den ganzen Bereich der ihm verwandten Strahlungen umfaßt, die wir nicht mit den Augen wahrnehmen können. Wenn wir das tun, dann ist Licht auch der große Vermittler von Energie von einem Punkt zum andern im Weltall, hauptsächlich durch den Übergang von Wärme. Auch der moderne Radioverkehr fällt unter diesen Begriff, ebenso die Röntgenstrahlen, gewisse Strahlungen der radioaktiven Substanzen und vielleicht auch die Höhenstrahlung, die neuerdings soviel Aufsehen erregt. Alle diese verschiedenen Erscheinungen sind Offenbarungen eines Prinzips, dessen großartige allgemeine Bedeutung immer klarer hervorgetreten ist, je mehr man sich mit dem Wesen des Lichtes beschäftigt hat.

Wir können sogar noch weiter gehen. In den allerletzten Jahren hat man gefunden, daß die Elektronen, die winzigen Elementarteilchen der Elektrizität, Eigenschaften haben, die große Ähnlichkeit mit den Erscheinungen zeigen, die uns an Lichtstrahlen bekannt und vertraut sind, und sogar die Atome scheinen in gewisser Hinsicht mit zu derselben Gruppe zu gehören.

Licht im vollen Sinne des Wortes übermittelt also Energie, ohne die kein Leben sich erhalten kann, und gibt den Lebewesen die unendlich wichtige Möglichkeit der Beobachtung; außerdem ist es wesensverwandt mit dem Stoff, aus dem alle Dinge, die lebenden und die leblosen, gemacht sind. Sein Wirkungskreis ist das ganze Weltall und wir werden ihm daher nur gerecht, wenn wir von der Welt des Lichtes sprechen.

Zunächst müssen wir uns mit Licht im engeren Sinne vertraut machen, also mit dem, was unsere Augen erblicken. Nehmen wir einmal an, ein Lichtstrahl verlasse die Sonne und komme nach einer gewissen Zeit zu uns. Er hat dann auf seinem Wege einiges erlebt: Zuerst hat er die heißen Gasschichten auf der Oberfläche der Sonne und die Lufthülle unserer Erde durchquert, er ist vielleicht viele Male reflektiert worden, und endlich kommt er zu uns von dem Gegenstand her, den wir ansehen. Diese letzte Reflexion ist für uns der wichtigste Teil seines Weges, denn mit ihrer Hilfe erkennen wir, wo der betreffende Gegenstand sich befindet, und was er darstellt. Aber das ist nicht alles, unsere Augen können auf Grund früherer Erfahrungen auch die Lichtquelle angeben, von der das Licht herkommt, und wir verwechseln sie nicht mit irgendeiner Art von künstlichem Licht. Wenn wir das Sonnenlicht mit geeigneten Apparaten analysieren, können wir noch viel mehr, nämlich alle die Erlebnisse rekonstruieren, die der Lichtstrahl auf seinem Wege gehabt hat, wir können die Zusammensetzung und den Zustand der Gasschichten angeben, durch die er gekommen ist, und erfahren auch etwas über die Körper, an denen er reflektiert worden ist.

Wenn wir einen Ozeandampfer beobachten, der nach einer großen Reise langsam in den Hafen einläuft, können wir ihm sofort ansehen, welches sein Heimathafen ist, und wo er herkommt. Geht man dann an Bord, so sieht man an dem, was die Reisenden in ihren Händen tragen, und an den Dingen, die an Bord herumliegen, welche Häfen das Schiff angelaufen hat, ja man kann die ganze Reisegeschichte an diesen Einzelheiten ablesen.

Ebenso ist es mit den Lichtstrahlen; wenn sie auf unser Auge treffen, bringen sie alle ihre Erlebnisse mit, von denen einige leicht, andere nur schwer zu erkennen sind. Das meiste erfahren wir durch die letzte Richtungsänderung, die der Strahl vor dem Ende seiner Reise durchmacht; denn durch sie „sieht“ das Auge den Gegenstand, an dem die Ablenkung stattfindet.

Die Wellentheorie des Lichtes

Wir kommen so auf die natürlichste Weise zu der Frage, was eigentlich das Wesen dieses Boten Licht ist, und wie er von Ort zu Ort reist. Heute ist es viel leichter, die Erklärung hierfür zu verstehen, als das noch vor wenigen Jahren der Fall war. Der

Rundfunk hat uns mit dem Gedanken vertraut gemacht, daß eine Art Störung, ein bestimmter Zustand, sich von einem Punkte aus in Wellenform ausbreitet und durch Empfänger nah und fern aufgefangen und verstanden werden kann. Die Sonne schickt Wellen aus, genau wie ein Radiosender; unsere Augen empfangen die Wellenzüge, die auf sie treffen, und deuten sie, ebenso wie unsere Radioempfänger die Wellen aus dem Senderraum auffangen und wiedergeben. In dem Wesen der beiden Wellenarten ist nicht der geringste Unterschied, nur in der Größe sind sie sehr verschieden; beide breiten sich mit der gleichen Geschwindigkeit aus, und jedes Medium, das die eine Wellenart trägt, trägt auch die andere. Der einzige Unterschied ist der, daß die Lichtwellen einander in viel kleineren Abständen folgen als die Radiowellen. Dies hat natürlich gewisse Konsequenzen, so daß sich Licht und Radiosendung in mancher Hinsicht nicht gleich verhalten, wichtig ist aber, daß sie im Wesen gleichartig sind.

Diese Ähnlichkeit ist interessant und nützlich. Es war immer schwer, die Wellentheorie des Lichtes zu verstehen, weil der Grundgedanke so fremdartig war; aber heute lesen wir jeden Tag in der Zeitung, welche Wellenlängen die verschiedenen Stationen aussenden, so daß uns der Begriff der Wellen vertraut geworden ist. Das bedeutet natürlich nicht, daß wir jetzt alle wissen, welches Medium diese Wellen trägt, und wie es im Weltenraum verteilt ist. Wir wissen auch nicht, was es denn eigentlich ist, das sich hin und her bewegt oder auf und nieder, oder überhaupt, was für eine Art Bewegung hier dem entspricht, was uns als Wellenbewegung auf der Wasseroberfläche vertraut ist. Nein, die meisten Leute wissen nur, daß es beim Radio Wellen gibt, die man ziemlich genau messen kann, und daß man den Empfänger auf die Wellenlänge eines bestimmten Senders einstellen kann. Aber das ist ganz nützlich, wenn wir zu begreifen versuchen, was man unter der Wellentheorie des Lichtes eigentlich versteht, denn wir sehen, daß der Radioingenieur den Begriff der Welle täglich benutzt und damit arbeiten kann. Der Gedanke verliert so seine Verschwommenheit und wird uns vertraut, auch wenn wir bei näherem Zusehen finden, daß wir eigentlich gar nicht viel mehr wissen als vorher. Ein anderer Vorteil besteht darin, daß auch die beträchtlichen Unterschiede im Verhalten der beiden Wellenarten lehrreich sind; hierauf werden wir noch bei verschiedenen Gelegenheiten zurückkommen.

Die Wellenlänge des Deutschlandsenders in Königswusterhausen beträgt 1571 m oder 157100 cm, die des roten Lichtes dagegen etwas weniger als ein Zehntausendstel Zentimeter. Wenn wir Experimente mit Wellen machen wollen, die uns einige ihrer Eigenschaften vor Augen führen sollen, dann sind Radiowellen natürlich viel zu groß und Lichtwellen viel zu klein. Wir brauchen eine etwas handlichere Größenordnung, wozu sich ausgezeichnet die Bewegung von Wellen auf dem Wasser eignet. Mit ihnen wollen wir uns zunächst beschäftigen. Das können wir mit vollem Recht, denn die wichtigsten Erscheinungen der Wellenbewegung zeigen sie uns ebenso gut wie irgendein anderes Beispiel: ob lang oder kurz, im wesentlichen verhalten sich alle Wellen gleich.

Versuche mit Wasserwellen

Wir nehmen einen flachen Behälter mit Glasboden, wie ihn Abb. 1 zeigt, und füllen ihn etwa $\frac{1}{2}$ cm hoch mit Wasser. Wenn wir das Wasser in Bewegung versetzen, dann entstehen kleine Wellen, die man direkt nur schwer mit dem Auge verfolgen kann. Man sieht sie aber sehr gut, wenn man eine starke Lichtquelle auf sie richtet und ihre Schatten mit einem Spiegel auf die Wand projiziert.

Jetzt geben wir dem Behälter einen Stoß, so daß Wellen parallel zu einer Wand entstehen; sie gehen von rechts und links durch die Schale, wobei beide Wellenzüge sich in der Mitte treffen; hier gehen sie durcheinander hindurch, und endlich kommt jeder am anderen Ende des Behälters an, wird reflektiert und kommt denselben Weg wieder zurück. Die beiden Beobachtungen, die wir so leicht hier machen können, zeigen uns zwei der wichtigsten Erscheinungen jeder Wellenbewegung.

Nämlich erstens sehen wir, wie zwei Wellenzüge durcheinander hindurchgehen, ohne sich irgendwie gegenseitig zu stören. Diese Tatsache ist uns allen wohlbekannt, auch wenn wir es uns vielleicht nie richtig klargemacht haben, ja, die Welt würde merkwürdig aussehen, wenn es nicht so wäre. Wir wollen einmal annehmen, ein Beobachter sieht auf eine Kerze, d. h. ihre Lichtstrahlen treffen sein Auge; eine zweite Person sieht nach einer anderen Kerze, wobei die beiden Blickrichtungen einander kreuzen. Jeder sieht dann die Kerze, die er anblickt, unabhängig davon, ob die andere vorhanden ist oder nicht. Die Folgen wären nur zu deutlich,

wenn das anders wäre. Wir würden ziemlich erstaunt sein, wenn all die Lichtstrahlen, die von den verschiedenen Gegenständen in einem Zimmer zurückgeworfen werden, sich bei jeder ihrer zahllosen Durchkreuzungen plötzlich irgendwie gegenseitig veränderten. Man könnte in dem Durcheinander nichts mehr erkennen; das ganze Zimmer wäre nur ein verschwommener Fleck und sonst nichts. Auch die Wellen von den verschiedenen Radiostationen stören einander nicht, wenn sie sich kreuzen. Das, was man mit einem technischen Ausdruck „Interferenz“ nennt, ist eine andere, besondere Erscheinung, mit der wir uns später beschäftigen werden. Wenn ein Hörer, sagen wir, in Breslau den Kölner Sender

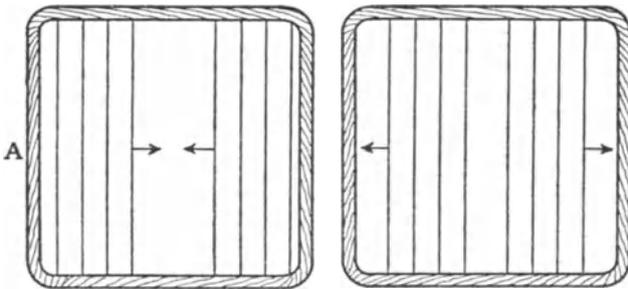


Abb. 1. Durch einen Stoß werden Wellen im Wasserbehälter erzeugt, den sie durchqueren. Die beiden Wellenzüge, die an zwei gegenüberliegenden Seiten entstehen, nähern sich einander im ersten Bilde, im zweiten haben sie sich gekreuzt.

hört, und ein anderer in München den von Königswusterhausen, dann wird keiner dadurch gestört, daß die beiden Wellenzüge sich irgendwo über Leipzig treffen. In dem Augenblick, in dem sie sich kreuzen, gibt es eine sehr komplizierte Bewegung. Aber gleich danach setzt jeder Wellenzug seinen Weg fort, als wenn er nie etwas mit dem anderen zu tun gehabt hätte. Die Tatsache, daß Wellenzüge sich ohne gegenseitige Störung durchdringen können, ist offenbar ungeheuer wichtig für die Erklärung unseres Sehvermögens.

Sicher war es früher einmal schwer zu verstehen, daß sich Lichtstrahlen ohne gegenseitige Beeinflussung kreuzen, und vielleicht besteht diese Schwierigkeit für manchen auch heute noch, besonders wenn man sich mit Sir Isaac Newton das Licht als einen Strom von kleinsten Teilchen vorstellt. Gegen diese „Korpuskulartheorie“ wurde der Einwand gemacht, daß sich zwei

Leute ja nie gegenseitig ins Auge sehen könnten, weil die hin und her fliegenden Korpuskeln sich gegenseitig treffen und zur Erde fallen würden. Das war kein sehr erheblicher Einwand, denn man konnte ja leicht annehmen, die Teilchen seien so klein, daß Zusammenstöße nur selten vorkämen. Es ist aber ganz interessant zu sehen, mit was für Argumenten die Gelehrten arbeiteten, als sie auf Grund einiger Experimente angingen, über das Wesen des Lichtes nachzudenken.

Es gab zu Newtons Zeiten zwei feindliche Theorien, nämlich die Korpuskulartheorie, die von Newton selbst stammte, und eine Impulstheorie von Huygens, die Vorläuferin der heutigen Wellentheorie. Newton und Huygens nahmen beide das Vorhandensein kleinster Teilchen an, der erstere glaubte aber, Licht bestehe aus solchen Teilchen in Bewegung, während Huygens sich vorstellte, die Teilchen seien in Ruhe, erfüllten aber lückenlos den ganzen Raum, und die Ausbreitung von Licht bestehe darin, daß sich Stöße von Teilchen zu Teilchen fortpflanzten. Wir zitieren aus seiner Abhandlung über das Licht:

„Wenn man eine Anzahl von Kugeln gleicher Größe nimmt, die aus irgendeinem harten Stoff verfertigt sind, und sie in einer geraden Reihe so anordnet, daß sie sich gegenseitig berühren, und wenn man dann eine ähnliche Kugel auf die erste in der Reihe aufprallen läßt, dann beobachtet man, daß die Bewegung in einem Augenblick durch die Reihe hindurch geht und sich auf die letzte Kugel überträgt, die sich von der Reihe loslöst, ohne daß man irgendeine Bewegung der anderen Kugeln bemerken könnte; auch die Kugel, die zuerst aufprallte, bleibt regungslos bei den anderen liegen. Man sieht hieraus, daß die Bewegung sich mit außerordentlicher Geschwindigkeit fortpflanzt; sie ist um so größer, je härter der Stoff ist, aus dem die Kugeln gemacht sind.

Trotzdem ist es sicher, daß die Übertragung der Bewegung nicht gleichzeitig erfolgt, sondern nacheinander durch die Kugeln geht und daher eine gewisse Zeit beanspruchen muß. Denn wenn die Bewegung oder, wenn man will, die Fähigkeit zur Bewegung nicht nacheinander durch alle Kugeln ginge, dann würden sie alle gleichzeitig die Bewegung aufnehmen, und die ganze Reihe würde sich weiterbewegen; dies geschieht aber nicht.“

Huygens betonte ausdrücklich, daß seine Impulse einander nicht in gleichen Abständen folgten. Damit leugnete er die Gleichmäßigkeit, die eine wesentliche Eigenschaft jeder Wellenbewegung

ist; mit ihrer Hilfe schufen Young und Fresnel am Anfang des 19. Jahrhunderts die Grundlagen der modernen Lichttheorie. Wir werden Youngs Ableitung der Interferenzerscheinungen und Fresnels Theorie der transversalen Wellen erst später betrachten. Huygens konnte immerhin die einfacheren Erscheinungen beim Lichte, einschließlich der Reflexion und des Durchdringens ohne gegenseitige Beeinflussung, mit seiner Impulstheorie erklären. Letzteres verdeutlichte er mit Hilfe einer Figur (Abb. 2), die wir hier wiedergeben. Er beobachtete nämlich folgendes: Wenn die harten Kugeln *A* und *D* von entgegengesetzter Richtung her so angestoßen werden, daß sie die Kugelreihe im selben Augenblick treffen, dann prallen sie ab, als wenn sie auf einen festen Körper gestoßen wären. Die Impulse müssen also in beiden Richtungen durch die Reihe gegangen sein, so daß die Bewegung sich von *A* auf *D* überträgt und umgekehrt (Abb. 2).



Abb. 2. Die Abbildung stammt aus Huygens Abhandlung über das Licht. Die Kugel *A* trifft auf das eine Ende einer Kugelreihe und bleibt liegen, am anderen Ende löst sich eine Kugel ab und rollt fort.

Man kann den Versuch noch etwas abändern. Wir ordnen die Kugeln in einer Ebene an, wie es Abb. 3 zeigt. Kleine Vertiefungen in der Unterlage sorgen dafür, daß sie an Ort und Stelle bleiben. Wenn jetzt *A* in der Richtung auf *B*, und *D* in der Richtung auf *E* gerollt wird, so daß sie gleichzeitig auftreffen, dann bleiben *A* und *D* neben *B* und *E* liegen, während *C* und *F* wegrollen. Beide Impulse haben sich in der Mitte der Abbildung gekreuzt, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen (Abb. 3).

Nach Newtons Tode verlor die Korpuskulartheorie an Bedeutung, die Wellentheorie siegte schließlich, denn sie wurde von Young und Fresnel so abgeändert und erweitert, daß man mit ihrer Hilfe nicht nur alles erklären konnte, was zu Newtons und Huygens Zeiten bekannt war, sondern noch viele andere Eigenschaften des Lichtes, die man später entdeckte. Wir werden weiterhin sehen, daß die Wellentheorie auch heute noch besteht; wir werden sie sogar ausführlich benutzen und noch viele Schlüsse aus dem Verhalten von Wasserwellen ziehen, wie wir es eben getan haben. Es ist aber sehr merkwürdig und interessant, daß in den letzten Jahren ganz neue Beobachtungen gemacht wurden,

die die Wellentheorie nicht mehr recht erklären kann. Sie scheinen eine Rückkehr zu einer Art Korpuskulartheorie, ähnlich der von Newton, zu verlangen. Es muß ein Weg gefunden werden, um Beobachtungen in Einklang miteinander zu bringen, die sich vollständig zu widersprechen scheinen; noch nie hat es in der Geschichte der Physik eine so aufregende Epoche gegeben wie die jetzige, in der der Wille zum Verstehen unsere geistigen Kräfte so aufs äußerste anzuspinnen scheint.

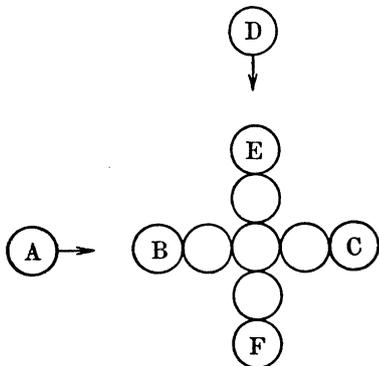


Abb. 3. Eine Abänderung des vorigen Versuches. Die Kugeln *A* und *D* treffen *B* und *E* gleichzeitig und bleiben liegen. Die Kugeln *C* und *F* rollen fort.

Wir können auf diese besondere Frage jetzt nicht näher eingehen, sondern müssen uns zunächst mit den weniger komplizierten Eigenschaften des Lichtes begnügen, und bei diesem Studium leistet uns die Wellentheorie ausgezeichnete Dienste. Das Bewußtsein, daß wir schwierigere Dinge für eine spätere Betrachtung beiseite schieben, schadet nichts, und indem wir so vorgehen, haben wir die beruhigende Sicherheit, daß wir unsere Zeit nicht ver-

geuden, wenn wir beim Studium der einfacheren Erscheinungen diese mit Hilfe einer Theorie beschreiben, die, wenigstens innerhalb eines gewissen Bereiches, richtig ist.

Reflexion

Wir kommen jetzt zu der zweiten Beobachtung, die wir bei unserem Versuch mit den Wasserwellen gemacht haben, nämlich der Tatsache der Reflexion. Wir hatten gesehen, daß ein Wellenzug, der senkrecht auf eine Wand der Schale auftrifft, direkt zurückgeworfen wird. Wenn wir jetzt Wellen erzeugen, die die Wand schräg treffen, dann beobachten wir, daß die Wellen, die zurückgeworfen werden, mit der Wand den gleichen Winkel bilden wie die ankommenden. Dies entspricht einer wohlbekanntem Eigenschaft des Lichtes. Man weiß nämlich seit langer Zeit, daß der einfallende und der zurückgeworfene Strahl mit der reflek-

tierenden Oberfläche eines Spiegels den gleichen Winkel bilden (Abb. 4).

Wir wollen das Verhältnis der beiden Ausdrücke, die wir benutzt haben, „Strahl“ und „Wellenzug“ etwas näher betrachten. Von einem Strahl sprechen wir z. B., wenn wir das Bündel von Sonnenlicht beschreiben wollen, das durch ein Loch im Vorhang in ein verdunkeltes Zimmer einfällt. Man kann sich dieses Bündel auch als einen Wellenzug vorstellen, aber es ist unmöglich, dies entsprechend in einer Zeichnung wiederzugeben. Dazu müßte man nämlich, wie in unserer Abbildung, parallele Linien zeichnen, die die Wellen, die aufeinander folgen, darstellen sollen; man müßte sie aber so zeichnen, daß etwa 15 000 Wellen auf einen Zentimeter kommen, wenn die Darstellung richtig sein soll. Wenn wir uns das näher überlegen, so kommen wir zu der wichtigen Beobachtung, daß die Wellen an den Seiten in Wirklichkeit nicht so

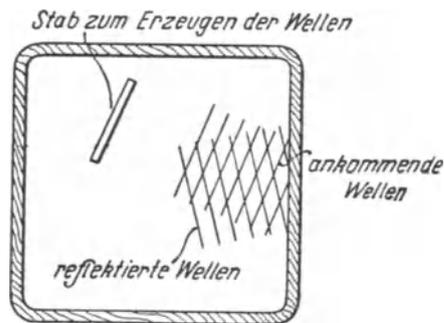


Abb. 4. Die Abbildung zeigt die Reflexion von Wellen an der Wand des Wasserbehälters.

klar begrenzt sein können, daß man eine gerade Linie durch sie ziehen kann, wie sie der Begrenzung eines „Strahles“ entsprechen würde. Man müßte vielmehr erwarten, daß die Wellen sich seitlich ausbreiten und ihre Ränder unscharf werden. Bei einem Lichtstrahl ist das auch wirklich der Fall, und wie wir später sehen werden, eine Tatsache von großer theoretischer Bedeutung. Praktisch ist der Effekt aber klein und kann allgemein vernachlässigt werden, so daß wir meistens berechtigt sind, „Lichtstrahlen“ zu zeichnen, als wenn das Licht gerade, wohldefinierte Grenzlinien hätte. Die Richtung des Strahles ist natürlich senkrecht zu der der Wellen.

Wir wollen noch einen oder zwei Versuche machen, um die Reflexion des Lichtes an einer ebenen Fläche zu zeigen. Die Lampe (Abb. 5) gibt uns ein gerades, enges Lichtbündel, das wir von einem Spiegel reflektieren lassen. Wir wollen uns nicht damit aufhalten, genaue Messungen zu machen, aber wir sehen sofort,

daß das Reflexionsgesetz, wenigstens ungefähr, erfüllt ist, und wir wollen der Versicherung glauben, daß man auch mit den allgeringsten Messungen keine Abweichungen findet. Um den Versuch zu erweitern und abzuändern, nehmen wir zwei Spiegel, die einen rechten Winkel miteinander bilden, und stellen sie so auf, daß die Schnittlinie der Spiegelebenen senkrecht steht und der

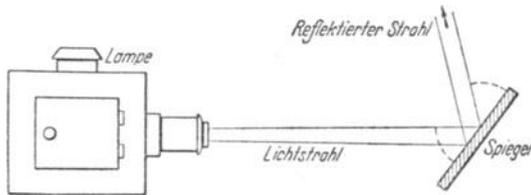


Abb. 5. Der einfallende und der reflektierte Strahl bilden gleiche Winkel mit dem Spiegel.

waagrechte Lichtstrahl erst den einen Spiegel trifft, und dann von ihm auf den zweiten reflektiert wird. Nach der doppelten Reflexion ist der zurückkommende Strahl parallel mit dem einfallenden, und das gilt, wie Abb. 6 zeigt, immer, wie man die Spiegel auch hält.

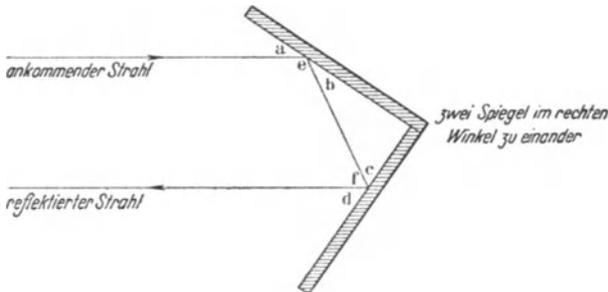


Abb. 6. Doppelte Reflexion an zwei Spiegeln, die rechtwinklig zueinander stehen. Beide Strahlen sind parallel, wenn die Verbindungslinie der Spiegel im rechten Winkel zu ihnen steht, denn $a + d = b + c = 90^\circ$; ... $e + f = 360^\circ - (a + b + c + d) = 180^\circ$.

Wenn man die Spiegel aber so aufstellt, daß ihre Schnittlinie nicht mehr senkrecht zum Lichtstrahl steht, dann ist der zweimal reflektierte Strahl nicht mehr parallel mit dem ankommenden (Abb. 7).

Ein weiteres, besonders interessantes Beispiel bekommen wir, wenn wir drei Spiegel so anordnen, daß sie alle zueinander senkrecht stehen, wie in Abb. 8. Ein Lichtstrahl, der ankommt und von allen dreien nacheinander reflektiert wird, geht in seiner Aus-

gangsrichtung zurück, wie man den Apparat auch hält. Diese Anordnung ist mehr als einmal erfunden und benutzt worden. Ihre letzte Anwendung ist besonders geistvoll und sinnreich. Vor kurzem kam ein Gesetz heraus, nach dem alle Fahrräder einen roten Reflektor haben müssen, der auf einen Autofahrer dessen eigenes Scheinwerferlicht teilweise zurückstrahlt. Verschiedene Arten von Reflektoren kamen bald auf den Markt, aber nicht alle konnten das Scheinwerferlicht in genügender Konzentration in Richtung auf das Auto zurückwerfen. Sie mußten deshalb alle im National Physical Laboratory¹⁾ geprüft werden, wo die ausgesucht wurden, die die vorgeschriebenen Bedingungen erfüllten. Einer der besten Reflektoren war nach dem Prinzip mit den drei Spiegeln der Abb. 8 gebaut. Er besteht vorn aus einer flachen roten

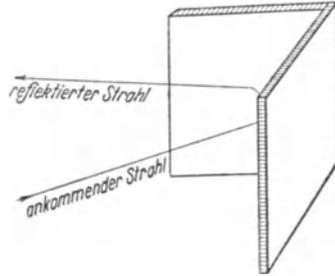


Abb. 7. Die Strahlen sind nicht parallel, wenn die Bedingung des vorigen Versuches nicht erfüllt ist.

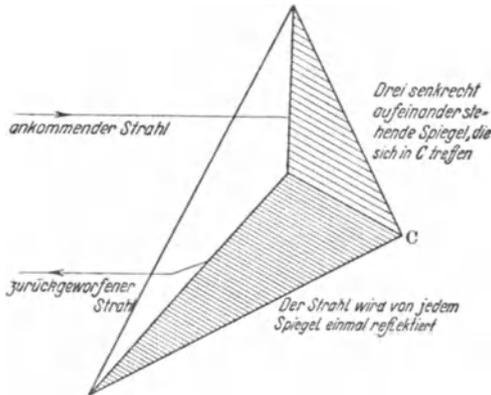


Abb. 8. Reflexion an drei zueinander senkrechten Spiegeln. Ankommender und zurückgeworfener Strahl sind parallel, wie man die Spiegel auch hält.

Glasscheibe; in die Rückwand ist eine Anzahl dreiseitiger Pyramiden eingepreßt, die von drei aufeinander senkrechten Flächen gebildet werden. Das Autolicht fällt vorn auf die rote Scheibe, wobei

¹⁾ Anmerkung des Übersetzers: Entspricht in Deutschland etwa der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.

ein Teil dreifach an den Flächen jeder Pyramide reflektiert wird, so daß ein helles Lichtbündel den Weg zurücknimmt, auf dem es gekommen ist, d. h. also, in Richtung auf das Auto, was ja gerade erreicht werden sollte.

Die Streuung des Lichtes

Manchmal sprechen wir von der Reflexion oder Spiegelung und manchmal von der Streuung des Lichtes. Dabei dürfen wir nicht vergessen, daß die beiden Ausdrücke nicht verschiedenen Vorgängen entsprechen, sondern eher verschiedenen Bedingungen, unter denen derselbe Vorgang stattfindet. Wenn Licht auf einen Körper fällt, wird es abgelenkt, und wenn der betreffende Gegen-



Abb. 9. Durch staubfreie Luft geht Licht, ohne merklich gestreut zu werden.

stand eine glatte Oberfläche hat, dann ist die neue Bewegung regelmäßig und folgt einem einfachen Gesetz, das von der Form der Oberfläche abhängt. Dies bezeichnen wir im allgemeinen als Reflexion. Ist die Oberfläche aber unregelmäßig geformt, dann wird das Licht in alle möglichen Richtungen geworfen, und wir sprechen von Streuung. Wenn die Meereswellen gegen einen glatten künstlichen Damm rollen, entsteht eine regelmäßige und einfache Reflexion. Ist die Küste aber steinig, dann erfolgt eine ungeordnete Bewegung, und man sieht keine Reihe zurückflutender Wellen.

Wenn ein Lichtstrahl durch ein Zimmer fällt, dann sehen wir seine Spur, weil die Luft des Zimmers viele verschiedenartige Staubteilchen enthält, die etwas von dem Licht in unser Auge ablenken. Wenn kein Staub da wäre, könnte man den Strahl von der Seite nicht mehr sehen. Um dies zu beweisen, machen wir uns einen Kasten, durch den ein Lichtstrahl, wie in Abb. 9, durch Glasfenster ein- und austreten kann. Die Vorderwand besteht ebenfalls aus Glas, so daß wir das Innere sehen können. Die Wände innen

sind schwarz und ein paar Tage vor dem Versuch mit Glyzerin bestrichen worden, so daß aller Staub in der Schachtel sich an den Seiten gesammelt hat und dort festklebt, die Luft also innen so gut wie staubfrei ist. Man kann dann sehen, wie der Lichtstrahl in den Kasten hinein- und aus ihm herausgeht, im Kasten selbst kann man ihn nicht sehen. Das ist natürlich im Einklang mit unserer Hypothese. Der Lichtstrahl besteht aus einem Wellenzug, und das Auge ist ein Organ, das reagiert, wenn Licht hineinkommt; wenn nun die Wellen unseres Strahles vom Staub nicht mehr abgelenkt werden, können wir das Licht nicht sehen. Ein beliebig starker Lichtstrahl mag in ein Zimmer durch ein Loch hinein- und durch ein anderes wieder hinausgehen; das Zimmer wird vollständig dunkel bleiben, wenn der Raum erstens nicht

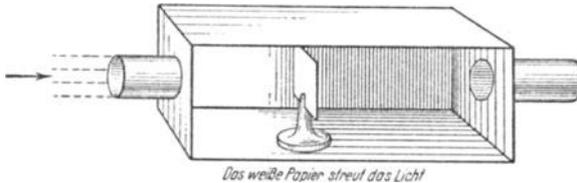


Abb. 10. Ein Stück weißes Papier im Strahlengang streut das Licht und wird selbst zur sehr hellen sekundären Lichtquelle.

anderweitig erhellt wird, und wenn zweitens die Luft staubfrei ist. Wir können uns unsere Schachtel als solchen Raum vorstellen. Wenn jetzt ein Stück weißes Papier in den Weg der Strahlen gebracht wird, dann sind Kasten und Zimmer hell beleuchtet (Abb. 10). Manchmal ist es ganz nützlich, daran zu denken, wie ein Strahl auf diese Weise zur Seite gelenkt werden kann. Wenn man z. B. auf einem Landweg bei Nacht einen Autoreifen wechseln muß, die Taschenlampe vergessen hat und die Lampen des Autos sich nicht drehen lassen, dann kann man sich mit etwas weißem Papier vor dem Scheinwerfer eine sehr schöne Beleuchtung machen. All das verstehen wir leicht, wenn der Strahl aus einem Wellenzug besteht.

Wir haben also bis jetzt in den Bewegungen der Wasserwellen zwei Erscheinungen gefunden, die Eigenschaften des Lichtes entsprechen, mit denen wir vertraut sind; sie können einander frei durchdringen, und sie werden von einer Wand in der gleichen Weise reflektiert, wie Licht zurückgeworfen werden kann. Wir wollen daher die Annahme, daß Licht eine Wellenbewegung sei, als

möglich hinstellen. Die nächste Frage lautet dann sofort: In welchem Medium erfolgt diese Bewegung? Da müssen wir zugeben, daß wir kein Medium kennen, in dem diese Wellen sich bewegen können. Die Luft kann es nicht sein, denn das Sonnenlicht durchquert den Raum zwischen Sonne und Erde, in dem sich gar keine Luft befindet. Aber mit der Tatsache, daß wir so ein Medium vorläufig nicht kennen, ist seine Anwesenheit noch nicht ausgeschlossen, und nichts hindert uns, sie als möglich anzunehmen. Wir wollen dies aus Zweckmäßigkeitsgründen zunächst tun.

Dann kann man die Frage erheben, werden diese Wellen immer von demselben Medium getragen? Trägt die Luft sie, wenn sie durch Luft, das Glas, wenn sie durch Glas gehen, und trägt sie irgend etwas auf Erden Unbekanntes, wenn sie den anscheinend leeren Raum durchqueren? Die Antwort lautet: wir bekommen eine gute Beschreibung der Vorgänge in allen diesen Fällen durch die Annahme, das Medium, das die Lichtwellen trage, erfülle den ganzen Raum, auch wenn sonst noch Glas, Luft oder sonst etwas vorhanden ist, also die ganze materiefreie und Materie enthaltende Welt. Wir stellen uns vor, alle Körper, die wir sehen oder fühlen können, sind in einem ungeheuren Meere versenkt. Dieses Meer nennen wir den Äther. Wenn Licht durch einen Raumteil kommt, der Materie enthält, dann werden die Wellen vom Äther getragen, aber die betreffende Substanz übt daneben auch ihren Einfluß aus. Sie kann die Bewegung der Wellen verlangsamten oder ganz verhindern, wir werden das gleich noch genauer sehen.

Existiert dieses seltsame Medium nun wirklich?, ist dann unsere nächste Frage; wenn wir etwas mehr über die Antwort nachdenken, dann kommen uns Zweifel über den rechten Sinn derselben, und ob es überhaupt eine vernünftige Frage ist. Wir kommen in eine schwierige Lage, wenn wir uns einmal klarmachen wollen, was eigentlich mit „wirklich existieren“ gemeint ist. Gott sei Dank haben wir das nicht nötig und sollten es auch nicht tun, denn sonst kommen wir von unserem Ziel ab, nämlich davon, unsere Beobachtungen über das Licht zusammenzustellen und zu sehen, wie sie zusammenhängen. Dabei finden wir eben, daß viele Erscheinungen uns an Wellen erinnern, die sich in irgendeinem Medium ausbreiten, und wir machen uns diese nützliche Betrachtungsweise zu eigen. Vielleicht können nicht alle Erscheinungen des Lichtes so dargestellt werden, ja, wir wissen, daß einige nicht in das Bild passen, aber das stört uns vorläufig nicht. Wenn

es sich herausstellt, daß unsere ersten Vorstellungen unzureichend sind, können wir sie abändern oder ganz verlassen, aber bis dahin sind sie uns außerordentlich nützlich.

Die seitliche Ausbreitung eines Lichtstrahls

Man könnte hier folgenden Einwand machen: Wenn der Lichtstrahl, der durch ein Zimmer geht, aus einem langen Zug von Wellen besteht, die den Äther durchziehen, dann sollte der Strahl an den Seiten allmählich schwächer werden. Seine Ränder könnten nicht so scharf sein, wie sie uns erscheinen. Der Einwand ist ganz berechtigt. Es gibt in der Tat eine derartige Ausbreitung nach den Seiten, aber sie ist so gering, daß man sie in diesem Falle nicht beobachten kann. Das ist nicht immer so; manchmal ist diese Ausbreitung sehr wichtig; sie verursacht einige der merkwürdigsten und sogar der großartigsten Naturerscheinungen. Die Bedeutung dieses seitlichen Ausbreitens hängt nämlich von dem Verhältnis der Wellenlänge zur Breite des Strahles ab. Die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes beträgt etwa ein zehntausendstel Zentimeter, sie ist daher sehr klein im Verhältnis zur Breite unseres Strahles. Wenn dieser nur einen kleinen Bruchteil eines Zentimeters breit wäre, würde sich der Hang der Wellen, sich seitlich auszubreiten, sehr stark bemerkbar machen. Wir werden das später noch beobachten. Nehmen wir einmal an, ein Sturm errege Wellen an einer bestimmten Stelle im Ozean und treibe diese bei einer Sturmbahn von über 100 km Breite vorwärts, dann wird die seitliche Ausbreitung der Wellen daneben verhältnismäßig unbedeutend. Wir können dasselbe in viel kleinerem Maßstabe auf der ruhigen Wasseroberfläche eines Teiches sehen, wenn ein Windstoß einen Zug von kleinen Wellen vorwärts treibt, während das Wasser zu beiden Seiten ganz ruhig bleibt. In allen diesen Fällen ist das Verhältnis der Wellenlänge zur Breite des Strahles noch viel größer als beim Lichtstrahl.

Wie entstehen Bilder?

Wir kommen jetzt zu einem weiteren Punkt, den wir uns wieder an dem Behälter mit den Wellen klarmachen können. Wenn man einen Finger in das Wasser taucht, dann breiten sich kreisförmige Wellen aus; mit dieser Erscheinung sind wir alle vertraut. Sie kommen zur Wand des Behälters, werden dort

zurückgeworfen und behalten, wie wir sehen, ihre Kreisform; aber der Mittelpunkt der neuen Schar von Kreisen liegt außerhalb des Behälters. Wenn wir uns von ihm eine gerade Linie gezogen denken zu der Stelle, an der der Finger das Wasser berührte, dann schneidet diese Linie die Wand der Schale in einem rechten Winkel (Abb. 11).

Ebenso ist es mit Lichtstrahlen. Wenn sich etwa das Licht einer Kerze kugelförmig ausbreitet und auf die ebene polierte Fläche eines Spiegels trifft, dann sieht es nach der Reflexion so

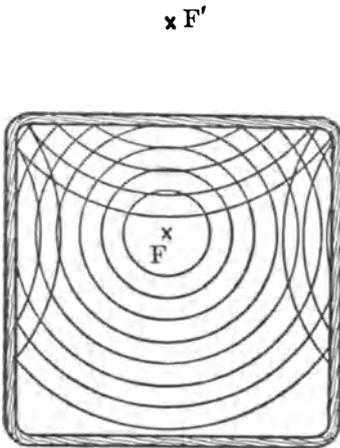


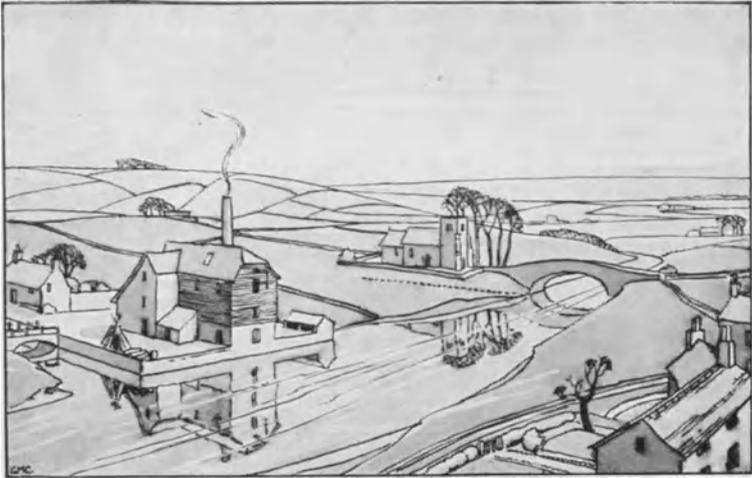
Abb. 11. Reflexion von kreisförmigen Wellen an der Wand des Behälters. Die Wellen gehen ursprünglich von F aus und scheinen nach der Reflexion von F' auszugehen.

aus, als ob die Wellen, die von jedem Punkt der Kerze ausgehen, von einem entsprechenden Punkt hinter dem Spiegel herkämen. Wenn einige dieser Wellen unser Auge treffen, dann stellen wir uns vor, daß sie wirklich von diesem Punkte herkommen. Da das Licht so aussieht wie Kerzenlicht, und weil jeder Punkt der Kerze in der gleichen Weise dargestellt wird, können wir uns denken, eine Kerze stände dort, und sagen deshalb: „Im Spiegel ist ein Bild der Kerze, und zwar ebenso weit hinter dem Spiegel, wie die wirkliche Kerze vor dem Spiegel steht“.

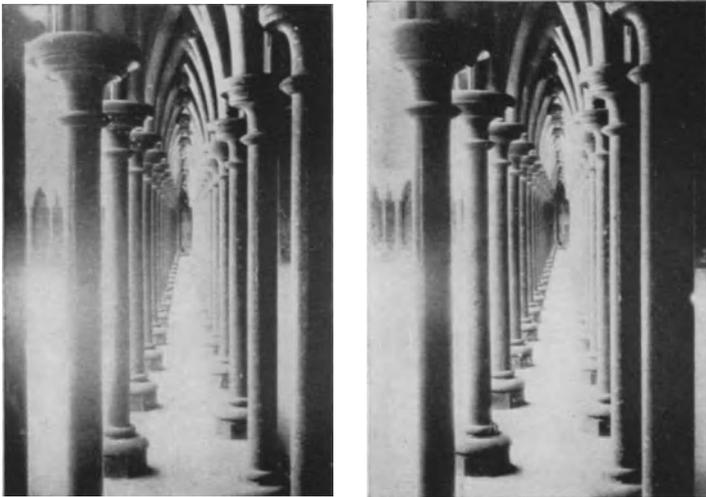
Es ist gleichgültig, wo wir stehen, wenn uns diese reflektierten Wellen treffen, sie scheinen

immer von einem und demselben Punkt herzukommen, weil sie kugelförmig sind — in dem Behälter mit den Wellen findet die Bewegung in einer Ebene statt und die Wellen sind Kreise. Diese Wellen breiten sich so aus, als ob das Spiegelbild ihr Mittelpunkt wäre. Wenn wir unser Auge daher vor einem ebenen Spiegel bewegen oder die Bilder auf einer ruhigen Wasseroberfläche ansehen, dann scheinen die gespiegelten Dinge stillzustehen, wenn wir uns hin und her bewegen. Jeder Punkt des Bildes liegt ebenso weit hinter der reflektierenden Fläche oder ihrer Fortsetzung wie der entsprechende Punkt des Originals davor. Einige Bilder sollen dies noch weiter verdeutlichen (Tafel IIa und III).

Tafel II

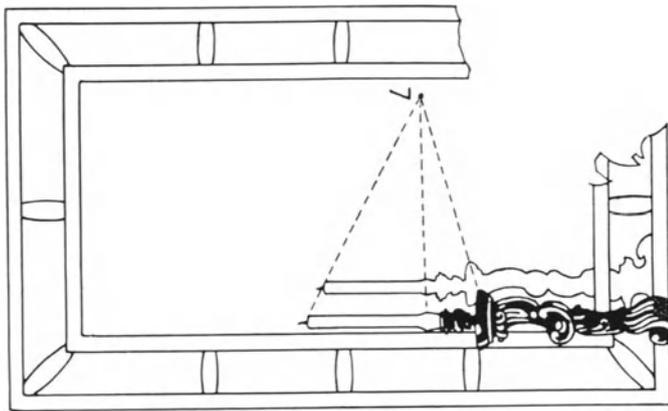
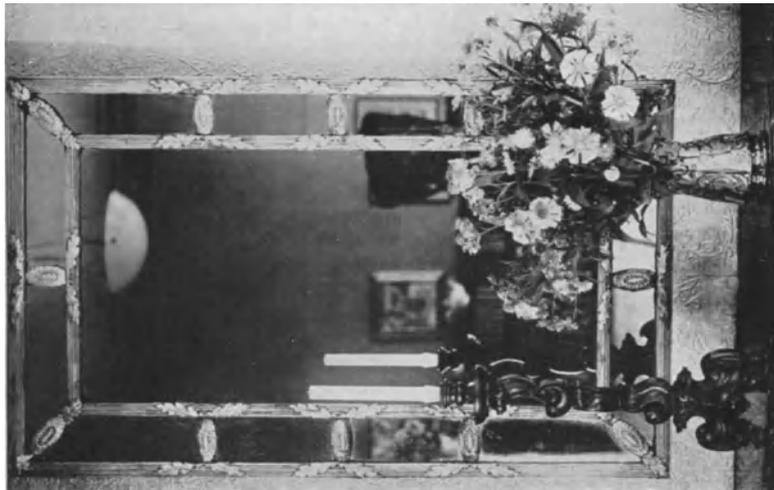


A. Wenn man durch eine senkrechte Linie irgendeinen Punkt in diesem Bilde mit seinem Spiegelbild im Wasser verbindet, so wird diese Linie durch die Ebene des Wasserspiegels halbiert. Der Wasserspiegel in diesem Bilde soll möglichst leicht zu konstruieren sein. Unter der Straße hinter der Kirche findet man ihn z. B. durch Verlängerung der Verbindungslinie der beiden Punkte, an denen der Brückenbogen auf der Seite des Beschauers auf beiden Seiten des Flusses das Wasser berührt. (S.16.)



B. Stereoskopisches Bild eines Kreuzganges in St. Michel. Beide Bilder sind unter etwas verschiedenem Gesichtswinkel aufgenommen. (S. 22.)

Tafel III



Spiegelung an einem ebenen Spiegel. Das Bild der Kamera ist anscharf rechts dicht über den Blumen zu sehen. Die gerade Linie, die die Linse des Apparates mit ihrem Spiegelbild verbindet, z. B. für diejenige, die die Kerzenspitze mit ihrem Spiegelbild verbindet, in einem Punkt, dem sogenannten „Fluchtpunkt“; dies wird durch die Zeichnung verdeutlicht. (S. 16.)

steht senkrecht zum Spiegel. Dasselbe gilt für jede andere solche Linie, z. B. für diejenige, die die Kerzenspitze mit ihrem Spiegelbild verbindet. Alle diese Linien schneiden sich nach den Gesetzen der Perspektive in einem Punkt, dem sogenannten „Fluchtpunkt“; dies wird durch die Zeichnung verdeutlicht. (S. 16.)

Reflexion an gekrümmten Flächen

Reflexionen an gewölbten Spiegeln sind bekanntlich nicht ganz so einfach. Wenn wir in einen der konvexen Spiegel sehen, die oft als Wandschmuck benutzt werden, dann sehen wir die Gegenstände des Zimmers in verkleinertem Maßstabe. Sie sind auch etwas verzerrt; wenn wir den Kopf bewegen, dann bewegen sie sich ein wenig mit. Der Behälter mit den Wellen soll uns dies wieder deutlich machen.

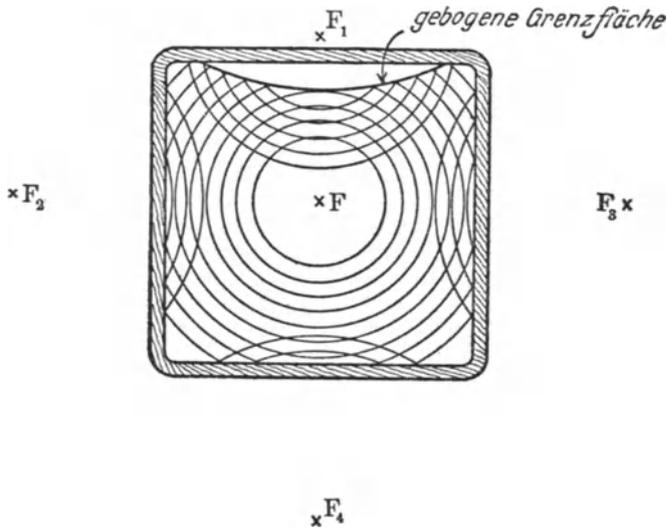


Abb. 12. Reflexion von Wellen an einer konvexen Fläche. Der Mittelpunkt der reflektierten Wellen F_1 ist der Fläche jetzt viel näher als der ursprüngliche Ausgangspunkt F . Die reflektierten Wellen sind nicht genau kreisförmig, aber die Abweichung wird nur bei großen Bogenstücken merklich.

Wir setzen eine gekrümmte Scheidewand, die nach der Stelle des Eintauchens hin konvex ist, in die Schale, um die Wellen zurückzuwerfen. Wenn wir jetzt, wie vorher, kreisförmige Wellen entstehen lassen, dann sehen wir, daß die reflektierten Kreise stärker gekrümmt sind als die ursprünglichen. Sie scheinen noch von einem Punkt hinter der Scheidewand herzukommen, aber dieser liegt nicht mehr ebenso weit hinter ihr, wie der Ausgangspunkt der Wellen vor ihr ist (Abb. 12). Dasselbe muß beim Licht der Fall sein, wir sehen das an Abb. 13. Wir können in diesem Falle erkennen, warum das (imaginäre) Bild soviel kleiner erscheint als das (reale)

Objekt, weil nämlich die verschiedenen Stellen des Bildes, die bestimmten Punkten des Originals entsprechen, alle viel mehr zu-

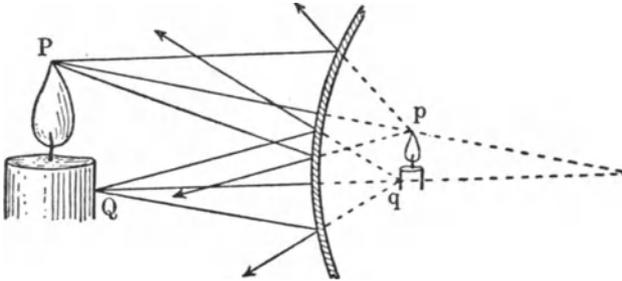


Abb. 13. Spiegelung an einem konvexen Spiegel. Die Strahlen von P und Q scheinen nach der Reflexion von p und q herzukommen. Wenn einige der reflektierten Strahlen unser Auge treffen, dann scheint es so, als ob sich in q eine verkleinerte Kerze befände.

sammengedrängt sind. Wir können ein ganzes Zimmer als Miniature in einem Konvexspiegel an der Wand abgebildet sehen (Tafel IV a).

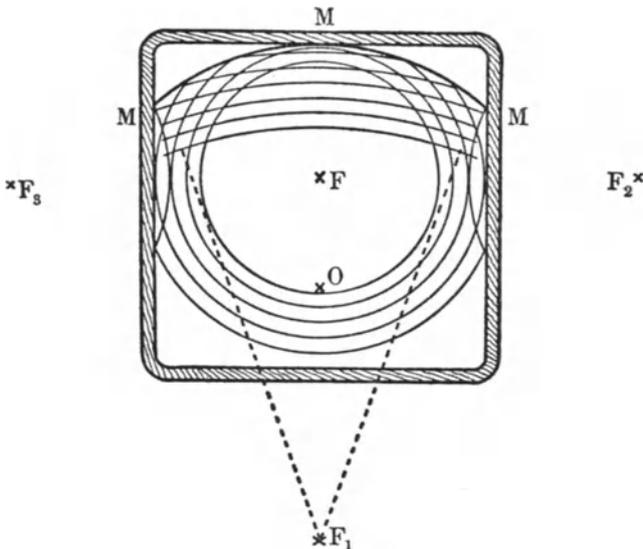


Abb. 14. Reflexion von Wellen an einer konkaven Fläche.

Wenn die reflektierende Fläche konkav zur Eintauchstelle ist, dann erfolgt natürlich das Gegenteil (Abb. 14). Die Wellen, die sich kreisförmig ausbreiten, werden wie vorher ungefähr als Kreise zurückgeworfen, aber, wenn die Krümmung stark genug ist,

scheinen sie nicht mehr von einem Punkt hinter der Wand herzukommen, sondern umgekehrt auf einen Punkt vor ihr zu konvergieren. Ist die Stelle des Eintauchens im Mittelpunkt des kreisförmigen Reflektors, dann kommen die Wellen nach der Reflexion zu diesem Punkt zurück, durchlaufen ihn und gehen dann wieder auseinander. Ist der Punkt des Eintauchens näher an der Fläche als ihr Mittelpunkt, dann ist der Treffpunkt der Wellen, das Bild, weiter fort, und umgekehrt. Wenn wir dementsprechend eine punktförmige Lichtquelle in die Mitte eines Konkavspiegels bringen, d. h. in den Mittelpunkt der Kugelfläche, von der der Spiegel

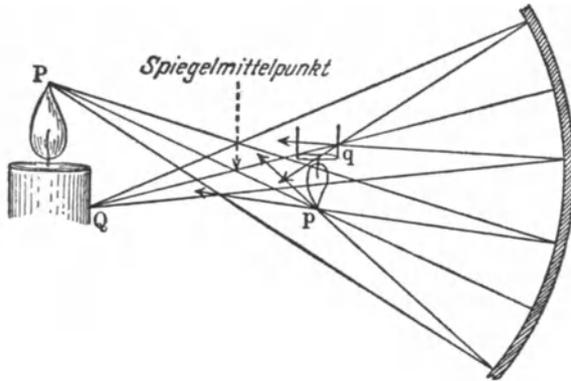


Abb. 15. Spiegelung an einem konkaven Spiegel. Mittelpunkt des Spiegels.

einen Teil bildet, dann entsteht das Bild des Punktes an derselben Stelle; bewegen wir den Lichtpunkt nach innen, geht das Bild nach außen, und umgekehrt (Abb. 15); und wenn wir den Punkt nach oben verschieben, geht das Bild nach unten, und wieder umgekehrt. Wenn wir eine Kerze vor den Spiegel stellen, dann kommt aus demselben Grunde das Bild der Spitze nach unten und das des unteren Endes nach oben, so daß die Kerze auf dem Kopf zu stehen scheint; auch rechts und links sind vertauscht.

Wenn die Eintauchstelle in der Schale in der Mitte zwischen der krummen Fläche und ihrem Krümmungsmittelpunkt liegt, dann haben die Wellen nach der Reflexion fast die ganze Krümmung verloren und bewegen sich in geraden, ungefähr parallelen Linien vorwärts. Sie werden ihre Form und Stärke lange Zeit behalten. Wenn Wellen divergieren, als gingen sie von einem Punkt hinter der Wand aus, dann werden sie durch diese Ausbreitung schwächer, und wenn sie konvergieren, kommen sie schließlich zu einem

Punkt, von dem aus sie wieder divergieren und auch schwächer werden; wenn man daher einen Lichtstrahl möglichst weit gehen lassen will, dann dürfen die Wellen am Anfang weder konvergieren noch divergieren. Bei einem kugelförmigen Spiegel ist das ungefähr dann der Fall, wenn die Lichtquelle in der Mitte zwischen der Fläche und ihrem Mittelpunkt steht. Aber die Kugelform ist nur für sehr kleine Spiegel günstig, weil es nicht möglich ist, die reflektierten Wellen vollkommen gerade zu richten. Man nimmt daher hierfür einen parabelförmigen Reflektor, bei dem die Lichtquelle im Brennpunkt der Parabel stehen muß.

Das Sehen

Wir wollen jetzt den Vorgang des „Sehens“ etwas genauer betrachten. Wie nehmen eigentlich unsere Augen alle Einzelheiten eines Gegenstandes wahr und beurteilen sein Aussehen und seine Lage? Eins ist die Hauptsache: wenn Lichtwellen irgendwo auf Materie fallen, werden sie gestreut, und wenn die gestreuten Strahlen unser Auge treffen, können wir die Richtung angeben, aus der sie zuletzt kamen. Das ist ein Teil der Beobachtungen, die uns das Sehen ermöglichen. Wir können auch bis zu einem gewissen Grade die Entfernung nach der Anstrengung beurteilen, die wir machen müssen, um einen Gegenstand deutlich zu sehen. Wir müssen unsere Augen anspannen, wenn wir etwas ganz in der Nähe erblicken wollen, und unsere Augenmuskeln entspannen, wenn wir Dinge sehen wollen, die sehr weit entfernt sind. Wir werden später hören, warum das so ist. Dies ist aber nicht die einzige Möglichkeit, Entfernungen zu schätzen; ich glaube sogar, im allgemeinen ist es eine recht unwirksame Methode, und es gibt mindestens noch zwei andere Mittel, die wir dauernd benutzen. Nämlich erstens schätzen wir die Lage eines Gegenstandes im Verhältnis zu anderen Dingen. Wir blicken auf ein kleines Objekt, sagen wir, auf eine Taschenuhr, die ein paar Meter entfernt auf einem Tische liegt. Dann können wir ihre Lage ziemlich genau angeben und etwa ihren Abstand von unseren Augen und ihre Höhe über dem Fußboden bestimmen. Wie machen wir das? Zunächst haben wir, fast unbewußt, Uhr und Umgebung untersucht und danach unsere Berechnung gemacht. Zuerst lassen wir unseren Blick über den Gegenstand schweifen. Das Auge kann bewegt werden, so daß die Wellen, die von jedem einzelnen Punkt gestreut werden, nacheinander auf die

empfindlichste Stelle der Netzhaut treffen und sich dort einprägen. So bekommen wir von den einzelnen Punkten des Objekts verschiedene Eindrücke, die von den Nerven in das Gehirn telegraphiert werden. Hier werden sie gesammelt und geprüft, und auf Grund langer Erfahrung können wir sie als Streuung von Licht deuten, verursacht durch eine Taschenuhr. Wahrscheinlich sehen wir gar nicht genau auf jeden einzelnen Punkt. Vielleicht sind wir sogar dafür zu weit entfernt, aber wir wissen, wie eine Uhr gewöhnlich aussieht, vielleicht haben wir sogar gesehen, wo sie herkam, und beobachtet, wie sie auf den Tisch gelegt wurde. Verschiedene Beobachtungen solcher Art werden zusammengestellt; alles das geht ohne bewußtes Denken vor sich. Wenn wir so weit sind, dann geht unser unbewußtes Überlegen etwa derart weiter: soundso viele Meter trennen uns von dem Tisch, er ist von normaler Höhe, und die Uhr liegt in der Mitte. Auf Grund solcher Beobachtungen und Überlegungen schätzen wir dann die Lage der Uhr. Natürlich hilft uns hierbei eine jahrelange Erfahrung.

Es ist leicht, sich davon zu überzeugen, wie wichtig dieses Beobachten und unbewußte Schätzen ist. Wenn wir alle Möglichkeiten hierfür ausschalten, fällt es uns viel schwerer zu sagen, wo ein Gegenstand sich befindet. Wir wollen eine schwarze Kugel an einem Faden aufhängen, der nahe bei der Kugel sichtbar ist, dann aber verschwindet, so daß wir den Aufhängepunkt nicht sehen können. Wir wissen nicht, wie groß die Kugel ist, und verlieren damit den Vorteil, den wir sonst durch irgendwelche allgemeinen Kenntnisse über Größe und Art des Gegenstandes haben. Außerdem wollen wir ein Auge zuhalten, denn das Zusammenwirken der beiden Augen, das wir noch nicht besprochen haben, macht ebenfalls sehr viel aus. Wenn wir dann auf die Kugel sehen, merken wir, daß es gar nicht so einfach ist, ihren Abstand anzugeben. Wir werden wahrscheinlich anfangen, den Kopf hin und her zu bewegen, um einen Anhalt dafür zu bekommen, wie weit sie von Wand oder Decke entfernt ist, die den Hintergrund bilden, und wenn wir Einzelheiten im Hintergrund erkennen können und dessen Entfernung kennen, dann werden wir ungefähr herausbekommen, wo die Kugel ist. Aber das gilt nicht, denn wir haben ja dann auch wieder die Methode des Beobachtens und unbewußten Berechnens angewandt.

Der gleichen Schwierigkeit, Entfernungen zu schätzen, begegnet man oft, wenn man nur ein Auge benutzt und sonst keinerlei

Anhaltspunkte hat. Wenn man z. B. unter einem dicht belaubten Baum liegt und mit einem Auge durch das Gewirr der Zweige so nach oben blickt, daß man die Gabelpunkte der Äste nicht sehen und daher keinerlei Anhaltspunkt aus ihrer Lage bekommen kann, dann ist es sehr schwer zu sagen, wie weit eine Schicht von Blättern von einer anderen entfernt ist.

Sehen mit zwei Augen

Endlich kommen wir zum Zusammenwirken der beiden Augen. Das gibt nun eine sehr wirksame Methode zum Schätzen von Entfernungen, die auf einem ganz anderen Prinzip beruht als alles, was wir bisher besprochen haben. Die beiden Augen sehen nämlich nicht genau dasselbe Bild, und unser Gehirn hat durch lange Übung gelernt, aus den Unterschieden die Abstände von Dingen zueinander zu beurteilen. Die Augen sind nahe beieinander, und die Unterschiede zwischen den beiden Bildern sind nur klein, um so erstaunlicher ist es, daß die Wirkung so groß sein sollte. Wenn man ein Paar Stereophotographien vergleicht, wie sie Tafel IIB zeigt, finden wir diese kleinen Unterschiede überall. Das Bild zeigt einen Kreuzgang in der Kirche auf Mont St. Michel. Man beachte das Verhältnis der Pfeiler im Hintergrund zu denen im Vordergrund. Im linken Bilde stehen die hinteren Pfeiler weiter links von den vorderen als im rechten Bilde. Die beiden Bilder sind von verschiedenen Punkten aus aufgenommen worden, genau wie man sie mit beiden Augen sehen würde. Die Stereokamera ist ein optischer Apparat, bei dem jedes Auge ein besonderes Bild zu sehen bekommt, wodurch der räumliche Eindruck entsteht. Der Erfolg zeigt deutlich, wie wirksam das Zusammenwirken beider Augen ist, um Entfernungen zu schätzen und die Lage von Dingen zueinander zu erkennen. Diese Gabe besitzt nur eine sehr beschränkte Zahl von Lebewesen, außer dem Menschen sind es vielleicht noch einige Wirbeltiere. Die meisten Tiere kennen kein zweiäugiges Sehen, wie man deutlich an der Lage ihrer Augen erkennt.

Lochbilder

Wir haben die wichtigsten Gesetze kennengelernt, nach denen die Streuung und Reflexion von Licht erfolgt, wenn Lichtwellen auf eine Oberfläche treffen, und wir wollen hiervon jetzt noch eine oder zwei Anwendungen betrachten.

Wenn der Sonnenschein durch das Laubwerk eines Baumes dringt und kleine helle Lichtflecke auf den Boden wirft, dann sind dieselben nie eckig, sondern immer gerundet, sie bilden sozusagen „bunte Kringle“. Die Öffnungen, durch die die Strahlen kommen, werden von den Kanten der Blätter begrenzt und haben an sich scharfe Ränder. Also kann die Form der Flecken nicht von den Rändern bestimmt sein. In Wirklichkeit haben sie ihre Form von der Sonne, und wir werden gleich sehen, warum das so sein muß.

Der obere Kreis in Abb. 16 soll die Sonne darstellen und *A* eine kleine Öffnung in irgendeinem Schirm, z. B. im Laubwerk eines Baumes, sein. Von einem Punkt *S* des Randes der Sonnenscheibe kommen Strahlen durch *A* und treffen den Boden in *s*; von hier werden sie gestreut, und einige fallen in unser Auge. Weil sie so beschaffen sind wie die Strahlen, die von der Sonne kommen, haben wir den Eindruck, in *s* sei etwas, das Strahlen aussendet, wie die Sonne es tut. Strahlen vom Punkt *Q* erzeugen ein Bild in *q*, und das gleiche gilt für jeden anderen Punkt der Sonnenscheibe. So entsteht ein Bild der ganzen Sonne auf dem Boden. Je kleiner die Öffnung bei *A* ist, um so deutlicher wird

das Bild. Um das zu verstehen, müssen wir uns klarmachen, daß die Strahlen von einem einzelnen Punkt, etwa von *S*, auf dem Boden einen kleinen Lichtfleck von derselben Form und Größe wie die Öffnung erzeugen, und der ganze Fleck besteht nun aus der Summe

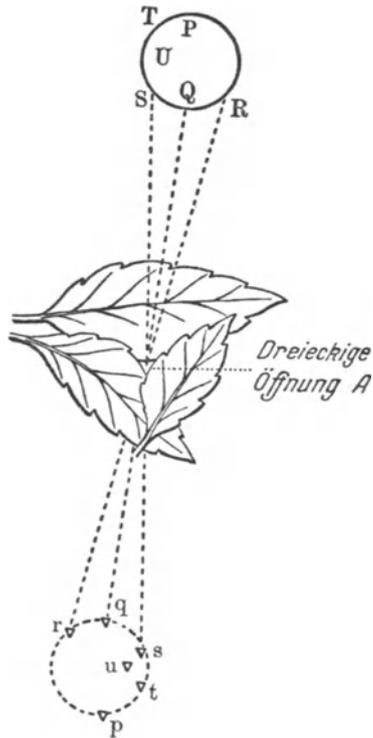


Abb. 16. Der obere Kreis stellt die Sonne dar und der untere ihr Bild auf dem Erdboden, das dadurch entsteht, daß Sonnenlicht durch die dreieckige Öffnung zwischen den Blättern fällt. Jeder helle Punkt auf der Sonne verursacht einen besonderen dreieckigen Lichtfleck auf dem Boden. Die Summe all dieser Fleckchen bildet den Kreis auf dem Boden mit seinem Halbschatten.

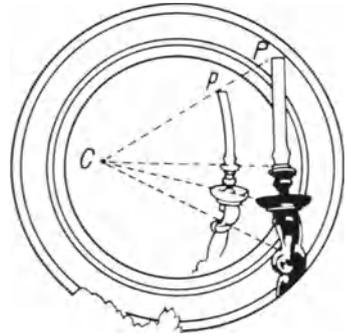
aller dieser Fleckchen, die von jedem einzelnen Punkt der Sonnenoberfläche hervorgerufen werden. In der Abbildung soll die Öffnung die Form von A haben, dann besteht der große Fleck auf dem Boden aus lauter kleinen Dreiecken A . Man kann sie nicht alle zeichnen, aber einige befinden sich auf dem Bilde, um die Erklärung zu verdeutlichen. Wenn die Öffnung sehr klein im Verhältnis zum ganzen Fleck ist, dann macht der Umstand nicht viel aus, daß jedem Punkt der Sonne nicht ein Punkt, sondern ein Fleck von der Größe der Öffnung entspricht. Eine kleine Öffnung läßt nicht viel Licht durch, aber das Bild, das durch sie entsteht, ist, wie wir eben erklärt haben, rund wie die Sonne. Durch eine große Öffnung geht mehr Licht, aber je größer sie wird, um so mehr verliert der Fleck auf dem Boden die runde Form der Sonne und nimmt die der Öffnung an. Auch das können wir der Zeichnung von Abb. 16 entnehmen. Daß nur die weniger hellen Flecken rund aussehen, zeigt die Photographie auf Tafel VA, die in einem sonnigen Garten gemacht wurde. Während einer Sonnenfinsternis werden die Flecken sichelförmig.

Diese Bilder haben keine scharfen Ränder, denn das Licht von den einzelnen Bildern der Öffnung, die sich gegenseitig überlagern, häuft sich in der Mitte mehr an als am Rande. So entsteht ein Halbdunkel oder Halbschatten zwischen dem vollen Schatten und den hellen Stellen des Bildes.

Der Lochbildereffekt ist leicht zu zeigen. Vor einen Lichtbogen halten wir ein Stück geschwärztes Glas in einer Entfernung von einigen Zentimetern. Wenn wir mit einer Nadel ein kleines Loch in die schwarze Schicht machen, gibt es an der Wand, wenige Meter entfernt, einen Lichtfleck, in dem wir ein Bild des brennenden Lichtbogens erkennen. Wenn man viele kleine Löcher verschiedener Form und Größe macht, dann entsteht immer dasselbe Bild an der Wand, nur wenn das Loch ganz groß wird, finden wir, daß seine Form Einfluß auf das entstehende Bild hat.

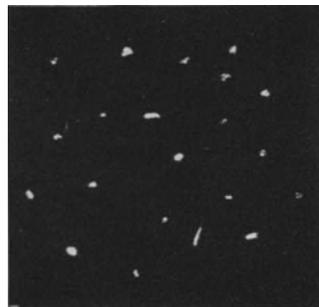
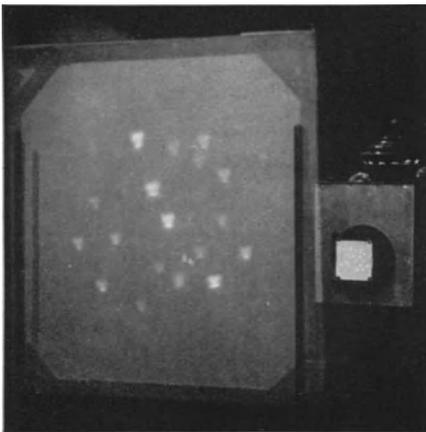
Tafel IVB zeigt ein Bild dieses Versuches. Die Bogenlampe steht hinten rechts, und das kleine helle Viereck ist das geschwärzte Glas, durch das der Lichtstrahl hindurchgeht. Trotz der Rußschicht sieht das Glas weiß aus, weil es so stark beleuchtet wird. Die Löcher in der Schicht sind zu klein, um gut auf dem Bilde erkennbar zu sein. Tafel IVC zeigt deshalb eine Vergrößerung der Glasplatte. Wir sehen den Wandschirm, auf dem die Bilder entstehen, von hinten. Die Lage der Bilder entspricht der der Löcher

Tafel IV



A. Spiegelung an einem konvexen Spiegel. Die Bilder der Gegenstände in dem Zimmer, in dem die Photographie gemacht wurde, sind aufrecht, verkleinert und verzerrt. Das Bild des photographischen Apparates befindet sich links. — Der Spiegel ist ein Teil einer Kugeloberfläche mit dem Mittelpunkt C . Eine gerade Linie, die den Mittelpunkt

verbindet, muß durch C gehen, denn ein Strahl, der von der Linse auf C fällt, muß nach der Reflexion denselben Weg zurückkommen. C liegt also hinter dem Spiegelbild des Mittelpunktes der Kameralinse. In der Zeichnung, die einige wesentliche Teile der Photographie wiedergibt, ist der Punkt C eingetragen. Die geraden Linien, die jeden Punkt der Zeichnung mit seinem Spiegelbild verbinden, z. B. P mit p , müssen durch C gehen, wie die gestrichelten Linien zeigen, denn die Verbindungslinie jedes Punktes mit seinem Spiegelbild muß durch den Mittelpunkt der Linse gehen. (S. 18.)



C.

B. Photographie eines Versuches, der das Prinzip der Lochblendenkamera zeigt. Die Erklärung findet sich im Text. (S. 24.)

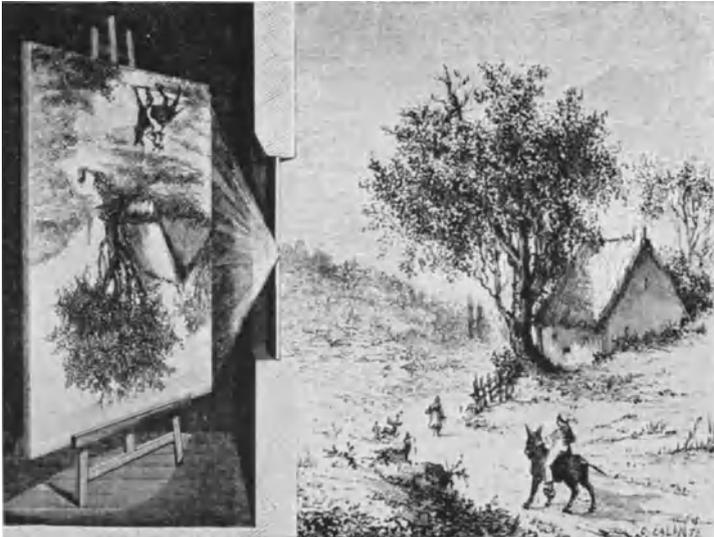
Tafel V



A. Die Photographie, die in einem sonnigen Garten aufgenommen wurde, zeigt den Schatten von Sträuchern auf einer Mauer. Die Hand und ihr Schatten zeigen die Stellung von Apparat und Sonne. Die vielen kleinen hellen Flecke sind „Lochblendenbilder“ der Sonne. (S. 24.)



B. Dieses Bild stammt aus dem Buche von Guillemin, *Forces of Nature* (Die Naturkräfte). Die scharfen Umrisse eines aus Pappe geschnittenen Gesichts werden im Schattenbild durch die Wirkung des Halbschattens gemildert. (S. 25.)



C. Nach einer Zeichnung aus Guillemins *„Forces of Nature“*, die die Wirkung der Lochblendenkamera zeigt. (S. 25.)

auf der Platte, und jedes Bild ist doppelt, weil es die hellen Enden der zwei Kohlenstäbe zeigt; obgleich die Form der Löcher stark verschieden ist, sind alle Bilder gleich.

Nach demselben Prinzip arbeitet die Lochblendenkamera; sie gibt scharfe Bilder, aber man muß sehr lange belichten. Tafel VC zeigt eine kuriose Abbildung des Lochblendeneffektes.

Wenn man einen Gegenstand nahe am Wandschirm und weit von der Lichtquelle entfernt in das Bogenlicht hält, dann gibt es fast keinen Halbschatten, der Umriß des Schattens ist scharf.

Wir wollen ein Stück Pappe nehmen, das so ausgeschnitten ist, daß in rohem Umriß ein menschliches Gesicht erscheint. Im Bogenlicht sieht dies Gesicht hart und knochig aus; wenn wir aber die Bogenlampe durch eine Kerze ersetzen, dann mildert das Halbdunkel die scharfen Konturen, und der weichere Umriß verleiht dem Bild ein natürlicheres Aussehen (Tafel VB).

Schimmer

Ein weiteres interessantes Beispiel für die Wirkung der Reflexion ist der Schimmer, den verschiedene Webstoffe von Natur aus haben, oder den man auf ihnen erzeugen kann. Es ist schwer, genau zu sagen, was wir mit Schimmer eigentlich meinen, aber es



Abb. 17. Ein Webverfahren, das dem Stoff einen besonderen Schimmer verleiht. Viele Fäden liegen einander parallel, und die Oberfläche wird dadurch gewellt.

scheint wesentlich dafür zu sein, daß Licht dahin reflektiert wird, wo man es eigentlich nicht erwartet. Ein schimmernder Gegenstand ist nicht einfach einer, der gut reflektiert, sonst würde nichts so stark schimmern wie ein versilberter Spiegel, und wir sind uns wohl darüber einig, daß der zwar glänzt, aber nicht schimmert. Wir können unsere Vorstellung von dem, was Schimmern ist, durch einen einfachen Versuch prüfen. Dazu lassen wir Licht auf ein Stück Satin schräg auffallen; am besten eignet sich hierzu gefärbter Satin. Die Lichtquelle befindet sich hinter uns, und wenn wir an Stelle des Stoffes einen Spiegel legen würden, dann würde er gar kein Licht in unser Auge werfen. Aber wenn der Satin in seiner

eigenen Ebene gedreht wird, dann sieht jeder ihn für einen Augenblick aufleuchten, und zwar zweimal während einer vollständigen Umdrehung. Um dies deutlich zu zeigen, müssen alle anderen Lampen im Raume ausgelöscht werden. Woher kommt nun dieses Aufleuchten? (vgl. Tafel VIA).

Wenn wir uns den Stoff mit einer Lupe ansehen, erkennen wir, daß die Fäden des Gewebes alle parallel zueinander liegen. Der Satin ist so gewebt, daß auf der schimmernden Seite die Fäden über eine ganze Anzahl der darunterliegenden Fäden laufen, ehe

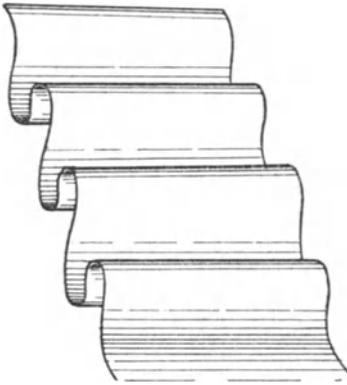


Abb. 18. Die Zeichnung zeigt, wie ein gewellter Stoff Licht in vielen Richtungen zurückwerfen kann.

sie untertauchen; die Abb. 17 soll das veranschaulichen. Es liegt daher eine große Zahl von Fäden auf dieser Seite eben und parallel. Wenn nun in unserem Versuch das reflektierte Licht aufblitzt, dann liegen alle diese Fäden senkrecht zu einer Geraden, nämlich der Halbierungslinie des Winkels, der von den Verbindungslinien des Stoffes mit der Lichtquelle und mit unseren Augen gebildet wird. Die Oberfläche ist in Wirklichkeit gefurcht und die Ränder der Furchen reflektieren das Licht (vgl. Abb. 18). Natürlich muß jeder

Faden eine gut reflektierende Oberfläche haben, aber die Wirkung entsteht außerdem dadurch, daß die Fäden parallel zueinander liegen. Auf der Unterseite des Gewebes ist keine solche bevorzugte Anordnung in einer Richtung vorhanden, sie schimmert daher viel weniger. Die regelmäßige Anordnung der Furchen ist sicher die Hauptsache bei dieser Erscheinung. Man kann den gleichen Effekt in einem frisch gepflügten Felde beobachten, wenn die Seiten der Furchen noch von der Berührung des Pfluges glänzen, oder auch, wenn Licht auf Wasserwellen scheint.

Die Furchung von Geweben wird deshalb manchmal durch Maschinen verstärkt. Man läßt den Stoff zwischen geheizten Walzen hindurchgehen, die feine parallele Rillen haben, wodurch der gewünschte Effekt erzielt wird. Nach dem Erfinder wird dieses Verfahren als „Schreinerisieren“ bezeichnet.

Der Zauberspiegel

Als letztes Beispiel möchte ich den japanischen sogenannten „Zauberspiegel“ anführen. Er zeigt ein sehr eigentümliches Verhalten. Vorn ist er fast völlig eben und scheint sich in nichts von einem gewöhnlichen Spiegel zu unterscheiden. Die Rückseite trägt ein tief eingepprägtes Muster, das von der Form herrührt, in der der Spiegel gegossen wurde (siehe Tafel VIB). Wenn man einen Lichtstrahl so auf den Spiegel fallen läßt, daß das Licht von seiner Vorderseite aus auf den Wandschirm fällt, dann erscheint im reflektierten Licht das Muster von der Rückseite. Es sieht so aus, als schein das Muster durch, aber das ist unmöglich, denn der Spiegel ist aus ziemlich dickem Metall. Dieser merkwürdige Effekt erschien denen, die ihn beobachteten, als Zauberei. Es gibt aber hierfür eine sehr einfache Erklärung, die Professor Ayrton im Hörsaal der Royal Institution vor 50 Jahren gegeben hat¹⁾. Sie beruht auf den Erscheinungen, die wir schon betrachtet haben, und ist eine Anwendung der Gesetze von der Reflexion an gekrümmten Flächen.

Professor Ayrton und sein Freund, Professor Perry, waren beide in hohen Stellungen im japanischen Erziehungswesen tätig. Spiegel, wie der Zauberspiegel, sind dort Gegenstände des täglichen Gebrauchs, die man im Ankleidezimmer jeder Dame antrifft. Ayrton und Perry fanden nun, daß merkwürdigerweise nur ein kleiner Teil aller Spiegel die „Zauber“eigenschaft besaß. Diese war an sich schon auffallend genug, und es war noch viel seltsamer, daß kein Mensch wußte, warum unter hundert Spiegeln immer nur einer oder zwei Zauberspiegel waren. Sie forschten nach und fanden, daß man sich in China oft mit dieser Frage beschäftigt und auch merkwürdige Erklärungen vorgeschlagen hatte, die sie aber alle nicht als richtig anerkennen konnten. Endlich kamen sie selbst zu einer befriedigenden Lösung, und zwar auf Grund einer zufälligen Beobachtung. Einer der Spiegel hatte eine tiefe Schramme auf der Rückseite, die von einem stumpfen Nagel herrührte; sie beobachteten, daß diese Schramme auch in dem Bilde erschien, das die Vorderseite warf. Dies brachten sie in Zusammenhang mit der Art, wie die Spiegel hergestellt werden. Wenn ein japanischer Handwerker einen solchen Spiegel mit dem Muster auf der Rückseite gegossen hat, dann legt er ihn auf ein Brett und fängt an, die Uneben-

¹⁾ Hier finden die Weihnachtsvorlesungen statt. Anmerkung des Übersetzers.

heiten der Oberfläche mit einer Art Hobel zu glätten. Abb. 19 zeigt ihn eifrig bei dieser Arbeit. Der Spiegel biegt sich bei jedem Aufdrücken etwas durch, und so macht der Handwerker einen Hobelstrich nach dem anderen, bis die ganze Fläche mit parallelen Strichen bedeckt ist, wobei die dünneren Teile des Spiegels sich durchbiegen und dem Werkzeug mehr nachgeben als die dickeren, die über dem erhabenen Teil des Musters liegen. Daher entgehen die dünneren Teile in einem gewissen Maße der Wirkung des Hobels, und wenn der Druck vorbei ist, erholen sie sich und ragen ein wenig über die Durchschnittshöhe der Fläche hervor. Wenn



Abb. 19. Japanischer Handwerker beim Polieren eines Spiegels der Art, die den „Zauber-effekt“ zeigt. Aus Silvanus Thompsons Buch „Light Visible and Invisible“ (Sichtbares und unsichtbares Licht). Teilansicht eines japanischen Stiches aus dem British Museum.

der Handwerker mit einer Schar von parallelen Hobelstrichen fertig ist, macht er eine zweite im rechten Winkel zur ersten, und dann noch mehrere Scharen in anderen Richtungen. Schließlich ist der Spiegel mit kleinen Erhebungen bedeckt, die das Muster der Rückseite wiederholen, er besteht daher aus einer Reihe von schwach konvexen Spiegeln. Wenn Lichtwellen von der Oberfläche reflektiert werden, dann werden sie nicht einfach zurück-

geworfen, sondern sie konvergieren und divergieren, und die Art der Störung steht in direktem Zusammenhang mit dem Muster auf der Rückseite. Es scheint merkwürdig, daß eine so geringe Abweichung von der Ebenheit der Oberfläche eine so starke Wirkung haben sollte, aber wir können das, was wir hier gesehen haben, mit unseren anderen Beobachtungen vergleichen. Bei dem Behälter mit den Wellen waren die Schatten am Wandschirm, die von der Ablenkung des Lichtes durch die kleinen Wellen verursacht wurden, deutlich genug; aber die Wellen selbst sind keineswegs leicht zu sehen, wenn wir sie auf der Oberfläche des Wassers suchen. Vielleicht haben wir auch einmal die Wellenbewegung an der Zimmerdecke beobachtet, wenn draußen Wasser von einer ganz leichten Brise bewegt wird und den Sonnenschein durch das Fenster oder die offene Tür ins Zimmer reflektiert.

Auge und Sehen

Warum es auf der Netzhaut kein Durcheinander gibt

Wie wir gesehen haben, kann man das Licht als eine Wellenbewegung auffassen, die von ihrem Ursprungspunkt aus sich verbreitet, gestreut und reflektiert wird, und wohl auch durch die verschiedenen Objekte, auf die sie trifft, verändert werden kann. Wenn das Licht von einem Auge aufgefangen wird, dann gibt es Kunde von der Quelle, von der es gekommen ist, von seinen Erlebnissen unterwegs, und besonders von dem letzten Zusammenstoß mit einem Körper, ehe es das Auge traf; hierdurch kann ja der Besitzer des Auges den betreffenden Gegenstand „sehen“.

Wenn ein wirres Durcheinander von Strahlungen das Auge trifft, die von vielen Lichtquellen her kommen und an vielen Gegenständen gestreut wurden, dann muß es erst sortiert werden, ehe man es verstehen kann. Hinten am Auge befindet sich eine lichtempfindliche Fläche, die Netzhaut. Wenn sich jeder der ankommenden Wellenzüge über die ganze Netzhaut verbreiten würde, dann wäre eine Entwirrung schwierig. Deshalb werden die Wellen von jedem einzelnen Punkt draußen mit Hilfe einer besonderen Anordnung in einem entsprechenden Punkt auf der Netzhaut gesammelt. Dadurch werden alle Einzelheiten des Gesichtsfeldes so auf der Netzhaut abgebildet, daß sie die gleiche Lage zueinander und alle ihre besonderen Eigenschaften behalten. Das Ganze wird dann auf einem komplizierten Wege von den Nerven in das Gehirn geleitet und hier gedeutet. Wir können sagen, es entsteht ein Bild auf der Netzhaut, aber wir dürfen diese Behauptung nicht zu wörtlich nehmen. Es ist für den Vorgang des Sehens nicht erforderlich, daß im Auge ein kleines, in Farbe und Einzelheiten getreues Bild entsteht, wie auf einem Hintergrund von weißem Papier oder auf der Mattscheibe eines photographischen Apparates. Manchmal stellt man sich allerdings vor, daß solch ein Bild wirklich entsteht und von einem Sinnesorgan so betrachtet wird, wie wir uns Bilder an der Wand ansehen.

Das Entwirren des Strahlengemisches erfolgt auf Grund der Tatsache, daß das Licht sich in verschiedenen Medien mit verschiedener Geschwindigkeit fortbewegt; in Glas hat es z. B. nur etwa zwei Drittel und in Wasser drei Viertel seiner Geschwindigkeit in Luft. Wenn nun eine Welle bei der Vorwärtsbewegung in ein Medium kommt, in dem sie sich langsamer bewegt als vorher, und wenn sie nicht senkrecht auf die Grenzfläche der beiden Medien auftrifft, dann ändert sich ihre Richtung, weil ein Ende von ihr früher aufgehalten wird als das andere. Ein weit verbreitetes Beispiel dieser Richtungsänderung kann man an der

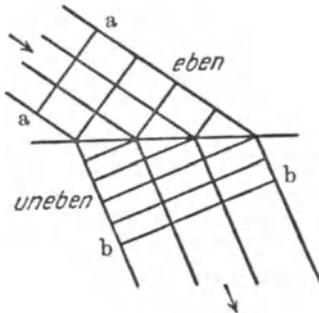


Abb. 20. $a a$ und die hierzu parallelen Linien entsprechen Reihen von Männern, die auf ebenem Boden marschieren. Sobald sie in unebenes Gelände kommen, ändern die Reihen ihre Richtung und werden parallel zu $b b$, außerdem nähern sie sich einander.

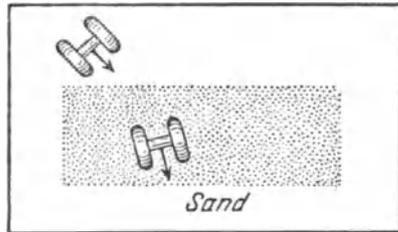


Abb. 21. Der punktierte Teil der Zeichnung soll Sand darstellen, der auf einen Tisch gestreut ist. Das Paar freibeweglicher Räder wird auf die sandige Stelle zu gerollt und ändert seine Richtung, sobald es sie erreicht.

Meeresküste sehen. Die ankommenden Wellen sind immer parallel zum Strande, unabhängig davon, welche Richtung sie auf dem offenen Meere hatten. Wenn sie in das flachere Wasser kommen, verlangsamt sich ihre Bewegung, und die Teile einer Welle, die am weitesten voran sind, werden aufgehalten, bis die neue Richtung hergestellt ist, die den Konturen der Küste folgt.

Ebenso können Soldaten auf dem Marsch ihre Richtung ändern, wenn sie schräg zu ihren Reihen auf ein Stück Boden kommen, auf dem das Gehen erschwert ist (Abb. 20).

Wir wollen dies an einem Versuch zeigen. Wir lassen ein Paar Räder, die sich frei auf einer gemeinsamen Achse drehen können, so über ein Brett rollen, daß sie schräg auf eine sandige Stelle kommen, auf der die Bewegung erschwert ist. Das Rad, das zuerst ankommt, wird dann zurückgehalten, und die Richtung der

Bewegung ändert sich so, daß sie mehr senkrecht zu der Grenzlinie verläuft, an der der Sand anfängt (Abb. 21).

Es ist jetzt nicht mehr schwer für uns zu verstehen, wie man es einrichten kann, daß ein ankommender Wellenzug auf einen Punkt konvergiert. Man muß nur dafür sorgen, daß die Mitte durch ein Medium kommt, in dem die Bewegung verlangsamt wird, während die beiden Flügel unbehindert bleiben. Wenn man dem Medium die richtige Form gibt, nehmen die Wellen die Form einer Sichel an, und da alle Teile einer Welle sich immer senkrecht zu dem Abschnitt der Wellenfront vor ihnen bewegen, so konvergieren sie allmählich auf einen Punkt und häufen ihre Energie dort an. Einen solchen Punkt nennt man Brennpunkt; die Wellen gehen durch ihn hindurch und verbreitern sich dann wieder in immer größer werdenden Kreisen.

Wir wollen diese Erscheinung wieder an unserem Behälter mit den Wasserwellen zeigen. Ein Stück Glas von der Form des Querschnitts durch eine Linse legen wir auf den Boden des Behälters. Das Wasser ist dort flacher, und die Wellen bewegen sich langsamer, wenn sie über das Glas hinweggehen. Wir erzeugen die Wellen mit einem Holzstab, der parallel zur Oberfläche des Wassers an einer Feder schwingt und immerzu aus- und eintaucht. Man sieht deutlich, wie die Wellen konvergieren, allerdings tun sie dies lange nicht so scharf in einem Punkt wie Lichtwellen (Abb. 22, vgl. auch Tafel VIIA).

Wenn man daher eine Glaslinse in den Weg von Lichtwellen bringt, die sich vorwärts bewegen, dann hemmen die dickeren Teile in der Mitte der Linse die Wellen mehr als die dünnen Teile weiter außen, und das Licht wird in einem Brennpunkt gesammelt, durch den es hindurchgeht, um sich dann wieder auszubreiten. Der einfache Versuch von Abb. 23 zeigt diese Tatsache, die übrigens wohl allbekannt ist.

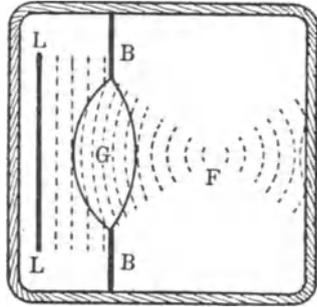


Abb. 22. Blick von oben auf den Wellenbehälter. Eine Glasscheibe *G* von der Form des Querschnitts einer Linse liegt auf dem Boden und vermindert hier die Tiefe des Wassers, das sonst etwa einen halben Zentimeter tief ist. Die Wellen bewegen sich in dem flachen Wasser langsamer. Daher konvergieren sie im Punkte *F*, nachher divergieren sie wieder. Die Wellen werden von dem Stabe *L* erregt, der dauernd aus- und eintaucht; die Schranken *B B* hindern die Wellen daran, an den Seiten der Linse vorbeizukommen.

Das Beispiel mit dem Wasserbehälter gibt uns einen Begriff von dem Wesen des Vorganges, aber ohne einige weitere Bemerkungen könnte der irreführende Eindruck entstehen, die Wirkung einer Linse auf einen Lichtstrahl sei nicht sehr exakt. Genau das Gegenteil ist der Fall. Strahlen von einer punktförmigen Lichtquelle können außerordentlich scharf in einem Brennpunkt gesammelt werden, wenn die Linse richtig entworfen und ausgeführt ist. Das kommt davon, daß die Lichtwellen so außerordentlich klein im Verhältnis zur Größe der Linse sind. In jedem Zentimeter des Wellenzuges sind weit über 10000 Lichtwellen, und daher bewegt sich der Zug fast ganz ohne Streuung vorwärts. Ist er auf einen bestimmten Punkt gerichtet, dann sind die Abweichungen von dem vorgeschriebenen Wege außerordentlich gering. Dies ist ein Beispiel für ein allgemeines Gesetz von größter

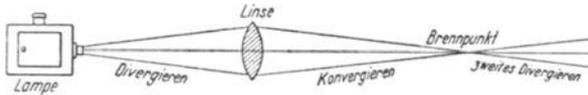
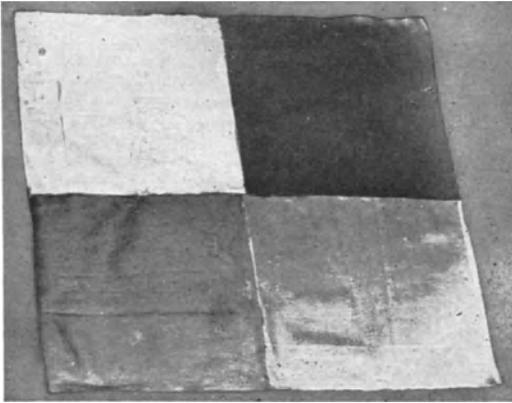


Abb. 23. Diese Zeichnung zeigt die Wirkung einer Linse. Die Strahlen von der Lampe werden in einem Punkt vereinigt; nachher divergieren sie wieder.

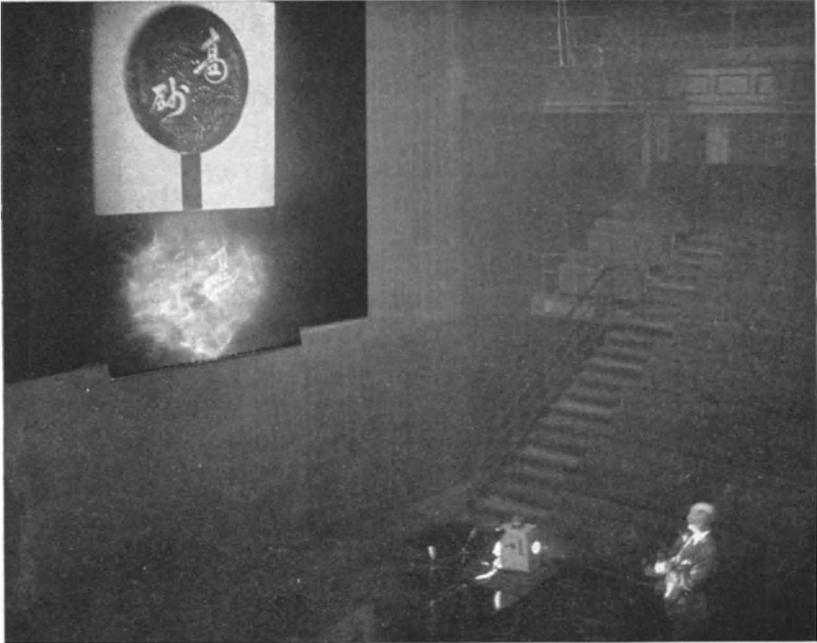
Bedeutung, und wir werden gelegentlich noch andere Beispiele kennenlernen. So winzig sind die Wellen, daß die allerhöchste technische Sorgfalt des Glasarbeiters und des Linsenschleifers erforderlich ist, um die gegebenen Möglichkeiten voll auszunutzen. Es gibt natürlich eine Grenze hierfür, aber sie wird erst von einer Arbeit erreicht, die so fein ist, daß die Moleküle des Glases als Einzelkörper angesehen werden können. Das Glas einer wirklich guten Linse muß vollständig homogen sein, und das wird mit zunehmender Größe außerordentlich schwierig; die Berechnung der Form ist sehr kompliziert, und der Schliff muß auf weniger als Haaresbreite genau sein. Natürlich gibt es viele alltägliche Verwendungszwecke, wo es nicht so sehr auf die Sorgfalt des Optikers ankommt.

Wenn wir eine Lichtquelle einer Linse nähern, dann weicht der Vereinigungspunkt der Strahlen zurück. Dies ist vollständig im Einklang mit der Erklärung, die wir für das Zustandekommen der Konvergenz gegeben haben. Die Linse verlangsamt in einem bestimmten Grade die Bewegung der Wellen durch ihre Mitte, hierdurch wird ein gewisser Wechsel in der Form der Wellen hervor-

Tafel VI

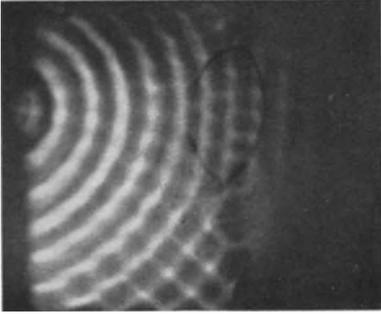


A. Vier Quadrate aus Satin sind aus demselben Stück Stoff herausgeschnitten und auf einer Tafel so angeordnet, daß ihre Fäden in verschiedenen Richtungen liegen. Der Beobachter steht zwischen der Lichtquelle und der Tafel. Die vier Stücke erscheinen verschiedenen hell. (S. 26.)

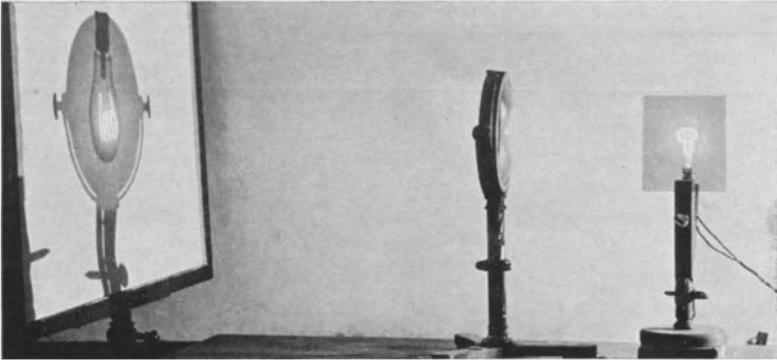


B. Die Spiegelung des japanischen Zauberspiegels erscheint auf dem unteren Teil des Wandschirms. Darüber ist eine Photographie der Rückseite des Spiegels, die von hinten aus dem Hörsaal projiziert wird. Die Übereinstimmung der beiden Bilder ist leicht zu erkennen. Diese Photographie ist aus zwei Aufnahmen zusammengesetzt. Sie zeigt, wie der Versuch gemacht wird, und sie zeigt auch sein Ergebnis. Daher sind die relativen Helligkeiten falsch. Der Hörsaal scheint hier heller zu sein als der Wandschirm. In Wirklichkeit ist es natürlich umgekehrt. (S. 27.)

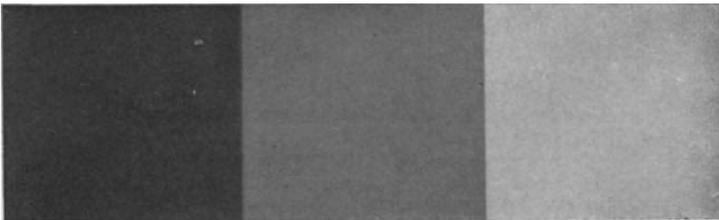
Tafel VII



A. Diese Photographie zeigt die Umkehrung des Effekts der Abb. 22. Von einem Punkt links gehen Wellen aus und laufen über eine Glasscheibe in Form einer Linse. Ihre Divergenz wird durch die Linse aufgehoben und rechts im Bilde sind die Wellen geradlinig; ihr Ausgangspunkt liegt im Brennpunkt der Linse. Die Photographie ist eine Zeitaufnahme, die Wellen wurden immer für Augenblicke belichtet und das Licht war mit der Bewegung des Wellenerregers gekoppelt. (S. 31.)



B. Diese Photographie zeigt links das umgekehrte Bild der rechts stehenden Glühlampe, das Bild wird von der Linse zwischen beiden entworfen. Der viereckige Schirm vor der Glühlampe verdeckte diese während eines Teiles der Belichtungszeit, weil ihr Licht sonst zu stark für die Platte gewesen wäre. Das umgekehrte Bild des Fadens auf dem Schirm links kommt von dem Glühfaden selbst, aber der umgekehrte Schatten des Kolbens der Lampe kommt von einer Lichtquelle rechts, die auf dem Bild nicht zu sehen ist. Dieselbe Lichtquelle wirft einen Schatten von der Linse und ihrem Halter, er ist aufrecht, weil die Strahlen nicht durch die Linse gegangen sind. (S. 34.)



C. Ein Fleck von gleichförmigem Farbton sieht an seinen Seiten verschieden aus. Neben einem dunklen Felde sieht er heller aus als neben einem hellen Felde. Daher bekommen die Flecken ein etwas gewelltes Aussehen. (S. 47.)

gerufen, der zur Folge hat, daß sie konvergieren, während sie vorher divergierten. Je größer die Divergenz vorher war, um so kleiner wird natürlich die Konvergenz nachher sein, wie Abb. 23 und 24 zeigen. Ja, wenn man die Lichtquelle der Linse genügend weit nähert, dann werden die Wellen hinter der Linse überhaupt nicht mehr konvergieren. Die Linse kann nur noch die frühere Divergenz vernichten, so daß die Wellen eben werden und geradeaus weiter gehen, ohne zu divergieren oder in einem Punkt zu konvergieren. Den Abstand zwischen Linse und Lichtquelle in diesem Falle bezeichnet man als Brennweite der Linse und den Punkt als ihren Hauptbrennpunkt. Der Fall läßt sich natürlich

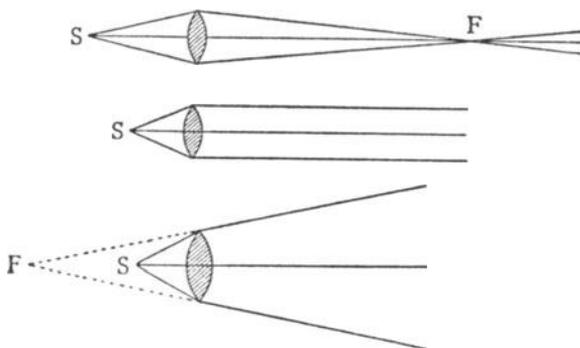


Abb. 24. Diese Zeichnungen zeigen für verschiedene Entfernungen von Linse und Lichtquelle zueinander, wie die Strahlen von der Linse zum Konvergieren gebracht werden.

auch umkehren; ebene Wellen, d. h. Wellen, die von einem Punkt aus großer Entfernung kommen, werden durch eine Linse im Hauptbrennpunkt vereinigt.

Wenn die Lichtquelle der Linse noch näher kommt, dann wird die Divergenz nur vermindert; die Strahlen divergieren, nachdem sie die Linse durchquert haben, immer noch, aber so, als wenn sie aus größerer Entfernung kämen.

In all diesen Fällen liegen Lichtquelle, Mittelpunkt der Linse und Brennpunkt in einer geraden Linie. Das kommt daher, daß die Linse in ihrer Mitte sich wie ein Stück ebenes Glas verhält; ein Strahl, der durch ihren Mittelpunkt geht, wird aus seiner Richtung nicht abgelenkt.

Die verschiedenen Vorgänge, die wir eben skizziert haben, entsprechen Versuchen, die man leicht hier auf dem Experimentiertisch vorführen kann; sie können aber nur angenähert erfolgreich

sein. Man kann eine Linse entwerfen, die sehr genau in einem bestimmten Punkt alle Strahlen zusammenbringt, die in einem anderen Punkt entstehen, aber das gilt nur für diese zwei Punkte. Man kann nicht erwarten, daß der Treffpunkt der Strahlen so scharf bleibt, wenn man die Abstände ändert, wie wir es eben getan haben. Eine Linse, die über einen großen Bereich wirksam sein soll, wird nicht überall gleich genau sein. Für den allgemeinen Gebrauch wird sie aber genügen, und die oben beschriebenen Versuche kann man auch mit einer verhältnismäßig ungenauen Linse ausführen. Etwas anderes ist es, wenn für einen bestimmten und eng begrenzten Zweck eine Linse von höchster Leistungsfähigkeit entworfen werden soll, etwa für ein Mikroskop, ein Fernrohr oder einen photographischen Apparat. Jeder, der einmal photographiert hat, weiß, was für ein Unterschied zwischen gewöhnlichen Linsen und den besten ihrer Art besteht.

Das Bild, das von einer Linse entworfen wird

Wenn wir wissen, wie Strahlen, die von einem Punkt vor der Linse ausgehen, hinter ihr wieder in einem Punkt vereinigt werden können, ist es nicht mehr schwer zu verstehen, wie mit Hilfe einer Linse ein Bild auf einem Schirm entstehen kann.

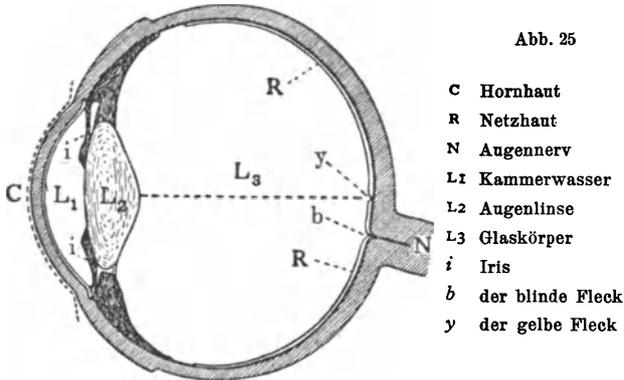
Betrachten wir z. B. die Abbildung Tafel VII B, die das Bild einer Glühlampe zeigt. Die Linse, deren Rand wir in der Mitte des Bildes sehen, vereinigt die Strahlen von der Lampe rechts in einem Brennpunkt auf dem Schirm links. Die Strahlen von jedem einzelnen Punkt des Glühdrahtes gehen durch die Linse und vereinigen sich wieder in einem Punkte auf dem Schirm; Linse und Schirm sind dementsprechend eingestellt. Die beiden Punkte liegen in einer geraden Linie, die durch den Mittelpunkt der Linse geht. Nachdem die Strahlen, die ursprünglich von der Lampe ausgingen, den Schirm getroffen haben, werden sie wieder gestreut, und ein Auge, das einen Teil von ihnen auffängt, hat den Eindruck, es wäre eine zweite Lichtquelle auf dem Schirm. Da für jeden Punkt des Originals ein entsprechender Bildpunkt vorhanden ist, erscheint ihre Summe als vollständiges Bild auf dem Schirm. Es steht auf dem Kopf, und seine Größe hängt davon ab, wie weit Glühfaden, Schirm und Linse voneinander entfernt sind.

Viele optische Apparate, z. B. die photographische Kamera, sind nach diesem Prinzip eingerichtet. Die lichtempfindliche Platte

ersetzt hier den Schirm der Tafel VII B; sie ist natürlich durch das Gehäuse der Kamera gegen alles Licht von außen geschützt. Auf der Platte entsteht umgekehrt und stark verkleinert das Bild von Gegenständen, die sich außerhalb befinden.

Das Auge als optischer Apparat

Die optische Einrichtung des Auges ist im Wesen der des photographischen Apparates ähnlich. Die linsenförmige Masse L_2 (Abb. 25) und die Flüssigkeiten L_1 und L_3 , die den Raum vor und hinter der Linse ausfüllen, verlangsamen alle die Geschwindigkeit



des Lichtes, das durch sie hindurchkommt, besonders L_2 , und zwar mehr in der Mitte des Auges als am Rande. Daher werden, wie vorher, die divergierenden Wellen, die das Auge treffen, dazu gebracht, auf der Netzhaut, die der Mattscheibe des photographischen Apparates entspricht, zu konvergieren. Auch hier ist das Bild eines äußeren Gegenstandes, wenn es auf der Netzhaut entsteht, sehr viel kleiner als das Original, und steht auf dem Kopf.

Die Lage der Mattscheibe im photographischen Apparat kann verändert werden. Das ist deshalb nötig, weil die Strahlen, die aus weiter Entfernung kommen, sich in einem Punkt treffen, der näher an der Linse liegt, als wenn die Strahlen aus großer Nähe kommen würden. Wir sind alle vertraut mit dem Anblick eines Photographen, der seinen Apparat auf die richtige Entfernung zum Objekt einstellt.

Bekanntlich haben wir die Fähigkeit, Einzelheiten an Gegenständen in verschiedener Entfernung wahrzunehmen, und unsere Augen müssen daher, wie die photographische Kamera, irgendwie die Möglichkeit haben, sich auf verschiedene Entfernungen einzustellen. Dies wird von Muskeln besorgt, die die Form des Auges und seines Linsensystems ändern können. Wenn wir z. B. sehr kleine Buchstaben lesen wollen, dann fühlen wir, wie wir uns anstrengen, um die Muskeln um das Auge herum zusammenzuziehen, und oft werden wir merken, daß wir dabei die Stirn runzeln. Dadurch wird der ganze Augapfel und besonders die Linse dicker in der Richtung von vorn nach hinten und schmaler an den Seiten. Dies verstärkt die konvergierende Wirkung. Die meisten Menschen können ihre Augen so weit zusammenziehen, daß sie noch in 15 bis 20 cm Entfernung gut sehen können; bringt man aber einen Gegenstand noch näher an das Auge, dann wird das Sehen verschwommen. Je näher wir Dinge an unser Auge halten können, ohne daß sie undeutlich werden, um so größer wird das Bild auf der Netzhaut, und um so besser können wir Einzelheiten an dem, was wir betrachten, wahrnehmen.

Optische Fehler des Auges und ihre Beseitigung

Mit einem normalen Auge kann man oft auf über 40 m Entfernung die einzelnen Zweige an einem Baum gegen den hellen Himmel erkennen, und man kann mit demselben Auge feine Einzelheiten in einer Entfernung von wenigen Zentimetern sehen. Dies gibt uns eine Ahnung davon, wie fein die Konstruktion sein muß, durch die winzige Gegenstände noch getrennt und ihre Strahlen zu einem Bildpunkt auf der Netzhaut vereinigt werden können. Aber wir wissen auch, daß nicht alle Augen gleich gut sind; manche Leute können besser in der Nähe und manche besser in der Entfernung sehen; andere wieder können Dinge niemals scharf sehen. Diese Abweichungen vom normalen Auge können wir mit einigen Experimenten leicht erklären.

Wir bauen uns einen Apparat, der den Vorgang des Sehens darstellen soll. In dem großen Kolben in der Abbildung ist in einer Flüssigkeit eine gewisse Menge von Materie aufgeschwemmt, so daß wir die Spuren von Lichtstrahlen leicht verfolgen können. In *S* befindet sich ein Lichtbogen oder eine Punktlichtlampe, um

Licht von genügender Konzentration zu geben. Dicht vor dem Kolben steht eine Linse, die so gewählt ist, daß sie das Licht des Bogens auf der Rückwand des Kolbens in einem Brennpunkt vereinigt (Abb. 26).

Kolben und Linse sollen ganz roh den runden Augapfel und die Augenlinse darstellen, und die Hinterwand des Kolbens soll die Netzhaut sein (Abb. 25). Die Strahlen, die in unserer ersten Versuchsanordnung hier zur Vereinigung gebracht werden, entsprechen dem Licht, das in ein normales Auge kommt und auf die Netzhaut trifft. Strahlen, die von einem Punkt ausgehen, werden in einem Punkt vereinigt. Wir haben schon gesehen, daß dies sehr wichtig ist, denn nur so ist es möglich, daß die Kenntnis,

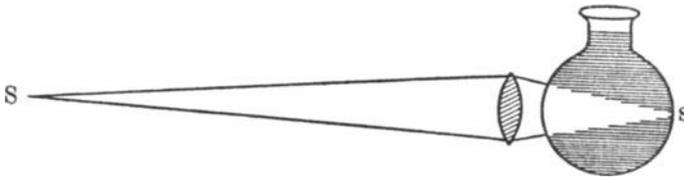


Abb. 26. Die Strahlen einer Bogenlampe bei S werden mit Hilfe der Linse und der Flüssigkeit im Kolben zum Konvergieren gebracht. Sie treffen sich in einem Punkt auf der Hinterwand des Kolbens. Linse und Flüssigkeit sollen roh dem optischen Aufbau des Auges entsprechen, und die Rückwand des Kolbens entspricht der Netzhaut.

die die Strahlen vermitteln, nicht dadurch gestört wird, daß Strahlen, die von anderswo herkommen, auf dieselbe Stelle der Netzhaut fallen.

Wenn die Lichtquelle S nach oben bewegt wird, bewegt sich das Bild s nach unten und umgekehrt, ebenso ist es mit rechts und links. Diese Umkehrung begleitet, wie wir gesehen haben, jede Wirkung einer Linse. Das „Bild“ auf der Netzhaut steht also auf dem Kopf. Hier erhebt sich die Frage, warum wir dann nicht alles verkehrt sehen. Das erklärt sich folgendermaßen: Als wir zuerst anfangen, die Eindrücke unserer Augen zu deuten, lernten wir, oben und unten und hoch und niedrig an einem Objekt zu unterscheiden. Aber wir wußten nichts über den Mechanismus dieses Vorganges und waren mit dem Lernen aus der Erfahrung zufrieden. Die Mehrzahl der Menschen weiß gar nicht, daß das Bild auf der Netzhaut verkehrt ist, denn diese Tatsache ist dem Bereich ihrer täglichen Erfahrung fremd. Wenn sie die Wirkung einer Linse nicht beobachtet und sich nicht klar gemacht haben, wie

das Linsensystem des Auges funktioniert, dann kommen sie mit dem wirklichen Tatbestand eben niemals in Berührung.

Man kann dies mit ganz einfachen Versuchen demonstrieren¹⁾. Zunächst bringen wir eine Linse dicht vor einen Schirm, wie in Abb. 27, und halten irgendeinen einfachen Gegenstand nahe an die Linse. Dann beobachten wir, daß der Gegenstand trotz der Linse einen Schatten auf den Schirm wirft, und dieser Schatten ist nicht umgekehrt, sondern aufrecht.

Wenn man nun eine Karte mit einem kleinen Loch nahe ans Auge hält und durch das Loch auf eine helle Fläche sieht, etwa

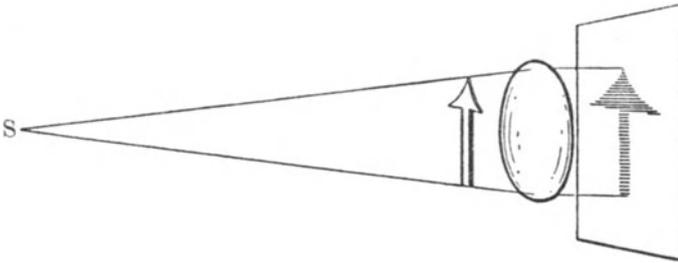


Abb. 27. Eine Lichtquelle *S* wirft den Schatten eines Körpers auf einen nahen Schirm. Hält man eine Linse von nicht zu kurzer Brennweite zwischen Körper und Schirm, dann wird der Schatten kaum verändert, er wird nur etwas aufgehellt und unscharf.

auf den Himmel oder auf einen hellen Lampenschirm, dann wird man einen ziemlich großen Lichtkreis sehen, weil ein beträchtlicher Teil der Netzhaut beleuchtet wird. Die Augenlinse kann nämlich die Strahlen, die nach dem Durchgang durch das kleine Loch so weit divergieren, nicht mehr zu einem Punkt zusammenbringen. Jetzt wollen wir eine Stecknadel so halten, daß ihr Kopf zwischen das Loch und das Auge kommt. Es dauert vielleicht einige Zeit, bis sie an der richtigen Stelle ist. Der Schatten auf der Netzhaut muß dann aufrecht sein (Abb. 27), aber das Gehirn wird das so deuten, als sei er verkehrt; was das Auge „sieht“, zeigt uns die Abb. 29.

Wir könnten noch darauf hinweisen, daß das Bild auf der Netzhaut sich nicht nur dadurch vom Original unterscheidet, daß es umgekehrt, sondern auch dadurch, daß es stark verkleinert ist. Wenn man sagt, wir müßten eigentlich alles auf dem Kopf sehen,

¹⁾ Silvanus Thompson: *Light visible and invisible*, S. 44.

dann kann man ebensogut sagen, wir müßten alle Dinge viel kleiner sehen, als sie wirklich sind.

Wenn wir in dem Versuch der Abb. 26 die Lichtquelle *S* weiter von dem Augenmodell entfernen, dann werden die Strahlen zu einem Brennpunkt vereinigt, bevor sie auf die Netzhaut treffen, und wenn sie dort ankommen, dann breiten sie sich wieder etwas aus. Wenn die Lichtquelle *S* näher am Auge ist, dann haben sich die Strahlen beim Auftreffen auf der Netzhaut noch nicht in einem Punkt vereinigt; in beiden Fällen ist das Bild undeutlich.

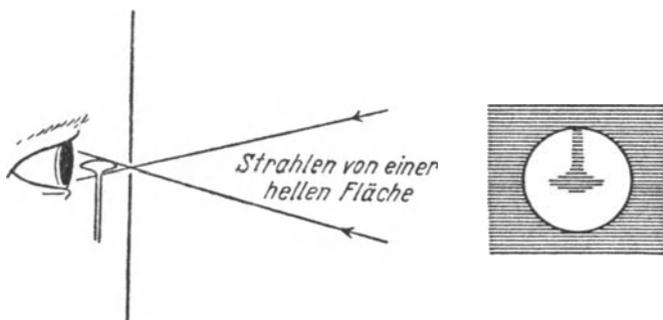


Abb. 28 und 29. Das Auge befindet sich nahe bei dem kleinen Loch in der Karte. Licht von einer hellen Fläche, z. B. dem Himmel, fällt ein und erfüllt die Netzhaut, so daß das Loch groß aussieht. Wenn eine Stecknadel mit ihrem Kopf so, wie das Bild zeigt, zwischen Auge und Loch gehalten wird, dann muß ihr Schatten auf der Netzhaut, in Übereinstimmung mit unserem vorigen Versuch, aufrecht stehen. Die Nadel erscheint aber umgekehrt; was man sieht, zeigt das Bild rechts.

Dasselbe würde beim Gebrauch der Augen der Fall sein, wenn nicht irgendeine Einrichtung da wäre, die dies verhindert. Durch die Wirkung der Augenmuskeln können nun die Linse und der Sehapparat verändert und das Sehen innerhalb gewisser Grenzen verschiedenen Verhältnissen angepaßt werden. Diese Anpassungsfähigkeit wechselt sehr stark bei verschiedenen Personen. Mit normalen Augen kann man einerseits die Einzelheiten einer Landschaft mit all der Deutlichkeit sehen, von der wir schon gesprochen haben, andererseits kann man in etwa 20 cm Abstand bequem ein Buch lesen. Aber manche Augen sind so beschaffen, daß alle Gegenstände in der Entfernung verschwommen erscheinen, nur in der Nähe kann man mit ihnen scharf sehen. Solche kurzsichtigen Augen müssen durch Linsen unterstützt werden, die in der Mitte dünner sind als an den Rändern, sogenannten Konkavlinsen; denn bei einem kurzsichtigen Auge

konvergieren die Wellen zu stark und müssen daher durch Linsen korrigiert werden, die das Strahlenbündel dadurch erweitern, daß sie die Strahlen am Rande stärker hemmen als in der Mitte. Umgekehrt müssen die Augen, die die Wellen nicht genug zum Konvergieren bringen können, durch konvexe Linsen unterstützt

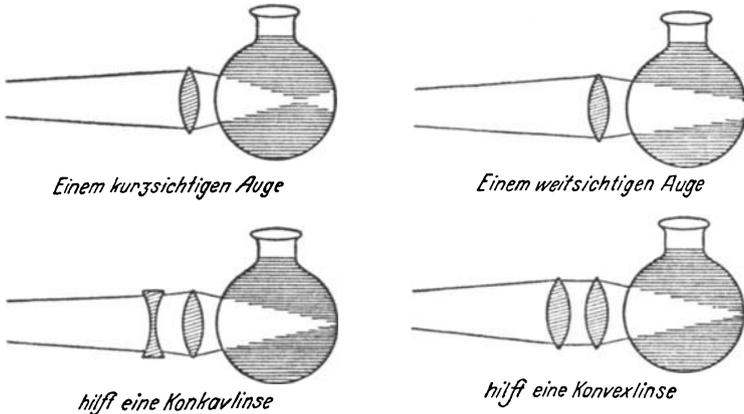


Abb. 30 und 31. Die Bilder zeigen, wie die Fehler eines kurzsichtigen und eines weitsichtigen Auges ausgeglichen werden können.

werden, das sind solche Linsen, die in der Mitte am dicksten sind. Sehr viele Menschen brauchen sie im Alter, denn die Augenlinse wird mit den Jahren flacher.

Vergrößerung

Je größer das Bild auf der Netzhaut ist, desto leichter kann man alle Einzelheiten eines Objektes sehen, vorausgesetzt, daß jeder Punkt scharf abgebildet wird. Um dieses Bild so groß wie möglich zu machen, muß man den betreffenden Gegenstand möglichst nahe ans Auge bringen. Die Grenze hierfür ist durch die beschränkte Fähigkeit des Auges gegeben, die Divergenz von Strahlen aufzuheben und sie so weit konvergent zu machen, daß sie sich in einem Punkte auf der Netzhaut treffen. Wenn wir einen Gegenstand genau untersuchen wollen, bringen wir ihn so nahe ans Auge, wie wir können, aber wir wissen alle, das geht nur bis zu einem ziemlich genau gegebenen Abstand. Dies ist der Punkt, wo die Kraft des Auges anfängt zu versagen. Es hat keinen

Zweck, den Gegenstand noch näher zu bringen; das Bild wird zwar größer, aber die Einzelheiten verschwimmen. Um diese Schwierigkeit zu überwinden, bedient man sich gewöhnlich einer Linse, die die konvergierende Wirkung des Auges verstärkt. Hiermit kommen wir zu dem einfachen Vergrößerungsglas in seinen verschiedenen Formen. Beim Gebrauch solch einer Linse kann man einen Gegenstand viel näher ans Auge bringen, ohne daß die Deutlichkeit unter der Vergrößerung zu leiden hätte. Die gewöhnliche Leselupe, die wir nehmen, um sehr kleine Schrift oder die Einzel-

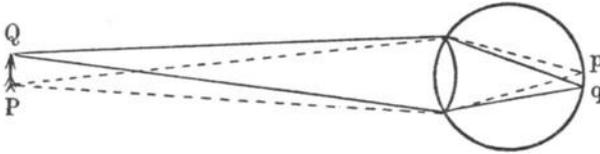
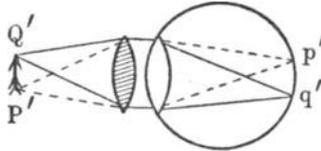


Abb. 32. Ohne besondere Hilfsmittel kann man keinen Gegenstand scharf sehen, der näher ist als PQ , sein Bild ist pq .

Aber wenn man eine Linse benutzt, kann man den Gegenstand viel näher an das Auge bringen und bekommt doch auf der Netzhaut ein deutliches Bild $p'q'$, das viel größer ist als pq .



heiten eines Bildes zu erkennen, vergrößert nicht sehr stark, und ihre Herstellung erfordert keine besondere Sorgfalt. Je stärker die Vergrößerung aber sein soll, um so höhere Anforderungen werden an die Sorgfalt des Linsenmachers gestellt; Lupen, wie sie die Botaniker, Geologen oder Uhrmacher gebrauchen, verlangen schon eine recht gute Arbeit. Aber die Methode selbst hat ihre Grenzen trotz aller Sorgfalt des Linsenmachers; der zu untersuchende Gegenstand kann nicht in allen Fällen so nahe an das Auge gebracht werden, daß die Vergrößerung erreicht wird, die man gern haben will. In diesem Falle benutzt man dann ein ganz anderes Verfahren.

Mikroskop und Fernrohr

Wir wollen einen Augenblick verweilen, um zu bedenken, wie ungeheuer viel dies alles für uns bedeutet. Beiderseits des Gebietes der Größen, die unser Auge ohne Hilfe sehen und untersuchen kann, sind weite Bereiche, die dem gewöhnlichen Auge unzu-

gänglich sind. Es ist natürlich wahr, daß man auch ohne Brillen, Lupen, Mikroskope und Fernrohre leben kann; aber ebenso wahr ist, daß wir ohne sie nichts von all dem Leben wissen würden, das, teils freundlich, teils feindlich gegen uns, im kleinsten Raume sich abspielt und uns so nahe angeht. Die Sterne wären dann für uns nur helle Punkte am Himmel, und nichts würden wir ahnen von all dem ungeheuren Reichtum im Aufbau der Erde und des Universums, dem wir angehören.

Bei dem neuen Verfahren entwerfen wir zuerst ein Bild von dem, was wir untersuchen wollen, und betrachten dieses Bild dann durch ein Vergrößerungsglas. Hierdurch haben wir zwei Vorteile,

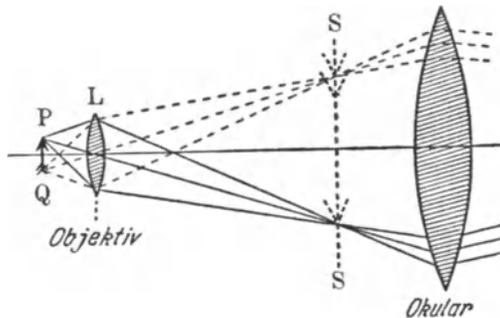


Abb. 33. Die Grundzüge des Mikroskops. Der hell beleuchtete Gegenstand PQ streut Licht, so daß die Linse L , das sogenannte Objektiv, ein Bild bei SS entwirft, das viel größer ist als PQ . Dieses Bild wird mit Hilfe einer zweiten Linse, des Okulars, so betrachtet, wie uns die vorige Zeichnung, Abb. 32, zeigt.

erstens können wir das Bild viel größer machen als das Original, und zweitens ist es uns leichter zugänglich. Nehmen wir einmal an, ein kleiner Gegenstand PQ (Abb. 33) befinde sich dicht vor der Linse L und werde hell beleuchtet. Auf dem Schirm SS entsteht dann ein vergrößertes Bild von ihm. Die Beleuchtung muß stark sein, damit das Bild trotz der starken Vergrößerung noch genügend hell ist. Dieses Bild können wir jetzt mit unserem Vergrößerungsglas betrachten. Wir könnten es natürlich auch auf einem weißen Schirm bei SS auffangen und von vorn ansehen, aber es ist unendlich viel günstiger, es von hinten mit Hilfe einer Linse zu betrachten, wie in Abb. 32; den Schirm brauchen wir dabei gar nicht, denn die Strahlen von jedem Punkt des Originals werden in der Ebene des Schirmes zu einem Punkt zusammengebracht, gehen dann wieder auseinander und kommen in das Auge, wie die Ab-

bildung es zeigt. Außerdem gelangt in diesem Falle das gesamte Licht in das Auge, während der Schirm einen großen Teil desselben zerstreuen würde.

Dies ist das Prinzip des Mikroskops. Zwei Dinge sind wesentlich in der optischen Anordnung von Abb. 33, nämlich erstens das Objektiv, das ein vergrößertes Bild entwirft, und zweitens das Okular, durch das man dieses Bild betrachtet. Die Vergrößerung, die man mit einem Mikroskop erreichen kann, hängt von der Konstruktion dieser beiden Teile ab. Und noch einmal möchte ich wiederholen, daß ein sehr hoher Grad von handwerklichem Können erforderlich ist, wenn die besten Resultate erreicht werden sollen.

Wenn man Einzelheiten an einem weiter entfernten Gegenstand sichtbar machen will, benutzt man eine ähnliche Anordnung. Hier kann das Objektiv aber nicht nahe an den betreffenden Gegenstand herangebracht werden, und deshalb ist das Bild, das entsteht, auch nicht vergrößert. Es wird aber immerhin ein Bild entworfen, und mit Hilfe eines Okulars oder eines Vergrößerungsglases kann man dieses Bild viel besser betrachten, als es ohne Hilfsmittel möglich wäre.

Je größer die Brennweite des Objektivs ist, um so größer wird das erste Bild: deshalb ist ein starkes astronomisches Fernrohr sehr lang; aber dann wird die Beleuchtungsfrage wichtig, denn das Licht, das durch das Objektiv geht, muß auf das ganze Bild verteilt werden. Daher muß das Objektiv für eine starke Vergrößerung sehr groß sein, und hier setzen die Herstellungskosten dem, was man erreichen kann, eine Grenze.

Wir wollen, um diese Frage zu verstehen, ebenso vorgehen, wie wir es schon beim Auge getan haben. Nehmen wir an, ein photographischer Apparat sei so aufgestellt, daß man eine Aufnahme machen kann. Wenn wir die Mattscheibe betrachten, ehe eine lichtempfindliche Platte an ihre Stelle tritt, und wenn wir mit einem schwarzen Tuch alles Licht von außen fernhalten, dann sehen wir ein umgekehrtes Bild dessen, was photographiert werden soll. Dieses Bild können wir mit einer Lupe betrachten, um die Einzelheiten besser zu erkennen. Wenn die Lupe sich aber in der richtigen Stellung befindet, dann ist es natürlich hundertmal besser, die Mattscheibe ganz fortzulassen. Die Strahlen, die auf einen Punkt der Mattscheibe trafen und von dort nach allen Richtungen

gestreut wurden, gehen dann nämlich direkt in unser Okular, ohne durch die Zerstreuung geschwächt zu werden.

Um es zusammenzufassen: bei der Steigerung unserer Sehleistungen können wir drei Stufen unterscheiden. Auf der ersten Stufe benutzen wir unsere bloßen Augen, auf der zweiten, bei der es sich nur um kleine Gegenstände handelt, die wir nahe ans Auge bringen können, benutzen wir eine Lupe oder ein Vergrößerungsglas, und auf der dritten Stufe entwerfen wir zuerst ein Bild des Gegenstandes mit Hilfe eines Objektivs und betrachten dann dieses Bild mit unserer Lupe oder unserem Vergrößerungsglas. Alle Mikroskope und Fernrohre sind nach diesem Prinzip gebaut, so verschieden sie auch in den Einzelheiten sein mögen. Instrumente für besondere Zwecke, wie z. B. die modernen Feldstecher, sind mit außerordentlich viel Scharfsinn entwickelt worden. Die Betrachtung solcher Instrumente gehört aber nicht mehr in den Rahmen dieses Buches.

Astigmatismus

Es ist eine bekannte Tatsache, daß die Sehkraft verschiedener Menschen stark verschieden ist. Manche von uns können in der Entfernung keine Einzelheiten unterscheiden, anderen wird es

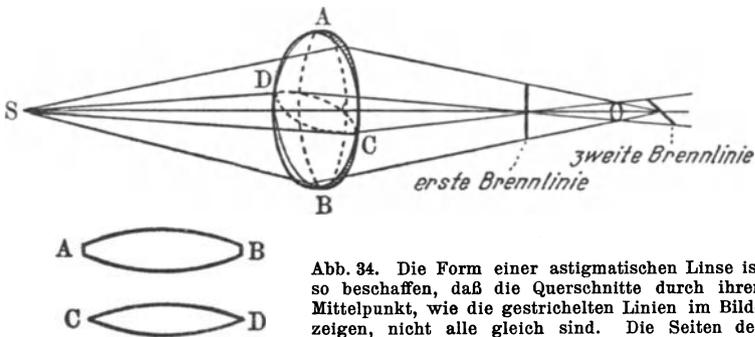


Abb. 34. Die Form einer astigmatischen Linse ist so beschaffen, daß die Querschnitte durch ihren Mittelpunkt, wie die gestrichelten Linien im Bilde zeigen, nicht alle gleich sind. Die Seiten des Schnittes *CD* sind z. B. stärker gekrümmt als die von *AB*. Nach dem Durchgang durch die Linse treffen sich die Strahlen von *S* nicht in einem Punkt, sondern in zwei kurzen Brennlinien, wie die Abbildung zeigt. Die erste davon liegt in der Zeichenebene, die zweite senkrecht zu ihr.

schwer, ein Buch zu lesen. Diesen Mängeln suchen wir mit geeigneten Brillen abzuhelpen. Es gibt kein „Normalauge“, das allen Gebrauchszwecken des Durchschnittsmenschen angepaßt

wäre. Da so viele Verschiedenheiten in dieser Hinsicht auftreten, daß wir oft künstliche Hilfsmittel brauchen, um in bestimmten Entfernungen etwas sehen zu können, so werden wir nicht erstaunt sein, zu hören, daß auch in anderer Richtung Abweichungen vom Normalen vorkommen, und zwar besonders von der symmetrischen Form des Auges, die wir als Normalzustand annehmen können. Wenn Strahlen von einer punktförmigen Lichtquelle auf der Achse einer Linse wieder zu einem Punkt zusammengebracht werden sollen, dann muß die Linse symmetrisch zu dieser Achse sein. Man kann leicht einsehen, was geschehen würde, wenn sie es nicht wäre. Wir nehmen eine Linse, die so geschliffen ist, daß ihre

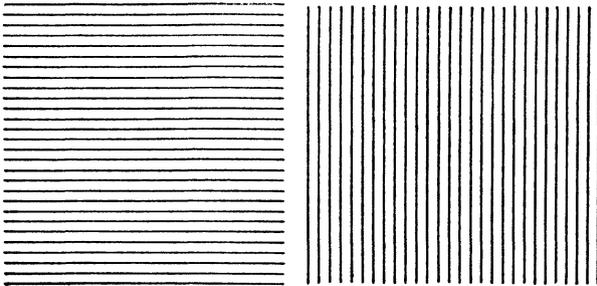


Abb. 35. Eine Prüfung des Auges auf Astigmatismus.

Krümmung in der senkrechten Richtung AB geringer ist als in der waagerechten Richtung CD (Abb. 34). Dann finden wir, daß das Licht einer punktförmigen Lichtquelle nicht wieder in einem Punkt auf der anderen Seite der Linse vereinigt werden kann. Die stärkere Krümmung des waagerechten Querschnittes der Linse vereinigt die Strahlen von den Seiten schneller, als sie in der senkrechten Ebene zusammengebracht werden. Abb. 34 zeigt uns das Ergebnis.

An einer Stelle gehen alle Strahlen durch eine kurze senkrechte Linie, und etwas später gehen sie alle durch eine kurze waagerechte Linie. Dazwischen sind sie alle in einem kleinen Kreis enthalten; aber durch einen einzigen Punkt gehen sie nie, daher kommt auch der Name Astigmatismus. Ein Auge, das diese Eigenschaft hat, kann keinen Gegenstand, ob nah oder fern, scharf sehen. Glücklicherweise ist es leicht, Linsen zu entwerfen und anzufertigen, die den Fehler ausgleichen. Das astigmatische Auge muß eine Rich-

tung größter und eine Richtung kleinster Krümmung haben, natürlich braucht dies nicht die senkrechte und waagerechte Richtung zu sein, wie in Abb. 34. Eine Linse, die diesen Unterschied umkehrt, wird den Fehler beseitigen. Mit einem astigmatischen Auge sieht man Striche auf einem Stück Papier am besten in bestimmten Richtungen. Wenn man daher mit einem solchen Auge die Zeichnung der Abb. 35 betrachtet, sieht man vielleicht die senkrechten Linien deutlicher als die waagerechten oder umgekehrt; vielleicht sieht man auch einen Unterschied in einem bestimmten Augenblick, während die Seite langsam in ihrer Ebene gedreht wird. Dies erklärt sich folgendermaßen:

Nehmen wir an, die Augenlinse sei so gebaut wie Abb. 34 es zeigt; dann werden die Lichtstrahlen, die von einem Punkt ausgehen und durch die Linse kommen, zunächst alle auf einer kurzen senkrechten Linie auf der Netzhaut vereinigt. Jeder Punkt der Linie, die wir ansehen, wird zu einem kurzen senkrechten Strich auseinandergezogen, und diese Striche werden sich alle überlagern, so daß im ganzen eine klare Linie erscheint. Aber wenn die Linie auf dem Papier waagerecht ist und jeder Punkt von ihr zu einem kurzen senkrechten Strich auseinandergezogen wird, dann erscheint eine verschwommene waagerechte Linie.

Optische Täuschungen

Auf den vorhergehenden Seiten haben wir das Auge als ein optisches Instrument betrachtet, das von Gegenständen der Außenwelt ein Bild auf der Netzhaut entwirft, wobei wir verschiedene Gründe für das Versagen dieses Instrumentes kennengelernt haben. Wir haben auch gesehen, daß die Deutung dieser Bilder ein Teil eines unbewußten Vorganges ist, bei dem das Gehirn die Einzelheiten eines Bildes erkennt. Ebenso gut wie Fehler im optischen System vorkommen, können auch Fehler in der Deutung unterlaufen, etwa aus Mangel an Erfahrung, aus Nachlässigkeit oder, weniger vermeidbar, durch das Wesen der physiologischen Vorgänge selbst, durch die das Licht in Nervenimpulse und diese wieder in Empfindungen umgewandelt werden. Z. B. glaube ich, daß die wohlbekanntere Täuschung über die relativen Längen der waagerechten Linien in Abb. 36 hauptsächlich auf einem Mangel an Aufmerksamkeit beruht. Die untere Linie sieht kürzer aus, weil das Auge ihr Ende irgendwo in die Pfeilspitze verlegt und die

Linie gar nicht bis zu ihrem wirklichen Ende verfolgt. Ein erfahrener Zeichner ließe sich nicht so täuschen, und er würde auch nicht den Fehler machen, zu denken, daß die beiden Linien der Abb. 37 zueinander geneigt seien, obgleich ein hastiger Blick diese Täuschung wohl hervorrufen kann.

Wenn andererseits ein dunkler Fleck nahe bei einem helleren auftritt, dann hat man den Eindruck, daß der helle Fleck in der Nähe des dunklen noch heller ist, während die Dunkelheit des anderen in der Nähe des hellen Fleckes verstärkt wird. Die Besonderheit jedes einzelnen wird sozusagen noch durch die Anwesenheit des anderen hervorgehoben. Die Quadrate in Tafel VIIC sehen daher so

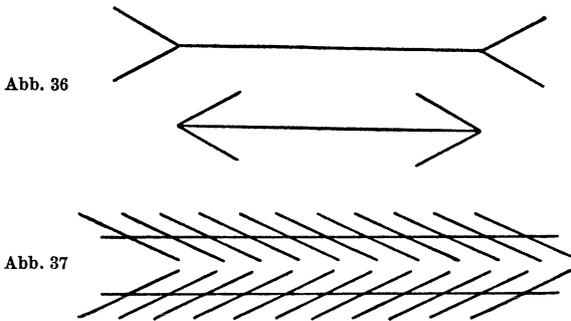


Abb. 36 und 37. Zwei wohlbekannte optische Täuschungen. Sind die horizontalen Linien oben gleich lang? Sind die langen Linien unten parallel zueinander?

aus, als wechsele der Farbton innerhalb eines Quadrates. Hierfür sind verschiedene Gründe wirksam, und ich bin nicht sicher, ob man genau erklären kann, wie weit ihr Einfluß im einzelnen geht. Eine der wichtigsten Ursachen bespricht Shelford Bidwell in seinem Buch *Curiosities of Light and Sight*: nämlich das unbewußte Wechseln des Maßstabes. Wenn das Auge den dunklen Fleck angesehen hat, wird es stärker vom Licht beeindruckt als sonst; sein Helligkeitsstandard ist sozusagen zeitweilig unter dem normalen Niveau. Diese Verstärkung des Eindruckes durch Kontrastwirkung kann zum Teil auch auf einem physiologischen Effekt beruhen, nämlich dem wirklichen Ermüden der Netzhaut infolge des auftreffenden Lichtes, das man beobachtet.

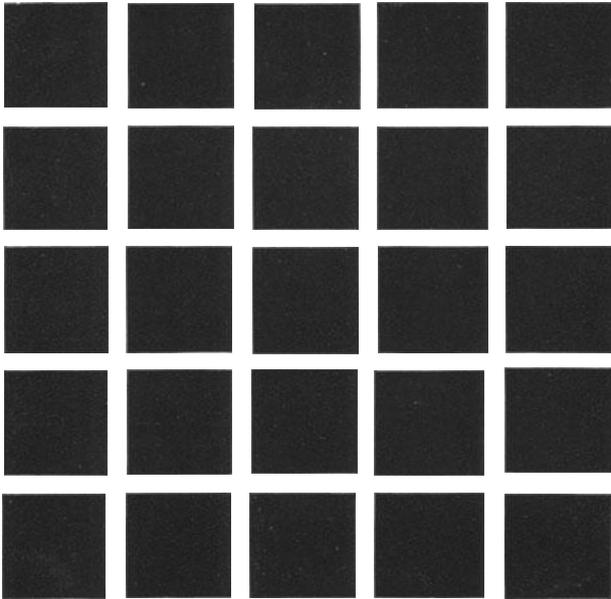
Wenn wir das Bild ansehen, dann sind unsere Augen ständig in Bewegung von Punkt zu Punkt. Blicken wir auf den mittleren Fleck, nachdem wir eben den hellen angesehen haben, dann sind

unsere Augen ein klein wenig ermüdet; haben wir eben den dunklen Fleck angesehen, dann sind sie ausgeruht. Im ersten Falle sieht der mittlere Fleck vielleicht dunkler aus als im zweiten. Ob die Ermüdung nun überhaupt etwas mit diesem Effekt zu tun hat oder nicht, bleibe dahingestellt; jedenfalls spielt das Wechseln des Maßstabes sicher stark mit, denn nach Bidwell „tritt das gewellte Aussehen auch auf, wenn das Bild nur einen Moment durch einen elektrischen Funken beleuchtet wird“.

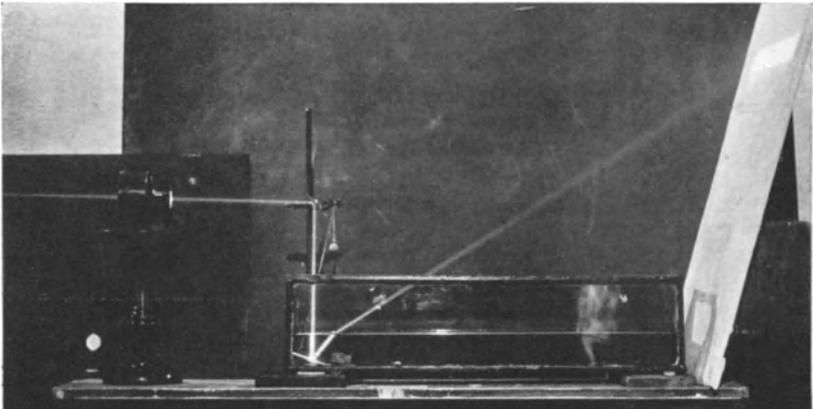
Ein sehr seltsamer Versuch derselben Art wurde vor vielen Jahren in einer Vorlesung in der Royal Institution von Professor William Stirling gezeigt; das Diagramm dieses Versuches zeigt Tafel VIIIA. Die weißen Streifen scheinen da, wo sie sich schneiden, etwas dunkler zu sein. Man kann vielleicht annehmen, daß ein Punkt in einem der weißen Streifen da, wo er von einer Kreuzung weit entfernt ist, von mehr Schwarz umgeben ist und deshalb heller aussieht als ein Punkt auf einem der Vierecke, wo die weißen Streifen sich schneiden.

Eine der berühmtesten optischen Täuschungen ist die scheinbare Vergrößerung des Mondes in der Nähe des Horizontes. Wenn seine klare rote Scheibe aufsteigt und man die scharfen Umrisse entfernter Bäume oder Häuser sich davor abheben sieht, dann ist es schwer, zu glauben, daß der Mond nicht größer sei, als wenn er hoch oben am Himmel steht. Diese Tatsache selbst läßt sich aber leicht beweisen. Ein Halfpenny (25 mm Durchmesser) in einer Entfernung von 3 m verdeckt gerade den Mond, ob er am Horizont steht oder im Zenith. Es ist selbstverständlich, daß der Winkel, unter dem sein Durchmesser dem Auge erscheint, immer derselbe ist, da sich ja die Entfernung des Mondes von der Erde nicht ändert. Die Brechung der Strahlen durch die Atmosphäre, die wir später betrachten werden, ändert diesen Winkel nur sehr wenig und verursacht sogar eine winzige Verkleinerung am Horizont. Die Täuschung kommt daher nicht von irgendeinem Wechsel der Größe des Bildes auf der Netzhaut oder sonst einem Fehler des Auges, sondern es muß sich um einen Irrtum in der Deutung handeln. Ich sehe keinen Grund für einen Zweifel an der Erklärung, die oft vorgeschlagen wird, daß nämlich die Ursache wieder in einem Wechsel des Maßstabes liegt. Unbewußt messen wir Gegenstände am Himmel mit verschiedenem Maß, je nachdem, wie weit sie vom Zenith über uns entfernt sind. Wir sehen Wolken zum Horizont ziehen und beobachten, wie ihre scheinbare Größe dabei

Tafel VIII

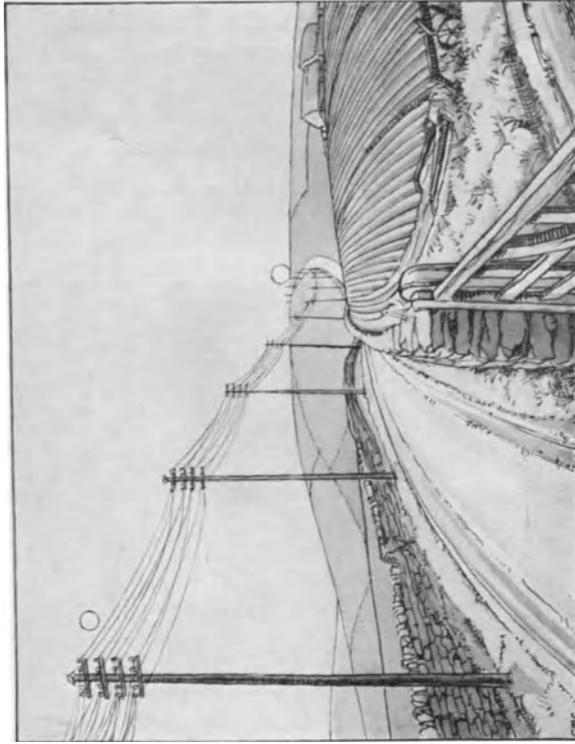


A. Wo die weißen Streifen sich treffen, erscheinen undeutlich dunklere Schatten. (S. 48.)



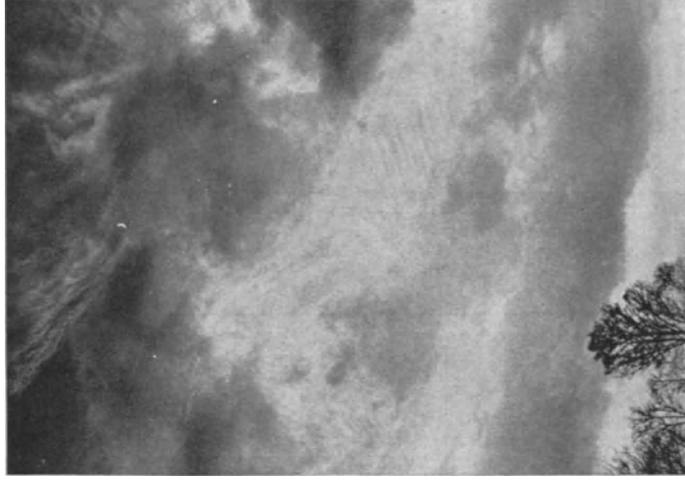
B. Photographie einer Versuchsanordnung, die die Brechung eines Lichtstrahls beim Durchtritt durch die Grenzfläche zwischen Luft und Wasser zeigt. (S. 53.)

Tafel IX



A. (Links.) Der Mond am Horizont ist groß im Vergleich zu den Telegraphenstangen dort, aber klein im Vergleich zu denen im Vordergrund. In einer Zeichnung wie dieser tritt die Täuschung nicht auf, man kann sie aber dadurch hervorrufen, daß man erst das eine und dann das andere Bild des Mondes verdeckt. Die wirkliche Umgebung ist für den psychologischen Effekt erforderlich. (S. 49.)

B. (Rechts.) Der Mond in dieser Wolkenphotographie ist nicht ganz leicht zu finden. Er bildet eine kleine Sichel in der oberen Hälfte des Bildes und ist von den beiden Rändern etwa gleich weit entfernt. Der Mond erscheint unter einem Winkel von ungefähr einem halben Grad, und seine Größe im Bilde muß etwa ein hundertzwanzigstel der Brennweite der Kamera linse betragen, denn dies ist das Verhältnis zwischen der Größe eines Gegenstandes und seinem Abstand, wenn er unter einem Winkel von dieser Größe erscheint. (S. 49.)



kleiner wird. Ein Flugzeug wird kleiner und kleiner, während es weiter fliegt, der Winkel, unter dem es erscheint, nimmt mehr und mehr ab, und schließlich verschwindet es als winziger Fleck hinter einem fernen Hügel. Aber beim Mond ändert sich der Winkel nicht in dieser Weise, und wenn wir ihn am Horizont sehen, dann messen wir ihn mit dem Maßstab, der für uns gewöhnlich mit diesem Teil des Himmels verbunden ist, und dann erscheint er riesig. Wenn wir am Horizont hinter einem entfernten Dorf ein Flugzeug auftauchen sehen würden, das dieselbe scheinbare Größe hätte, die es über unseren Köpfen hat, dann würde es anscheinend größer als das ganze Dorf sein und wäre sicher ein erschreckender Anblick. Nicht anders ist es mit dem Mond; es liegt daher nichts Überraschendes in der Tatsache, daß er so groß aussieht, obgleich wir sein Verhalten genau kennen und wissen, daß er in Wirklichkeit am Horizont nicht größer ist, als wenn er über unseren Köpfen steht. Die Tafel IX A soll diese Erklärung erläutern.

Auf Bildern ist der Mond gewöhnlich viel größer dargestellt, als er es nach den Gesetzen der Geometrie sein sollte. Da keine Farbe seinen Glanz und seine Erscheinung wiedergeben kann, will der Maler vielleicht seine scheinbare Größe erhöhen, um ihm so gerecht zu werden. Ob er dazu berechtigt ist oder nicht, ist eine Frage der künstlerischen Gestaltung, mit der wir nichts zu tun haben. Wenn ein Bild, das man auf etwa Armeslänge entfernt ansieht, Gegenstände in ihrer wahren Größe wiedergeben soll, dann müßte der Mond einen Durchmesser von ungefähr 5 mm haben, und wenn das Bild von irgendeiner anderen Entfernung aus gesehen werden soll, dann muß die Größe des Mondes entsprechend verändert werden.

Wir wollen nicht vergessen, daß einem Beobachter unabhängig von dessen Stellung der Mond immer unter demselben Winkel erscheint, während alle anderen Dinge ihre scheinbare Größe ändern, wenn der Beobachter seine Lage wechselt. Vom geometrischen Standpunkt andererseits hängt die Größe des Mondes im Bilde davon ab, wie weit das Bild vom Auge entfernt ist. In einer Photographie hängt sie davon ab, wie weit die Kameralinse von der Platte entfernt war. Ein etwas überraschendes Beispiel hierfür zeigt Tafel IX B.

Eine andere Art von Täuschung, mit der wir wohl alle vertraut sind, ist die scheinbare Vergrößerung von Entfernungen auf

Photographien. Wenn wir das Bild eines Raumes sehen, den wir kennen, dann fällt uns sofort auf, daß er viel tiefer aussieht, als er nach unserer Ansicht aussehen müßte.

Die photographische Kamera gibt die geometrischen Verhältnisse richtig wieder und kann nicht lügen, und der Effekt kann auch nicht mit einer Verzerrung durch die Linse erklärt werden. Es muß sich also wieder um einen Fehler bei der Deutung handeln, nämlich um den unbewußten Gebrauch eines falschen

Größenmaßstabes. Wir sind so daran gewöhnt zu finden, daß ferne Gegenstände größer sind als sie aussehen, daß wir sie anders beurteilen als nahe Gegenstände, wenn wir sie anblicken oder an sie denken. Ein Anfänger, der eine Landschaft zeichnet, macht die Berge im Hintergrund bis zu zehnmal so groß wie sie wirklich sein müßten. Wenn umgekehrt die Einzelheiten eines Raumes in ihrer richtigen geometrischen Form gezeigt werden — eigentlich ist das auch die Form, in der sie

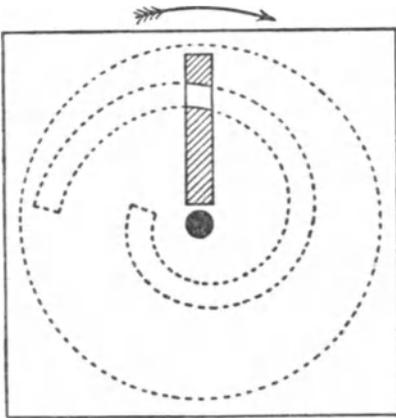


Abb. 38. Vor einer Lampe dreht sich eine Platte mit einem spiralförmigen Schlitz. Davor ruht eine andere Platte mit einem senkrechten Schlitz. Der Versuch wird im Text erklärt. *Curiosities of Light and Sight* von Bidwell, S. 147.

auf der Netzhaut erscheinen —, dann überschätzen wir die Entfernung der Dinge im Hintergrund.

Der Gebrauch eines falschen Maßstabes kann auch eine scheinbare Bewegung vortäuschen. Wenn wir eine Zeitlang in der Eisenbahn sitzen und die Landschaft an den Fenstern vorbeiziehen sehen, dann gewöhnt sich das Auge an die Bewegung und nimmt sie für den Normalzustand. Wenn der Zug hält, dann entsteht für eine kurze Zeit die Täuschung, als bewege die Landschaft sich vorwärts oder der Zug rückwärts. Ein einfacher Versuch von Shelford Bidwell (siehe Abb. 38) zeigt den Effekt sehr deutlich. Vor eine Lampe stellt man eine viereckige Metallplatte mit einem senkrechten Schlitz, und davor eine zweite Platte mit einem spiralförmigen Schlitz, die um eine zur ersten Platte senkrechte

Achse gedreht werden kann. Auf dem Wandschirm erscheint dann ein Lichtfleck von der Stelle her, wo die beiden Schlitze sich kreuzen, während der Rest des Gesichtsfeldes dunkel bleibt. Wenn man jetzt die zweite Platte dreht, dann wandert der Lichtfleck auf dem Schirm nach oben und verschwindet am Rande; im selben Augenblick erscheint unten ein neuer Fleck und fängt auch an, sich nach oben zu bewegen; so ist eine Folge von Flecken dauernd in Bewegung. Wenn das etwa $\frac{1}{4}$ Minute gedauert hat, hält man die Bewegung an. Es scheint dann dem Beobachter so, als bewege der Lichtfleck sich nach unten, und diese Täuschung dauert einige Sekunden lang. Beobachtungen wie diese können nicht auf irgendein Versagen des optischen Mechanismus des Auges zurückgeführt werden, sondern sie hängen mit der Deutung durch das Gehirn zusammen. Man findet noch viele andere Beispiele, wenn man darauf achtet. Der Autofahrer unterliegt z. B. oft einer bestimmten Täuschung. Wenn er über Gelände fährt, das in hügeligen Stufen zu einem Gebirge im Hintergrund ansteigt, dann irrt er sich leicht über die Neigung der Straße. Wenn er einen der Vorberge herunterfährt, dann überschätzt er das Gefälle, und wenn er bergauf fährt, dann unterschätzt er die Steigung, die er überwindet. Wenn er andererseits in der entgegengesetzten Richtung fährt, dann ist er oft grundlos stolz darauf, wie gut sein Wagen läuft. Der Irrtum beruht hier einfach auf einer falschen Einschätzung dessen, was man sieht, und kann leicht vermieden werden, wenn man sich besser von allen Umständen Rechenschaft gibt.

Optisches Beharrungsvermögen

Das optische Beharrungsvermögen gehört zu einer anderen Gruppe von Erscheinungen, die mit der Eigenart der Struktur des Auges zusammenhängen, und die wir nicht ändern können. Wenn Licht auf die Netzhaut fällt, dann dauert der Reiz noch einen Bruchteil einer Sekunde länger als die eigentliche Belichtung. Tyndall hat diesen Effekt in sehr einfacher Weise demonstriert. Eine Lampe wirft einen Lichtkegel, und mit einem weißen Stab durchquert man den Kegel schnell, wie mit einem Schwert, mit dem man das Licht zerhaut. Dann sieht das Auge des Beobachters nicht einen weißen Stock, der vorbeikommt, sondern es sieht eine weiße Scheibe, wie sie, nur heller, von einem weißen Schirm im Wege des Lichtes gebildet würde. Das Auge sieht den

weißen Stab in allen seinen Stellungen zugleich. Wenn man z. B. eine Uhrkette im Licht einer elektrischen Lampe herumwirbelt, dann zeigen die hellen Reflexe von den einzelnen Gliedern die Kette gleichzeitig in einer Reihe von Stellungen, die aufeinanderfolgen. Der Mechanismus der Vorführung von Filmen im Kino beruht ebenfalls darauf, daß jeder optische Eindruck eine bestimmte Zeitlang anhält.

Allgemeines über die Brechung von Licht

Wir haben die Erscheinung der Brechung des Lichtes im Zusammenhang mit dem natürlichen optischen Apparat des menschlichen Auges und mit künstlichen optischen Apparaten, wie

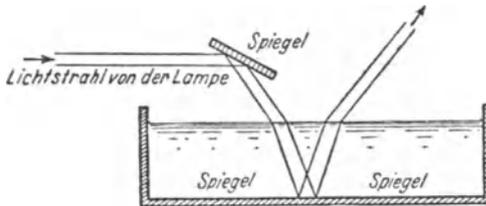


Abb. 39. Der Behälter im Bilde ist gefüllt mit einer schwach gefärbten Flüssigkeit, und seine Vorderwand ist aus Glas, so daß der Gang des Lichtstrahls verfolgt werden kann. Den Boden bildet ein Spiegel.

Mikroskop und Fernrohr, kennengelernt. Viele bekannte Erscheinungen hängen auch noch von der Brechung ab und geben uns nützliche und interessante Beispiele für ihre Wirkung.

Wir wollen uns daran erinnern, daß eine Brechung immer dann auftritt, wenn Wellen von einem Medium in ein anderes übertreten und ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den beiden Medien verschieden ist. Zunächst wollen wir die Erscheinung mit einigen einfachen Versuchen prüfen.

In dem Versuch der Abb. 39 und 40 trifft ein Lichtstrahl auf einen Spiegel, der das Licht so nach unten wirft, daß es in das Wasser in dem Behälter geht; dieses Wasser ist mit einem Farbstoff versetzt, der den Weg der Strahlen sichtbar macht, und die Vorderseite des Behälters ist aus Glas, so daß wir beobachten können, was innen vorgeht. Am Boden des Behälters liegt ein Spiegel, so daß der Lichtstrahl reflektiert wird, wieder durch das Wasser geht und oben ins Freie tritt. Der Knick, den die Strahlen beim Ein- und Austritt machen, ist deutlich zu sehen, und wir

können auch beobachten, daß der Brechungswinkel größer wird, wenn die Strahlen schräger auftreffen. Außerdem sehen wir, daß der Strahl, der von dem Spiegel am Boden des Behälters reflektiert wird, symmetrisch zu dem Wege weitergeht, auf dem er gekommen

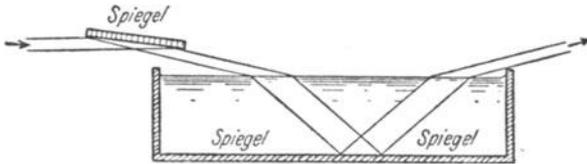


Abb. 40. Dieses Bild zeigt den Gang eines Strahles, der das Wasser schräger trifft als in Abb. 39.

ist. Ein Strahl, der beinahe auf der Oberfläche entlang streift, ehe er eintritt, verläßt die Oberfläche also auch wieder in genau demselben Winkel.

Dies zeigt uns eine sehr wichtige Tatsache, nämlich daß der Weg der Lichtstrahlen umkehrbar ist. Wenn wir dem Lichtstrahl einen Spiegel senkrecht in den Weg stellen, dann geht er auf seinem Wege wieder zurück und wiederholt alle Reflexionen und Abbeugungen in der umgekehrten Reihenfolge. Außerdem bekommen wir einen Begriff davon, wie stark ein Lichtstrahl gebrochen wird, wenn er in Wasser eintritt, und wir sehen die beträchtliche Zunahme der Brechung mit zunehmender Neigung des Einfallswinkels. Tafel VIII B zeigt ebenfalls den Effekt der Brechung.

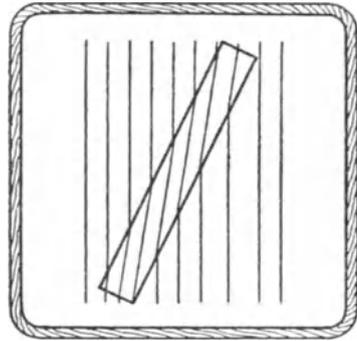


Abb. 41. Ein rechteckiger Glasstreifen liegt auf dem Boden des Behälters und die Wellen gehen über ihn hinweg. Die zeitweilige Knickung verschwindet, sobald die Wellen vorüber sind. Dies zeigt, warum die Richtung eines Lichtstrahls durch eine Glasscheibe mit ebenen parallelen Seiten nicht geändert wird.

Ein Lichtstrahl, der durch ein Fenster ins Zimmer kommt, wird aus seiner Richtung abgelenkt, während er im Glase ist, aber beim Herauskommen nimmt er die alte Richtung wieder an. Der Anblick der Gegenstände draußen wird daher fast gar nicht verändert. Ein Versuch mit den Wellen im Wasserbehälter zeigt deutlich, wie das ge-

schiebt. Ein Glasstreifen mit parallelen Seiten liegt am Boden des Behälters, und wir erzeugen Wellen in der üblichen Weise.

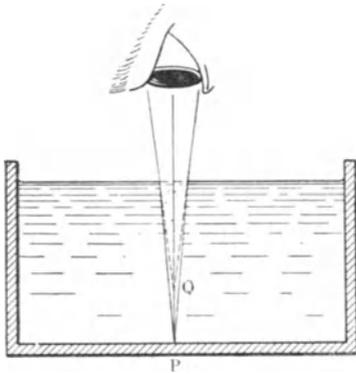


Abb. 42. Der rechteckige Umriß zeigt einen Wasserbehälter im Schnitt. Ein Auge blickt senkrecht nach unten auf einen Gegenstand P auf dem Boden des Behälters. Wegen der Brechung wird das Strahlenbündel, das von P aus das Auge trifft, ausgeweitet, sobald es das Wasser verläßt, und scheint daher von Q her zu kommen. Das Auge ist im Verhältnis zu groß gezeichnet, damit man die Verbreiterung der Strahlen besser sehen kann. Die Tiefe von Q beträgt drei Viertel der Wassertiefe.

den Boden erblicken können, dann scheint das Wasser immer weniger tief zu sein, als es wirklich ist. Das Auge beurteilt die

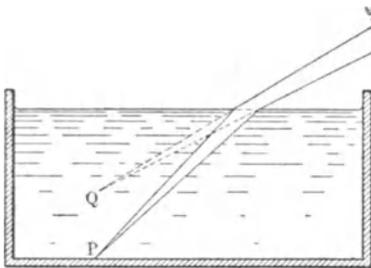


Abb. 43. Wenn die Blickrichtung schräger ist, dann liegt Q näher an der Oberfläche und nicht mehr genau über P .

Viertel der wirklichen. Das scheinbare Flachersein ist größer, wenn die Strahlen schräger kommen. Wenn man von oben in ein

Während die Wellenfront durch das flache Wasser geht, ist sie eine Zeitlang geknickt, aber wenn sie an dem Glase vorbei ist, kommt alles wieder in Ordnung. Diesen Effekt zeigen Tafel X A und Abb. 41. Ein gutes Stück Fensterglas verschiebt daher die Lichtstrahlen nur ein wenig zur Seite, ohne sie aus ihrer Richtung abzulenken, und das bleibt unbemerkt. Wenn aber Vorder- und Hinterseite einer Scheibe nicht parallel sind, dann sehen alle Gegenstände, die man durch das Glas sieht, verzerrt aus; bei minderwertigem Glas ist das nur zu oft der Fall.

Wir sind jetzt soweit, daß wir eine wohlbekannte Erscheinung erklären können. Wenn wir auf eine Wasserfläche herabsehen und den Boden erblicken können, dann scheint das Wasser immer weniger tief zu sein, als es wirklich ist. Das Auge beurteilt die Entfernung eines Gegenstandes nämlich nach der Lage des Punktes, von dem die Strahlen auszugehen scheinen. Wegen der Brechung der Strahlen beim Austritt aus dem Wasser wird das Auge irreführt, wie Abb. 42 und 43 zeigen. Wenn man senkrecht nach unten ins Wasser sieht, dann beträgt die scheinbare Tiefe drei

Aquarium blickt, sieht der Boden daher immer gewölbt aus, und die Fische nehmen beim Herumschwimmen seltsame Formen an. Wenn man ein Boot im flachen Wasser, in dem es gerade noch schwimmen kann, mit einer Stange vorwärts stößt, dann scheint das Wasser vorne immer so flach zu sein, daß man auf Grund zu kommen fürchtet. Wenn man aber über die betreffende Stelle kommt, wird das Wasser scheinbar tiefer, und das Boot bewegt sich weiter. Ein Stock, der teilweise unter Wasser ist, scheint an der Berührungsstelle des Wassers geknickt zu sein, weil jeder Teil von ihm im Wasser anscheinend gehoben wird. Diesen Effekt zeigt Tafel X B.

Die Brechung der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre verändert den Zeitpunkt des scheinbaren Sonnenunterganges. Das

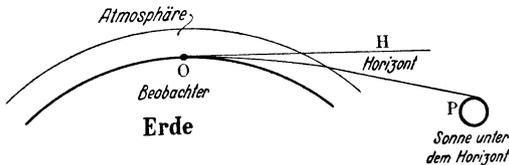


Abb. 44. Der Beobachter sieht nach dem Horizont und empfängt Strahlen von der Sonne unter dem Horizont, weil dieselben beim Durchgang durch die Atmosphäre gebrochen werden.

Licht bewegt sich langsamer in Luft als im materiefreien Raum, und die Sonnenstrahlen werden daher von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt, ehe sie die Erde erreichen. Der Wechsel der Richtung ist am größten, wenn die Strahlen die Oberfläche der Atmosphäre am flachsten treffen, und das ist der Fall, wenn die Sonne am Horizont steht. Strahlen von einem Punkt P der Sonnenscheibe werden, wie Abb. 44 zeigt, einen Beobachter in O treffen, obgleich sein Horizont in der Richtung OH liegt, in einer Ebene mit der Oberfläche von unbewegtem Wasser in O . Der Punkt P ist also noch sichtbar, obgleich er unter dem Horizont liegt. Geometrisch geht die Sonne demnach früher unter als optisch, und der Betrag des Richtungswechsels der Strahlen ist so groß, daß sie geometrisch gerade untergegangen ist, wenn ihr unterer Rand den Horizont zu berühren scheint.

Im nächsten Kapitel werden wir die Zerlegung des weißen Lichtes in seine farbigen Bestandteile während der Brechung betrachten. Wir wollen daraus vorwegnehmen, daß die blauen und grünen Strahlen stärker gebrochen werden als die gelben und

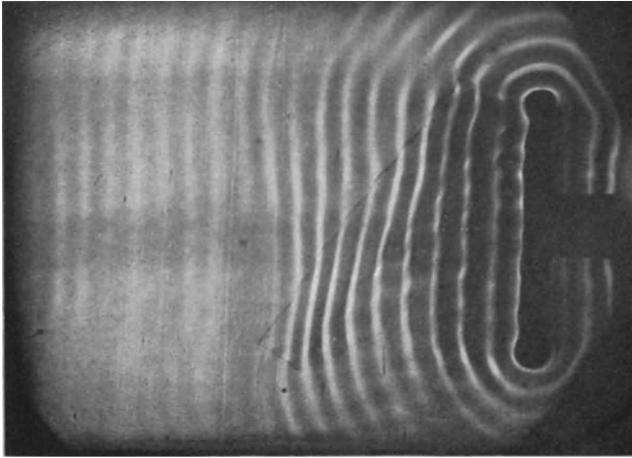
roten. Die letzten Strahlen, die uns von der untergehenden Sonne erreichen, sind daher blaugrün, wenn nicht, wie es meistens der Fall ist, andere Bedingungen störend dazwischentreten. Daher kommt der sogenannte „grüne Strahl“, der manchmal einige Sekunden lang gerade vor Aufgang oder nach Untergang der Sonne aufleuchtet, und nach dem man Ausschau hält, wenn die Luft sehr ruhig und gleichmäßig ist.

Selbst wenn Licht von einem Gas zu einem anderen übergeht, wird es gebrochen, wenn die Dichte der Gase verschieden ist; das kann auch in einem und demselben Gas bei Dichteschwankungen der Fall sein, die durch wechselnden Druck oder wechselnde Temperatur verursacht sein können. Wenn man ein Feuer im Freien anzündet, dann flimmern die Gegenstände, die man durch den Raum über den Flammen sieht, weil die Lichtstrahlen durch die unregelmäßige Mischung heißer und kalter Gase hin und her gebrochen werden. Dasselbe beobachtet man, wenn man durch die heiße Luftschicht über einer Kerze oder einer Glühlampe blickt. In heißen Ländern ist die Luft nahe an der Erde durch die Berührung mit dem warmen Boden erhitzt, und die fernen Einzelheiten einer Landschaft scheinen daher niemals in Ruhe zu sein.

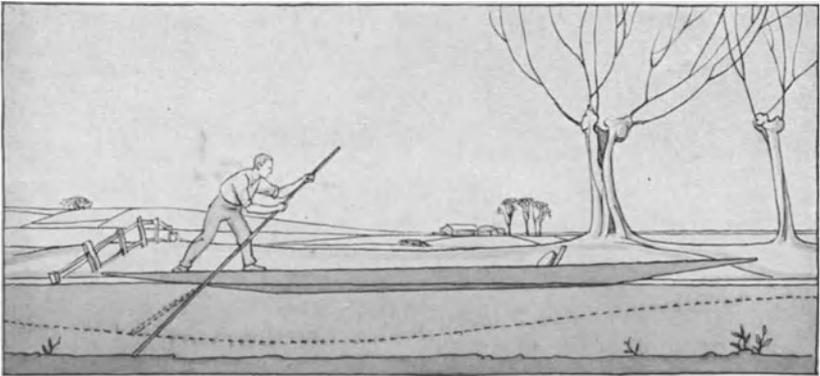
Totalreflexion

Es gibt eine Erscheinung, die sogenannte „Totalreflexion“, die viele merkwürdige Effekte verursacht. Wir wollen noch einmal an den Versuch der Abb. 40 anknüpfen; dort beobachteten wir, daß der Strahl, der nach der Reflexion am Boden des Gefäßes gerade noch aus dem Wasser herauskam, vorher einen ziemlich großen Winkel mit der Wasseroberfläche bildete. Wir können uns nun fragen: „Was geschieht mit einem Strahl, der die Oberfläche von unten noch flacher trifft?“ Der Versuch ist leicht zu machen, wenn wir die Lage der Spiegel verändern. Der Spiegel M_1 schickt jetzt einen Lichtstrahl senkrecht nach unten in den Behälter zu einem zweiten Spiegel M_2 (Abb. 45), dessen Neigung verändert werden kann. Wenn wir ihn allmählich immer steiler stellen, dann trifft der reflektierte Strahl die Wasseroberfläche immer schräger. Bei einer bestimmten Neigung kommt der Strahl gerade noch heraus, wie wir oben gesehen haben, danach kann er nicht mehr heraus und wird wieder nach unten reflektiert. Diese Reflexion ist vollkommen, besser als wenn wir die Wasser-

Tafel X

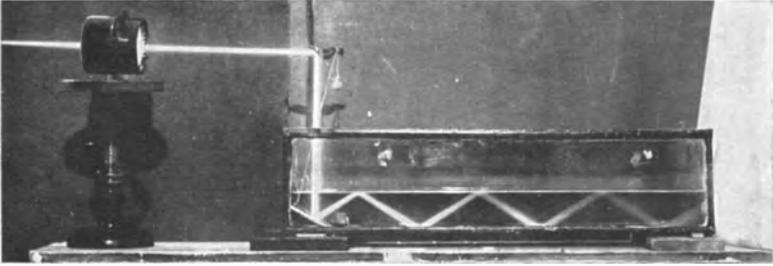


A. Wellen gehen über ein rechteckiges Stück Glas hinweg, das auf dem Boden des Behälters liegt. Man sieht, wie sie vorübergehend aus der Ordnung kommen. (S. 54.)

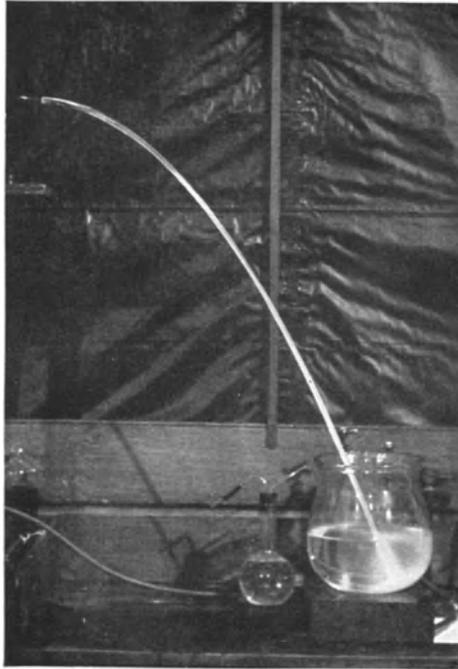


B. Die gestrichelte Linie unter dem Boot zeigt, wie dem Mann im Boot das Flußbett erscheint, wenn er nach unten blickt. (S. 55.)

Tafel XI



A. Diese Photographie des Versuches selbst zeigt mehrere Totalreflexionen an der Wasseroberfläche. Man beachte, daß der Strahl am Ende beim Herauskommen gebrochen wird. Der Spiegel M_2 (Abb. 45) ist etwas weiter gedreht, als in der Photographie der Tafel VIII B. (S. 57.)



B. Ein Versuch, der von Tyndall stammt und die Totalreflexion zeigt. Ein Lichtbündel trifft den fallenden Wasserstrahl oben bei seinem Ausgangspunkt und wird von ihm mitgeführt. Das Licht kommt von einer Bogenlampe außerhalb des Behälters und wird durch eine Linse in der Wand desselben auf den Wasserstrahl konzentriert. Bogen und Linse sind auf der Photographie nicht zu sehen. (S. 57.)

oberfläche durch einen versilberten Spiegel ersetzen würden; daher hat die Erscheinung ihren Namen. Wenn der Behälter im Verhältnis zur Tiefe des Wassers lang genug ist, dann kann die Reflexion an der Oberfläche und am Spiegel am Boden des Gefäßes mehrmals wiederholt werden. Dies zeigt uns die Photographie der Tafel XIA.

Eine sehr einfache Methode zur Beobachtung der Totalreflexion besteht darin, daß man einen Löffel in ein Glas Wasser stellt und die Wasseroberfläche von unten in einem geeigneten

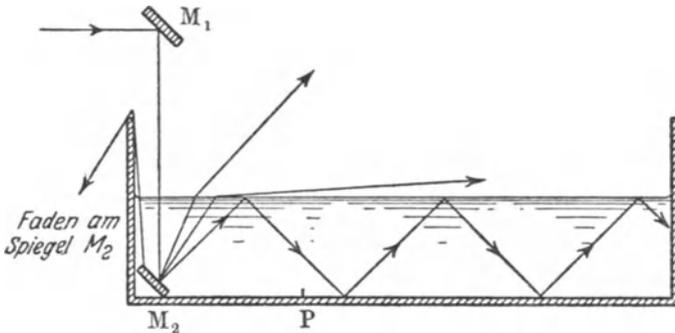


Abb. 45. Querschnitt durch einen Wasserbehälter, der die Erscheinung der Totalreflexion zeigen soll. Ein Lichtstrahl trifft den Spiegel M_1 und wird so reflektiert, daß er den Spiegel M_2 trifft. Dieser kann mit Hilfe eines Fadens gedreht werden. In einer Stellung reflektiert er einen Lichtstrahl, der leicht aus dem Wasser herauskommt, in einer zweiten Stellung kann der Strahl gerade noch heraus und streicht auf der Oberfläche des Wassers entlang; in einer dritten Stellung wird er innen an der Oberfläche des Wassers reflektiert. Auf dem Boden des Behälters liegt ein Spiegel.

Winkel betrachtet. Ein Teil des Löffels wird an der Unterseite der Wasseroberfläche gespiegelt, und man ist von der Helligkeit der Erscheinung überrascht.

Die Totalreflexion wird bei der Konstruktion optischer Instrumente, z. B. bei Feldstechern, viel benutzt. Im einfachsten Falle verwendet man ein Glasprisma, von dem zwei Flächen senkrecht aufeinander stehen. Das Licht kommt an einer Fläche herein und geht an der anderen wieder heraus, nachdem es an der dritten, die mit den beiden anderen gleiche Winkel bildet, total reflektiert worden ist.

Ein Experiment von Tyndall, das er vor vielen Jahren in der Royal Institution vorgeführt hat, zeigt wunderschön die Erscheinung der Totalreflexion. Der Behälter in der Abbildung links oben, in Tafel XIB, ist gefüllt mit Wasser, das in dauerndem Strahle

verändert, nur ist der Weg des Strahles gekrümmt, wie Abb. 47 es zeigt, anstatt scharf geknickt zu sein wie in Abb. 46. So können Strahlen von fernen Gegenständen nicht nur auf dem gewöhnlichen direkten Wege unser Auge treffen, sondern auch auf dem gekrümmten Wege der Abb. 47. Dann würden Strahlen von einem Baum oder vom Himmel hinter demselben das Auge so treffen, als kämen sie vom Boden, und dadurch bekommt man natürlich den Eindruck, als sei Wasser zwischen Beobachter und Baum, da man Wasser ja immer an seinem Reflexionsvermögen erkennt. Oft sieht man dies an heißen Tagen auch in unseren Breiten, wenn das Straßenpflaster sehr heiß ist. Besonders wenn das Auge zufällig wegen der Unebenheit des Geländes mehr oder weniger auf gleicher Höhe mit dem Boden in einiger Entfernung ist, glaubt man, von dort Spiegelungen vom Himmel oder von hellen, bunten Kleidern zu sehen.

Einige seltsame Erscheinungen, denen man beim Rundfunk begegnet, müssen in einer Weise erklärt werden, die große Ähnlichkeit mit unserer Beschreibung der Luftspiegelungen hat. In den höheren Bereichen der Atmosphäre gibt es Schichten, die die Radiowellen reflektieren und wieder auf die Erde lenken. Ohne diese Erscheinung würde eine Übertragung auf große Entfernungen praktisch unmöglich sein, besonders bei kurzen Wellen, sagen wir von etwa 50 m, weil diese Wellen nicht in genügender Intensität der Krümmung der Erde folgen würden. Wie wir schon gesehen haben, besitzen diese Wellen genau denselben Charakter wie Lichtwellen, so daß die Analogie eine sehr nahe ist. Die betreffenden Luftschichten enthalten eine Anzahl elektrisch geladener Moleküle und freier Elektronen, deren Anwesenheit durch Strahlung von der Sonne verursacht wird, und zwar besonders durch Strahlung von kürzerer Wellenlänge, als die des Lichtes ist. Die Energie dieser Strahlungen wird dadurch verbraucht, daß Moleküle teilweise zertrümmert werden und Elektronen verlieren, die sich wieder an andere Moleküle anhängen, so daß positive und negative Ladungen und Elektronen in der Atmosphäre vorhanden sind. Es findet auch dauernd eine Wiedervereinigung der geladenen Teilchen statt, so daß der Zustand der Atmosphäre dem Gleichgewicht zwischen diesen beiden Vorgängen entspricht. Wenn die Strahlungen intensiv sind, dann elektrisieren sie die Schichten, durch die sie kommen, in stärkerem Maße; hierbei wird ihre Energie verbraucht, so daß die Luft an der Erdoberfläche nie-

mals stark beeinflußt wird. In höheren Schichten ist die Elektrizierung so stark, daß sie einen merklichen Einfluß auf die Ausbreitung von Radiowellen hat. Das hat folgenden Grund. Wenn die Wellen von den niedrigen Luftschichten in die elektrisierten Schichten kommen, dann werden sie gebrochen oder zur Seite gelenkt; in derselben Art und im gleichen Sinne wie ein Lichtstrahl gebrochen wird, wenn er aus Wasser in Luft tritt, wie in dem Versuch der Abb. 39. Dieser Effekt ist experimentell beobachtet worden, und man kann ihn auch auf Grund der elektromagnetischen Lichttheorie berechnen. Für den vorliegenden Zweck muß es genügen, die Tatsache als gegeben hinzunehmen.

Ebenso wie nun der Lichtstrahl der Abb. 45 nach innen reflektiert wird, wenn er die Oberfläche von unten unter einem genügend schrägen Winkel trifft, so werden unter ähnlichen Bedingungen die Radiowellen an den elektrisierten Schichten der höheren Atmosphäre reflektiert. Wenn die Elektrizierung stark genug ist, wird eine Reflexion auch dann erfolgen, wenn die Strahlen die Schicht senkrecht treffen, aber sehr oft, besonders nachts, wenn die Elektrizierung nicht so stark ist, findet die Reflexion nur dann statt, wenn die Wellen genügend schräg ankommen. Der reflektierte Strahl kehrt zur Erde zurück und wird vielleicht an Stellen, die weit genug entfernt sind, aufgefangen, während dazwischen keine Spur von ihm zu finden ist. Ebenso kann in dem Versuch der Abb. 45 der reflektierte Lichtstrahl den Boden des Wasserbehälters an keinem Punkt treffen, der dem Spiegel M_2 näher liegt als der Punkt P in der Zeichnung.

Der Übergang von einer unelektrisierten Atmosphäre zu einer Schicht, die getrennte elektrische Ladungen enthält, ist nicht plötzlich und unvermittelt und braucht dies auch nicht zu sein. Je allmählicher er ist, um so mehr wird der Weg der reflektierten Strahlen während der Reflexion eine gekrümmte Form annehmen wie in Abb. 47.

Es gibt mindestens zwei Schichten in der Atmosphäre, die Radiowellen reflektieren. Die eine von ihnen liegt in etwas über 100 km Höhe; sie ist seit langer Zeit als die Kennelly-Heavyside-Schicht bekannt. Eine zweite Schicht wechselt sehr stark in der Höhe, sie ist einige Male so weit von der Erdoberfläche entfernt wie die erste und wurde 1927 von Professor Appleton entdeckt. Signale, die in East London College ausgesandt wurden, konnten in Kings College im Zentrum der Stadt empfangen

werden, wie das Echo von Schallwellen von einer Zimmerdecke, und von jedem Signal erhielt man mehr als ein Echo. Die Aufnahme der Abb. 48 zeigt uns den Empfang einer solchen interessanten Reihe von Echos. Die Wellenlinie ist eine Zeitskala, 1115 vollständige Wellen entsprechen einer Sekunde. Die Spitze G zeigt den Augenblick, in dem das Signal auf dem gewöhnlichen Wege an der Erdoberfläche empfangen wurde, praktisch in demselben Zeitpunkt, in dem es ausgesandt worden war. Bei E ist das Zeichen des Ankommens des ersten Echos von der niedrigsten Schicht, bei F kommt das Signal von der höheren Schicht zurück, und bei S ist ein schwaches Echo aus einer so großen Entfernung, daß man seine Ursache noch nicht kennt.

Interessant ist, daß auch der Schall Schichten in der höheren Atmosphäre findet, an denen er reflektiert werden kann, wenn er



(e)

Abb. 48. Ein Diagramm, das die Reflexion von Radiowellen an verschiedenen atmosphärischen Schichten zeigt (E. V. Appleton).

sie genügend schräg trifft. Diese Schichten hängen wahrscheinlich irgendwie mit den anderen, von denen wir eben gesprochen haben, zusammen. Die Absorption der Sonnenstrahlung, die die Elektrisierung hervorruft, muß Wärme erzeugen, und vor kurzem ist berechnet worden, daß es Schichten in der höheren Atmosphäre geben muß, deren Temperatur außerordentlich hoch ist. In heißer Luft bewegt sich der Schall schneller als in gewöhnlicher Luft, und so erfolgt die Ablenkung der Schallstrahlen ganz analog zu der der Lichtstrahlen, wie wir sie kennengelernt haben. Daher kommt es, daß das Echo von sehr starken Geräuschen nicht nur nahe am Ursprungsort gehört wird, sondern auch auf große Entfernungen hin, während man in dem Gelände dazwischen nichts hören kann.

Ein sehr interessantes Beispiel der Anwendung der Gesetze von Reflexion und Brechung findet man in der Art, wie die Steinschleifer die Edelsteine und besonders den Diamanten behandeln. Man ist immer erstaunt, wenn man liest, daß etwa die halbe Masse eines rohen Diamanten weggeschnitten wird, ehe

der Stein seine volle Wirkung als Edelstein entfalten kann. Die Erklärung besteht darin, daß der Diamant eine oder die andere ganz bestimmte Form annehmen muß, von der man weiß, daß sie die beste Wirkung gibt. Am besten ist der sogenannte „Brilliant“-schliff, der vom Kardinal Mazarin erfunden sein soll. Abb. 49 zeigt ihn im Quer- und Längsschnitt. Die beiden Zeichnungen unten zeigen die Lage der Facetten oberhalb und unterhalb des Gürtels.

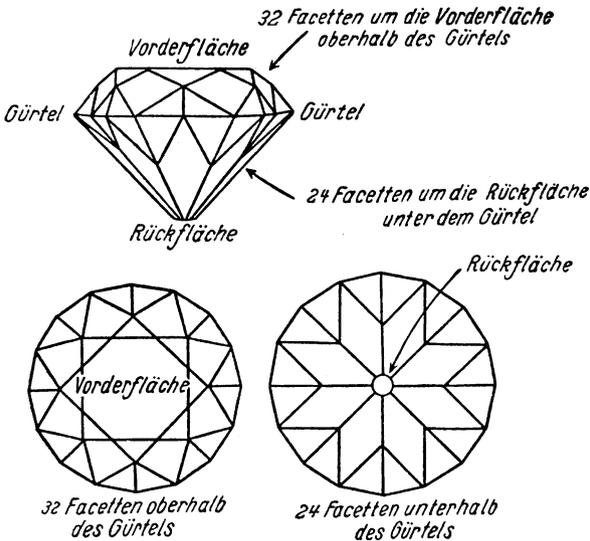


Abb. 49. Das obere Bild zeigt im Querschnitt einen Diamanten mit Brillantschliff. Die unteren Bilder zeigen die Anordnung der Facetten ober- und unterhalb des Gürtels.

Wenn ein Diamant in dieser Form geschliffen ist, dann kann kein Strahl von vorn nach hinten durch ihn hindurchgehen. Wenn man ihn mit der rückwärtigen Fläche zum Auge und der Vorderfläche vom Auge abgewandt gegen das Licht hält, sieht er schwarz aus. Alle Strahlen, die die Vorderseite treffen, werden zurückgelenkt und gehen an der Vorderseite wieder heraus. Sie werden im allgemeinen nicht genau in derselben Richtung zurückgehen, sondern ein Strahl wird gewöhnlich zu einer Facette herein- und zu einer anderen wieder herauskommen. In Abb. 50 sind einige solche Wege gezeichnet, die das Licht nehmen kann. Dies ist der Grund für das Strahlungsvermögen des Diamanten, das ihn zu

$OB \dots$ wieder heraus, aber der erste und der letzte kommen nur eben noch heraus und gehen dann an der Oberfläche entlang. Strahlen, die von den Punkten 1 oder 2 in den Richtungen PO und QO nach O gehen, können nicht heraus und werden entlang OP' und OQ' total reflektiert. Der Winkel $A'O'E'$ beträgt nur 49° . Wenn wir uns jetzt den Schnitt durch den Diamanten in Abb. 50 ansehen, dann erkennen wir, wie vorteilhaft diese große Möglichkeit zur Totalreflexion ausgenutzt ist. Ein Strahl, der direkt von vorn

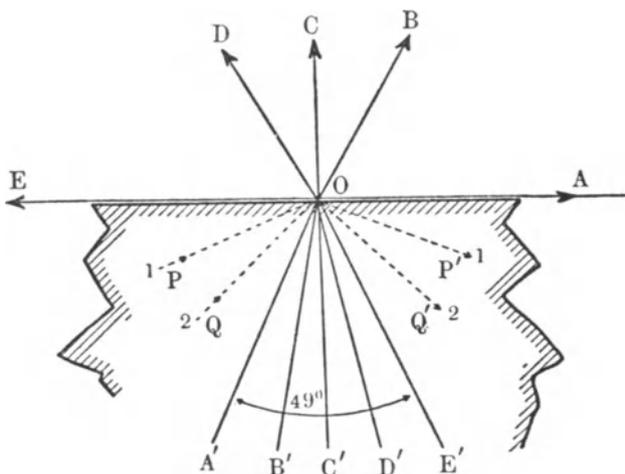


Abb. 51. Der Brechungsindex des Diamanten ist sehr groß; ein Strahl $A'O'A$ kommt gerade noch heraus, aber Strahlen wie QOQ' werden total reflektiert. Die Wege können in beiden Richtungen verfolgt werden.

senkrecht zur Tafelfläche hineinkommt, wird total reflektiert, sobald er unterhalb des Gürtels eine Facettenfläche trifft; er geht quer durch, wird noch einmal in der gleichen Weise reflektiert, und kommt senkrecht wieder heraus auf dem umgekehrten Wege zu dem, auf dem er angekommen ist. Kommt er zu einer der Facettenflächen oberhalb des Gürtels hinein und ist immer noch parallel zur Achse des Steines, dann wird er an einer anderen der oberen Facetten wieder herauskommen, und sogar, wenn er ursprünglich zur Achse geneigt ist, kann er immer noch vorn herauskommen. Ein oder zwei mögliche Wege sind im Bilde eingetragen, sie können der Bewegung des Lichtes in beiden Richtungen auf diesen Wegen entsprechen.

Ein Versuch im Hörsaal zeigt diesen Effekt sehr schön. Wir lassen ein enges Lichtbündel von einer Bogenlampe von außen in den Saal kommen und halten einen Diamanten einige Meter vom Eintrittspunkt entfernt so, daß die Tafelfläche senkrecht zum Lichtstrahl steht. Dann ist die ganze Wand des verdunkelten Raumes besät mit Hunderten von Reflexionen vom Diamanten, die bei jeder Bewegung des Steines auf komplizierten Wegen durcheinandergehen und die erstaunlichsten Muster bilden (Tafel XIIA).

Andere Steine, wie der Titanit oder der Zirkon, zeigen diesen Effekt ebenso schön, aber sie sind als Edelsteine nicht so wertvoll, weil sie viel weicher sind als der Diamant. Reflexe vom Zirkon zeigt die Tafel XIIB.

Farbe

Das Spektrum der Farben

Das Licht besitzt eine Eigenschaft, die wir Farbe nennen. Wir wollen uns nun fragen: Wovon hängt die Farbe beim Mechanismus des Lichtes ab?

Wenn wir das Licht als einen Wellenzug in einem Medium, das wir Äther nennen, betrachten, dann kann man sofort folgende Antwort geben: die Farbe hängt von der Wellenlänge des Lichtes ab, d. h. von dem Abstand zwischen einem Wellenberg und dem nächsten. Mit dem Beweis für diese einfache Behauptung wollen wir lieber noch ein wenig warten, aber es wird nützlich sein, die Tatsache nicht zu vergessen.

Das Licht von irgendeiner Quelle kann gewöhnlich in eine Reihe von Bestandteilen zerlegt werden, die einzeln die Empfindung von Farbe hervorrufen. Diese Bestandteile können nicht scharf getrennt werden, sondern sie gehen allmählich ineinander über. Die einfachste Trennungsmethode beruht auf der Verwendung eines Glasprismas. Auf diesem Wege begann Newton eine große Reihe von Versuchen, die die Grundlage der physikalischen Optik bildeten und eine seiner größten Leistungen auf naturwissenschaftlichem Gebiete sind. Seine Versuchsanordnung zeigt Tafel XIIC und IB. Ein Sonnenstrahl kommt durch ein Loch im Vorhang in ein dunkles Zimmer und fällt auf ein Glasprisma, wie die Abbildung zeigt. Beim Herauskommen ist die Trennung beendet, das Licht wird zu einem farbigen Band, das wir als Spektrum kennen, auseinandergezogen. Das rote Ende des Spektrums wird von den Strahlen gebildet, die beim Durchgang durch das Prisma am wenigsten, das violette Ende von denen, die am stärksten abgelenkt werden. Andere Farben liegen ohne irgendwelche scharfen Grenzen zwischen den beiden; nach einer natürlichen Einteilung findet man im Spektrum rot, orange, gelb, grün und verschiedene blaue und violette Farben. Eine Farbenphotographie des Spektrums finden wir in Tafel XIV D.

Die roten Wellen sind, wie wir wieder vorwegnehmen wollen, die längsten im Spektrum, und am anderen Ende finden wir die kürzesten. Wir haben schon einmal das Beispiel einer Reihe marschierender Leute benutzt, die, schräg zu ihren Reihen, auf schwieriges Gelände kommen. Ebenso wie die Reihe die Tendenz

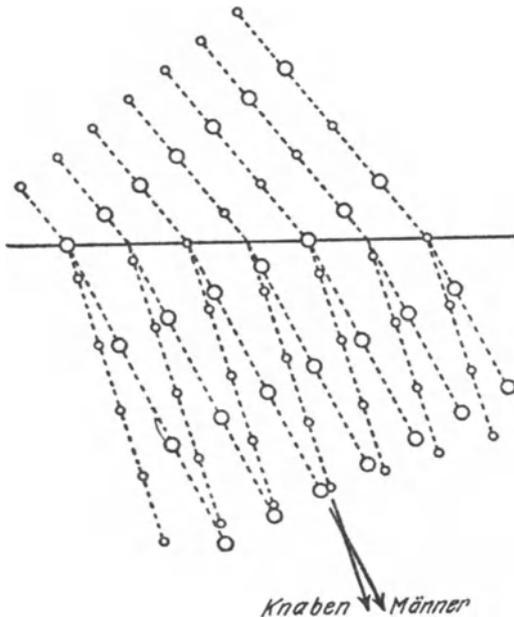


Abb. 52. Im oberen Teil der Zeichnung marschieren abwechselnd Männer (große Kreise) und Knaben (kleine Kreise) über ebenen Boden und bleiben in Reih und Glied. Unten ist der Boden uneben und die Reihen der Knaben werden stärker abgelenkt als die der Männer. Um die Analogie aufrechtzuerhalten, nehmen wir an, daß jede Reihe für sich gerade bleibt und daß sich die einzelnen Reihen gegenseitig nicht stören. Die Abstände zwischen den Reihen entsprechen nicht Wellenlängen.

hat, herumzuschwenken und mehr parallel zu der Trennungslinie zwischen gutem und schlechtem Boden zu verlaufen, so ändern auch die fortschreitenden Wellen ihre Richtung im selben Sinne. Dieses Beispiel können wir jetzt erweitern. Wenn die marschierenden Reihen statt der Männer von kleinen Knaben gebildet werden, dann wird die Abweichung größer sein, weil ihre kurzen Beine von dem unebenen Boden, auf den sie kommen, mehr behindert werden. Wenn, wie in der Abb. 52, Männer und

Knaben zusammen da sind, dann werden sie voneinander getrennt werden. Die Reihen der Knaben werden stärker herumschwingen als die der Männer, und sie werden nicht nur hinter den anderen zurückbleiben, sondern wirklich in einer anderen Richtung weiter marschieren. Ebenso werden die kurzen Wellen durch das Prisma von den langen getrennt, und das Beispiel kann uns helfen, uns daran zu erinnern, daß es die kurzen sind, die stärker abgebeugt werden als die langen.

Wellen jeder Länge und Farbe bewegen sich im leeren Raume mit derselben Geschwindigkeit. Wenn das nicht so wäre, würde ein Stern beim Verschwinden hinter einem anderen Himmelskörper, etwa dem Monde, gefärbt erscheinen. Wenn die blauen Strahlen die langsamsten wären, würde der Stern beim Unsichtbarwerden blau sein und dementsprechend rot wieder zum Vorschein kommen. In einem durchsichtigen Medium bewegt sich das Licht langsamer als im leeren Raume, und gewöhnlich sind die kurzen oder blauen Wellen langsamer als die roten.

Die Abbildungen zeigen eine Erweiterung von Newtons Versuch. Ein kleiner Teil des Spektrums geht durch ein Loch im Schirm und fällt auf ein zweites Prisma. Man sieht dann, daß die Zerlegung durch das erste Prisma vollständig war, denn das ausgewählte Lichtbündel wird nicht wieder zu einem Spektrum auseinandergezogen wie das erste, und es erscheinen keine neuen Farben. Eine kleine Verbreiterung tritt allerdings auf, weil die beiden Spalte, durch die das Licht gekommen ist, eine gewisse Breite haben müssen und die Strahlen sich daher überschneiden. Deshalb läßt der zweite Spalt eine Auswahl von Wellenlängen oder Farben durch, die das zweite Prisma etwas ausbreitet. Je enger die Spalte sind und je weniger sie durchlassen, um so schwächer ist diese Erscheinung. Wenn umgekehrt der erste Spalt weit geöffnet ist, dann überlagern sich die Flecken von den verschiedenen Farben auf dem Schirm so sehr, daß in der Mitte alle Farben zusammen Weiß ergeben, wie in Tafel XIV A.

Diese Versuche zeigen, daß die Brechung durch ein Prisma oder überhaupt jede Anordnung, bei der die Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Wellenlänge ausgenutzt wird, eine Trennung hervorruft, die sofort vollständig ist. Dem Auge erscheint sie als eine Zerlegung in Farben, aber wir werden gleich zeigen, daß man sie besser als eine Trennung von Wellen verschiedener Länge bezeichnet.

Die Eigenschaften des Lichtes

Wir kommen jetzt zu einem sehr wichtigen Punkt. Wenn das Prisma die Strahlen zerlegt hat, dann kann man, wie wir gesehen haben, keine weitere beobachtbare Trennung hervorrufen. Wir sind also hier am Ende der sichtbaren Eigenschaften des Lichtes. Es hat eine bestimmte Geschwindigkeit, die im leeren Raume für alle Wellenlängen die gleiche ist, und sonst von der Wellenlänge und der Art des Mediums abhängt, durch das das Licht kommt, daher gibt es die Erscheinung der Brechung und die Möglichkeit der Spektralanalyse. Das Licht hat außerdem natürlich eine bestimmte Intensität und eine Wellenlänge. Das ist alles, soweit das Sehen in Frage kommt. Es gibt noch eine andere Eigenschaft, nämlich den Polarisationsgrad, der in sehr einfacher Weise davon abhängt, wie die Wellen ihre Bewegung ausführen. Die Meereswellen steigen und fallen, aber beim Licht gibt es keine solche bevorzugte Richtung, die Bewegung kann ebenso gut von rechts nach links wie von oben nach unten oder in irgendeiner Richtung dazwischen erfolgen. Wir werden diese Erscheinung später betrachten, jedenfalls sieht das Auge nichts von ihr, und sie soll nur der Vollständigkeit halber hier erwähnt werden.

Das Wesen eines Lichtstrahles ist also, für das Auge wenigstens, vollständig definiert, wenn Intensität und Wellenlänge von ihm angegeben sind. Wenn er zusammengesetzt ist, d. h. aus einer Mischung von Strahlen verschiedener Wellenlänge besteht, dann muß man außerdem noch die Intensität jedes einzelnen Bestandteiles angeben, aber das ist auch alles. Unsere Farbempfindungen bilden zwar eine unendliche Mannigfaltigkeit, aber das kommt nicht von den Unterschieden im Wesen des Lichtes selbst, sondern von Verschiedenheiten in der Reaktion von Auge und Gehirn. Diese beiden Dinge darf man nicht verwechseln.

Der Bereich der Wellenlängen

Die Vorstellung, daß das Licht eine Art Wellenbewegung ist, hat uns, bis jetzt wenigstens, ausgezeichnete Dienste geleistet. Die wesentlichen Eigenschaften des sichtbaren Lichtes sind gerade solche, daß sie bequem als Eigenschaften von Wellen beschrieben werden können. Deshalb liegt es nahe, zu fragen, ob wir nicht

irgendwelche Erfahrungen über das Verhalten von anderen Wellen, etwa Wasserwellen, haben, nach denen wir ähnliche Erscheinungen im Falle des Lichtes erwarten sollten.

Eine sehr auffallende Erscheinung bei Meereswellen sind nun die großen Unterschiede zwischen den verschiedenen Wellenlängen, d. h. den Abständen zwischen je zwei Wellenbergen, die aufeinanderfolgen. Am einen Ende haben wir die langen Wogen im Ozean, am anderen die winzigen Wellchen, die ein leichter Windstoß erregt. Wenn wir von diesem Gesichtspunkt aus das Licht betrachten, dann fällt uns sofort eine sehr merkwürdige Tatsache auf. Es sind nämlich nur die Wellen sichtbar, deren Wellenlänge in einen ganz engen Bereich fällt.

Die Wellenlänge des roten Lichtes beträgt etwas weniger als $\frac{1}{10000}$ cm, und die der kurzen Wellen am anderen Ende des Spektrums ist nicht ganz die Hälfte davon. Alle anderen sichtbaren Wellen liegen zwischen diesen zwei Grenzen.

Sind deshalb andere Wellenlängen unmöglich? Gibt es noch etwas beim Licht, das wir nicht bemerkt haben, so daß unsere Wellentheorie versagt, weil sie die Grenzen nicht angibt, denen das Sehen unterworfen ist?

Das Experiment zeigt uns, daß der Fehler nicht bei der Wellentheorie zu suchen ist; nein, die Beschränkung liegt an unseren Sehkräften, und nicht an dem, was man sehen könnte, wenn unsere Augen anders eingerichtet wären. Wir kennen heutzutage einen gewaltigen Bereich von Wellenlängen, von den Radiowellen, die nach Hunderten von Metern zählen, herunter bis zu den Wellen, die von einigen radioaktiven Substanzen ausgehen, und die einige zehntausendmal kürzer sind als alles, was wir sehen können. Der Bereich, in dem unsere Augen wirksam sind, ist nur ein winziger Bruchteil des ganzen Gebietes, unabhängig davon, welchen Maßstab wir unserer Schätzung zugrunde legen.

Vorläufig wollen wir uns auf diesen engen Bereich beschränken, der natürlich ungeheuer wichtig für uns ist, weil ja alle Erscheinungen des Sehens ihm angehören. Alles, was mit Farbe zu tun hat, hängt davon ab, wie die Wellen in diesem Bereich erzeugt werden, wie sie durch Reflexion an der Oberfläche von Körpern oder beim Durchgang durch andere Körper verändert, und wie sie schließlich durch Auge und Gehirn aufgenommen und gedeutet werden.

Die Wirkung von Farbstoffen

Wir wollen eine Versuchsanordnung aufbauen, bei der das Licht einer Bogenlampe durch einen Spalt geht und dann auf eine Linse trifft, die ein Bild des Spaltes auf einem Schirm entwirft. Vor den Spalt halten wir ein Prisma, dann wird das enge, weiße Bild in ein buntes Spektrum auseinandergezogen, wie in Tafel XIV D. Dieses Spektrum können wir als eine Reihe sich überlagernder Spaltbilder ansehen, die von den verschiedenen Wellenlängen herkommen, in die das ankommende Licht durch das Prisma zerlegt wird. Halten wir jetzt ein Stück rotes Glas vor den Spalt, dann werden alle Farben im Spektrum außer dem Rot ausgelöscht (Tafel XIV E). Wir bemerken, daß keine Farbe in eine andere umgewandelt wird, und daß es sich nur um eine zerstörende Wirkung handelt. Ein Stück rotes Glas hat seine besondere Eigenschaft nicht daher, daß es andere Farben in Rot verwandelt, sondern es vernichtet alles außer dem Roten. Dies ist überhaupt das wesentliche Merkmal jeder Färbung; die Farbe beruht auf einem Auslesen und Entfernen aller Farbtöne außer einem Rest; dieser Rest bildet dann die Farbe des Gegenstandes, der die Auslese besorgt hat.

Wenn wir uns das rote Bild genau ansehen, das bei Gebrauch des roten Glases auf dem Schirm übrigbleibt, dann sehen wir, daß das Bild zwar oben und unten scharf ist, aber nicht an den Seiten. Die Ränder oben und unten sind Bilder von den Enden des Spaltes, die von jeder Wellenlänge in derselben Höhe entworfen werden, und die Verschwommenheit an den Seiten zeigt, daß das Licht nicht von einer genau bestimmten Wellenlänge herkommt, sondern von einem engen Bereich von Wellenlängen in der Gegend des Roten. Daher überlagern sich die Bilder ein wenig.

Wenn wir ein Stück gelbes Glas nehmen, dann wird diese Überlagerung sehr deutlich (Tafel XIV F). Ja, das Spektrum scheint beim ersten Blick kaum verändert zu sein. Wenn wir es genauer betrachten, sehen wir, daß das letzte blaue Ende verschwunden ist. Es ist überraschend, daß das gelbe Glas so einen gemischten Bereich von Wellenlängen durchlassen sollte. Wir würden sagen, die Farbe „Gelb“ sei rein. Da unser Versuch uns zeigt, daß Licht, das von gelbem Glas durchgelassen wird, eine große Reihe von Wellenlängen enthält, von denen jede einzeln

auf das Auge einen anderen Farbeindruck machen würde, so müssen wir schließen, daß Prisma und Auge uns nicht dieselbe Art von „Reinheit“ geben. Dies ist eine sehr interessante Erfahrung beim Sehen; bevor wir darauf näher eingehen, wollen wir die Erscheinung der Färbung noch etwas weiter beobachten.

Gefärbte Flüssigkeiten rufen, ebenso wie gefärbtes Glas, Farben dadurch hervor, daß sie Farben zerstören. Derselbe Vorgang bewirkt auch die Färbung von festen Körpern. Wenn wir eine Wasserfarbe auf ein Stück weißes Papier auftragen, dann erzeugen wir nicht Licht von einer besonderen Eigenschaft, sondern wir zerstören welches, das vorher bestand. Das weiße Papier, auf das wir malen, wirft alle auftreffenden Farben zurück. Wir tragen darauf eine Schicht einer durchsichtigen Flüssigkeit auf, durch die das Licht zweimal durchgeht, ehe es unser Auge trifft, nämlich einmal auf dem Wege zu dem weißen Papier darunter, und dann, nachdem es dort reflektiert worden ist. Wenn diese Flüssigkeit alle Wellenlängen außer dem Rot absorbiert, dann kommt nur Rot zum Auge zurück, d. h. wir haben eine rote Farbschicht aufgetragen. Wenn die Flüssigkeit nur Violett absorbiert, dann wird Gelb zurückgestrahlt, und wenn die Flüssigkeit nur Rot absorbiert, dann ist die resultierende Farbe ein grünliches Blau, und so fort. Wenn eine Schicht von verschiedenen Farben nach der anderen auf das Papier aufgetragen wird, dann wächst die Zahl der farbzerstörenden Mittel, und in ungeübten Händen wird der Rest von Farbe, der das Auge erreicht, leicht zu einem schmutzigen Grau.

Die Ölmalerei arbeitet nach einem anderen Verfahren. Der Farbstoff ist „massiv“, d. h. er enthält eine feste Substanz, die das auffallende Licht zurückwirft und zerstreut und die Rolle des weißen Papiers bei der Aquarellmalerei einnimmt. Daher kommt das Licht nicht bis zur Leinwand durch, und eine Schicht von Farbe kann so dick sein, daß sie vollständig die unter ihr liegende verdeckt. Dasselbe kann man bei Wasserfarben erreichen, wenn man die betreffende Farbe mit Deckweiß mischt.

Die Tatsache, daß ein Farbstoff dadurch Farbe erzeugt, daß er Farbe vernichtet, widerspricht natürlich vollständig der Vorstellung, daß eine Farbe in eine andere umgewandelt werden kann, wie man sich vielleicht denken könnte. Wir sehen hier wieder, daß die Wellentheorie uns die richtige Auskunft gibt. Wir wissen, daß ein gegebener Wellenzug sich nicht einfach in einen solchen von

anderer Wellenlänge umwandeln kann. Eine Ozeanwelle wird nicht zur winzigen kleinen Wasserwelle dadurch, daß sie durch eine Öffnung geht oder an einer Wand reflektiert wird. Wir können daher auch nicht erwarten, daß rotes Licht blau wird oder umgekehrt blaues rot, wenn es durch ein gefärbtes durchsichtiges Medium kommt oder von einem Körper reflektiert wird. Die Lichtquelle ist die Quelle aller Farben im Licht. Wir müssen annehmen, daß das weiße Licht von der Sonne, ehe es durch ein Prisma zerlegt wird, irgendwie den ganzen Bereich der Farben des Spektrums enthält.

Wenn wir in derselben Art das Licht von irgendeiner anderen Quelle untersuchen, dann finden wir, daß die Farben des Spektrums nicht immer dieselben sind. Z. B. enthält das Spektrum des gelben Lichtes einer Petroleumlampe keine der kurzen Wellenlängen. Sogar das Sonnenspektrum wechselt von Zeit zu Zeit. Ein Stück blaues Tuch ist deshalb blau, weil sein Farbstoff im vollen Tageslicht das meiste auffallende Licht absorbiert und nur ein dunkles Blau dem Auge zurückwirft. Im Lichte der Petroleumlampe sieht es schwarz aus, weil dieses Licht die einzige Farbe, die das Tuch reflektieren kann, nicht enthält; es wird daher gar nichts reflektiert.

Wenn wir einen Strauß von Primeln nehmen, die angeblich „rein gelb“ sind und lassen nacheinander die Farben des Spektrums darauf fallen, dann ändert sich die Farbe des Straußes. Im Roten sehen die Blumen rot aus, im Gelben erscheinen sie in ihrer normalen Farbe, im Grünen sind sie grün und nur im tiefen Blau sehen sie schwarz aus. Dies ist die einzige „Wellenlänge“, die sie nicht reflektieren. Ebenso hängt die Farbe jedes Gegenstandes, wie sie uns erscheint, nicht nur von der Färbung des Körpers ab, sondern auch von dem Licht, in dem wir den betreffenden Gegenstand sehen. Wenn das Sonnenlicht in ein Zimmer strömt, dann fällt es zuerst vielleicht auf eine weiße oder farbige Wand oder auf einen bunten Teppich, und alle Farben im Zimmer werden hierdurch beeinflusst.

Was ist dann das „Weiß“, durch dessen Zerlegung alle anderen Farben zu entstehen scheinen? Die Antwort liegt nahe, daß das gewöhnliche Tageslicht weiß ist, aber, wie wir gesehen haben, ändern sich dessen Eigenschaften, wie jedem Photographen wohl bekannt ist. Wenn die Sonne abends sinkt, dann wird das Licht verhältnismäßig reicher an gelben und roten Farbtönen, und auf dem

Gipfel eines hohen Berges enthält es mehr Blau. Es ist daher nicht leicht, das weiße Tageslicht zu definieren. Eine bestimmte mittlere Zusammensetzung von Wellenlängen nennen wir „weiß“ und für gewöhnliche Zwecke genügt diese Definition. Wenn größere Genauigkeit erfordert wird, müßte man die relative Stärke der Bestandteile entweder direkt oder im Verhältnis zu irgendeiner Vergleichslichtquelle angeben, die selbst wieder genau und vollständig beschrieben werden kann. Ein absolut weißes Licht gibt es nicht; die Eigenschaft „weiß“ hängt vielmehr nur von unserer Definition ab. Wir könnten viel eher die Oberfläche eines Stückes Papier oder eines anderen Körpers weiß nennen, denn das würde bedeuten, daß die Oberfläche Licht jeder Art vollkommen reflektiert oder zerstreut. Es ist eine passive Eigenschaft im Vergleich mit den aktiven Eigenschaften des Lichtes. Eine weiße Oberfläche sieht im roten Lichte rot aus, im blauen blau, und so fort. Aber selbst dann kommt der Name von der Fähigkeit, die sichtbaren Strahlen in dem engen Bereich, in dem das Auge empfindlich ist, zurückzustrahlen. Wenn wir diesen Bereich überschreiten, könnte es nötig werden, unsere Ausdrücke zu ändern. Eine durchsichtige und farblose Flüssigkeit wie Benzol läßt alle sichtbaren Strahlen durch, aber wenn der Bereich unseres Sehens am violetten Ende des Spektrums noch ein wenig weiter reichen würde, dann müßten wir Benzol eine gefärbte Flüssigkeit nennen, weil es die ultravioletten Strahlen absorbiert.

Wie das Auge auf Farben reagiert

Bis jetzt haben wir uns mit den Eigenschaften des Lichtes beschäftigt, die Farbempfindungen hervorrufen, nun müssen wir betrachten, wie das Auge auf das, was ihm geboten wird, reagiert.

Wir wollen, wie meistens, mit einem Versuch anfangen. Wir nehmen zwei Bogenlampen und stellen sie so auf, daß mit Hilfe von runden Blenden und Linsen auf dem Wandschirm zwei helle, weiße Scheiben erscheinen. Eine der Lampen oder Linsen kann bewegt werden, so daß die Scheiben sich teilweise überlagern. Wenn wir vor die eine Lampe ein blaues und vor die andere ein gelbes Stück Glas halten, dann bekommt der mittlere Teil des Bildes blaues Licht von der einen Lichtquelle und gelbes von der anderen. Dem Auge erscheint dieser Teil weiß. Wir wissen aber, daß blaue und gelbe Farben Grün ergeben, wenn man sie mischt;

hier haben wir offenbar einen Widerspruch. Er kann leicht erklärt werden; wenn wir das blaue und das gelbe Glas beide vor eine der Lampen halten, dann ist der Lichtfleck, der von dieser Lampe herkommt, wirklich grün. Das ist im Einklang mit unseren Erwartungen, denn, wie wir gesehen haben, nimmt das gelbe Glas das blaue Ende vom Spektrum weg; ebenso könnten wir leicht zeigen, daß das blaue Glas das rote Ende abschneidet. Wenn ein ursprünglich weißer Lichtstrahl also durch beide Gläser hindurchgeht, dann bleibt nur der mittlere Teil des Spektrums übrig, der vorwiegend grün ist. Wenn wir aber einen blauen und einen gelben Lichtfleck an der Wand erzeugen, und sehen, daß da, wo sie sich überlagern, Weiß entsteht, dann handelt es sich nicht um eine wiederholte Absorption. Wir machen vielmehr etwas ganz anderes, nämlich wir lassen blaues und gelbes Licht gleichzeitig auf das Auge fallen. Der gemeinsame Teil der beiden Lichtflecken enthält alle Farben des Spektrums, und obgleich die mittleren Wellenlängen vielleicht überwiegen, erscheint das Ganze dem Auge doch als ein gewöhnliches Weiß.

Wenn wir den gleichen Versuch mit roten und grünen Gläsern machen, dann bekommen wir ein ähnliches Ergebnis. Die Überlagerung ergibt Gelb; wenn wir beide Gläser vor dieselbe Lampe halten, dann lassen sie gar kein Licht durch, und der Schirm bleibt dunkel. Eine Untersuchung mit Hilfe eines Prismas zeigt, daß das rote Glas alles Licht außer dem roten abschneidet, während das grüne Glas das rote und einen Teil des blauen Lichtes fortnimmt. So kann also kein Licht durch beide hindurchgehen, während in der Überlagerung alle Farben außer Blau vorhanden sind; wir haben schon vorher gesehen, daß dies dem Auge als Gelb erscheint (Tafel XIV B).

In solchen Versuchen begegnet uns die merkwürdige Tatsache, daß eine Farbe, die dem Auge rein erscheint, aus einem vielfältigen Gemisch von verschiedenen Lichtarten bestehen kann, von denen jede allein ihre eigene Farbe erzeugen würde. An einer bestimmten Stelle im Spektrum gibt es ein Gelb, das von Licht aus einem sehr engen Bereich von Wellenlängen erzeugt wird; aber das Gelb, das durch das gelbe Glas durchgeht, enthält beinahe alle sichtbaren Wellenlängen. Eine nähere Untersuchung zeigt, daß es zahllose Wege gibt, um ein Gelb zusammzusetzen, das dem Auge immer gleich erscheint. Das ist sehr interessant, denn merkwürdigerweise verhält sich das Ohr in seinem eigenen Bereich

ganz anders. In der Welt der Töne wird die Wahrnehmung durch eine Wellenbewegung vermittelt, ganz ähnlich wie wir es, wenigstens vorläufig, als charakteristisch für das Licht angenommen haben. Aber bei den Tönen ist das Medium, das die Wellen trägt, sicher materiell, es ist entweder die Luft oder es sind andere Gase, Flüssigkeiten, oder feste Körper. Bei den Tönen wie beim Licht ist die Empfindung abhängig von der Wellenlänge. Je kürzer die Wellenlänge, um so höher ist ein Ton, und umgekehrt. Die Wellenlänge des tiefsten Tones auf dem Klavier beträgt einige Meter, die des höchsten Tones nur 3 bis 5 cm. Soweit ist die Analogie zwischen Licht und Ton vollkommen, aber das hört auf, wenn man die Wirkung von Kombinationen vergleicht. Wenn zwei Lichtstrahlen verschiedener Wellenlänge gleichzeitig auf das Auge treffen, dann entsteht, wie wir gesehen haben, der Eindruck einer reinen Farbe. Das Auge ist nicht imstande, eine Mischung als solche zu erkennen und ihre Bestandteile auseinanderzuhalten, aber bei den Tönen kann das Ohr immer eine Mischung verschiedener Schwingungszahlen als Gemisch erkennen, ein Akkord kann analysiert werden, und je nach seiner Zusammensetzung klingt er schön oder unschön. Dadurch wird die Musik wesentlich bereichert, wir brauchen uns nur vorzustellen, was dabei herauskäme, wenn jeder Akkord durch irgendeinen mittleren Ton ersetzt wäre, den wir als einen „reinen Ton“ hören würden.

Viele Leute haben versucht, ein Instrument zu bauen, bei dem wir das Spiel von Farben auf einem Schirm sehen, jeder Note soll dabei eine bestimmte Farbe entsprechen. Die Versuche sind alle insofern fehlgeschlagen, als man lange nichts so Eindrucksvolles wie Musik hervorbringen konnte. Dieses Versagen liegt vielleicht an der Unfähigkeit des Auges, einen „Farbenakkord“ aufzulösen; Auge und Ohr sind bei weitem nicht so ähnlich, wie manche Erfinder von „Farbenorgeln“ gedacht haben. Die gleichzeitige Darbietung von mehreren Farben auf verschiedenen Teilen des Schirmes könnte vielleicht als Analogie zur gleichzeitigen Erzeugung verschiedener Töne angesehen werden, aber Analogien sind bekanntlich niemals eine sichere Grundlage für solche Betrachtungen.

Man ist allgemein der Ansicht, daß der Mechanismus des Ohres eine Anzahl von Empfängern enthält, von denen jeder nur auf Töne aus einem ganz engen Bereich von Schwingungszahlen

anspricht. Man kann sich dies als einen Raum vorstellen, der voll ist mit scharf eingestellten Radioempfängern. Das Auge kann man mit einem so vielfältigen und selektiven Apparat nicht vergleichen, es kann nur wenige und nicht so spezialisierte Empfänger haben. Man hat natürlich sehr viele Forschungen angestellt, um diesen Empfangsmechanismus zu verstehen; es ist aber nicht zu verwundern, daß man die Lösung eines so schwierigen Problems noch nicht vollständig beherrscht. Immerhin ist man zu einigen allgemeinen Folgerungen gekommen; und darüber ist man sich einig, daß es — um bei dem Beispiel mit den Radioapparaten zu bleiben — drei Empfänger gibt, die in einem weiten Bereich ansprechen, wie ein Radioapparat, der nicht scharf eingestellt werden kann. Zwei empfangen am besten die Enden des sichtbaren Spektrums und einer die mittleren Wellenlängen; in gewissem Grade ist jeder von ihnen für beinahe das ganze Spektrum empfindlich. Unsere Farbempfindungen hängen von der relativen Stärke ab, mit der die drei Empfänger auf Licht, das ins Auge kommt, reagieren. Wenn einer von den dreien, sagen wir der, der am empfindlichsten für Rot ist, fehlt oder nicht gut funktioniert, dann ist das Auge für das Vorhandensein von Rot mehr oder weniger unempfindlich; es ist dann schwer, rote Blumen von grünen Blättern zu unterscheiden. Eine ganze Anzahl von Leuten sind infolge eines solchen Fehlers farbenblind; meistens ist es der Empfänger für Rot, der versagt, und manchmal hat der Besitzer des Auges davon gar keine Ahnung. Der berühmte Chemiker John Dalton wußte nicht, daß er farbenblind war, bis Thomas Young diese Tatsache entdeckte, als Dalton bereits 40 Jahre alt war. Theorien über den genauen Bereich dieser Empfänger beruhen meistens auf Vergleichen zwischen den Wahrnehmungen von normalen und farbenblinden Augen.

Wir verstehen jetzt, wieso man verschiedene Kombinationen von Wellenlängen herstellen kann, die für das Auge alle gleich aussehen. Eine bestimmte Farbempfindung entspricht einer Erregung der drei Empfänger in bestimmtem Verhältnis. Da jede Wellenlänge mindestens zwei und oft alle drei Empfänger erregen kann, aber jeden in verschiedener Stärke, so kann eine bestimmte Empfindung, natürlich innerhalb gewisser Grenzen, dadurch erzeugt werden, daß man irgendwelche drei Wellenlängen vereinigt, wenn nur ihre relativen Intensitäten dementsprechend angepaßt sind.

Komplementärfarben

Wenn wir annehmen, daß diese Empfangsorgane durch Gebrauch ermüden und weniger wirksam werden können, dann haben wir die Erklärung für das Auftreten der sogenannten Komplementärfarben. Wenn wir einige Sekunden lang fest einen farbigen, hell beleuchteten Gegenstand fixieren und dann auf eine beleuchtete, am besten weiße Fläche blicken, dann sehen wir einen andersfarbigen Fleck, der vor unseren Augen schwimmt und sich mitbewegt, wenn wir unsere Augen bewegen. Die Erklärung besteht darin, daß die Empfänger nicht gleichmäßig ermüdet sind.

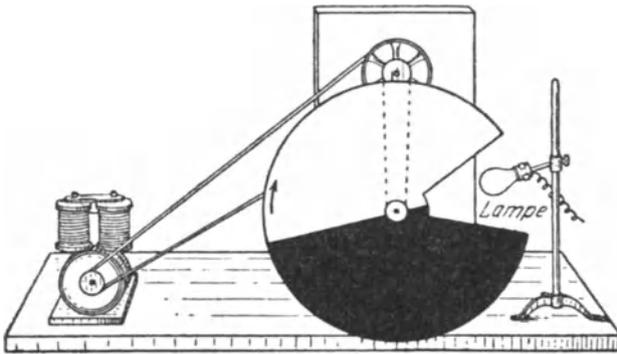


Abb. 53. Die Scheibe dreht sich in der Pfeilrichtung. Durch den offenen Sektor erscheint, mit Unterbrechungen, die rote Lampe; sie sieht grün aus und nicht rot, wenn die Scheibe hell beleuchtet wird.

Wenn wir auf etwas Rotes gesehen haben, dann ist der Empfänger für Rot am meisten ermüdet, so daß die beiden anderen stärker ansprechen, wenn weißes Licht auf unser Auge fällt, und daher ein grünliches Blau erscheint.

Ein prachtvolles Beispiel für diesen Effekt bekommt man, wenn man das ganze Spektrum einer Bogenlampe auf einen weißen Schirm projiziert. Wir blicken fest auf einen Punkt im Spektrum, der irgendwie markiert ist, nach etwa $\frac{1}{4}$ Minute löschen wir den Bogen aus und erhellen das Zimmer. Dann erscheint eine Art umgekehrtes Spektrum, Blau und Grün da, wo vorher Rot war, und Rot an der Stelle des Blauen; in der Mitte ersetzt Violett einige der helleren Farben.

Man sollte erwarten, daß die Komplementärfarben, die man so sieht, viel schwächer sind, als die ursprünglichen Farben, aber es

gibt einen sehr eigenartigen Versuch, der zeigt, daß das Gegenteil der Fall sein kann. Dazu nehmen wir eine runde Pappscheibe von etwa 50 cm Durchmesser, schneiden aus ihr einen Sektor heraus und teilen den Rest in eine schwarze und eine weiße Hälfte, wie in Abb. 53 gezeigt wird.

Die Scheibe stellen wir so auf, daß sie um ihre Achse gedreht werden kann, wobei sie zwei oder drei Umdrehungen in der Sekunde macht. Eine rote Lampe wird so aufgestellt, wie die Abbildung zeigt, und die Scheibe wird hell beleuchtet und gedreht. Wir sehen dann nacheinander den roten Glühfaden für einen Augenblick, dann die weiße Hälfte der Scheibe, dann die schwarze Hälfte, wieder den Faden usw. Wenn der weiße Teil der Scheibe die Lampe verdeckt, müssen wir bekanntlich ein Grün sehen; das Interessante ist nun, daß dieses Grün so viel stärker ist als das Rot, daß letzteres ganz verschwindet, wenn die Scheibe in Bewegung ist. Die Reaktion ist also stärker als die ursprüngliche Wahrnehmung; es sieht sehr merkwürdig aus, wie ein grüner Glühfaden an die Stelle des roten tritt. Wenn wir die Scheibe andersherum drehen, dann ändert sich die Farbe der Lampe nicht, sondern sie bleibt rot, denn der schwarze Sektor verdeckt die Lampe unmittelbar nachdem wir sie gesehen haben, und es ist kein Licht vorhanden, um die Sekundärreaktion zu erregen.

Farbentäuschungen

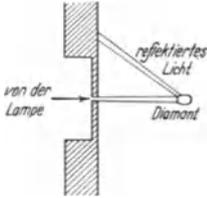
Erscheinungen wie die eben besprochenen werden von besonderen Eigenschaften unserer Augen verursacht, die wir nicht ändern können; aber andere Effekte kommen ohne Zweifel zum Teil daher, daß wir einen falschen Maßstab anlegen; wir haben schon Beispiele hierfür gehabt und lernen jetzt, daß dies auch beim Farbensehen wirksam sein kann. Wenn wir z. B. drei Farben, Rot, Lila und Blau, in der angegebenen Reihenfolge nebeneinander halten, dann ist es schwer, sich davon zu überzeugen, daß das Lila einheitlich ist (Tafel XIV J). Wo es an das Blau grenzt, sieht es rötlich aus, und wo es an das Rot grenzt, bläulich. Wenn wir einen Augenblick auf Rot sehen, dann ermüdet vielleicht das Auge mit seinen Empfängern, und wenn wir dann auf Lila blicken, dann wird dessen Rot nicht mehr vollständig wahrgenommen. Wir können uns auch vorstellen, daß wir nahe beim Rot einen falschen Maßstab von dem haben, was

wir unter Lila verstehen, nämlich daß wir es uns zu rot vorstellen, weil wir im Augenblick an einen Überschuß von Rot gewöhnt sind. Die beiden Erklärungen sind nicht identisch, aber es mag schwer sein, zwischen ihnen zu entscheiden.

Eine interessante Abänderung des Versuches, der in Tafel XIV B gezeigt wurde, gibt uns ein anderes Beispiel für diese Art von Täuschung. Von den zwei Lichtscheiben auf dem Wandschirm sei die rechte rot und die linke weiß; d. h. vor die eine Lampe hält man ein Stück rotes Glas und die andere läßt man ungeändert. Dann erscheint nicht der Teil des Schirmes weiß, auf den das reine weiße Licht fällt, sondern der Teil, wo die Lichtflecken sich überlagern. Dies hält das Auge für weiß, und, nachdem es so seinen Maßstab gewählt hat, erscheint ihm der linke Teil grün. Wenn man einen Stab oder sonst einen Gegenstand so hält, daß sein Schatten auf die Stelle fällt, wo die Lichtflecke sich überlagern, dann erscheinen die beiden Schatten, die von den zwei Lampen herkommen, in verschiedenen Farben; der eine ist rot, während der andere grün aussieht.

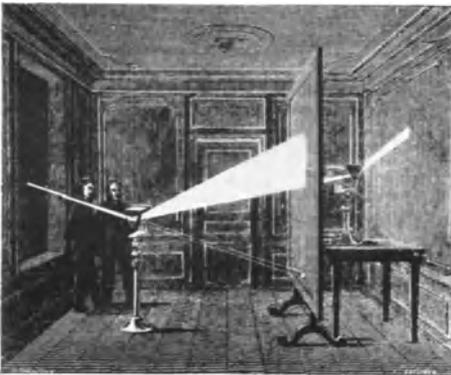
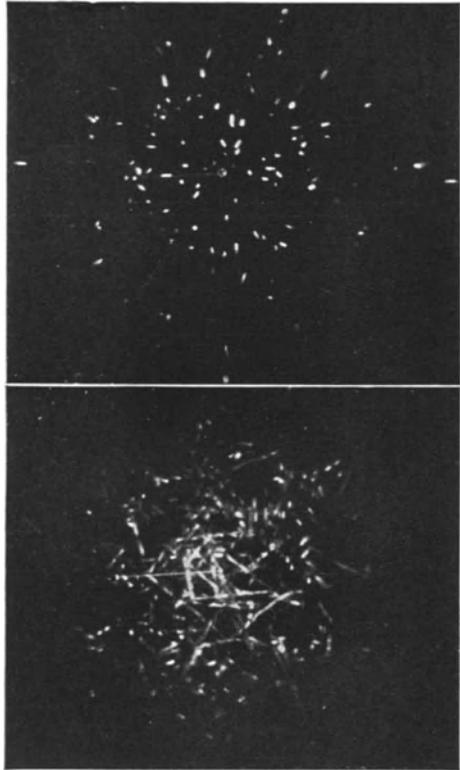
Diese Kontrastwirkung wird natürlich bei Malereien und bunten Dekorationen viel verwendet. Man hebt eine Farbe besonders hervor oder man ändert ihre Schattierung dadurch, daß man eine bestimmte andere Farbe danebensetzt.

Wenn wir ein Bild an der Wand aufhängen, dann wird sein Aussehen von all den Umständen, die wir besprochen haben, beeinflußt. Zunächst von der Art des Lichtes, das ins Zimmer fällt oder das wir besonders eingerichtet haben; das Licht wieder wird von den verschiedenen Dingen im Zimmer verändert, von denen es reflektiert wird ehe es auf das Bild trifft, und schließlich hängen unsere Wahrnehmungen von der Umgebung und der Farbe der Gegenstände ab, auf denen unser Auge geruht hat, ehe wir das Bild ansahen, oder auf die wir vielleicht von Zeit zu Zeit blicken. Wahrscheinlich zeigt man ein Bild am besten so, daß man ihm eine Beleuchtung von derselben Stärke und Art gibt, wie sie bei seiner Entstehung vorhanden war, und seine Umgebung soll man so wählen, wie der Künstler es gewollt hat. Ein Bild, das im hellen Tageslicht im Freien entstanden ist, sieht ganz anders aus, wenn es bei Nacht von künstlichem Licht beleuchtet und mit Augen angesehen wird, die ihren Maßstab mit dem Verschwinden des Tageslichtes geändert haben. Wenn das Licht einer Petroleumlampe auf ein Stück weißes Papier fällt, neben



A. Reflexionen von einem einzigen Diamanten. Durch ein kleines Loch in der Wand kommt Licht in ein Zimmer, wie man auf der Zeichnung oben sieht. Auch auf der Photographie sieht man das Loch in der Mitte. Der feine Lichtstrahl ist gerade bis zu der Stelle zu sehen, wo er den Diamanten trifft und in eine große Zahl von reflektierten Strahlen zerlegt wird, von denen jeder einen Lichtfleck an der Wand hervorruft. (S. 65.)

B. Derselbe Versuch wie vorher mit einem Zirkon an Stelle des Diamanten. (S. 65.)



C. Newtons Versuch nach einer Zeichnung aus Guillemins Buch *Forces of Nature*. Ein Sonnenstrahl wird durch das erste Prisma in ein Spektrum auseinandergezogen; ein Teil desselben geht durch einen Spalt im Schirm und fällt auf ein zweites Prisma, es erfolgt aber keine weitere Auflösung. (S. 66 und 68.)

Tafel XIII



A. Die alte Inschrift auf dem Sockel lautet: Das erste reflektierende Fernrohr, erfunden von Sir Isaac Newton und mit eigenen Händen von ihm angefertigt im Jahre 1671. (Mit Genehmigung des Vorstandes der Royal Society.) Höhe etwa 45 cm. (S. 84.)



B Mikrophographien von Bakterien (*B. Megatherium* 2000 mal vergrößert) von Mr. I. E. Barnard, F. R. S.:

1. im sichtbaren Licht unter bestmöglichen Bedingungen aufgenommen,
 2. im ultravioletten Licht (2743 Å) aufgenommen.
- Gegenstände, die in 1. wie runde weiße Scheiben aussehen, sind in 2. feiner aufgelöst. (S. 85.)

dem ein anderes Stück von demselben Papier von Tageslicht beleuchtet wird — im Laboratorium kann man so einen Versuch leicht machen —, dann sieht das eine gelbbraun aus neben dem anderen. Trotzdem kann es bei Nacht für uns weiß aussehen, und Gegenstände anderer Farbe zeigen natürlich ähnliche Veränderungen. Heutzutage, wo man soviel helle Beleuchtung anwendet, ist der Unterschied zwischen Tag und Nacht nicht so groß, aber auch die hellste und weißeste „Halbwattlampe“ entspricht nicht dem Tageslicht. Man muß mit einer blauen Lampe die Intensität der langen Wellenlängen des künstlichen Lichtes sehr stark verringern, wenn man dem Tageslicht nahekommen will. Das elektrische Licht enthält die blauen Strahlen, aber nicht in genügender Stärke. Der Gebrauch von Tageslichtlampen hat in der letzten Zeit aus verschiedenen Gründen sehr stark zugenommen, denn die Kaufäden verwenden sie, wenn sie bei künstlichem Licht Waren ausstellen müssen, und Künstler und Dekorateurs benutzen sie gern. Die Änderungen von Farbtönen bei verschiedener Beleuchtung sind verblüffend, im Tageslicht sehen zwei Stoffe vielleicht grün aus, bei künstlichem Licht dagegen ist der eine grün und der andere braun, und so fort.

Farberscheinungen bei Linsen

Wenn keine besonderen mühsamen Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, dann kann eine Linse alles Licht von einer hellen Lichtquelle niemals in einem Punkt zusammenbringen, denn immer wenn weißes Licht von seinem Wege abgelenkt wird, dann wird das Blau stärker abgelenkt als das Rot. Abb. 54 zeigt den Gang der Strahlen in diesem Falle, die blauen Strahlen werden sich näher an der Linse in einem Punkt treffen, als die roten. Ein Stück weißes Papier wird in *A* einen roten und in *B* einen blauen Rand haben, aber niemals werden alle Farben in einem Punkt vereinigt sein.

Auch das Auge zeigt dieselbe Erscheinung. Wenn man durch eine Öffnung, etwa ein Fenster, den hellen Himmel sieht, dann hat das Viereck des Fensters oft einen roten oder blauen Rand, je nach den Umständen, von denen die Einstellung des Auges beeinflußt wird. Diese Unfähigkeit, alle Wellenlängen gleichzeitig scharf zu sehen, stört uns nur sehr wenig. Bei optischen Apparaten, die eine Vergrößerung geben sollen, würde derselbe Fehler

verhängnisvoll werden; glücklicherweise kann man achromatische Linsen entwerfen, wie wir gleich sehen werden, mit denen man diese Schwierigkeit überwindet.

Das Fehlen dieses „Achromatismus“ im Auge führt zu einigen merkwürdigen Ergebnissen. Da die roten Strahlen weniger stark gebeugt werden als die blauen, muß die Augenlinse stärker zusammengedrückt werden, wenn sie auf das Sehen eines roten Gegenstandes eingestellt wird. Die Anstrengung unserer Augenmuskeln ist nun teilweise ein Maß dafür, wie nahe ein Gegenstand ist; je größer die Anstrengung, um so näher erscheint er uns. Wir werden daher leicht Entfernungen falsch schätzen, und unter sonst gleichen Bedingungen werden uns rote Dinge näher er-

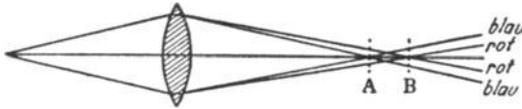


Abb. 54. Eine Linse vereinigt die blauen Strahlen in einem Punkt A, der näher an der Linse liegt als der Schnittpunkt der roten Strahlen B.

scheinen als blaue. Wahrscheinlich sieht deshalb ein rotes Zimmer kleiner aus als ein blaues. Vielleicht verbinden wir auch in Gedanken blau mit Entfernung von unseren Erfahrungen im Freien her, aber der erste Grund scheint mir der wahrscheinlichere. In einem hell beleuchteten Plakat scheinen die roten Buchstaben aus der Reihe der blauen herauszuspringen, und wenn wir gleich große blaue und rote Gegenstände in derselben Entfernung sehen, dann halten wir leicht die blauen für größer, weil wir denken, sie seien weiter entfernt als die roten.

Ein sehr interessantes Beispiel für diese merkwürdige Täuschung liefert die französische Fahne; die drei senkrechten Streifen, Rot, Weiß und Blau haben nämlich nicht dieselbe Breite. Ursprünglich sollten sie gleich breit sein, aber dann fand man, daß das Blau größer aussah als das Rot. Ein Untersuchungsausschuß prüfte diese Frage und empfahl, die Breite von Blau, Weiß und Rot sollte im Verhältnis von 30 : 33 : 37 sein; diese Zahlen waren auf Grund von Versuchen gefunden worden; es erscheinen dann nämlich die drei Streifen dem Auge gleich groß. Man kann vielleicht annehmen, daß dem Auge natürlicherweise das Blau weiter entfernt zu sein scheint als das Rot; nun sind aber die Winkel, unter denen das Auge die beiden Farben sieht, gleich groß, und

dies führt weiter zu der Deutung, daß das Blau größer ist als das Rot. Ich möchte allerdings nicht verschweigen, daß man neuerdings die vollständige Erklärung dieser Erscheinung für komplizierter hält¹⁾.

Im blauen Licht kann man auf kürzere Entfernungen scharf sehen, denn die kürzeren Wellenlängen werden noch in einem Brennpunkt auf der Netzhaut vereinigt, während die langen Wellen sich erst hinter ihr treffen, auch wenn man das Auge so stark wie möglich anspannt. Dadurch wird die Tatsache, daß man Einzelheiten in der allernächsten Umgebung besser im blauen als im roten Licht sieht, wenigstens teilweise erklärt.

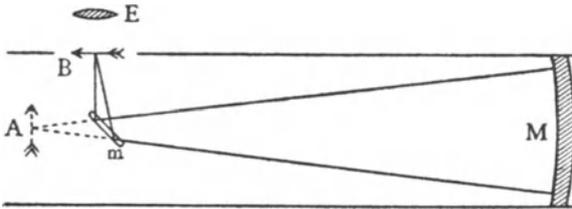


Abb. 55. Eine Zeichnung, die den Aufbau von Newtons Fernrohr zeigt.

Die Trennung der Farben, die immer auftritt, wenn ein Strahl von weißem Licht gebrochen wird, bildet ein ernsthaftes Problem, wenn optische Instrumente die Kraft des Auges verstärken sollen, denn bei einer Vergrößerung tritt eine viel stärkere Brechung von Strahlen auf als im Auge und daher auch eine größere Trennung einzelner Farben. In dem Blickfeld eines schlechten Feldstechers sind die hell erleuchteten Teile umgeben von störenden farbigen Rändern. Bei den starken Vergrößerungen besserer Instrumente würde dieser Effekt unerträglich werden, wenn man ihn nicht beseitigte.

Merkwürdigerweise hielt Newton diese Schwierigkeit für unüberwindlich; er verzichtete deshalb auf eine Linse als Objektiv in seinem Fernrohr und benutzte an ihrer Stelle einen sphärischen Spiegel. Dieser Spiegel konnte ebensogut wie eine Linse ein Bild entwerfen, das man aus größter Nähe mit einem Okular betrachten konnte, und eine Trennung einzelner Farben trat nicht auf. In der Abb. 55 ist *M* der große konkave Spiegel, der ein Bild in *A* entwerfen würde, der kleine ebene Spiegel *m* lenkt die Strahlen

¹⁾ Hartridge: Journal of Physiology 52, 222, 1918.

aber so ab, daß dies Bild in B entsteht; hier tritt das Okular in Tätigkeit. Der Kopf des Beobachters wäre nämlich im Weg der Strahlen, wenn das Bild in A entstünde. Ein Bild dieses Fernrohres zeigt die Tafel XIII A.

Es gibt nun einen Weg, um diese Farbwirkung zu vermeiden, er wurde zuerst praktisch von John Dollond beschrieben, der im Jahre 1758 der Royal Society das erste achromatische Fernrohr überreichte. Seine Konstruktion beruht auf der Tatsache, daß die Zerlegung in Farben, die jede Strahlenbrechung begleitet, für verschiedene Glassorten bei gleicher Brechung verschieden stark ist. Man kann zwei Linsen herstellen, die eine aus Kronglas, die andere aus dem schwereren Flintglas, die die Spektralfarben gleich stark zerlegen und doch den Strahl als ganzen um verschiedene Winkel brechen. Nehmen wir an, der Gang eines Lichtstrahles durch eine Konvexlinse aus Kronglas sei in Abb. 56a dargestellt, die blauen Strahlen treffen sich in einem Punkt in B und die roten in R .

Das Verhalten einer Konkavlinse aus Flintglas gegenüber demselben Strahl zeigt dann die Abb. 56b. Die Brechung als Ganzes ist schwächer als beim Kronglas, aber die Trennung der Farben ist dieselbe in beiden Fällen.

Wenn man jetzt die beiden Linsen vereinigt, dann heben sich die Trennungen in Farben gegenseitig auf, aber nicht die beiden Brechungen. Die Linse aus Kronglas läßt die Strahlen stärker konvergieren, als die Flintglaslinse sie divergieren läßt; beide zusammen wirken daher so, wie es die Abb. 56c zeigt.

So kann ein Lichtstrahl zum Konvergieren gebracht werden, ohne daß Farben auftreten; die Kombination ist achromatisch. Diese Behauptung ist nicht ganz richtig, wir wollen lieber sagen, sie ist angenähert achromatisch. Irgendwelche zwei Wellenlängen, etwa B im blauen und R im roten Gebiet, können in einem Brennpunkt vereinigt werden, wie wir es eben beschrieben haben; aber das Spektrum aller Wellenlängen wird nicht gleichmäßig durch beide Linsen ausgebreitet, und wenn B und R genau zusammenfallen, dann werden andere Teile des Spektrums nur ungefähr vereinigt werden; das Übel wird also stark gemildert, aber nicht ganz beseitigt.

Beim Mikroskop kann man noch einen Schritt weiter gehen und ein deutliches Sehen dadurch erreichen, daß man den Wellen-

längenbereich stark einengt. Natürlich beeinflußt das die Farbe, aber man legt vielleicht weniger Wert auf die Farbe als auf scharfe Umrisse. Ausgezeichnete mikroskopische Arbeiten hat man neuerdings mit monochromatischem Licht im Ultraviolett gemacht, diese Strahlen kann man mit dem Auge nicht sehen, aber sie wirken auf die photographische Platte. Tafel XIII B

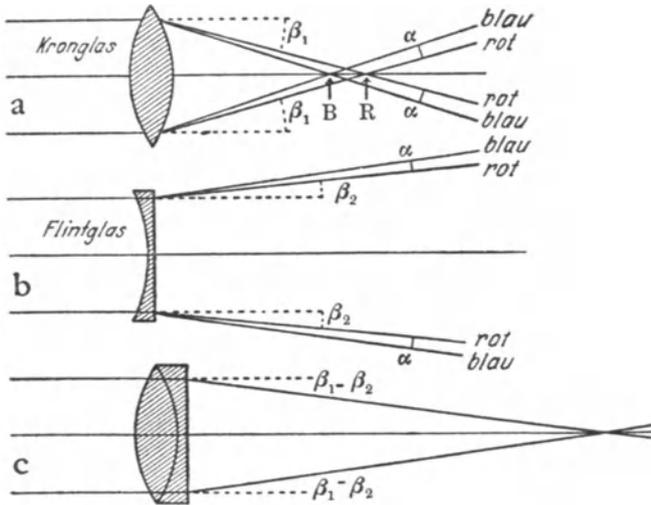


Abb. 56. Das oberste Bild zeigt eine Linse aus Kronglas. Der Winkel β_1 zeigt, wie stark sie Strahlen zum Konvergieren bringt, und der Winkel α entspricht dem Betrag, um den sie Blau von Rot trennt. Das mittlere Bild zeigt eine Linse aus Flintglas, sie bringt Strahlen um den Betrag von β_2 zum Divergieren, wobei β_2 kleiner ist als β_1 , und sie trennt Blau und Rot ebenso stark wie die andere Linse. Beide zusammen ergeben, wie das dritte Bild zeigt, keine Trennung von Blau und Rot, aber die Strahlen werden um den Betrag $\beta_1 - \beta_2$ zum Konvergieren gebracht.

zeigt z. B. eine Aufnahme von Bakterien, die so hergestellt worden ist.

Diese Farbenprobleme vermehren die Schwierigkeiten beim Bau optischer Instrumente sehr erheblich, und je stärker die Vergrößerung ist, die verlangt wird, um so sorgfältiger müssen die Linsen entworfen werden. Unser Wissen im Gebiet des ganz Großen und des ganz Kleinen stammt zum größten Teil vom Gebrauch von Fernrohr und Mikroskop her, und wir schulden daher den Männern sehr viel Dank, die sich ihrer Vervollkommnung gewidmet haben.

Der Regenbogen

Die funkelnden Farben der Tropfen, die nach einem Regen an Blättern und Drahtzäunen hängen und von der Sonne beschienen werden, kommen von einer Vereinigung von Brechung und Reflexion. In einem vorbeiziehenden Schauer schließen sich die

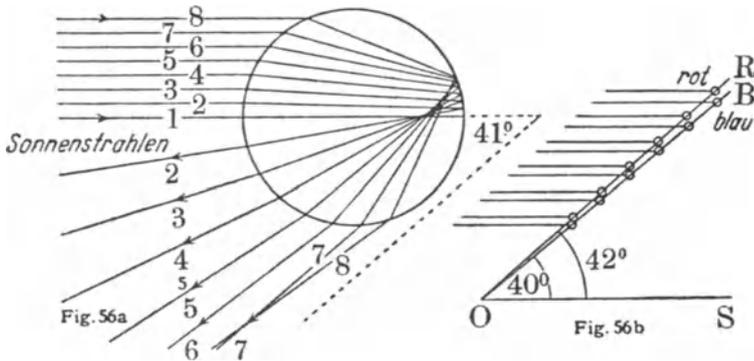


Abb. 56 a. Der Kreis soll einen kugelförmigen Wassertropfen vorstellen. Parallele Strahlen kommen von der Sonne und verlassen den Tropfen wieder, nachdem sie zweimal gebrochen und einmal reflektiert worden sind. Die Zahlen zeigen den Weg der einzelnen Strahlen. Die meisten Strahlen, die herauskommen, sind beinahe parallel mit einer Linie, die einen Winkel von 41° mit den ankommenden Strahlen bildet (in Wirklichkeit sind es 42° für Rot und 40° für Blau).

Abb. 56 b. Daher wird ein Beobachter in O, der in irgendeine Richtung blickt, die einen Winkel von 41° mit der Sonne (hinter ihm) bildet, von jedem Tropfen in dieser Richtung rotes Licht empfangen. Alle diese Richtungen bilden einen Kegel mit der Achse OS; ein blauer Kegel liegt innerhalb des roten.

Farben zusammen und bilden den Regenbogen. Die beiden obenstehenden Abbildungen erklären, wie dies geschieht.

Man beachte, daß der Regenbogen nicht in einer bestimmten Entfernung vom Beobachter ist, wohl aber liegen seine Farben in bestimmter Richtung.

Die Entstehung der Farben

Das Prinzip der Resonanz

Wir haben gesehen, daß Farbe ganz allgemein durch Vernichtung von Farbe entsteht. Das Sonnenlicht ist eine Mischung und kann durch ein Prisma in eine Reihe verschiedener Lichtarten zerlegt werden, die dem Auge als verschiedene Farben und dem Physiker in seinem Laboratorium als verschiedene Wellenlängen erscheinen. Wir haben auch etwas von dem merkwürdigen Mechanismus kennengelernt, mit dem das Auge Farben und Mischungen von Farben wahrnimmt und sie zur Deutung in das Gehirn fortleitet.

Wir wollen jetzt etwas genauer betrachten, wie diese Zerstörung von Farbe vor sich geht. Das Sonnenlicht fällt auf die Dinge um uns herum, auf Blätter, Gras, Blumen, Vögel, Insekten und die Erde selbst, und überall sind Farben. Überall muß also Farbe zerstört werden. Wie geschieht dies? Durch welchen Vorgang wirken die Farbstoffe?

Wir wollen hier eins nicht vergessen; die meisten Färbungen in unserer Umgebung kommen von Farbstoffen, aber es gibt noch gewisse andere Methoden, Farben zu erzeugen, die außerordentlich interessant und wichtig sind und auch einige der allerschönsten Farberscheinungen hervorrufen. Man betrachtet sie gewöhnlich unter der Überschrift von Beugung und Interferenz, und wir werden uns später mit ihnen beschäftigen; vorläufig wollen wir uns auf die Methode der Färbung beschränken, die, wenigstens mengenmäßig, die Hauptursache für das Auftreten von Farben ist.

Das Geheimnis liegt in dem Prinzip der Resonanz, deren Erscheinungen sehr häufig sind und leicht beobachtet werden können. Wir wollen einen ganz einfachen Fall nehmen, nämlich die Wirkung einer Stimmgabel auf eine zweite von gleicher Tonhöhe. Beide stehen nebeneinander auf einem Tisch, jede auf ihrem eigenen

Resonanzkasten. Die eine erregen wir stark dadurch, daß wir mit einem Bogen über ihre Zinken streichen; wir lassen sie einige Sekunden tönen und bringen sie dann durch Berühren mit dem Finger zum Schweigen. Dann merken wir, daß die zweite Stimmgabel tönt, obgleich sie nie berührt wurde; sie ist von der ersten in Gang gesetzt worden. Nach einiger Zeit kann man jetzt die zweite anhalten und wird finden, daß die erste wieder etwas von der abgegebenen Energie zurückbekommen hat und schwach tönt.

Es ist wichtig, daß die Stimmgabeln aufeinander abgestimmt sind. Wenn man an das Ende von einer von ihnen ein Stückchen Wachs klebt, so daß ihr Ton tiefer wird, dann hört der Austausch von Energie in beiden Richtungen auf, und es erfolgt keine Resonanz.

Andere Beispiele gibt es in Menge. Man kann sich vor ein Klavier setzen und eine Taste leicht herunterdrücken, so daß der Dämpfer die Taste nicht mehr berührt; wenn man dann den betreffenden Ton laut singt, so wird die Saite mitschwingen, und man hört sie, wenn man mit dem Singen aufhört. Kein anderer Ton wird ebenso antworten, denn Stimme und Saite müssen im Einklang sein; nur wird man vielleicht gelegentlich eine Resonanz hören, weil eine Tonquelle niemals einfach ist, sondern außer dem Grundton noch Obertöne enthält, und deshalb noch andere Möglichkeiten für eine Resonanz vorhanden sein können.

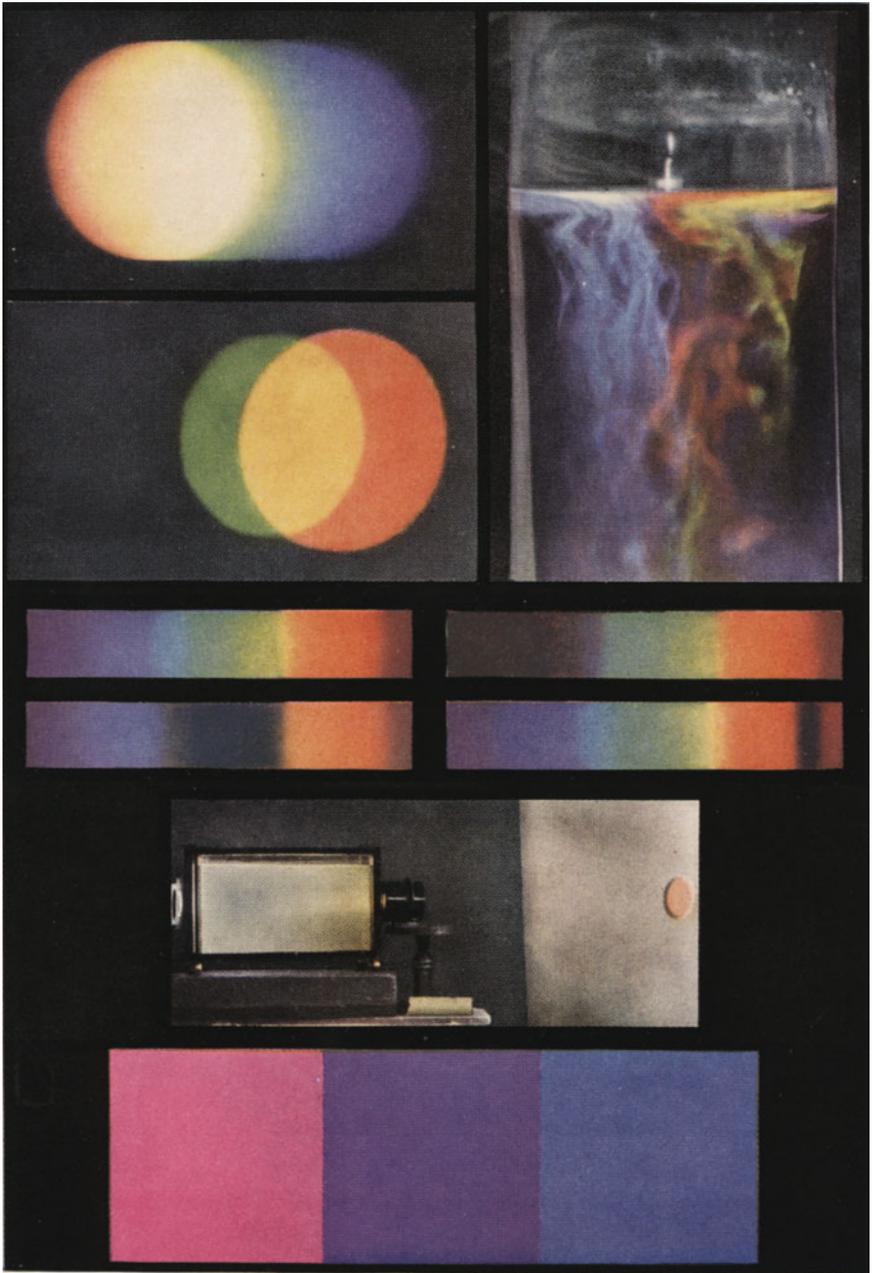
Sänger mit kräftigen Lungen haben sich manchmal gerühmt, sie könnten eine Glasschale, ohne sie zu berühren, dadurch zertrümmern, daß sie laut den Ton hineinsingen, den die Schale ertönen läßt, wenn man sie anschlägt.

Den gewöhnlichsten Resonanzeffekt heutzutage bildet aber das Funktionieren eines jeden Radioempfängers. Beim Einstellen machen wir direkten Gebrauch vom Resonanzprinzip; wir drehen die Knöpfe unseres Empfängers, bis die Periode oder Frequenz der elektrischen Schwingungen in seinen Kondensatoren und Spulen genau dieselbe ist wie die der Wellen von der Sendestation. Die einzelnen Stationen senden Wellen von verschiedener Frequenz, die sich genau so voneinander unterscheiden wie eine Farbe von der anderen. Jeder Sender hat seine eigene spezielle Frequenz, seine Farbe. Unser Radioempfänger ist ein „Farbstoff“, der eine bestimmte Farbe absorbiert; und wir sind in der Lage, den Farbstoff so lange zu ändern, bis er die Farbe absorbiert, die wir

Tafel XIV

<p>A. Das Spektrum hier unterscheidet sich von dem der Tafel XII C oder IB dadurch, daß der Spalt durch eine runde Öffnung ersetzt ist. Die Bilder, die sich überlagern, sind jetzt alle rund, und in der Mitte entsteht beinahe Weiß, weil sich hier fast alle Bilder überlagern. (S. 68.)</p>	<p>C. Licht von oben fällt in den Behälter mit Wasser, in das Pulver von verschiedenen fluoreszierenden Substanzen geworfen worden sind. Die Pulver sinken langsam im Wasser unter und lösen sich dabei auf. (S. 176.)</p>
<p>B. Die Lichtscheiben, die sich überlagern, kommen von verschiedenen Lichtquellen. Die Strahlen der einen sind durch rotes Glas gegangen, die der andern durch grünes Glas. Der rote und der grüne Fleck ergeben gemeinsam ein Gelb. Eine Farbenphotographie dieses Versuches. (S. 75.)</p>	<p>F. Ein Stück gelbes Glas schneidet nur das violette Ende ab. (S. 71.)</p> <p>G. Eine Lösung von Chlorophyll absorbiert gewisse Teile des Spektrums, besonders einen Teil im äußersten Rot. Farbenphotographie des so veränderten Spektrums. (S. 93.)</p>
<p>D. Eine Farbenphotographie des Spektrums. Die Strahlen der Lampe sind durch einen engen Spalt gegangen, und das Bild ist eigentlich eine Reihe von Bildern des Spaltes, die von Licht verschiedener Farbe oder Wellenlänge herkommen. (S. 66.)</p> <p>E. Ein Stück rotes Glas im Wege des weißen Lichtes nimmt fast alle Farben weg, außer in der Nähe des roten Endes des Spektrums, so daß die Ausdehnung des Spektrums beträchtlich abnimmt. (S. 71.)</p>	<p>H. Das Licht von einer Bogenlampe verliert einen Teil seines Blaus beim Durchgang durch eine Flüssigkeit, in der feine Teilchen suspendiert sind. Der Rest bildet auf dem Schirm eine rote Scheibe wie die untergehende Sonne. (S. 117.)</p>
<p>I. Das violette Feld in der Mitte erscheint in seiner Farbe nicht einheitlich. Neben dem roten Felde steht es mehr bläulich aus, und neben dem blauen Felde mehr rötlich. (S. 79.)</p>	

TAFEL XIV



brauchen. Mit den besten Apparaten kann man am schärfsten einstellen, bekommt am stärksten die Station, die man haben will, und wird am wenigsten von allen anderen gestört.

Wenn wir uns die Frage beantworten wollen, warum dies Einstellen so notwendig und wirksam ist, brauchen wir nur an einen Fall zu denken, wo die Bewegung so langsam ist, daß man sie beobachten kann. Stellen wir uns ein Kind in einer Schaukel vor und eine Person, die die Schaukel in Bewegung setzt. Die Schaukel hat eine natürliche Periode ihrer Bewegung; ihre Frequenz ist die Anzahl Schwingungen, die sie in einer Minute oder in irgendeiner anderen Zeiteinheit vollführt. Wenn die Stöße immer im richtigen Augenblick gegeben werden, dann werden die Schwingungen so lange immer stärker werden, bis die Energie jedes Stoßes vollständig von dem Luftwiderstand und anderen entgegenwirkenden Kräften aufgehoben wird. Wenn die Stöße aber unregelmäßig gegeben werden, oder auch, wenn sie regelmäßig erfolgen, aber die Zeit zwischen einem Stoß und dem nächsten nicht der Schwingungsperiode der Schaukel entspricht, dann heben sie sich gegenseitig in ihrer Wirkung auf. Ein Stoß erfolgt vielleicht, während die Schaukel sich entfernt, er ist wirksam, der nächste aber, wenn sie ankommt, er wird dann natürlich die Bewegung verlangsamten usw. Auch eine lange Reihe von Stößen in gleichen Zeitabständen bleibt wirkungslos, wenn diese Abstände nicht die richtigen sind, denn die Stöße werden in regelmäßiger Folge die Bewegung fördern oder hemmen.

Wenn die eine Stimmgabel die andere erregt, dann ist jeder einzelne Anstoß außerordentlich schwach, da er ja nur durch die Luft übertragen wird; aber da die Abstimmung vollkommen ist, so häuft die Wirkung der einzelnen Stöße sich an. Wenn Männer im Gleichschritt über eine Brücke marschieren, dann besteht vielleicht die Gefahr, daß eine Schwingungsperiode der Brücke mit der des Marsches übereinstimmt, und vielleicht ist die Brücke zu schwach und könnte das nicht aushalten. Man läßt deshalb Soldaten auf einer Brücke ohne Tritt marschieren. Ebenso ist es bei anderen Fällen von Resonanz; schwache Impulse können sehr stark wirken, wenn die Abstimmung gut ist.

Die Absorption von Licht von einer bestimmten Wellenlänge durch einen Farbstoff ist ebenfalls ein Resonanzeffekt wie die anderen Erscheinungen, von denen wir eben gesprochen haben; besonders ähnlich ist der Fall des Radioempfanges, denn hier

handelt es sich auch um einen elektrischen Vorgang und um Ätherwellen, nur haben sie eine andere Wellenlänge. Der Radioempfänger absorbiert die langen Ätherwellen, und ein Etwas im Farbstoff absorbiert die kurzen Lichtwellen.

Der Radioapparat besteht aus einer Anordnung von elektrischen Kondensatoren und Drahtspulen, die miteinander in bestimmter Weise verbunden sind. Die Atome und Moleküle sind die Empfänger beim Licht; dies wissen wir, auch wenn es manchmal schwierig und kompliziert ist, sie Punkt für Punkt mit den Radioapparaten zu vergleichen. Einige allgemeine Gesichtspunkte bei der Betrachtung von Atomen und Molekülen als Resonatoren sind aber außerordentlich interessant und ihnen wollen wir uns jetzt zuwenden.

Zunächst müssen wir noch eine Überlegung vorausschicken, die den Zusammenhang zwischen Empfang und Absorption klarstellt. Eine Stimmgabel erregt eine zweite; dann muß ein Teil der Energie, die sie aussendet, hierbei verbraucht werden. Ebenso absorbiert jeder Radioempfänger einen gewissen Betrag von Energie aus dem Äther. Mit Hilfe bestimmter Vorrichtungen kann ein Radioempfänger, wie der Fachmann weiß, dazu angeregt werden, Energie aus einem Vorrat zu schöpfen, mit dem er verbunden ist, aber das hat hiermit nichts zu tun.

Wir wollen uns eine Stimmgabel vorstellen, die Energie nach allen Richtungen ausstrahlt. In einer bestimmten Richtung kommen die Schallwellen zu einer Stelle, wo eine große Zahl von Stimmgabeln von derselben Tonhöhe wie die erste stehen. Sie werden alle in bestimmtem Maße angeregt werden und folglich von dem Wellensystem etwas absorbieren. Natürlich wird dann in der Richtung, die wir betrachten, entsprechend weniger Energie sich ausbreiten können. Allerdings werden die Stimmgabeln alle denselben Ton auch wieder aussenden, aber die Summe von all dem kann nicht größer sein als der Betrag, den sie aufgenommen haben, und außerdem strahlen sie ihn nach allen Richtungen aus; also kann sicherlich weniger in der ursprünglichen Richtung weitergehen. Mit anderen Worten, die Batterie von Stimmgabeln wirkt als absorbierendes Medium. Wenn die erste Tonquelle außer der einen Stimmgabel von demselben Ton wie die Batterie noch aus zwei oder drei Stimmgabeln von anderer Tonhöhe bestanden hätte, dann wäre nicht ein bißchen von der Energie dieser zusätzlichen Schallwellen von der Batterie aufgenommen worden,

sondern diese würde selektiv die eine Wellenlänge absorbiert und alle anderen durchgelassen haben.

Die Analogie mit der Wirkung eines Farbstoffes ist offenkundig. Der Farbstoff besteht aus einer Ansammlung gleicher Atome und Moleküle, die alle Licht von bestimmten Wellenlängen aussenden und absorbieren können. Wir benutzen den Plural hier, denn die Stimmgabel ist wirklich eine viel zu einfache Tonquelle, um all den Schwingungsmöglichkeiten zu entsprechen, die ein Atom oder Molekül hat. Wenn weißes Licht durch einen Raumteil mit diesen komplexen Schwingungen gekommen ist, dann muß sein Spektrum eine ganze Anzahl von Lücken haben.

Die Schwingungen der Atome und Moleküle

Atome und Moleküle sind winzig kleine Gebilde. Wir wollen daher hier die Längeneinheit einführen, die ihrer Größe angemessen ist, nämlich das Ångström, das ist ein hundertmillionstel Zentimeter. Wir wissen heute, daß es 92 verschiedene Arten von Atomen gibt. Die Moleküle bestehen gewöhnlich aus wenigen Atomen, etwa zwei, drei, vier usw. 20, 30 oder mehr Atome bilden schon ein verhältnismäßig großes Molekül. Die Durchmesser der Atome sind von der Größenordnung von ein, zwei oder drei Ångström-Einheiten.

Man hat diese kleinen Längen auf einer Reihe von Wegen ziemlich exakt gemessen. Mit einer röntgenographischen Untersuchung kann man sie sogar mit großer Genauigkeit bestimmen, wenigstens dann, wenn die Atome und Moleküle eine Kristallstruktur bilden. Die Chemiker machen sich in vielen Fällen ein bestimmtes Bild vom Aufbau eines Moleküls; sie können angeben, wie die Atome im Verhältnis zueinander liegen, und an welche Nachbarn jedes einzelne gebunden ist. Das schließen sie aus einem genauen Studium der chemischen Reaktionen; man versteht hierunter alle die Vorgänge, bei denen Moleküle verschiedener Art Atome miteinander austauschen und so neue Verbindungen bilden, wenn sie in geeigneter Weise zusammengebracht werden. Dies Gebiet ist viel zu umfangreich, um es hier zu besprechen; wir wollen nur betonen, daß solche Untersuchungen von der allergrößten Bedeutung sind, besonders in dem Teil der Chemie, der sich mit der Molekularstruktur der lebenden Substanz beschäftigt. Es ist leicht einzusehen, daß die Eigenschaften eines

Moleküls davon abhängen werden, wie die einzelnen Atome angeordnet sind; ebenso wie die Beschaffenheit eines Hauses davon abhängt, wie seine einzelnen Teile: Steine, Balken, Dachziegel usw., angeordnet sind. Die Röntgenstrahlen haben in den letzten Jahren dem Chemiker bei dieser Arbeit geholfen, und wir werden später hören, wie sie die auf ohemischem Wege gewonnenen Erkenntnisse vertieft und erweitert haben.

Die Art, wie ein Molekül Schwingungen ausführt, können wir nicht so einfach beschreiben wie das Schwingen einer Stimmgabel, aber in einigen Fällen sind wir doch in der Lage, gewisse Zusammenhänge zwischen den „Tönen“ eines Moleküls und seinem Aufbau zu erkennen. Da es nun sehr interessant und oft auch technisch wichtig ist, alle derartigen Zusammenhänge zu finden, so sind gerade die Moleküle, die das Auftreten von Farbe verursachen, besonders eingehend untersucht worden. Man hat das Hauptgewicht dabei auf die „Töne“ oder Eigenschwingungen gelegt und auf ihren Zusammenhang mit Aufbau und Form des Moleküls.

Chlorophyll

Wir wollen mit dem Molekül des Chlorophylls beginnen, weil es besonders interessant und das wichtigste Molekül für alle die Vorgänge ist, die mit dem Leben zusammenhängen. Sein Aufbau ist außerordentlich kompliziert und man kennt ihn daher noch nicht in allen Einzelheiten. Trotzdem nehmen wir das Chlorophyll zum Ausgangspunkt, denn es erfüllt die ganze belebte Natur für uns mit Farbe, und noch mehr: es fängt die Energie der Sonnenstrahlen für uns ein und wandelt sie so um, daß wir sie nutzen können. Alle Schönheit der Welt zeigt es unserem Auge, wo immer wir der Natur gegenüberstehen, und andererseits ist es ein Helfer bei den wichtigsten Lebensprozessen. Auch Kohle und Erdöl, von denen wir so sehr abhängen, sind nichts als Speicher der Energie, die das Chlorophyll den Sonnenstrahlen vergangener Zeiten entzogen hat.

Wir wollen in der üblichen Weise ein Spektrum an der Wand dadurch erzeugen, daß wir die Strahlen der Sonne oder eines elektrischen Lichtbogens durch ein Prisma gehen lassen. Wenn wir dann einen Behälter mit Chlorophyll in den Weg der Strahlen bringen — man kann Chlorophyll aus Nesselblättern bequem und reichlich gewinnen —, dann finden wir, daß ein schmaler

Streifen im tiefen Rot, also im Bereich der langen Wellen stark absorbiert wird (Tafel XIV G). Schwache andere Banden erscheinen auch in anderen Teilen des Spektrums, und das äußerste Blau ist verschwunden, aber die Absorption der langen Wellen ist besonders wichtig. Das Molekül des Chlorophylls reagiert auf diesen bestimmten Bereich von Wellenlängen im Licht der Sonne und nimmt so Energie auf. Die Chemiker haben gezeigt, daß so gewappnet, wenn man diesen Ausdruck hier benutzen darf, das Molekül des Chlorophylls sich mit dem des Kohlendioxyds (der Kohlensäure), das überall vorhanden ist, verbinden kann. So werden die „Kohlehydrate“ — Stärke und Zucker — gebildet, die die Grundlage des Lebens der Pflanzen bilden. Da wir entweder die Pflanzen selbst essen, oder Tiere verzehren, die ihrerseits von den Pflanzen leben, so gewinnen wir unsere Kräfte ebenfalls von der Absorption der roten Strahlen durch das Chlorophyll.

Es ist außerordentlich bemerkenswert, daß dieses eine besondere Molekül eine so große Rolle spielt. In allen Pflanzen ist es dasselbe; allerdings wissen wir, daß es in zwei verschiedenen Formen existiert, aber, abgesehen davon, benutzt jede erdenkliche Pflanze ein und dasselbe Molekül für denselben Zweck. Unser Interesse wird noch vermehrt, wenn wir berücksichtigen, daß das Hämoglobin, das im Tierleben eine so wichtige Rolle spielt, einen ähnlichen Aufbau hat. Irgendein großes, noch unbekanntes Geheimnis steckt hinter der allgemeinen Verwendung dieser einen besonderen Molekülform. Die Zusammensetzung des Chlorophylls ist bekannt; es besteht aus 55 Atomen von Kohlenstoff, 72 von Wasserstoff, 5 von Sauerstoff, 4 von Stickstoff und einem Magnesiumatom; das ist wirklich recht kompliziert. Die Anordnung dieser Atome ist aber noch ziemlich unbekannt und bleibt ein wissenschaftliches Problem von hervorragendem Interesse.

Die Farben der Blumen

Die Farben der Blumen verdienen als nächstes unsere Aufmerksamkeit. Auch hier bildet eine kleine Zahl von Verbindungen die Grundlage, allerdings haben sie in diesem Falle sehr viele Abkömmlinge, da es ja so unendlich viele verschiedene Farben gibt. Einer der wichtigsten dieser Stoffe ist das Karotin, von dem ein Abkömmling vor 100 Jahren aus Karotten dargestellt wurde. Sein Molekül besteht aus 40 Kohlenstoff- und 65 Wasserstoff-

atomen, aber man weiß wenig über die Art, wie sie miteinander verbunden sind. Ein anderer Pflanzenfarbstoff ist das Xanthophyll, das sich in seiner Zusammensetzung vom Karotin nur dadurch unterscheidet, daß es außer den genannten noch zwei Atome Sauerstoff besitzt. Diese beiden und ihre Varianten bilden die meisten gelben und roten Blütenfarben; das erste findet man z. B. in Narzissen, Aurikeln und Löwenzahn, das letztere in Butterblumen, Schöllkraut, Ringelblumen (*calendula*) und Sonnenblumen. Man findet diese Farbstoffe außer in den Blüten auch in den Blättern der Pflanzen, und wenn das Chlorophyll später im

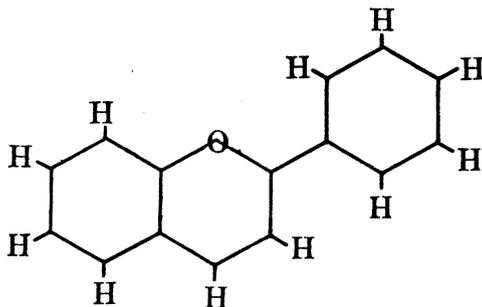


Abb. 57. Das Bild zeigt die Anordnung der Atome in der Grundform des Anthocyanmoleküls, das die Farben vieler Blumen bildet.

Jahre verschwindet, dann bleiben sie übrig und bilden die Farben des Herbstes. Unlängst hat man gefunden, daß aus Karotin durch die Einwirkung von ultraviolettem Licht Vitamin A entsteht.

Andere interessante Stoffe sind die Anthocyane, die ebenfalls die Farben vieler Blumen bilden. In diesem Falle kennt man außer der Zusammensetzung auch den Aufbau, und man kann beobachten, wie bestimmte Änderungen in der Form des Moleküls den Farbwechsel beeinflussen. Die Grundzüge der Struktur zeigt Abb. 57 mit ihrer merkwürdigen Verbindung von Kohlenstoff- und Sauerstoffatomen zu sechseckigen Ringen. Überall, wo die Striche sich treffen, liegen Kohlenstoffatome, die in der Abbildung nicht besonders bezeichnet werden, nur bei O ist an ihrer Stelle Sauerstoff. An den Punkten H befinden sich Wasserstoffatome. Die Art, wie die Atome zusammengefügt sind, ist auf chemischem Wege gefunden worden.

Die Anordnung ist wahrscheinlich eben, aber das weiß man nicht ganz genau. Von bestimmten anderen Molekülen mit

sechseckigen Kohlenstoffringen — den Benzolringen — weiß man durch röntgenographische Untersuchungen, daß sie eben sind, und man weiß auch aus diesen Untersuchungen, daß es sich um

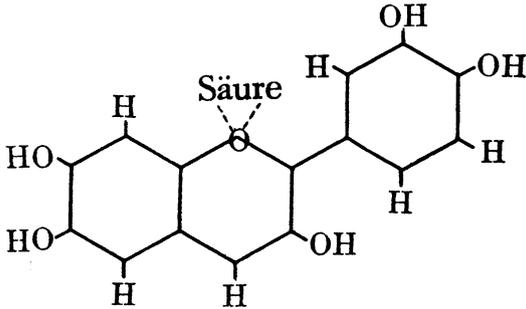


Abb. 58. Eines der Anthocyane, das das Rot der Rosen hervorruft, entsteht aus der Abb. 57 dadurch, daß eine Säuregruppe lose an das Sauerstoffatom gebunden wird und Wasserstoff an bestimmten Stellen durch Hydroxyl (Sauerstoff + Wasserstoff) ersetzt wird. Das Molekül hat jetzt Säurecharakter.

regelmäßige Sechsecke mit einer Kantenlänge von 1,42 Ångströmeinheiten handelt (eine ÅE. = $\frac{1}{100\,000\,000}$ cm).

Die Anthocyane bilden einen großen Teil der hell- und dunkelroten, violetten und blauen Farben. Abb. 58 zeigt z. B. den

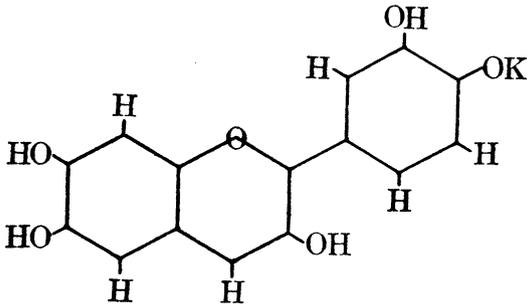


Abb. 59. Die Säuregruppe ist entfernt und der Wasserstoff einer der Hydroxylgruppen durch Kalium, gekennzeichnet durch K, ersetzt. Das Molekül ist jetzt alkalisch, es bildet das Blau der Kornblume.

Farbstoff der Rosen; der Hauptunterschied von der Grundform in Abb. 57 ist die Säuregruppe, die an das Sauerstoffatom angeschlossen ist. Wenn man sie wegnimmt und das Molekül dadurch alkalisch macht, daß man an einem Ende Wasserstoff durch Kalium ersetzt, dann bekommen wir das Anthocyan, das den

Kornblumen ihre blaue Farbe gibt (Abb. 59). Manchmal pflanzen Kinder auf dem Lande wilde blaue Hyazinthen in der Nähe von Ameisenhügeln ein; dann verwandelt die Ameisensäure das Blau der Blumen in Rot.

Man kann das Skelett des Anthocyanmoleküls ein wenig verändern, wenn man, wie in Abb. 60, an einer Stelle ein Sauerstoff-

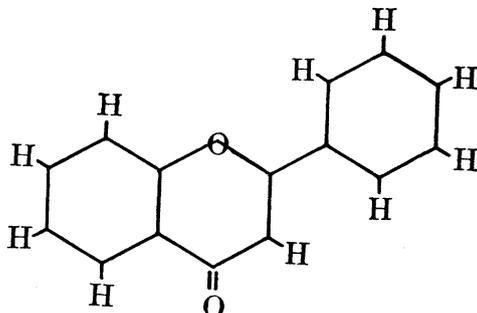


Abb. 60. Der Kern des Anthoxanthins ist von dem des Anthocyans dadurch verschieden, daß ein Sauerstoffatom fest an eines der Kohlenstoffatome in dem mittleren Ring gebunden ist und dort ein Wasserstoffatom ersetzt.

atom zufügt. Das Molekül wird dadurch in Wasser löslich, es ist der Farbstoff der Primeln, und wahrscheinlich ist dies der Grund, warum Primeln so leicht ihre Farbe verlieren, wenn sie naß werden.

Farbstoffe

Seit undenklichen Zeiten haben die Menschen Farbstoffe aus Pflanzen extrahiert, aber merkwürdigerweise haben sie selten die natürlichen Farbstoffe der Blätter und Blüten benutzt. Sie haben andere Bestandteile der Pflanzen genommen, die bei der Färbung der Pflanze selbst keine Rolle spielen. Die Farben der Natur sind zu vergänglich, die Änderungen der Farbtöne, die den Wechsel der Jahreszeiten begleiten, gehören zum Walten der Natur, aber der Mensch sucht nach etwas dauerhafterem, wenn er anfängt, sein Werkzeug oder Haus oder sich selbst zu schmücken. So haben die Menschen Indigo und Waid (blauer Farbstoff) aus den Wurzeln gewisser Pflanzen gewonnen, die sie anzubauen lernten. Aus ihnen und ihren Abkömmlingen haben die Färber viele wohlbekanntere Farbstoffe hergestellt.

Der Aufbau des Indigomoleküls ist wohlbekannt, wir sehen ihn in Abb. 61. Nachdem er im Jahre 1883 von A. von Baeyer endgültig aufgeklärt wurde, hat die Herstellung dieses Farbstoffes auf synthetischem Wege vollständig die ältere mühsame Gewinnung durch Extraktion aus Pflanzen verdrängt. Die Art der

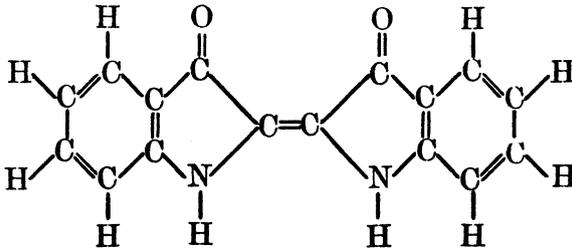


Abb. 61. Die Anordnung der Atome des Indigomoleküls, wie sie mit chemischen Methoden bestimmt worden ist.

Verwendung des Indigos ist sehr lehrreich; es ist in Wasser unlöslich, was natürlich sehr günstig ist, da ja Dinge gefärbt werden sollen, die dem Wetter ausgesetzt sind. Aber für den Vorgang des Färbens selbst braucht man eine Lösung, in die man die Stoffe eintauchen kann. Diese Schwierigkeit überwindet man dadurch,

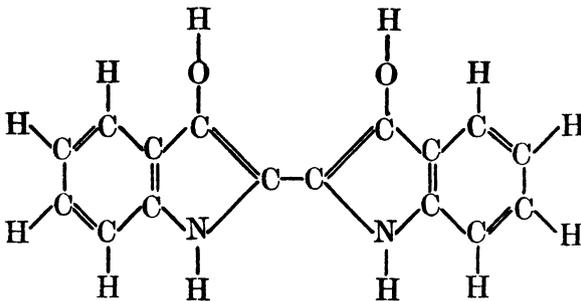


Abb. 62. Das Indigomolekül ist so verändert, daß es in Wasser löslich wird.

daß man den Indigo chemisch so behandelt, daß man Wasserstoffatome an sein Molekül anlagert (Abb. 62). So verändert ist das Molekül imstande, sich mit einem Wassermolekül zu verbinden, d. h. es wird in Wasser löslich.

Gleichzeitig wird die Verbindung farblos; dies ist ein gutes Beispiel für die früher erwähnte Tatsache, daß die Absorption von

Licht durch Moleküle eine Resonanzerscheinung ist. Wir hatten gesehen, wie der Ton einer Stimmgabel sich änderte, wenn an eine oder beide Zinken ein Stückchen Wachs geklebt wurde; bei der beladenen Stimmgabel waren die Schwingungen langsamer. Ebenso sollten wir erwarten, daß der „Ton“ oder die „Töne“ eines Moleküls, wenn überhaupt ein Parallelismus hier besteht, verändert würden, wenn man Gewichte anhängt, d. h. also, wenn man an bestimmten Stellen Atome einfügt. Der Färbereichemiker arbeitet wirklich mit solchen Zusätzen, er versucht, herauszufinden, was er anhängen soll, und an welcher Stelle es sein muß. Die „Echtheit“ der Farbe muß natürlich dabei erhalten bleiben, und die Zusätze, die er macht, dürfen durch die Einflüsse, denen das gefärbte Material ausgesetzt wird, nicht gelockert oder gar entfernt werden.

Der Bereich der sichtbaren Wellenlängen ist sehr klein, und es ist nicht schwer, den Farbton zu einem anderen Teil des Spektrums hin zu verschieben oder gar ganz aus ihm herauszukommen. Dies geschieht mit dem Indigomolekül, wenn es in Wasser löslich wird; es absorbiert dann nicht mehr die langen Wellen und läßt die blauen durch, sondern es läßt alles durch, und seine Lösung ist farblos.

Für den Vorgang des Färbens ist das kein Nachteil; die Stoffe werden in die Indigolösung eingetaucht und der Farbstoff heftet sich an die Fasern. Dann werden die Wasserstoffatome, die man an das Indigomolekül angehängt hatte, sehr einfach dadurch entfernt, daß man den gefärbten Stoff der Luft aussetzt. Sobald das Material das Farbbad verläßt, beginnt das Molekül, seine ursprüngliche Form wieder anzunehmen, die die Farbe des Indigos zeigt. Der Stoff ist dann gegen Wasser beständig, und der Färber hat seinen Zweck erreicht.

Das Waid, mit dem unsere Vorfahren vor 2000 Jahren ihre Körper bemalten, und der Purpur des Roms der Kaiserzeit, der von der Schnecke Murex gewonnen wurde, haben einen ähnlichen Aufbau wie das Molekül des Indigos.

Die Farben der Blätter und Blumen um uns bilden natürlicherweise den größten Teil von allem, was wir an Farben in der Welt sehen, mit Ausnahme der Farben von Himmel und Meer, denen wir uns jetzt zuwenden wollen. Wie die Farben der blauen Ferne und der untergehenden Sonne kommen die letzteren nicht von irgendwelchen Farbstoffen, und sie müssen auf eine ganz andere

Art erklärt werden. Es gibt auch noch die Farbe der Erden und der Gesteine, von denen einige so leuchtend sind, daß man sie als Farbstoffe benutzt hat; sie gewinnen ihre Farbe durch Absorption und gehören deshalb in eine Klasse mit den Farbstoffen, die wir bis jetzt betrachtet haben.

Beugung

Wir müssen uns jetzt einem ganz neuen Kapitel zuwenden und wollen gewisse Arten der Erzeugung von Farben kennenlernen, die vollkommen anders sind als die Methoden der teilweisen Absorption, die wir bis jetzt betrachtet haben.

Wir hatten früher gesehen, daß ein Lichtstrahl auf seinem Wege nur sehr wenig an den Seiten an Energie verliert, und daß dieses Verhalten nicht ganz leicht zu verstehen ist, wenn das Licht eine Art von Wellenbewegung sein soll. Dies ist auch der Haupteinwand, den Newton gegen die Wellentheorie erhob. Versuche mit Wasserwellen, wie wir sie in dem Wellenbehälter machen, zeigen immer einen gewissen Betrag von seitlicher Ausbreitung, und mit Newton könnte man annehmen, daß dieser Vorgang auch im Falle des Lichtes bei Annahme der Wellentheorie so deutlich in Erscheinung treten müßte, daß man sie aufgeben muß. In Wirklichkeit hat sich herausgestellt, daß dieser sehr ernsthafte Einwand der beste Beweis für die Wellentheorie geworden ist. Man hat bei näherer Betrachtung gefunden, daß die seitliche Ausbreitung sehr gering und schwer zu beobachten sein kann, wenn die Wellenlänge klein ist im Verhältnis zu der Breite des Strahles. Im Falle des Lichtes ist dieses Verhältnis oft außerordentlich klein, so daß man die Verbreiterung nur schwer beobachten kann, was für das Sehen außerordentlich günstig ist.

Dieser Punkt ist von größter Wichtigkeit für unsere Lichttheorien; wir wollen ihn daher sorgfältig untersuchen und uns dabei auf Experimente stützen.

Wenn wir in unseren Wasserbehälter in bestimmtem Abstand zwei Schranken einsetzen (Abb. 63) und Wellen erzeugen, die durch die Öffnung zwischen ihnen gehen, dann sehen wir sofort, daß immer etwas von dieser seitlichen Ausbreitung vorhanden ist. Die Wellen jenseits der Schranken sind noch in gewissem Maße Fortsetzungen der ursprünglichen Wellenbewegung und laufen miteinander parallel, aber auf beiden Seiten des neuen Wellensystems

ist eine Art Flügel, der die seitliche Ausbreitung zeigt, von der wir sprechen. Je weiter die Öffnung ist, um so mehr tritt der mittlere Teil der Wellen mit der regelmäßigen Fortsetzung des ursprünglichen Wellensystems in Erscheinung, und um so unbedeutender sind die Flügel. Wenn wir die Öffnung aber sehr klein machen, dann werden Mitte und Flügel zusammen zu Halbkreisen und die Störung breitet sich nach Durchgang durch die Öffnung nach allen Richtungen gleichmäßig aus, wie in Abb. 64.

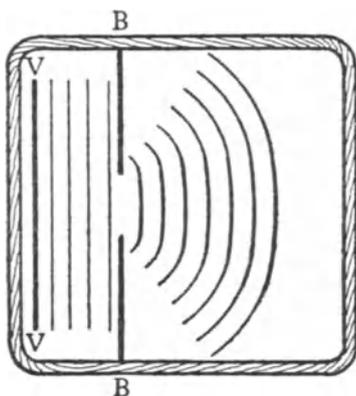


Abb. 63. Der vibrierende Stab V erzeugt Wellen und treibt sie zu der Schranke B , in der eine verhältnismäßig weite Öffnung ist. Die weiter fortschreitenden Wellen zeigen noch nach einiger Zeit die Form der Öffnung.

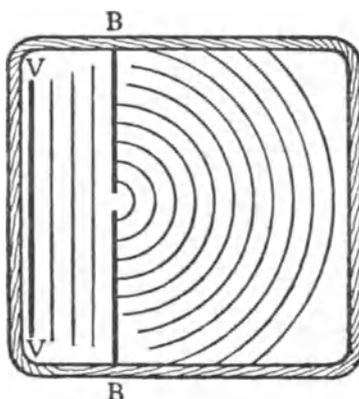


Abb. 64. Die Öffnung in der Schranke ist hier verhältnismäßig klein, und die Wellen nehmen beim Weitergehen die Form von Halbkreisen an.

Wenn wir von der Größe der Öffnung sprechen, dann meinen wir ihre Größe im Verhältnis zu der Länge der Wellen. Eine Öffnung, die groß für kurze Wellen ist, kann zur kleinen Öffnung werden und eine Ausbreitung in Halbkreisen wie in Abb. 64 verursachen, wenn es sich um lange Wellen handelt.

Wir können die Größenverhältnisse, wie sie beim Lichtstrahl auftreten, in unserem Behälter nicht nachmachen, denn unsere Wellen sind immer zu groß für die Öffnungen. Im Falle des Lichtes ist eine Öffnung von einem Zentimeter über zehntausendmal so groß wie die Wellenlänge; wir können uns daher leicht vorstellen, wie gering der Anteil der Flügel im Verhältnis zur Mitte sein muß. Wir müßten unseren Behälter einige tausend Male größer machen und in demselben Verhältnis auch die Öffnung in

der Schranke erweitern, wenn wir die Verhältnisse beim Licht genau nachmachen wollten. Statt dessen lernen wir aus unseren Versuchen mit dem Wellenbehälter, daß eine seitliche Ausbreitung in gewissem Maße immer bestehen muß, und daß wir im Falle eines Lichtstrahles unter gewöhnlichen Umständen nichts davon bemerken werden. Unter außergewöhnlichen Verhältnissen, wie wir sie im Laboratorium erzeugen können, ist es möglich, sie sichtbar zu machen, d. h. mit anderen Worten, wir können zeigen, daß Licht um die Ecke geht, wenn man entsprechende Vorkehrungen trifft. Außerdem zeigt uns der Vergleich mit den Wasserwellen, daß der Effekt von der Wellenlänge abhängig ist, und daß deshalb die langen und kurzen Wellen nicht mit gleicher Leichtigkeit um eine Ecke kommen, und daß daher einzelne Farben auftreten werden. Das ist auch wirklich der Fall, aber da die ganze Erscheinung unter gewöhnlichen Bedingungen nicht leicht beobachtet werden kann, so ist die Trennung in Farben noch schwerer zu verstehen.

Wir wollen daher besondere Maßnahmen für unsere Versuche mit dem Wellenbehälter treffen, um so zu einer Erklärung dafür zu kommen, daß im Falle des Lichtes sehr starke Farbwirkungen auftreten können. Wir stellen dazu in den Behälter eine Schranke mit einer Reihe von Öffnungen, die für unseren ersten Versuch nicht gleich groß zu sein brauchen und beliebig angeordnet sein sollen. Wenn Wellen auf diese Schranke zu bewegt werden und sie teilweise durchdringen, dann beobachten wir, daß die Wellensysteme sich auf der anderen Seite nach kurzer Zeit wieder zusammenschließen und die alte Front wieder herstellen (Abb. 65). Jede einzelne Schar, die aus einer Öffnung herauskommt, würde sich als Schar von Halbkreisen ausbreiten, wie in Abb. 64, aber ihre Wirkung vereint sich mit der aller anderen Wellen, und so erscheint schließlich eine gerade Wellenfront und bewegt sich in der ursprüng-

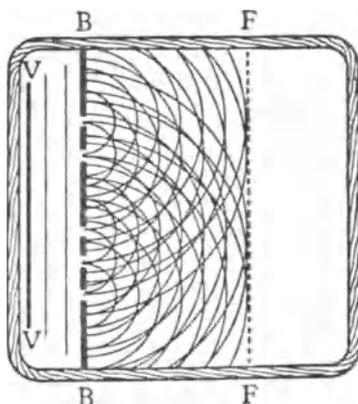


Abb. 65. Wenn die Wellen (vgl. Abb. 64) von einer Anzahl von Öffnungen ausgehen, dann bildet sich schließlich eine Wellenfront, angezeigt durch die gestrichelte Linie *F*, die mit der ursprünglichen Wellenfront parallel ist.

lichen Richtung weiter. Der Zweck dieses Versuches ist, zu zeigen, wie sich die Scharen von halbkreisförmigen Wellen zu einer ebenen Wellenfront zusammenschließen können.

Wir wollen uns jetzt die erste Schranke durch eine andere ersetzt denken, in der die Öffnungen sich in regelmäßigen Abständen folgen. Sie müssen nicht die gleiche Größe haben, aber es ist am bequemsten, sie gleich groß zu machen. Wir wollen uns eine Zeichnung machen, um zu sehen, was dann geschieht; das ist besser, als eine Beobachtung des Versuches selbst, für den die Größe des Behälters kaum ausreichen dürfte. Abb. 66 zeigt uns diese Zeichnung. Sie sieht kompliziert aus, aber sie besteht nur aus Scharen von Halbkreisen, die um den Mittelpunkt jeder Öffnung gezeichnet sind. Jede Schar zeigt, wie die Wellen sich ausbreiten würden, wenn die betreffende Öffnung die einzige in der Schranke wäre. In Wirklichkeit bilden alle Scharen zusammen ein System, und es entsteht, wie in dem vorigen Versuch, ein Wellenzug, den man als Fortsetzung des ursprünglichen Zuges betrachten kann, nur enthält er weniger Energie. Seine Front ist mit der ursprünglichen Wellenfront parallel und wird um so deutlicher, je weiter sie von der Schranke entfernt ist. Soweit ist der Versuch genau so wie in Abb. 65, nur befinden sich die Öffnungen jetzt in gleichen Abständen.

Aber es tritt außerdem eine neue Erscheinung auf, die sich nur dann bemerkbar macht, wenn die Öffnungen gleich weit voneinander entfernt sind. Außer der Wellenfront, die der Ausgangsrichtung entspricht, bildet sich schräg dazu eine neue Wellenfront, die der Richtung OB in der Zeichnung parallel geht. Sie wird durch eine Vereinigung von Wellen gebildet, die zu verschiedenen Scharen von Halbkreisen gehören; die Wellen sind aber nicht alle gleichzeitig durch die Öffnungen gekommen, sondern in regelmäßigen Abständen. Die Wellenfront berührt z. B. den ersten Kreis von der ersten Öffnung, den zweiten von der nächsten, und so weiter. Man sieht sie in der Zeichnung, wenn man das Buch beinahe in Augenhöhe hält, so daß die Abbildung stark perspektivisch verkürzt erscheint, und wenn die Blickrichtung parallel mit OB ist. Die Abb. 67, die einen Ausschnitt der vollständigeren Zeichnung 66 wiedergibt, mag helfen, dies zu verdeutlichen. Da sich so eine neue Wellenfront bildet, erfolgt eine Ausbreitung von Energie in dieser neuen Richtung. Man bezeichnet dies gewöhnlich als einen abgebeugten Strahl. Die Erscheinung wird in einem

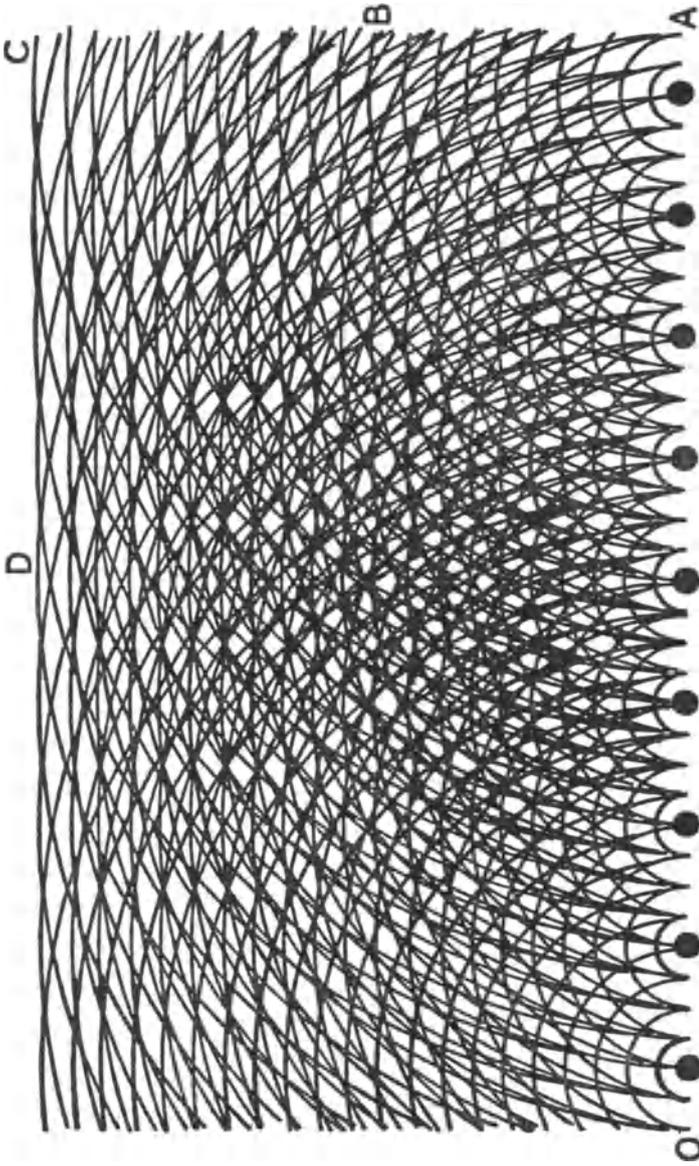


Abb. 66. Die schwarzen Punkte sollen eine Schaar regelmäßig angeordneter Löcher in der Sohranke im Wellenbehälter darstellen, sie können auch einer Anzahl von Teilchen entsprechen, die ankommendes Licht in Kreisen (oder wenn wir die Anwendung auf den dreidimensionalen Fall erweitern wollen, in Kugeln) streuen. Die Wellen kommen von unten und ihre Front ist parallel OA . Es entsteht die Wellenfront DC , wie schon in Abb. 65 erklärt wurde. Außerdem entstehen hier aber auch noch andere Wellenfronten. Um sie zu sehen, muß man schräg in den Richtungen OA , OB , OC und OD auf die Zeichnung sehen. Außer diesen gibt es keine andere Wellenfronten. (Zeichnung von W. T. Astbury.)

optischen Laboratorium dauernd beobachtet und bildet, wie wir gleich sehen werden, die Grundlage zu einem sehr genauen Verfahren zur Analyse des Lichtes.

Wenn wir die Zeichnung Abb. 66 in ihrer Ebene drehen, und nacheinander in der Richtung OC und OD blicken, dann sehen wir, daß noch in anderen Richtungen Wellenfronten sich nach dem Durchgang der Wellen durch die Barriere bilden und daß in diesen Richtungen Energie ausgebreitet wird. Wir sprechen von dem abgebeugten Strahl der ersten, zweiten, dritten Ordnung und so weiter. In der Zeichnung beträgt die Wellenlänge ein Viertel des Abstandes der Öffnungen, daher gibt es, wie die Abbildung zeigt, auf jeder Seite der Ausgangsrichtung drei abgebeugte Strahlen.

Nichts von alledem erfolgt, wenn die Öffnungen in der Schranke ungleiche Abstände haben. Nur wenn sie gleich sind, kann eine ebene Wellenfront eine Auswahl der halbkreisförmigen Wellen berühren und durch ihre vereinte Wirkung entstehen. Dies zeigt die Abb. 68.

Man beachte, daß die Ablenkung eines abgebeugten Lichtstrahls um so geringer wird, je kürzer die Wellenlänge ist, und je weiter die Öffnungen auseinander sind. In Abb. 67 ist die Beugung von zwei verschiedenen Wellenlängen in erster Ordnung gezeigt. Ein Paar von Photographien auf Tafel XVA bildet eine weitere Erläuterung zu diesem Punkt. Auf ihnen sind Beugungseffekte vieler Ordnungen zu sehen.

Im Falle des Lichtes ist ein Versuch leicht auszuführen. Man braucht dazu ein Stück Glas, auf das eine Schar von parallelen geraden Linien geritzt ist, so daß auf einen Zentimeter einige tausend Linien kommen und das Ganze ein Viereck von einigen Zentimetern Kantenlänge bildet. Man nennt dies ein Beugungsgitter. Es ist außerordentlich schwierig, ein wirklich gutes Gitter herzustellen, und die besten kommen von einigen berühmten Teilmaschinen. Die Gitter, die der verstorbene Professor Rowland in Baltimore angefertigt hat, sind weltberühmt, und eine ausgezeichnete Teilmaschine ist auch im National Physical Laboratory.

Licht von einer Bogenlampe fällt auf einen engen Spalt, der durch eine Linse auf einen Schirm abgebildet wird. Spalt und Linse sind in der Erklärung, die wir oben gegeben haben, nicht vorgekommen, sie sind aber unentbehrlich, wenn die Bilder auf dem Schirm hell und scharf sein sollen. Der Spalt soll senkrecht stehen und das Gitter so angeordnet sein, daß seine Linien parallel zu dem



Abb. 67. Dies Bild ist ein Ausschnitt aus dem vorigen und zeigt die Entstehung der in erster Ordnung abgelenkten Wellen. Es zeigt auch, daß die Beugung erfolgt, von der Wellenlänge abhängt. Das Verhältnis der kürzeren Wellen zu den längeren ist etwa dasselbe wie beim blauen und roten Licht.

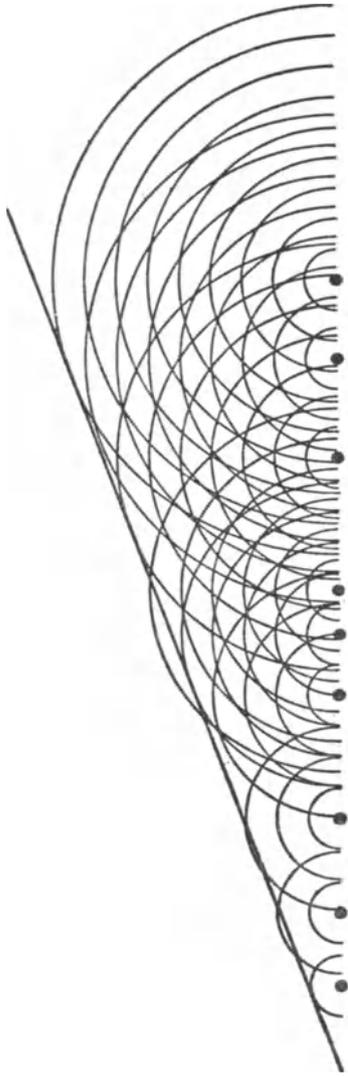


Abb. 68. Dies Bild zeigt, daß ein abgelenkter Wellenzug nur dann entsteht, wenn die Beugungszentren (schwarze Punkte) gleichmäßig verteilt sind. Wenn man, wie in dem Bilde, eine gerade Linie zieht, die einige der Wellenberge, die von den Kreisen dargestellt werden, berühren soll, dann werden andere Wellenberge durchschnitten. Einige der Wellen würden also einem Berg in der Front entsprechen und andere einem Tal: insgesamt würden sie sich gegenseitig vernichten. Die „Interferenz“ zwischen den einzelnen Wellenzügen wird im folgenden noch ausführlicher behandelt.

Spalt laufen; Abb. 69 zeigt dann einen Querschnitt durch diese Versuchsanordnung, mit dem einzigen Unterschied, daß die Wellenlängen und die Gitterabstände nicht so eng gezeichnet sind, wie sie eigentlich sein sollten. Die freien Stellen des Glases entsprechen den Öffnungen in der Schranke der Abb. 66, und die Striche, die undurchsichtig sind, den Teilen zwischen den Öffnungen. Die einzelnen Wellenlängen werden dann in verschiedenen Richtungen abgelenkt, und zwar die roten am stärksten und die blauen am wenigsten, so daß auf dem Schirm ein Spektrum erscheint, das dieselbe Farbenfolge zeigt, die wir früher von dem Prisma erhielten.

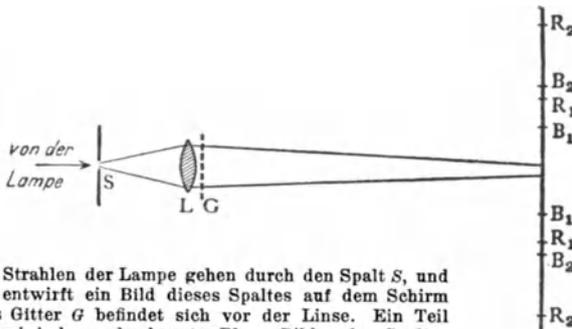


Abb. 69. Die Strahlen der Lampe gehen durch den Spalt S , und die Linse L entwirft ein Bild dieses Spaltes auf dem Schirm rechts. Das Gitter G befindet sich vor der Linse. Ein Teil des Lichtes wird dann abgelenkt. Blaue Bilder des Spaltes erscheinen in $B_1, B_2 \dots$ und rote in $R_1, R_2 \dots$. So entstehen Spektren. Das Spektrum erster Ordnung liegt zwischen B_1 und R_1 , das der zweiten Ordnung zwischen B_2 und R_2 usw.

Und noch mehr, das Spektrum erscheint auch in der zweiten und in höheren Ordnungen, und jedesmal ist es breiter, und die Farben sind besser voneinander getrennt.

Diese Methode, ein Spektrum zu erhalten, hat den großen Vorteil, daß mit ihr die Wellenlänge jeder abgelenkten Farbe bestimmt werden kann. Wie die Abb. 67 zeigte, besteht ein Zusammenhang zwischen der Wellenlänge, den Abständen des Gitters und dem Winkel, den der abgelenkte Strahl mit der Ursprungsrichtung bildet. Dieser Winkel wird beobachtet, der Gitterabstand ist mit dem Gitter gegeben, und daher kann man den Wert der ersten Größe bestimmen. Wellenlängen können so mit außerordentlich großer Genauigkeit gemessen werden.

Das Gitter kann auch auf einem Stück von gut reflektierendem Metall eingeritzt sein, etwa auf dem Spiegelmetall, das für die Reflektoren eines Fernrohres benutzt wird. Das Licht wird dann von

der Oberfläche des Spiegels reflektiert, und man bekommt genau denselben Effekt, als wenn das Licht durch das Glasgitter hindurchgegangen wäre.

Die Farben der Flügeldecken einiger Käfer und manche der Farben von Schmetterlingsflügeln und Vogelfedern, wie z. B. die Farben des Pfauenschwanzes, sind Beugungseffekte. In der Durchsicht zeigen die Pfauenfedern keine hellen Farben, sie sind nur einfach braun.

Manchmal erscheinen solche Farben durch die besondere Behandlungsweise eines Materials. Die Farben von Perlmutter kommen von dem Vorhandensein von kleinen Vertiefungen auf der polierten Oberfläche. Die Substanz hat sich in Schichten gebildet, die bei dem Fabrikationsprozeß durchschnitten werden, wobei parallele Furchen hinterbleiben. Wenn man einen Wachsabdruck von Perlmutter macht, dann erscheinen die Farben auch auf dem Wachs; die Färbung kommt also von der Form der Oberfläche und nicht von einem Farbstoff. Die Farben des Himmels und des Meeres sind in der Hauptsache ebenfalls Beugungserscheinungen; ihre Entstehungsweise werden wir später noch näher betrachten.

Interferenz

Wir wollen hier eine neue, aber verwandte Erscheinung betrachten, die ebenfalls Farben verursachen kann; nämlich die Erscheinung der Interferenz; sie ist deshalb mit der Beugung verwandt, weil sie ebenfalls als direkte Folgerung aus der Wellentheorie betrachtet werden kann. Es handelt sich um eine charakteristische Erscheinung jeder Wellenbewegung, die man oft auf der Meeresoberfläche beobachten kann, wenn zwei Scharen von Wellen einander durchqueren. An der Küste von Südaustralien liegt eine kleine Insel (Abb. 70), die die Wellen zerteilt, die von der Antarktis herkommen; dies hat zur Folge, daß zwei Wellensysteme entstehen, die einander schräg durchqueren, wenn sie zur Küste kommen. Das Ergebnis ist sehr interessant anzusehen. Wo Wellenberg auf Wellenberg trifft, schäumt das Wasser hoch auf, wo zwei Wellentäler sich treffen, ist die Vertiefung verdoppelt. Wenn ein Wellenberg der einen Schar an einer bestimmten Stelle das Wasser heben und ein Wellental der anderen Schar es gleichzeitig senken würde, dann bleibt das Wasser ruhig, es fällt weder, noch steigt es. Diese gegenseitige Wechselwirkung von Berg und Tal hat der Er-

scheinung der Interferenz ihren Namen gegeben, aber der Name ist in gewisser Hinsicht unvollständig, denn er bezieht sich nur auf einen bestimmten Teilvorgang der ganzen Erscheinung, die man besser als die Summierung oder Vereinigung von Wellen bezeichnet. Nur an bestimmten Stellen „interferieren“¹⁾ die beiden Wellensysteme so, daß sie sich gegenseitig aufheben, an anderen Stellen vereinigen sie sich zu verdoppelter Wirkung.

In kleinerem Maßstab haben wir denselben Vorgang in dem Behälter mit den Wasserwellen beobachtet; die Form der Wasser-

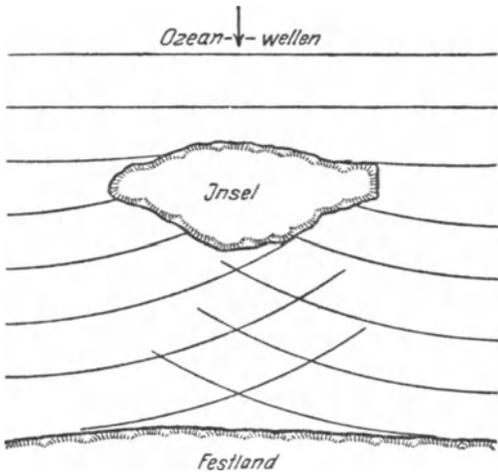


Abb. 70. Wellen vom Ozean gehen an beiden Seiten der Insel vorbei und treffen zusammen, wie man auf dem Bilde sieht.

oberfläche ist in jedem Augenblick einfach die Summe der Formen der einzelnen Wellensysteme. Wir können daher alle Interferenzerscheinungen jederzeit sehen und beobachten, wenn wir die Oberfläche von bewegtem Wasser anblicken. Am Meere sehen wir vielleicht eine Schar von kleinen Wellchen auf der Oberfläche einer größeren Welle dahinziehen, die vielleicht ihrerseits wieder von einer großen Meereswoge getragen wird. Jede Schar bewegt sich auf der gekrümmten Oberfläche des größeren Systems so, als wenn dieses eben wäre.

Als daher Thomas Young bei einer Vorlesung in der Royal Institution in den ersten Jahren des neunzehnten Jahrhunderts das

¹⁾ Im Englischen soviel wie: „stören“. Anmerkung des Übersetzers.

Prinzip der Interferenz verkündete und es auf gewisse bemerkenswerte optische Erscheinungen anwandte, da benutzte er in genialer Weise eine Erscheinung, die jedermann zu allen Zeiten sehen kann.

Das Prinzip ist im Grunde dasselbe wie das der Beugung; beide Erscheinungen kommen daher, daß Wellenbewegungen sich addieren können, aber man hält die beiden gewöhnlich auseinander, und zwar bezieht sich der Unterschied hauptsächlich auf die Art der Vorgänge, die man unter den beiden Überschriften betrachtet.

Wir wollen als Beispiel für Interferenzwirkungen die Farben einer Seifenblase betrachten. Young selbst wählte dasselbe Beispiel und gab die Erklärung dazu in seinem Buch über Naturphilosophie.

Eine Lamelle aus Seifenwasser besteht aus einer dünnen Wasserschicht, die durch die gegenseitige Anziehung der Seifenmoleküle zusammengehalten wird; sie ist für Licht durchsichtig. Wenn ein Lichtstrahl auf diese Lamelle fällt, dann wird ein Teil von ihm an der ersten Oberfläche, auf die der Strahl trifft, reflektiert, und ein Teil an der zweiten. Die beiden interferieren beim Weitergehen genau so wie die beiden Wellensysteme, die um die kleine Insel herumgingen, und die wir oben beschrieben haben. Die Reflexion von der Seifenblase ist aber ganz besonders regelmäßig. Der Wellenzug, der an der ersten Oberfläche reflektiert wird, addiert sich zu dem zweiten, der die Lamelle zweimal durchquert hat und deshalb etwas zurückgeblieben ist. Die beiden überlagern sich, und wo Wellenberg auf Wellenberg trifft, ist die Wirkung verdoppelt, und so weiter.

Das Zurückbleiben der einen Schar von reflektierten Wellen hinter der anderen hängt davon ab, wie groß die Strecke ist, die bei dem zweimaligen Durchqueren der Lamelle verlorengegangen ist, und das hängt wieder von der Dicke der Schicht und der Richtung des Durchquerens ab. Man kann den Verlust in Wellenlängen der betreffenden Lichtart ausdrücken; wir wollen annehmen, er betrage ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge, etwa ein, zwei, drei oder mehr Wellenlängen. Dann laufen die beiden Wellenzüge vollständig gleich, Berg trifft auf Berg und Tal auf Tal. Sie addieren sich und bilden eine Welle, die nach oben und unten den doppelten Ausschlag besitzt, und daher, wie man leicht nachweisen kann, die vierfache Energie jedes einzelnen der reflektierten Strahlen hat.

Zu dem geometrisch berechneten Verlust muß man noch eine halbe Wellenlänge hinzufügen; das kommt von einer bestimmten physikalischen Erscheinung. Die eine Reflexion erfolgt nämlich in Luft an der Grenze zum Wasser, und die andere in Wasser an der Grenze zur Luft. Beide sind in ihrer Art verschieden: nämlich bei der zweiten Reflexion geht eine halbe Wellenlänge verloren, wie dies

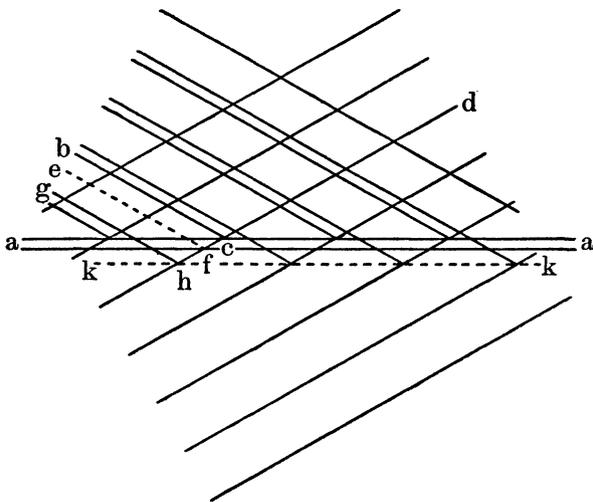


Abb. 71. Ein Wellenzug trifft auf die dünne Schicht $a a$; sie bestehe aus irgendeinem durchsichtigen Material. Die Wellen treffen die obere Fläche und werden hier reflektiert, wie z. B. $b c d$; hier ist $b c$ der reflektierte Teil, und $c d$ ist noch nicht bis zu der Schicht gekommen. Wenn $c d$ ein Teil eines Wellenberges ist, dann ist $b c$ der Rest desselben Wellenberges. Die Wellen gehen weiter, da sie nur einen Teil ihrer Energie an der ersten Oberfläche verlieren, und treffen auf die zweite. Hier verlieren sie eine halbe Wellenlänge bei der Reflexion. Die gestrichelte Linie $e f$ zeigt, wo der Berg der reflektierten Welle sein würde, wenn die Reflexion genau so wie an der ersten Oberfläche verlaufen würde. Der Verlust der halben Wellenlänge bringt die reflektierte Welle nach $g h$ zurück. Die Reflexion erfolgt so, als entstände sie erst an der gestrichelten Linie $k k$. Der zusätzliche Verlust vergrößert scheinbar die Dicke der Schicht.

in Abb. 71 zeichnerisch dargestellt ist. Es handelt sich um einen ähnlichen Vorgang wie bei der Reflexion der Schallwellen in Orgelpfeifen; man findet dort denselben Unterschied bei der Reflexion, wenn das Ende der Pfeife offen oder geschlossen ist. Man kann leicht einsehen, daß etwas derartiges angenommen werden muß, denn wenn die Lamelle verschwindend dünn wäre, würden die beiden Reflexionen in gleicher Phase sein, d. h. sich gegenseitig verstärken, und es kann doch keine Reflexion erfolgen, wenn die Lamelle nicht

vorhanden ist. Der Verlust einer halben Wellenlänge erklärt vollkommen das Verschwinden der Reflexion bei unendlich dünner Lamelle, denn er verschiebt die beiden Wellenzüge gerade um den richtigen Betrag; die Wellenberge des einen reflektierten Strahles treffen dann auf die Täler des anderen mit dem Erfolg, daß sie interferieren und sich gegenseitig aufheben. Es ist bekannt, daß eine sehr dünne Seifenlamelle keine Farben reflektiert, man beschreibt diesen Teil gewöhnlich als den schwarzen Punkt, obgleich man ihn mit genügender Vorsicht so groß machen kann, daß der Ausdruck „Punkt“ ganz unzutreffend ist.

Wenn also alle verzögernden Einflüsse zusammen eine ganze Zahl von Wellenlängen ausmachen, erfolgt starke Reflexion. Dieselbe Verzögerung wird aber für irgendeine andere Wellenlänge eine ganze Zahl und eine halbe Wellenlänge mehr betragen, und in diesem Falle vernichten sich die beiden reflektierten Strahlen gegenseitig, und Licht von der betreffenden Wellenlänge wird überhaupt nicht reflektiert, sondern die gesamte in ihr enthaltene Energie geht ungehemmt hindurch. Die Lamelle sondert also die einzelnen Farben aus, einige reflektiert sie, andere läßt sie durch; d. h. sie ist farbig, wenn man sie von vorn oder von hinten betrachtet.

Die Farbe, die unter einem bestimmten Winkel reflektiert wird, hängt, wie wir gesehen haben, von der Dicke der Lamelle ab. Wenn man einen runden Rahmen aus Draht in eine Seifenlösung taucht und dann senkrecht hält, dann wird die Flüssigkeit allmählich nach unten laufen, so daß die Dicke der Schicht mit der Tiefe zunimmt. Die Farben werden daher in horizontalen Streifen erscheinen. Eine der schönsten aller optischen Erscheinungen erhält man, wenn man einen feinen Luftstrahl, der die Oberfläche aufwirbelt, schräg gegen diese Schicht richtet. Wie bei einem Strudel im offenen Wasser wird die Flüssigkeit durch die kreisende Bewegung um den Mittelpunkt nach außen zum Rande getrieben, und die Farben erscheinen in ovalen Bändern um die Mitte herum. Man bekommt auf diese Weise schnell sehr reiche Farben, weil das Aufwirbeln und Blasen die Schicht dünner macht, und wir wissen wohl alle aus der Erfahrung, daß die Farben einer Seifenblase immer schöner werden, je dünner die Seifenblase ist, und daß die Farben am schönsten sind, gerade ehe der schwarze Punkt sich bildet oder die Blase platzt.

Die Erklärung für dieses Reicherwerden der Farben ist nicht schwer zu finden, und sie ist besonders interessant, weil Young

darüber geschrieben, und sie in Farben in seinem Buche im Bilde wiedergegeben hat (Tafel ID).

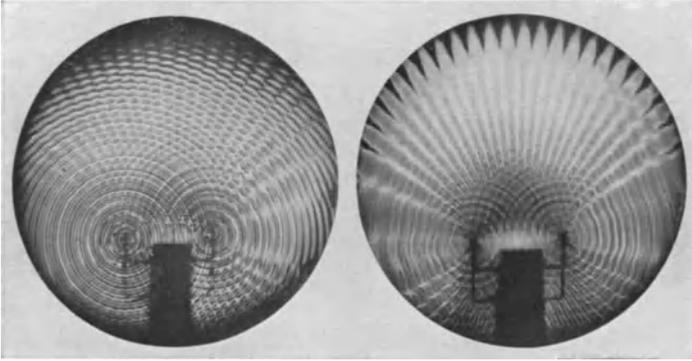
Wir wollen annehmen, der eine reflektierte Strahl sei zwei tausendstel Millimeter hinter dem anderen zurück. Die Wellenlänge des roten Lichtes, die 0,8 Tausendstel beträgt, tritt dann in dem reflektierten Strahl nicht auf, denn $0,8 \times 2,5 = 2$; der Verlust beträgt also zwei und eine halbe Wellenlänge. Zwei andere Wellenlängen im sichtbaren Spektrum werden auch fehlen, nämlich 0,57 und 0,44 Tausendstel, denn $0,57 \times 3,5 = 0,44 \times 4,5 = 2$, d. h. der Verlust beträgt drei und eine halbe bzw. vier und eine halbe Wellenlänge. Es werden also Teile im tiefen Rot (0,8), im Gelb (0,57) und im Blau (0,45) fehlen, andere Lücken treten im sichtbaren Spektrum nicht auf. Die Farbe des reflektierten Lichtes ist eine Mischung aus dem, was übrigbleibt.

Nehmen wir an, der Wegunterschied der beiden Strahlen sei größer, etwa vier tausendstel Millimeter; im Spektrum des reflektierten Lichtes werden dann mehr Lücken sein, und sie werden nicht so weit auseinander liegen. Vier ist gleich $0,73 \times 5,5$; $0,62 \times 6,5$; $0,53 \times 7,5$; $0,47 \times 8,5$ und $0,42 \times 9,5$. Alle diese Wellenlängen, 0,73, 0,62, 0,53 . . . liegen im sichtbaren Bereich. Man hat nun durch Versuche gefunden, daß das Licht nur schwach gefärbt erscheint, wenn im Spektrum viele Lücken in gleichen Abständen auftreten. Nur wenn die Schicht so dünn ist, daß der Unterschied der beiden Strahlen eine halbe oder anderthalb oder jedenfalls eine sehr kleine Zahl von Wellenlängen ausmacht, tritt starke Färbung auf.

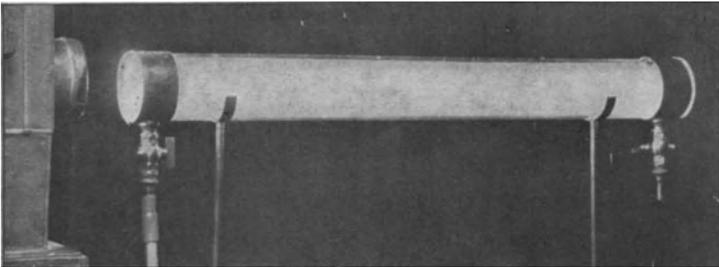
Young zeigte diese Erscheinung dadurch, daß er das Licht, das von einem Seifenhäutchen reflektiert wurde, durch ein Prisma gehen ließ. Er blendete mit einem senkrechten Spalt einen Teil davon aus und brachte ein Prisma in den Weg des Lichtes, das durch den Spalt kam; so erhielt er ein Spektrum, wie wir es von der Bogenlampe bekommen haben. Das Ergebnis zeigt Tafel ID in einer Reproduktion nach seiner Originalzeichnung. Das Bild ist um 90 Grad gedreht. Die Lücken sehen aus wie breite Bänder, die schräg durch das Bild gehen. Das kommt daher, daß im Spektrum des oberen Teiles der Lamelle (links im Bilde) nur wenige, weit auseinander liegende Lücken sind, während dieselben am unteren Ende, wo die Lamelle dicker ist, zahlreich sind (rechts im Bilde).

Young benutzte diese einfache Erklärung der Farben dünner Schichten als Stütze für die Wellentheorie. Newton selbst hatte

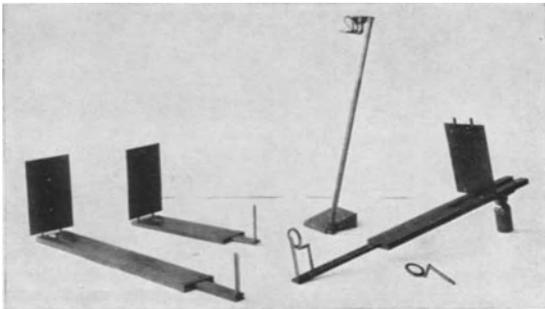
Tafel XV



A. Diese zwei Photographien stammen von Prof. Andrade. Sie zeigen die Ausbreitung von Wellen auf einer Quecksilberoberfläche. Die Wellen gehen von zwei Stellen aus, an denen die Oberfläche sehr oft in gleichmäßiger Folge von einer Spitze berührt wird. Das Bild links wurde beim Licht eines elektrischen Funkens aufgenommen, das rechts wurde eine Sekunde lang belichtet. Man sieht deutlich die Interferenzen, und die Trennung in radiale Streifen zeigt die Entstehung der abgebeugten Strahlen, die sehr zahlreich sind, weil die eintauchenden Spitzen so weit auseinander sind. (S. 104.)

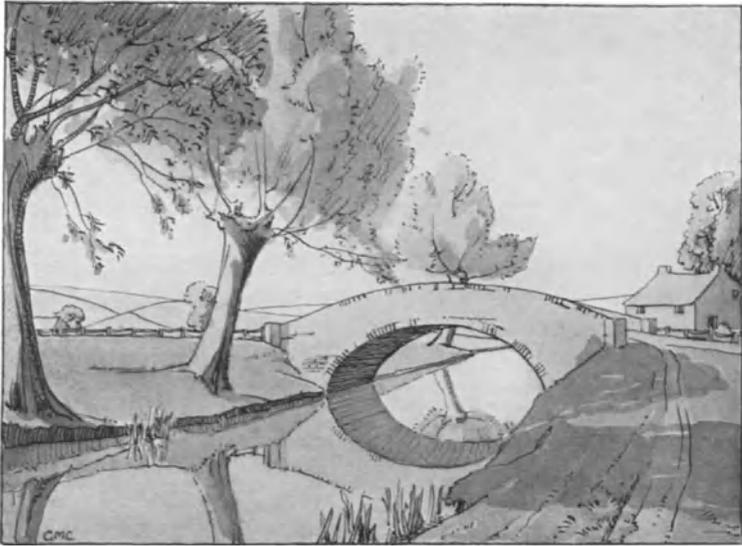


B. Das Rohr, das Tyndall bei seinen Versuchen über die Streuung des Lichtes durch feine, in der Luft schwebende Teilchen benutzte. (S. 116.)

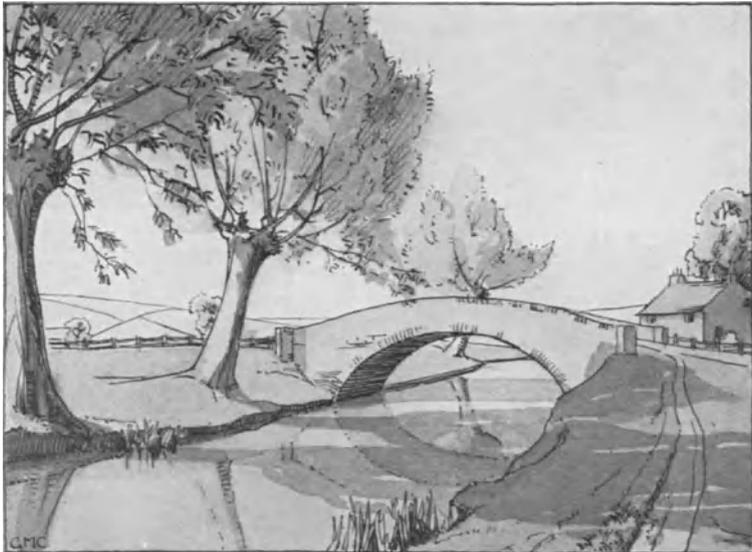


C. Eriometer, wie Young sie machte und benutzte. Jedes hat einen Halter für die Fäden, einen Schirm mit kleinen Löchern und eine verschiebbare Skala. Die Anwendung wird auf S. 126, 127 beschrieben.

Tafel XVI



A. In dieser Zeichnung ist das Wasser des Flusses klar, und der überhängende Baum wirft keinen Schatten auf die Oberfläche des Wassers. (S. 119.)



B. In dieser Zeichnung ist das Wasser jedoch schmutzig, und Schatten liegen auf seiner Oberfläche. Der Vergleich der beiden Bilder darf nicht auf eine Betrachtung der Farbtöne ausgedehnt werden, bei der man beide Bilder als Ganzes betrachtet. Das schmutzige Wasser wird eigentlich von der Sonne erhellt, aber dies kann durch Anpassen der Farbtöne in einer so einfachen Zeichnung nicht genügend deutlich gezeigt werden. (S. 119.)

diese Erklärung vorausgeahnt, aber er hielt sie nur für eine komplizierte ergänzende Hypothese zur Vervollständigung seiner Korpuskulartheorie. Die Einführung des Interferenzprinzips durch Young war deshalb ein großer Fortschritt, weil er zeigen konnte, daß die Wellentheorie für alle damals bekannten Erscheinungen ausreichte. Ein Beispiel der Farben dünner Schichten zeigt Tafel IA.

Die einfachen Farberscheinungen dünner Schichten sehen wir nie in großem Maßstabe, aber vereinzelt kommen sie oft genug vor. Sie verursachen die Anlauffarben von Stahl, der erhitzt wird, wobei sich die Oberfläche mit einer dünnen Haut von Eisenoxyd bedeckt. Sie bewirken die hellen Farben, die man sieht, wenn Benzin oder Öl in dünner Schicht sich auf Wasser ausbreiten. Man sieht sie in Sprüngen von Glas oder anderem durchsichtigem Material, und sehr schön erscheinen sie als sogenannte Newtonsche Ringe, wenn eine Linse auf eine ebene Glasscheibe gelegt wird, so daß zwischen den beiden eine dünne Luftschicht entsteht; da die Dicke dieser Schicht von der Mitte nach außen zunimmt, erscheinen die Farben als konzentrische Ringe, wobei der Mittelpunkt die Berührungsstelle der beiden Körper ist.

Dem Interferenzprinzip werden wir auf einem anderen Gebiet wiederbegegnen, nämlich bei der Aufklärung der Struktur von Kristallen mit Hilfe von Röntgenstrahlen. Auch für die Elektroingenieure sind die Interferenzen wichtig bei der Behandlung der Überlagerung elektrischer Wechselströme, die sich wie Wellen in den Leitungsdrähten fortpflanzen.

In der Akustik spielt das Interferenzprinzip eine große Rolle bei der Erklärung der Schwebungen von Tönen und bei anderen akustischen Erscheinungen. Wenn im Rundfunk ein Signalton gegeben wird, dann gibt es oft Stellen in einem Zimmer, wo die Berge von Schallwellen immer mit Wellentälern zusammentreffen und wo der Ton verhältnismäßig leise ist, während er an anderen Stellen immer lauter ist. Die Interferenz erfolgt hier zwischen dem ursprünglichen Ton und seinen Reflexionen von den Wänden und Gegenständen im Zimmer; wenn man den Kopf hin und her bewegt, dann kann man die Unterschiede in der Lautstärke hören.

Die Farben des Himmels

Die selektive Streuung des Lichtes

Die verschiedenen Farben des Himmels, sein tiefes Blau, die Höfe, die manchmal Sonne und Mond umgeben, das Rot und Gold und Grün der Sonnenaufgänge und -untergänge; all dies und noch manche andere Erscheinungen kommen von der Wechselwirkung zwischen den Lichtwellen und den Molekülen und verschiedenen Teilchen, die die Atmosphäre bilden und in ihr schweben. Es gibt keine färbende Substanz in der Luft, keinen Farbstoff, der einzelne Farben absorbiert und andere durchläßt, sondern es gibt nur eine Trennung von Farben ohne Zerstörung derselben. Früher einmal ist die Ansicht ausgesprochen worden, die Luft enthalte oder bestände aus einem blauen Gas, das Rot absorbiere. Aber dann würden Sonne, Mond und Sterne immer blauer und blauer werden, je näher sie dem Horizonte kämen und je größer die Luftschicht wäre, die ihre Strahlen zu durchqueren hätten, ehe sie unser Auge erreichen. Wir müßten dann auch ein blasses Blau über unseren Köpfen und ein tieferes weiter unten sehen; all dies ist aber in Wirklichkeit nicht der Fall.

Die Wellentheorie gibt uns eine bessere Erklärung. Das Licht wird von Teilchen gestreut, die in der Luft schweben, ebenso wie die Meereswellen von Felsen, die über die Wasseroberfläche herausragen, abgelenkt und gestreut werden. Die kurzen Lichtwellen, die das blaue Ende des Spektrums bilden, werden leichter abgelenkt als die längeren roten Wellen, genau so wie kleine Wellchen von einem Felsen aus ihrer Richtung gebracht werden, den große Wellen überspülen können, die dann in ihrer eigenen Richtung weiterziehen. So entsteht eine Trennung, und Farbe wird erzeugt. Nach dieser Hypothese müßte man erwarten, daß das Sonnenlicht beim Sonnenaufgang und auch beim Untergang dazu neigen sollte, gelblich und sogar rot zu werden, weil der längere Luftweg die blauen Strahlen vollständiger beseitigen kann. Außerdem müßte das abgelenkte Blau die blaue Farbe des Himmels hervorrufen.

Beispiele für diese Erscheinung sind sehr häufig. Der Rauch, der aus einem Schornstein aufsteigt, sieht gegen einen dunklen Hintergrund blau aus, besonders, wenn die Kohleteilchen, die das Licht streuen, sehr klein sind, wie bei einem Holzfeuer oder bei einem Kohlenfeuer, das nahe am Ausbrennen ist. Kohle in Stücken ist natürlich schwarz, aber im Rauch ist die Streuung durch die kleinsten Teilchen wirksamer als die Absorption der Farbe. Um ein gutes Blau zu erzeugen, müssen die Teilchen kleiner sein als die Wellenlänge des Lichtes, und in diesem Falle ist die Absorptionswirkung verhältnismäßig gering. Wenn man andererseits den Rauch gegen einen hellen Hintergrund leuchtender Wolken oder gar gegen die Sonne selbst sieht, dann ist die Farbe, die durchdringt, ein Braun oder Rotbraun.

Der Rauch von dem brennenden Ende einer Zigarette ist blau, wenn er in die Luft steigt, aber er ist grau, wenn er aus dem Munde kommt, denn die Teilchen haben dann Feuchtigkeit von dem warmen Atem aufgenommen, sind daher größer und streuen die langen Wellen stärker. Rotes Licht dringt in einer nebligen Atmosphäre besser durch als weißes, weil die Wasserteilchen die langen roten Wellen nicht so stark streuen wie die blauen Wellen. Die Einzelheiten einer nebligen Landschaft photographiert man am besten mit einer Gelscheibe vor der Linse, die das gestreute blaue Licht absorbiert. Wenn man nachts im Auto fährt, wird man bei Nebel leicht geblendet durch die gestreuten Strahlen, die in das Auge zurückgelangen, und man setzt deshalb oft rote Glas-scheiben vor die Scheinwerfer, um die kürzeren Wellen zu be-seitigen. Helle rote Lichter benutzt man auch, um den Verkehr im Nebel aufrechtzuerhalten. Versuche aus letzter Zeit haben aber gezeigt, daß der Gebrauch roten Lichtes ein zweifelhafter Vorteil ist, weil die Nebelteilchen so groß sind, daß sie alle sichtbaren Wellenlängen streuen. Die ultraroten Strahlen dagegen, denen wir uns gleich zuwenden werden, sind so lang, daß sie der Streuung entgehen.

Streuung durch Moleküle

Mit Hilfe der Wellentheorie kann man also das Auftreten von Farben beim Durchgang von Strahlen durch eine Luftschicht voll feiner Teilchen wohl erklären. Diese Teilchen können aus Staub oder aus kondensiertem Wasserdampf bestehen; beides hat man als Ursache für die Streuung angenommen. Tyndall nahm an,

die blaue Farbe des Himmels käme von dem Wasserdampf, aber der verstorbene Lord Rayleigh konnte auf rechnerischem Wege zeigen, daß als Grund für die Streuung die Luftmoleküle selbst vollständig ausreichen. Sie sind zwar außerordentlich klein, viel kleiner als die Wellenlänge des Lichtes, aber die Gesamtwirkung einer unendlich großen Anzahl von winzigen Streuungsbeträgen von den einzelnen Molekülen reicht aus, um das Licht, das vom blauen Himmel zu uns kommt, zu erklären. In der Nähe der Erdoberfläche schwebt viel Materie in der Luft und ist mit für die Streuung verantwortlich, aber die Staubschicht der Erde reicht nicht höher als etwa 1000 m, und in dem Observatorium auf Mount Wilson in Kalifornien, 1500 m über dem Meeresspiegel, hat man die Intensität des Lichtes, das vom Himmel kommt, messen können und das Ergebnis mit dem Wert verglichen, der aus Rayleighs Theorie folgte; es ergab sich eine vollständige Übereinstimmung. Wenn Sonnenlicht in tiefere Luftschichten kommt, dann ist das seitlich von ihm gestreute Licht nicht so rein blau, wie wenn es in größerer Höhe gestreut wird, wo keine Staubteilchen längere Wellenlängen zu dem von den Luftmolekülen selbst gestreuten Licht hinzufügen.

In nördlichen Breiten, besonders in England, ist gewöhnlich viel Feuchtigkeit in der Luft, und das Blau des Himmels ist blaß und wässerig im Vergleich zu dem tiefen Blau südlicher Länder. Aber auch im Süden herrscht nicht immer strahlendes Blau, manchmal bläst ein heißer trockener Wind und wirbelt Staubwolken auf, bis das Blau verschwindet und der Himmel farblos und dunkel geworden ist. Dann strömt vielleicht ein Regen nieder, nimmt allen Staub mit und wäscht den Himmel im wahrsten Sinne des Wortes sauber.

Tyndall pflegte einen sehr schönen Versuch zur Erläuterung der Theorie zu zeigen, daß das Blau von feinen suspendierten Teilchen komme. Ein Glasrohr von etwa 1 m Länge wurde so aufgestellt, wie man auf Tafel XVB sehen kann. Seine Enden waren mit Glasplatten verschlossen, so daß ein Lichtstrahl hindurchgehen konnte. Das Rohr wurde erst evakuiert und dann mit einer Mischung von Luft, Chlorwasserstoff und dem Dampf von Butylnitrit gefüllt. Nach einigen Minuten wurden durch chemische Reaktionen sehr feine feste Teilchen gebildet, die in dem Gas suspendiert blieben. Die Teilchen hatten alle gleiche Größe, dies ist ein wichtiger Punkt; sie streuten das Blau zur Seite, und ein

Beobachter, der das Rohr von der Seite sah, gewahrte zuerst einen schwachen blauen Schimmer, der allmählich immer stärker und mit zunehmender Teilchengröße heller wurde. Nach Tyndalls eigener begeisterter Beschreibung „... können wir ein Blau erzeugen, das dem des tiefsten und reinsten italienischen Himmels gleichkommt oder es sogar übertrifft“.

Man kann den Versuch leicht in etwas anderer Form anstellen; man füllt einen Behälter aus Glas mit einer stark verdünnten Lösung von Natrium-thiosulfat, und läßt einen Lichtstrahl durch den Behälter gehen und auf einen Wandschirm treffen, wo er einen weißen Lichtkreis hervorruft. Dann gibt man verdünnte Salzsäure dazu, und in ein oder zwei Minuten scheiden sich Schwefelteilchen aus und fangen an, zu wachsen; die Farbe des Lichtes, das durch den Behälter geht, wird dabei erst gelb und dann rot, die weiße Scheibe verwandelt sich in eine gelbe und dann in eine rote untergehende Sonne. Währenddessen ist das Wasser im Behälter zuerst blau und erscheint dann grau wie dichter Nebel. Eine Farbenphotographie dieser Erscheinung zeigt Tafel XIVH.

Tyndall glaubte, wenn er allen Staub und Dampf aus seinem Glasrohr entfernen könnte, würde nichts übrigbleiben, um das Licht zu zerstreuen, und man würde von der Seite den Lichtstrahl bei dem Durchgang durch das Rohr nicht sehen können. Dies war ein Irrtum, aber sein Versuch zeigte sehr gut die Tatsache der Streuung durch feste Teilchen und die Abhängigkeit der gestreuten Farbe von der Größe der Teilchen.

Der jetzige Lord Rayleigh hat betont, daß es möglich sein müsse, die Streuung des Lichtes durch die Moleküle der Luft auch in einem Rohr von der Größe, wie Tyndall es benutzte, zu beobachten. Er wies darauf hin, daß Licht vom Himmel komme, auch wenn derselbe nur vom Mond erhellt würde. Da nun das Sonnenlicht eine halbe Million mal so stark ist wie das Mondlicht, so muß man die Streuung von Sonnenlicht beim Durchgang durch eine Luftschicht von zwei Millionstel der Dicke der Atmosphäre ebenso gut sehen können wie man den Himmel bei Mondlicht erblicken kann, ja, 10 bis 20 cm Luft müßten schon sichtbar sein. Als der Versuch mit geeigneten optischen Instrumenten angestellt wurde, zeigte es sich, daß dies der Fall war.

Natürlich kommt ein großer Teil der herrlichen Farben der Sonne und des Himmels, die man morgens und abends sehen kann, davon, daß die Streuung durch Staub und Wasserdampf zu der

Wirkung der Luftmoleküle hinzukommt. Manchmal fügt der Rauch eines Feuers, etwa eines Waldbrandes, noch ein tiefes Rot zu den anderen Farben. Als der Krakatau bei seinem Ausbruch vor einem halben Jahrhundert Unmengen feinsten Staubes in die Luft schleuderte, waren viele Monate danach die Himmelfarben in der ganzen Welt erstaunlich schön, weil der Staub überallhin kam und es sehr lange dauerte, bis er sich absetzte.

Wenn wir bei etwas nebliger Luft Berge in der Ferne sehen, dann scheinen sie blau zu sein, aber sie senden natürlich kein blaues Licht aus, sondern das Blau kommt von den Molekülen und Teilchen der Luftschicht, die dazwischen liegt, es ist ein Teil des Himmels, der diesen Raum ausfüllt.

Eine Wolke besteht gewöhnlich aus einer Anhäufung von Wassertropfen, die so groß sind, daß sie alle Farben des Spektrums streuen, und wenn die Wolke Strahlen von der Sonne in unser Auge reflektiert, dann erscheint sie daher als glänzende weiße Masse; wenn eine Wolke zwischen uns und der Sonne liegt, dann kann sie alles Licht abfangen und schwarz aussehen, nur an den Rändern wird vielleicht etwas Licht gestreut und versilbert ihre Umrisse.

Die Farbe des Meeres

Die blaue Farbe des offenen Meeres ist ähnlich zu erklären wie die des Himmels. Der Beweis hierfür ist aber schwieriger, und selbst große Beobachter wie der verstorbene Lord Rayleigh waren ihrer Sache nicht ganz sicher. Zweifellos stammt ein großer Teil des Meeresblaus davon, daß der Himmel gespiegelt wird; man könnte dies zunächst sogar für eine allein ausreichende Erklärung halten. Die Beobachtung drängt sich uns geradezu auf, daß unter einem blauen Himmel auch das Meer blau aussieht, besonders wenn ein leichter Wind die Oberfläche kräuselt und die Seiten der Wellen das Licht, das von oben kommt, zu uns reflektieren; unter einem bleifarbigem Himmel dagegen sieht das Meer grau aus.

In der Nähe der Küste ist das Wasser grün, weil es feinen gelben Sand aufgeschwemmt enthält, und wenn die Sonne hindurchscheint, dann mischt sich Gelb in das gestreute Licht. Wenn Algen vorhanden sind, dann gibt ihr tiefes rötliches Braun zusammen mit dem Blau und Grün eine violette Farbe. Manchmal enthält Süßwasser oder Meereswasser so viel aufgeschwemmte Materie in feiner Verteilung oder so viel Luft in Form kleinster

Bläschen, daß auch eine kleine Menge Wasser grün aussieht. Das Wasser des Pukaki-Sees in Neuseeland, das von Gletschern kommt, ist sogar im Eimer grün, und diese Erscheinung ist zweifellos keine Seltenheit.

Es gibt also viele Beispiele, die zeigen, daß suspendierte Materie das Meer blau färben kann, aber trotzdem kann man beweisen, daß die Moleküle des Wassers ebensowohl ein Blau streuen wie es die Luftmoleküle tun. Unlängst hat Sir C. V. Raman aus Kalkutta auf Grund von Beobachtungen, die er während einer Seereise machte, zeigen können, daß das violette Blau der Tiefsee so erklärt werden müsse, und er stellte Versuche im Laboratorium an, die wirklich die Streuung eines Lichtstrahles beim Durchgang durch sehr reines Wasser zeigten.

Ein Lichtstrahl, der die glatte Oberfläche reinen Wassers trifft, wird von dem Punkt seines Auftreffens nicht nach allen Richtungen gestreut; die Oberfläche ist deshalb unsichtbar, und man kann keine Einzelheiten auf ihr unterscheiden. Ein Baum, der über klares Wasser hinausragt, wirft daher keinen Schatten auf der Oberfläche. Es gibt aber wohl einen Schatten, wenn das Wasser schmutzig ist und genügend schwebende Teilchen enthält, um das Licht zu streuen, bevor es tief eingedrungen ist, denn in diesem Falle sieht das Auge da einen Unterschied, wo kein Sonnenlicht das Wasser trifft. Diesen Schatten darf man nicht mit dem Spiegelbild des Baumes verwechseln; der Schatten ist auf der Oberfläche, während das Spiegelbild ebenso weit unter der Oberfläche liegt, wie der Baum darüber ist. Eine Wolke wirft einen Schatten auf bewegter See, weil sie Licht abschneidet, das von den einzelnen Wellen in unser Auge gespiegelt wird, auf glatter See dagegen können wir nur das Spiegelbild der Wolke im Wasser sehen. Wenn man auf der Schattenseite eines Dampfers über die Reling in das Wasser sieht, dann beobachtet man, daß der Schatten des Schiffes nicht bis zu dem Teil der Wasseroberfläche reicht, wo das Meer rein und von tiefblauer Farbe ist, sondern man sieht ihn nur da, wo die Bewegung des Dampfers das Wasser aufgewühlt und mit Luftblasen erfüllt hat. Hier werfen die Ränder der Blasen das Licht in unser Auge, und wo die Masse des Dampfers das Licht abschneidet, verschwindet diese Streuung und wir sehen einen Schatten.

Auf dem Wasser eines trüben Flusses sind die Schatten stark und deutlich (vgl. Tafel XVI).

Höfe um Sonne und Mond

Die Höfe, die manchmal Sonne und Mond umgeben, sind ebenfalls Erscheinungen von Streuung unter besonderen Bedingungen. Wenn die suspendierten Teilchen sehr klein sind, dann streuen sie Licht nach allen Richtungen, und wenn sie groß sind im Verhältnis zur Wellenlänge des Lichtes, dann reflektieren sie das Licht wie feste Körper oder Wassertropfen. Zwischen diesen beiden Extremen gibt es eine kritische Größe, bei der ein Hof auftritt, nämlich dann, wenn Tropfen und Wellenlänge von ungefähr gleicher Größe sind. Wir hatten einen Parallellfall kennengelernt, als wir

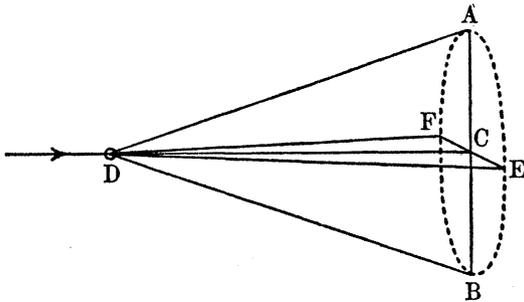


Abb. 72. Wenn ein Strahl in der Richtung DC von dem Tropfen bei D um den Winkel ADC abgelenkt wird, dann bilden die abgelenkten Strahlen insgesamt einen Ring auf einem Schirm wie in der Zeichnung, weil alle Richtungen DA , DB , DE und DF usw. mit DC denselben Winkel bilden.

die Wirkung des Beugungsgitters beschrieben, wo die Gitterabstände von derselben Größenordnung waren wie die Wellenlänge des Lichtes (vgl. Abb. 66). Nur wenn die beiden Größen ungefähr übereinstimmten, konnte man die vom Gitter abgelenkten Strahlen beobachten. Wenn die Mitten der Öffnungen zu weit auseinander waren, dann wirkte jede unabhängig von der andern, waren sie zu eng beisammen, konnten sich die sekundären Wellenfronten der Abb. 66 nicht bilden. Dasselbe ist der Fall, wenn Tropfen Beugungseffekte verursachen, sie dürfen weder zu groß noch zu klein sein.

Man kann leicht folgendes einsehen: Wenn ein Wassertropfen, der in der Luft schwebt, überhaupt eine Beugung hervorruft, d. h. wenn er die Ursache für irgendeine Trennung von einzelnen Farben ist, dann muß er einen Ring bilden; eine andere Möglichkeit gibt es nicht. Wenn Licht von bestimmter Wellenlänge in einer

bestimmten Richtung besonders stark gestreut wird, was ja das Wesen der Beugung ist, und wenn man das gestreute Licht auf einem Schirm auffängt, dann muß es hier in Form eines Kreises erscheinen mit dem Mittelpunkt in C (Abb. 72), dem Projektionspunkt des Tropfens auf dem Schirm. Das kommt daher, daß die bestimmte Richtung, von der wir sprachen, eine beliebige Lage um die Linie DC herum haben kann, sie muß nur immer denselben Winkel mit DC bilden. Wir können auch erwarten, daß der Winkel zwischen der Ausgangsrichtung und der bestimmten Streurichtung

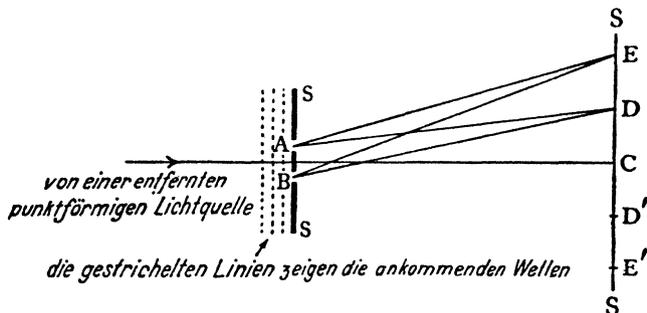


Abb. 73. Von links kommen Lichtwellen durch zwei kleine Löcher in einem Schirm. Bei C verstärken sich die zwei Züge von kugelförmigen Wellen, die von A und B ausgehen, und es entsteht Helligkeit. Wenn DB um eine halbe Wellenlänge größer ist als DA , dann entsteht bei D Dunkelheit, weil die beiden Wellenzüge nach dem Prinzip von Young interferieren. Bei E ist wieder Helligkeit, wenn EB um eine ganze Wellenlänge größer ist als EA und die beiden Wellenzüge daher gleiche Phase haben. Andere Linien von Licht und Dunkelheit folgen einander abwechselnd. Die Lage der Linien hängt von der Wellenlänge ab, sie sind bei blauem Licht enger beieinander als bei rotem.

mit abnehmender Wellenlänge immer kleiner wird, so daß der Beugungsring, der von einem einzelnen Tropfen kommt, farbig, und zwar innen blau, sein wird. Man kann diese Erscheinung leicht in einem Versuch zeigen. Wir wollen aber, ehe wir das tun, uns noch etwas genauer mit der Theorie beschäftigen, weil wir dabei neue Beweise für die Gültigkeit der Wellentheorie finden werden.

Zunächst wollen wir uns einen Versuch ausmalen, den man im Laboratorium auch wirklich ausführen kann, wenn man die hierbei gebotenen Vorsichtsmaßregeln einhält. Wir wollen uns vorstellen, wir schneiden in ein Stück Pappe ss zwei kleine Löcher mit den Mitten A und B (Abb. 73) und bringen die Pappe vor eine punktförmige Lichtquelle, wie die Abbildung es zeigt. Wir sagen eine „punktförmige“ Lichtquelle, denn wäre diese breit, dann würden

sich so viele Bilder überlagern, daß die Erscheinung, die wir beobachten wollen, undeutlich sein würde. Auf der Seite des Kartons, die dem Licht abgewandt ist, gehen zwei kugelförmige Wellenzüge von A und B aus und fallen auf den Schirm SS . An einigen Stellen des Schirmes sind die beiden Wellenzüge in gleicher Phase, wenn sie auftreffen, und ihre Wirkungen überlagern sich. An anderen Stellen wirken sie gegeneinander, sie interferieren und es entsteht Dunkelheit. Zum Beispiel ist der Punkt C auf dem Schirm in der Zeichenebene von A und B gleich weit entfernt, hier addieren sich die beiden Wellenzüge und es entsteht Licht. Dies gilt nicht nur für den Punkt C in unserer Zeichnung, sondern für alle Punkte auf

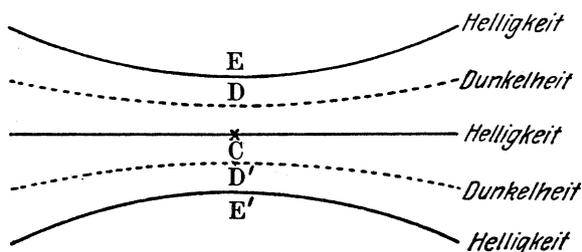


Abb. 74. Vorderansicht des Schirmes SS der Abb. 73. Die ausgezogenen Linien erscheinen hell, die gestrichelten dunkel. Von der großen Zahl aufeinander folgender Linien sind nur einige gezeichnet; jede bildet ein enges Spektrum.

dem Schirm, die von A und B gleichen Abstand haben, ob sie in der Zeichenebene liegen oder nicht. Es entsteht daher eine Linie von Licht, wie die waagerechte Linie durch C in der nächsten Abbildung (74) zeigt; dieses Bild zeigt den Schirm SS von vorne.

Bei dem Punkt D auf dem Schirm, der so gewählt ist, daß DA um eine halbe Wellenlänge kürzer ist als DB , wirken die beiden Wellenzüge dauernd gegeneinander, und der Punkt bleibt daher dunkel. Das gilt auch wieder für alle Punkte auf einer Linie, wie Abb. 74 zeigt. Diese Linie ist etwas gekrümmt, weil für Punkte rechts und links von D die Entfernungen von A und B größer sind als bei D selbst, und der Punkt, bei dem die eine Entfernung eine halbe Wellenlänge größer ist als die andere, liegt etwas weiter von der waagerechten Linie durch C entfernt. So entsteht also auf dem Schirm eine Anzahl heller und dunkler Linien.

Bei diesem Vorgang treten nun einzelne Farben auf, weil die Lage der Punkte D und E und der Linien, die durch sie gehen, von der Wellenlänge abhängt. Die blauen Linien liegen näher an der

horizontalen Linie der Abb. 74 als die roten, und eigentlich entsprechen die hellen Linien Reihen von Spektren.

Wir wollen jetzt annehmen, daß wir die Karte mit den beiden Löchern A und B um eine Achse drehen, die senkrecht zu der Ebene der Karte ist und durch den Mittelpunkt zwischen A und B geht. Das Bild auf dem Schirm wird sich dann mitdrehen. Die beiden Löcher bilden einen Ring, oder vielleicht haben sie sich ursprünglich berührt, dann bilden sie einen großen Kreis. Aus dem Bild auf dem Schirm wird ein Ring mit C als Mittelpunkt und mit einem Radius, der etwas größer ist als CE . Man kann dies leicht dadurch zeigen, daß man auf eine Karte zwei schwarze Linien zeichnet, die den hellen Kurven durch E und E' entsprechen sollen, und diese Karte dann in ihrer eigenen Ebene um C als Mittelpunkt dreht. Wenn man die Linien bunt zeichnet, dann kann man den Ring noch genauer nachmachen.

Wenn also Licht durch die beiden Löcher kommt, während sie gedreht werden, dann bildet es einen Beugungsring, und obgleich die Umdrehung der beiden Löcher nicht ganz genau einem großen Loch entspricht, so ist es doch einleuchtend, daß dadurch kein großer Fehler entsteht, und durch die Verbesserung würde das Aussehen des Ringes nicht sehr verändert werden.

Der eigentliche Versuch ist wegen der Kleinheit einiger der vorkommenden Längen schwierig zu machen und gelingt nur unter ganz bestimmten Bedingungen. Wenn nämlich die Mitten der beiden Löcher A und B einen halben Millimeter auseinander wären und der Schirm einen Meter weit entfernt wäre, dann würde der Radius des Ringes erst etwa zwei Millimeter betragen, und die Erscheinung würde nicht nur sehr klein sondern auch sehr lichtschwach sein.

Wir haben noch einen weiteren Schritt zu machen, ehe unsere Erklärung vollständig ist, denn wir haben nur gezeigt, daß ein Beugungsring entstehen kann, wenn Licht durch eine enge Öffnung kommt, wir wollen aber wissen, was erfolgt, wenn das Licht um ein kleines Hindernis herumgeht. Man kann nun zeigen, daß die beiden Vorgänge gleichwertig sind, jede der beiden Anordnungen führt zu demselben Beugungsring. Dies ist ein einfacher, aber sehr interessanter Schluß, der aus der Wellentheorie folgt, wie Babinet im Jahre 1837 zeigte; sein Beweis lautete folgendermaßen:

Nehmen wir an, der Schirm SS in Abb. 73 bestände aus Glas. Wäre das Glas überall klar, dann würde kein Beugungsring auf-

treten, wäre es überall schwarz, mit Ausnahme eines kleinen Loches, dann würde der Ring erscheinen. Den Fall des klaren Glases kann man sich nun als Überlagerung zweier Vorgänge denken, erstens alles ist schwarz mit Ausnahme eines kleinen Loches, und zweitens alles ist durchsichtig mit Ausnahme eines schwarzen Fleckes an der Stelle, wo vorher das Loch war. Die Wirkung dieser beiden Fälle ist vereint dieselbe wie die des ersten Falles, wo alles durchsichtig war, nämlich es erscheint kein Beugungsring bei E . Die beiden

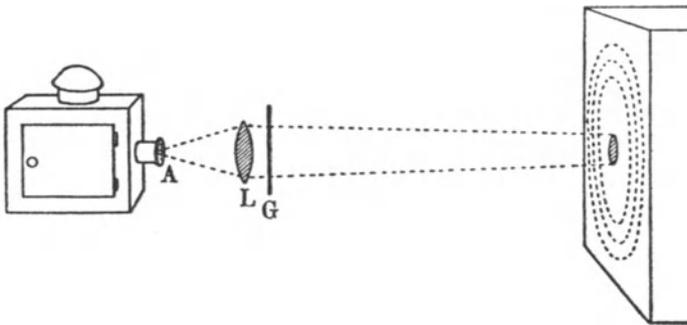


Abb. 75. Durch die kleine Öffnung A kommt Licht von der Lampe und wird mit Hilfe der Linse L auf das Loch in der Wand des Kastens rechts im Bilde konzentriert. Das Licht geht in den Kasten, der innen schwarz ist, und bleibt unbemerkt. Die Glasscheibe G ist mit feinem Staub oder mit Flüssigkeitströpfchen bedeckt und erzeugt einen Beugungsring auf der Wand des Kastens; dadurch, daß der Hauptstrahl verschwindet, kann man den verhältnismäßig schwachen Beugungsring leicht sehen.

Vorgänge müssen also derart miteinander interferieren, daß sie sich gegenseitig vernichten.

Eine Wellenbewegung kann nur von einer gleichartigen Wellenbewegung derselben Wellenlänge zerstört werden, bei der die Wellenberge der einen auf die Täler der andern kommen, und umgekehrt. Daher muß in dem letzten Fall, nämlich bei dem schwarzen Fleck auf dem durchsichtigen Glase, auch ein Beugungsring entstehen, wie bei dem kleinen Loch im schwarzen Schirm. Den Unterschied zwischen den beiden, der zur Folge hat, daß sie sich gegenseitig bei einer Überlagerung vernichten, können wir mit unsern Augen nicht sehen, er besteht nur darin, daß das eine Wellensystem gegen das andere um eine halbe Wellenlänge nach vorwärts oder rückwärts verschoben ist.

Jetzt können wir zu eigentlichen Versuchen übergehen. Um einen Beugungsring zu erzeugen, der so groß ist, das man ihn gut

beobachten kann, muß das beugende Teilchen außerordentlich klein sein, etwa $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{50}$ mm im Durchmesser, und der Ring von einem einzigen solchen Teilchen würde zu schwach sein, als daß man ihn sehen könnte. Wir können aber leicht die Wirkung von Tausenden solcher Teilchen vereinigen. Wenn wir eine Glasscheibe vor einen feinen Lichtstrahl halten und auf sie hauchen, dann bilden sich winzige Tröpfchen auf dem Glas, und alle die Beugungsringe von ihnen werden sich gegenseitig verstärken, besonders wenn die Tröpfchen ungefähr gleich groß sind. Obgleich die Teilchen nämlich an verschiedenen Stellen liegen, werden sich ihre verschwommenen Beugungsringe doch praktisch alle überlagern, und durch die Vereinigung wird die Erscheinung sichtbar werden (Abb. 75). Wenn man eine saubere Glasscheibe in einem ruhigen Zimmer einige Zeit flach liegen läßt, dann setzt sich genug feiner Staub auf ihr ab, um Beugungsringe zu erzeugen, aber wenn wir das Glas da-

nach anhauchen, dann entstehen so zahlreiche Tröpfchen, daß die Erscheinung sehr viel stärker wird. Zuerst sind die Tropfen sehr klein, und es sieht merkwürdig aus, wie die Ringe, die schon von dem Staub her vorhanden waren, durch andere Ringe verstärkt werden, die sich über den Schirm ausbreiten und sich dann schnell zusammenziehen, während die kleinen Tropfen verdampfen und ineinanderfließen. Alle Farben treten in diesen Ringen auf, und in einem verdunkelten Zimmer ist die Erscheinung sehr schön. Wenn man den Versuch anstellt, macht man gewöhnlich ein Loch in die Mitte des Schirmes, durch das der erzeugende Lichtstrahl hindurchgeht, damit man ihn nicht sieht, denn sonst würde der Glanz von seinem Auftreffen auf den weißen Schirm die zarten Farben verdunkeln.

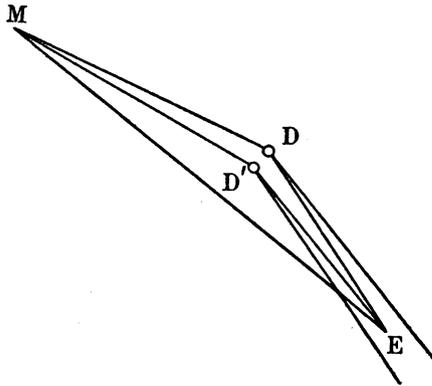


Abb. 76. Von dem Tropfen bei *D* kommt rotes Licht, von dem Tropfen bei *D'* blaues Licht in das Auge des Beobachters. So erscheint ein farbiger Hof rings um den Mond, den man in der Richtung *EM* sieht.

Ein Beugungsring oder Hof um Sonne und Mond entsteht auf ähnliche Weise, aber man muß beachten, daß die verschiedenen Farben nicht von demselben Tropfen in das Auge des Beobachters kommen (Abb. 76). Nehmen wir an, M sei der Mond und E das Auge. Ein Tropfen in der Atmosphäre bei D würde, wie in dem eben beschriebenen Versuch, auf einem Schirm einen Beugungsring erzeugen, dessen Mittelpunkt da liegen würde, wo die Verlängerung von MD den Schirm trifft. Sagen wir, das Auge sei im äußeren Teil des Ringes und empfängt ein Rot von D . Es sieht dann kein Blau von demselben Tropfen, weil der blaue Ring innerhalb des roten liegt und nicht ins Auge kommt, wohl aber kann Blau von einem anderen Beugungsring kommen, der von dem Tropfen D' her stammt: das Auge kann also Rot von D und Blau von D' her sehen, und da die Erscheinung symmetrisch um die Verbindungslinie von Mond und Auge ME herum ist, sieht der Beobachter einen Hof rings um den Mond, der innen blau und außen rot ist. Die Erscheinung sieht genau so aus, wie das Bild auf dem Schirm in unserem Versuch, nur die Bildungsweise ist ein klein wenig anders. Für einen deutlichen Hof sollten die Tropfen alle dieselbe Größe haben, damit die einzelnen Beugungsringe sich alle überlagern können und der Effekt stärker wird. Je größer ein solcher Beugungsring ist, desto kleiner sind die Wassertropfen, die ihn erzeugen.

Jeder Beobachter kann den Versuch leicht für sich selbst wiederholen, er braucht dazu nur auf einer ebenen Glasscheibe durch Anhauchen eine dünne Schicht von kleinen Tröpfchen zu erzeugen und durch die Glasscheibe hindurch auf eine helle Lichtquelle zu blicken.

Eine interessante Anwendung findet das Beugungsprinzip in dem „Eriometer“ von Thomas Young, einem Instrument, mit dem man die Dicke von Wollfäden messen kann, und das heute noch benutzt wird. Wenn man einen dünnen Faden in einen Lichtstrahl quer zur Richtung des Strahles hält und den Schatten auf einem Schirm beobachtet, dann erscheinen parallel zum Schatten auf beiden Seiten helle Linien. Die Erklärung hierfür ist dieselbe wie vorhin bei dem Fall der beiden Löcher, und wir brauchen sie nicht im einzelnen zu wiederholen. Wenn eine Anzahl von Fäden, die in allen Richtungen senkrecht zum Strahl liegen, in den Weg eines Lichtstrahls gebracht werden, dann kreuzen sich die verschiedenen Linienpaare auf dem Schirm, und wenn überall genug

Fäden da sind, dann wird das Resultat genau so sein, wie wenn ein Paar von starken Linien im Kreise herumgedreht wird, wie wir an Hand von Abb. 74 gezeigt hatten, d. h. es wird ein Beugungsring entstehen, dessen Durchmesser von der Dicke des Fadens abhängt.

Der Apparat ist in Tafel XVC abgebildet; auf einer Nadel wird ein Haufen von Fäden befestigt, und das Auge sieht durch diesen Haufen nach einem kleinen Lichtfleck, der durch ein kleines Loch in einem Schirm vor einer Lampe oder hellen Fläche gebildet wird. Man sieht den hellen Fleck dann umgeben von einem Ring.

Beugungseffekte kann man überall beobachten. Die Straßenlampen zeigen nachts einen farbigen Stern, wenn man sie durch einen aufgespannten Regenschirm hindurch ansieht. Die Strahlen des Sternes sind parallel zu der Richtung der Fäden im Gewebe des Schirmes. Man kann dieselbe Erscheinung durch einen seidenen Vorhang oder durch jedes feine und nicht zu undurchsichtige gewebte Material hindurch sehen. Die Kinder sehen manchmal mit halbgeschlossenen Augen in das Kaminfeuer und sagen, sie sehen Stroh aus den Flammen herauskommen. Auf einer Glasscheibe, die man mit einem fettigen Tuch abwischt, bleiben Furchen in parallelen Reihen, die rote und grüne Farben zeigen.

Eine Beugungerscheinung verursacht Farben immer dadurch, daß einzelne Wellenlängen getrennt werden; hierin unterscheidet sie sich von der Wirkung eines Farbstoffes, die auf der selektiven Zerstörung von Farben beruht. Wie die eben erwähnten Beispiele uns gezeigt haben, kann man die Beugung als die natürliche und notwendige Folge der Wellentheorie beschreiben. Während der hundert Jahre, die seit Youngs Tode vergangen sind, wurde eine große Fülle verschiedener Beugungerscheinungen untersucht, und die Tatsache, daß alle Beobachtungen durch die Wellentheorie so zufriedenstellend erklärt und ebenso neue Erscheinungen vorausgesagt werden konnten, war und ist die Hauptstütze für diese Theorie. Sie muß innerhalb ihres Anwendungsbereiches gültig sein.

Die Polarisation des Lichtes

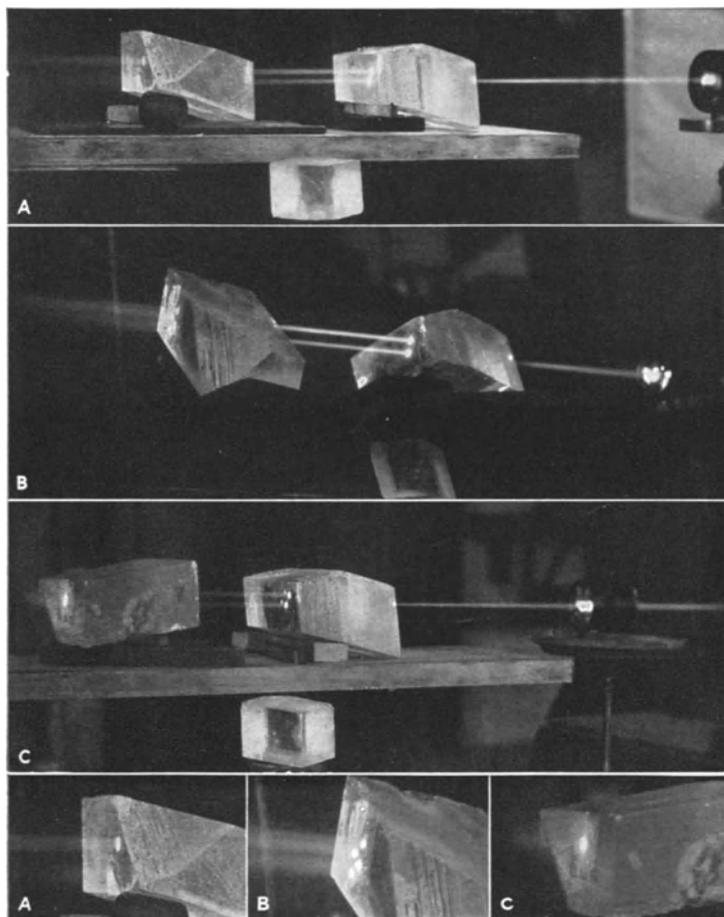
Die Eigenschaften des Lichtes

Es gibt eine besondere Eigenschaft des Lichtes, die das Auge weder entdecken noch messen kann. Richtung, Intensität und Farbe sind alles Eigenschaften, die man direkt beobachten kann, und die beim Sehen verwendet werden: sie sind allen Arten von Wellen, den Ätherwellen, Wasserwellen und den Luftwellen beim Schall gemeinsam. Die neue Eigenschaft gestattet jedoch eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Wellenarten, denn sie bezieht sich auf die Art der Bewegung in der Welle selbst, und zwar nicht darauf, wie das Wellensystem als Ganzes sich vorwärts bewegt, sondern auf die Bewegung in dem Medium, durch das die Wellen hindurchkommen.

Wenn z. B. Wellen über die Meeresoberfläche ziehen, dann steigt und fällt das Wasser an jeder bestimmten Stelle, an der die Wellen vorbeikommen. Nur die Form der Welle bewegt sich vorwärts, nicht ihr materieller Inhalt. Ein Schiff oder ein anderer Körper, der auf der Oberfläche schwebt, wird nicht von den Wellen fortgetragen, er steigt und fällt nur und schwankt vorwärts und rückwärts. Auch ein Schwimmer, der auf seinem Rücken im offenen Meere liegt, wird von den Wellen unter ihm auf- und niedergehoben, aber nicht mit den Wellen fortgetragen. Nur an der Küste hat die Bewegung einen anderen Charakter, es handelt sich hier nicht um eigentliche Wellen, sondern um „Brecher“; das Wasser wird von der Brandung zur Küste hingeschleudert und der Schwimmer mit ihm. Die Meereswellen sind „transversale Wellen“, die Bewegung des Wassers erfolgt senkrecht zu der Richtung, in der der Wellenzug sich fortbewegt.

Die Bewegung der Luft bei den Schallwellen ist eine ganz andere. Die Luftmoleküle bewegen sich vorwärts und rückwärts in der Bewegungsrichtung des Wellenzuges und nicht auf und ab. Tyndall stellte bei seinen Weihnachtsvorlesungen eine Reihe von Knaben vor dem Vorlesungstisch auf, von denen jeder die Hände

Tafel XVII

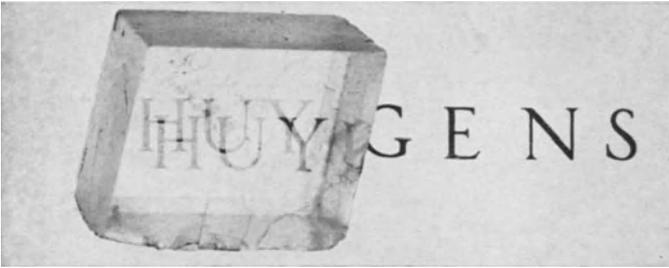


A. Zwei Blöcke von Kalkspat aus Island liegen parallel zueinander; es sind große Stücke aus dem Besitz der Royal Institution. Sie sind nicht gespalten, so daß sie keine regelmäßigen Rhomboeder bilden, aber man kann leicht erkennen, daß sie parallele Kanten haben. Der Strahl, der von der Laterne kommt, und mit Hilfe von etwas Rauch in der Luft sichtbar gemacht ist, wird von dem ersten Kristall in zwei Strahlen aufgeteilt, die Trennung der beiden wird durch den zweiten Kristall vergrößert. Man beachte, daß die Verbindungslinie der beiden weißen Punkte, die die Austrittsstelle der Strahlen zeigen, parallel ist mit der Winkelhalbierenden des stumpfen Winkels der Fläche, auf der die Punkte liegen. (S. 130, 136, 137.)

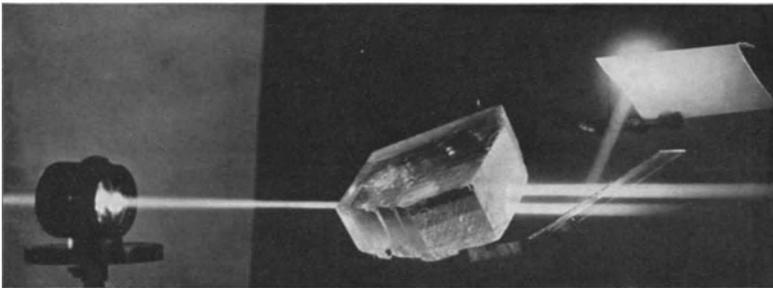
B. Der zweite Kristall ist hier gedreht worden, und zwar so, daß die beiden Flächen, auf denen die Strahlen austreten, parallel zueinander geblieben sind. Die beiden Strahlen, die aus dem ersten Kristall kommen, werden jetzt wieder aufgeteilt, und auf der hintersten Fläche erscheinen daher vier Punkte. (S. 136, 138.)

C. Der zweite Kristall ist jetzt von seiner Lage in Taf. XVII A um 180° gedreht worden. Die beiden Blöcke sind beinahe genau gleich dick, und die beiden Strahlen, die aus dem ersten Kristall herauskommen, sind beim Verlassen des zweiten wieder zu einem Strahl vereinigt. (S. 136, 138.) Die Austrittsflächen sind unten in vergrößertem Maßstabe noch einmal abgebildet, damit die Punkte besser zu erkennen sind.

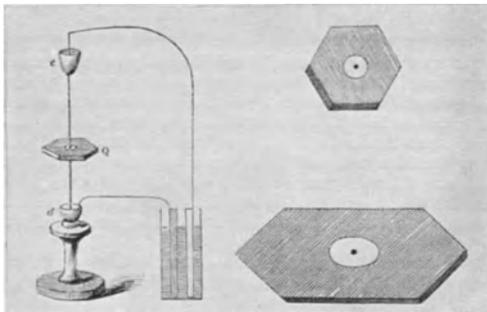
Tafel XVIII



A. Diese Photographie zeigt die Verdopplung von Gegenständen, die man durch ein Kalkspatprisma hindurch betrachtet. (S. 130, 131.)



B. Der Block von Kalkspat teilt den ursprünglichen Lichtstrahl in zwei Strahlen auf. Die Verbindungslinie der beiden Punkte, auf denen die Strahlen austreten, ist parallel zu der Halbierungslinie des stumpfen Winkels der Fläche, auf der die Punkte liegen. Die Schwingungen des Lichtes in dem unteren Strahl, dem ordentlichen, sind senkrecht zu dieser Verbindungslinie, d. h. sie liegen parallel zu dem reflektierenden Stück Glas. Ein Teil des Strahles wird reflektiert, wie das Bild zeigt. Die Schwingungen in dem oberen Strahl, der offensichtlich der außerordentliche ist, weil er nicht in der Verlängerung des ankommenden Lichtstrahles liegt, sind parallel zu der Verbindungslinie der beiden Punkte. Der außerordentliche Strahl wird nicht reflektiert. (S. 139.)



C. Die Abbildung stammt aus Tyndalls Buch: *Wärme, eine Form von Bewegung*, S. 244. Sie zeigt eine Versuchsanordnung, die von Sénarmont angegeben wurde. (S. 145.)

auf die Schultern seines Vordermannes legen mußte. Dann gab er dem Knaben am einen Ende der Reihe einen Stoß, der sich, wie ein Impuls, durch die ganze Reihe fortsetzte, woraufhin der Knabe, der am anderen Ende stand, auf eine Matratze fiel, die für ihn vorbereitet war. Wenn er, in etwas sanfterer Weise, den letzten Knaben hin und her geschüttelt hätte, dann wären die Impulse nacheinander wie ein Wellenzug durch die Reihe gegangen und hätten noch genauer den Durchgang einer Schallwelle durch Luft oder durch irgendein anderes Material nachgeahmt. Die Moleküle der Luft würden dabei den Knaben entsprechen, allerdings sind ihre Hin- und Herbewegungen natürlich unendlich viel schneller als die der Knaben bei Tyndalls Experiment.

Zuletzt können wir noch an einen kurzen Schlag denken, den man einem Seil gibt, dessen eines Ende man in der Hand hält, während das andere Ende irgendwo festgemacht ist. Ein Impuls läuft durch das Seil, und dieser Vorgang ist der Bewegung einer Lichtwelle ähnlicher als irgendeines der vorhergehenden Beispiele. Es handelt sich um eine „transversale Welle“ wie bei den Meereswellen, nicht um eine „longitudinale Welle“ wie beim Schall. Aber bei der Meereswelle ist die Richtung der Wasserbewegung beschränkt, denn das Wasser steigt und fällt zwar, aber es bewegt sich nicht senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Welle seitlich hin und her. Das Seilbeispiel gibt eine bessere Analogie, denn die transversale Bewegung kann in jeder Richtung senkrecht zum Seile stattfinden, und dasselbe muß man beim Lichte als möglich annehmen, um gewisse Erscheinungen zu erklären. Die Bedeutung der Annahme liegt darin, daß das Licht dadurch eine neue Eigenschaft erhält, die man zwar mit den Augen nicht sehen, aber doch auf andere Weise feststellen kann, und die man irgendwie erklären muß. Wir werden gleich hören, daß man diese Eigenschaft mit Hilfe bestimmter Kristalle entdeckt, und daß man sie dann sehr oft im Licht vom Himmel und in den Reflexen von der Oberfläche durchsichtiger Körper wie der Meeresoberfläche beobachten kann.

Diese Frage ist von großer Wichtigkeit und Bedeutung, und dadurch, daß sie von einer ganzen Reihe von Forschern untersucht wurde, sind unsere gegenwärtigen Vorstellungen über das Licht außerordentlich bereichert worden. Die historische Entwicklung zeigt hier sehr schön das allmähliche Wachsen einer wissenschaftlichen Idee, und deshalb wollen wir sie von ihrem Anfang in der Zeit von Newton und Huygens her verfolgen. „Von Island,

einer Insel im Nordmeer, unter 66° nördlicher Breite“, schreibt Christian Huygens im Jahre 1678, „hat man eine Art Kristall oder durchsichtigen Stein gebracht, der wegen seiner Form und anderen Eigenschaften, besonders aber wegen seiner eigentümlichen

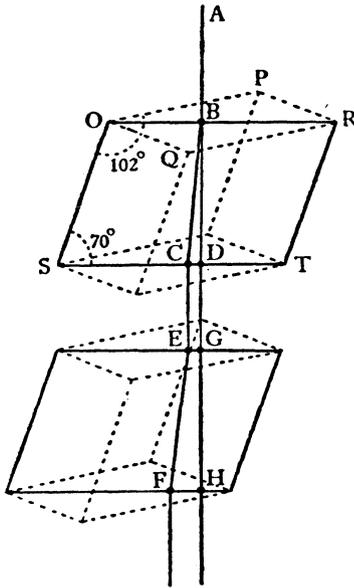


Abb. 77. Diese Abbildung ist die Kopie einer Zeichnung von Huygens aus seiner „Abhandlung“. Der Einfachheit halber wird angenommen, der Kristall sei so gespalten, daß OP , OQ und OS gleich lang sind; dann ist OT die Kristallachse, die durch den Punkt O geht, und $ORTS$ ist ein Querschnitt, der die Achse enthält. Der Strahl AB steht senkrecht zu der Fläche $OPRQ$; er teilt sich in den ordentlichen Strahl BD , der die Verlängerung von AB bildet, und in den Strahl BC , der einer anderen Richtung folgt. Beide Strahlen liegen in der Ebene $ORTS$: beim Verlassen des Kristalles nehmen sie ihre ursprüngliche Richtung wieder an.

Brechungen bemerkenswert ist“. Wir wissen heute, daß die meisten Kristalle ähnliche Eigenschaften haben, aber der „Stein von Island“ war zweifellos sehr auffallend wegen seiner Größe und Klarheit und daher wegen der Stärke der Erscheinung. Huygens sagt, daß Erasmus Bartolimus es war, der zuerst die Aufmerksamkeit auf diesen Kristall lenkte, aber er schreibt seine eigene Abhandlung trotzdem, „denn ich habe mich bemüht, die Eigenschaften dieser Brechungen mit großer Genauigkeit zu untersuchen, um ganz sicher zu gehen, ehe ich es unternehme, die Ursachen derselben zu erklären.“ Die Tafeln XVII und XVIII zeigen Photographien von Isländer Kalkspat. Wir wissen heute, daß er aus CaCO_3 , Calciumcarbonat, besteht. Der Kalkspat läßt sich in gewissen Ebenen leicht spalten, so daß er von Natur die Form eines Rhomboeders annimmt. Dies sieht man auf Tafel XVII A, am

deutlichsten an dem einzelnen Stück, das auf dem Tisch unter den großen Blöcken liegt, die für den optischen Versuch gebraucht werden; und ebenso in der Photographie der Tafel XVIII A. An zwei Ecken des Rhomboeders, bei O und T in der Abb. 77, bilden alle Flächen einen stumpfen Winkel von etwa 102° miteinander.

Huygens Aufmerksamkeit wurde zuerst dadurch erregt, daß jeder Strahl, der in den Kristall hineinging, (mit Ausnahme besonderer Fälle) merkwürdigerweise in zwei Strahlen aufgespalten wurde, die in verschiedener Richtung durch den Kristall gingen; beim Herauskommen nahmen sie zwar wieder ihre ursprüngliche Richtung an, blieben aber voneinander getrennt und gingen so auf verschiedenen, einander parallelen Wegen weiter. Abb. 77, die von einer Abbildung aus Huygens „*Treatise*“¹⁾ kopiert ist, soll die Erscheinung verdeutlichen. Der Strahl AB soll, der Einfachheit halber, den Kristall senkrecht zu seiner Oberfläche treffen. Er spaltet sich in zwei Strahlen, BC und BD , auf, die beim Herauskommen die parallelen Strahlen CE und DG bilden. Das Bild in Tafel XVIIIA zeigt die Erscheinung deutlich. Bei dieser Anordnung trifft ein Lichtstrahl auf einen Kalkspatkristall; der Weg des Lichtes vor dem Auftreffen ist durch etwas Rauch in der Luft sichtbar gemacht worden. Innerhalb des Kalkspats ist die doppelte Spur nicht zu sehen, weil der Kristall so rein ist, daß fast nichts da ist, um das Licht zu streuen, aber beim Herauskommen aus dem Kristall werden die beiden Strahlen in der rauchigen Luft wieder sichtbar.

Diese Zerlegung eines Strahles in zwei Strahlen kann man auch dadurch zeigen, daß man ein Stück Kalkspat auf ein Blatt Papier mit einem schwarzen Punkt oder sonst irgendeinem Zeichen legt: der Punkt erscheint dann verdoppelt. In Tafel XVIII A wird die Verdoppelung von gedruckten Buchstaben gezeigt.

Wenn wir diesen Versuch jetzt bei verschiedenen Lagen des Kalkspats zum auftreffenden Lichtstrahl wiederholen, dann finden wir, ebenso wie Huygens bei seinen Untersuchungen fand, daß die zwei Teile, in die der Strahl zerlegt wird, sich ungleich verhalten. Der eine folgt den gewöhnlichen Brechungsgesetzen. Wenn wir den Kalkspat z. B. auf ein Blatt Papier mit einem schwarzen Punkt legen, und ihn dann in der Ebene des Papiers herumdrehen, dann bleibt eines der Bilder des Punktes in Ruhe; genau so wäre es, wenn an Stelle des Kristalles ein Stück Glas vorhanden wäre (Abb. 78). Das andere Bild des Punktes dagegen bewegt sich in einem Kreis um das erste herum, und seine Lage hängt offensichtlich von der Form und Lage des Kristalles ab. Die Verbindungslinie der beiden Bilder ist parallel zu der Halbierungslinie des größeren Winkels der Fläche, auf der der Kristall liegt. Das Bild,

¹⁾ Huygens *Treatise on Light*, ins Englische übersetzt von S. P. Thompson (Macmillan).

das sich nicht bewegt, scheint viel näher zu sein als das andere; offenbar ist die Brechung hier größer, das Licht, das diesen Bildpunkt erzeugt, muß sich im Kristall viel langsamer fortbewegen als das Licht, das den anderen Punkt hervorruft.

Der Lichtstrahl, der den gewöhnlichen Brechungsgesetzen folgt, heißt der ordentliche Strahl, der andere der außerordentliche Strahl. Huygens versuchte nun zu finden, wovon die Richtung des außerordentlichen Strahles abhinge; dies gelang ihm vollständig, und er

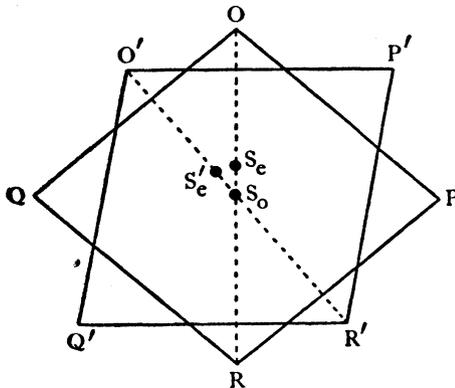


Abb. 78. Dies Bild zeigt den Zusammenhang zwischen dem ordentlichen und dem außerordentlichen Bild eines schwarzen Punktes, den man durch einen Isländer Kalkspatkristall hindurch sieht. Der Beobachter sieht schwarze Punkte bei S_0 und S_e , von denen der erste näher zu liegen scheint. Wenn der Kristall gedreht wird, z. B. in die Lage $O'P'R'Q'$, dann bleibt der Punkt S_0 an Ort und Stelle, dagegen bewegt sich der Punkt S_e nach S_e' , er liegt auf der Linie $O'R'$.

Wenn man den Kristall auf dem Papier verschiebt, ohne ihn zu drehen, dann bewegt sich keiner der Punkte.

durchsichtige Körper voneinander trennten, hatten ihn zu einer bestimmten geometrischen Konstruktion geführt, die wir selbst im wesentlichen schon benutzt haben.

Nehmen wir an, ein Wellenzug trifft auf einem Schirm mit einer Anzahl von Löchern. In dem Versuch der Abb. 66 war die Wellenfront parallel zu dem Schirm, aber diese Bedingung wollen wir jetzt fortlassen und uns vorstellen, die Wellen kämen unter irgendeinem Winkel schräg an, so wie in Abb. 79. Jede der Öffnungen im Schirm wird dann der Reihe nach zum Ausgangspunkt von kreisförmigen Wellen, die sich hinter dem Schirm ausbreiten und sich

beschreibt in seinem „Treatise“ die genialen Methoden, die ihn zu der Lösung der Aufgabe führten. Er konnte aber das physikalische Verhalten der Strahlen weder erklären noch es in Zusammenhang mit der Art des Kristalls bringen, und seine Beschreibung dieses Versagens ist, wie wir gleich sehen werden, ebenso interessant wie die seines geometrischen Erfolges.

Seine früheren Arbeiten über die Reflexion und Brechung von Wellen an Flächen, die Luft von Glas oder Wasser, oder überhaupt zwei

allmählich, wie wir vorher gesehen haben, zu einer Wellenfront zusammenschließen. Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit auf beiden Seiten des Schirmes dieselbe ist, dann bleibt die neue Wellenfront parallel mit der alten, sonst ändert sich ihre Neigung zu dem Schirm (vgl. Abb. 79 und Abb. 20 und 21). Die Anzahl oder Größe der Öffnungen kann hierauf offenbar keinen Einfluß haben, es können beliebig viele Löcher ganz nahe beieinander vorhanden, ja, es braucht überhaupt gar kein Schirm da zu sein.

Ehe wir weitergehen, wollen wir einen Punkt nicht vergessen. In unserem Versuch geht eine Welle von *A* aus, kommt nach *B* und trägt hier dazu bei, die neue Wellenfront zu bilden. Wenn *A* verstopft wäre, dann würde die entsprechende Störung in *B* fehlen, im optischen Parallelfall würde hier kein Licht hinkommen. Wenn wir uns unter dem Schirm nur die Grenzfläche zwischen zwei durchsichtigen Medien vorstellen, dann würde ein Hindernis in *A* einen Schatten in *B* werfen, wir können deshalb sagen, *AB* ist die Richtung des Lichtstrahles

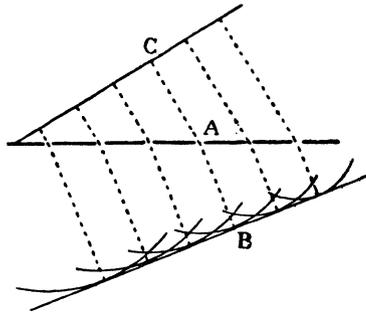


Abb. 79. Ein Wellenzug kommt durch eine Reihe von Öffnungen in einem Schirm in ein Medium, in dem seine Geschwindigkeit geringer ist als vorher. Wir sehen, wie eine der Wellenfronten von kreisförmigen kleinen Wellen gebildet wird.

nach der Brechung. Vorher war seine Richtung *CA*. Auf diese Weise untersuchte Huygens die Erscheinung der Brechung.

Wenn eine ähnliche Untersuchungsmethode bei dem Kristall Erfolg haben sollte, dann mußte irgendeine Erweiterung oder Abänderung gemacht werden. Der außerordentliche Strahl konnte nicht einfach daher kommen, daß eine zweite Lichtgeschwindigkeit im Kristall auftrat, die einer zweiten Schar von Kugelwellen entsprach. Zwei Geschwindigkeiten würden allerdings zwei Strahlen bedingen, aber es würden sich dann für beide die gewöhnlichen Brechungsgesetze ergeben, während wir doch gesehen haben, daß der außerordentliche Strahl seinen eigenen Gesetzen folgt und von der Lage des Kristalles zum ankommenden Strahl abhängig ist.

Huygens erkannte daher, daß er für die Gesetze des außerordentlichen Strahles keine Kugelwellen zugrunde legen dürfe, und versuchte es mit „elliptischen“ oder vielmehr „sphäroidischen

Wellen“. Tatsächlich stellte sich heraus, daß auf diesem Wege das Problem lösbar war. Daß Huygens gerade ein Sphäroid nahm, war ganz natürlich, denn dieses bot sich, nachdem die Kugelfläche ausgeschieden war, als einfachste Fläche von selbst dar. Ein Sphäroid, für das die Oberfläche der Erde ein bekanntes Beispiel bildet, entsteht durch Drehung einer Ellipse um die eine ihrer beiden Achsen, die dann zur Achse des Sphäroides wird. Die Wellen sollten sich also auf derartigen sphäroidischen Flächen ausbreiten, und zwar fand Huygens, daß es sich beim Kalkspat um ein abgeplattetes Sphäroid handelte wie bei der Erde, bei der die Verbindungslinie der beiden Pole, die Erdachse, der kürzeste Durchmesser ist.

Diese sphäroidischen Flächen mußten offenbar mit der Form des Kristalles in Zusammenhang stehen, das heißt, die Achse des Sphäroides mußte mit den Kanten des Rhomboeders irgendwie verknüpft sein, denn sonst hatte die Einführung des Sphäroides keinen Sinn. Damit kommen wir sofort zu einem Verständnis unserer in Abb. 77 dargestellten Beobachtung, daß die Richtung des außerordentlichen Strahles an die Kristallform gebunden ist.

Trifft dies zu, so gibt es nur eine einzige Richtung, die die Achse des Sphäroides haben kann; sie muß mit der Achse des Kristalles zusammenfallen. Dies ist die Richtung derjenigen geraden Linie durch den Punkt O (Abb. 77) — wo die drei Winkel von 102° auftreten —, die mit allen drei Flächen, die sich in O schneiden, gleiche Winkel bildet. Wir erinnern daran, daß eine Achse in einem Kristall keine bestimmte Linie, sondern eine bestimmte Richtung darstellt. Sie kann infolgedessen durch jeden einzelnen Punkt gehen. In Abb. 77 trifft die Achse, die durch den Punkt O geht, die gegenüberliegende Ecke des Rhomboeders nur dann, wenn die Kanten OP , OQ und OS alle gleich lang sind, was nur davon abhängt, wie der Kalkspat gespalten worden ist. Die Lage der Achse bezieht sich auf die Eigenschaften des Kristalles und nicht auf seine Abmessungen.

Betrachten wir jetzt, wie Huygens mit Hilfe dieser neuen Vorstellungen seine Beobachtungen erklärte. Nehmen wir den Fall, den Abb. 77 zeigt; der Strahl AB entspricht einem Wellenzug, der sich auf den Kristall zu bewegt, seine Wellenfront ist parallel zu einer Fläche des Kristalles. Wenn die Wellenfront auf die Kristallfläche trifft (Abb. 80 und 81), kann man ihre Ausbreitung nach der Huygensschen Methode finden, indem man die

Wellenflächen zeichnet, die von verschiedenen Auftreffpunkten *L, M, N* ausgehen. Das eine Bild zeigt den Fall, bei dem die gewöhnlichen Gesetze der Brechung gelten: die Wellen breiten sich wie in den früheren Beispielen in Kugelflächen aus, und die punktierten Linien zeigen die Richtung der Strahlen; der ordentliche Strahl verhält sich so, als wenn der Kristall aus Glas bestände. Aber für den außerordentlichen Strahl bestehen die Wellenflächen aus Sphäroiden, deren Achse parallel mit der Achse des Kristalles läuft. Daher ersetzen in Abb. 81 Sphäroide die Kugelflächen

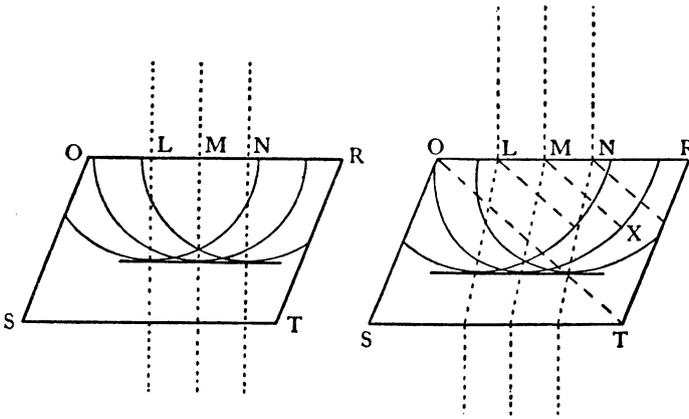


Abb. 80 und 81. Die beiden Zeichnungen veranschaulichen Huygens Konstruktion für den ordentlichen und den außerordentlichen Strahl im Kalkspat.

der Abb. 80, und die Wellenfront bewegt sich jetzt schräg im Kristall, so daß man eine Erklärung für die beim Experiment beobachteten Erscheinungen erhält. Huygens konnte den Betrag messen, um den der außerordentliche Strahl von dem ordentlichen abwich, und auf diese Weise die Form des Sphäroides bestimmen.

Mit dieser Erweiterung seiner Methode konnte Huygens alle Beobachtungen über das geometrische Verhältnis zwischen dem einfallenden Strahl und den beiden Strahlen, die aus dem Kristall herauskamen, erklären. Ein sehr bemerkenswertes Ergebnis war erzielt.

Huygens' überraschende Beobachtung

Über dies Ergebnis hinaus konnte Huygens nicht gelangen, da er die Eigenschaft des Lichtes, die wir heute Polarisation nennen, und ihre Eigentümlichkeiten nicht kannte. Wir geben die Schwierig-

keiten, mit denen er zu kämpfen hatte, am besten mit seinen eigenen Worten wieder. Folgendermaßen beschreibt er eine „Überraschende Beobachtung an Strahlen, die nacheinander durch zwei Kristalle hindurchgehen, für die es keine Erklärung gibt“. In Abb. 77 sehen wir die Zeichnung, die er zur Erläuterung dieser Beobachtung anfertigte. Die Erscheinungen selbst sind in den Photographien der Tafel XVII A, B, C wiedergegeben. Sie werden von ihm wie folgt beschrieben: „Man nehme zwei derartige Kristallstücke und lege sie übereinander; oder besser noch, man halte sie, durch einen kleinen Zwischenraum getrennt, so übereinander, daß alle Kanten des einen Kristalles den Kanten des anderen parallel verlaufen. Dann wird ein Lichtstrahl AB im ersten Kristall durch die ordentliche und außerordentliche Brechung in zwei Strahlen BD und BC zerlegt. Beide Strahlen durchsetzen den zweiten Kristall, ohne bei ihrem Eintritt in denselben nochmals in zwei Strahlen aufgeteilt zu werden. Dabei wird der im ersten Kristall regulär gebrochene Strahl DG wieder nur regulär — nach GH — gebrochen, und der andere wieder unregelmäßig — nach EF — gebrochen. Es ist merkwürdig, daß die Strahlen CE und DG , die aus der Luft in den unteren Kristall eintreten, sich nicht wieder wie der ursprüngliche Strahl AB in zwei Strahlen trennen. Man könnte sagen, dadurch, daß der Strahl DG durch den oberen Kristall gegangen ist, hätte er etwas verloren, was nötig ist, um die Materie anzuregen, die die unregelmäßige Brechung verursacht, und daß ebenso CE das verloren hätte, was nötig ist, um die Materie für die regelmäßige Brechung anzuregen . . .“ Das heißt, man müßte annehmen, daß ein ordentlicher Strahl immer ein ordentlicher bleibt und ein außerordentlicher Strahl immer ein außerordentlicher. Er fährt dann fort: „aber hiermit ist eine andere Erscheinung im Widerspruch. Hält man die Kristalle so, daß die Ebenen, die die Hauptschnitte bilden, im rechten Winkel zueinander stehen, . . . dann erfährt der zunächst regelmäßig gebrochene Strahl DG im unteren Kristall nur eine unregelmäßige Brechung, und umgekehrt wird der durch die unregelmäßige Brechung entstandene Strahl CE jetzt nur regelmäßig gebrochen . . .“ Das heißt, der ordentliche Strahl ist zum außerordentlichen geworden, und umgekehrt. Hauptschnitt wird ein solcher Schnitt genannt, der durch eine der Kanten an der Ecke mit den stumpfen Winkeln geht und den Winkel zwischen den beiden anderen Kanten halbiert, z. B. $OSTR$ in Abb. 77.

„Aber in all den unzähligen anderen Lagen, mit Ausnahme der beiden, von denen ich eben gesprochen habe“ (das heißt also in allen Lagen, bei denen die Hauptschnitte weder parallel noch rechtwinklig zueinander stehen) „teilen sich die beiden Strahlen *DG* und *CE* bei der Brechung im unteren Kristall noch einmal in zwei Strahlen, so daß aus dem einen Strahl *AB* schließlich vier Strahlen entstehen. Dabei hängt es von der Lage der beiden Kristalle zueinander ab, ob alle diese vier Strahlen, wie es mitunter vorkommt, gleiche Helligkeit besitzen, oder ob einige von ihnen bedeutend heller als die anderen sind. Alle vier Strahlen zusammen enthalten jedoch anscheinend nicht mehr Licht als der ursprüngliche Strahl *AB*.“

„Wenn man hier bedenkt, daß die Strahlen *CE* und *DG* stets unverändert dieselben bleiben, und daß es nur von der Lage, die man dem unteren Kristall gibt, abhängt, ob jeder der beiden Strahlen wieder in zwei Teile gespalten wird oder nicht, und wenn man andererseits bedenkt, daß der Strahl *AB* immer in zwei Strahlen aufgeteilt wird, dann wird man — so scheint es mir —, zu dem Schluß gezwungen, daß die Lichtwellen nach dem Durchgang durch den ersten Kristall eine gewisse Form oder Anlage bekommen haben, mit deren Hilfe sie beim Auftreffen auf das Gefüge des zweiten Kristalles in bestimmten Lagen die zwei Arten von Materie anregen können, die die beiden Brechungsarten hervorrufen; daß sie dagegen nur eine dieser Arten von Materie anregen können, wenn sie den zweiten Kristall in einer anderen Lage antreffen. Aber wie dieses vor sich geht, dafür habe ich bis jetzt keine befriedigende Erklärung gefunden“, daher „überläßt er es anderen, dies zu erforschen“. Er konnte nicht erraten, was diese „gewisse Form oder Anlage“ sein mochte; der Lichtstrahl hatte nach dem Verlassen des ersten Kristalles, wie man sich noch längere Zeit hindurch ausdrückte, „Seiten“ bekommen. Sein Hinweis auf die „zwei verschiedenen Arten von Materie“ stammt von seiner Erklärungsweise der Doppelbrechung und soll uns hier nicht weiter beschäftigen.

Die Beobachtungen von Huygens werden durch die Photographien der Tafel XVII erläutert. In Tafel XVII A wird der Lichtstrahl beim Durchgang durch den Isländer Kalkspatkristall, der sich im Bilde rechts befindet, in zwei Strahlen zerlegt; der Weg des Lichtes ist durch die Streuung, die es an hineingeblasenem Rauch erfährt, sichtbar gemacht worden. Ein zweiter Kalkspat-

kristall liegt so, daß seine Kanten mit denen des ersten parallel sind; beide Kristalle sind also gleich orientiert, oder mit anderen Worten, ihre Lage ist identisch. In diesem Falle werden die beiden Strahlen nicht weiter zerlegt. Beim Durchgang durch den zweiten Kristall vergrößert sich nur ihr gegenseitiger Abstand. Der Weg der Strahlen läßt sich wieder an ihren Spuren in der Luft verfolgen, man kann ihn aber auch an den hellen Flecken erkennen, die durch die Streuung des Lichtes an den unpolierten Flächen beim Eintritt und Austritt hervorgerufen werden. Man beachte, daß die Verbindungslinie der hellen Flecke parallel der Winkelhalbierenden des stumpfen Winkels der Fläche, auf der die Flecken liegen, verläuft; dies stimmt mit dem überein, was wir weiter vorn gehört haben.

In Tafel XVII B ist der zweite Kristall um eine mit der Richtung der Lichtstrahlen parallele Achse gedreht worden. Jetzt sind nach dem Durchgang durch beide Kristalle vier Strahlen vorhanden. Das Bild ist unter einem anderen Winkel als das erste aufgenommen, damit man die Aufteilung der Strahlen besser erkennen kann. Hier haben wir eine der „unzähligen anderen Lagen“ von Huygens vor uns.

In Tafel XVII C ist der zweite Kristall um 180° gedreht worden; man sieht, daß die beiden Strahlen, die aus dem ersten Kristall heraustreten, nach dem Durchgang durch den zweiten wieder zu einem Strahl vereinigt sind. Die beiden Kalkspatstücke sind nämlich fast genau gleich dick. Daher heben sich ihre Wirkungen gegenseitig auf.

Die Beobachtungen von Malus

Hundert Jahre vergingen, ohne daß ein Versuch zur Aufklärung dieses Rätsels gemacht wurde. Im Jahre 1808 blickte dann zufällig Malus durch ein Stück Isländer Kalkspat nach dem Licht der untergehenden Sonne, das sich in den Fenstern des Palais Luxemburg in Paris spiegelte, und fand zu seiner Überraschung, daß die beiden dabei auftretenden Bilder ungleich hell waren. Er drehte nun den Kalkspat in seiner Hand in der gleichen Weise herum, wie der Kalkspat der Abb. 78 gedreht wurde. Diese Handlungsweise liegt sehr nahe, da es einen eigenartigen Anblick bietet, die beiden sich umeinander drehenden Bilder zu betrachten. Dabei beobachtete er, daß die Helligkeit der Bilder, genau wie in dem Experi-

ment des Huygens in Abb. 77, bei der Drehung zu- und abnahm. Damit hatte Malus gefunden, daß das Licht bei seiner Reflexion an einer Glasscheibe ebenfalls „Seiten“ bekam. Um den Zustand eines solchen Strahles zu beschreiben, erfand er den Ausdruck „Polarisation“. Er wollte damit folgendes ausdrücken. Wenn man an einem solchen Strahl entlang blickt, unterscheiden sich die verschiedenen Richtungen in ähnlicher Weise voneinander wie die Linien, die man auf einer Kompaßrose in verschiedenen Richtungen zieht. Die Richtung der Verbindungslinie von Süd- und Nordpol verhält sich anders als die Ost-Westrichtung oder eine beliebige andere Richtung. Der Ausdruck ist nicht besonders glücklich gewählt, denn Polarität bedeutet eigentlich eine Richtungseigenschaft, bei der den Enden verschiedene Bedeutung zukommt. Ein Pfeil hat polare Eigenschaften, eine Gardinenstange dagegen nicht.

Der Versuch selbst ist leicht zu wiederholen (Tafel XVIII B). In der Figur liegt der Kalkspatkristall so, daß der ordentliche und der außerordentliche Strahl übereinander in der gleichen Ebene verlaufen. Sie treffen auf eine Glasplatte, die so aufgestellt ist, daß auch die von ihr reflektierten Strahlen in dieser Ebene bleiben. Wie man sieht, wird nur der ordentliche Strahl reflektiert, der außerordentliche nicht. Die Strahlen haben „Seiten“.

Zur selben Zeit entwickelte Young sein Prinzip der Interferenz von Wellen und versuchte, die seit langer Zeit vergessene Wellentheorie wieder zu Ehren zu bringen. Die damaligen Philosophen waren überzeugte Anhänger einer auf den Arbeiten Newtons aufgebauten Korpuskulartheorie, so daß Young auf heftigen Widerspruch stieß. Durch die Entdeckung des Malus wurde seine Lage noch schwieriger, denn er sah keine Möglichkeit, wie die Wellen in der ihm vorschwebenden Theorie „Seiten“ haben konnten. Er nahm an, daß die Lichtschwingungen, wie es bei den Schallschwingungen der Fall war, in der Fortpflanzungsrichtung des Wellensystems erfolgten. Seine Vorstellungen entsprachen dem Verhalten von Körpern wie Stahl, Glas oder Wasser nach der Art des Versuches von Tyndall mit der Knabenreihe: bei solchen Schwingungen kann keine Bewegung von einer Seite zur anderen auftreten. Es dauerte lange Zeit, bis Young einsah, daß die Schwierigkeit überwunden werden konnte, wenn man annahm, daß die Schwingungen des Lichtes transversal waren. Dies mag sonderbar erscheinen, wenn man bedenkt, daß die Wellen auf der Oberfläche des Meeres ja

transversale Wellen sind, aber vielleicht stand gerade die Tatsache, daß diese Wellen auf die Oberfläche beschränkt sind, dem Gedanken im Wege, daß sich eine gleichartige Wellenbewegung auch durch das Innere des Wassers fortpflanzen könnte. Viele Menschen müssen dieselbe Schwierigkeit empfunden haben oder empfinden sie noch; es ist dies eine der unvermeidlichen Folgen des Gebrauchs von Analogien.

Die transversalen Schwingungen von Young und Fresnel

Endlich fand Young den Ausweg. Im Januar des Jahres 1817, neun Jahre nach der Entdeckung des Malus, schrieb er an Arago: „Ich habe auch darüber nachgedacht, ob es möglich ist, für das, was man als Polarisation des Lichtes bezeichnet, eine wenn auch unvollkommene Erklärung zu finden, ohne dabei die ursprüngliche Lehre von den Schwingungen aufgeben zu müssen.“ Er entwickelte die Vorstellung von „transversalen Schwingungen, die sich in der Richtung des Strahles fortpflanzen, wobei aber die Bewegungsrichtung der schwingenden Teilchen einen bestimmten, konstanten Winkel mit der Strahlenrichtung bilden soll; und dies“, fügte er hinzu, „ist Polarisation“. Als er dies schrieb, dachte er noch nicht daran, daß die Bewegung der Teilchen vielleicht stets rechtwinklig zur Strahlrichtung und nicht unter irgendeinem beliebigen Winkel erfolgen könnte, aber er war doch einen großen Schritt vorwärts gekommen. Der hervorragende junge französische Ingenieur Fresnel erfaßte die Bedeutung dieses Hinweises und zeigte, daß man auf dieser Grundlage eine Theorie aufbauen konnte, die alle Erscheinungen beim Durchgang des Lichtes durch einen Kristall, einschließlich der Polarisation und der Trennung des Lichtes in zwei Strahlen, umfaßte. Fresnel hatte damals von sich aus die Theorie der Interferenz des Lichtes ausgearbeitet, ohne zu wissen, daß Young dieselbe Leistung in England schon vollbracht hatte, aber er gab sofort zu, daß er zu spät gekommen wäre, und verteidigte Youngs Ansichten mit Begeisterung. Er schrieb im Jahre 1816 an Young: „Wenn mich jedoch irgend etwas darüber trösten kann, daß ich den Vorzug der Priorität nicht besitze, dann ist es das Bewußtsein, einen Gelehrten getroffen zu haben, der die Physik mit einer so großen Zahl wichtiger Entdeckungen bereichert hat, und der gleichzeitig mein Zutrauen zu der von mir angenommenen Theorie außerordentlich gestärkt hat.“

Young antwortete in ebenso höflichen Ausdrücken. Die überragende Stellung, die die Wellentheorie im neunzehnten Jahrhundert einnahm, beruht sicherlich in erster Linie auf den vereinten Bemühungen dieser beiden großen Männer.

Sobald der transversale Charakter der Lichtwellen sichergestellt war, ging die Entwicklung der Wellentheorie bis zum Ende des Jahrhunderts ohne Schwierigkeiten von statten. Sie konnte nach verschiedenen Richtungen hin weiter ausgebaut werden, und die Physiker fanden in ihr ein zuverlässiges Hilfsmittel zur Erklärung einer Reihe sehr verwickelter Erscheinungen.

Die Betrachtung all dieser Fortschritte würde uns jedoch von unserem eigentlichen Ziel weit wegführen, das darin besteht, die Rolle des Lichtes im Weltall in breiten Umrissen zu zeigen. Bei vielen dieser Fortschritte könnten wir auch auf mathematische Berechnungen und Hinweise auf andere Theorien, besonders auf die der Elektrizität und des Magnetismus nicht verzichten. Wir kehren daher zu den Beobachtungen des Huygens zurück und wollen sehen, wie die aufgetretenen Schwierigkeiten sich durch die Annahme polarisierter transversaler Schwingungen überwinden ließen. Dabei werden wir auch kennenlernen, wie diese Dinge mit den Vorstellungen über die Kristallstruktur zusammenhängen, die in den letzten Jahren in so reichem Maße entwickelt worden sind. Zunächst wollen wir die Ausdrücke, die wir benutzen, noch einmal definieren. In einem polarisierten Strahl sind alle Bewegungen oder Schwingungen einander parallel, und zwar steht die Schwingungsrichtung dabei stets senkrecht auf der Fortpflanzungsrichtung des Strahles. Man kann daher die Meeresswellen als polarisiert bezeichnen, denn die eigentliche Bewegung erfolgt wesentlich in senkrechter Richtung, während die Welle in horizontaler Richtung, also rechtwinklig dazu fortschreitet. Man braucht sich keine besondere Vorstellung von dem, was sich im Lichtstrahl bewegt, zu machen, es genügt, wenn wir eine Wellenbewegung mit den zugehörigen Erscheinungen der Interferenz usw. annehmen.

Bei einem unpolarisierten oder gewöhnlichen Strahl stehen die Schwingungsrichtungen ebenfalls senkrecht zum Strahl, aber unter den mit dieser Bedingung verträglichen Richtungen ist keine bevorzugt. Die meisten Lichtstrahlen sind fast frei von Polarisation; ein gewisser Polarisationsgrad tritt jedoch häufig auf, da ja, wie

wir gesehen haben, Reflexionen polarisierend wirken können. Wir wollen nicht vergessen, daß das Auge keinen Unterschied zwischen einem unpolarisierten oder einem teilweise oder ganz polarisierten Strahl wahrnehmen kann¹⁾.

Wir wollen jetzt annehmen, daß ein natürlicher oder unpolarisierter Lichtstrahl beim Eintritt in einen Kristall in zwei gleich starke Strahlen zerlegt wird, die beide vollständig polarisiert sind, und zwar sollen die Schwingungsrichtungen der beiden Strahlen rechtwinklig zueinander stehen. Das reicht für die Erklärung unserer Versuche aus. Der ursprüngliche Strahl in Tafel XVII A enthielt z. B. transversale Schwingungen jeder Richtung, aber beide aus dem ersten Kalkspat austretenden Strahlen sind polarisiert. Beim Eintritt in den zweiten Kristall sind die Schwingungen des ordentlichen Strahles (des unteren in der Figur, der die Fortsetzung des Primärstrahles bildet) gerade so gerichtet, daß keine weitere Unterteilung erfolgt. Der ordentliche Strahl des ersten Kristalles geht auch als ordentlicher Strahl durch den zweiten hindurch, da alle seine Schwingungen gerade in der hierfür erforderlichen Richtung stattfinden. Aus demselben Grunde geht auch der außerordentliche Strahl durch den zweiten Kristall als außerordentlicher Strahl hindurch. Steht der zweite Kristall aber so, wie Tafel XVII B es zeigt, dann sind relativ zu ihm die Schwingungen der beiden aus dem ersten Kalkspatkristall austretenden Strahlen so gerichtet, daß sie nicht wieder einfach als ordentlicher oder außerordentlicher Strahl weitergehen können, es muß vielmehr jeder von ihnen von neuem aufgeteilt werden. In Tafel XVII C dagegen wird der ordentliche Strahl des ersten Kristalles zum außerordentlichen des zweiten, und umgekehrt. Die Wirkung der beiden Kristalle hebt sich auf diese Weise gegenseitig auf. Wenn diese Vorstellung richtig ist, muß der Effekt irgendwie mit der Kristallstruktur zusammenhängen. Was kann nun bei der Kristallstruktur die Ursache hiervon sein?

¹⁾ Unter bestimmten Umständen sieht man allerdings einen fahlen gelben Fleck oder ein Lichtbüschel, wenn polarisiertes Licht in das Auge kommt. Wenn man durch ein Nicolsches Prisma (Abb. 86) auf eine helle Wolke sieht, kann man diese Erscheinung beobachten. Sie ist keineswegs sehr deutlich und hat mit dem Mechanismus des Sehens an sich nichts zu tun. Man nimmt an, daß sie von einem Kristalleffekt in der Substanz des Auges herkommt. Haidinger lenkte als erster die Aufmerksamkeit auf diese Erscheinung, die daher unter seinem Namen bekannt ist.

Polarisation und Kristallstruktur

Die Grundtatsache ist, daß die Atome in einem Kristall eine ganz bestimmte Anordnung besitzen, wodurch dieser alle seine charakteristischen Eigenschaften bekommt. Wir können sagen, daß diese Eigenschaften allgemein verbreitet sind, denn das Bestreben aller festen Körper geht dahin, zu kristallisieren. Der kristalline Zustand ist in Wirklichkeit viel weiter verbreitet, als es äußerlich den Anschein hat. In dieser Hinsicht haben die Röntgenstrahlen unsere Kenntnisse außerordentlich erweitert. Die Atome und Moleküle, aus denen jeder Kristall besteht, sind stets regelmäßig angeordnet, und zwar in einer Weise, die für den betreffenden Kristall charakteristisch ist. Zwischen einem Kristall und einem Stück Glas besteht derselbe Unterschied wie zwischen einem Gewebe oder einem Holzblock einerseits und einem Stück von ungedehntem Gummi andererseits. Viele Eigenschaften des Holzes sind richtungsabhängig, z. B. die Wärmeleitfähigkeit, der Widerstand gegen Zug oder gegen Spaltung, die Zusammenziehung beim Trocknen und so fort.

In einem Kristall ist das Muster viel feiner und daher für das Auge nicht erkennbar; die Atome und Moleküle sind viel zu klein, als daß man sie sehen könnte. Aber die Annahme, daß sie im Kristall eine regelmäßige Anordnung besitzen, ist schon sehr alt. Die regelmäßige und so charakteristische äußere Form der Kristalle hat schon früh zu diesem Schluß geführt. Jetzt haben uns die Röntgenstrahlen die Möglichkeit gegeben, das Muster zu erkennen und den Atomen bestimmte Plätze zuzuschreiben. Einige dieser Muster sind sehr einfach, wie z. B. die des Steinsalzes oder des Diamanten. Sie sind in der Tat so einfach, daß bei diesen Kristallen die Erscheinung, deren Zusammenhang mit der Kristallstruktur wir jetzt betrachten wollen, gar nicht auftritt, da hierfür schon eine gewisse Kompliziertheit erforderlich ist. Der Kalkspat ist jedoch kompliziert genug gebaut, um den Effekt sehr deutlich zu zeigen. Gerade dieser Umstand und die Tatsache, daß er in gut ausgebildeten Stücken von beträchtlicher Größe vorkommt, haben dazu geführt, daß er so gründlich untersucht worden ist.

In dem Kalkspatmodell der Abb. 82 sind die Atome in den Lagen eingezeichnet, die sie nach den Röntgenstrahluntersuchungen einnehmen müssen. Wie in jedem Kristall, findet sich auch hier eine bestimmte Grundeinheit, und das Modell ist

so groß, daß es mehrere dieser Einheiten ganz oder teilweise umfaßt. Eine jede solche Einheit besteht aus einem Calcium-, einem Kohlenstoff- und drei Sauerstoffatomen. Das Modell besitzt, wie man deutlich erkennen kann, dieselbe Form wie der Kalkspat der Abb. 77; das ist auch zu erwarten, denn der ganze Kalkspatkristall besteht ja nur aus einer Aneinanderreihung solcher Einheiten. In der Abbildung sehen wir, außer dem

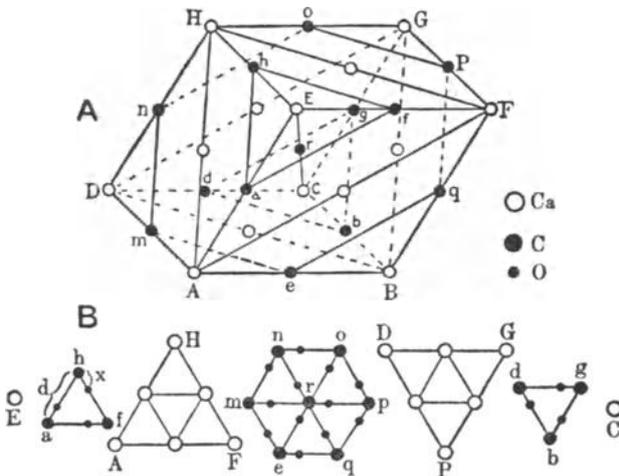


Abb. 82. Die Abbildung A zeigt die Anordnung der Atome, aus denen der Kalkspat, CaCO_3 , besteht. Die hellen weißen Kreise sollen Calciumatome sein, und die schwarzen Kreise Kohlenstoffatome. Die Sauerstoffatome sind in dieser Abbildung fortgelassen, damit dieselbe nicht zu kompliziert wird. In Abbildung B sehen wir die Anordnung der Atome in aufeinanderfolgenden Schichten senkrecht zu der Hauptachse EC . Die Sauerstoffatome sind hier durch kleine schwarze Kreise dargestellt. Die Bilder zeigen nur die Lage der Atome zueinander, sonst nichts. Der Abstand zwischen je zwei solchen Schichten in B beträgt $2,79$ Ängström-Einheiten, etwa drei hundertmillionstel Zentimeter. Die Größe und Form der einzelnen Atome ist in diesem Bilde nicht berücksichtigt, sie ist viel schwieriger zu bestimmen als die relativen Lagen der Mittelpunkte der Atome.

Modell selbst, unter B eine Reihe von Schnitten durch dasselbe. Diese Schnitte liegen senkrecht zu der Linie EC und zeigen, daß die Atome sich in aufeinanderfolgenden Ebenen abwechseln. Zuerst kommt eine Calciumebene, dann eine solche, die nur CO_3 -Gruppen enthält, d. h. Kohlenstoffatome, die jeweils von drei Sauerstoffatomen symmetrisch umgeben sind, dann folgt wieder eine Calciumebene und so fort. Die CO_3 -Gruppe ist am deutlichsten in dem Bilde der mittleren Schicht bei r zu erkennen. In der

zweiten und sechsten Ebene kommen nur Teile von ihr vor. Wir schneiden nun aus dem Kristall parallel zu diesen Ebenen, also senkrecht zu CE , eine Platte heraus. Eine solche Platte besitzt eine gewisse Symmetrie, und zwar die gleiche Symmetrie, die bei einem Drahtnetz mit sechseckigen Maschen auftritt. Die Richtung EC bezeichnet man als die Achse des Kristalles, weil um sie herum diese Symmetrie herrscht. Wenn wir mit einer solchen Platte physikalische Experimente anstellen, macht sich diese Symmetrie sofort bemerkbar. Der Kristallograph Sénarmont untersuchte z. B. die Wärmeleitfähigkeit des Quarzes. Seine Methode ist in Tafel XVIII C abgebildet. Wie der Kalkspat, so gehört auch der Quarz zu der Klasse der Kristalle mit einer besonderen Symmetrieachse; viele ihrer physikalischen Eigenschaften sind daher ähnlich. Sénarmont schnitt aus einem Quarzkristall eine Platte senkrecht zur Achse heraus, und bohrte durch ihre Mitte ein Loch. Auf die Platte wurde eine dünne Schicht von weißem Wachs aufgetragen und durch das Loch ein Draht gezogen, der durch einen

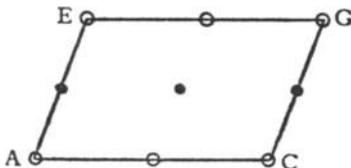


Abb. 83. Das Bild zeigt die Anordnung der Atome des Kalkspats in der Ebene $EACG$ (Abb. 82). Dies entspricht der Ebene $OSTR$ der Abb. 77.

elektrischen Strom erwärmt wurde. Das Wachs fing dann an zu schmelzen. Sénarmont fand, daß der geschmolzene Teil des Waxes eine Kreisfläche bildete, was bewies, daß die Wärme sich vom Draht aus gleichmäßig nach allen Richtungen ausgebreitet hatte. Wenn er aber eine Platte nahm, die nicht senkrecht zur Achse geschnitten war, dann blieb der Umriß der geschmolzenen Zone nicht mehr kreisförmig, sondern bildete, wie in der Abbildung, ein Oval. Die stärkste Abweichung von der Kreisform trat bei einer parallel zur Achse geschnittenen Platte auf, und zwar zeigten die Versuche, daß die Leitfähigkeit in der Richtung der Achse am größten und senkrecht zu ihr am kleinsten war. Die Leitfähigkeit in jeder anderen Richtung lag zwischen diesen beiden Extremen.

Selbst bei einer solch komplizierten Anordnung der Atome, wie sie im Kalkspat auftritt, können wir sehen, daß die Symmetrie in einer Ebene, die die Achse enthält, sehr viel geringer als in einer zur Achse senkrechten Ebene ist. Abb. 83 zeigt die Lage der Calcium- und Kohlenstoffatome in einer Ebene parallel zur Achse.

Von der sechseckigen Symmetrie der Abb. 82 ist nichts mehr zu erkennen.

So ist die besondere Struktur des Kalkspates — und bei den meisten Kristallen verhält es sich ähnlich — die Ursache dafür, daß physikalische Eigenschaften und Vorgänge von der Richtung im Kristall abhängig sind. Wir haben die Ausbreitung von Wärme als Beispiel genommen. Beim Durchgang des Lichtes durch irgendeine Substanz ist zwar der wesentliche Vorgang eine Schwingung, die wir dem Äther zuschreiben. Diese wird aber irgendwie auch von der Materie, aus der der Körper besteht, beeinflußt werden. Wir können daher durchaus erwarten, daß beim Durchgang des Lichtes durch einen Kristall die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von der Lage

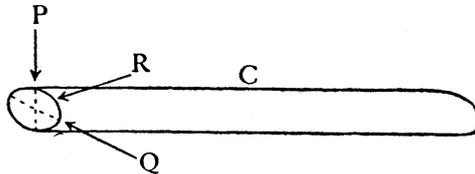


Abb. 84. Ein Stahlstab von elliptischem Querschnitt läßt einen höheren Ton erklingen, wenn man ihn bei Q anschlägt, als wenn man ihn bei P anschlägt, wobei P auf der flachen Seite liegt. Wenn man ihn bei R anschlägt, dann ertönen der hohe Ton von Q und der tiefe von P gleichzeitig, aber kein Ton von mittlerer Tonhöhe tritt auf.

der Schwingungsrichtung zu den wichtigsten Richtungen der Kristallstruktur abhängt. Alle Schwingungen senkrecht zur Achse des Kristalles müssen gleichartig sein, wie bei dem analogen Fall der Ausbreitung von Wärme. Daher müssen sich alle Strahlen, in denen die Schwingungen senkrecht zur Achse erfolgen, gleich schnell fortpflanzen. Das sind die ordentlichen Strahlen des Huygens. Alle anderen Strahlen haben eine hiervon abweichende Geschwindigkeit. Sie bilden außerordentliche Strahlen.

Nun erfolgen aber die Schwingungen doch, bevor der Strahl in den Kristall eintritt, in allen zum Strahl senkrechten Richtungen. Warum findet dann eine solche Auslese statt, daß in dem Kristall nur noch zwei Schwingungsrichtungen auftreten, eine senkrecht zur Achse, die den ordentlichen Strahl bildet, und eine zweite, die den außerordentlichen Strahl bildet?

Die Antwort auf diese Frage gilt gleichzeitig für viele andere Fälle, bei denen es zu einer Aufteilung von Schwingungsenergie kommt; als Beispiel betrachten wir die Schwingungen eines Stahlstabes, und zwar zunächst eines solchen mit kreisförmigem

Querschnitt. Wir halten ihn lose in der Mitte und schlagen ein Ende an, er biegt sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit hin und her, und dabei erklingt ein ganz bestimmter Ton. Es ist dabei gleichgültig, an welcher Stelle wir den Stab anschlagen. Bei einem elliptischen Querschnitt des Stabes ist der Vorgang jedoch verwickelter. Der Stab biegt sich in einer bestimmten Richtung leichter als in einer anderen. Wenn man ihn auf der flachen Seite der Ellipse bei P anschlägt (Abb. 84), schwingt er langsamer, als wenn der Schlag bei Q , also aus einer dazu senkrechten Richtung erfolgt; im ersten Fall hört man einen tieferen Ton als im zweiten Fall. Nun wollen wir den Stab bei R anschlagen, dann erklingt nicht etwa ein Ton, der zwischen den beiden liegt, die von dem Schlag bei P und Q herrühren, sondern man hört eine Mischung dieser beiden Töne. Das ist das Wesentliche an dem Vorgang. Die Energie der Schwingungen, die von dem Schlag bei R herkommt, teilt sich sofort in zwei Teile auf; ein Teil der Energie ist in den langsameren, der andere in den

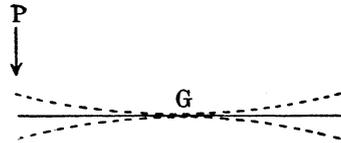


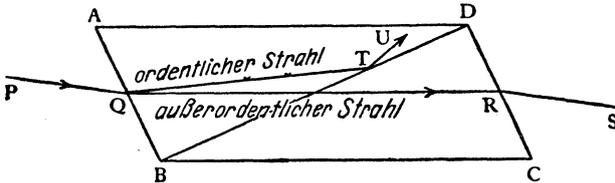
Abb. 85. Der schwingende Stahlstab der Abb. 84 nimmt abwechselnd die beiden Formen an, die die punktierten Linien zeigen.

schnelleren Schwingungen enthalten. Liegt R näher an P als an Q , dann überwiegt die langsamere Schwingung, und umgekehrt.

Der Ton, der erklingt, wenn der Stab auf diese Weise angeschlagen wird, kommt dadurch zustande, daß die Form des Stabes sich in regelmäßiger Weise periodisch ändert und dadurch Erschütterungen der Luft in Form von Schallwellen erzeugt. Die Veränderung selbst besteht darin, daß der Stab sich biegt und zwischen den beiden Lagen, die Abb. 85 zeigt, hin und her schwingt. Ein Schlag bei P erzeugt einen tieferen Ton, weil der Stab sich in diesem Falle leichter biegt. Man kann sich die Veränderung auch auf andere Weise vorstellen, nämlich als einen Impuls, der im Stab auf und ab läuft und von dem Schlag erregt worden ist. Die Laufgeschwindigkeit hängt einerseits von der Starrheit und andererseits von der Masse des Stabes ab; wenn der Impuls das Ende des Stabes erreicht, wird er reflektiert. Beide Arten, sich die Veränderung vorzustellen, sind gleichwertig; man muß nur berücksichtigen, daß die Reflexion am Stabende ein komplizierter Vorgang ist, der nicht so einfach verläuft wie die Reflexion bei einer gespannten Saite. Wäre der Stab unendlich lang, dann würden die von dem Schlag herrühren-

den Impulse an ihm entlanglaufen und niemals zurückkehren. Es wäre also auch kein Ton zu hören. Der Impuls, der von einem Schlag bei P herrührt, pflanzt sich langsamer fort als derjenige, der durch einen Schlag bei Q verursacht wird; er bleibt daher hinter dem letzteren zurück.

Beim Durchgang des Lichtes durch einen Kristall tritt eine analoge Erscheinung auf. Pflanzt das Licht sich in einer geraden Linie fort, so daß es einen Strahl bildet, dann treten entweder Schwingungen in zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen, oder nur in einer dieser beiden Richtungen auf. Ein Etwas im Kristall entspricht der Starrheit des Stabes, so daß die beiden Schwingungen sich verschieden schnell fortpflanzen und die eine



Das Nicol'sche Prisma.

Abb. 86. Ein langes Stück Kalkspat ist in zwei Teile geschnitten, die mit Kanadabalsam wieder zusammengeklebt sind. Die Lage des Schnittes im Verhältnis zur Form des Kristalles ist so gewählt, daß nur der eine der beiden Strahlen, in die das ankommende Licht zerlegt wird, durch den Apparat hindurchgehen kann.

der anderen voraussieht. Beim Kalkspat ist diese „Starrheit“ für Schwingungen senkrecht zur Achse am kleinsten, und zwar ist sie für alle diese Richtungen gleich groß, gerade wie in dem Versuch von Sénarmont (Tafel XVIII C) die Wärmeleitfähigkeit für alle Richtungen senkrecht zur Achse die gleiche war. Daher steht in einem Strahl, der in irgendeiner beliebigen Richtung durch den Kalkspat geht, die eine der Schwingungsrichtungen immer senkrecht zur Achse. In Abb. 77 ist dies z. B. die Richtung senkrecht zur Zeichenebene. Die andere Schwingungsrichtung muß, wie beim Stabe, auf der ersten senkrecht stehen. Wenn diese Schwingung gerade parallel zur Achse des Kristalles erfolgt, pflanzt sie sich mit der größtmöglichen Geschwindigkeit im Kristall fort; je näher sie dieser parallelen Richtung kommt, um so größer ist ihre Geschwindigkeit. Deshalb ist für diese Schwingung die Ausbreitungsfläche ein Sphäroid, dessen Achsenrichtung mit der Achse des Kristalles zusammenfällt. Die erste Schwingung pflanzt sich jedoch immer gleich schnell, unabhängig von der

Richtung des Strahles, fort. Ihre Ausbreitungsfläche ist deshalb eine Kugel. So ist das von Huygens aufgestellte Problem in dem Sinne gelöst, daß man es mit Hilfe wohlbekannter mechanischer Gesetze und Erscheinungen erklären kann.

Das Experimentieren mit polarisiertem Licht wird durch eine Vorrichtung, die wir William Nicol verdanken, außerordentlich erleichtert. Ein Kalkspatkristall wird in zwei Teile zerschnitten und dann mit Kanadabalsam wieder zusammengekittet, und zwar soll der Schnitt längs der Linie BD in Abb. 86 verlaufen. Die Geschwindigkeit des Lichtes im Balsam ist größer als die des sogenannten ordentlichen Strahles im Kalkspat, also des Strahles, der den gewöhnlichen Brechungsgesetzen gehorcht. Sie ist aber kleiner als die des außerordentlichen Strahles. Im Kanadabalsam

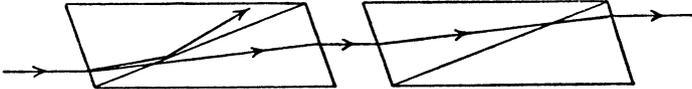


Abb. 87. Zwei Nicol'sche Prismen stehen in gleicher Lage. Das erste teilt alles ankommende Licht in zwei Teile, von denen nur der eine Teil hindurchgehen kann. Das zweite Prisma bewirkt keine weitere Teilung und hält auch den Strahl, der durch das erste kommt, nicht auf. Wenn das zweite Prisma aber um 90° um eine Achse gedreht wird, die den langen Kanten parallel geht, dann wird alles Licht zwischen den beiden zurückgehalten.

selbst haben beide Strahlen gleiche Geschwindigkeit, da die Lichtgeschwindigkeit in einer Flüssigkeit durch die Polarisation nicht beeinflußt wird. Nur in Kristallen hängt die Geschwindigkeit von der Lage der Schwingungen zum Kristall ab. In der genialen Anordnung der Abb. 86 trifft nun der ordentliche Strahl den Kanadabalsam so, daß er total reflektiert wird (vgl. Abb. 45), während der andere Strahl weitergeht. Bei einem Nicol'schen Prisma wird also die halbe Energie des Primärstrahles absorbiert, und der Rest kommt als polarisiertes Licht heraus. Da gute Kalkspatstücke selten sind, ist ein großes Nicol'sches Prisma sehr wertvoll.

Läßt man, wie in der Abb. 87, einen Lichtstrahl nacheinander durch zwei Nicol'sche Prismen gehen, dann hängt die Lichtmenge, die aus dem zweiten Kristall austritt, von der gegenseitigen Lage der beiden Prismen ab. Wir wollen z. B. annehmen, das erste Prisma sei so aufgestellt, daß es nur diejenigen Schwingungen des ankommenden Lichtes hindurchläßt, die in der Zeichenebene liegen. Das zweite Prisma sei zunächst genau so orientiert. Dann geht

das Licht ohne weiteren Verlust durch das zweite Prisma hindurch. Dreht man nun aber das letztere um einen rechten Winkel, dann absorbiert es das auffallende polarisierte Licht vollständig, so daß kein Licht durch beide Prismen hindurchkommt. Die Photographien der Tafel XIX A und B zeigen diese Erscheinung.

Mit Hilfe eines solchen Nicolschen Prismas können wir jetzt die Polarisation, die bei der Reflexion des Lichtes an einer durchsichtigen Oberfläche auftritt, viel einfacher als vorher nachweisen.

Ein polarisierter Lichtstrahl trifft eine Glasplatte in G (Abb. 88). Beim allmählichen Drehen des Nicols um seine Achse zeigt es sich, daß die Reflexion schwach ist, wenn der Hauptschnitt des Prismas

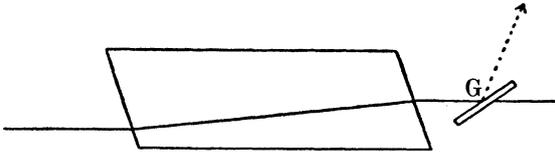


Abb. 88. Das Bild zeigt einen polarisierten Lichtstrahl, der ein Stück ebenes Glas trifft und schwach reflektiert wird, das meiste Licht geht durch das Glas hindurch. Wenn das Stück Glas oder das Nicolsche Prisma aber um 90° um die Richtung des hindurchfallenden Lichtstrahles in der Zeichnung gedreht wird, dann wird die Reflexion stark; dies ist der Versuch von Malus.

in der Zeichenebene liegt, wie die Abbildung es zeigt; wenn man aber das Nicolsche Prisma um einen rechten Winkel hierzu dreht, tritt kräftige Reflexion auf. Wenn wir unsere Vorstellung über die Entstehung der Polarisation in einem Kristall beibehalten, dann folgt hieraus, daß Licht von einer Glasplatte dann am besten reflektiert wird, wenn die Schwingungen parallel zur Oberfläche des Glases erfolgen (vgl. auch Tafel XVIII B). Die Glasplatte soll dabei mit dem Lichtstrahl einen Winkel von ungefähr 35° bilden. Hiermit haben wir den Versuch von Malus wiederholt.

Da das Licht, das von der Oberfläche durchsichtiger Körper reflektiert wird, mehr oder weniger polarisiert ist, so kann die Erscheinung der Polarisation gar nicht selten sein, in der Natur treten ja häufig Reflexionen an der Oberfläche des Meeres und anderer Gewässer auf. Wir wollen uns aber wieder daran erinnern, daß man die Polarisation nicht direkt sehen kann, vielmehr muß man hierzu irgendeinen polarisierenden Apparat, ein Nicolsches Prisma oder ein Stück Glas, das man im richtigen Winkel hält, zu Hilfe nehmen. Die störenden Reflexe, die manchmal an dem Glase eines Bildes auftreten, das man aus einer bestimmten

Richtung betrachtet, kann man mitunter durch ein Nicolsches Prisma beseitigen. Man muß es dabei in der Hand drehen, bis die Reflexe verschwinden. Das geht, weil die Reflexe ja polarisiert sind. Aber es gelingt nur, wenn der Beobachter an ganz bestimmten Stellen steht. Es ist daher keine praktische Hilfe für den Museumsbesucher. Ebenso kann man — unter gewissen Umständen — das von der Oberfläche des Meeres reflektierte Licht vernichten, und dadurch in die Tiefe blicken; dieselbe Methode ist auch von Beobachtern im Flugzeug angewandt worden. Aber auch hier ist die Methode nicht allgemein anwendbar.

Die Polarisation des Himmelslichtes

In der Natur tritt ein besonders interessanter Fall von Polarisation bei dem Lichte, das vom Himmel ausgeht, auf. Er ist einmal deshalb interessant, weil er uns wieder die Fähigkeit der Wellentheorie zeigt, natürliche Tatsachen zu erklären, andererseits aber auch wegen der geistreichen Experimente, die zu seiner Untersuchung unternommen wurden, die ihrerseits wieder zu einigen sehr schönen Demonstrationen geführt haben.

Daß das Licht, das vom Himmel kommt, polarisiert ist, kann man mit Hilfe eines Nicolschen Prismas leicht feststellen (Abb. 89). Wir wollen annehmen, S sei die Sonne, P ein Teilchen, das Licht streut, und O das Auge des Beobachters. Hält man das Prisma so, daß sein Hauptschnitt in derselben Ebene wie SP und PO liegt, dann sieht der Himmel dunkel aus. Sobald man aber das Prisma um 90° um seine Achse dreht, erscheint der Himmel hell. Denselben Versuch kann man natürlich auch mit einer Glasplatte, aber nicht mit einem versilberten Spiegel anstellen. Bei der Anordnung der Abb. 90 sieht ein in E befindliches Auge im Spiegel bei M einen Reflex. Der Reflex wird dunkler, wenn wir den Ständer mit dem Spiegel um einen rechten Winkel drehen, so daß in der zeichnerischen Darstellung die Fläche des Spiegels auf uns zu gerichtet ist, wenn wir die Abbildung betrachten.

Wir haben früher angenommen, daß die Schwingungen, die vom Prisma durchgelassen werden, im Hauptschnitt des Prismas liegen. Dann muß das Licht, das von P zu dem Spiegel oder zu dem Auge in unseren Abbildungen gestreut wird, senkrecht zu der Zeichenebene schwingen. Das müssen wir auch nach der Wellentheorie erwarten. Wir wollen uns dies an einem analogen Fall klarmachen.

Zwei Seile von, sagen wir, 8 bis 10 m Länge sind in der Mitte zusammengeknotet und werden von vier Männern, die an den Enden stehen, ziemlich straff gehalten (Abb. 91). Der Mann bei A läßt Schwingungen in der Richtung AE durch das Seil gehen. Zunächst sollen es senkrechte Schwingungen sein, bei denen das Seil sich also auf und ab bewegt. Wenn die Schwingungen zu dem Punkt E kommen, und der Knoten dort anfängt, sich nach oben

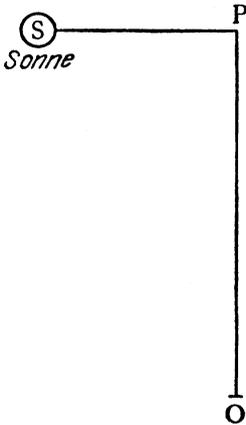


Abb. 89. Der Beobachter bei O sieht zum Himmel auf in der Richtung OP . Wenn er ein Nicolsches Prisma so vor sein Auge hält, daß die Hauptebene $ABCD$ in der Abb. 86 — in der Ebene OPS liegt, d. h. in der Ebene, die OP und die Verbindungslinie zwischen Beobachter und Sonne bei S enthält, dann erscheint der Himmel dunkel. Wenn das Prisma um 90° um seine eigene Achse gedreht wird, dann hellt der Himmel sich auf.

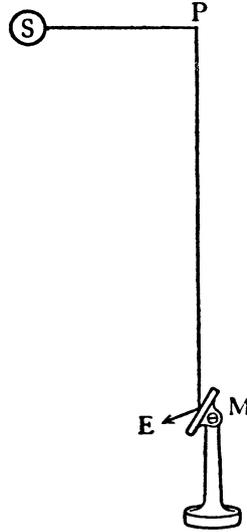


Abb. 90. Anstatt des Nicolschen Prismas kann der Beobachter ein Stück unversilbertes Glas M , wie in Tafel XVIII B, benutzen und damit das Licht in sein Auge bei E reflektieren. Mit der Anordnung, die in der Abbildung gezeigt wird, erhält er dann einen helleren Reflex vom Himmel, als wenn er den Glasspiegel um die Linie PM oder um die Richtung der Ständerachse so dreht, daß er in einer Richtung senkrecht zur Zeichenebene blicken muß, um die Reflexion zu beobachten.

und unten zu bewegen, gehen von dort Impulse in den Richtungen EC und ED aus; die ursprüngliche Bewegung setzt sich aber auch nach EB fort. Wenn nun der Mann bei A das Seil seitliche Schwingungen ausführen läßt, wie es die gestrichelte Linie angibt, dann wird keine Bewegung nach EC und ED weitergeleitet, da E keinerlei Bewegungen ausführen kann, die transversale Schwingungen nach EC und ED weiterleiten könnten. Das geht nur, wenn die von A ausgehende ursprüngliche Schwingung eine senkrechte Komponente

enthält. In diesem zweiten Falle (der seitlichen Schwingungen) kommt ein gewisser Teil der Bewegung durch E hindurch zu EB , und die Impulse, die von A ausgehen, kommen als transversale Bewegung von AE nach B , da der Knoten bei E genügend nachgibt, um diese Schwingungen durchzulassen. Beim Licht gibt es natürlich nichts, was der Schwierigkeit im Seilversuch, an E vorbeizukommen, entspräche. Licht von A kommt auf alle Fälle an E vorbei nach B .

Dieser Versuch hat den Zweck, eine Analogie zu der Streuung des Lichtes durch ein feines Teilchen, etwa ein Molekül in der Luft, zu geben. Schwingungen, die in der Richtung AE fortschreiten, werden nur dann nach EC oder ED weiter gestreut, wenn sie rechtwinklig zu diesen Richtungen erfolgen, aber nicht, wenn ihre Schwingungsrichtung parallel zu EC und ED ist. Nehmen sie eine mittlere Lage ein, werden sie zum Teil nach EC und ED gestreut.

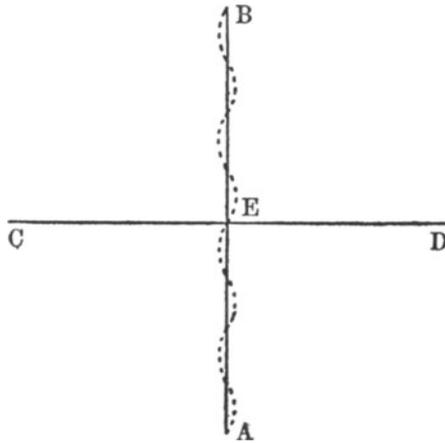


Abb. 91. Zwei Seile sind bei E zusammengeknotet und werden an den vier Enden gehalten. Wenn eine Schwingung in der Ebene der Zeichnung, wie es die Wellenlinie zeigt, von A aus erregt wird, dann wird sich BE in Bewegung setzen, aber nicht EC oder ED ; aber wenn die Schwingung senkrecht zur Zeichenebene erfolgt, dann fangen EC und ED ebenso an zu schwingen wie EB .

Wir wollen uns jetzt dem Fall der Abb. 90 zuwenden. Von der Sonne bei S gehen Lichtwellen aus und bewegen sich in Richtung SP . Wenn ihre Schwingungen in der Zeichenebene liegen, können sie keine transversale Schwingung, die sich in der Richtung MP ausbreiten kann, erzeugen; dies entspricht dem ersten Fall der Abb. 1. Schwingungen aber, die senkrecht zur Zeichenebene erfolgen, können beim Zusammenreffen mit einem streuenden Teilchen bei P , wie in dem analogen Versuch mit den Seilen, transversale Wellen erregen, die von P nach M gehen. Das Licht, das von der Sonne kommt und in der Richtung SP geht, muß man sich als unpolarisiert vorstellen, es enthält transversale Schwingungen aller Richtungen;

dasjenige, das entlang PM geht, besteht hauptsächlich aus Wellen, die senkrecht zur Zeichenebene schwingen. Daher ist das Himmelslicht polarisiert.

Man kann im Laboratorium einige sehr schöne Versuche anstellen, um dies zu erläutern. Das Licht einer Bogenlampe wird mit Hilfe eines Nicolschen Prismas N polarisiert und von einem versilberten Spiegel M so reflektiert, daß der Strahl nach unten in einen Glaszylinder J geht (Abb. 92). Der reflektierte Strahl ist dann immer noch polarisiert. Wir wollen z. B. annehmen, daß die Schwingungen horizontal und senkrecht zur Zeichenebene

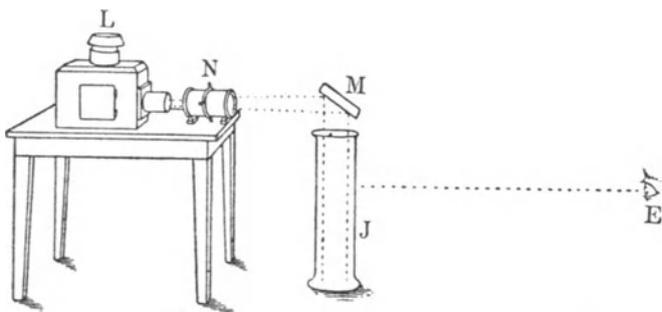


Abb. 92. Das Licht von der Lampe L wird durch das Nicolsche Prisma N polarisiert und von dem Spiegel M in den Behälter reflektiert, der mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, die fein verteilte Materie suspendiert enthält. Die Menge des gestreuten Lichtes ist von der Streuungsrichtung abhängig, wie im Text erklärt wird.

erfolgen, wenn sie aus dem Prisma herauskommen; sie werden dann ebenso durch den Behälter gehen. Der Behälter sei mit reinem Wasser gefüllt, dem man etwas Mastixlösung zugesetzt hat, so daß eine Suspension von sehr feinen Mastixteilchen entstanden ist. Diese Teilchen streuen das Licht, aber nicht gleichmäßig nach allen Seiten. Für ein Auge bei E in der Ebene der Zeichnung wird der Zylinder hell erscheinen. Geht der Beobachter aber um den Behälter herum, so daß er ihn von der Seite ansieht, so wie der Beschauer das Bild im Buche sieht, dann wird der Zylinder dunkel aussehen. Derselbe Wechsel zwischen Hell und Dunkel tritt ein, wenn der Beobachter stehenbleibt und das Nicolsche Prisma gedreht wird. Wenn verschiedene Beobachter im Raume sind, dann wird der Behälter einigen hell, anderen dunkel erscheinen.

Die Erscheinung ist sehr auffallend, und durch eine kleine Abänderung wird sie wunderschön. Hierzu lösen wir in der Mastix-

suspension noch eine gewisse Menge Zucker auf. Zucker hat, wie viele andere Substanzen, eine merkwürdige Wirkung auf polarisiertes Licht; wenn dieses nämlich durch eine Zuckerlösung oder durch festen Zucker hindurchgeht, ändert sich dauernd die Schwingungsrichtung, sie dreht sich während des Weges schraubenförmig. Wenn z. B. das Licht, das von oben in die Zuckerlösung eintritt, so polarisiert ist, daß es senkrecht zur Zeichenebene schwingt, dann dreht sich beim Eindringen des Lichtes in die Flüssigkeit die Schwingungsrichtung in der Weise, daß in einer gewissen Tiefe die Schwingungen in der Zeichenebene erfolgen. Das Auge empfängt dann kein gestreutes Licht mehr. In einer größeren Tiefe erscheint der Behälter, von E aus gesehen, wieder hell. Die Abstände, in denen dieser Wechsel von Hell und Dunkel auftritt, ändern sich nun mit der Wellenlänge. Die Schwingungsrichtung des blauen Lichtes wird nämlich viel schneller als die des roten herumgedreht; die Folge ist, daß der ganze Zylinder von einem herrlichen Farbenspiel erfüllt ist, dessen Intensität von oben nach unten zunimmt. Durch Zwischenschalten einer Quarzplatte zwischen Nicol und Zylinder kann man es erreichen, daß der Behälter von oben bis unten intensiv bunt erscheint. Eine Quarzplatte, die rechtwinklig zur Achse des Kristalles geschnitten ist, dreht nämlich die Schwingungsrichtung des hindurchgehenden Lichtes in ähnlicher Weise wie Zucker. Infolgedessen sind die Schwingungsrichtungen für verschiedene Wellenlängen schon beim Eintritt in die Flüssigkeit voneinander getrennt.

Das Licht der Sonne und der Sterne

Die Sterne erscheinen uns als helle Punkte, die miteinander am Himmel entlang ziehen. Schon vor langen Zeiten haben die Astronomen nachgewiesen, daß die Sterne uns hierdurch viel mehr von der Drehung der Erde als von ihren eigenen Bewegungen erzählen. Sehr genaue und mühsame Beobachtungen zeigen jedoch, daß auch relative Bewegungen zwischen den einzelnen Sternen vorkommen. Diese sind aber so klein, daß die Sternbilder die gleiche Form beibehalten haben, seit sie zuerst von Menschen beschrieben wurden. In den letzten hundert Jahren sind wir nun mit der Deutung der Nachrichten, die das Licht uns bringt, viel weiter gekommen, und wir sind daher heute mit den Sternen vertraut geworden; sie sind uns nicht mehr ein bloßer Haufen heller unregelmäßig am Himmel verstreuter Punkte, oder ein Haufen in der Tiefe des Weltraums verteilter Sonnen, die Licht wie unsere eigene austrahlen, sondern sie sind für uns zu Teilen eines in Tätigkeit begriffenen Weltalls geworden, von dem unser eigenes Sonnensystem ebenfalls einen Teil bildet. Wir kennen ihre Entfernungen und ihr Gewicht, ihre Helligkeit, Zusammensetzung und Bewegungen, ja wir können sogar die Geschichte ihrer Vergangenheit und Zukunft abschätzen. Die Welt, die wir kennen und begreifen, hat sich plötzlich erweitert, und wir fangen an, die tieferen Gesetze, die in ihr herrschen, zu verstehen.

Die Wissenschaft der Astronomie ist sehr alt, aber sie hat sich in früheren Zeiten fast ausschließlich mit der Beobachtung der Lage der Himmelskörper begnügt. Das Licht wurde nur benutzt, um Winkel zu messen und die scheinbare Bewegung der Sonne, des Mondes und der Sterne auf einer Himmelskugel festzulegen. Die gewaltige Erweiterung, die unsere astronomischen Kenntnisse in den letzten hundert Jahren erfahren haben, begann, als man anfang das Licht selbst zu untersuchen, und nicht nur die Richtung, aus der es kam. Eigenschaften und Intensität des Sonnenlichtes sind charakteristisch für die Art und den physikalischen Zustand der

Quelle, von der das Licht kommt; ihr Studium hat zu neuen Untersuchungsmethoden geführt und gleichzeitig für die alten Methoden, die schon lange benutzt wurden, neue Möglichkeiten eröffnet.

Die Entfernungen der Sterne

Mit den alten Methoden konnte man Entfernungen im Raume messen, und unzählige solcher Messungen wurden ausgeführt. Sie sind außerordentlich wichtig und interessant, denn es ist ja ein ewig neues Wunder für uns, daß die Sterne nicht nur helle Flecke auf einer Kugel sind, in deren Mittelpunkt die Erde steht, sondern Körper, die an Größe, Temperatur und anderen Eigenschaften mit der Sonne verglichen werden müssen, die in unendlichen Räumen verteilt und nicht auf eine einzelne Ebene beschränkt sind. Die Bemühungen der Astronomen waren daher zunächst darauf gerichtet, diese Entfernungen zu bestimmen, und auch heute noch ist dies eine ihrer wichtigsten Aufgaben.

Wenn man derartige Bestimmungen ausführen will, muß man zunächst eine bestimmte Längeneinheit wählen; denn alle Längenmessungen kommen letzten Endes auf einen Vergleich der zu messenden Strecke mit einer bestimmten Grundeinheit heraus. In unserem Falle muß diese Einheit natürlich so groß sein, daß der Astronom mit ihr umgehen kann. Die Grundlage aller Längenmessungen bilden Metallstäbe, die von Regierungsbeamten der verschiedenen Länder mit allergrößter Sorgfalt hergestellt und aufbewahrt werden. Die gebräuchlichsten unter ihnen sind das Normalmeter und das Normalyard. Diese beiden haben fast alle anderen verdrängt. Von diesen Einheiten ausgehend, muß der Astronom einen weiten Weg zurücklegen, bis es ihm möglich wird, die riesigen Entfernungen der Sterne auszumessen. Diese Reise muß in einzelnen Etappen zurückgelegt werden, deren Endziel jedesmal darin besteht, die Länge einer bestimmten Entfernung, auf die Grundeinheit bezogen, festzulegen. Dabei wächst die Länge der zu messenden Strecke von Etappe zu Etappe vieltausendmal an.

Die erste Aufgabe besteht darin, eine auf der Erdoberfläche von Süden nach Norden verlaufende Strecke von einigen Kilometern Länge genau zu vermessen, d. h. festzustellen, wie oft die Grundeinheit in ihr enthalten ist. An den Enden dieser Strecke stellt der Astronom dann seine Fernrohre auf und mißt den Unterschied der geographischen Breite dieser beiden Punkte. Hierzu wählt er sich

einen geeigneten Stern aus. In dem Augenblick, wo der Stern südlich von den beiden Endpunkten liegt — die gemessene Strecke also auf ihn hinzeigt —, wird die Höhe des Sternes über dem Horizont mit beiden Fernrohren in Winkelgraden gemessen. Die Differenz dieser Winkel gibt den Unterschied in der geographischen Breite. Wenn die Erde eine flache Scheibe wäre, würden die beiden gemessenen Winkel gleich sein, denn der Horizont würde für beide Plätze in derselben Richtung liegen, und der Stern ist ja außerordentlich weit entfernt. In Wirklichkeit fallen beide Winkel verschieden aus. Der Betrag, um den sie sich voneinander unterscheiden, hängt von der Krümmung der Erde ab und kann dazu dienen, diese Krümmung zu messen.

In Abb. 93 sollen P und Q die beiden Punkte auf der Erdoberfläche darstellen, und PS_1 und QS_2 die Linien, die zu dem Stern S hinzeigen. Diese verlaufen praktisch parallel miteinander. Wenn nun die Linien PH_1 und QH_2 dem Horizont in den Punkten P und Q entsprechen, dann ist der Unterschied zwischen den beiden gemessenen Winkeln S_1PH_1 und S_2QH_2 gleich dem Winkel zwischen PH_1 und QH_2 , und damit gleich dem Winkel zwischen den Linien, die von P und Q aus zum Mittelpunkte der Erde führen. PQ und der Winkel PCQ sind also beide bekannt, so daß man PC , den Radius der Erde, berechnen kann. Die Erde ist nicht gleichmäßig rund; sie bildet ein Sphäroid und keine Kugel. Der Abstand von ihrem Mittelpunkt nach den Polen hin beträgt fast genau 6300 km, zum Äquator hin ist er etwa 21 km länger.

Damit ist das nächste Stadium erreicht. Die Erde selbst wird jetzt zur Grundlage für weitere Messungen, denn nachdem ihre Form bekannt ist, kann jede beliebige Entfernung auf ihr aus Breiten- und Längenmessungen berechnet werden. Für diese Messungen braucht man nur Uhren und Fernrohre. Es ist nicht mehr nötig, die Entfernungen mühselig, Schritt für Schritt, mit einem Metermaß auszumessen.

Bei solchen Messungen dient das Fernrohr als Präzisionsinstrument. Die meisten von uns kennen es nur als Vergrößerungsapparat. Für den Astronomen ist es jedoch weit mehr. Wie schon in Kapitel II erklärt wurde, bildet das Objektiv des Fernrohres einen Teil des Himmels in seiner Brennebene ab. Man kann nun ein Paar von feinen Drähten oder Spinnwebfäden in derselben Ebene anbringen, so daß das Auge mit Hilfe des Okulars den abgebildeten Teil des Himmels gleichzeitig mit den Fäden sieht; das

Fernrohr wird nun so gerichtet, daß der Stern oder ein anderer Gegenstand, den man betrachtet, auf einen der Fäden fällt. Dann ändert man die Richtung des Rohres, bis ein anderer Stern auf dieselbe Linie fällt. Der Winkel, um den das Fernrohr dabei gedreht wird, läßt sich mit Hilfe von Teilkreisen, die am Fernrohr befestigt sind, messen. Bei einer anderen Art von Versuchen läßt man das Fernrohr in bestimmter Lage stehen und verfolgt die scheinbare Bewegung der Sterne, bis ein anderer Stern mit dem Faden

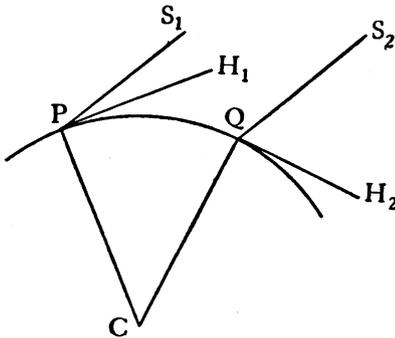


Abb. 93. Ein Beobachter bei P sieht den Horizont in der Richtung PH_1 , und der Winkel S_1PH_1 gibt die Höhe des Sternes S über dem Horizont im Winkelmaß an. Der Winkel S_2QH_2 gibt die Höhe desselben Sternes, von einem Beobachter von Q aus gesehen, an. Der Unterschied zwischen diesen beiden Winkeln ist gleich dem Winkel PCQ und damit gleich dem Unterschied in der geographischen Breite zwischen den zwei Beobachtungspunkten.

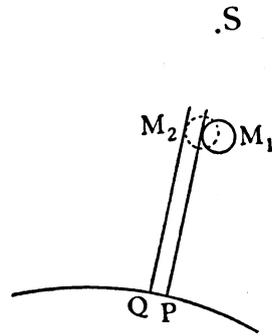


Abb. 94. Für einen Beobachter bei P fängt der Mond gerade an, den Stern S zu verdecken, wenn der Mond in der Stellung M_1 ist. Von Q aus gesehen findet dieser Vorgang statt, wenn der Mond bei M_2 steht. Der Abstand M_1M_2 ist gleich dem bekannten Abstand PQ , und so kann man die Geschwindigkeit des Mondes bestimmen.

zusammenfällt; dann geht die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde in die Messung ein. Messungen solcher Art sind seit Hunderten von Jahren immer wieder verbessert worden, so daß sie heute einen hohen Grad von Vollkommenheit erreicht haben. Dadurch sind die Astronomen in der Lage, ihre Messungen immer weiter in den Raum hinaus zu erstrecken.

Der nächste Schritt besteht darin, zu bestimmen, in welcher Entfernung von uns sich Mond und Sonne befinden. Die Kenntnis des Sonnenabstandes ist, wie wir sehen werden, für die Ausdehnung der Messungen auf noch größere Entfernungen notwendig. Um die Entfernung des Mondes zu messen, bestimmt man an zwei verschiedenen Punkten der Erdoberfläche den Zeitpunkt, an dem der Mond an einer bestimmten Stelle des Himmels, z. B. an einem

Stern oder bei einer Sonnenfinsternis an dem Rand der Sonne vorbeikommt. Aus solchen Messungen ergibt sich nämlich die Geschwindigkeit des Mondes in ähnlicher Weise wie die Geschwindigkeit eines Autos aus den Zeitmessungen zweier Polizisten, die sich in einem bekannten Abstand aufgestellt haben.

In der Abb. 94 sind PM_1 und QM_2 parallel oder wenigstens so wenig gegeneinander geneigt, daß wir sie angenähert als parallel betrachten können. Dann ist der Abstand M_1M_2 gleich der Strecke PQ , die eine bekannte Entfernung auf der Erdoberfläche darstellt. Man kann also auf diese Weise die Geschwindigkeit des Mondes bestimmen; da man andererseits auch die Zeit kennt, die er braucht, um die Erde einmal zu umkreisen, läßt sich der Radius dieses Kreises ohne weiteres berechnen (Abb. 94).

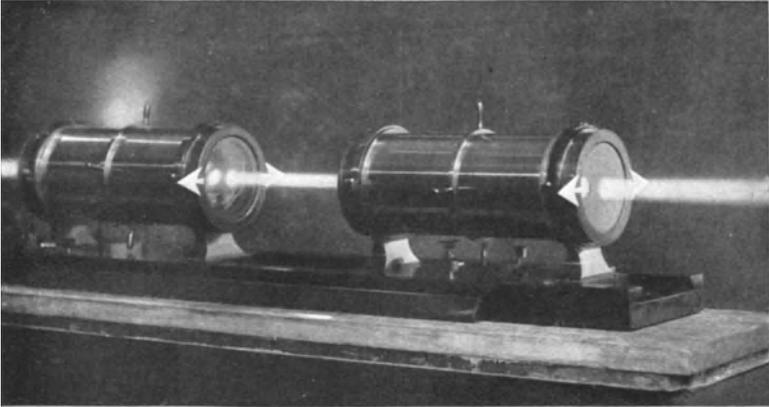
In ganz ähnlicher Weise bestimmt man die Entfernung der Sonne von der Erde, obgleich die Berechnung hier nicht ganz so einfach und direkt ist. Zu diesem Zweck beobachtet man die Zeiten, an denen Venus oder Eros an den Rändern der Sonnenscheibe vorbeizukommen scheinen, ein Ereignis, das allerdings nicht sehr häufig vorkommt. Auch diese Messungen nimmt man an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche vor, die bekannte Entfernungen voneinander haben. Der Zeitunterschied, der hierbei auftritt, ist allerdings sehr klein, denn selbst wenn zwei Beobachter an gegenüberliegenden Stellen der Erdoberfläche ständen und dort gute Messungen machen könnten, würden sie nur einen Unterschied von etwa fünf Minuten feststellen können.

Auf diese Weise hat man gefunden, daß der Radius der Erdbahn etwa 150 Millionen Kilometer beträgt, und jetzt hat der Astronom die richtige Basis gefunden, von der aus er seinen letzten Ausflug in den Sternenraum unternehmen kann.

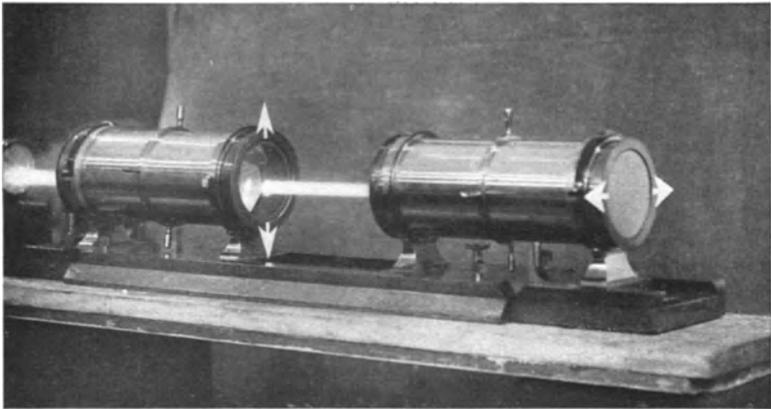
Der Wert einer solchen Basislinie zur Bestimmung der Bewegungen von Erde und Sternen zueinander war schon lange Zeit hindurch gewürdigt worden, ehe man wirklich Berechnungen auf dieser Basis anstellen konnte. Wir wollen zur Erläuterung ein einfaches Bild benutzen, das von Jeans¹⁾ stammt: Ein Kind in einer Schaukel sieht, daß die Gegenstände seiner näheren Umgebung sich auf dem Hintergrund, der von entfernter liegenden Gegenständen gebildet wird, hin und her bewegen. Ebenso müßten Beobachter auf der Erde sehen können, daß einige

¹⁾ Jeans: The Universe Around Us.

Tafel XIX



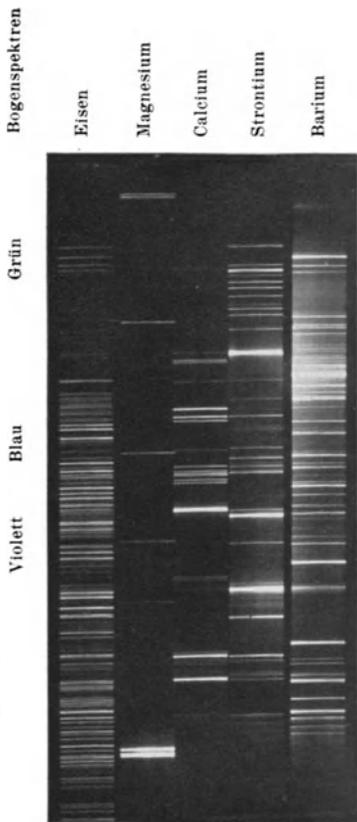
A.



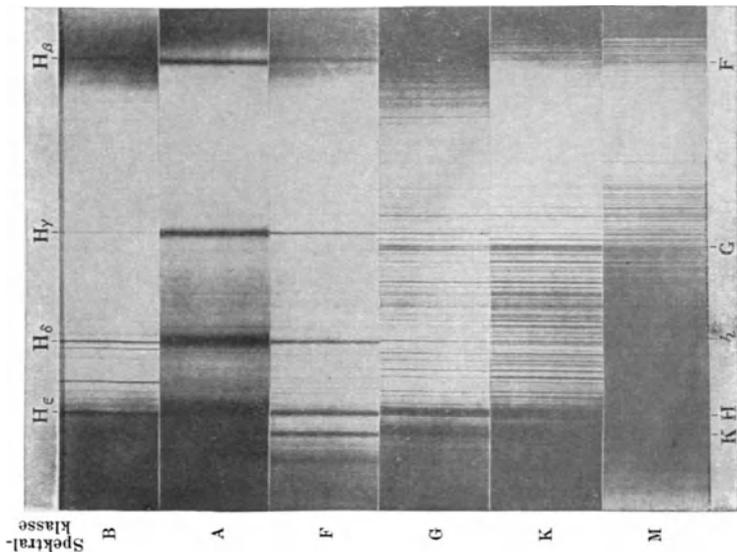
B.

Ein Lichtstrahl, der aus einem Nicol'schen Prisma herauskommt, geht durch ein zweites Prisma hindurch, wenn die beiden parallel zueinander stehen. Der weiße Pfeil an jedem Prisma liegt in der Hauptebene des Kristalles. Die Strahlen kommen nicht durch das zweite Prisma hindurch, wenn die Hauptebenen senkrecht zueinander stehen. Der Weg der Lichtstrahlen ist mit Hilfe von Rauch in der Luft sichtbar gemacht. (S. 150.)

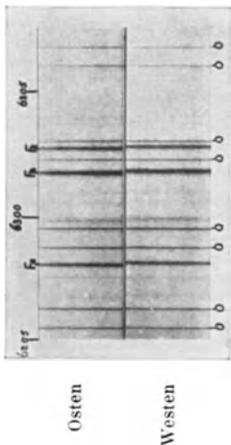
Tafel XX



B. Spektren der leuchtenden Dämpfe verschiedener Elemente, die im elektrischen Bogen verdampfen (A. Fowler). (S. 166.)



A. Einige Spektren von Sternen, die die Verschiebung des Maximums der Intensität von den heißen weißen Sternen der Klasse F, wie Procyon und Kanopus, zu den kälteren roten Sternen der Klasse M, Antares und Betelgeuze zeigen. (S. 104.) Aus dem Buche: *Sonne, Sterne und Weltall* von W. M. Smart



C. Ein Vergleich der Spektren des sich nähernden und des sich entfernenden Randes der Sonne zeigt den Dopplereffekt. Wenn in beiden Photographien die Linien, die von dem Sauerstoff in der Erdatmosphäre kommen, genau übereinander liegen, dann liegen die Linien, die von dem Eisen in der Sonne stammen, nicht genau übereinander. (S. 171.)

von den Sternen sich gegen die übrigen hin und her bewegen, und diese Bewegung müßte dieselbe Periode haben wie die Erde bei ihrem Weg um die Sonne. Bewegungen dieser Art wurden erst im Jahre 1838 beobachtet; sie sind winzig klein, viel geringer als man erwartet hatte, und konnten unmöglich gefunden werden, solange man nur Instrumente hatte, die dazu nicht ausreichten.

In diesem Jahre entdeckte man, daß drei Sterne, nämlich 61 Cygni, α Centauri und α Lyrae Bewegungen auf dem Hintergrund des Himmels ausführten, die zwar außerordentlich klein, aber unverkennbar waren. Diese Sterne sind so weit entfernt, daß ihr Licht mehrere Jahre braucht, ehe es uns erreicht; bei α Centauri sind es zum Beispiel 4,31 Jahre. Wie ungeheuer groß dieser Abstand ist, macht man sich am besten klar, wenn man diese Zeit mit den 500 Sekunden vergleicht, die das Sonnenlicht braucht, um die 150 Millionen Kilometer auf seinem Weg zur Erde zurückzulegen.

Nur bei einigen der allernächsten Sterne kann man diese Methode anwenden. Die andern sind so weit entfernt, daß auch mit den besten Fernrohren kein Unterschied in ihrer Lage festzustellen ist, wenn man sie von entgegengesetzten Punkten der Erdbahn aus beobachtet. Es ist erstaunlich genug, daß man selbst bei diesen wenigen Sternen so viel erreicht hat, denn sie sind ungefähr eine Million mal so weit von uns entfernt wie die nächsten Planeten. Die Astronomen drücken solche Entfernungen in Lichtjahren aus.

Die Geschwindigkeit des Lichtes

Wir haben uns bisher nicht mit der Größe der Lichtgeschwindigkeit beschäftigt, denn keine der bis jetzt besprochenen Erscheinungen hing von dem Zahlenwert dieser Größe ab; wir müssen uns jetzt aber einen Begriff von dieser Geschwindigkeit machen, wenn der Ausdruck „Lichtjahr“ einen bestimmten Sinn bekommen soll.

Die Zeit, die das Licht braucht, um eine abgemessene Entfernung auf der Erde zurückzulegen, ist so außerordentlich klein, daß man sie nur mit sehr genauen Präzisionsinstrumenten bestimmen kann; Galilei machte einen Versuch, sie zu messen, aber ohne Erfolg. Es ist kein Wunder, daß die ersten Messungen, die wirklich den Beweis dafür brachten, daß das Licht eine endliche Geschwindigkeit hat, im Zusammenhang mit der Zeitspanne unternommen wurden, die das Licht braucht, um die 300 Millionen Kilometer des Durchmessers der Erdbahn zurückzulegen.

Die Geschichte ist oft erzählt worden, wie Olaf Römer am Ende des 17. Jahrhunderts in Paris das Verschwinden der Jupitermonde hinter der Scheibe des Planeten Jupiter beobachtete. Aus einer Reihe solcher Beobachtungen berechnete er die durchschnittliche Umlaufszeit eines jeden Mondes. Dabei fand er, daß immer, wenn Erde und Jupiter einander am nächsten waren, das Verschwinden acht Minuten vor der Zeit eintrat, die sich aus den Mittelwerten berechnen ließ, dagegen erfolgte es acht Minuten zu spät, wenn beide Planeten den größtmöglichen Abstand voneinander hatten. Er zog hieraus den richtigen Schluß, daß die Abweichungen gegen die berechnete Zeit darauf zurückzuführen seien, daß das Licht eine gewisse Zeit brauche, um den Durchmesser der Erdbahn zu durchqueren. Man kann sich hierzu leicht ein einfaches Beispiel vorstellen. Ein Kaufmann bekommt jede Woche einen Brief aus Australien, der ihm sofort ausgehändigt wird, wo er auch immer ist; er muß nun sehr oft zwischen London und Dublin hin und her reisen; erhält er den Brief in London, dann ist die Zeit, die der Brief gebraucht, um ihn zu erreichen, kleiner, in Dublin aber größer als die Durchschnittszeit. Der Unterschied dieser beiden Zeiten ist gleich der Zeit, die der Brief braucht, um von London nach Dublin zu gelangen. Auf diese Weise ergibt sich für das Licht da es ungefähr 1000 Sekunden braucht, um den etwa 300 Millionen km langen Durchmesser der Erdbahn zu durchlaufen, eine Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde. Es gibt noch andere Wege, diese Größe zu bestimmen. Sie ist heutzutage sehr genau bekannt. Die angegebene Geschwindigkeit ist die Geschwindigkeit aller Wellen im freien Äther; in durchsichtigen Körpern wie Glas oder Wasser ist sie etwas kleiner, ebenso, aber nur unbedeutend, in der Luft. Man hat oft darauf hingewiesen, daß infolge dieser großen Geschwindigkeit durch Radio übertragene Musik ferne Länder auf dem Wege über die Ätherwellen in kürzerer Zeit erreicht als das andere Ende eines Konzertsaales auf dem Wege über die Schallwellen in der Luft.

Bei diesem Ausmessen der Sternentfernungen mit dem Metermaß benutzt man das Licht nur zum Festlegen von Richtungen. Es hat diesen Dienst seit Tausenden von Jahren erfüllt, allerdings zunächst nur unvollkommen, bis Galilei als erster hierbei sein Fernrohr benutzte. Da nun aber heute noch die Fernrohre dauernd verbessert werden, wächst die Genauigkeit der Winkelmessung ständig an, und damit steigert sich der Wert dieser Beobachtungen.

Andererseits gibt es eine ganze neue Wissenschaft, die sich mit der Zusammensetzung des Lichtes eines Sternes beschäftigt und daraus Schlüsse auf seine Natur und seine Bewegungen zieht.

Die Analyse des Sternenlichtes

Der erste Schritt bei diesen Untersuchungen besteht darin, daß man mit einem Prisma oder einem Gitter das Sternenlicht zerlegt. Wir finden in jedem Fall dieselben Spektralfarben in der Reihe von Rot bis Violett, denn von dem Komplex, den jeder Stern ausstrahlt, ist dies der einzige Teil, den unsere Augen wahrnehmen können. Nun ist aber die Intensität in den verschiedenen Teilen des Spektrums nicht immer dieselbe, sie wechselt von Stern zu Stern. Ein blauer Stern ist immer heißer als ein roter. Tatsächlich läßt sich die Temperatur eines Sternes aus der Lage des Intensitätsmaximums bestimmen. Das ist auf Grund eines interessanten Naturgesetzes möglich, nach dem die Eigenschaften des Lichtes, das ein Körper ausstrahlt, mit Ausnahme einiger besonderer Fälle, nur von der Temperatur, aber nicht von der Zusammensetzung des Körpers abhängen. Wenn wir z. B. in eine Höhlung in einem brennenden Kohlenfeuer hineinschauen, am besten durch eine möglichst kleine Öffnung in einen rotglühenden Ofen, in dem überall dieselbe hohe Temperatur herrscht, dann können wir die Umrisse der Kohlenstücke innen nicht sehen, ebensowenig wie wir Eisen oder Porzellan erkennen, wenn sie tief im Ofen sind und die Temperatur des Feuers angenommen haben. Da Kohle, Eisen und Porzellan alle dieselbe Temperatur haben, geht von ihnen allen dieselbe Art von Strahlung aus, so daß man sie nicht voneinander unterscheiden kann. Das Licht eines Ofens, dessen Temperatur durch ein Gebläse gesteigert wird, ist nicht von derselben Art wie das eines einfachen Kohlenfeuers. Es ist weißer, weil das Maximum der Strahlen nach dem blauen Ende des Spektrums hin verschoben ist. Es sind mehr blaue Strahlen vorhanden. Könnte man eine Temperatur von 6000° C erreichen, dann erhielte man Licht, das die gleichen Eigenschaften wie das Tageslicht haben würde, denn so hoch ist ungefähr die Temperatur der Sonne. Einige Sterne sind noch heißer. Bei ihnen sind die blauen Strahlen im Verhältnis noch intensiver. So kann man die Temperatur eines Sternes aus der Art seines Spektrums bestimmen, d. h. aus der Verteilung der Energie auf die verschiedenen Wellenlängen. Dies hat zur Voraussetzung, daß man im

Laboratorium bestimmt, wie sich das Spektrum mit steigender Temperatur verändert. Da man jedoch die Sterntemperaturen im Laboratorium nicht erzeugen kann, so enthalten die Messungen dieser Temperaturen eine gewisse Unsicherheit. Man muß nämlich annehmen, daß ein Gesetz, das im Bereich der Laboratoriumserfahrung gilt, auch noch über diesen Bereich hinaus Gültigkeit hat. Beispiele für die Spektren von Sternen zeigt Tafel XX A.

Durch einen sehr einfachen Versuch kann man diesen Zusammenhang zwischen Temperatur und Eigenschaften der Strahlung zeigen. Wir entwerfen auf dem Wandschirm das Spektrum eines elektrischen Lichtbogens und schalten dann den Strom aus. Wenn die Kohlen aufhören zu glühen, und die Temperatur fällt, dann sehen wir, daß das Spektrum verschwindet, und zwar verschwindet der blaue Teil zuerst und das Rot zuletzt.

Spektralanalyse und Sterne

Eine genauere Untersuchung des Spektrums eines Sternes ermöglicht es uns, seine Zusammensetzung zu bestimmen. Zerlegt man sein Licht mit Hilfe eines Prismas, so findet man, daß sein Spektrum, abgesehen von den durch die höhere Temperatur bedingten Abweichungen, wie das Spektrum jedes anderen glühenden festen Körpers aussieht, etwa wie das Spektrum des Kohlenstabes einer Bogenlampe, aber mit einem wichtigen Unterschiede. Es fehlt im Sternspektrum eine Anzahl ganz bestimmter, meist sehr eng begrenzter Wellenlängenbereiche.

Solche Fälle der Absorption von Strahlung haben wir schon kennengelernt, als wir die Entstehung der Farben betrachteten. Der Unterschied diesen gegenüber liegt darin, daß die Lücken in den Sternspektren so außerordentlich schmal, so scharf begrenzt und — in den meisten Fällen — so zahlreich sind. Dieses besondere Verhalten lassen die auf Tafel XX A abgebildeten Spektren deutlich erkennen.

Die Erklärung hierfür ist leicht zu geben. Wir können an das Beispiel von den Stimmgabeln und den Radioempfängern, das wir schon früher benutzten, anknüpfen, nur müssen wir jetzt etwas genauer als damals auf den Vergleich eingehen, damit uns der wichtige Zusammenhang zwischen Sender und Empfänger bei den verschiedenen Strahlungsarten, bei Schall, Radiowellen und Licht, klar wird.

Der Anfang ist leicht zu verstehen. Von einer einzelnen Stimmgabel geht ein sehr reiner Ton aus; d. h. der von ihr erzeugte Schall besteht aus Luftwellen einer ganz bestimmten Frequenz. Diese Schallwellen breiten sich nach allen Richtungen aus. Sie mögen in irgendeiner Richtung auf eine Stimmgabel von genau derselben Tonhöhe treffen. Diese wird dann erregt werden. Sie fängt an zu schwingen und verbraucht hierbei natürlich Energie. Daher wird der Schall, der sich in dieser Richtung ausbreitete, geschwächt, es findet eine Absorption statt. Der aufgetretene Verlust wird durch das Schwingen der zweiten Stimmgabel nicht ausgeglichen, da deren Schallwellen sich gleichmäßig nach allen Seiten ausbreiten, so daß sie den Verlust in der ursprünglichen Richtung nicht aufwiegen können. Hierauf beruht, wie wir schon gesehen haben, das Auftreten von Absorption und die Erzeugung von Farben. Man beachte, daß Sender und Empfänger genau die gleiche Tonhöhe haben. Ebenso sendet eine Radiostation Wellen aus, die innerhalb eines ganz genau bestimmten Frequenzbereiches liegen; würde dieser Bereich nicht sorgfältig eingehalten, so wäre jeder Rundfunkverkehr unmöglich. Ein scharf auf dieselbe Frequenz eingestellter Radioempfänger wird etwas von der Energie, die von der Sendestation ausgeht, absorbieren und diese dadurch verringern. Man kann einen Radioempfänger auch dazu bringen, daß er, wenn auch nur schwach, als Sender wirkt; die Wellen, die er dabei ausstrahlt, haben dann genau dieselbe Wellenlänge wie die der Sendestation, auf die der Apparat eingestellt ist. Manche Radioempfänger lassen sich bekanntlich sehr scharf einstellen. Solche Apparate sprechen auf Wellen, die von Sendestationen mit einer bestimmten Wellenlänge ausgesandt werden, nur bei sehr sorgfältiger Abstimmung an, dann aber auch mit großer Lautstärke.

Ebenso liegt die Sache bei einem Atom, das durch Erhitzen des festen Körpers oder des Gases, dem es angehört, in Schwingungen versetzt wird. Trifft die von diesem Atom ausgehende Strahlung andere Atome, die mit der gleichen Frequenz oder richtiger gesagt mit den gleichen Frequenzen schwingen können, so wird ebenfalls ein Teil der ausgehenden Energie absorbiert werden und daher weniger Energie weitergehen. Auch hier wieder spielt die Genauigkeit der Abstimmung eine große Rolle. Ein einzelnes, von seinen Nachbarn unbeeinflusstes, Atom verhält sich wie ein guter Radiosender; die von ihm ausgehenden Schwingungen liegen in einem sehr engen Bereich. In engen Bereichen sollte man lieber sagen,

denn ein Atom kann man eher mit einer Glocke oder einer Violin-
saite als mit einer Stimmgabel vergleichen. Das Verhalten der
Stimmgabel ist außerordentlich einfach, von ihr geht kaum mehr
als eine einzige Wellenlänge aus, dagegen sendet die Glocke, Saite
und Atom gleichzeitig eine ganze Anzahl von „Tönen“ aus. Jeder
Ton ist aber ganz genau bestimmt und kann außerordentlich
scharf eingestellt werden. Diese Schärfe der Abstimmung ist für
die Atome im Gaszustande charakteristisch, denn im Gas sind die
Atome die meiste Zeit voneinander unabhängig. Zusammenstöße
kommen vor, aber die Zeit, während der die Atome so nahe bei-
sammen sind, daß sie sich gegenseitig beeinflussen können, ist nicht
lang. Die Gesamtheit der Atome, aus denen ein Gas besteht, hat
also mit einem guten Radiosender Ähnlichkeit, wenn sie Energie
emittiert, und sie ist einem guten oder „selektiven“ Radioempfänger
ähnlich, wenn sie Energie absorbiert.

Wenn nun ein Lichtstrahl, der alle Frequenzen enthält, durch
eine Menge solcher „selektiver“ Atome hindurchgeht, dann wird
eine Anzahl von Frequenzen scharf absorbiert oder ausgesiebt
werden, und im Spektrum des Strahles tritt eine Reihe von engen
Lücken auf, wie sie Tafel XX A zeigt. Wenn ein Gas dagegen
Energie ausstrahlt, wird es gerade diejenigen Frequenzen, die es
absorbiert, aussenden; dies zeigt Tafel XX B.

Das Spektrum der Sonne

Das Sonnenspektrum zeigt eine ungeheure Anzahl solcher
scharf begrenzter Lücken oder „Linien“, wie man sie gewöhnlich
nennt. Steigert man die Temperatur verschiedener Stoffe, wie
Eisen, Calcium, Wasserstoff usw., durch Erhitzen soweit, daß sie zu
glühenden Gasen werden, dann kann man beobachten, daß jeder
dieser Körper Licht aussendet, das aus einer Reihe scharf definierter
Frequenzen besteht. Außerdem findet man, daß diese Frequenzen
Linie für Linie mit dunklen Linien des Sonnenspektrums überein-
stimmen. Hieraus folgt der zwingende Schluß, daß das Licht der
Sonne irgendwo durch Wolken dieser Atome hindurchgegangen
sein muß, und bei Stoffen wie Eisen, Calcium und den meisten
anderen Elementen muß dieser Vorgang auf der Sonne selbst statt-
gefunden haben, denn auf dem weiteren Wege des Lichtes ist die
Temperatur nirgends so hoch, daß diese Stoffe als glühende Gase
auftreten könnten. Wenn man daher die Spektren der Sonne, der

Sterne oder anderer glühender Körper analysiert und sie mit den Spektren vergleicht, die man von den verschiedenen Elementen im Laboratorium erzeugt, indem man sie in den Zustand glühender Gase versetzt, kann man sofort sagen, ob ein bestimmtes Element in den Himmelskörpern ebenso wie auf der Erde vorkommt oder nicht. Solche Untersuchungen wurden zuerst in großem Maßstabe von Huggins, Lockyer und ihren Zeitgenossen ausgeführt. Von da an bis auf den heutigen Tag hat ihre Bedeutung und das Interesse an ihnen dauernd zugenommen, weil man, wie sich herausgestellt hat, aus ihnen noch viel mehr ersehen kann, als einfach die Übereinstimmungen in der Lage bestimmter Frequenzen in beiden Arten von Spektren. Die für jedes Element charakteristischen Frequenzen hängen nämlich auch noch von dem Zustand des betreffenden Elementes ab; seinen Atomen können ein oder mehrere Elektronen fehlen, und mit jeder dadurch bedingten Änderung des Atomzustandes ändern sich auch die ausgesandten Frequenzen. Der Atomzustand des Elementes hängt nun aber wieder von der Temperatur und der Dichte des Gases ab. Daher gibt die Untersuchung der Sternspektren ebensogut über den physikalischen Zustand eines Sternes wie über seine Zusammensetzung Auskunft.

Dieselben Elemente, die man auf der Erde findet, finden sich auch in den Sternen. In einem bemerkenswerten Fall wurde sogar das Vorhandensein eines Elementes durch Lockyers Untersuchung des Sonnenspektrums nachgewiesen, ehe man dieses Element im Laboratorium kannte. Man beobachtete nämlich eine Anzahl scharfer Linien, die zu keinem der damals bekannten Elemente gehörten, und Lockyer schloß daraus auf das Vorhandensein einer neuen Substanz, die er „Helium“ nannte. Bald danach wurde dieser Stoff aus Kleveit und anderen Mineralien isoliert. Heute ist er wohlbekannt als das beste Gas zur Füllung der lenkbaren Luftschiffe; das Helium ist nämlich fast ebensoviel leichter als die Luft wie der Wasserstoff, und außerdem ist es nicht brennbar. Auch im Laboratorium ist dieser Stoff außerordentlich interessant, denn die Heliumatome sind mit den Alphateilchen identisch, die von den radioaktiven Körpern ausgesandt werden. Wegen der ungeheuren Geschwindigkeit, mit der ein solches Alphateilchen ausgeschleudert wird, kann es in das Innere anderer Atome gelangen und selbst bis zu deren Kern vordringen, den es manchmal sogar zertrümmert, von dem es jedoch meistens abgelenkt wird. Beob-

achtungen auf diesem Gebiete bildeten die Grundlage der modernen Atomtheorien; aus ihnen entwickelten Rutherford und seine Mitarbeiter die Lehre von der Struktur der Atomkerne und alles, was damit zusammenhängt.

Jetzt bleibt aber noch eine sehr wichtige Frage, auf die wir eine Antwort finden müssen; wir haben angenommen, daß von der Sonne eine Strahlung ausgeht, die ein kontinuierliches Spektrum liefern würde, wenn sie nicht auf dem Wege zu uns durch eine Gasschicht gekommen wäre, die die Sonne umhüllt und die verschiedenen Elemente in Dampfform enthält. Diese Dämpfe müssen selbst leuchten und Licht von derselben Frequenz ausstrahlen, die sie absorbieren, denn so kommen nach unserer Theorie die schwarzen Linien im Spektrum zustande. Woher kommt nun die ursprüngliche Strahlung selbst? Sie muß so stark sein, daß ihre Absorption an der Oberfläche der Sonne sich trotz des Leuchtens dieser Oberfläche bemerkbar macht, und ihre Energie muß lückenlos über das ganze Spektrum verteilt und nicht auf eine bestimmte Anzahl von Frequenzen beschränkt sein.

Wir haben schon gehört, daß voneinander unabhängige Atome genau ihre eigenen Frequenzen ausstrahlen würden; aber die Atome sind niemals ganz unabhängig. Sie sind dauernd in Bewegung, erleiden daher fortwährend Zusammenstöße miteinander und verbringen so einen Bruchteil ihrer Zeit in engster Nachbarschaft mit anderen Atomen. Während dieser Zeit senden sie nicht genau ihre eigenen Frequenzen aus. Werden die Atome nun so dicht zusammengedrängt, daß sie während eines großen Teiles ihrer Zeit sich gegenseitig stören, dann breiten sich die Frequenzbereiche aus, bis sie sich treffen und überschneiden, und so das ganze Spektrum ausgestrahlt wird. Im folgenden soll hierfür ein rohes Beispiel gegeben werden. Wenn man eine Anzahl von Stimmgabeln, jede auf ihrem Ständer, irgendwie in eine Kiste wirft und letztere dann kräftig schüttelt, erklingt ein Gemisch verschiedener Töne, das nicht mehr auf die bestimmten Töne der Stimmgabeln beschränkt bleibt. Im Inneren der Sonne sind die Atome nun dicht zusammengedrängt und werden von der extrem hohen Temperatur außerordentlich heftig durcheinander geschüttelt; so kann man sich die Kontinuität ihres Spektrums erklären. Die etwas kältere Atmosphäre, die die Sonne umgibt, entfernt dann gewisse Frequenzen, und so entstehen die Linien des Sonnenspektrums.

Wir können diese Verhältnisse in einem Laboratoriumsversuch nachahmen und bauen uns dazu einen kleinen elektrischen Ofen. Wir lassen durch die Wände eines Gehäuses aus gebranntem Ton zwei Kohlestäbe hindurchgehen, wie die Abb. 95 zeigt, und schicken durch diese einen elektrischen Strom. Die Kohlestäbe sollen sich zunächst gegenseitig berühren und werden dann, wie üblich, ein wenig auseinandergezogen. In den so entstehenden Lichtbogen bringen wir etwas metallisches Natrium. Dann erhebt sich eine Wolke intensiv gelben Dampfes, die oben aus dem Ofen abzieht;

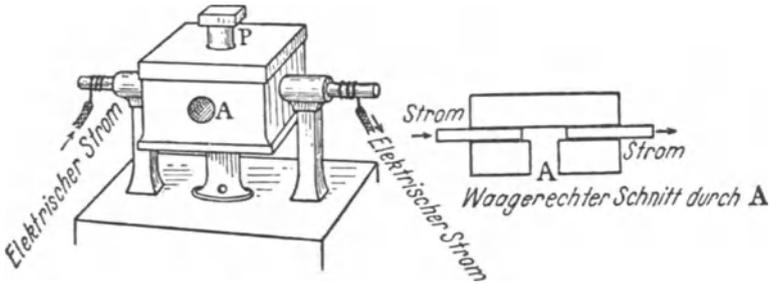


Abb. 95. Der kleine Ofen besteht aus feuerfestem Material. In seinem Inneren wird von dem elektrischen Strom ein Lichtbogen gebildet. Durch die Öffnung oben läßt man Metalle hineinfallen, deren Dämpfe nach oben abziehen können, während das Licht, das bei *A* herauskommt, in ein Spektrum von hellen Linien aufgelöst werden kann. Wenn man den Deckel *P* aufsetzt, dann füllt der Dampf den Tunnel, der bei *A* endet; das Licht muß durch ihn hindurchgehen, und in dem Spektrum erscheinen jetzt dunkle Linien da, wo vorher die hellen Linien waren.

durch eine enge tunnelartige Öffnung *A* an der Seite des Ofens fällt Licht von dem Bogen durch eine Linse auf ein Prisma und bildet auf einem Wandschirm ein Spektrum. In diesem ist die helle gelbe Natriumlinie außerordentlich deutlich zu sehen. Jetzt schließen wir die Öffnung über dem Lichtbogen, sodaß das glühende Gas nur noch durch die zweite Öffnung entweichen kann. Infolgedessen muß das Licht jetzt einige Zentimeter in dem glühenden Dampfe zurücklegen, ehe es auf die Linse trifft. Die helle gelbe Linie ist jetzt verschwunden, und an ihrer Stelle erscheint eine schwarze Linie; der Dampf hat aus dem Licht des elektrischen Bogens gerade die Frequenzen, die er selbst aussendet, absorbiert.

Während einer totalen Sonnenfinsternis kann man sehen, daß die glühenden Dämpfe an der Oberfläche der Sonne weit über die verdunkelte Scheibe hinausreichen. Ihr Spektrum besteht, wie zu erwarten, aus einer Reihe heller Linien.

Es ist sehr wichtig und bemerkenswert, daß ein leuchtendes Gas, das ein „helles Linienspektrum“ aussendet, auch ein kontinuierliches Spektrum geben kann, wenn das Gas in genügender Menge vorhanden ist. Neben den Eigenfrequenzen der Atome des Gases ist stets ein gewisser Anteil an allgemeiner Strahlung vorhanden. Die Eigenfrequenzen werden nun bei ihrem Durchgang durch das Gas stärker als die allgemeine Strahlung absorbiert, sie werden daher nur von den äußeren Schichten ausgestrahlt, während die allgemeine Strahlung aus größerer Tiefe kommt. Bei genügend dicken Gasschichten wird hierdurch schließlich bewirkt, daß beide Arten von Strahlung gleich stark werden und ein kontinuierliches Spektrum auftritt. Dieses Spektrum hängt nur noch von der Temperatur und nicht mehr von der Art des strahlenden Körpers ab. Das kontinuierliche Spektrum eines Himmelskörpers beweist also nicht, daß wir einen festen Körper vor uns haben, sondern nur, daß er aus einer genügend großen Menge von Materie besteht.

Die Bewegungen der Sterne zur Erde hin und von ihr fort

Durch eine sorgfältige Untersuchung anderer Art kann man die Geschwindigkeit bestimmen, mit der ein Stern sich zur Erde hin oder von ihr fortbewegt. Nehmen wir z. B. an, der Stern bewege sich auf die Erde zu. Er drückt dann gewissermaßen die Wellen vor sich zusammen, so daß sie sämtlich verkürzt, also stärker brechbar werden. Ähnlich drückt ein auf uns zukommendes Auto die Schallwellen vor sich zusammen, und zieht sie auseinander, wenn es sich von uns entfernt. Täglich fahren viele Autos an uns vorüber, und die Tonhöhe aller von ihnen ausgehenden Geräusche sinkt in dem Augenblick, in dem sie an uns vorbeikommen. Bei einem Wagen, der mit einer Geschwindigkeit von 40 km in der Stunde fährt, werden alle Geräusche etwa um einen halben Ton tiefer. Wenn ein Stern ein kontinuierliches Spektrum ohne Linien aussenden würde, wäre es nicht möglich, diese Verschiebung festzustellen, denn die Wellenlängen, die das äußerste Violett bildeten, würden etwas verkürzt und daher unsichtbar werden, während am roten Ende Wellenlängen, die sonst zu lang waren, um sichtbar zu sein, infolge der auftretenden Verkürzung das rote Ende des sichtbaren Spektrums bilden würden. Alle Wellenlängen, die sichtbaren und die unsichtbaren, wären zwar etwas verkürzt, aber die sichtbaren Farben würden unseren Augen wie sonst erscheinen. Man

könnte also keinen Unterschied wahrnehmen. Aber die Linien eines Spektrums verschieben sich in beobachtbarer Weise. Dieser Effekt wurde zuerst von Doppler beschrieben. Die Lage der Linien im Spektrum läßt sich mit großer Genauigkeit messen, und da sie eine Verschiebung erleiden, die der Geschwindigkeit, mit welcher sich der Stern auf die Erde zu- oder fortbewegt, proportional ist, kann man die relative Bewegung der beiden Körper in der Richtung ihrer Verbindungslinie bestimmen. Ein Beispiel dieses Effektes zeigt Tafel XX C. Die beiden Spektren in dieser Abbildung sind von dem Licht des östlichen und westlichen Randes der Sonne erzeugt worden. In dem einen Falle bewegt sich die Lichtquelle infolge der Umdrehung der Sonne auf die Erde zu, im anderen Falle von ihr weg. Beide Male ist das Licht durch die Erdatmosphäre hindurchgegangen, wir finden deshalb im Spektrum auch Linien, die von der Absorption des Sauerstoffs der Luft herrühren. Die beiden Spektren sind so aneinander gelegt, daß die letzteren Linien sich gegenseitig verlängern. Es liegen also stets gleiche Wellenlängen untereinander. Man sieht dann, daß andere Linien etwas gegeneinander verschoben sind. Dies sind Linien, die durch die Absorption in der Sonnenatmosphäre entstanden sind. Die Verschiebung ist durch den Doppler-Effekt verursacht, denn alle Linien vom Ostrande der Sonne, der sich der Erde nähert, sind nach dem kurzwelligeren Ende verschoben. Dagegen sind die Linien des Westrandes, da hier die Bewegung von der Erde fort gerichtet ist, langwelliger geworden. Das gleichzeitige Auftreten der Sauerstofflinien ermöglicht einen genauen Vergleich der Spektren. Im Spektrum eines Sternes sind solche Verschiebungen nicht so leicht wie in diesem Fall zu messen. Man beachte noch, daß der Betrag der Verschiebung für alle Sonnenlinien gleich groß ist.

Diese Messungen sind unabhängig von der Entfernung, daher kann man merkwürdigerweise das Nahen oder sich Entfernen von Sternen mit großer Genauigkeit messen, obgleich die meisten dieser Sterne so weit von uns entfernt sind, daß sie sich am Himmel nicht zu bewegen scheinen. Auf diese Weise hat man z. B. gefunden, daß die weit entfernten Sternnebel, oder wenigstens diejenigen unter ihnen, deren Lichtstärke für solche Versuche ausreicht, sich von uns fortbewegen, und zwar um so schneller, je weiter sie von uns entfernt sind; daher stammt die moderne Vorstellung von einem sich ausdehnenden Universum. Viele Sterne nähern und entfernen sich abwechselnd in gleichbleibenden Zeit-

abständen. Es ist sicher, daß alle diese Sterne einen dunklen Begleiter haben müssen, den sie umkreisen. Aber derartige Betrachtungen führen uns zu weit in das Studium der Astronomie. Dasselbe gilt für die Untersuchungen über die Helligkeit der verschiedenen Sterne und die Folgerungen, zu denen man kommt, wenn man die Kenntnisse über Helligkeit und Temperatur kombiniert. Es muß uns genügen zu sehen, welche Fülle von Kenntnissen wir aus der Zusammensetzung des von allen Teilen des Weltalls zu uns kommenden Lichtes gewinnen können.

Wir wollen hier einen Augenblick verweilen, um eine allgemein bekannte Eigentümlichkeit des Sternenlichtes zu betrachten, nämlich das Funkeln. Diese Erscheinung entsteht durch Ungleichmäßigkeit in der Atmosphäre. Sie ist dem Flimmern von Gegenständen analog, die man durch die heiße Luft über einem Feuer im Freien oder über einer Kerze in einem Zimmer sieht. Der Weg, auf dem die Strahlen eines Sternes den Beobachter erreichen, unterliegt kleinen Schwankungen. Mitunter wird das Licht für einen Augenblick teilweise abgeschnitten, weil sich in der zwischenliegenden Luftschicht eine Stelle befindet, deren Brechungsvermögen von dem der Umgebung abweicht, wodurch die Strahlen seitlich abgelenkt werden. Auch Farben treten auf, da die roten Strahlen eines Sternes das Auge auf einem Wege erreichen, der von dem der blauen Strahlen ein wenig abweicht. So ist es möglich, daß der störende Teil der Luftschicht die eine Farbe abschneidet und die andere nicht. Wenn man einen Stern direkt anblickt, sieht man keine Farben. Sie sind aber leicht zu beobachten, wenn man das Bild des Sternes in einem Spiegel, den man dauernd leicht hin und her bewegt, betrachtet. Der Lichtpunkt wird dann zu einer Kette von farbigen Juwelen auseinandergezogen. Eine genauere Untersuchung mit Hilfe eines Spektroskopes zeigt, daß das Spektrum eines Sternes dauernd von dunklen Flecken durchzogen wird, die vom roten zum blauen oder vom blauen zum roten Ende gehen, je nachdem, ob der Stern im Westen oder im Osten steht. Dies ist leicht zu erklären. Da die Erde bei ihrer Umdrehung die Atmosphäre mit sich führt, bewegt sich der Teil der Luft, der die Störung hervorruft, ebenfalls von Westen nach Osten. Bei einem Stern im Westen unterbricht dieser Teil zuerst die roten Strahlen und dann die blauen, denn die roten Strahlen eines Sternes im Westen kommen zu dem Auge auf einem Wege, der weniger gekrümmt ist und mehr nach Westen liegt als der Weg der blauen Strahlen.

Unsichtbare Strahlung

Wir wollen jetzt die früher gemachte Einschränkung fallen lassen und auch diejenigen Wellenlängen betrachten, die man nicht direkt mit dem Auge sehen kann, und zwar zunächst diejenigen, die sich unmittelbar an beide Enden des sichtbaren Spektrums anschließen. Wir sind hierbei vollständig auf Instrumente angewiesen, aber es gibt glücklicherweise verschiedene Methoden, mit denen man diese unsichtbare Strahlung feststellen kann. Unter ihnen sind die photographischen Methoden die wichtigsten; man kann Platten für verschiedene Strahlungen empfindlich machen, ja, die gewöhnlichen photographischen Platten, wie sie schon viele Jahre hindurch benutzt werden, sind nicht nur für die kürzeren Wellenlängen des sichtbaren Spektrums besonders empfindlich, sondern auch noch für Strahlen, die sich an das violette Ende anschließen, die sogenannten ultravioletten Strahlen. Schwieriger ist es, Platten für die längeren Wellen empfindlich zu machen, aber auch dies ist in den letzten Jahren gelungen. Die hierbei erzielten Ergebnisse haben gerade in allerletzter Zeit großes Interesse erregt. Eines von ihnen erläutert ausgezeichnet einige Tatsachen, die wir weiter vorne geschildert haben.

Wir hatten gehört, daß die roten Strahlen von den Atomen und Molekülen der Atmosphäre und von dem Staub und dem Dampf in der Luft weniger abgelenkt werden als die blauen Strahlen am anderen Ende des Spektrums. Mit einer rotempfindlichen photographischen Platte und besonders mit einer Platte, deren Empfindlichkeit sich auch noch auf das ultrarote Gebiet erstreckt, kann man daher Bilder aufnehmen, die in der Kamera von Gegenständen entworfen werden, die für das menschliche Auge verschleiert oder ganz unsichtbar sind. Man kann z. B. viele Kilometer weit entfernte Berge damit photographieren. Vor kurzem wurden in der Times herrliche Bilder weit entfernter Landschaften veröffentlicht, die z. B. über den englischen Kanal oder die Irische See hinweg aufgenommen waren, und zwar in einem Zeitpunkt, in dem man mit dem Auge von diesen Landschaften überhaupt nichts sehen konnte. Die Photographien der Tafel XXI, die ich der Ilford Co. verdanke, sind schöne Beispiele für diese Anwendungsart der ultraroten Strahlen. Die photographische Kamera hat vor dem Auge natürlich immer dadurch einen großen Vorsprung, daß die Stärke der Eindrücke mit der Zeit zunimmt, auch für die Astronomie ist dies

ein großer Vorteil. Daher sind Filter, die man zur Beseitigung der kurzen Wellen benutzt, nicht deswegen unbrauchbar, weil sie die roten und ultraroten Strahlen ebenfalls in gewissem Maße schwächen, man braucht ja nur die Belichtungszeit entsprechend zu erhöhen. Die Länge dieser Wellen ist natürlich immer noch klein genug, um feine Einzelheiten wiederzugeben.

Auf diesen Photographien erscheinen grüne Pflanzen immer sehr hell. Wir wollen uns daran erinnern, daß vom Chlorophyll das tiefe Rot ja nicht absorbiert wird; infolgedessen übt das von Blättern und Gräsern reflektierte Licht eine sehr starke Wirkung auf diese besonders präparierten Platten aus. Bäume, Sträucher und Gräser sehen daher aus, als ob sie mit Schnee bedeckt wären.

Für den Physiker sind die ultraroten Strahlen besonders deshalb interessant, weil sie in stärkerem Maße von den Schwingungen der Moleküle als von denen der Atome abhängen, und eine nähere Beschäftigung mit ihnen daher zur Aufklärung der Struktur der Moleküle beiträgt.

Unter dem Ausdruck „ultraviolette Strahlen“ versteht man gewöhnlich denjenigen Teil der unsichtbaren Sonnenstrahlung, der die Erdoberfläche erreicht und aus Wellen besteht, die kürzer als die der sichtbaren Strahlen sind. In dem Licht, das die Sonne verläßt, müssen auch noch kürzere Wellenlängen vorhanden sein, die jedoch von unserer Atmosphäre absorbiert werden. Die Grenze liegt bei etwa 0,00003 cm, keine Strahlung kürzerer Wellenlänge kommt bis zu uns auf die Oberfläche der Erde herab. Durch die Absorption dieser Strahlung wird die Atmosphäre erwärmt, so daß in 150 km Höhe über der Erdoberfläche und darüber hinaus die Luft viel wärmer als an der Oberfläche selbst ist. Diese Luftschicht unterscheidet sich von der Luft unten so sehr, daß, wie wir schon gehört haben, Radio- und Schallwellen von ihr stark reflektiert werden.

Fluoreszenz

Von den ultravioletten Strahlen gehen viele energische Wirkungen aus, die wir zum Teil erst gerade anfangen zu würdigen. Eine der merkwürdigsten Erscheinungen ist, daß sie gewisse Körper zur Fluoreszenz anregen; diese Tatsache ist schon seit langer Zeit bekannt und auch verwertet worden. Lassen wir das Spektrum eines Lichtbogens auf einen mit Chininsulfat bestrichenen

Schirm fallen, dann leuchtet dieser noch weit über das violette Ende des Spektrums hinaus farbig auf; das Ultraviolett ist sichtbar geworden. Die Erscheinung wird noch viel deutlicher, wenn wir Linsen und Prismen aus Quarz anstatt aus Glas benutzen. Quarz läßt nämlich ultraviolette Strahlen viel besser hindurch als Glas, das für die kürzesten Wellenlängen sogar völlig undurchlässig ist. Wir dürfen nicht vergessen, daß Glas für uns nur deshalb ein durchsichtiger Körper ist, weil es keine sichtbaren Strahlen absorbiert. Wären unsere Augen so eingerichtet, daß wir statt dieser das Ultraviolett oder vielleicht das Ultrarot sehen könnten, dann würden wir den Ausdruck „durchsichtig“ in dem einen Falle vom Glas auf den Quarz und im anderen Falle auf das Steinsalz übertragen. Wir wollen nun die Farbe näher betrachten, die auf dem präparierten Schirm überall da aufleuchtet, wo er von den ultravioletten Strahlen getroffen wird. Sie hat fast im ganzen Bereich einen bläulichen Ton. Dieses Blau ist nun aber keineswegs eine neue Farbe. Bei der Untersuchung mit dem Spektroskop findet man eine Wellenlänge des sichtbaren Spektrums. Das Ultraviolett ist also nicht selbst sichtbar geworden, sondern es hat eine sichtbare Farbe hervorgerufen. Strahlung einer bestimmten Wellenlänge ist verschwunden, und an ihrer Stelle sichtbares Licht erschienen. Dies scheint zunächst unseren Erfahrungen mit Wellenbewegungen zu widersprechen; wir haben immer angenommen, daß weder Reflexion noch Brechung noch Beugung die Wellenlänge ändern kann, und wir haben auch bei all unseren bisherigen Erfahrungen keinen einzigen derartigen Fall kennengelernt. In Wirklichkeit ist hier kein Widerspruch vorhanden; unsere Annahmen sind vollständig richtig und mit der Erfahrung im Einklang. Es handelt sich nämlich hier um keine gewöhnliche Brechung oder Reflexion, sondern um eine ganz ungewöhnliche Erscheinung. Wir haben hier in der Tat das erste Anzeichen dafür, daß unsere Wellentheorie unvollständig ist, und nicht dafür, daß sie falsch ist. Wir brauchen keine einzige unserer Behauptungen zurückzunehmen. Wir finden nur, daß es eben auch Erscheinungen gibt, die wir mit der Wellentheorie nicht erfassen können. Das wird uns in der Folge noch klarer werden.

Man kann im Laboratorium ein sehr interessantes Experiment machen, das gut zeigt, bis zu welchem Punkt wir bei unseren bisherigen Betrachtungen gekommen sind. Wir lassen durch einen Schlitz in einem Vorhang Sonnenlicht in einen verdunkelten Raum

fallen und entwerfen mit Hilfe von Linsen und Prismen ein Spektrum auf der Oberfläche eines Gefäßes mit Wasser, in dem etwas Eosin oder sonst ein stark fluoreszierender Farbstoff aufgelöst ist (Tafel I C). Die roten und gelben Strahlen gehen quer durch das Wasser hindurch und treffen den Boden des Gefäßes, alles andere Licht aber wird an der Oberfläche festgehalten. Die ursprünglichen Farben sind verschwunden, und da, wo das Grün und Blau liegen müßte, erscheint ein dunkelgrüner Streifen, der wie ein auf dem Wasserschwimmendes Band aussieht; er reicht weit über das blaue Ende des Spektrums hinaus, wie man leicht feststellen kann, wenn man ein Stück weißes Papier in den Farbstreifen hineinhält. Bei genügend engem Spalt sind die Hauptlinien des Sonnenspektrums deutlich zu sehen, einige von ihnen liegen auch im ultraviolettten Teil des Spektrums; dies zeigt uns wieder, daß kein prinzipieller Unterschied zwischen sichtbarer und unsichtbarer Strahlung besteht. Die blauen und grünen Strahlen des Spektrums dringen nur wenig in die Flüssigkeit ein, ihre Umwandlung in Strahlen von größerer Wellenlänge ist schon in kurzer Entfernung von der Oberfläche beendet. Die roten Strahlen dagegen gehen fast ohne Schwächung hindurch. Man beachte, daß in der ganzen Erscheinung eine deutliche Verschiebung auf der Stufenleiter der Wellenlängen auftritt; die Farben, die verschwinden, werden durch andere ersetzt, die alle näher am roten Ende des Spektrums liegen, vgl. auch Tafel XIV C.

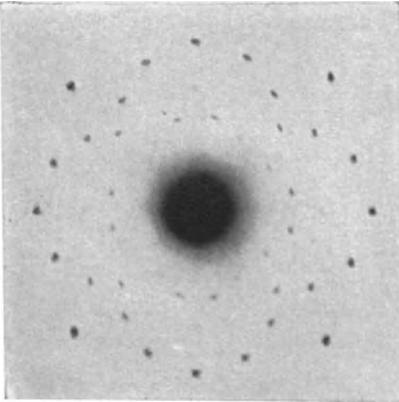
Die Fluoreszenz ist durchaus keine seltene Erscheinung, man kann sie sehr leicht beobachten, wenn man sich Maschinenöl in einem Glasgefäß ansieht; der bläuliche Schimmer, der an der Oberfläche auftritt, rührt von der Fluoreszenz des Öles her.

Wie wir schon gehört haben, absorbiert die Luft die ganz kurzen Wellen außerordentlich stark, so daß das Sonnenlicht nur Wellen oberhalb einer bestimmten Grenze enthält. Es gibt aber viele Methoden, um Wellen zu erzeugen, die noch kürzer sind als diejenigen, die von der Sonne zu uns kommen, und man hat gefunden, daß die fluoreszierende Wirkung mit abnehmender Wellenlänge sehr stark zunimmt. Eine Quecksilberdampf Lampe ist eine sehr kräftige Lichtquelle für kurze Wellenlängen; alle diese Strahlen können ins Freie austreten, wenn man das Licht in einem Quarzrohr erzeugt. Es ist für die Augen gefährlich, in solch ein Rohr hineinzublicken. Ebenso schädlich würde auch das Sonnenlicht sein, wenn die kurzen Wellenlängen nicht von der Atmosphäre

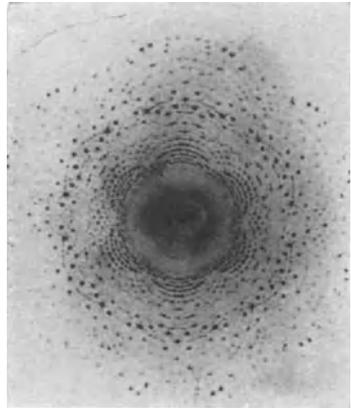
Tafel XXI



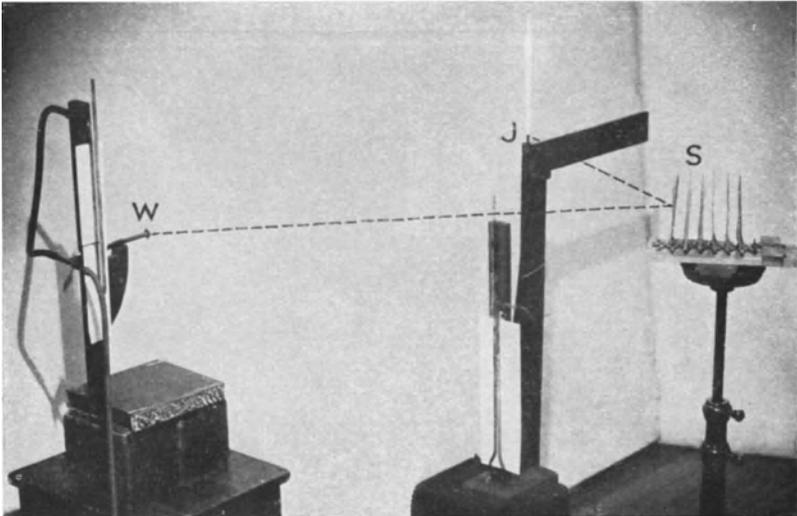
Diese Photographie verdanke ich der Ilford Co. Das untere Bild ist mit einem Ultravioletfilter, das obere unter normalen Bedingungen aufgenommen. Man beachte, daß der blaue Himmel schwarz aussieht, da er keine ultraroten Strahlen streut. Andererseits reflektieren Gras und Bäume viel Ultrarot und sehen daher weiß aus. Das ganze Verhältnis der Farbtöne ist unnatürlich, weil es sich nicht um dieselben Strahlen handelt, auf die das Auge reagiert. Man beachte auch, wie außerordentlich gut Einzelheiten, besonders in der Entfernung, herauskommen. (S. 173.)



A. Röntgenbeugungsbild von Steinsalz. (S. 185.)



B. Ein Röntgenbeugungsbild von Kaliophyllit. (S. 185.) Baunister.



C. Eine Photographie der Apparatur, die Lord Rayleigh benutzte, und die auf den S. 193, 194 beschrieben ist. Die Pfeife befindet sich bei *W*, die Schar von Schirmen bei *S* und die leuchtende Gasflamme bei *J*. Die punktierte Linie zeigt ungefähr den Weg der Schallwellen, die die Flamme beeinflussen. Das Bild zeigt, wie die Flamme aussieht, wenn kein Schall ertönt, oder wenn die Schirme (die man in dem Bild von der Seite sieht) so stehen, daß ihre Reflexionen sich nicht gegenseitig verstärken. Die Düse bei *J* hat eine solche Form, daß die Flamme auf Schallwellen, die direkt von *W* nach *J* gehen, nicht anspricht. Wenn die Schirme die richtigen Abstände haben, dann verbreitert sich die Flamme und schrumpft zu einem Bruchteil ihrer gewöhnlichen Höhe.

absorbiert würden. Unter der Quecksilberlampe leuchten viele Substanzen hell auf, die im Tageslicht keinerlei solchen Effekt zeigen. Ganz verschiedene Farben können auf diese Weise erregt werden und außerordentlich schöne Farbwirkungen auftreten. Es gibt Filter, die alles sichtbare Licht zurückhalten und nur das Ultraviolett durchlassen; es sieht dann so aus, als ob die fluoreszierenden Substanzen selbstleuchtend wären. Blickt man durch ein solches Filter auf die Lichtquelle hin, so bleibt diese unsichtbar — in einiger Entfernung von ihr sind die Strahlen so schwach, daß sie in einer kurzen Zeitspanne noch nicht schädlich wirken. Hierbei beobachtet man eine merkwürdige Erscheinung; das ganze Zimmer scheint von einem leuchtenden Schimmer erfüllt zu sein. Dies rührt von der Fluoreszenz her, die von den ultravioletten Strahlen in der Augenflüssigkeit erregt wird. Es handelt sich hierbei also um eine rein subjektive Erscheinung. Der Schimmer verschwindet sofort, wenn wir durch einen Schirm die ultravioletten Strahlen von unserem Auge fernhalten.

Die Entladung von Elektrizität durch ultraviolettes Licht

Das ultraviolette Licht besitzt noch eine andere bemerkenswerte Eigenschaft. Trifft es auf gewisse, negativ aufgeladene Metalle, so werden diese entladen; besonders gilt dies für die Alkalimetalle und für Zink. Die Erscheinung läßt sich leicht demonstrieren. Durch eine Elektrisiermaschine erzeugt man zwischen zwei Kugeln dauernd elektrische Funken. Eine dieser Kugeln bestehe aus reinem, frisch amalgamiertem Zink. Sie liegt am negativen Pol der Maschine, während die andere Kugel geerdet ist. Die Maschine lädt dann die so vorgerichtete Kugel so lange mit negativer Elektrizität auf, bis das Isoliervermögen der Luft zwischen den Kugeln überschritten wird; hierauf erfolgt der Ausgleich, indem ein Funken von einer Kugel zur anderen übergeht.

Sobald man jetzt von irgendeiner Quelle her ultraviolettes Licht auf die Zinkkugel fallen läßt, hört der Funkenübergang auf. Die negative Elektrizität kann sich nämlich nicht mehr auf der Kugel ansammeln, weil sie durch das ultraviolette Licht ebenso schnell entladen wird, wie sie zugeführt wird. Hält man aber eine Glasscheibe zwischen die Lichtquelle und die Kugel, setzen die Funken sofort wieder ein, denn das Glas hält ja die ultravioletten Strahlen zurück, obgleich es das sichtbare Licht durchläßt. Es ist sehr merk-

würdig, wie die Funken plötzlich aufhören und wiedererscheinen, wenn man die Glasscheibe abwechselnd in den Weg der Strahlen hält und wieder fortnimmt.

Durch diese und ähnliche Versuche bekommt man den Eindruck, daß eine um so stärkere Wirkung eintritt, je kürzer die Wellenlänge wird; man wird dadurch angeregt, die Versuche mit möglichst kurzen Wellen zu wiederholen. Einige der auftretenden Erscheinungen werden dann vielleicht deutlicher und stärker sein, so daß man leichter zu einem allgemeinen Verständnis dieser Dinge kommt. Dies ist auch wirklich der Fall. Wir wollen hierzu die Röntgenstrahlen benutzen. Zunächst müssen wir uns aber davon überzeugen, daß man diese mit demselben Recht wie das Licht selbst als Ätherwellen betrachten kann; dann wollen wir ihre Eigenschaften untersuchen, und wir werden bei ihnen, wenn auch stärker ausgeprägt, dieselben Erscheinungen wie beim ultravioletten Licht wiederfinden. Wir werden dabei auch, bis zu einem gewissen Grade wenigstens, sehen, daß die Wellentheorie keinen Platz für einige der auffallendsten Erscheinungen, die man beobachtet, bietet, und daß man daher diese Theorie auf irgendeinem Wege, den man allerdings noch nicht recht kennt, vervollständigen muß. Wir kommen damit zu Fragen, die unseren Untersuchungen einen ganz besonderen Reiz verleihen, weil sie noch ungelöst sind.

Die Röntgenstrahlen

Im Jahre 1895 entdeckte Röntgen eine neue Art von Strahlen, die er X-Strahlen nannte, da ihr Wesen so völlig unbekannt war. Ihr Verhältnis zu anderen bekannten Strahlungsarten wurde sofort Gegenstand eifriger Untersuchungen. Wenige Wochen nach seiner Entdeckung hatte Röntgen die wichtigsten Eigenschaften der Strahlung festgestellt, ohne jedoch über ihr Wesen zu einer endgültigen Entscheidung zu kommen. Erst im Jahre 1912 zeigte Laue, daß die Strahlen wie gewöhnliches Licht gebeugt werden konnten, und seit dieser Zeit sind sie mit Sicherheit als Ätherwellen von außerordentlich kurzer Wellenlänge erkannt worden. Als Beugungsgitter benutzte Laue einen Kristall; hierüber werden wir gleich Näheres hören. Die Röntgenstrahlen sind also ihrem Wesen nach mit dem Licht identisch. In ihren Eigenschaften unterscheiden sie sich aber sehr stark von ihm. Dieser Umstand ist für die Erweiterung unserer Kenntnisse außerordentlich günstig. Das Studium der kürzeren Wellen ist besonders deshalb so interessant, weil es uns zeigt, daß die Wellentheorie, obgleich sie durch alle unsere bisherigen Beobachtungen bestätigt wurde, unvollständig ist. Sie ist nämlich in der bisherigen Form nicht imstande, eine ganze Anzahl neu entdeckter Tatsachen zu erklären. Eine allgemeinere Theorie fängt langsam an, Gestalt anzunehmen. Dadurch entsteht eine Situation von besonderem Interesse.

Die Röntgenstrahlen entstehen gewöhnlich durch elektrische Funken oder Entladungen in einem Raume, in dem der Druck der Luft oder anderer Gase sehr stark erniedrigt ist. Der elektrische Funken war jahrhundertlang Gegenstand eifriger Untersuchungen. Größere Erfolge wurden aber erst erzielt, als man die Entladungen in einem Rohr oder Kolben aus Glas, aus dem man die Luft mehr oder weniger vollständig ausgepumpt hatte, übergehen ließ. Mit abnehmendem Druck wurde der Funken länger, breiter und lebhafter gefärbt. Als Crookes die Luftpumpen so weit verbessert hatte, daß Drucke von der Größenordnung von einem Millionstel des gewöhnlichen Atmosphären-

druckes erreicht werden konnten, trat eine Erscheinung auf, die man bis dahin nicht beobachtet hatte. Die negative Elektrode wurde zum Ausgangspunkt einer Strahlung, die geradlinig durch das Rohr hindurchging und mechanische Wirkungen ausüben konnte. Sie erzeugte Wärme, wenn sie auf die gegenüberliegende Glaswand oder auf irgendeinen ihr in den Weg gestellten Körper auftraf, sie erregte in Glas und in vielen Mineralien lebhaftes Fluoreszenz, ein leichtes Windrädchen drehte sich, wenn die Strahlen auf einen Flügel desselben trafen, und, eine besonders wichtige Eigenschaft, der Strahl wurde durch einen Magneten,

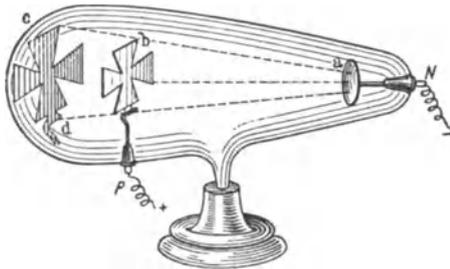


Abb. 96. Die negative Elektrode, die Kathode, befindet sich rechts bei a. Die Strahlen bewegen sich geradlinig durch die Röhre und erregen Fluoreszenz an der gegenüberliegenden Wand. Ein Kreuz aus Metall b wirft einen scharfen Schatten.

den man in die Nähe brachte, abgelenkt. Dies war eine außerordentlich bedeutsame Beobachtung, da man daraus folgerte, daß der Strahl aus schnell sich bewegenden elektrisch geladenen Teilchen bestände; ein solcher Strahl ist nämlich einem elektrischen Strome gleichwertig und muß daher von einem Magneten ab-

gelenkt werden. Die Abb. 96 bis 99 zeigen Bilder der Crookes'schen Versuche nach den Originaldruckstöcken des Berichtes über eine Vorlesung, die er im April des Jahres 1879 in der Royal Institution hielt. Crookes glaubte, daß der Strom aus irgendwelchen Molekeln bestände. Er nahm an, seine Luftpumpe habe einen solchen Grad von Vollkommenheit erreicht, daß die verhältnismäßig wenigen Moleküle, die in dem Rohr geblieben seien, Entfernungen von der Länge des Rohres zurücklegen könnten, ohne mit anderen Molekülen zusammenzustoßen. Er meinte, ein solcher Zustand sei von dem eines gewöhnlichen Gases ebenso verschieden, wie der Zustand des Gases von dem einer Flüssigkeit. Am Ende eines Berichtes an die Royal Society aus demselben Jahre (1879) schrieb er in einer unklaren aber interessanten Vorahnung der Zukunft folgende Sätze, die sich zum Teil bewahrheiten sollten.

„Die Erscheinungen in diesen luftleeren Röhren erschließen der Physik eine neue Welt; — eine Welt, in der die Materie in einem

vierten Zustand existiert, in der die Korpuskulartheorie des Lichtes gilt und in der das Licht sich nicht immer geradlinig fortpflanzt. Wir werden aber niemals in diese Welt eintreten können, sondern

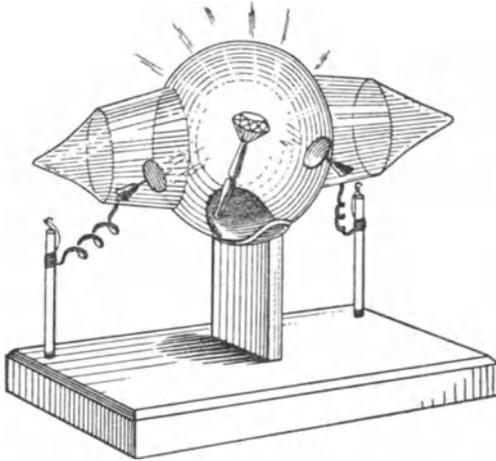


Abb. 97. Die Strahlen erregen den Diamanten, der in der Mitte der Röhre angebracht ist, zu lebhafter Fluoreszenz.

wir müssen uns damit zufrieden geben, sie von außen zu beobachten und mit ihr zu experimentieren.“

J. J. Thomson, Wiechert und andere zeigten, daß der Strom aus Teilchen, die negative elektrische Ladungen trugen, bestand,

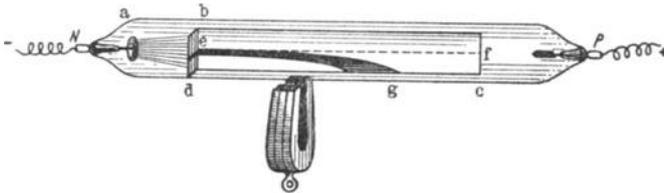


Abb. 98. Die Kathodenstrahlen werden durch einen Schlitz vor der Kathode a zu einem engen Bündel eingeschnürt. Die Ablenkung der Strahlen durch einen hufeisenförmigen Magneten ist dann leicht zu beobachten.

und daß diese Träger noch viel kleiner als selbst die Wasserstoffatome waren; man nannte sie „Elektronen“. Man fand, daß man solche Elektronen von Atomen jeder Art abtrennen konnte, wenn man Induktionsspulen oder andere elektrische Apparate anwandte, die genügend elektrische Energie lieferten, und es zeigte

sich auch, daß die Elektronen jeden Ursprungs einander gleich waren. Offenbar war das Elektron ein Grundbestandteil der Materie. Den Elektronenstrom nannte man Kathodenstrahl, weil er von dem negativen Pol, der Kathode, ausging.

Bei seinen Versuchen mit Kathodenstrahlen beobachtete Röntgen nun, daß in der Nähe befindliche photographische Platten verschleiert wurden, obgleich gar kein Licht auf sie fallen konnte. Er fand, daß dies durch eine Strahlung verursacht wurde,

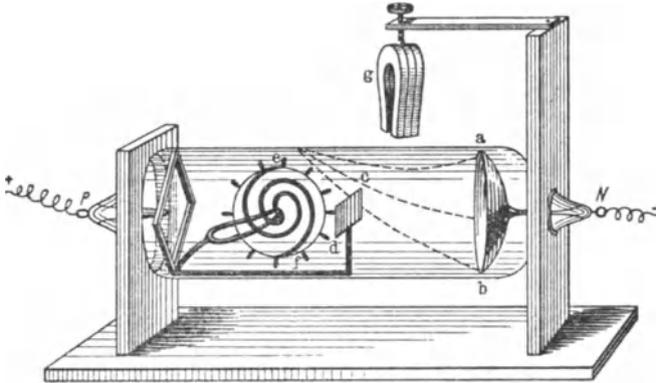


Abb. 99. Die Kathode *a* hat die Form einer Schale; man hat gefunden, daß die Strahlen dadurch auf einen Punkt konzentriert werden. Gewöhnlich ist ein Schirm *c* im Weg der Strahlen und läßt sie nicht durch, aber der Magnet *g* lenkt die Strahlen so ab, daß sie über den oberen Rand des Schirmes hinweggehen und die Flügel des kleinen Rades treffen, das sich daraufhin schnell dreht. Wenn die Lage des Magneten umgekehrt wird, gehen die Strahlen unter *c* hindurch und das Rädchen dreht sich im entgegengesetzten Sinne.

die von seiner Glasröhre ausging, und zwar besonders von der Stelle, wo die Kathodenstrahlen die Wand trafen. Er begann darauf sofort, die allgemeinen Eigenschaften dieser neuen Strahlen, auf die er zufällig gestoßen war, zu untersuchen.

Sie hatten viel Ähnlichkeiten mit dem Licht. Sie bewegten sich in geraden Linien, warfen scharfe Schatten, durchquerten den Raum anscheinend ohne irgendwelchen Transport von Materie, wirkten auf die photographische Platte, erregten Fluoreszenz in gewissen Körpern und konnten, wie ultraviolettes Licht, einen elektrisch aufgeladenen Konduktor entladen. In anderer Hinsicht schienen sich die Strahlen vom Licht zu unterscheiden. Spiegel, Prismen und Linsen, die doch das Licht ablenken, hatten keinerlei solche Wirkung auf Röntgenstrahlen, die gewöhnlichen Gitter

beugten sie nicht ab und weder Doppelbrechung noch Polarisation konnten mit Hilfe von Kristallen erzeugt werden. Außerdem besaßen sie eine außerordentliche Fähigkeit, Materie zu durchdringen. Nichts schien sie völlig aufzuhalten, obgleich sie von allen Körpern in gewissem Grade absorbiert wurden; schwere Atome absorbierten sie stärker als leichte. Hierauf beruht ihre Fähigkeit, das Innere undurchsichtiger Körper sichtbar zu machen, eine Fähigkeit, auf die man bald aufmerksam wurde; Knochen werfen zum Beispiel viel tiefere Schatten als das sie umgebende Fleisch.

Hätte man mit Sicherheit zeigen können, daß die Röntgenstrahlen die gleiche Geschwindigkeit wie das Licht besaßen, dann wäre ihre Identität gesichert gewesen; der Versuch wurde gemacht, aber er war zu schwierig und mißlang. Dagegen wies Barkla nach, daß ein Bündel von Röntgenstrahlen „Seiten“ haben, das heißt, polarisiert sein konnte, wenn die Strahlen unter bestimmten Bedingungen erzeugt wurden, aber die Polarisation zeigte in gewisser Hinsicht andere Eigenschaften, als man sie vom Lichte her kannte. Der Lauesche Versuch beendigte die Streitfrage, denn er bewies, daß man eine Beugung der Röntgenstrahlen hervorrufen konnte, die der Beugung des Lichtes in jeder Hinsicht entsprach; wenn die Beugungserscheinungen genügten, um die Wellentheorie des Lichtes zu beweisen, mußten sie auch für eine Wellentheorie der Röntgenstrahlen dieselbe Beweiskraft besitzen.

Der Versuch von Laue

Wir wollen jetzt die Einzelheiten von Laues berühmtem Versuch, der so weitreichende Folgen hatte, betrachten. Die experimentelle Anordnung war denkbar einfach. Ein feines Bündel von Röntgenstrahlen durchsetzte einen Kristall, hinter dem eine photographische Platte (Abb. 100) aufgestellt war, auf die der Strahl nach dem Durchgang durch den Kristall treffen sollte. Laue nahm an, daß außer dem direkten Bild, das durch das Auftreffen des Strahles auf die Platte verursacht wurde, noch weitere abgebeugte Bilder auftreten würden. Er begründete diese Voraussage mit einer Betrachtung ähnlicher Erscheinungen dieser Art, die, wie wir gesehen haben, beim Licht auftreten. Wenn ein Zug von Ätherwellen auf eine Platte mit eingeritzten parallelen Linien fällt, oder durch eine solche Platte hindurchgeht, wird ein Teil der Energie in ganz be-

stimmter Weise abgelenkt, wodurch eine Reihe abgebeugter Strahlen entsteht. Dasselbe tritt auf, wenn ein Lichtstrahl eine Luftschicht durchsetzt, in der feine Teilchen von gleicher Größe suspendiert sind. Diese Erscheinungen haben wir schon früher betrachtet und in verschiedenen Beispielen kennengelernt. In allen diesen Fällen darf die Wellenlänge sich nicht zu sehr von dem gleichmäßigen Linienabstand oder dem Durchmesser der Teilchen unterscheiden. Laue nahm an, daß die früheren Versuche, Beugungserscheinungen an Röntgenstrahlen aufzufinden, fehlgeschlagen waren, weil diese Bedingung nicht genügend beachtet

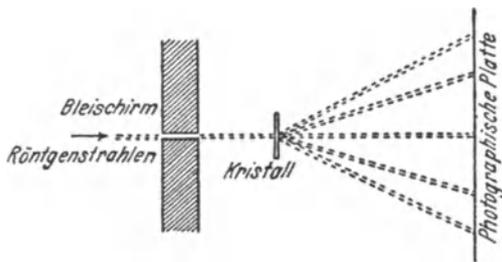


Abb. 100. Die Röntgenstrahlen gehen durch eine enge Öffnung in einem Bleischirm und treffen auf den Kristall, wie die Abbildung zeigt. Auf der photographischen Platte bildet sich ein Lauesches Beugungsbild.

worden war. Wenn die Wellenlänge der Röntgenstrahlen, wie er mit gutem Grunde annahm, vieltausendmal kürzer war als die des Lichtes, war es sinnlos, mit den üblichen Gittern Beugungserscheinungen zu suchen. Man mußte Gitter benutzen, bei denen auch die Abstände der Linien tausendmal kleiner waren, als sonst üblich. Niemand kann aber derartige Gitter, bei denen auf einen Zentimeter Millionen paralleler Striche kommen müßten, herstellen.

Es bestand aber die Möglichkeit, daß die Natur das Werkzeug schon gebildet hatte, das in der Werkstatt nicht angefertigt werden konnte. Die Kristalle konnten für die Röntgenstrahlen die geeigneten Gitter sein; man nahm ja an, daß ihre Atome regelmäßig angeordnet wären, und die Abstände zwischen ihnen mußten, so weit man berechnen konnte, dieselbe Größenordnung wie die Wellenlänge der Röntgenstrahlen haben. Diese Voraussage erwies sich als vollkommen richtig, als Laues Mitarbeiter, Friedrich und Knipping, im Jahre 1912 den Versuch aus-

führten, der von vollem Erfolge begleitet war. Ein kompliziertes, aber symmetrisches Muster von Punkten erschien auf der photographischen Platte, das zwar nicht so wie die Beugungsbilder des Lichtes aussah, aber offensichtlich denselben Charakter hatte. Man fand bald heraus, daß jeder Kristall sein besonderes Muster lieferte, und daß durch den Versuch nicht nur ein neues Verfahren zur Untersuchung der Röntgenstrahlen, sondern auch eine neue Methode zur Untersuchung von Kristallstrukturen gewonnen war. Beispiele dieser Bilder zeigen die Tafeln XXII A und B, man vergleiche sie mit Tafel XXIII C.

Zum besseren Verständnis wollen wir, wenigstens kurz, die Einzelheiten des Versuches und seine Bedeutung besprechen. Wir haben schon beim Kalkspat einige Eigenschaften der Kristallstrukturen kennengelernt, aber es ist besser, daß wir uns noch einmal mit diesem Gebiet beschäftigen und es dabei von einem allgemeineren Gesichtspunkt aus betrachten.

Das, was uns an einem Kristall am meisten auffällt und für ihn so charakteristisch ist, ist die regelmäßige äußere Form, die polierte Glätte seiner Flächen und die Schärfe seiner Kanten. Wenn wir Kristalle derselben Zusammensetzung vergleichen, finden wir, daß die Winkel zwischen den Flächen von Kristall zu Kristall immer die gleichen bleiben, während die Größe der einzelnen Flächen ganz verschieden sein kann, oder, um es mit anderen Worten auszudrücken, die Flächen der einzelnen Stücke können verschieden stark entwickelt sein. Es liegt nahe, hieraus den Schluß zu ziehen, daß dies die Folge einer regelmäßigen Struktur ist, bei der sich eine bestimmte Einheit, die zu klein ist, um direkt gesehen werden zu können, ständig wiederholt. Als einfache Analogie kann man ein Stück Stoff nehmen, der wie üblich so gewoben ist, daß Kette und Schuß rechtwinklig zueinander sind. Beim Zerreißen eines solchen Stoffes bilden sich stets Stücke mit lauter rechtwinkligen Ecken, aber die Stücke sind nicht immer quadratisch. Ein solcher Stoff besitzt zwei senkrecht aufeinander stehende Hauptrichtungen, und alle Risse verlaufen rechtwinklig zu einer dieser Richtungen. Wenn die beiden Richtungen in allen Eigenschaften, die man prüfen könnte, genau gleich wären, wenn sie z. B. gleich leicht reißen würden, und wenn die ausgefaserten Ränder an allen Seiten dieselben wären, müßten Kette und Schuß identisch sein; sie müßten aus denselben Fäden bestehen und die gleichen Abstände haben. Wir könnten dann mit Recht sagen, daß dem Material ein „qua-

dratisches“ Muster zugrunde liege. Das würde auch dann noch der Fall sein, wenn Kette und Schuß nicht einfach, sondern zusammengesetzt wären, wenn sie z. B. beide aus farbigen Fäden in verschiedenen Abständen bestehen würden. Solange das Schema, nach dem sie sich wiederholen, bei beiden dasselbe ist, kann man immer noch von einem quadratischen Muster reden. Ein Beispiel hierfür bilden die schottischen Stoffe.

Das Beispiel des gewebten Stoffes genügt nicht, um all die verschiedenen Möglichkeiten, die bei Kristallstrukturen auftreten können, darzustellen; denn Kette und Schuß müssen stets einen

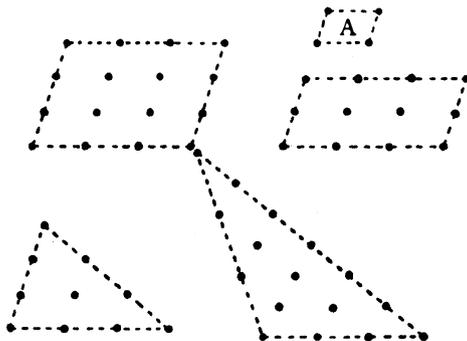


Abb. 101. Die Einheit einer ebenen Anordnung ist in dem Umriss von *A* enthalten. Durch Wiederholung dieser Einheit können verschiedene Formen gebildet werden, von denen einige abgebildet sind. Die Neigung der Kanten zueinander ist auf einige bestimmte Winkel beschränkt.

Winkel von 90° miteinander bilden; aber es weist deutlich auf die wichtige Tatsache hin, daß bei jeder Struktur, die aus einer räumlichen Wiederholung besteht, die Winkel des Ganzen immer dieselben bleiben müssen, während für die Größe der einzelnen Flächen keine ähnliche Einschränkung besteht. Die Einheit, die sich nach allen Richtungen hin wiederholt, bestimmt die Größe des Winkels. Wenn z. B. die Einheit einer ebenen Anordnung die Form der kleinen Einheit in Abb. 101 hat, dann kann das Ganze, wie die Abbildung zeigt, verschiedene Formen annehmen. Die Kanten müssen nicht immer dieselben Winkel bilden wie bei *A*, aber es treten doch immer nur einige ganz bestimmte Winkel auf.

So können auch in einem festen Kristall verschiedene Flächen entwickelt sein, bei denen aber die Winkel, die sie miteinander bilden, stets die gleiche Größe haben. Gerade dies muß man

erwarten, wenn der Kristall aus regelmäßig in allen Richtungen aufeinander folgenden Einheiten aufgebaut wäre, und da die Tatsachen in diesem Falle vollständig mit den Erwartungen übereinstimmen, schließen wir, daß die Vorstellungen, die wir uns von der Struktur der Kristalle gebildet haben, richtig sind.

Was geschieht nun, wenn ein Zug von Ätherwellen auf einen solchen Kristall trifft? Man kann sich jeden Kristall aus einer Anzahl von Schichten gebildet vorstellen, die in regelmäßigen Ab-

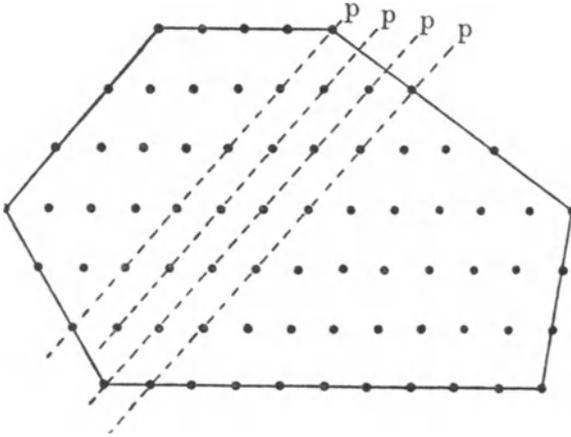


Abb. 102. Die Punkte in der Abbildung können auf verschiedene Weise zu Reihen angeordnet werden.

ständen aufeinander folgen, ebenso wie man sich im zweidimensionalen Falle jede regelmäßige Anordnung von Punkten als eine Schar von Linien vorstellen kann, die gleiche Abstände voneinander haben. Ebenso wie im zweidimensionalen Fall diese Linien in verschiedenen Richtungen verlaufen können, wie Abb. 102 zeigt, so kann man sich auch jeden Kristall auf unendlich viele verschiedene Arten in parallele Schichten zerlegt denken.

Es ist zweckmäßig, das Problem der Beugung der Röntgenstrahlen schrittweise zu behandeln; zunächst betrachtet man die Streuung an einer einzelnen Einheit, dann an einer Schicht von Einheiten, und schließlich am ganzen Kristall, der aus einer Reihe solcher Schichten besteht.

Die Einheit im Kristall, der sogenannte Elementarkörper, besteht aus einer gewissen Anzahl von Atomen, die in bestimmter

Weise angeordnet sind. Zusammensetzung und Anordnung sind von Kristall zu Kristall verschieden. Wenn ein Wellenzug diese Einheit trifft, streut jedes Atom in ihr und kann als Zentrum einer Schar von Wellen betrachtet werden, die sich in Kugelform ausbreiten. In kurzer Entfernung verschmelzen die Wellen miteinander, und es bleibt schließlich nur eine kugelförmige Welle übrig, deren Zentrum irgenwo innerhalb der Einheit liegt. Diese Welle hat aber eine Besonderheit, sie ist nämlich nicht in allen Richtungen

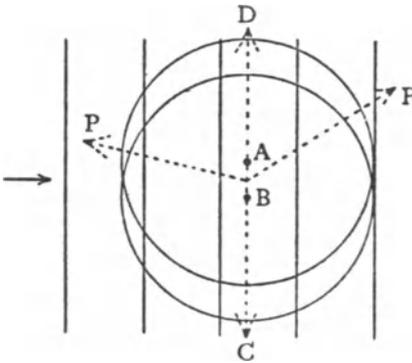


Abb. 103. Wellen, die durch die senkrechten Linien dargestellt werden, bewegen sich auf die beiden Atome *A* und *B* zu, die einen kleinen Teil der Energie der Wellen streuen. Der Abstand der beiden Atome beträgt eine halbe Wellenlänge. Die kugelförmigen Wellen, die von beiden Atomen ausgehen, vernichten sich gegenseitig in den Richtungen *ABC* und *BAD*, weil hier ein Wellenberg der einen Welle immer mit einem Wellental der anderen zusammenfällt. Aber in allen anderen Richtungen, wie z. B. in den Richtungen der Pfeile *P*, wird Energie gestreut. Dies ist eigentlich ein Spezialfall der Abb. 73.

anderen Richtung aber ist die Interferenz unvollständig. Die Wellen verstärken sich z. B. in gewissem Grade in den durch die Pfeile *P* bezeichneten Richtungen, und zwar um so mehr, je weiter die Richtung *P* von *C* oder *D* abweicht.

In diesem Falle hat die durch das Zusammenwirken der gestreuten Wellen gebildete Welle zwar Kugelform, aber die Intensität ist nicht in allen Richtungen die gleiche. An den Stellen *C* und *D* verschwindet die Welle, wie die Abbildung zeigt, vollständig.

gleich stark. Um ein einfaches Beispiel zu nehmen, wollen wir uns vorstellen, daß die Einheit aus zwei Atomen, *A* und *B*, bestehe, deren Abstand eine halbe Wellenlänge beträgt (Abb. 103). Die ankommenden Wellen treffen beide Atome gleichzeitig, und die Wellen, die von *A* und *B* gestreut werden, haben gleiche Phase. In der Richtung *ABC* wirken die beiden Wellenscharen stets gegeneinander. Jeder Wellenberg der einen trifft auf ein Tal der anderen. In dieser Richtung vernichten sich die beiden gegenseitig. Dasselbe gilt für die entgegengesetzte Richtung *BAD*. In jeder

Andere Anordnungen der Atome führen zu einer anderen Intensitätsverteilung auf der Kugelfläche, und je komplizierter die Anordnung ist, um so komplizierter ist auch die Verteilung.

Diese Kompliziertheit ist aber auf unsere Ableitung ohne Einfluß. Ich erwähne sie nur, um dem Bild mehr Realität zu verleihen. Der wesentliche Punkt ist, daß die Einheiten eines Kristalles sich alle gleich verhalten, wie sie auch zusammengesetzt und angeordnet sind. Wir brauchen im Augenblick nicht zu berücksichtigen, daß die Energie auf der Oberfläche der gestreuten Welle

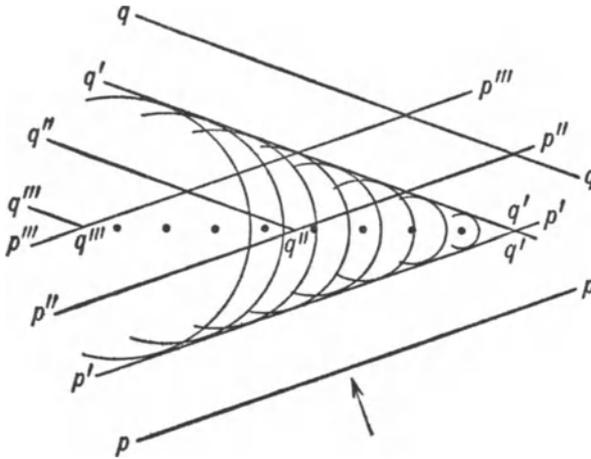


Abb. 104. Die Wellen pp , $p'p'$... streichen über eine Reihe von Punkten hinweg, wobei Streuung in gewissem Maße auftritt. Die Hauptmenge der Energie geht weiter, aber ein Bruchteil von ihr wird in Form der Wellen qq , $q'q'$... reflektiert.

ungleichmäßig verteilt ist, und wollen nur behalten, daß die Wellen letzten Endes kugelförmig sind, und daß man sich vorstellen kann, sie gingen von regelmäßig angeordneten Punkten aus, die die Lagen der einzelnen Einheiten darstellen.

Wir wollen jetzt betrachten, wie die in einer Schicht vereinigten Einheiten zusammenwirken. Wir nehmen an, daß die Punkte in der Abb. 104 die Lage einiger Struktureinheiten in einer Ebene, die rechtwinklig zur Zeichenebene steht, darstellen. Die geraden Linien pp , $p'p'$ usw. zeigen eine Schar von Wellen im Schnitt. Jedesmal, wenn eine Welle über die Punkte hinwegstreicht, breiten sich nacheinander von jedem Punkt neue Wellen aus, und diese bilden zusammen einen reflektierten Wellenzug. Dies ist eigentlich

nur ein neues Beispiel für die Anwendung des Prinzips von Huygens. Wir haben einen Fall einfacher Reflexion vor uns, der sich von der Reflexion an einem Spiegel nur dadurch unterscheidet, daß in der reflektierten Welle nur ein Teil der ursprünglichen Energie enthalten ist. Man weiß aus vielen Versuchen, daß dieser Teil im Fall einer einzelnen Schicht außerordentlich klein ist; die Röntgenstrahlen gehen oft über Millionen solcher Schichten hinweg, ehe ihre Energie völlig verbraucht ist.

Eine analoge Erscheinung kann man häufig beim Schall beobachten. An einem eisernen Geländer kann eine richtige Reflexion

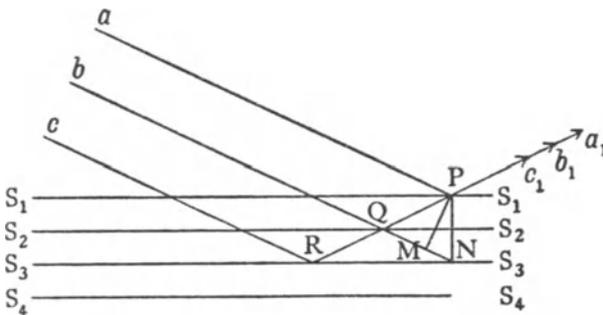


Abb. 105. Das Bild zeigt die Reflexion eines Wellenzuges an einer Reihe von Schichten, die gleiche Abstände voneinander haben, und von denen jede einen kleinen Bruchteil der Energie der ankommenden Wellen reflektieren kann.

erfolgen, obgleich die Hauptmenge der Energie hindurchgeht. Man hört solche Reflexionen z. B., wenn man in einem Auto an dem Geländer entlang fährt.

Man beachte, daß es unwesentlich ist, ob die Einheiten und die Punkte, durch die sie in Abb. 104 ersetzt werden, gleiche Abstände haben, solange man nur die Wirkung einer einzelnen Schicht betrachtet. Auch die Eisenstangen eines Geländers brauchen nicht regelmäßig angeordnet zu sein, um ein Echo zu erzeugen, und auch von einer Hecke kann man ein Echo erhalten. Die Regelmäßigkeit wird erst dann wichtig, wenn wir die Möglichkeit der Reflexion an verschiedenen Ebenen innerhalb eines Kristalles betrachten.

In der Abb. 105 sind mehrere solcher Schichten durch die Linien $S_1 S_2 S_3$ usw. im Querschnitt dargestellt, und zwar als ausgezogene Linien und nicht als Reihen von Punkten, weil es gleichgültig ist, wo die Einheiten — oder die sie repräsentierenden Punkte — innerhalb jeder Schicht liegen. Der Einfachheit halber geben wir

auch die Richtung, in der die Wellen fortschreiten, nur durch gerade Linien an, statt die Wellen selbst zu zeichnen. aPa_1 stellt also den eben besprochenen Fall der Reflexion an einer einzelnen Schicht dar. Außer der durch aPa_1 dargestellten treten noch weitere Reflexionen auf, wie sie z. B. durch bQb_1 , ferner durch cRc_1 usw. dargestellt sind. Die Größenverhältnisse der Zeichnung sind in bestimmten Richtungen stark übertrieben, um den Gedankengang besser verständlich zu machen. In Wirklichkeit sind die Abstände zwischen den einzelnen Schichten im Verhältnis zu der Breite des Strahlenbündels winzig klein. Jeder Strahl, etwa bQb_1 , entspricht einem Wellenzuge, der so breit ist, daß die verschiedenen reflektierten Wellen sich seitlich überlagern.

Die durch bQb_1 dargestellte Schar reflektierter Wellen muß einen längeren Weg als die Schar aPa_1 zurücklegen, ehe sie wieder zum Vorschein kommt und sich mit der letzteren vereinigt. Wenn wir die Lote PM und PN fallen, sehen wir, daß dieser Wegunterschied gleich MN ist.

Die Schar cRc_1 wieder bleibt hinter bQb_1 um ebensoviel zurück, wie diese hinter aPa_1 zurückbleibt, da die Schichten in gleichmäßigen Abständen aufeinanderfolgen. Es folgen dann noch weitere Reflexionen in immer gleichen Abständen. Die von dem Kristall reflektierte Welle ist die Summe all dieser Scharen. Diese Summation kann durch die Abb. 106 erläutert werden. Hier sind die Kurven, die den reflektierten Wellenzügen entsprechen, übereinander gezeichnet. Jeder Wellenzug ist um den Betrag MN hinter dem vorhergehenden Wellenzug zurückgeblieben. Alle diese Wellen müssen nun addiert werden, z. B. müssen wir längs der senkrechten Linie in Abb. 106 die Strecken Oa, Ob, Oc usw. addieren, wobei wir die Längen der über den waagerechten Linien liegenden Strecken positiv, und die unter ihnen negativ rechnen müssen. Ihre Summe wird gewöhnlich Null sein, weil die Strecken mit ebenso großer Wahrscheinlichkeit über wie unter dieser Linie liegen werden, und unter den Millionen von ihnen werden alle möglichen Längen bis zum Maximum hin vorhanden sein. Dies bedeutet, daß kein reflektierter Strahl auftritt, denn seine Bestandteile haben sich alle gegenseitig vernichtet. Nur eine Ausnahme gibt es zu dieser Regel; wenn nämlich die Wellen genau um eine, zwei, drei oder irgendeine ganze Zahl von Wellenlängen hintereinander zurückbleiben, so daß also die Kurven der Abb. 106 alle genau übereinander liegen, dann ist die Summe das Vielfache einer einzelnen Welle, und da wir

mit einer großen Zahl multiplizieren müssen, so heißt das: es erfolgt eine kräftige Reflexion. Natürlich kann die reflektierte Energie nicht größer als die ankommende sein, aber die genaue Berechnung zeigt, daß innerhalb eines sehr kleinen Bereiches beiderseits des Reflexionswinkels vollkommene Reflexion auftritt.

Um wieviel die einzelnen Wellenzüge hintereinander zurückbleiben, hängt von zwei Größen ab, nämlich von dem Winkel,

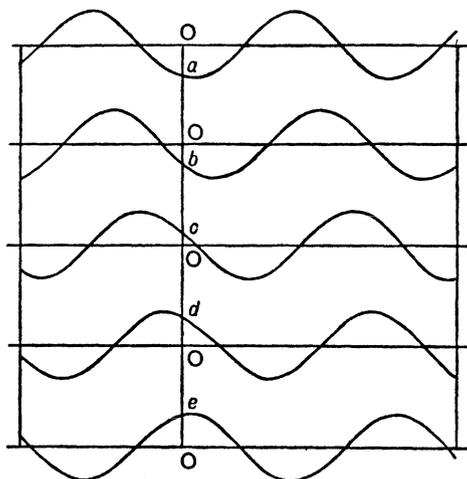
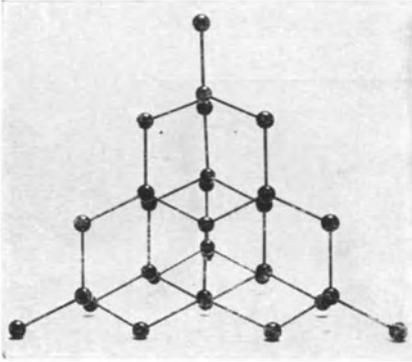


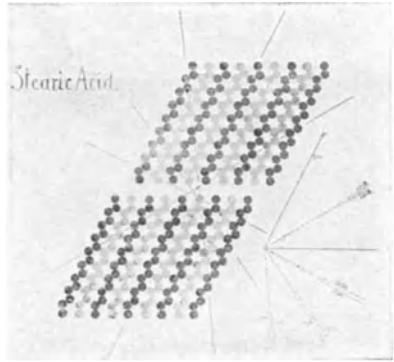
Abb. 106. Dieses Bild zeigt, daß die Wellen, die in Abb. 105 addiert werden, alle zusammen Null ergeben, wenn sie nicht genau in Phase miteinander sind. Die Größe $Oa + Ob + Oc + \dots$ ist gleich Null, weil unter den Millionen von Werten, die man addieren muß, ebenso viele ein positives wie ein negatives Vorzeichen haben. Eine Ausnahme gibt es nur dann, wenn die Reflexionen alle in Phase sind, so daß die Wellenberge einer Schar bei dieser Art von Abbildung genau über oder unter den Wellenbergen aller anderen Scharen liegen.

unter dem die Strahlen den Kristall treffen, und von dem Abstand der Schichten. Wenn die Strahlen beinahe senkrecht auf die Schichten auftreffen, ist der Wegunterschied gleich dem doppelten Abstand zweier benachbarter Schichten. Das ist zugleich der größtmögliche Wert. Je schräger die Strahlen einfallen, um so kleiner ist der Wegunterschied; bei streifendem Einfall wird er ganz klein. Ist also die Wellenlänge nicht zu groß, so muß es immer einen bestimmten Einfallswinkel geben, bei dem dieser Betrag gerade eine oder auch mehrere Wellenlängen ausmacht. Bei diesen Winkeln erfolgt dann starke Reflexion.

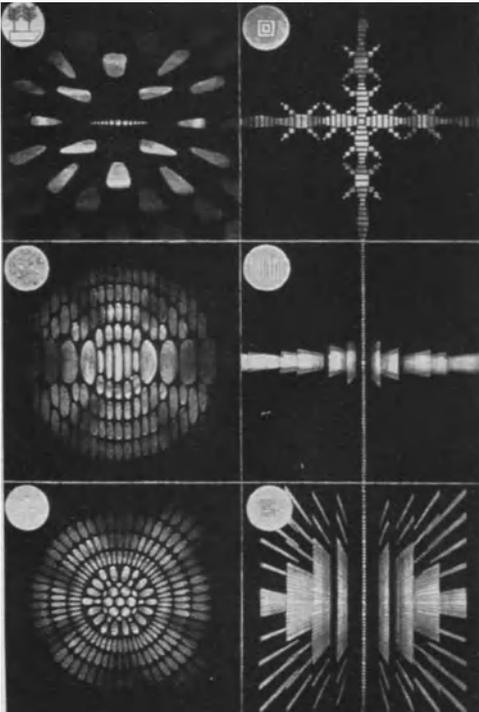
Tafel XXIII



A. Ein Modell, das die Struktur des Diamanten zeigt. Jede Kugel entspricht einem Kohlenstoffatom, aber nur in bezug auf seine Lage, nicht in bezug auf seine Form oder Größe. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier benachbarter Atome beträgt 1.54 Ångström-Einheiten. Eine Ångström-Einheit ist ein Hundertmillionstel Zentimeter. (S. 195.)

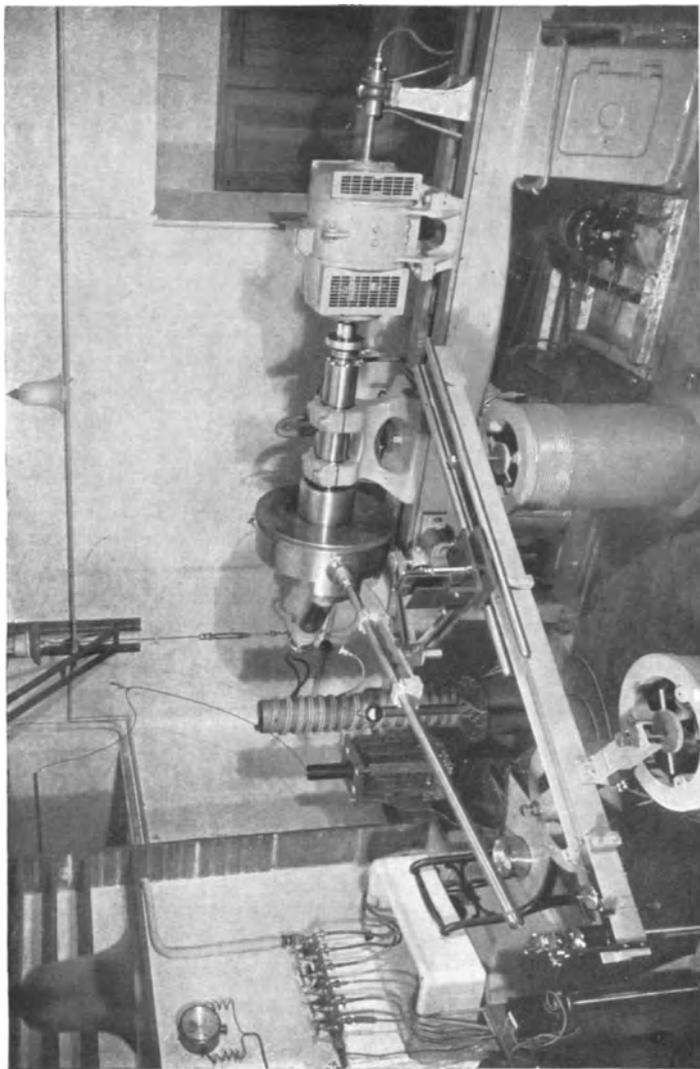


B. Die Anordnung der Moleküle in einem Kristall von Stearinsäure. Jede Zickzackkette zeigt die Kohlenstoffatome eines einzelnen Moleküls. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier benachbarter Kohlenstoffatome beträgt 1.54 Ångström-Einheiten, wie beim Diamanten. Die beiden Modelle A und B sind in verschiedenem Größenmaßstab gebaut. Die Endgruppen und die Wasserstoffatome fehlen im Modell. (Nach einem Modell von A. Müller. Davy-Faraday-Laboratorium.) (S. 195.)



C. Eine Schar von optischen Beugungsbildern, die Fraunhofer beobachtete, aus dem Buche von Guillemin, *Die Naturkräfte*. Das Licht ist in jedem Bilde durch einen Schirm gebeugt worden, der eine Reihe feiner Öffnungen enthält, nämlich durch eine Vogelfeder. Das Original ist bunt, aber die Unterschiede zwischen den einzelnen Farben sind in dieser Reproduktion nicht berücksichtigt. Man vergleiche diese optischen Spektren mit den Röntgenspektren von Tafel XXII A und B. (S. 185.)

Tafel XXIV



Eine Maschine, die Röntgenstrahlen von verhältnismäßig großer Wellenlänge für die Kristallstrukturanalyse in großer Menge erzeugt. Die Antikathode besteht aus einer Stahlmasse von 100 kg Gewicht, die 2000 Umdrehungen in der Minute macht. Mit Hilfe dieser Bewegung und mit einer Wasserkühlung wird die Wärme abgeleitet, die bei dem Aufprall der Kathodenstrahlen entsteht. Die Antikathode befindet sich innerhalb des Zylinders, der links auf dem Schlitten der Drehbank ruht. Rechts von dem Schlitten ist der Motor, der die Antikathode bewegt. Die Strahlen gehen durch das lange enge Rohr links zu dem Kristallträger in der linken unteren Ecke. Die reflektierten Strahlen werden von einer Kamera aufgefangen, die auf Schienen läuft, sie steht etwas unterhalb der Mitte des Bildes. (S. 203.)

Enthalten die Strahlen ursprünglich nur eine einzige Wellenlänge, so muß man den Kristall drehen, bis man zu dem richtigen Einfallswinkel kommt. Andererseits erhält man bei einem bestimmten Wert des Einfallswinkels eine Reflexion, wenn man ein gemischtes Strahlenbündel auf den Kristall fallen läßt, aus dem dann Strahlen von passender Wellenlänge ausgewählt und reflektiert werden, während der Rest durch den Kristall hindurchgeht. Der verstorbene Lord Rayleigh zeigte einmal bei einer Vorlesung in der Royal Institution einen entsprechenden Versuch aus der Akustik. Da alle Längen hier so sehr viel größer sind als bei Röntgenstrahlen und Kristallen, wird uns der Versuch helfen, die Reflexion der Röntgenstrahlen zu verstehen. Durch eine Pfeife von außerordentlich hohem Ton, eine sogenannte Lockpfeife, werden Schallwellen erzeugt. Diese Wellen sind nur etwa 2 bis 3 cm lang, viel kürzer als die Schallwellen bei der menschlichen Sprache, aber einige hundert Millionen mal länger als die Ätherwellen der Röntgenstrahlen. Der Ton ist so hoch, daß viele Menschen, besonders alte Leute, ihn nicht hören können. Eine Reihe viereckiger Musselinschirme von etwa 35 cm Kantenlänge steht hintereinander auf einem verstellbaren Holzrahmen, der so eingerichtet ist, daß man die Schirme in verschiedene, aber untereinander stets gleiche Abstände bringen kann. Wir wollen annehmen, daß die Schirme den Schichten der Abb. 105 entsprechen. Jeder kann einen kleinen Teil der ankommenden Schallwellen reflektieren, während er das meiste durchläßt.

Wenn man jetzt die Pfeife und die Reihe von Schirmen so aufstellt, wie es in der Photographie auf Tafel XXII C dargestellt ist, kann der Schall von den Schirmen reflektiert werden. Ob reflektierter Schall vorhanden ist, läßt sich leicht mit Hilfe einer „empfindlichen Flamme“ feststellen. Das ist eine leuchtende Gasflamme, die unter großem Druck aus einem langen engen Rohr mit einer feinen Düse herausbrennt. Der Druck wird so reguliert, daß die Flamme gerade anfangen will, zu flackern; dann verkürzt sie sich und flackert sehr auffallend, wenn sie von Schallwellen von großer Tonhöhe getroffen wird. Die schnellen Druckschwankungen in der Schallwelle sind die direkte Ursache für diese Erscheinung. Die empfindliche Flamme steht so, daß sie auf den etwa vorhandenen reflektierten Schall reagieren kann, aber gegen die direkte Wirkung der Lockpfeife abgeschirmt ist.

Wenn man nun mit Hilfe des Holzrahmens die Abstände der Schirme allmählich und kontinuierlich ändert, dann wird die Flamme abwechselnd flackern und wieder ruhig brennen. Dies ist ebenso zu erklären, wie wir es eben bei den Röntgenstrahlen getan haben. Ein Flackern der Flamme zeigt an, daß die Reflexionen an den verschiedenen Schirmen sich addieren, was immer dann auftritt, wenn die Abstände zwischen ihnen so groß sind, daß eine jede reflektierte Welle hinter der vorhergehenden gerade um eine ganze Zahl von Wellenlängen zurückbleibt.

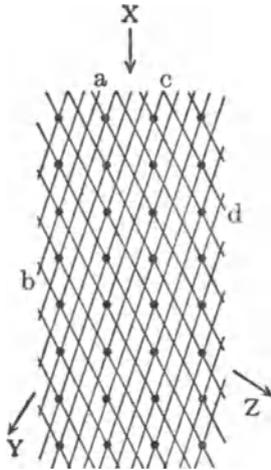


Abb. 107. Die Punkte stellen die Einheiten eines kubischen Kristalles dar. Der Maßstab ist etwa 100 000 000 : 1. X gibt die Richtung der ankommenden Röntgenstrahlen. Eine Reflexion erfolgt in der Richtung Y an den Ebenen, die parallel zu ab sind, und in der Richtung Z an den Ebenen, die parallel zu cd sind. Auch in anderen Richtungen, die nicht eingezeichnet sind, werden die Strahlen reflektiert.

Rayleigh benutzte dieses Beispiel, um die leuchtenden Farben der Kaliumchloratkristalle zu erklären. Diese Kristalle sind eigenartig aufgebaut. Sie bestehen aus verschiedenen Schichten desselben Kristallmaterials, die sich nur dadurch voneinander unterscheiden, daß die Kristallachsen in ihnen verschiedene Lagen einnehmen. Die Dicke dieser Schichten ist viele tausendmal kleiner als der Abstand der Musselinschirme, aber viele tausendmal größer als die Abstände der Schichten, in denen die Kristalleinheiten liegen; sie ist von der Größenordnung der Wellenlängen des sichtbaren Lichtes. Für alle diese drei Fälle gilt die gleiche Erklärung.

Wir müssen noch einen Punkt betrachten, ehe wir Laues Versuch richtig einschätzen können. Wir müssen uns

daran erinnern, daß es nicht nur eine einzige, sondern unendlich viele Möglichkeiten gibt, einen Kristall in parallele Schichten zu zerlegen. Wir wollen annehmen, daß Abb. 107 z. B. die Anordnung der Einheiten in einem kubischen Kristall darstellt. Die Zeichenebene entspricht dabei einer Schnittfläche durch den Kristall, denn mehr kann man in einer Ebene nicht gut darstellen. Wir können nun die Einteilung in Schichten so vornehmen, daß diese parallel zu ab verlaufen. Diese Schichten reflektieren einen Teil der Röntgenstrahlen.

Aus dem ursprünglichen Strahlenbündel, in dem verschiedene Wellenlängen enthalten sein müssen, wird ein scharf begrenzter Teil nach Y hin reflektiert. Dieser Teil besteht aus Wellen, bei denen der Wegunterschied gerade eine ganze Wellenlänge beträgt; der Wegunterschied hängt, wie schon erwähnt, von dem Abstand der Schichten und vom Einfallswinkel ab.

Man kann den Kristall aber auch in Schichten zerlegen, die die Ebene der Zeichnung in Linien parallel zu cd schneiden. Die Reflexion erfolgt dann unter einem anderen Winkel, und die reflektierten Strahlen haben eine andere Wellenlänge. Der reflektierte Strahl geht in der Richtung Z fort und erzeugt einen weiteren Punkt auf der photographischen Platte.

So erfolgen gleichzeitig viele Reflexionen, von denen sich jede auf der photographischen Platte markiert. Bei einem kubischen Kristall, bei dem die Strahlen parallel zu einer Kante auffallen, entsteht dabei auf der Platte ein Muster, das symmetrisch zu zwei sich senkrecht schneidenden Geraden ist, wie in Tafel XXII A. Bei einem hexagonalen Kristall bekommen wir dagegen eine sechsseitige Figur, wie in Tafel XXII B. Immer stimmen die beobachteten Resultate ausgezeichnet mit dem, was man nach der Berechnung erwarten sollte, überein und zeigen so deutlich, daß die zugrunde liegende Hypothese offenbar richtig ist. Wir können von den Röntgenstrahlen mit demselben Rechte wie vom Lichte selbst behaupten, daß sie Ätherwellen seien.

Die beiden Abbildungen von Laue-Diagrammen (Tafel XXII) sind sehr stark voneinander verschieden; ihr Unterschied zeigt die große Mannigfaltigkeit, die bei diesen Photographien auftritt. Jeder Kristall liefert sein eigenes, für ihn charakteristisches Bild, aus dem man in manchen Fällen die Struktur des Kristalles leicht ableiten kann. In anderen Fällen ist die Lösung dieser Aufgabe nur unter Schwierigkeiten möglich, und bei einer noch größeren Anzahl von Fällen werden diese Schwierigkeiten so groß, daß sie mit den heutigen Hilfsmitteln nicht bewältigt werden können. Nun enthält jeder feste Körper kristalline Teile, viele von ihnen sind sogar vollständig aus Kristallen zusammengesetzt, man kann daher leicht einsehen, daß sich aus der Kenntnis der Kristallstruktur oft eine Erklärung für die Eigenschaften eines Körpers ergibt. Tafel XXIII A und B geben ein oder zwei Beispiele. Hier ist aber nicht der Platz, dieses Thema ausführlich zu behandeln; das wäre auch unmöglich, da es sich so schnell entwickelt hat, daß man heut-

zutage schon eine größere Abhandlung schreiben müßte, um überhaupt eine vernünftige Übersicht über das Gebiet zu geben. Wir müssen uns mit dem Beweis zufrieden geben, daß die Röntgenstrahlen als Ätherwellen angesehen werden können.

Es ist leicht, in dieselbe Liste gewisse Strahlen mit aufzunehmen, die von radioaktiven Substanzen ausgesandt werden, nämlich die sogenannten Gammastrahlen. Kurz nach den ersten Entdeckungen, die auf Laues Versuch folgten, zeigte es sich, daß auch die Gammastrahlen von einem Steinsalzkristall in genau derselben Weise reflektiert werden konnten. Wenn die Röntgenstrahlen Ätherwellen sind, dann müssen die Gammastrahlen ebenfalls Ätherwellen sein. Sie haben ein stärkeres Durchdringungsvermögen als die Röntgenstrahlen und können durch mehrere Zentimeter dickes Blei hindurchgehen und dabei noch einen beträchtlichen Bruchteil ihrer ursprünglichen Stärke bewahren.

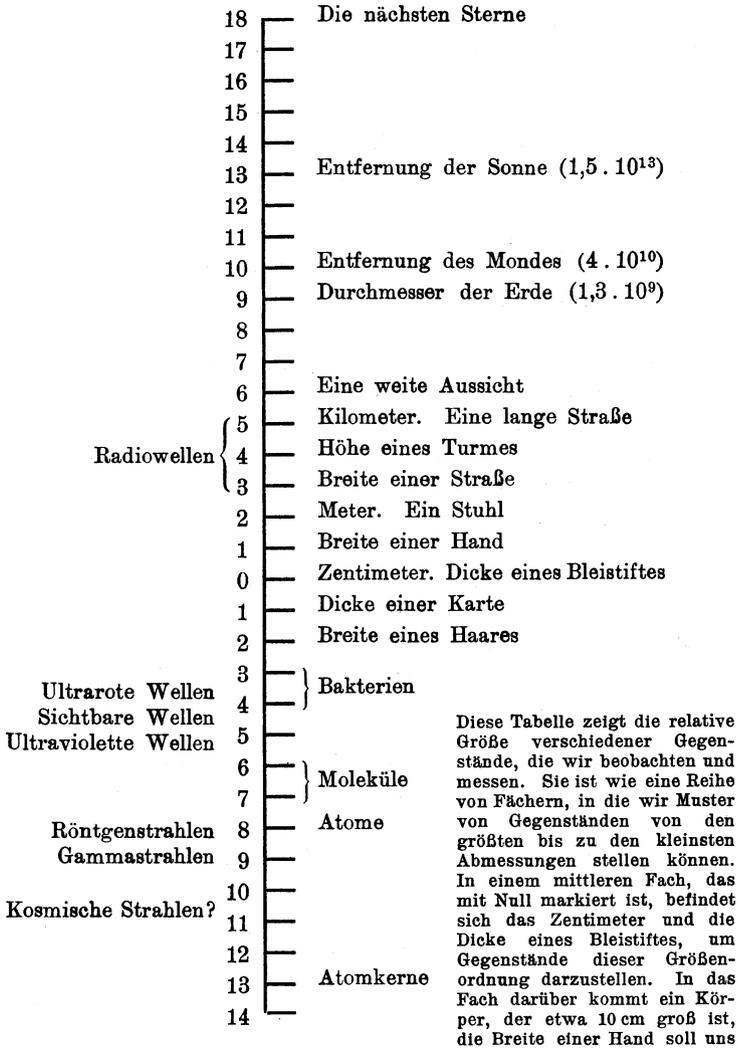
Am anderen Ende der Reihe finden wir die Ätherwellen, die beim Rundfunk benutzt werden. Sie werden mit elektrischen Maschinen erzeugt. Der Beweis dafür, daß sie von derselben Art sind wie das Licht, stammt von Clerk Maxwell, der die Geschwindigkeit dieser Wellen berechnete und fand, daß sie die gleiche Geschwindigkeit wie das Licht besaßen. Seit dieser Zeit hat die Annahme, daß das Licht eine Art elektromagnetischer Störung sei, zu vielen Berechnungen geführt, die durch experimentelle Untersuchungen bestätigt wurden.

Wir fassen zusammen und finden, daß man Ätherwellen von ganz verschiedener Wellenlänge beobachten kann. Wir beginnen mit den Hunderte von Metern langen Wellen, wie sie beim Radio benutzt werden. Sie werden elektrisch erzeugt. Durch Verkleinern der Dimensionen des elektrischen Erzeugers kann man die Wellenlänge entsprechend verkürzen, und auf diesem Wege hat sich die Möglichkeit ergeben, mit Wellen von 2 oder 3 cm Länge zu arbeiten. Hierauf folgt eine Lücke, die aus technischen Gründen schwer auszufüllen ist, aber wir finden den Anschluß bei den ultraroten Schwingungen wieder, deren Wellenlänge wenige Zehntausendstel eines Zentimeters beträgt. Dann kommt der sichtbare Bereich, den wir natürlich sehr viel genauer als alles andere kennen; er ist sehr schmal. Die Wellenlänge des äußersten Rot ist etwas kleiner als ein zehntausendstel Zentimeter und die des äußersten Blau etwa halb so groß. Das Ganze liegt sozusagen innerhalb einer Oktave. Es folgt das Ultraviolett; hierunter versteht man die Wellenlängen vom Ende

des sichtbaren Bereiches bis zu einem unbestimmten kleineren Wert herunter, sagen wir bis zu einem hunderttausendstel Zentimeter. An diese schließt sich ein schwer zugängliches Gebiet, in dem die Strahlen sehr stark von der Luft absorbiert werden, so daß man alle Arbeiten im Vakuum ausführen muß. Es war sehr schwierig, diese Lücke auszufüllen und die Röntgenstrahlen auf der anderen Seite zu erreichen; aber in neuerer Zeit ist auch dieses Unternehmen erfolgreich durchgeführt worden. In dem Gebiet der Röntgenstrahlen ist es wieder leichter zu experimentieren, da man die neuen Methoden mit den Kristallen als Beugungsgittern benutzen kann, und so kommen wir zu den Gammastrahlen mit zunehmendem Durchdringungsvermögen und endlich vielleicht zu den „kosmischen Strahlen“, von denen man annimmt, daß sie aus dem Weltenraume kommen, und die außerordentlich durchdringend sind und mit den Gammastrahlen verwandt zu sein scheinen. Wir wollen diese Größen in einer Tabelle zusammenstellen und zu Vergleichszwecken gleichzeitig einige andere Größen hinzufügen (S. 198).

Diese kurze Übersicht über den Bereich der Ätherwellen wollen wir damit abschließen, daß wir die Methoden, mit denen man die verschiedenen Wellenlängen mißt, kurz beschreiben. In den meisten Fällen benutzt man hierzu ein Beugungsgitter, wie auf S. 106 auseinandergesetzt wurde. Wenn ein Lichtstrahl, wie in Abb. 69, senkrecht auf ein Gitter fällt, werden Strahlen nach rechts und nach links abgelenkt. Der Winkel zwischen diesen Strahlen und der Richtung des ursprünglich auftreffenden Lichtstrahles hängt von dem Verhältnis zwischen der Wellenlänge und dem Abstand der Striche im Gitter ab. Bei der Herstellung des Gitters mit der Teilmaschine hängt die Anzahl der Striche, die auf einen Zentimeter kommen, von der Einstellung der Maschine ab und ist somit bekannt. Sobald man daher den Winkel gemessen hat, ist es leicht, die Wellenlänge zu berechnen.

Die Gittermethode kann auch für ultrarote und für ultraviolette Strahlen benutzt werden. Ja, man kann sie sogar noch bei den Röntgenstrahlen anwenden, bei denen die Durchführung freilich erst vor kurzer Zeit gelungen ist. Die ersten Messungen der Wellenlängen von Röntgenstrahlen beruhten darauf, daß man Kristalle als Beugungsgitter benutzte. Die Abstände zwischen den Atomen ließen sich nämlich berechnen, sobald die Strukturen einfacher Kristalle, wie Steinsalz oder Kalkspat, bekannt waren. Aus physikalischen



dazu dienen. In das Fach darüber kommen Gegenstände von 100 cm, z. B. kleinere Möbelstücke. Die Breite einer Straße soll 1000 cm entsprechen, die Höhe eines Turmes 10000 cm oder 100 m, und so weiter. In das erste Fach unter Null kommen Dinge, die etwa 1 mm dick sind, z. B. eine Karte; dann kommt im nächsten Fach die Breite eines Haares, und so weiter. Bakterien verschiedener Größe kommen in das dritte und vierte Fach unter Null, Moleküle in das sechste und siebente, und die Atome bis zum achten Fach herunter. Auf der anderen Seite der senkrechten Linie sind die verschiedenen Wellenlängen in der gleichen Weise eingetragen. Manchmal sind die Entfernungen in Zahlen angegeben. Die Entfernung der Sonne beträgt 15 Billionen Zentimeter, oder in Ziffern $1,5 \cdot 10^{13}$. Sie kommt daher in das dreizehnte Fach nach oben.

und chemischen Messungen kennt man das Gewicht der Atome ziemlich genau. Man weiß ferner, daß die Atome im Steinsalz z. B. in geraden Linien angeordnet sind. Aus dem ebenfalls bekannten Gewicht eines Kubikzentimeters des Kristalles und den Gewichten der Natrium- und Chloratome kann man infolgedessen die Atomabstände im Kristall berechnen. Dann braucht man nur noch die Reflexion eines Röntgenstrahles an einem Kristall zu beobachten (vgl. Abb. 105) und den Reflexionswinkel zu messen, um die Wellenlänge des Röntgenstrahles bestimmen zu können. Ausführlichere Beschreibungen dieser Messungen findet man in den Büchern, in denen diese neuen Methoden geschildert werden.

In neuerer Zeit hat man die Beugung von Röntgenstrahlen auch an gewöhnlichen Gittern beobachtet. Der Einfallswinkel muß dabei sehr schräg gewählt werden, da zwischen der Wellenlänge und der Maschenweite des künstlichen Gitters ein so großer Unterschied besteht. Wir wollen uns daran erinnern, daß es eine Zeit gab, zu der ein solcher Beugungsversuch zu schwierig erschien, um Erfolg zu versprechen, und deshalb hatte Laue vorgeschlagen, einen Kristall zu benutzen. Nachdem aber der Beweis erbracht war, daß die Röntgenstrahlen mit dem Licht verwandt waren, wurden wegen der Wichtigkeit solcher Messungen neue Versuche unternommen, die auch von Erfolg begleitet waren. Dieser neue Weg ist vielleicht genauer als die Messung mit Hilfe von Kristallen, jedenfalls ist die Methode direkter. Aber mit Hilfe der Kristallmethoden kann man sowohl die Wellenlängen von Röntgenstrahlen wie auch die Gitterabstände von Kristallen viel genauer miteinander vergleichen, als man beide nach der Gittermethode mit den üblichen Längeneinheiten vergleichen kann.

Auch die Wellenlängen von Gammastrahlen lassen sich mit Hilfe von Kristallen bestimmen. Es bleiben dann nur noch die langen Radiowellen übrig. Bei ihnen mißt man die Frequenz, also die Anzahl von Schwingungen in der Sekunde. Die allgemeine Geschwindigkeit der Ätherwellen ist bekannt. Aus der Frequenz ergibt sich daher ohne weiteres die Wellenlänge.

Welle und Korpuskel

Im vorigen Kapitel haben wir gesehen, daß uns ein weiter Bereich von Ätherwellen zum Experimentieren zur Verfügung steht. Ein kleiner, engbegrenzter Teil von ihnen ist für unsere Augen sichtbar, andere lassen sich durch ihre Wirkung auf eine photographische Platte feststellen. Zur Beobachtung der sehr langen Radiowellen benutzt man eine Kombination elektrischer Apparate, einen Radioempfänger. Im folgenden werden wir noch andere Methoden zur Feststellung von Ätherwellen kennenlernen.

Die charakteristischen Erscheinungen, die uns veranlaßt haben, das sichtbare Licht als eine Art von Wellenbewegung im Äther zu betrachten, treten im ganzen Bereich der Strahlungen auf. Das gilt besonders für das Phänomen der Beugung, mit dem wir uns so viel beschäftigt haben. Es steht zu erwarten, daß auch jede beliebige andere Erscheinung, die wir bei irgendeiner Art von Strahlung beobachten, in mehr oder weniger starkem Grade bei allen anderen Arten auftreten wird.

Es gibt nun eine besondere Erscheinung, die namentlich bei den Strahlungen kürzester Wellenlänge sehr deutlich auftritt, während sie sich bei den längeren Wellen weniger gut beobachten läßt, das ist der sogenannte lichtelektrische Effekt. Hier versagt die Wellentheorie, die uns bis jetzt so gut geholfen hat. Sie kann uns hierfür keine Erklärung liefern. Gerade diese Tatsache und einige andere, die mit ihr im Zusammenhang stehen, zeigen, daß unsere Hypothese von den Wellen unvollständig ist. Sie haben zu der merkwürdigen Lage, in der sich die Physik heutzutage befindet, geführt. Schon im Jahre 1905 machte Einstein darauf aufmerksam, daß man die Korpuskulartheorie vielleicht zu voreilig beiseite geschoben hätte.

Der lichtelektrische Effekt

Der lichtelektrische Effekt ist leicht zu beschreiben. Beim Auftreffen des Lichtes auf irgendwelche Materie werden die getroffenen Atome zur Elektronenabgabe angeregt. Daher stammt

auch der Name. Er wird aber auch für den gleichen Effekt bei Röntgen- und Gammastrahlen angewandt, die wir ja auch als Lichtarten ansprechen. Gerade hier tritt die Elektronenemission sehr deutlich auf und läßt sich leicht beobachten und messen, so daß es am einfachsten ist, den Effekt mit Hilfe dieser kürzeren Wellen zu untersuchen. Man beachte aber, daß der Effekt bei allen Wellenlängen auftritt. Nur weil man ihn mit Hilfe der

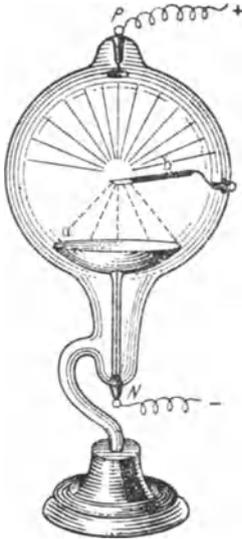


Abb. 108. Diese Abbildung stammt, wie die Abb. 96, 97, 98 und 99, von einem Druckstock, der die Vorlesung, die Crookes in der Royal Institution im Jahre 1879 hielt, erläutern sollte. Der Glaskolben hat die Form einer Birne; die negative Elektrode, die Kathode, ist unten und die Anode, der positive Pol, befindet sich oben, ihre Lage ist aber unwesentlich. Gegenüber der Kathode ist ein Stück Platindraht, der ebensogut auch als Anode hätte dienen können. Die schalenförmige Kathode konzentriert den Strom von Elektronen auf den Platindraht. Crookes eigene Worte lauten: „Der Platindraht wird nicht nur weißglühend, sondern man kann sogar die Funken sehen, die von ihm nach allen Seiten ausgehen, was beweist, daß er tatsächlich schmilzt“. Der Versuch wurde angestellt, um die Wärmeentwicklung zu zeigen, man wußte damals und auch 20 Jahre später noch nicht, daß von dem Platin Röntgenstrahlen ausgingen. Der Glaskolben in der Abbildung ist etwa 15 cm hoch.

kurzen Wellen so viel leichter untersuchen kann, benutzen wir diese anstatt der sichtbaren Strahlen, bei denen er schon vor Entdeckung der Röntgenstrahlen bekannt war.

Wir gewinnen vielleicht am einfachsten eine allgemeine Übersicht über diesen Effekt, wenn wir mit der Erzeugung der Röntgenstrahlen in der Röntgenröhre beginnen, und dann diesen Strahlen auf ihrem Wege nach außen folgen.

Die Hauptbestandteile jeder Röntgenröhre sind a) die eigentliche Röhre, die, zum mindesten teilweise, aus Glas besteht, und b) die beiden Elektroden aus Metall, die Kathode und die Anode, die letztere wird auch Antikathode oder positive Elektrode genannt. Wir haben schon einige der Erscheinungen besprochen, die die Elektrizitätsentladung in einer solchen Röhre begleiten, aus der die Luft zum größten Teil entfernt worden ist. Ein Strom von Elek-

tronen kommt aus der Kathode, wie das Wasser aus einem Wasserhahn. Dieser Strom bewegt sich in einer geraden Linie, kann aber von einem Magneten abgelenkt werden; er löst mechanische Wirkungen aus und erzeugt Wärme, wenn er auf irgendeinen Körper trifft. Außerdem gehen von der Auftreffstelle stets Röntgenstrahlen aus. Der Weg, den die Kathodenstrahlen nehmen, ist von der Lage der Anode unabhängig. Soll diese als Antikathode wirken, d. h. Ausgangspunkt von Röntgenstrahlen sein, so muß sie bei der Herstellung der Röhre an die richtige Stelle gebracht werden, also an eine Stelle, wo der Elektronenstrom sie treffen kann. Die positive Elektrode scheint hierbei gar nichts zu tun zu haben. Das stimmt natürlich in Wirklichkeit nicht, da sie ja vorhanden sein muß, um den elektrischen Stromkreis zu schließen. Sie muß die positive Elektrizität auf die Atome und Moleküle zur Weiterbeförderung übertragen; diese haben eine verhältnismäßig beträchtliche Masse und erlangen daher keine so überaus große Geschwindigkeit wie die Elektronen im Kathodenstrahl. Die scharfe Abgrenzung des letzteren und sein geradliniger Verlauf senkrecht von der Kathode aus durch die Röhre sind außerordentlich bemerkenswert. Bei einem kleinen Gasrest im Rohr wird der Kathodenstrahl durch die Zusammenstöße der dahinfliegenden Elektronen mit den Gasmolekülen sichtbar; seine Spur bildet dann ein feines leuchtendes Bündel. Die Erfahrung zeigt, daß seine Form sehr von der Gestalt der Röhre und der Kathode abhängt, und zwar besonders infolge der elektrischen Ladungen, die sich an den Wänden der Röhre ansammeln.

Crookes nahm an, daß der Strom aus strahlender Materie bestehe, die von der Kathode ausgeschleudert werde.

Er mußte für seinen Gedanken kämpfen, da es sich zeigte, daß der Kathodenstrahl beim Auftreffen auf eine dünne Stelle in der Wand der Röhre diese durchdringen und ins Freie gelangen konnte, wo er in einem verdunkelten Zimmer schwach sichtbar war. Man konnte auch beobachten, daß er durch dünne Schirme, die innerhalb der Röhre in den Weg der Strahlen gestellt waren, hindurchging. Folglich, so schloß man, konnten die Strahlen nicht aus Teilchen bestehen, die, wie Crookes annahm, elektrische Ladungen trugen, sondern sie mußten irgendeine Art von Wellen sein. Man hielt es nämlich damals noch nicht für möglich, daß materielle Teilchen irgendwelcher Art geradlinig durch Schichten von Materie hindurchgehen konnten, auch dann nicht, wenn diese Schichten be-

liebig dünn waren. Daß Crookes jedoch vollständig recht hatte, stellte sich heraus, als J. J. Thomson zeigte, daß der Strom aus negativ geladenen „Korpuskeln“ — um seine ursprüngliche Bezeichnungswiese zu gebrauchen — oder aus Elektronen, wie wir heute sagen, bestand. Thomson konnte Ladung und Masse des Elektrons bestimmen und zeigte, daß der Wert dieser beiden Größen unter allen Umständen und bei jeder Art von Röntgenröhre der gleiche blieb. Die Masse war sehr gering; das Wasserstoffatom, das man bis dahin für das kleinste Teilchen in der Welt hielt, war 1845mal so groß. Da die Elektronen überall auftraten, schloß man, daß sie ein allgemeiner Bestandteil aller Atome seien; heute ist ja allgemein bekannt, daß man sich ein normales Atom als einen positiv geladenen Kern vorstellt, der von soviel Elektronen umgeben ist, daß seine positive Ladung gerade ausgeglichen wird.

Die Geschwindigkeit der Elektronen, die von der Kathode ausgeschleudert werden, wurde mit elektrischen und magnetischen Methoden bestimmt, und es zeigte sich, wie man erwarten konnte, daß der Flug der Elektronen um so schneller war, je höhere Spannung am Rohr lag. Eine Spannung von 10 Volt erzeugte eine Geschwindigkeit von einem Hundertstel der Lichtgeschwindigkeit, bei 1000 Volt wuchs sie auf etwa ein Zehntel, und bei 100000 Volt wurde fast die volle Lichtgeschwindigkeit erreicht. Die Geschwindigkeit der Elektronen übertraf aber niemals die Lichtgeschwindigkeit, auch beim Anlegen noch so hoher Spannungen nicht, sie näherte sich vielmehr immer langsamer und langsamer einem bestimmten Endwert, je höher die Spannung stieg.

Die moderne Röntgenröhre ist ein sehr sorgfältig ausgedachter Apparat (Tafel XXIV). Ihre wesentlichen Teile sind geblieben, aber die Erfahrung hat uns gezeigt, was man alles bei der Konstruktion beachten muß, wenn man gute Resultate erzielen will. Mit solchen Einzelheiten wollen wir uns hier jedoch nicht beschäftigen.

Wir müssen uns vielmehr der Entstehung der Röntgenstrahlen selbst zuwenden. Wir haben schon beschrieben, wie Röntgen sie entdeckte und wie er zeigte, daß sie von der Stelle ausgingen, wo der Kathodenstrahl die Wand der Röhre oder irgendeinen ihnen in den Weg gestellten Gegenstand traf. Dabei wird ein Teil der Energie des Kathodenstrahles in die Energie der Röntgenstrahlen umgewandelt, aber der bei weitem größte Teil der Energie ver-

wandelt sich an der Auftreffstelle in Wärme. Die dabei auftretende Erhitzung ist so groß, daß bei allen Röhren, mit Ausnahme der allerschwächsten, die Glaswand des Rohres sehr bald ein Loch bekäme, wenn man den Strom länger eingeschaltet ließe. Man nimmt daher gewöhnlich als Antikathode einen schweren massiven Metallkörper von hohem Atomgewicht, wie Platin oder Wolfram. Aber auch dieser kann noch rotglühend werden, wenn man die Röhre nicht mit einer Wasserkühlung versieht.

Wir wollen uns jetzt ein Bild davon machen, wie die Röntgenstrahlen, was sie auch immer sein mögen, von der Stelle, wo die Elektronen die Antikathode treffen, ausstrahlen. Mit einer photographischen Platte läßt sich ihre Richtung und ihre Intensität bestimmen. Man findet leicht heraus, daß sie, wie schon oben erwähnt, sich geradlinig bewegen und die Fähigkeit haben — immer geradlinig weitergehend — alle Materie zu durchdringen, auf die sie treffen. Es zeigt sich auch, daß ihr Durchdringungsvermögen sehr stark wechselt, wenn man die Bedingungen, unter denen die Strahlen entstehen, verändert. Je schneller die Elektronen im Kathodenstrahl sind, um so durchdringender werden die von ihnen erzeugten Röntgenstrahlen. Es kommt auch etwas auf das Material der Antikathode an, auf das die Elektronen treffen; je höher dessen Atomgewicht ist, um so größer ist in dem Gesamtkomplex der Anteil an durchdringenden Röntgenstrahlen, wobei natürlich vorausgesetzt ist, daß die Elektronen eine genügend große Geschwindigkeit haben, um überhaupt derartig durchdringende Strahlen von irgendeiner Antikathode zu erzeugen. Bei medizinischen Röntgenröhren besteht die Antikathode meist aus Wolfram, während man in dem besonderen Fall der Kristallstrukturanalyse gewöhnlich Kupfer oder Eisen nimmt, um eine „weichere“, weniger durchdringende Strahlung zu erhalten.

Das Durchdringungsvermögen spielt in allen Fällen, bei denen die Röntgenstrahlen für verschiedene praktische Zwecke benutzt werden, also auch in der Medizin und Chirurgie, eine wichtige Rolle. Dies zeigt ein einfaches Beispiel: Strahlen, die zu „weich“, d. h. nicht durchdringend genug sind, liefern dem Chirurgen kein brauchbares Bild eines gebrochenen Gliedes. Die Strahlen können das Fleisch nicht genügend durchdringen, und auf eine hinter das betreffende Glied gestellte photographische Platte wirft das Fleisch einen fast ebenso tiefen Schatten wie die Knochen. Beim Anlegen einer höheren Spannung, also einer größeren Voltzahl, an

die Röhre wächst die Geschwindigkeit der Elektronen, und die Strahlen werden durchdringender; das Fleisch wirft keinen starken Schatten mehr, aber die Knochen, die Calcium und andere schwere Atome enthalten, absorbieren die Strahlen noch so stark, daß ein dunkler und leicht unterscheidbarer Schatten in dem helleren Schatten des Fleisches liegt. Wird die Spannung aber zu hoch, dann halten auch die Knochen die Strahlen nicht mehr genügend zurück und ihre Schatten werden ebenfalls schwach.

Mit Hilfe der Methoden der Kristallanalyse kann man leicht zeigen, daß das Durchdringungsvermögen der Röntgenstrahlen direkt von ihrer Wellenlänge abhängt. Wenn man die Geschwindigkeit der erzeugenden Elektronen steigert, verkürzt man die Wellenlänge der entstehenden Röntgenstrahlen. Wenn man dagegen die Intensität des Kathodenstrahles steigert, d. h. die Zahl der Elektronen, die in der Sekunde auf die Antikathode treffen, vergrößert, wächst die Intensität der Röntgenstrahlen. Eine photographische Platte, die man in ihren Weg stellt, wird dann schneller geschwärzt. Die Qualität der Röntgenstrahlen, oder mit anderen Worten ihre Wellenlänge, ist von der Zahl der Elektronen im Kathodenstrahl vollständig unabhängig und hängt nur von deren Geschwindigkeit ab. Die Anzahl der Elektronen bestimmt also die Intensität, ihre Geschwindigkeit die Wellenlänge der Röntgenstrahlen.

Jetzt kommen wir zum lichtelektrischen Effekt zurück. Die Röntgenstrahlen treiben aus jedem Körper, auf den sie treffen, Elektronen heraus; dabei wird ihre Energie verbraucht. Sie wirken nicht auf den betreffenden Körper als Ganzes, sondern auf einzelne seiner Atome. Die Strahlen haben sozusagen nur mit den Atomen als Individuen zu tun und kümmern sich gar nicht darum, wie diese Atome zu Molekülen oder die Moleküle zu einem festen Körper zusammengesetzt sind. Wenn ein Röntgenstrahl über ein Atom hinweggeht, besteht zwar die Möglichkeit, daß er mit diesem Atom reagiert und ein Elektron aus ihm herausschleibt; die Wahrscheinlichkeit hierfür ist aber außerordentlich klein. Die Energie der Strahlen wäre schnell aufgebraucht, wenn sie bei jedem Atom, auf das sie treffen, erfolgreich sein würden. Auf einen Treffer kommen Millionen mal Millionen von Versagern. Aber wie groß auch immer diese Wahrscheinlichkeit ist, sie ist vollständig unabhängig davon, wie das betreffende Atom mit anderen Atomen verbunden ist. Natürlich gilt dies nicht für alle Wellenlängen; beim

Licht hatten wir ja gerade gesehen, daß die Absorption der Lichtwellen außerordentlich stark von der chemischen Zusammensetzung abhängig war. Aber bei den Röntgenstrahlen ist dieser Einfluß zum mindesten so klein, daß man ihn vernachlässigen kann. Man hat wohl einige wenige Beispiele der Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung gefunden, aber diese sind so selten und der Effekt ist so klein, daß er nur sehr schwer zu beobachten ist.

Wenn wir unter dem Ausdruck Elektronen „austreiben“ auch diejenigen Fälle mitverstehen, bei denen die Wirkung der Röntgenstrahlen darin besteht, daß ein Elektron von seinem eigentlichen Platz innerhalb des Atoms auf einen anderen Platz im Innern desselben Atoms verschoben wird — die Austreibung also unvollständig bleibt —, dann haben wir die Wirkung der Röntgenstrahlen praktisch vollständig beschrieben. Sie üben keine andere Wirkung auf Materie aus, und ihr Vorhandensein kann sich in keiner anderen Weise zeigen. Ebenso wie die fliegenden Elektronen in der Röntgenröhre die Röntgenstrahlen erzeugten, so setzen die Röntgenstrahlen ihrerseits wieder Elektronen in Bewegung. Fallen die Röntgenstrahlen auf die Silbersalze der photographischen Platte, dann regen sie Elektronen dieser Salze an, und diese Elektronen ihrerseits leiten den chemischen Vorgang ein, durch den die Veränderung der Platte hervorgerufen wird. Wenn die Strahlen den menschlichen Körper durchdringen, dann kommt ihre Wirkung auf die Gewebe des Körpers ebenfalls durch die von ihnen in Bewegung gesetzten Elektronen zustande. Es ist, als wenn der Körper der Wirkung von explodierenden Geschossen ausgesetzt würde.

Es ist außerordentlich interessant, die Geschwindigkeit zu bestimmen, mit der diese Elektronen unter dem Einfluß der Röntgenstrahlen aus den Atomen herausgeschleudert werden. Schon seit langer Zeit ist verschiedentlich versucht worden, diese Frage zu beantworten. Ein solcher Versuch wurde von Innes im Jahre 1907 unternommen. Die Methode ist sehr einfach und leicht zu beschreiben. Die Röntgenstrahlen treffen auf eine Platte aus irgendeinem Material MM , von der Elektronen nach allen Richtungen ausgesandt werden. Zwei Schirme L und L' sind bei Q und R mit kleinen Löchern versehen. Die Elektronen gehen durch die Löcher und treffen bei P auf eine photographische Platte, wobei R , Q und P eine gerade Linie bilden. Die Zeichnung Abb. 109 gibt die Anordnung der Platte und der Schirme wieder, aber ohne

die Einzelheiten, die bei der Benutzung von empfindlichen Platten erforderlich sind.

Nun kann der Strom der fliegenden Elektronen, wie wir schon gesehen haben, durch einen Magneten abgelenkt werden. Ihre Bahn wird kreisförmig und der Strom strebt dahin, in sich selbst zurückzukehren. Das Maß der Krümmung hängt von der Stärke des Magneten einerseits und von der Ladung, Geschwindigkeit und Masse der Elektrizitätsträger andererseits ab. Als Innes seinen Versuch ausführte, waren Ladung und Masse der Elektronen von J. J. Thomson gemessen worden, und man nahm mit Recht an, daß in diesem Falle Elektronen die Träger der Elektrizität seien. Innes brachte einen Magneten in eine bestimmte Lage in der Nähe seines Apparates. Der Strahl von Elektronen, der jetzt seine Wirkung auf der photographischen Platte anzeigte, war nicht mehr geradlinig, sondern bildete einen Kreisbogen (die Kurve $S'RQP'$ der Abbildung). Dadurch, daß Innes die Lage von Q , R und P' zueinander bestimmte, konnte er den Radius des Kreises ermitteln. Er kannte auch die Stärke seines Magneten und konnte so die einzige unbekannte Größe, nämlich die Geschwindigkeit der Elektronen berechnen.

Aus diesen Messungen ergab sich ein Resultat von hervorragender Wichtigkeit. Es stellte sich nämlich heraus, daß die Elektronen eine sehr große Geschwindigkeit besaßen. Sie war mit der Geschwindigkeit der Elektronen vergleichbar, die in der Röhre die Röntgenstrahlen erzeugt hatten. Sie war von der Intensität der Röntgenstrahlen unabhängig, was man leicht dadurch feststellen konnte, daß man den Versuch bei einer anderen Entfernung zwischen der Röntgenröhre und der Platte MM wiederholte. Auch wenn man den Abstand von der Röhre auf das Achtfache erhöhte, so daß die Intensität der auf die Platte fallenden Strahlen, entsprechend dem Gesetz von dem Quadrat der Entfernung, auf den 64sten Teil sank, änderte sich die Lage des Punktes P' nicht. Man mußte natürlich länger belichten, um eine beobachtbare Wirkung

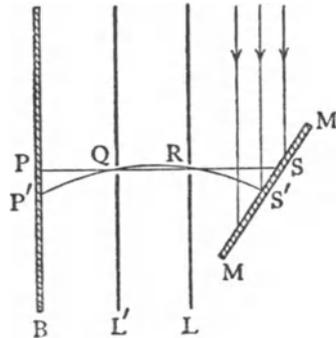


Abb. 109. Eine Zeichnung, die das Prinzip der Versuchsanordnung von Innes zeigt.

auf der photographischen Platte zu erhalten, aber das war selbstverständlich, weil die Anzahl der Elektronen im Strahl geringer geworden war. Die Zahl der Elektronen wurde kleiner, aber ihre Geschwindigkeit blieb unverändert.

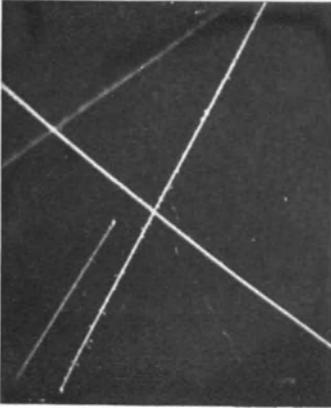
Andererseits zeigte es sich, daß der Elektronenstrom im Experiment schneller wurde, wenn man die Geschwindigkeit der Elektronen in der Röntgenröhre erhöhte und dadurch die Röntgenstrahlen durchdringender machte.

Man erhielt eine bestimmte, aber nur kleine Änderung, wenn man die Platte *MM* durch eine Platte aus anderem Material ersetzte. Hatte das neue Material ein höheres Atomgewicht, nahm man z. B. statt Silber Gold, so fand man, daß einige Elektronen eine Geschwindigkeit besaßen, die etwas größer war als die Höchstgeschwindigkeit vorher. Die Geschwindigkeiten waren nämlich immer auf einen gewissen Bereich verteilt, wobei die schnellsten Elektronen etwa 20% schneller als die langsamsten waren. Während nun die untere Grenze immer dieselbe blieb, konnte die obere etwas erhöht werden. Im Verhältnis zu den anderen Beobachtungen war dies, wie man damals annahm und heute bestimmt weiß, nur ein sekundärer Effekt.

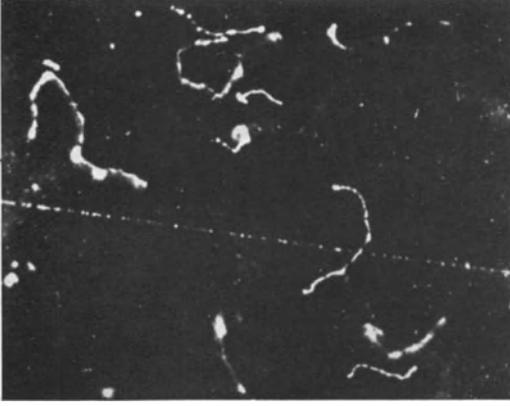
Andere Forscher bestätigten und erweiterten die Beobachtungen von Innes.

So erhalten alle die verschiedenen Erscheinungen zusammengekommen ein verhältnismäßig einfaches Aussehen. Es fängt damit an, daß in der Röntgenröhre Elektronen mit bestimmter Geschwindigkeit auf die Antikathode geschossen werden; praktisch ist es allerdings sehr schwierig, diese Geschwindigkeit in enge Grenzen einzuschließen. Im nächsten Stadium wird durch Vermittlung der Röntgenstrahlen Energie durch die Wand der Röhre hindurch in den Raum außerhalb der Röhre übertragen, und schließlich erscheinen wieder Elektronen, die fast die gleiche, nur etwas kleinere Geschwindigkeit wie die ursprünglichen Elektronen besitzen. Es ist so wie bei einem Fluß, der unter der Erde verschwindet und irgendwo wieder auftaucht; nur kann man natürlich nicht annehmen, daß es sich immer um dieselben Elektronen handelt. Wir können sie auch nicht markieren, wie man das Wasser des Stromes anfärben kann. Das Material der Röhre und der Platte *MM* und die ganze Anordnung des Versuches haben wenig oder gar keinen Einfluß. Am Anfang haben wir Elektronen, die sich an einer bestimmten Stelle mit bestimmter Geschwindig-

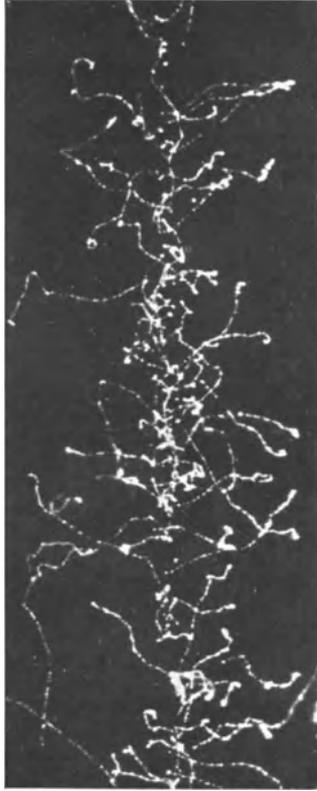
Tafel XXV



A. Die Spuren von Alphateilchen — Heliumatomen —, die vom Anfang bis zum Ende beinahe in einer geraden Linie verlaufen. Die Nebeltropfchen sind so zahlreich und eng beieinander, daß die Spuren als durchgehende weiße Linien erscheinen. Diese Teilchen werden von radioaktiven Substanzen ausgeschildert. (S. 215.)

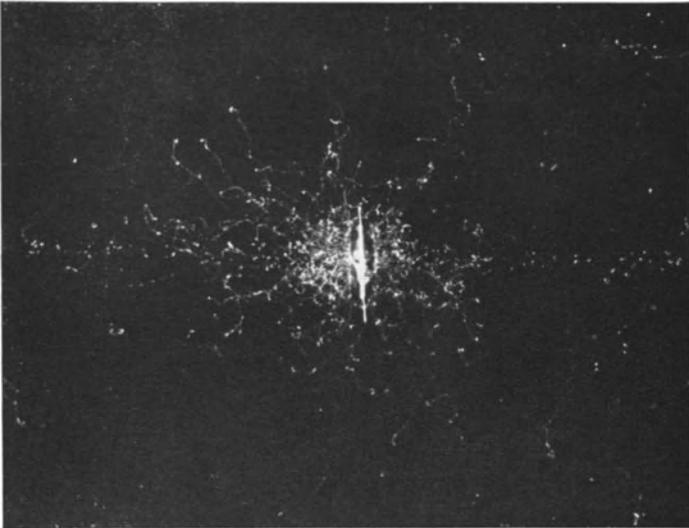


C. Hier sind einige der Spuren einzeln abgebildet. Einige von ihnen stammen von sehr schnellen Elektronen, Betastrahlen, die sich in dem verhältnismäßig kleinen Teil ihrer Bahn, der hier abgebildet ist, geradlinig fortbewegen. Eine der Spuren enthält nur so wenige Tropfen, daß sie kaum zu sehen ist. (S. 215.)

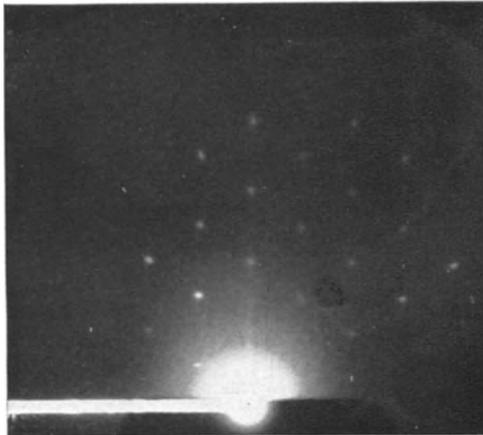


B. Spuren von Röntgenstrahlen. Die Röntgenstrahlen selbst sind überhaupt nicht zu sehen; sie bilden einen feinen geraden Strahl, der mitten durch das Bild geht, aber es erscheinen keine geraden Linien wie in Tafel XXV A. Die sichtbaren Spuren stammen von Elektronen, die die Röntgenstrahlen aus einigen der Atome, mit denen sie zusammengetroffen sind, in Freiheit gesetzt haben. Ihre gekrümmten Wege sind charakteristisch, sie sind zu leicht, um geradlinige Bahnen, wie die Alphateilchen, aufrecht zu erhalten, denn sie werden von den Atomen, denen sie begegnen, hin und her gestoßen. Dies ist ein Beispiel für die Tatsache, von der wir gesprochen haben, daß die Röntgenstrahlen indirekt wirken, nämlich durch die Bewegungen der Elektronen, die sie erzeugen. Die Röntgenstrahlen gehen von links nach rechts. (S. 215.)

Tafel XXVI



A In dieser Photographie trifft ein enges Bündel von Röntgenstrahlen, die von rechts nach links gehen, auf einen Kupferschirm. Die Strahlen erregen eine Wolke von Elektronen im Kupfer und man sieht, daß sie dazu neigen, die Elektronen mit sich mitzuziehen. Es sind mehr Elektronen auf der Seite, auf der die Röntgenstrahlen herauskommen, nachdem sie durch das Kupfer hindurchgegangen sind, als auf der anderen Seite. (S. 215.)



B. Ein Beugungsbild von Elektronen (S. P. Thomson). Ein Strahl von Elektronen wurde auf die Oberfläche eines Kristalles gerichtet, und die photographische Platte stand so, daß sie die abgebeugten Strahlen aufging. (S. 217.)

keit bewegen, und am Ende haben wir Elektronen von beinahe derselben Geschwindigkeit an einer anderen Stelle.

Wir wollen uns den ganzen Vorgang stark vergrößert vorstellen, so daß wir einen Begriff davon erhalten, wie groß Elektronen, Atome und die anderen Versuchsgrößen im Verhältnis zueinander sind. Dazu wollen wir die Antikathode in der Röntgenröhre hundertmillionenmal größer machen, so daß sie etwa so groß wird wie der Mond. Die Elektronen, mit denen man sie bombardiert, sind dann immer noch so klein, daß man sie mit bloßem Auge nicht erkennen kann. Der Abstand des Mondes von der Erde entspricht ungefähr der Entfernung zwischen der Röntgenröhre und einem Beobachter unter gewöhnlichen Bedingungen. Ein Atom hat dann etwa die Größe einer Kirsche oder Pflaume. Der Mond wird mit den außerordentlich kleinen unsichtbaren Teilchen, die den Elektronen entsprechen, beschossen. Unmittelbar darauf springen aus der Erde an verschiedenen Stellen ähnliche Teilchen heraus; eines vielleicht aus einem Stein, der auf einem Berggipfel in den Anden liegt, das nächste aus einem Wassertropfen im Indischen Ozean und das nächste aus einem Blatt in einem Wald in England. Diese Vorkommnisse sind bemerkenswert unabhängig voneinander. Wie groß die Geschwindigkeit der Teilchen, die man nach dem Monde schießt, auch immer ist, die sekundären Teilchen haben eine ähnliche Geschwindigkeit, die sich, der Geschwindigkeit der primären Teilchen entsprechend, ändert.

Es ist klar, daß die Wellentheorie, wie wir sie kennengelernt haben, diese merkwürdigen Erscheinungen nicht als charakteristische Eigenschaften von Wellenbewegungen mitumfassen kann. Die Hauptschwierigkeit liegt in der Erklärung der Energieübertragung von einer Stelle zur anderen. Wir sind aber gezwungen, eine solche Übertragung anzunehmen. Man könnte vielleicht im ersten Augenblick glauben, daß die Energie des Elektrons, das aus dem Atom beim Auftreffen der Röntgenstrahlen herausspringt, aus dem Atom selbst stammt, daß der Röntgenstrahl also den Vorgang im Atom nur auslöst, etwa wie das Abdrücken des Hahnes bei einem Gewehr wirkt. Wäre das der Fall, dann müßte man erwarten, daß jedes Atom sein Geschöß mit einer bestimmten, für das Atom charakteristischen Geschwindigkeit abschießt. Wir beobachten aber, daß die Geschwindigkeit der sekundären Elektronen von der Art der Atome, denen sie entstammen, unabhängig ist; sie hängt vielmehr von den Eigenschaften der auslösenden

Röntgenstrahlen ab, und es ist unmöglich sich vorzustellen, daß die Geschwindigkeit einer Gewehrkuugel von den Eigenschaften des Mannes, der den Hahn abdrückt, abhängt.

Diese Hypothese von dem „Hahnabdrücken“ oder Auslösen erscheint noch viel unbefriedigender, wenn wir einen Versuch anderer Art betrachten, den man mit den Strahlen radioaktiver Substanzen anstellen kann. Drei Arten von Strahlen gehen von radioaktiven Substanzen aus, Alpha-, Beta- und Gammastrahlen. Die ersten sind Heliumatome, mit denen wir uns hier nicht beschäftigen wollen, die zweiten sind Elektronen von sehr großer Geschwindigkeit, die gewöhnlich noch höher ist als die der Elektronen in einer Röntgenröhre. Die dritte Strahlenart hat, wie wir schon gesehen haben, denselben Charakter wie Licht und Röntgenstrahlen; sie hat ein höheres Durchdringungsvermögen als Röntgenstrahlen und steht zu den Betastrahlen etwa im selben Verhältnis wie die Röntgenstrahlen zu den sie erzeugenden Elektronen. Wenn Gammastrahlen über Atome hinweggehen, sendet ein sehr kleiner Bruchteil dieser Atome Elektronen aus, die ungefähr dieselbe Geschwindigkeit haben wie die Betastrahlen der radioaktiven Substanz, die gleichzeitig mit den Gammastrahlen ausgesendet werden. Der ganze Vorgang verläuft in diesem Falle offenbar parallel zu der Wirkung der Elektronen und Röntgenstrahlen aufeinander, in Wirklichkeit handelt es sich ja auch um denselben Vorgang, nur ist die Größenordnung eine andere. Was in einen Falle gilt, muß in gewissem Maße auch im anderen Falle gelten.

Versuche, deren Einzelheiten wir nicht zu beschreiben brauchen, zeigen nun, daß ein Elektron, das durch einen Gammastrahl herausgeschossen wird, das Atom nicht in irgendeiner beliebigen Richtung verläßt, sondern mehr oder weniger die Richtung des Gammastrahles beibehält. Dies ist nun sehr schwer auf Grund einer Auslösungstheorie zu verstehen. Es ist, wie wenn ein Mann zu einer Kanone läuft und den Abzug betätigt, ohne irgendeine andere Kraft dabei anzuwenden. Wie soll man sich dann vorstellen, daß die Richtung, in der das Geschoß fortfliegt, irgendwie mit der Richtung zusammenhängt, aus der der Mann herkam?

Die Auslösungshypothese muß also verlassen werden. Die Röntgenstrahlen bringen dem Atom auf irgendeine Art und Weise die Energie, die das fortfliegende Elektron erhält. Wie kann man sich diesen Vorgang vorstellen?

Wenn man den Röntgenstrahl als eine Welle betrachtet, dann breitet er sich von seinem Ursprungspunkt in sich ständig erweiternden Kugelflächen aus. Seine auf die ganze Oberfläche verteilte Energie wird dabei immer schwächer und schwächer. Nun haben wir aber gesehen, daß die Geschwindigkeit, mit der ein Elektron fortgeschleudert wird, von der Intensität der Röntgenstrahlen unabhängig ist. Sollen wir annehmen, daß die Energie in jedem Atom so lange aufgespeichert wird, bis sich ein bestimmter Betrag angesammelt hat und dann eine Art Explosion erfolgt? Wie eine Überschlagsrechnung leicht zeigt, würde zu einer solchen Anhäufung der Energie sehr viel Zeit erforderlich sein. Ein Atom ist außerordentlich klein im Verhältnis zur Größe der sich ständig ausbreitenden Kugelfläche, auf der die Wellenenergie verteilt ist; es kann davon nur so wenig aufnehmen, daß die Lebensdauer einer gewöhnlichen Röntgenröhre viel kürzer ist als die zur Ansammlung erforderliche Zeit. Trotzdem sind die Röntgenstrahlen im Augenblick, in dem die Röhre eingeschaltet wird, wirksam. Außerdem ist es schwer einzusehen, warum die Geschwindigkeit des ausgeschleuderten Elektrons dann nichts mit dem Atom zu tun hat, von dem es stammt, und nur von der Geschwindigkeit der Elektronen in der Röntgenröhre abhängt. Die Schwierigkeit wird uns vielleicht klarer, wenn wir uns den gleichen Vorgang wieder in größerem Maßstabe vorstellen. Nehmen wir an, wir werfen einen Balken von einer bestimmten Höhe, etwa von 30 m Höhe aus in das Meer. Es gibt einen Spritzer, und Wellen breiten sich über die Oberfläche des Wassers aus; sie gehen an Booten und Schiffen ohne jede Wirkung vorbei, und dann — nachdem sie vielleicht Tausende von Meilen weit gezogen sind — treffen sie plötzlich auf ein Schiff, auf das sie eine katastrophale Wirkung ausüben; eine Planke wird aus der Seite des Schiffes herausgerissen und in die Luft geschleudert, 25 m hoch, oder auch nur 15 oder 5 m hoch; alle Zahlen erscheinen gleich sinnlos. Und doch ist dies eine vollkommen korrekte Parallele zu einer Erklärung des lichtelektrischen Effekts vom Standpunkt der Wellentheorie aus.

Es gibt nur einen einzigen Weg, der aus der Schwierigkeit herausführt, er ist ganz einfach und direkt und wird allen experimentellen Beobachtungen, mit denen wir uns eben beschäftigt haben, gerecht. Um die Tatsachen sinnvoll zu vereinen, müssen wir uns die Röntgenstrahlen als Korpuskeln irgendwelcher Art vorstellen, die die Energie der Elektronen in der Röntgenröhre in dem

Augenblick und an der Stelle aufnehmen, wo diese Elektronen ein Atom der Antikathode treffen. Die Röntgenstrahlen bewegen sich dann als bestimmte Einheiten fort. Sie haben die Fähigkeit, das Glas der Röhre und andere Körper zu durchdringen, aber schließlich wird bei einem ihrer unzähligen Zusammenstöße mit anderen Atomen der Vorgang, durch den sie entstanden sind, wieder umgekehrt; ihre Energie wird auf ein Elektron übertragen, das sich so fortbewegt, wie es der Versuch von Innes lehrt. Bei dieser Auffassung kommt es nicht mehr so sehr darauf an, was für ein Atom den ersten oder zweiten Wechsel hervorruft, und die Geschwindigkeit des zweiten Elektrons kann sehr wohl gleich oder ungefähr gleich der des ersten Elektrons sein. Es ist jetzt auch sehr gut möglich, daß ein Zusammenhang zwischen der Bewegungsrichtung des Röntgen- oder Gammastrahles und der des Elektrons besteht, das denselben erzeugt, oder von ihm erzeugt wird.

Dies ist eine Korpuskulartheorie; wir sind also jetzt zu dem Punkt gekommen, wo man auf Grund der beobachteten Erscheinungen eher eine Korpuskel annehmen muß als eine Welle, mit der wir bis hierher so gut ausgekommen waren.

Aber was für eine Art Korpuskel soll man sich vorstellen, die all dies leisten kann? Vor vielen Jahren (*Philosophical Magazine*, Oktober 1907 ff.) habe ich vorgeschlagen, eine Verbindung eines Elektrons und einer positiven Masse mit der gleichen elektrischen Ladung anzunehmen, also ein sozusagen „neutrales Paar“. Da ein solches Paar keinerlei elektrische Ladung trägt, kann man annehmen, daß es die Materie viel leichter durchdringen kann, als es jeder seiner Bestandteile für sich vermöchte, denn die elektrischen und magnetischen Kraftfelder des Paares würden auf einen sehr engen Raum beschränkt sein. Ich nahm ferner an, das Paar könne aus den beiden korpuskularen Strahlungen der radioaktiven Substanzen bestehen, aus einem Elektron und einem positiv geladenen Heliumatom. Diese Annahme erschien nicht so unwahrscheinlich; denn man wußte damals noch nicht sicher, daß die Röntgenstrahlen im Wesen dasselbe waren wie das Licht. Als es sich dann später herausstellte, daß die Röntgenstrahlen ebensogut Wellen waren wie Licht und das Licht ebenso sehr einen korpuskularen Charakter hatte, wie die Röntgenstrahlen ihn zu haben schienen, da konnte man Licht und Röntgenstrahlen nicht mehr als so verschiedenartige Erscheinungen ansehen, wie es die Hypothese von dem neutralen Paar erforderte.

Das Energiebündel, das an die Stelle von Newtons Koruskel getreten ist, nennt man heute ein Photon. Licht aller Wellenlängen, Röntgenstrahlen, ultrarote Strahlen und so weiter können als Ströme von Photonen betrachtet werden. Die Vorstellung vom neutralen Paar hat man aber nicht vollständig aufgegeben, da man in letzter Zeit Anzeichen für das Vorhandensein von sogenannten Neutronen gefunden hat. Diese bestehen aus einer sehr engen Verbindung eines Elektrons mit einem positiv geladenen Element, einem Proton.

Mit einer genialen Versuchsanordnung gelang es C. T. R. Wilson im Jahre 1911, auf eine ganz neue Art und Weise die experimentellen Beobachtungen und die daraus gezogenen Schlüsse, die wir eben besprochen haben, zu bestätigen. Seine Methode lieferte direkt sichtbare Bilder von überzeugender Beweiskraft. Sie beruht auf gewissen physikalischen Erscheinungen, die wir kurz erklären wollen.

Zunächst muß man beachten, daß ein Elektron, das sich durch ein Gas bewegt, imstande ist, von einigen der Atome, die es durchquert oder an denen es vorbeikommt, Elektronen abzutrennen. Hierzu muß seine Geschwindigkeit oberhalb einer gewissen Grenze liegen. Sie muß etwas über hundert Millionen Zentimeter in der Sekunde betragen. Ein langsames Elektron geht nämlich überhaupt nicht durch ein Gas hindurch, sondern wird praktisch schon von dem ersten Atom, mit dem es zusammenstößt, aufgehalten und absorbiert. Ein Elektron, das von einem Röntgenstrahl ausgelöst worden ist, hat eine etwa zehn- bis hundertmal größere Geschwindigkeit, und ein Elektron, das durch einen Gammastrahl entstanden ist, bewegt sich noch viel schneller. Der Weg, den das erstere in irgendeinem Gas bei normalem Druck und normaler Temperatur zurücklegen kann, mag einige Millimeter oder Zentimeter betragen, der des letzteren einige Meter. Dieser Weg, ob kurz oder lang, ist in jedem Falle durch Atome gekennzeichnet, von denen entweder Elektronen abgetrennt worden sind, oder an die sich die losgelösten Elektronen vorübergehend angehängt haben. Längs des Weges, den das Elektron zurückgelegt hat, finden sich daher positiv und negativ geladene Atome. Es setzt allerdings sofort eine Wiedervereinigung ein, bei der die Atome mit überzähligen Elektronen diese an Atome, die zu wenig Elektronen haben, abgeben; aber für einige Sekunden oder Minuten sind beide Arten von Atomen vorhanden.

Die zweite Grundlage dieses schönen Versuches ist eine wohlbekanntere Erscheinung. Wenn ein Gas sich ausdehnt, kühlt es sich ab, denn es verbraucht bei diesem Vorgang Energie, und diese Energie muß es seinem Wärmeverrat entnehmen. In dem Gase enthaltene Feuchtigkeit hat dabei das Bestreben, sich zu kondensieren. Meteorologen erklären so die Wolkenbildung und den Regen, die oft auf ein plötzliches Sinken des Luftdruckes folgen.

Eine derartige Kondensation von Feuchtigkeit findet besonders an solchen Atomen oder auch größeren Partikeln statt, die eine elektrische Ladung tragen.

Das Wesen des Versuches dürfte jetzt wohl klar sein. Sind Spuren von Elektronenbahnen mit ihren elektrisch geladenen

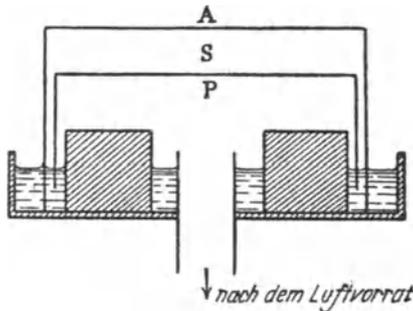


Abb. 110. Diese Zeichnung erläutert das Prinzip der Wilsonschen Nebelkammer. Innerhalb der Kammer, deren Deckel *A* aus Glas besteht, kann ein Kolben *P* sich auf und ab bewegen. Der Raum unterhalb von *P* steht mit einem Luftvorrat in Verbindung, dessen Druck verändert werden kann. In dem Raume *S* werden die Spuren beobachtet. Er ist gegen den Raum unter *P* und gegen die Außenluft durch einen Wasserverschluß abgesperrt, wie er in einem Gasometer benutzt wird. Wenn man den Druck unter *P* steigert, dann geht *P* nach oben in die eingezeichnete Lage; wenn danach der Druck unter *P* plötzlich verringert wird, dann saust *P* nach unten, die Luft in *S* dehnt sich aus und kühlt sich dabei ab. Wenn irgendwelche Spuren von Elektronen oder Alphateilchen vorhanden sind, dann bilden sich auf ihnen Wassertropfchen, die bei greller Beleuchtung photographiert werden können.

Trümmern in einem feuchten Gas vorhanden, das man sich plötzlich ausdehnen läßt, dann wird sich die Feuchtigkeit in erster Linie auf den Spuren kondensieren, und diese erscheinen unter geeigneter Beleuchtung als weiße Striche auf einem dunklen Hintergrund. Auf diese Weise werden die Wege der Elektronen sichtbar.

Die Apparatur hierzu ist in ihren Grundzügen außerordentlich einfach (Abb. 110). Sie besteht aus einem Metallzylinder von einigen Zentimetern Durchmesser mit einem Deckel aus Glas. Der

Boden des Zylinders besteht aus einem Kolben, der um eine beliebige Strecke herausgezogen werden kann. Dabei dehnt sich die Luft im Zylinder aus und kühlt sich gleichzeitig ab. Die Luft wird durch die Anwesenheit einer kleinen Menge Wasser feucht gehalten. Die Strahlen, die man untersuchen will, läßt man durch geeignete Öffnungen in der Wand eintreten, oder durch radioaktive Substanzen in der Kammer selbst entstehen.

Beispiele hiervon zeigen die Tafeln XXV und XXVI. Man sieht sofort, daß diejenigen Spuren, die von der Wirkung von Röntgenstrahlen herrühren, innerhalb der Kammer entstehen und enden. Ihre gebrochene und unregelmäßige Form rührt von den dauernden Ablenkungen her, die die Elektronen auf ihrem Wege durch das Gas erfahren. Mitunter kommen auch scharfe Knicke vor; in diesen Fällen hat ein Elektron ein Atom ziemlich zentral getroffen und ist etwas in das Innere des Atoms eingedrungen. Dabei ist es ungewöhnlich nahe an den Kern herangekommen und hier scharf abgebogen worden, ähnlich wie ein Komet, der nahe an die Sonne herangekommen ist. Der unterbrochene Verlauf der Spuren kommt daher, daß die getroffenen und von den Strahlen durchquerten Atome verschieden reagieren. Manchmal wird nur ein einzelnes Elektron entfernt und manchmal mehrere, dicht beieinander liegende. Mitunter wird auch durch das erste Elektron ein anderes Elektron so heftig herausgeschleudert, daß dieses infolge der dabei erhaltenen großen Bewegungsenergie seinerseits wieder einige Elektronen aus anderen von ihm getroffenen Atomen auslösen kann. Am Ende seiner Bahn wird die Wirkung eines Elektrons kräftiger, da es mit abnehmender Geschwindigkeit etwas länger in jedem Atom bleibt, in das es eingedrungen ist. Am Anfang seines Weges kann es infolge seiner größeren Geschwindigkeit ein Atom schneller durchfliegen, und richtet daher weniger Schaden an. Bei den Betastrahlen der Tafel XXV C sieht man dies besonders deutlich; in manchen Fällen ist deren Geschwindigkeit so groß, daß nur wenige Tropfen verstreut auf ihrem Wege liegen. Dieser ist dann verhältnismäßig geradlinig und manchmal nur mit Mühe zu erkennen. Man beachte, daß die Elektronenspuren um so länger werden, je durchdringender die sie erzeugenden Röntgenstrahlen sind.

In einem der vorangehenden Kapitel sahen wir, daß ultraviolettes Licht einen negativ aufgeladenen Konduktor entladen kann. Dies ist der gleiche Vorgang wie das Auslösen der Elektronen

durch Röntgenstrahlen. Das ultraviolette Licht treibt aus den getroffenen Atomen ebenfalls Elektronen heraus. Die Geschwindigkeit der Elektronen ist in diesem Falle aber viel geringer, so daß man den Effekt nur unter günstigen Umständen beobachten kann. Die Elektronen bewegen sich so langsam, daß die Art der Substanz, auf die das Licht fällt, eine Rolle spielt. Das Herauskommen der Elektronen wird dadurch erschwert, daß schwache elektrische Kräfte entgegenwirken, die bei den einzelnen Substanzen verschieden groß sind. Diese Kräfte sind viel zu klein, um die Wirkung der Röntgenstrahlen zu beeinflussen, aber beim Licht können sie den photoelektrischen Effekt bis zum völligen Verschwinden bringen. So kann eine reine Zinkoberfläche leicht entladen werden, der Effekt hört jedoch fast vollständig auf, wenn die Oberfläche der Luft ausgesetzt und dadurch verunreinigt wird.

Die längeren Lichtwellen haben ohne Zweifel dieselbe Wirkung wie die kürzeren. Sie können ebenfalls auf die einzelnen Elektronen im Atom einwirken. Sie übertragen jedoch nicht genug Energie, um den Elektronen die Loslösung vom Atom zu ermöglichen. Vielleicht ist dies der Grund dafür, daß wir die ultraroten Strahlen nicht sehen können; die Empfindlichkeit des Auges scheint nämlich auf elektrischen Wirkungen zu beruhen, die in einer Verlagerung von Elektronen bestehen müssen. Wir können auch annehmen, daß aus demselben Grunde die sehr kurzen Strahlen, die ultravioletten und so weiter, schädlich sind, weil sie die Elektronen in zu schnelle Bewegung versetzen und deshalb zu kräftig wirken. Aus demselben Grunde wirken die kurzen Strahlen sehr energisch auf die photographische Platte, während es schwierig ist, Platten so zu präparieren, daß sie für das Ultrarot empfindlich sind.

Das Bild, das wir so von dem Zusammenwirken der Elektronen und der verschiedenen Arten von Strahlen erhalten, ist in seinen Grundzügen einfach und vollständig. Ein Elektron wird in der Röntgenröhre in Bewegung gesetzt. Es trifft ein Atom der Antikathode, und im selben Augenblick wird seine Energie auf ein Etwas übertragen, das man neuerdings ein Photon nennt. Dieses Photon fliegt geradlinig fort und kann, je nach seiner Energie, verschiedene Stoffe mehr oder weniger durchdringen. Früher oder später hört dieses Durchdringen von Atomen auf, weil irgendein Zusammenstoß das Photon vernichtet: es verschwindet und an seiner Stelle tritt wieder ein Elektron als Träger der Energie auf.

Das Elektron — nicht aber das Photon — verliert bei seinem Fluge Energie, da es von den Atomen, an denen es vorbeikommt, Elektronen losreißt. Manchmal kann es bei einem Zusammenstoß seine gesamte noch vorhandene Energie verlieren, wobei diese zur Erzeugung eines neuen Photons verbraucht wird. In anderen Fällen wird die Energie schließlich in Form von Wärme oder chemischer Energie abgegeben. Manchmal, so scheint es, sind die Zusammenstöße nicht einfacher Natur, die Energie eines Photons oder Elektrons kann bei einem einzigen Zusammenstoß auf ein Photon und ein Elektron verteilt werden; aber obwohl diese Nebenerscheinungen sehr interessant und außerordentlich wichtig für das Verständnis des ganzen Vorganges sind, können wir sie in unsere kurze Beschreibung nicht mit aufnehmen. Die Hauptsache ist, daß es zwei elementare Größen gibt, von denen die eine elektrisch geladen ist und die andere nicht; beide können Energie durch den Raum übertragen und sie auch gelegentlich, jede auf ihre Art und Weise, abgeben, wobei sie ihre Last gegenseitig austauschen.

Diese Vorstellung vom Licht in allen seinen Formen steht, zum mindesten in den äußeren Erscheinungen, im Widerspruch zu der Wellentheorie, die so nützlich war und es noch ist. Ehe wir aber versuchen, uns mit diesem Widerspruch zu befassen, müssen wir unsere Betrachtungen noch etwas weiter ausdehnen, wobei wir finden werden, daß es noch viel mehr zu erklären gibt.

Das Licht in seinen verschiedenen Formen verhält sich manchmal wie eine Welle und manchmal wie eine Korpuskel; ist es nicht vielleicht möglich, daß manches, was wir bisher als Korpuskel anzusehen gewohnt waren, sich unter bestimmten Umständen wie eine Welle verhält?

Man hat die Probe gemacht, und es ergab sich, daß derselbe Dualismus auch hier auftritt. Es ist sogar sehr leicht, dies zu zeigen, wenn man geeignete Bedingungen wählt; aber erst als man von der theoretischen Möglichkeit überzeugt war, hat man in den letzten Jahren sorgfältige Versuche angestellt und dann endlich geeignete Versuchsbedingungen gefunden. Läßt man ein feines Bündel von Elektronen auf einen Kristall fallen, so erhält man ein Beugungsbild, das für diesen Fall charakteristisch, aber offenbar von derselben Art wie die Beugungsbilder der Röntgenstrahlen ist. Unser Beispiel in Tafel XXVI B stammt von G. P. Thomson. Das

Durchdringungsvermögen der Elektronen ist außerordentlich klein, so daß man äußerst dünne Kristallschichten verwenden muß; andererseits kann man auch den gleichen Erfolg durch Reflexion an Kristalloberflächen erzielen. Nachdem nun aber einmal die technischen Schwierigkeiten überwunden sind, ist der Effekt leicht zu zeigen. Hier verhalten sich die Elektronen also wie Wellen.

Schließlich bleibt noch das Atom selbst übrig, das man sich nie anders als ein Stück Materie vorgestellt hat. Hier ist der Versuch nicht so einfach, aber es scheint, daß auch ein Strom von Atomen, der auf einen Kristall fällt, ein Beugungsbild liefert. So geht durch den ganzen Bereich der elementaren Größen, die wir kennen, dieses doppelte Verhalten; sie können sich alle, je nach den Umständen, wie Korpuskeln oder wie Wellen verhalten. Damit wird unsere Unterscheidung zwischen Materie und Strahlung zu einem Unterschied des Grades und nicht der Art.

In dieser kurzen Übersicht über das Thema fehlen natürlich eine Anzahl von experimentellen Ergebnissen und von theoretischen Betrachtungen und Zusammenhängen, durch die das Bild umfassender geworden wäre und mehr Einzelheiten gezeigt hätte. Aber Raum und Zeit im prosaischen Sinne dieser Worte haben uns eine Grenze gesetzt.

Diese Erweiterung unserer Anschauungen über das Wesen der Dinge ist sicher eines der erstaunlichsten Ergebnisse moderner Forschung. Niemand konnte eine so grundlegende Einheitlichkeit voraussagen. Ein Aufsteigen des Nebels hat uns dort Zusammenhänge und Ähnlichkeiten gezeigt, wo wir Trennung und Verschiedenheit angenommen hatten. Sichtbares und unsichtbares Licht, Röntgenstrahlen, die Strahlen der radioaktiven Substanzen, Elektronen, ja, die Materie selbst, haben, wie wir jetzt sehen, gemeinsame Grundeigenschaften, und sie scheinen auf irgendeine Art, die wir noch nicht ganz verstehen, eins zu sein. Die größte Schwierigkeit für das Verständnis scheint mir darin zu liegen, daß wir nicht wissen, was man sich unter einem Etwas vorstellen soll, das in einem Augenblick als Welle und im nächsten als Korpuskel aufgefaßt werden kann. Wie sollen wir diesen anscheinenden Widerspruch verstehen?

Wahrscheinlich sind wir hier an einem Punkt angelangt, wo die persönliche Neigung des einzelnen die Wahl der Ausdrucksweise

bestimmt. Der Tatbestand ist, daß eine Anzahl von Vorgängen in der Natur am besten mit Hilfe einer Wellentheorie zusammengefaßt werden können, während eine andere ebenso wichtige Gruppe von Erscheinungen sehr klar mit den Ausdrücken einer korpuskularen Theorie beschrieben werden kann. Wie Jeans schon gesagt hat, haben wir offenbar nicht das Recht, zu erwarten, daß es uns immer gelingen wird, neue Erscheinungen und neue Gedanken mit alten Ausdrücken zu beschreiben. Unser Gebrauch von Welle und Korpuskel ist — jede an ihrem Platze — vollständig richtig, aber wenn wir geeignetere Bilder zur Verfügung hätten, könnten wir vielleicht eher einen Widerspruch vermeiden. Die Entwicklung des neuen Gebietes der Wellenmechanik zeigt, wie wir uns vielleicht allmählich zu einer günstigeren Lage vortasten können. Wenn ein örtlich begrenzter Windstoß Wellen auf einem bestimmten Teil der Meeresoberfläche erregt, ziehen die Wellen als Gruppe, als etwas deutlich abgegrenztes Ganzes fort. Die Gruppe als Ganzes hat eine andere Geschwindigkeit, als die einzelnen Wellen in ihr, die dauernd von hinten nach vorne die Gruppe durchziehen und dann absterben. Man muß zweierlei deutlich unterscheiden: die Gruppe als Ganzes und die Wellen in ihr. Die Gruppe enthält bei ihrem Fortschreiten einen bestimmten Betrag von Energie; die Wellen werden, wenn ihre Wege sich kreuzen, alle Erscheinungen der Interferenz zeigen. Hier haben wir einen Parallellfall zum Photon in seinen beiden charakteristischen Formen. Die Versuche, die Eigenschaften von Strahlungen auf diese neue Weise auszudrücken, haben schon sehr bemerkenswerte Erfolge gehabt.

Es zeigt sich ganz deutlich, daß wir nicht für alle Zeiten alle Erscheinungen und ihre Folgen in Ausdrücken, die wir heute wählen, festlegen können. Als Whewell in seiner „Geschichte der induktiven Wissenschaften“ die allmähliche Entwicklung der Wellentheorie des Lichtes beschrieb, da betonte er, daß jede neue Entdeckung ausgezeichnet in das von der Theorie gegebene Schema paßte und er rief aus, dies sei das Merkmal einer richtigen Theorie im Gegensatz zu einer falschen: die Korpuskulartheorie des Newton sei erledigt, und die Wellentheorie habe für immer ihren Platz eingenommen. Die heutige Unterbrechung im Siegeszuge der Wellentheorie hat dieser große Geist nicht vorhergesehen. Der Wert der beiden alten Theorien, ebenso wie der der neuen Wellenmechanik und anderer noch ungeborener Vorstellungen liegt nur darin, daß sie Gruppen von beobachteten Erscheinungen

zusammenfassen und uns befähigen, klärer zu denken und neue Forschungsrichtungen zu finden. Wenn, wie es augenblicklich der Fall ist, Widersprüche auftreten, die uns verwirren, dann müssen sie an der Unvollkommenheit unserer Theorien und unserer Vorstellungen liegen, und wir brauchen uns nicht zu sehr anzustrengen, sie aufzulösen. Die Lösung wird zu ihrer Zeit schon kommen, wenn unser Wissen durch neue Forschungen erweitert und dadurch unser Geist zu höheren Gesichtspunkten gelangt ist. Inzwischen haben wir ein wunderbares Prinzip kennengelernt, das alle Formen von Strahlung und alle Arten von Materie umfaßt. Mit Recht können wir sagen, die Welt besteht aus Licht, wenn wir diesem Wort die volle Bedeutung beilegen, die uns dieser Ausblick eröffnet hat.

Register

- A**chromatismus 82.
Äther 14.
Alphateilchen 167.
Andrade, Prof. E. N., Tafel XVA.
Anthocyan 94.
Anthoxanthin 96.
Appleton, Prof. E. V. 60.
Astigmatismus 45.
Auge 35.
Augen, Fehler der 36.
Auslösungshypothese der Röntgenstrahlen 210.
- B**abinet 123.
Bakterien 85.
Barnard, J. E., Tafel XIV B.
Bartolimus, Erasmus 130.
Beharrungsvermögen, optisches 51.
Bereich der Wellenlängen 69, 196.
Beugung 99.
Beugungseffekte 104, 106.
Beugungsgitter 104.
Beugung von Röntgenstrahlen durch Kristalle 184.
Bewegung, scheinbare 50.
Bewegung der Sterne 161.
Bidwell, Shelford 50.
Bilder 15.
Brechung 52.
Brechung durch die Atmosphäre 55.
Brennweite einer Linse 33.
- C**hlorophyll 92.
Crookes 179, 203.
- D**alton 77.
Diamant 62.
Dollond 84.
Dopplereffekt 171.
- E**igenschaften des Lichtes 69, 128.
Elektronen 181.
Elektronenbeugung 217.
Entfernung d. Mondes u. d. Sonne 160.
Entfernung der Sterne 157.
Eosin, Fluoreszenz von 176.
Eriometer 126.
- F**arbenorgel 76.
Farbentäuschungen 79.
Farbstoffe 91.
Farbstoffe, Wirkung von 71.
Fata Morgana 58.
Fernrohr 43.
Fluoreszenz 174.
Fraunhofersche Figuren, Tafel XXIII C.
Fresnel 7, 140.
Funkeln der Sterne 172.
- G**alilei 162.
Gammastrahlen 196.
- H**aidingersche Büschel 142.
Halbschatten 24.
Helium 167.
Huygens 6, 129.
- I**ndigo 97.
Innes 207.
Interferenz 107.
Isländer Kalkspat 130.
- J**eans, Sir James 160, 219.
- K**alkspat, Anordnung der Atome im 144.
Karotin 93.
Kathode 180.
Kennelly-Heaviside-Schicht 60.
Komplementärfarben 78.
Konkavspiegel 19.
Konvexspiegel 18.
Korpuskulartheorie des Lichtes 6.
der Röntgenstrahlen 212.
Kristalle und Röntgenstrahlen 184.
- L**aeue, v. 179, 183.
Lauebilder 184, 195.
Licht, Geschwindigkeit des 162.
Linse, Wirkung einer 32.
Lochbilder 22.
Lockyer 167.
Luftspiegelung 58.

- Malus** 138.
Mikroskop 42.
Mond, Entfernung von der Erde 160.
Mond, Höfe um den 120.
Mond, scheinbare Größe am Horizont 48.
Neutron 213.
Netzhaut 35.
Netzhaut, umgekehrtes Bild auf der 37.
Newton 6, 66, 129.
Newtons Fernrohr 83.
Newtonsche Ringe 113.
Newton und das Spektrum 66.
Nicolisches Prisma 149.
Ölmalerei 72.
Polarisation des Lichtes 141.
Polarisation des Lichtes vom Himmel 151.
Polarisation und Kristallstruktur 143.
Prisma zur Reflexion von Licht 57.
Quarz, Wärmeleitfähigkeit beim 145.
Raman, Sir C. V. 119.
Rayleigh, Lord 116, 117, 193.
Reflexion 8.
Reflexion an krummen Flächen 17.
Reflexion an ebenen Flächen 9.
Reflexion von Röntgenstrahlen durch Kristalle 184.
Regenbogen 86.
Resonanz 87.
Römer, Olaf 162.
Röntgen 179.
Röntgenanalyse 92
Röntgenröhre 201.
Röntgenstrahlen 179.
Röntgenstrahlen und Kristalle 184.
Schatten auf trübem Wasser 119.
Schimmer 25.
Schwingungen der Atome und Moleküle 91.
Schwingungen, transversale 140.
Sehen 20.
Seifenblase 109.
Sénarmont 145.
Sonne, Entfernung von der Erde 160.
Spektralanalyse 66.
Spektralanalyse des Lichtes der Sonne 166.
Spektralanalyse des Lichtes der Sterne 164.
Spektrallinien, Umkehr der 169.
Spiegelung 19.
Stearinsäure, Tafel XXIII B.
Sterne, Bewegungen der 156, 161.
Sterne, Entfernung der 157.
Sterne, Funkeln der 172.
Stirling 48.
Streuung von Licht 12.
Streuung durch Moleküle der Luft 116.
Täuschungen, optische 46.
Thompsons, Silvanus P. 131.
Thomson, Prof. G. P. 217.
Thomson, Sir J. J. 181, 203, 207.
Totalreflexion 56.
Transversale Schwingungen des Lichtes 140.
Tyndall 57, 117, 128.
Ultrarotphotographie 173.
Ultraviolettes Licht, Entladung von Elektrizität durch 177.
Ultraviolettes Licht zum Photographieren 85.
Ultraviolette Strahlen 174.
Umkehr der Spektrallinien 169.
Wasser, scheinbare Tiefe von 54.
Wasserfarben 72.
Whewell 219.
„Weiß“ 73.
Welle und Korpuskel 200.
Wellenbehälter 4.
Wellenform im Kristall 135.
Wellenlängen, Bereich der 69, 196.
Wellentheorie des Lichtes 2.
Wilson, Prof. C. T. R. 213.
Young, Thomas 7, 77, 108, 126.
Zauberspiegel, japanischer 27.
Zirkon 65.