

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

L. inv. ~~369~~

Geisteswelt

L. Graek  
Einführung in die Optik  
Das Licht  
und die Farben

Fünfte Auflage  
Oberrealschule  
Waldenburg

LB

III A i 97

B. G. Teubner · Leipzig · Berlin

# Die Sammlung

## „Aus Natur und Geisteswelt“

nummehr über 800 Bände umfassend, bietet wirkliche „Einführungen“ in abgeschlossene Wissensgebiete für den Unterricht oder Selbstunterricht des Laien nach den heutigen methodischen Anforderungen und erfüllen so ein Bedürfnis, dem weder umfangreiche Enzyklopädien noch skizzenhafte Abrisse entsprechen können. Die Bände wollen jedem geistig Mündigen die Möglichkeit schaffen, sich ohne besondere Vorkenntnisse an sicherster Quelle, wie sie die Darstellung durch berufene Vertreter der Wissenschaft bietet, über jedes Gebiet der Wissenschaft, Kunst und Technik zu unterrichten. Sie wollen ihn dabei zugleich unmittelbar im Beruf fördern, den Gesichtskreis erweiternd, die Einsicht in die Bedingungen der Berufsarbeit vertiefend.

Die Sammlung bietet aber auch dem Fachmann eine rasche zuverlässige Übersicht über die sich heute von Tag zu Tag weitenden Gebiete des geistigen Lebens in weitestem Umfang und vermag so vor allem auch dem immer stärker werdenden Bedürfnis des Forschers zu dienen, sich auf den Nachbargebieten auf dem laufenden zu erhalten. In den Dienst dieser Aufgaben haben sich darum auch in dankenswerter Weise von Anfang an die besten Namen gestellt, gern die Gelegenheit benutzend, sich an weiteste Kreise zu wenden.

Seit Herbst 1925 ist eine Neuerung insofern eingetreten, als neben den Bänden im bisherigen Umfange solche in erweitertem, etwa anderthalbfachem zu  $1\frac{1}{2}$  fachem Preise ausgegeben werden, weil abgeschlossene Darstellungen größerer Gebiete auf beschränkterem Raume heute schwer möglich sind. Diese Bände, die die Nummern von 1001 ab tragen, erscheinen, um die Einheitlichkeit der Sammlung zu wahren, in der gleichen Ausstattung wie die übrigen Bände. Sie sind nur auf dem Rückentitel durch je ein Sternchen über und unter der Nummer besonders gekennzeichnet.

Alles in allem sind die schmucken, gehaltvollen Bände besonders geeignet, die Freude am Buche zu wecken und daran zu gewöhnen, einen Betrag, den man für Erfüllung körperlicher Bedürfnisse nicht anzusehen pflegt, auch für die Befriedigung geistiger anzuwenden.

... der meist reich illustrierten Bände  
Biblioteka Politechniki Krakowskiej

Leipzig, t



100000295886

W. Teubner

## Bisher sind zur **Physik und Chemie** erschienen:

### **Physik: Einführung, Grundlagen und Geschichte.**

**Naturphilosophie.** Von Prof. Dr. J. M. Verwehen. 2. Aufl. (Bd. 491.)

**Die Grundbegriffe der modernen Naturlehre.** Einführung in die Physik. Von Hofrat Prof. Dr. J. Auerbach. 5. Aufl. Mit 63 Fig. (Bd. 40.)

**Einführung in die Experimentalphysik, Gleichgewicht und Bewegung.** Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. K. Börnstein. Mit 90 Abb. (Bd. 371.)

**Einführung in die Relativitätstheorie.** Von Dr. W. Bloch. 4. Aufl. Mit 18 Fig. (Bd. 618.)

**Naturwissenschaften, Mathematik und Medizin im klassischen Altertum.** Von Prof. Dr. Job. E. Heiberg. 2. Aufl. Mit 2 Fig. (Bd. 370.)

**Physikalisches Wörterbuch.** Von Prof. Dr. G. Verndt. (Leubners kl. Fachwörterbücher Bd. 5.)

### **Mechanik.**

**Mechanik.** Von Prof. Dr. G. Hamel. 3 Bde. (Bd. 684/86.) I. Grundbegriffe der Mechanik. Mit 98 Fig. i. T. \*II. Mechanik der festen Körper. \*III. Mechanik der flüssigen und luftförmigen Körper.

**Aufgaben aus der techn. Mechanik.** Von Prof. N. Schmitt. 2 Bde. (Bd. 558/559.)

I. Bewegungslehre, Statik und Festigkeitslehre. 2. Aufl. 240 Aufgaben u. Lösungen. Mit zahlr. Fig. i. T.

II. Dynamik und Hydraulik. 2. Aufl. bearb. von Studiendir. Prof. Dr. G. Wiegner. 198 Aufgaben u. Lösungen. Mit zahlr. Fig. i. T.

**Festigkeitslehre.** Von Gewerbeschulrat Oberstudiendir. A. Schau. 2. Aufl. Mit 119 Fig. i. T. (Bd. 829.)

### **Optik, angewandte Optik und Strahlungsercheinungen.**

**Das Licht und die Farben.** (Einführung in die Optik.) Von Prof. Dr. E. Graeh. 5. Aufl. Mit 100 Abb. (Bd. 17.)

**Sichtbare und unsichtbare Strahlen.** Von Geh. Regierungs-Rat Prof. Dr. K. Börnstein. 3., neubearb. Aufl. von Prof. Dr. E. Regenert. Mit 71 Abb. (Bd. 64.)

**Das Auge und die Brille.** Von Prof. Dr. M. v. Rohst. 2. Aufl. Mit 84 Abb. u. 1 Eichdrucktaf. (Bd. 372.)

**Einführung in die Mikrotechnik.** Von Prof. Dr. V. Franz u. Oberstudiendir. Dr. H. Schneider. Mit 18 Abb. (Bd. 765.)

**Spektroskopie.** Von Prof. Dr. E. Grebe. 2. Aufl. Mit 63 Fig. i. T. u. auf 2 Doppeltaf. (Bd. 284.)

**Die Kinematographie, ihre Grundlagen und ihre Anwendungen.** Von Dr. H. Lehmann. 2. Aufl. von Dr. W. Merté. Mit 68 7. T. neuen Abb. (Bd. 358.)

**Die Photographie, ihre wissenschaftlichen Grundlagen u. ihre Anwendung.** Von Dipl.-Ing. Dir. Dr. D. Prelinger. 2., verb. Aufl. Mit 64 Abb. i. T. (Bd. 414.)

**Die künstlerische Photographie.** Ihre Entwicklung, ihre Probleme, ihre Bedeutung. Von Studienrat Dr. W. Warstat. 2., verb. Aufl. Mit Bildertanhang. (Bd. 410.)

**Die Röntgenstrahlen und ihre Anwendung.** Von Dr. med. G. Budé. 2., verb. Aufl. Mit 94 Abb. i. T. u. auf 4 Taf. (Bd. 556.)

## Wärmelehre.

**Die Lehre von der Wärme.** Gemeinverständlich dargestellt von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. K. Börnstein. 2., durchgef. Aufl. Hrsrg. von Prof. Dr. A. Wigand. Mit 33 Abb. i. T. (Bd. 172.)

**Einführung in die technische Wärmelehre (Thermodynamik).** Von Geh. Bergrat Prof. K. Vater. 3. Aufl. von Prof. Dr. Fr. Schmidt. Mit 46 Abb. i. T. (Bd. 516.)

**Praktische Thermodynamik.** Aufgaben und Beispiele zur technischen Wärmelehre. Von Geh. Bergrat Prof. K. Vater. 2. Aufl. Hrsrg. von Prof. Dr. Fr. Schmidt. Mit 40 Abb. i. T. u. 3 Taf. (Bd. 596.)

## Einführung in die Chemie.

**Einführung in die allgemeine Chemie.** Von Oberstudientat Dr. B. Bavink. 2., verb. Aufl. Mit 24 Fig. (Bd. 582.)

**Einführung in die anorganische Chemie.** Von Oberstudientat Dr. B. Bavink. Mit 31 Abb. i. T. (Bd. 598.)

**Einführung in die organische Chemie.** (Natürliche und künstliche Pflanzen- und Tierstoffe.) Von Oberstudientat Dr. B. Bavink. 3. Aufl. Mit 9 Abb. i. T. (Bd. 187.)

**Einführung in die analytische Chemie.** Von Dr. S. Rüsberg. 2 Bde. I. Theorie und Gang der Analyse. Mit 15 Fig. i. T. II. Die Reaktionen. Mit 4 Fig. i. T. (Bd. 524/25.)

**Einführung in die Biochemie in elementarer Darstellung.** Von Prof. Dr. W. Löb. 2., durchgef. u. verm. Aufl. V. Prof. Dr. H. Friedenthal. M. 12 Fig. i. T. (Bd. 352.)

**Elektrochemie und ihre Anwendungen.** Von Prof. Dr. K. Arndt. 2. Aufl. Mit 37 Abb. i. T. (Bd. 234.)

**Das Radium und die Radioaktivität.** Von Prof. Dr. M. Centnerschwer. 2. Aufl. Mit 33 Fig. i. T. (Bd. 405.)

**Photochemie.** Von Prof. Dr. G. Kümmele. 2. Aufl. Mit 23 Abb. i. T. u. auf 1 Taf. (227.)

**Luft, Wasser, Licht und Wärme.** Einführung in die Experimentalchemie. Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. K. Blochmann. 5. Aufl. Mit 92 Abb. (Bd. 5.)

**Das Wasser.** Von Geh. Regierungsrat Dr. O. Anselmino. Mit 44 Abb. (Bd. 291.)

---

**Chemisches Wörterbuch.** Von Prof. Dr. H. Remé. Mit 15 Abb. i. T. u. 5 Tabellen im Anhang. (Leubners kl. Sachwörterbücher Bd. 10/11.)

## Chemische Technologie.

**Die künstliche Herstellung von Naturstoffen.** Von Prof. Dr. E. Rüst. (Bd. 674.)

**Der Luftstickstoff und seine Verwertung.** Von Prof. Dr. K. Kaiser. 2. Aufl. Mit 13 Abb. (Bd. 313.)

**Agrikulturchemie.** Von Dr. P. Kriese. 2., verb. Aufl. Mit 21 Abb. (Bd. 314.)

**Die Sprengstoffe, ihre Chemie und Technologie.** Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. R. Biedermann. 2. Aufl. Mit 12 Fig. (Bd. 286.)

**Bierbrauerei.** Von Dr. A. Bau. Mit 47 Abb. (Bd. 333.)

---

**Wörterbuch der Warenkunde.** Von Prof. Dr. M. Pietsch. (Leubners kleine Sachwörterbücher Bd. 9.)

## Naturlehre im Hause.

**Physik in Küche u. Haus.** Von Studiendir. Prof. H. Speittamp. 2. Aufl. Mit 54 Abb. (Bd. 478.)

**Chemie in Küche und Haus.** Von Dr. J. Klein. 5. Aufl. (Bd. 76.)

**Desinfektion, Sterilisation, Konservierung.** Von Regierungs- und Medizinalrat Dr. D. Solbrig. Mit 20 Abb. (Bd. 401.)

Weitere Bände befinden sich in Vorbereitung.

Aus Natur und Geisteswelt  
Sammlung wissenschaftlich-gemeinverständlicher Darstellungen

---

17. Band

# Das Licht und die Farben

(Einführung in die Optik)

Sechs Vorlesungen  
gehalten im Volkshochschulverein München

von

**Dr. Leo Graef**

Prof. a. d. Universität München

Fünfte Auflage

(21. — 25. Tausend)

Mit 100 Abbildungen



Verlag und Druck von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin 1922

*W 25*

1-301528

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA  
KRAKÓW

~~1369~~

Schutzformel für die Vereinigten Staaten von Amerika:  
Copyright 1922 by B. G. Teubner in Leipzig.

BPK 3-88/2877

Alle Rechte, einschließlich des Übersetzungsrechts, vorbehalten.

Akc. Nr.

~~3283~~ / 49

## Vorwort.

Die hier im Druck vorliegenden Vorlesungen wurden im Volkshochschulverein München vor einem Publikum gehalten, welches im wesentlichen aus den gebildeten Klassen, und zwar zu einem guten Teil aus Künstlern bestand. Nach der Zusammensetzung des Publikums richtete sich die Form der Vorträge. Für den Inhalt aber war bestimmend, daß keinerlei spezielle Kenntnisse vorausgesetzt werden durften, daß selbstverständlich von jeder Anwendung der Mathematik, so einfach sie auch wäre, abgesehen werden mußte, und daß doch das Verständnis für die hauptsächlichsten optischen Erscheinungen erzielt werden sollte. Eine große Reihe sorgfältig ausgewählter Experimente führte, um dieses Ziel in der kurzen Zeit zu erreichen, den Zuhörern alle wichtigen optischen Erscheinungen selbst vor Augen, und der Vortragende bemühte sich, aus diesen Erscheinungen vor den Zuhörern die entsprechenden Folgerungen zu entwickeln, die Gesetze der Optik sowohl, wie die Wellentheorie des Lichtes aus ihnen abzuleiten. Es gelang auf diese Weise, in den sechs Vorlesungsstunden, ausgehend von den einfachsten Erscheinungen der geradlinigen Ausbreitung, die Zuhörer allmählich in die Theorie der Farben einzuführen und sie bis zu den Erscheinungen der Polarisierung des Lichtes zu leiten, den Zusammenhang zwischen den optischen, thermischen, chemischen und elektrischen Strahlen darzulegen, die Wellentheorie des Lichtes zu begründen und durch Experimente zu stützen und endlich eine große Zahl von Anwendungen optischer Erscheinungen zu besprechen. Da so diese Vorlesungen eine kurze, aber abgerundete Darstellung der gesamten Optik geben, dürften sie auch, wie ich hoffe, in Buchform dem Ziele entsprechen, welches die Volkshochschulvorlesungen sich gesetzt haben, nämlich gründliches, sicheres Wissen in weitere Kreise zu tragen. Für den Druck wurden die Experimente durch eine große Zahl von Abbildungen ersetzt. Es sei besonders erwähnt, daß dieselben, soweit sie nicht schematisch sind, direkt nach den wirklichen Aufstellungen der betreffenden Apparate hergestellt wurden, so daß es leicht ist, nach ihnen die Versuchsanordnung richtig zu machen. Die fünfte Auflage wurde im einzelnen sorgfältig durchgesehen und an einigen Stellen die Darstellung verändert und erweitert.

München, im Frühjahr 1922.

Gracy.

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
<b>Erste Vorlesung.</b>	
<b>Geradlinige Ausbreitung, Zurückwerfung und Brechung des Lichts . . . . .</b>	<b>1</b>
Bogenlampe als Lichtquelle. Isolierung schmaler Lichtbündel. Geradlinige Ausbreitung derselben. Camera obscura. Schattenbildung. Regelmäßige Zurückwerfung des Lichts. Bilder von ebenen Spiegeln. Konkavspiegel. Reelle Bilder. Brennlinien. Diffuse Zurückwerfung. Brechung des Lichts. Brechungsgesetz. Totale Reflexion. Linsen. Bilder.	
<b>Zweite Vorlesung.</b>	
<b>Farbenzerstreuung, Farbenmischung, Spektre . . . . .</b>	<b>26</b>
Goethes und Newtons Theorien der Farben. Dispersion durch Prismen. Zerlegung des weißen Lichts. Homogene Farben. Zusammensetzung des weißen Lichts aus den Farben. Komplementäre Farben. Gelb und Blau geben zusammen Weiß. Körperfarben. Absorptionsspektre. Mischung von zwei und mehr Farben durch Addition. Purpur. Mischung durch Subtraktion. Farbige Flammen. Emissionsspektre. Spektralanalyse. Fraunhofer'sche Linien. Umkehrung der Natriumlinie. Konstitution der Sonne. Sonnenkorona. Helium.	
<b>Dritte Vorlesung.</b>	
<b>Interferenzen. Wellennatur des Lichts. Lichtäther . . . . .</b>	<b>48</b>
Farben der Seifenblasen. Newtons Farblingas. Interferenzen. Wellenbewegung. Wellenlänge. Schwingungszahl, Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts. Wann interferieren zwei Wellen? Versuche von Young und Fresnel und Modifikation derselben. Wellenlängen der verschiedenen Farben. Lichtäther.	
<b>Vierte Vorlesung.</b>	
<b>Einwände gegen die Wellentheorie. Beugungsercheinungen . . . . .</b>	<b>68</b>
Warum zeigen nur dünne Platten die Farben? Interferenzen im reflektierten weißen Licht von dickeren Platten und Seifenlamellen. Kann Licht um Ecken herumgehen? Beugung durch einen Spalt. Beugungsgitter. Normale Spektre. Reflexionsgitter. Die Beugungsercheinungen sind direkte Beweise für die Wellentheorie.	
<b>Fünfte Vorlesung.</b>	
<b>Ultrarote, ultraviolette Strahlen. Fluoreszenz. Phosphoreszenz. Photographie. Farbige Photographie . . . . .</b>	<b>81</b>
Wärmewirkung der Strahlen. Ultrarote Strahlen. Wellenlängen derselben. Reflexion und Brechung derselben. Chemische Wirkung der Strahlen. Ultraviolette Strahlen. Fluoreszenzerscheinungen. Sichtbarmachung der ultravioletten Strahlen. Uviolfilter. Phosphoreszenz. Umwandlung der Energie des absorbierten Lichts. Photographie mit Trockenplatten. Stehende Wellen. Lippmann'sche Farbenphotographie. Lumière'sche Farbenphotographie.	
<b>Sechste Vorlesung.</b>	
<b>Transversale Wellen. Doppelbrechung. Drehung . . . . .</b>	<b>106</b>
Wellenbewegungen können von zweierlei Art sein, longitudinal und transversal. Beobachtung von Malus. Der reflektierte Strahl ist polarisiert. Die Lichtwellen sind daher transversal. Doppelbrechung durch Kalkspat. Beide Strahlen sind polarisiert. Nicol'sche Prismen. Drehung der Polarisationsebene durch Zucker. Anwendung derselben im Zolldienst. Gipsblättchen zwischen Nicols. Erklärung der Farbenerscheinungen. Elektrische Wellen. Schluß.	
<b>Register . . . . .</b>	<b>129</b>

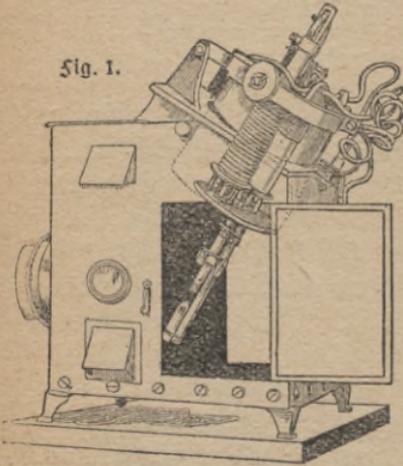
## Erste Vorlesung.

### Geradlinige Ausbreitung, Zurückwerfung und Brechung des Lichts.

Anders beobachtet der Naturfreund das Licht und die Farben in der Natur, anders der Künstler, anders der Forscher. Der Naturfreund genießt naiv das Zusammenspiel aller der Tausende von Einzelercheinungen des Lichtes, aus welchen das Bild einer Landschaft, eines Menschen, ja jedes einzelnen Gegenstandes sich kombiniert, ohne sich über das Zusammenwirken im allgemeinen irgendwie Rechenschaft geben zu wollen. Der Künstler beobachtet die Natur viel genauer und kennt sie auch viel genauer. Er muß bei jeder Einzelheit, um sie nachzubilden zu können, verweilen, er erkennt, wie sich die Beleuchtung jedes einzelnen Gegenstandes, ja jedes Theiles eines solchen, zusammensetzt aus so vielen Quellen, wie jede Veränderung in der Umgebung, wie jeder Wechsel in der Stellung von Gegenständen auch merkbare Unterschiede der Lichtwirkung hervorbringt. Aber ihm kommt es im allgemeinen immer nur auf das Resultat der Zusammensetzung an. Dies sucht er nachzubilden. Die Gesetze, nach denen die Erscheinungen vor sich gehen, sind ihm nur etwas Nebensächliches. Sie dienen ihm höchstens dazu, nicht direkt Beobachtetes auch richtig darzustellen, aber sie können ihm, eben wegen der Vielseitigkeit der Natur, nie die Beobachtung ersetzen. Diese Gesetze aber gerade sind die Freude und die Domäne des Naturforschers. Ihm löst sich das ganze Bild auf in seine Einzelheiten, von diesen Einzelheiten sucht er sich genaue Rechenschaft zu geben und er findet immer und immer wieder, nicht bloß im Gebiete des Lichtes, daß die Elemente, aus denen sich die Natur zusammensetzt, äußerst einfache sind, und daß die wunderbare Mannigfaltigkeit und Kompliziertheit alles dessen, was wir in der Natur vor uns sehen, sich nur aus dem Zusammenwirken einer sehr großen Menge von Elementen ergibt, die aber selbst die denkbar einfachsten sind.

Der Naturforscher, der Physiker, also muß stets versuchen, aus der verwirrenden Fülle der Erscheinungen aller Art sich die Elemente herauszufinden, die große Mannigfaltigkeit der Natur zu beschränken, die Erscheinungen zu isolieren. Derjenige, der zum erstenmal bewußterweise in ein dunkles Zimmer durch eine kleine Öffnung einen einzelnen schmalen Strahl von Sonnenlicht hineinfallen ließ, um ihn zu untersuchen, war ein echter Naturforscher. Sein Name ist nicht bekannt, aber seine Methode war die richtige. Ein solches enges Lichtbündel, gewisser-

Fig. 1.



maßen ein einziger Strahl, den wir verfolgen, muß sofort genaue und sichere Auskunft darüber geben, wie sich die verschiedenen Körper dem Lichte gegenüber verhalten, viel genauere, als wenn wir diese Auskunft ohne das Experiment, nur aus der Betrachtung der Natur, schöpfen wollten, da diese eben so mannigfaltig ist. Machen wir also dieses Experiment nach und sehen wir zu, was es uns zeigt. Ich kann natürlich wegen der Abendstunden dieser Vorlesungen einen Sonnenstrahl nicht in diesen Raum hineinlassen. Wir wollen uns eine künstliche Sonne, eine möglichst starke, möglichst weiße Lichtquelle verschaffen. Das elektrische Bogenlicht ist dazu vorzüglich geeignet. Es ist das hellste Licht, das wir künstlich erzeugen können, und ähnelt durchaus dem Lichte der Sonne. Ich habe hier in diesem Metallkasten (Fig. 1), den Sie jetzt geöffnet sehen, eine elektrische Bogenlampe. Bei einer solchen wird bekanntlich der elektrische Strom durch zwei Kohlen geleitet, welche hier einander schräg gegenübergestellt sind. Wenn diese Kohlen, durch die der elektrische Strom hindurchgeht, nach der anfänglichen Berührung voneinander getrennt werden, so daß sie einen Abstand von einigen Millimetern zwischen sich haben, so bringt der elektrische Strom eine starke Erhitzung der Kohlenenden bis zur hellen Weißglut hervor und bringt auch die Luftzwischenräume zum Leuchten. Dieses helle Licht soll uns also die Sonne ersetzen. Damit das Licht längere Zeit mit möglichst gleicher Stärke strahlt, besitzt diese Bogenlampe eine selbsttätige Regulierung, welche die Kohlen, auch wenn sie abbrennen, immer wieder in gleichen Abstand voneinander bringt. Diese Regulierungsvorrichtung, die in dem Aufsatz der Lampe, oben in der Figur,

enthalten ist, hier zu beschreiben, ist aber für unsere Zwecke nicht nötig.

Man kann auch einfacher eine Lampe anwen-

den, deren Kohlen mit der Hand nachgestellt werden. Hier genügt es uns, zu wissen, wie wir unsere helle Lichtquelle erzeugen können. Ganz allerdings ersetzt diese uns die Sonne noch nicht, und zwar aus zwei Gründen. Erstens ist kräftiges Sonnenlicht noch viel heller als elektrisches Licht, ein Umstand, mit dem wir uns notgedrungen abfinden müssen. Zweitens aber sind die Lichtstrahlen, die von der Sonne kommen, alle, wie man es nennt, parallel. Wenn man Sonnenlicht durch eine kreisrunde Öffnung *O* (Fig. 2) im Fensterladen fallen läßt, so bildet sich auf einer gegenüberliegenden Wand *S* ein heller Kreis *B* ab, der genau ebenso groß ist wie die Öffnung. Das beruht eben darauf, daß die Strahlen von der Sonne, da diese sehr weit entfernt ist, parallel auf die Öffnung fallen. Ganz anders ist es zunächst bei unserer Bogenlampe. Lassen wir das Licht unserer Kohlen (Fig. 3) durch eine kreisrunde Öffnung *B* der Lampe auf die Wand fallen, so wird der dort entstehende Kreis um so größer, je weiter die Wand

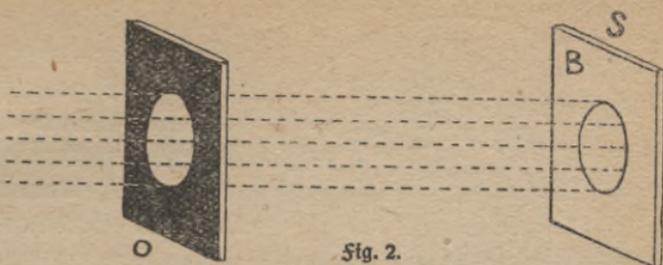


Fig. 2.

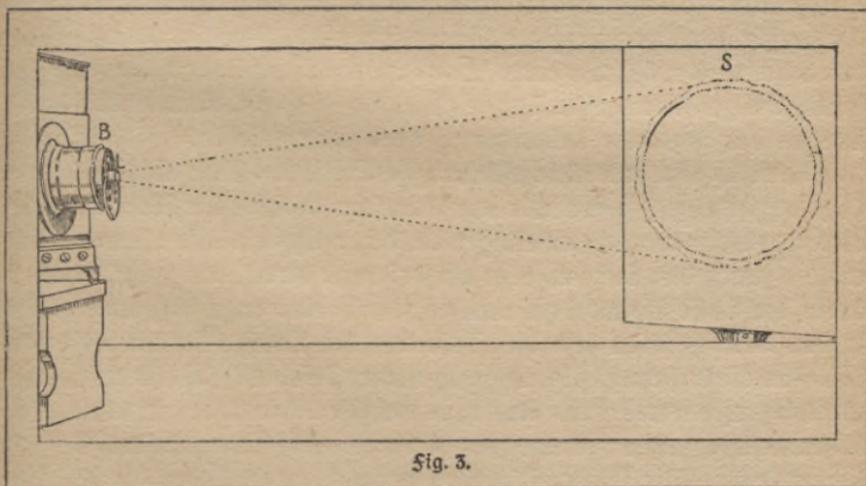


Fig. 3.

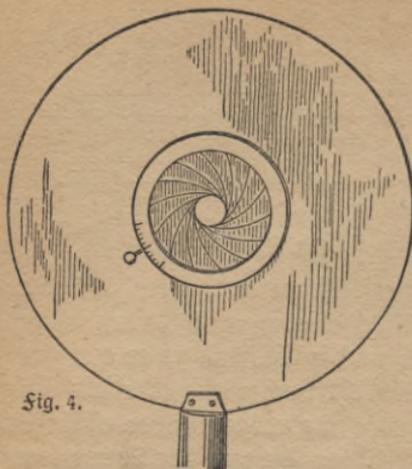


Fig. 4.

von der Öffnung absteht, und die Ränder werden ganz unscharf. Das Licht der Bogenlampe ist eben nicht parallel, sondern es ist divergent. Wir können aber diesen Mangel durch eine optische Vorrichtung beseitigen, die wir allerdings erst später verstehen lernen werden. Wir bringen nämlich vorn an der Lampe in ihrem Ansaß, den man in Figur 1 sieht, eine passende Glaslinse an. Durch diese können wir die hindurchgehenden Strahlen alle parallel machen, so daß sie uns in dieser Beziehung

die Sonnenstrahlen möglichst ersetzen. In der That, wenn wir nun vor die Lampenöffnung einen schwarzen Schirm mit einer kreisförmigen Öffnung stellen und das Licht der Lampe durch diese Öffnung hindurch auf eine weiße Wand fallen lassen, so erhalten wir dort einen Kreis von derselben Größe wie die Öffnung.

Es ist für unsere Zwecke die erste Aufgabe, dünne, schmale Lichtbündel allein zu betrachten. Um solche zu erhalten, bedienen wir uns der in Figur 4 abgebildeten Irisblende, die wir vor die Öffnung der Lampe setzen. Durch Drehen des Knopfes verschieben sich die passend geformten Stahlblätter so, daß in der Mitte immer ein Loch von verschiedener Größe für den Durchgang des Lichtes frei wird. Auch können wir durch den Spalt (Fig. 5) statt eines kreisförmigen Lichtbündels ein schmales spaltförmiges durchgehen lassen. Den Spalt selbst können wir durch Drehen der Schraube beliebig eng oder weit machen.

Wie rasch wir nun neue und präzise Einsichten über die Gesetze des Lichtes gewinnen, wenn wir nur mit sehr dünnen Lichtbündeln operieren, werden wir jetzt an einigen einfachen Experimenten lernen. Wir wollen zuerst das Licht unserer Bogenlampe direkt, das heißt, ohne es durch die Linse parallel zu machen, durch eine enge Öffnung gehen lassen. Wir nehmen also die Linse aus der Lampe heraus und verschließen die Öffnung (Fig. 6) durch unsere Irisblende B, deren kleinste Öffnung wir anwenden. Auf dem weißen Schirm, der in etwa 6 m Abstand steht, sehen wir nun ganz direkt eine Abbildung unseres Bogenlichtes selbst. Wir sehen die beiden helleuchtenden Enden der Kohlen-

stäbe und dazwischen die bläulich leuchtende Luftschicht. Wenn wir aber genauer beobachten, so finden wir, daß das Bild auf dem Schirm umgekehrt ist. Die Kohle, die in der Lampe oben ist, ist im Bild unten, und umgekehrt.

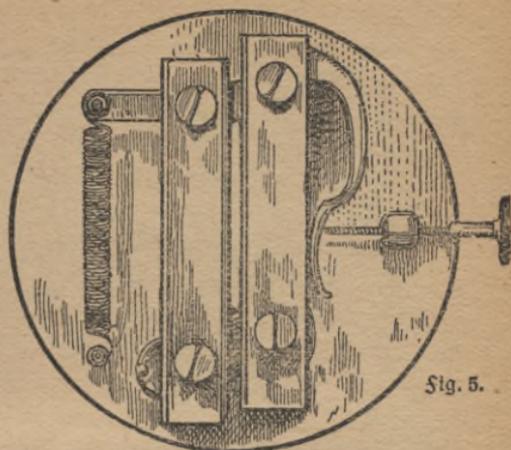


Fig. 5.

Was sagt uns dieses Experiment aus, wie können wir das am einfachsten in ein Gefäß fassen? Offenbar geht von allen leuchtenden Stellen des Bogenlichts, von den Kohlen sowohl wie von der leuchtenden Luftschicht, Licht nach allen Seiten aus. Dadurch aber, daß wir die ganze Lampe eingeschlossen und nur die eine kleine Öffnung gelassen haben, dringt nach außen nur dasjenige Licht, welches durch die kleine Öffnung gegangen ist. Und nun zeigt uns unser Experiment folgendes. Nehmen wir von dem Bild auf dem Schirm irgendeinen Punkt heraus, z. B. den obersten Punkt der zugespitzten Kohle (die in dem Bild die obere ist), und denken wir uns von diesem Punkt eine Linie zu der kreisförmigen Öffnung gezogen und weiter verlängert, so trifft diese Linie genau den obersten Punkt der zugespitzten Kohle in der Lampe, die dort die untere ist. Das heißt, das Licht hat sich von diesem Punkte der Kohle ganz geradlinig durch die enge Öffnung fortgepflanzt, bis es auf den Schirm fällt. Das-

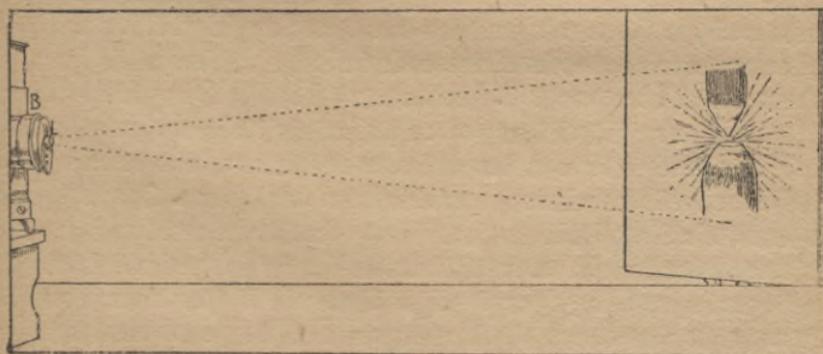


Fig. 6.

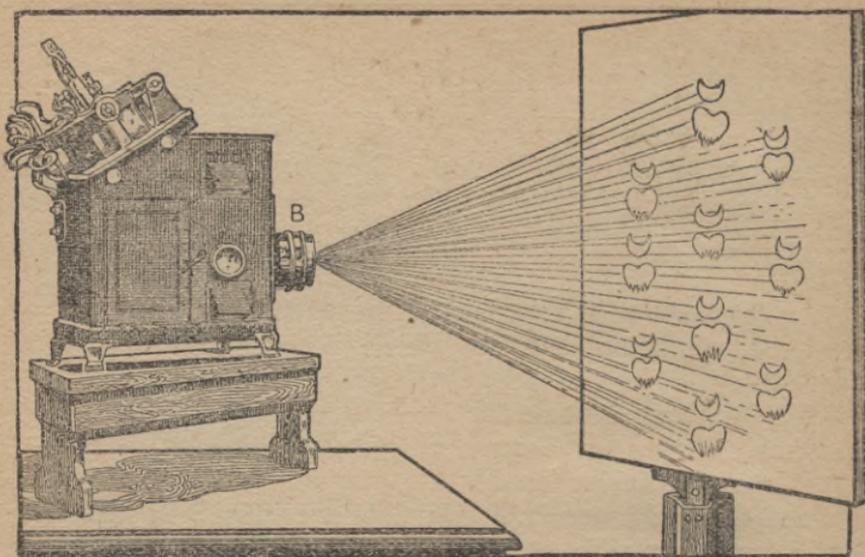


Fig. 7.

selbe gilt für jeden anderen Punkt der Lichtquelle und des Bildes. Jeder Punkt des Bildes liegt immer auf derjenigen geraden Linie, die von dem entsprechenden leuchtenden Punkte durch die enge Öffnung gezogen ist. In Figur 6 haben wir einige solche Linien gezogen. Wir können also aus unserem Experiment folgenden Schluß ziehen: Das Licht geht von jedem leuchtenden Punkte aus in geraden Linien fort.

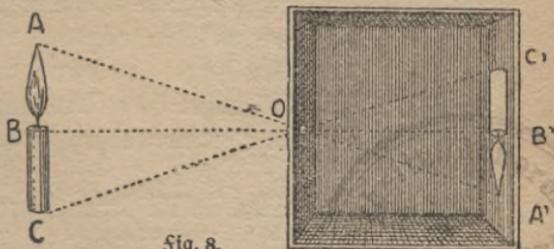
Ein solcher Schluß aber aus einem einzigen Experiment ist nicht sicher genug. Er muß geprüft und gestützt werden. Versuchen wir also ihn zu prüfen, sehen wir zu, was aus dem Satz folgt. Was wird geschehen, wenn wir vor unsere Lampe nicht ein kleines Loch allein bringen, sondern zwei oder drei? Offenbar muß jedes Loch in gleicher Weise wirken, d. h. von jedem leuchtenden Punkt der Kohlen usw. geht Licht geradlinig durch jede von den Öffnungen hindurch und erleuchtet die betreffende Stelle auf einem gegenüberstehenden Schirm. Ich verschleße also durch ein Stanniolblatt die Öffnung der Lampe und steche in dieses 10 feine Löcher hinein. Wir sehen tatsächlich auf dem Schirm 10 Bilder des Bogenlichts, wie Figur 7 zeigt. Sind die Löcher aber einander sehr nahe, so überdecken sich die einzelnen Bilder, und die Konturen verschwimmen. Eine weitere Folgerung unseres Satzes ist diese: Bisher

nahmen wir an, daß die Öffnung, durch die das Licht geht, sehr klein ist, etwa ein Stednadelstich. Ist sie aber ausgedehnter, so sieht man ebenfalls leicht, daß man kein deutliches Bild mehr bekommen kann. Denn eine kreisförmige Öffnung von, sagen wir, 1 qcm Fläche kann angesehen werden als ein System von etwa 100 nebeneinanderliegenden Öffnungen von je 1 qmm Fläche. Jede von den letzteren sehr kleinen Öffnungen erzeugt ein scharfes Bild. Diese einzelnen Bilder überlagern sich aber, und das Resultat ist eine ziemlich gleichmäßige Erhellung des Schirmes, aber keine Abbildung des Bogenlichts. So sieht man schon hier bei unserem ersten Experiment, wie viel präziser die Einsichten werden, wenn man dünne Lichtbündel untersucht, als wenn man beliebige große Lichtmengen betrachtet.

Wir wollen zwar in diesen Vorlesungen wissenschaftliche Einsichten über das Licht gewinnen, aber wir wollen doch nicht stolz an den Anwendungen vorübergehen, die von unseren Erkenntnissen gemacht werden können. Gleich unsere erste Erfahrung mit dem Loch gibt uns eine hübsche Anwendung. Wenn wir einen ganz geschlossenen Kasten aus dunklem Holz konstruieren, dessen Hinterwand von einer matten Glasscheibe gebildet ist, während in der Vorderwand ein kleines Loch sich befindet, so haben wir eine Camera obscura oder eine Lochkamera, Fig. 8 (in der die eine Seitenwand weggelassen ist). Alle hellen Gegenstände, die vor dem Loch sich befinden, senden geradlinig ihr Licht durch das Loch auf die Hinterwand, und man sieht daher auf der matten Scheibe von jedem Objekt, auf das man die Kamera richtet, eine vollständige, aber umgekehrte Abbildung. Diese kann man entweder direkt auf der matten Scheibe nachzeichnen oder man kann sie bekanntermaßen, wenn man die matte Scheibe durch eine photographische Platte ersetzt, photographieren. Je näher die matte Scheibe an dem Loch ist, desto kleiner erscheint das Bild, je entfernter, desto größer. Bei demselben Abstand von Loch und matter Scheibe bilden sich Gegenstände, die nahe am Loch sind, groß, entfernte im richtigen Verhältnisse klein ab.

In unserer Figur erzeugt das Licht  $ABC$  auf der matten Scheibe ein verkleinertes, umgekehrtes Bild  $A'B'C'$ .

Eine weitere Folgerung unseres Gesetzes von der ge-



radlinigen Ausbreitung des Lichtes ist die Bildung der Schatten. Die Erscheinungsweise desselben sind verschieden, je nachdem das Licht von einer sehr kleinen, punktförmigen Lichtquelle, oder von einem ausgedehnten Körper ausgeht. Ich kann das Licht unserer Bogenlampe,

Fig. 9.



nachdem es durch die Öffnung der Laterne hindurchgegangen ist, dadurch, daß ich eine Linse in passender Entfernung vorstelle, zu einem Strahlenkegel zusammendrängen, der sich in einem Punkt vereinigt und dann wieder auseinanderght. Die Wirkungsweise der Linse, die das verursacht, werden wir später besprechen. Hier wollen wir nur die Eigenschaften derselben benutzen. Von dem Vereinigungspunkte  $O$  (Fig. 9) geht also ein leuchtender Kegel aus, der auf der weißen Wand einen hellen Lichtkreis erzeugt. Ich bringe in diesen Lichtkegel eine Holzkuugel  $BB'$  hinein, und wir sehen auf der Wand einen ganz scharf begrenzten tiefschwarzen Schatten  $FF'$ . Alle Lichtstrahlen gehen geradlinig fort. Wo sie von dem undurchsichtigen Körper aufgehalten werden, erscheint auf der Wand Dunkelheit. Ganz anders aber wird die Erscheinung, wenn ich nicht von einem Punkte aus das Licht ausgehen lasse, sondern wenn ich eine ausgedehnte Lichtquelle anwende. Ich brauche bloß die Linse fortzunehmen. Dann wird das Schattenbild unserer Kugel sofort ein anderes. Um den tiefdunklen Schatten in der Mitte bildet sich ein ausgedehnter, weniger dunkler Schatten, der allmählich, aber nicht scharf, in die Helligkeit übergeht. Den ersten Teil nennt man den Kernschatten, den zweiten den Halbschatten. Der Kernschatten entsteht dadurch, daß an die betreffenden Stellen der Wand von keinem Punkte des leuchtenden Körpers aus Licht hingelangt, der Halbschatten dadurch, daß dort von einigen Teilen der Lichtquelle das Licht hinkommt, von anderen abgehalten wird. In Figur 10 ist das Schattenbild derselben Kugel gezeichnet, wenn sie von einer leuchtenden Kugel  $AA'$  bestrahlt wird. Zum Kreise  $K$  kommt gar kein Licht, nach  $H$  kommt Licht zum Teil von oben, so daß diese Stelle bloß halb beschattet ist.

Also auch die Schattenbildungen beweisen das Gesetz von der geradlinigen Ausbreitung des Lichtes. Und doch, so scharf es durch die

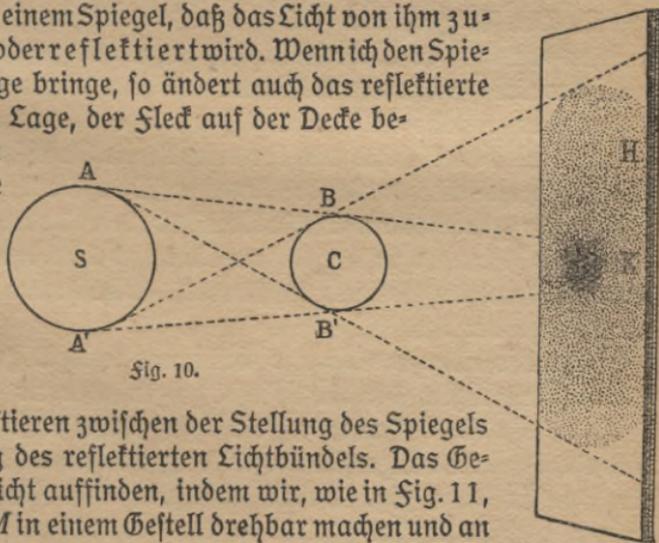
vorhergegangenen Experimente bewiesen erscheint, das Gesetz ist nicht ganz streng richtig. Wir werden später finden, daß in gewissen Grenzen, die allerdings gewöhnlich sehr eng sind, das Licht auch von der geradlinigen Bahn abweicht und um Ecken sich herumbiegt. Aber solange wir auf solche Erscheinungen nicht stoßen, wollen wir die geradlinige Ausbreitung als tatsächlich vorhanden ansehen.

Im gewöhnlichen Leben haben die Spiegel nur die Aufgabe, unser mehr oder minder liebliches Konterfei wiederzugeben. In der Optik sind die Spiegel ebenfalls vielgebrauchte Apparate. Aber natürlich benutzt der Physiker die Spiegel nicht aus Eitelkeit, sondern er will wissen, welchem Gesetze des Lichts der Spiegel seine Fähigkeit verdankt. Befragen wir also wieder unsere dünnen Lichtbündel. Ich setze vor meine Lampe jetzt den schmalen Spalt aus Figur 5 und mache das aus der Lampe austretende Licht parallel. Sie sehen den Strahl in der Luft des Zimmers sich abzeichnen, da alle Staubteilchen, die in seinem Bereich liegen, durch ihn erhellt werden. Der Strahl fällt auf die weiße Wand und gibt dort ein Bild des Spaltes. Ich bringe jetzt einen Spiegel in den Weg des Lichtbündels. Das Bild an der weißen Wand ist verschwunden, statt dessen sehen Sie, daß von der Stelle aus, wo das Lichtbündel den Spiegel trifft, jetzt ein weiteres Lichtbündel ausgeht, sich in der Luft abzeichnet und schließlich das Bild des Spaltes oben auf der Decke entwirft.

Wir sagen von einem Spiegel, daß das Licht von ihm zurückgeworfen oder reflektiert wird. Wenn ich den Spiegel in andere Lage bringe, so ändert auch das reflektierte Lichtbündel seine Lage, der Fleck auf der Decke bewegt sich; ich kann ihn durch bloße

Drehung des Spiegels hindertigieren, wohin ich will. Es muß also ein Gesetz bestehen, ein Zu-

sammenhang existieren zwischen der Stellung des Spiegels und der Richtung des reflektierten Lichtbündels. Das Gesetz können wir leicht auffinden, indem wir, wie in Fig. 11, unseren Spiegel *M* in einem Gestell drehbar machen und an



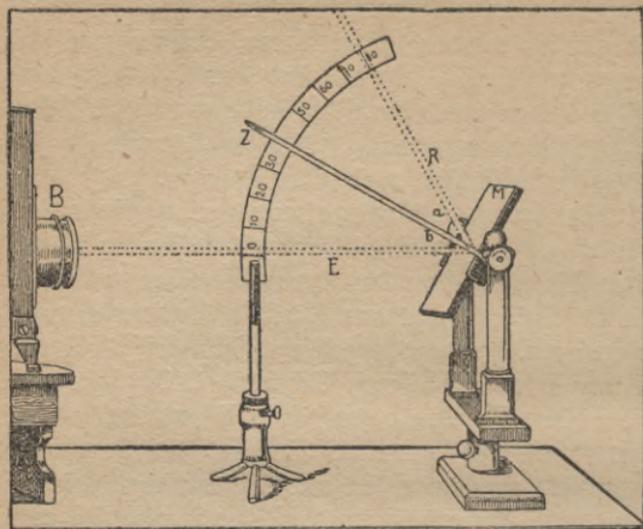
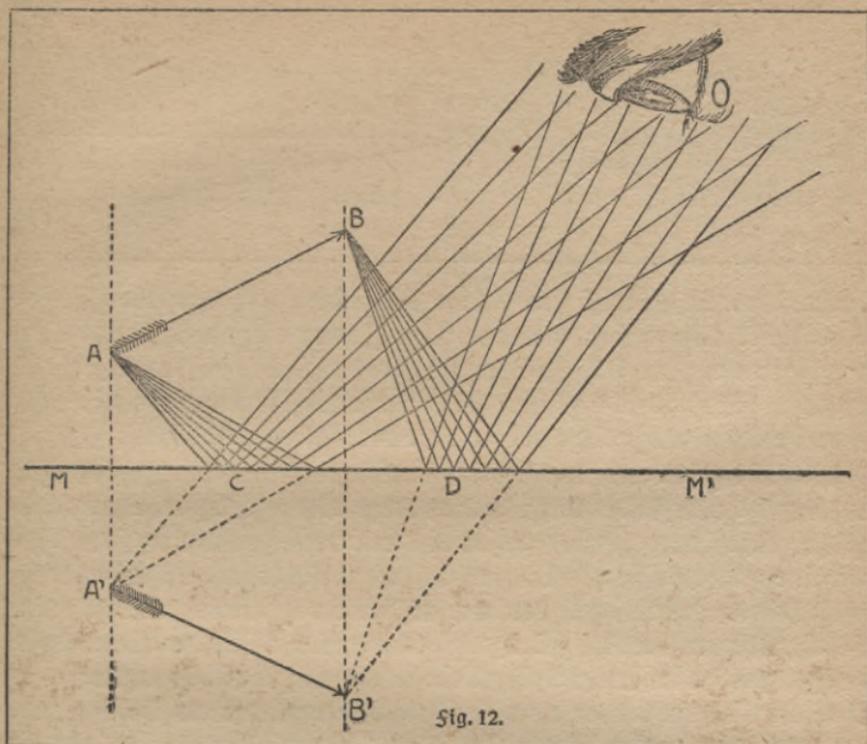


Fig. 11.

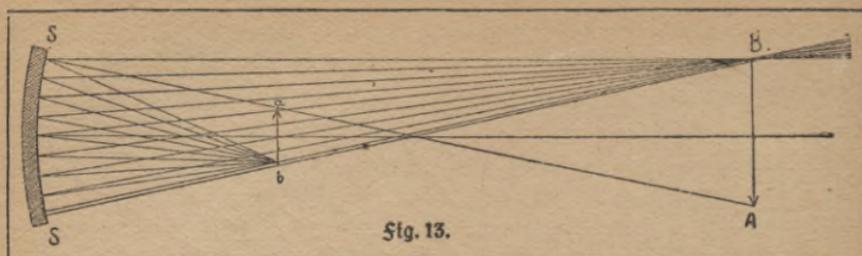
ihm einen Zeiger Z senkrecht befestigen. Ein Gradbogen, an dem wir den Zeiger spielen lassen, soll uns die Richtung des Spiegels und zugleich die Richtung der Strahlen in Zahlen ausdrücken lassen. Nun sehen wir leicht an den Wegen der Lichtbündel: Der von dem Spiegel zu-

rückgeworfene Strahl  $R$  bildet mit dem Zeiger immer genau denselben Winkel, wie der auf den Spiegel fallende Strahl, den wir den einfallenden Strahl  $E$  nennen wollen, mit dem Zeiger bildet. In der Figur ist jeder von beiden Winkeln  $40^\circ$ . Drehen wir den Spiegel, so daß der Zeiger auf  $20^\circ$  steht, so geht der reflektierte Strahl bei  $40^\circ$  vorbei. Den Zeiger, der senkrecht auf dem Spiegel befestigt ist, bezeichnen wir als das Einfallslot oder kürzer und gelehrter als die Normale des Spiegels, und wir können also aus diesem Experiment aussagen: Der reflektierte Strahl bildet mit der Normale des Spiegels immer denselben Winkel wie der einfallende Strahl, oder noch kürzer in leicht verständlicher Ausdrucksweise: Der Reflexionswinkel  $a$  ist immer gleich dem Einfallswinkel  $b$ . Dabei liegt der reflektierte Strahl immer in derjenigen Ebene, welche durch den einfallenden Strahl und die Normale bestimmt ist. Dies ist das Gesetz, und zwar das einzige der Spiegel.

Wenn das aber das einzige Gesetz der Spiegel ist, so müssen wir alle Erscheinungen, die die Spiegel zeigen, daraus ableiten können. Also zunächst die Tatsache, daß ein Spiegel uns unser Abbild oder das Bild eines anderen Gegenstandes wiedergibt. Nichts ist in der That leichter als das. Es sei in Fig. 12  $MM'$  eine spiegelnde Fläche, und vor dem Spiegel befinde sich der Pfeil  $AB$ . Von jedem Punkte des Pfeiles aus



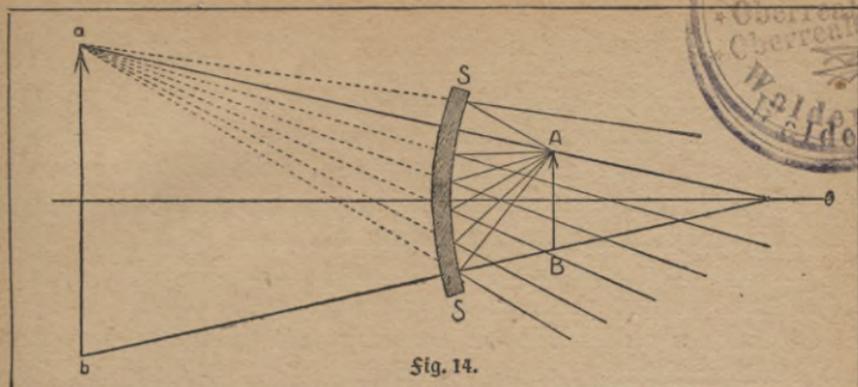
gehen Lichtstrahlen nach allen Seiten geradlinig fort. Wir betrachten bloß diejenigen Lichtstrahlen, die von der äußeren Spitze und von dem äußersten Ende des Pfeiles ausgehen. An beiden Stellen sind eine Anzahl solcher ausgehenden Strahlen gezeichnet. Die von A ausgehenden kommen in der Nähe von C an den Spiegel und werden dort nach dem Spiegelgesetz unter gleichen Winkeln reflektiert, ebenso werden die von B ausgehenden in der Nähe von D reflektiert. Aus der Richtung der reflektierten Strahlen sieht man, daß in ein Auge bei O von C aus Strahlen kommen, die alle von einem Punkte A' hinter dem Spiegel auszugehen scheinen, ebenso von D aus Strahlen, die von B' auszugehen scheinen. Das Auge glaubt die Ausgangspunkte dieser auseinandergehenden (divergierenden) Strahlen in A' und B' zu finden und sieht dort das Bild des Pfeiles. Dieses Bild ist nicht wirklich vorhanden, da die Strahlen von C und D aus sich tatsächlich nicht hinter den Spiegel erstrecken, sondern es ist nur ein subjektives oder, wie man es nennt, virtuelles Bild. Zugleich sieht man, daß der Punkt A' genau so weit



hinter dem Spiegel ist, als A vor demselben, und daselbe gilt für B und B'. Also haben wir den Satz: Jeder ebene Spiegel entwirft von einem Objekt ein virtuelles Bild, dessen einzelne Punkte ebensoweit hinter dem Spiegel liegen, als die entsprechenden Objektpunkte vor dem Spiegel.

Wir übersehen nun leicht, wie die Erscheinungen an Spiegeln sich in komplizierten Fällen darstellen werden. Wenn z. B. zwei ebene Spiegel sich einander gegenüberstehen und wir dazwischentreten, so müssen wir eine ganze Reihe von Bildern unseres Gesichts und unseres Hinterkopfs sehen. Der Spiegel, den wir anschauen, gibt uns zunächst unser Gesicht. Der andere Spiegel erzeugt ein virtuelles Bild des Hinterkopfs, welches wieder im ersten Spiegel ein neues virtuelles Bild erzeugt, und es wirken immer weiter die virtuellen Bilder wieder als Gegenstände zur Erzeugung neuer Bilder. In jedem Friseurladen machen wir die Probe auf diese Erscheinung.

Das Reflexionsgesetz, das wir gefunden haben, erlaubt nun in allen möglichen Fällen, wo Spiegel in Anwendung kommen, von vornherein zu sagen, welche Erscheinungen auftreten. Wir haben bisher nur von gewöhnlichen ebenen Spiegeln Gebrauch gemacht. Wir können aber auch Kugelflächen als Spiegel benutzen, oder Zylinder, oder Kegelflächen, oder auch Flächen beliebiger Art. Die Lachkabinette, die man bei allen Volksbelustigungen sieht, geben eine praktische Anwendung dieser verschiedenen Formen. Man sieht da auf einen Blick, wie verschiedenartig verzerrt die Bilder erscheinen, wenn sie von gekrümmten Spiegeln entworfen werden. Es gelingt leicht, aus einem faden dünnen Schneider einen dicken Bierbrauer durch Spiegelung herzustellen und, umgekehrt, einem Menschen mit geraden Beinen X- oder O-Beine nach Belieben zu geben, aus dem anmutigsten Mädchengesicht eine scheußliche Hexenfratze zu machen. Das Umgekehrte geht allerdings weniger leicht.



Alle diese Bilder sind virtuelle Bilder, Bilder an Stellen, wo die Lichtstrahlen nicht wirklich zusammentreffen, sondern wo sie nur unser Auge hinverlegt. In Wirklichkeit gehen die reflektierten Lichtstrahlen vom Spiegel aus auseinander. Wenn dagegen die Lichtstrahlen nach der Reflexion zusammenlaufen, so daß sie sich wieder in einem Punkte schneiden, so erhält man an dieser Stelle ein wirkliches, objektives, reelles Bild des die Strahlen aussendenden Punktes. Man sieht z. B. in Fig. 13, wie ein reelles Bild entsteht. Ein kleiner konvex gekrümmter Spiegel SS (ein Teil einer spiegelnden Kugelfläche) empfängt Licht von einem Pfeil AB. Vom Punkte B z. B. gehen eine Reihe von Lichtstrahlen aus, die auf den Spiegel fallen und sich nach der Reflexion im Punkte b schneiden. Es ist also b das reelle Bild von B. Ebenso schneiden sich die von A ausgehenden Lichtstrahlen in a. Man sieht also ein reelles Bild des Pfeiles in ab. Umgekehrt gibt der auf der konvergen Seite benutzte Spiegel SS ein virtuelles Bild. Auch wenn ich auf der konkaven Seite, wie in Fig. 14, den Pfeil nahe an den Spiegel heranrücke, gibt er ein virtuelles Bild. Denn die von der Pfeilspitze A ausgehenden Strahlen gehen vom Spiegel an auseinander und würden sich erst rückwärts verlängert im Punkte a treffen. Ebenso würden sich die von B ausgehenden Strahlen, die in Wirklichkeit nach der Reflexion divergieren, erst rückwärts verlängert in b treffen. Es sind also a und b virtuelle, nicht wirklich vorhandene, sondern nur von unserem Auge scheinbar gesehene Bilder, und ebenso sehen wir das Bild des ganzen Pfeiles nur virtuell.

Ein reelles Bild kann man direkt bei passender Beleuchtung in der Luft sehen oder auf einem Schirm auffangen, sogar unter Umständen

ohne daß man den Spiegel bemerkt, ein virtuelles Bild dagegen sieht man nur im Spiegel. Mit reellen Bildern von Spiegeln, Konvexspiegeln, kann man sehr merkwürdige Effekte hervorbringen. Ich habe z. B. hier einen Blumenstrauß, wie Fig. 15 zeigt, unten in einem schwarzen Kästchen angebracht, und zwar umgekehrt, beleuchte ihn kräftig durch eine Lampe und bringe nun außen einen passend geneigten Konvexspiegel an. Es erscheint ein reelles Bild des Blumenstraußes, und durch veränderte Neigung des Spiegels kann ich bewirken, daß dieses Bild gerade aus der Vase herauszukommen scheint, die Sie auf dem Kästchen stehen sehen. Jeder in passender Richtung in das Zimmer Tretende wird wirklich den Blumenstrauß zu sehen glauben, während er in der That nur sein reelles Bild sieht.



Es ist durchaus nicht notwendig, daß die Strahlen, die von einem leuchtenden Punkte auf einen gekrümmten Spiegel fallen, sich wieder nach der Reflexion in einem Punkte, sei es in einem reellen oder in einem virtuellen vereinigen. Im Gegenteil, meistens geschieht das nicht. Schon bei konvexen Kugelspiegeln ist das nicht mehr der Fall, wenn dieselben ziemlich große Fläche haben, und ebensowenig bei Zylinderspiegeln. Von den sukzessiven Auffassungspunkten der Strahlen am Spiegel gehen die reflektierten Strahlen aus, und zwei benachbarte reflektierte Strahlen schneiden sich zwar immer in einem Punkte, die folgenden Strahlen aber schneiden sich in einem anderen Punkte, die nächsten wieder in einem anderen. Das Resultat ist also, daß ein solcher Spiegel eine ganze leuchtende Linie oder eine leuchtende Fläche als Bild erzeugt, wenn man ihn von einem Punkte aus bestrahlt. Der Versuch wird Ihnen das zeigen. Ich lasse von meiner Bogenlampe aus paralleles Licht auf den gebogenen zylindrischen Spiegel (Fig. 16) fallen, und Sie sehen die leuchtende Linie, die das reflektierte Licht bildet. Man nennt dies die Brennlinie oder Katakaustik. Bei jedem glänzenden Metallgefäß, ja bei jedem Glas- oder Porzellangeschirr werden Sie eine solche Katakaustik bei passender Beleuchtung schon beobachtet haben.

Es ist nämlich der Begriff des Spiegels, optisch genommen, ein weiterer, als man ihn im Sprachgebrauch des Zimmerschmucks oder der

Toilette nimmt. Jede glatte Fläche ist in optischer Beziehung ein Spiegel, weil sie das Licht regelmäßig reflektiert. Es ist gar nicht nötig, daß der Spiegel mit Silber oder Quecksilber belegt ist, oder daß er direkt aus glattem Metall besteht, wie die Silber Spiegel, die die jungen Frauen des alten Roms benutzten. Eine Wasserfläche nennt man ja auch im gewöhnlichen Sprachgebrauch einen Wasserspiegel, er wirft uns auch unser Bild zurück. Aber auch jedes gewöhnliche glatte Fensterglas, ja sogar jede glatte Porzellanfläche, jede glattpolierte Holzfläche ist optisch ein Spiegel. Man kann auch tatsächlich an solchen Fällen alle Gegenstände gespiegelt sehen, wenn auch nicht in der Lichtstärke, wie es bei den eigentlich sogenannten Spiegeln der Fall ist. Wir achten gewöhnlich nicht darauf, daß alle glatten Gegenstände spiegeln; aber die Maler wissen das sehr genau, und auch wir würden ein Bild gleich als unrichtig empfinden, wenn der Maler dieses zurückgeworfene Licht nicht überall richtig nachbilden würde.

Das materielle Kennzeichen des Spiegels ist also die Glätte, auf den Stoff kommt es nicht an. Das optische Kennzeichen ist die regelmäßige Zurückwerfung des Lichts. Nehmen wir den andern Grenzfall an, Körper, welche eine sehr rauhe Oberfläche haben, z. B. eine Samtdecke. Wenn das Licht auf diese fällt, so wird es zwar auch an jeder Stelle, wo es auftrifft, zurückgeworfen. Aber da die einzelnen Teile der rauhen Oberfläche ganz verschiedene Richtungen haben, ihre Normalen also ganz verschieden liegen, schon bei zwei sehr nahe aneinander befindlichen Punkten, so wird das reflektierte Licht nicht nach einer bestimmten Richtung zurückgeworfen, wie bei spiegelnden Flächen, sondern nach allen Richtungen hin zerstreut. Auch solche Flächen reflektieren also das Licht, aber sie reflektieren es, wie man sagt, diffus, sie diffundieren das Licht. Sie geben keine Bilder von leuchtenden Körpern, sondern sie werfen nur allgemein auffallendes Licht nach allen Richtungen zurück. Diese Diffusion des Lichts ist immer, bei jedem Körper, vorhanden. Auch bei spiegelnden Flächen. Denn selbst die glatteste Oberfläche, die wir herstellen können, zeigt schon unter dem Mikroskop Rauigkeiten, Erhebungen und Vertiefungen verschiedener Form, gibt also Veranlassung zur Diffusion. Nur ist eben bei den Spiegeln die regelmäßige Reflexion

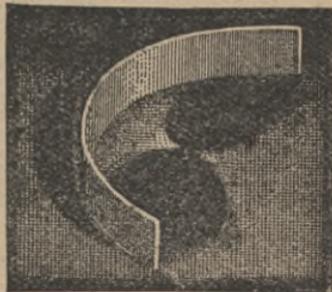


Fig. 16.

weit überwiegend. Die Diffusion des Lichts ist es überhaupt, durch welche wir beleuchtete Körper erst sehen. Von jeder kleinsten Fläche eines beleuchteten Körpers gehen eben nach allen Seiten hin Strahlen aus, von denen diejenigen, die in unser Auge fallen, eben bewirken, daß wir den betreffenden beleuchteten Punkt sehen. Wenn ich wieder (wie in Fig. 11) das Licht unserer Lampe durch den schmalen Spalt auf unseren drehbaren Spiegel fallen lasse, so sehen wir zunächst in der Luft den Gang des einfallenden und des reflektierten Strahles. Wir sehen dies nur durch die Diffusion. In der Luft schweben Millionen von Staubteilchen, an denen das Licht diffus reflektiert wird, wodurch es auch in unser Auge gelangt. Wir sehen weiter auf der Decke oder Wand unseres Raumes den hellen schmalen Spalt. Daß wir ihn sehen, kommt auch wieder durch die Diffusion. Von jedem beleuchteten Flächenstück der Decke gehen Lichtstrahlen nach allen Seiten, von denen ein Teil in das Auge jedes einzelnen von uns fällt. Wir sehen endlich auf dem Spiegel selbst den hellen rechteckigen Schein, der das Abbild des Spaltes ist. Würde der Spiegel nur regelmäßig reflektieren, so käme von ihm aus kein Licht in unser Auge, sondern es ginge nur in der Richtung der reflektierten Strahlen. Da er aber dabei auch diffus reflektiert, so sehen wir den Spiegel selbst. Also die Sichtbarkeit aller nicht selbstleuchtenden Körper, wenn sie beleuchtet werden, beruht nur auf ihrer diffusen Reflexion.

Diese Kenntnisse haben wir einzig erlangt durch Anwendung unseres dünnen Strahlenbüschels, indem wir das einfache Gesetz der Reflexion, das wir dabei ermittelt haben, auf immer weitere und verwickeltere Fälle angewendet haben.

Ist aber die Reflexion, sei es die regelmäßige oder die diffuse, die einzige Art und Weise, wie die Körper auf das Licht, das auf sie fällt, wirken? Offenbar nicht. Wir wissen aus unzähligen Erfahrungen, daß es durchsichtige Körper gibt, die also nicht das Licht an ihrer Oberfläche zurückwerfen, sondern die es durch sie hindurchlassen. Wir müssen zusehen, was unsere dünnen Lichtbündel für Eigenschaften zeigen werden, wenn sie auf durchsichtige Körper fallen. Ich bringe wieder meinen engen Spalt vor die Lampe, mache ihr Licht parallel und stelle nun in den Weg des Lichtbündels eine Glasplatte, die ich beliebig neigen kann. Wir sehen tatsächlich, daß das Licht durch die Glasplatte hindurchgeht, und daß sich ein Bild des Spaltes auf der Wand abzeichnet. Zugleich aber sehen wir auch, daß von der Glasplatte das

Licht reflektiert wird, und daß wir ein anderes, schwächeres Bild des Spaltes oben auf der Decke bemerken. Wir schließen zuerst daraus, daß ein durchsichtiger Körper das Licht durch sich hindurchläßt, einen Teil des Lichtes aber zugleich an seiner Oberfläche reflektiert. Die Durchsichtigkeit und die Reflexion schließen sich also nicht aus, sondern bestehen nebeneinander.

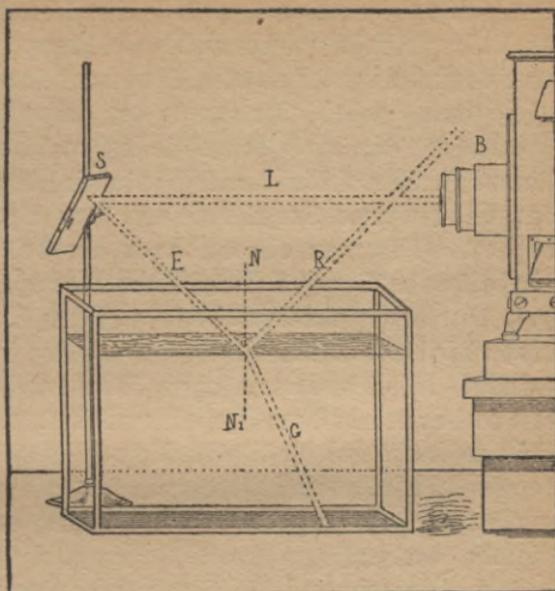


Fig. 17.

Es dringt also, um nun unsere neue Erscheinung genauer ins Auge zu fassen, das auffallende Licht in einen durchsichtigen Körper ein. Ich habe hier (Fig. 17) eine große Glaswanne mit Wasser gefüllt. Um den Weg der Strahlen deutlich sichtbar zu machen, löse ich in dem Wasser etwas Fluoreszein auf. Das schmale Lichtbündel von meinem Spalt zeichnet seinen Weg durch das Wasser in einer hellgrün leuchtenden Bahn ab. Ich möchte nun ebenso wie bei dem Spiegelversuch das Licht unter verschiedenen Winkeln auf die Wasseroberfläche fallen lassen und sehen, welche Richtung der im Wasser verlaufende Strahl hat. Zu dem Zweck stelle ich am einfachsten hinter die Wanne einen drehbaren Spiegel S auf und lasse den Strahl L von der Bogenlampe B auf den Spiegel und von diesem auf die Wasseroberfläche fallen. Wir sehen den einfallenden Strahl E und bemerken zunächst wieder, daß von der Wasseroberfläche aus ein reflektierter Strahl R in der Luft verläuft. Zugleich aber sehen wir den grün gefärbten Strahl G im Wasser, und wir beobachten, daß das Lichtbündel im Wasser eine andere Richtung hat als das einfallende Lichtbündel, daß der einfallende Strahl an der Wasseroberfläche gebrochen erscheint. Man sagt tatsächlich, das in einen durchsichtigen Körper eindringende Licht erleidet eine Brechung. Wenn ich den Spiegel S drehe, so bildet der auf die Wasseroberfläche einfallende

Strahl  $E$  andere und andere Winkel mit der Normale  $NN$ , der Wasserfläche. Zugleich ändert sich auch die Richtung des gebrochenen Strahles  $G$ , aber es findet immer eine Knüpfung der beiden Strahlen an der Wasserfläche statt, wobei aber immer der gebrochene Strahl in derjenigen Ebene liegt, die durch den einfallenden Strahl und die Normale bestimmt ist. Wir können das auch so ausdrücken: Der Winkel, welchen der gebrochene Strahl  $G$  mit der Normale  $N_1$  im Wasser bildet, ist immer ein anderer als der Winkel, welchen der einfallende Strahl  $E$  mit der Normale  $N$  in der Luft bildet. Wir bezeichnen den Winkel zwischen  $E$  und  $N$  wieder wie früher als Einfallswinkel, den Winkel zwischen  $G$  und  $N_1$  als Brechungswinkel. Also können wir sagen: Der Brechungswinkel ist immer ein anderer als der Einfallswinkel. Nur in dem Falle, wo das Licht senkrecht auf die Wasserfläche fällt, geht es ungebrochen in das Wasser hinein. Dabei ist der Einfallswinkel 0 und der Brechungswinkels auch 0. Es wäre nun interessant, den Zusammenhang zu ermitteln, der zwischen dem Einfallswinkel und dem Brechungswinkel besteht. Ein solcher besteht natürlich. Denn ändert sich der eine, so ändert sich auch der andere. Aber dieser Zusammenhang ist hier nicht so leicht zu finden wie bei der Reflexion, und in der That ist er erst im Jahre 1620 von Snellius und unabhängig von ihm noch einmal im Jahre 1637 von Descartes entdeckt worden. Auch ist er nicht in Worte zu fassen, wenn man nicht die Kenntnis derjenigen Größe voraussetzen darf, welche die Mathematik den Sinus eines Winkels nennt. Der Zusammenhang zwischen dem Einfallswinkel und dem Brechungswinkel ist bei einer bestimmten brechenden Substanz nämlich der, daß bei kleinen Einfallswinkeln das Verhältnis der beiden Winkel immer dasselbe ist, bei größeren Einfallswinkeln ist es nicht mehr das Verhältnis der Winkel selbst, welches konstant bleibt, sondern das ihres Sinus. Bleiben wir, um das Gesetz zu erläutern, bei den kleinen Einfallswinkeln stehen. Wenn wir eine Vorrichtung anbringen würden, um bei unserem Wassertrog den Einfallswinkel und den Brechungswinkel genau zu messen, so würden wir z. B. folgende Tabelle finden:

Einfallswinkel	$0^\circ$	$1^\circ$	$2^\circ$	$3^\circ$	$4^\circ$	$5^\circ$
Brechungswinkel	$0^\circ$	$\frac{3}{4}^\circ$	$1\frac{1}{2}^\circ$	$2\frac{1}{4}^\circ$	$3^\circ$	$3\frac{3}{4}^\circ$

Aus diesen Zahlen sieht man, daß das Verhältnis:

$$\frac{\text{Brechungswinkel}}{\text{Einfallswinkel}}$$

für alle angeführten Winkel dasselbe ist, nämlich gleich  $\frac{4}{3}$ . Denn es ist

$$\frac{1}{\frac{3}{4}} = \frac{2}{1\frac{1}{2}} = \frac{3}{2\frac{1}{4}} = \frac{4}{3} = \frac{5}{3\frac{3}{4}}$$

Die Zahl  $\frac{4}{3}$  kommt hier in Betracht, wo wir das Licht aus Luft in Wasser haben gehen lassen. Hätten wir es in Petroleum oder Glas oder Diamant gehen lassen, so hätten wir eine andere Zahl gefunden, welche jedesmal das Verhältnis des Einfallswinkels zum Brechungswinkel angegeben hätte. Diese Zahl nennt man den Brechungsindex der betreffenden Substanz gegen Luft. Es ist also der Brechungsindex von Wasser  $\frac{4}{3}$ , der von gewöhnlichem Glas ist  $\frac{3}{2}$ , von Schwefelkohlenstoff ist er  $\frac{5}{3}$ , von Diamant ist er nahezu  $\frac{5}{2}$ . Diamant hat also einen sehr großen, den größten bekannten Brechungsindex.

Es war notwendig, dieses Brechungsgesetz anzuführen. Denn ebenso wie früher das Reflexionsgesetz alle Erscheinungen zusammenfaßte, die auch in den kompliziertesten Fällen der Zurückwerfung des Lichts auftraten, so faßt dieses Brechungsgesetz durchaus alles zusammen, was sich bei dem Eindringen des Lichts aus einem Körper in einen andern, aus einem Medium in ein anderes über die Richtung der Strahlen sagen läßt. Während aber in bezug auf die Reflexion des Lichts sich kein Unterschied ergab, ob der reflektierende Körper aus Metall oder Glas oder Wasser bestand, spielt hier bei der Brechung die Natur des Körpers insofern eine Rolle, als sie die Größe des Brechungsindex bestimmt. Der allgemeine Verlauf der gebrochenen Strahlen ist bei allen brechenden Körpern zwar der nämliche, aber die quantitativen Verhältnisse sind je nach der Natur des Körpers etwas verschieden.

Wenn Licht aus Luft an die Grenzfläche eines anderen durchsichtigen Mediums kommt, entsteht also immer neben dem reflektierten noch ein gebrochener Strahl. Dagegen ist das Umgekehrte nicht immer der Fall. Wenn Licht in einem durchsichtigen Medium, z. B. Wasser, verläuft und an die Grenzfläche des Wassers gegen Luft kommt, so tritt zwar für gewöhnlich auch ein gebrochener Strahl in die Luft ein, unter gewissen Umständen aber nicht. Es folgt dies aus der genaueren Form des Brechungsgesetzes, ich will Ihnen aber die Erscheinung nur rein experimentell zeigen.

Zu dem Zweck nehme ich wieder meine Wanne mit gefärbtem Wasser und setze in dieselbe jetzt (Fig. 18) einen kleinen Apparat, der unten

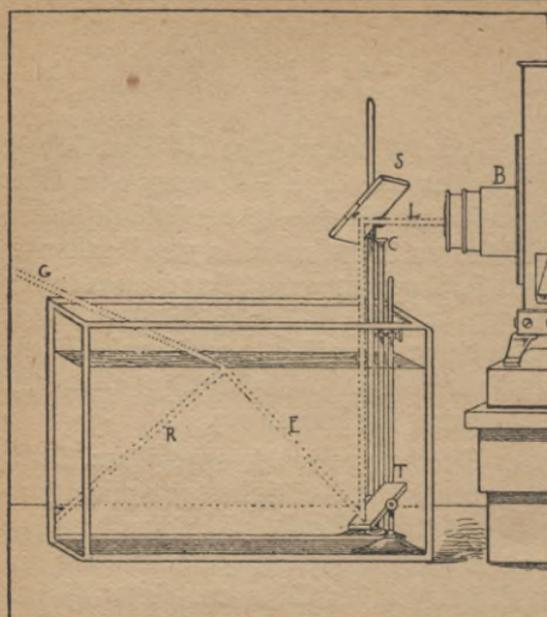


Fig. 18.

einen Spiegel *T* enthält, den ich von oben durch die Schraube *C* beliebig drehen kann. Ich lasse das Licht der Bogenlampe auf den Spiegel *S* und von diesem auf den Spiegel *T* fallen, dann geht der am unteren Spiegel reflektierte Strahl *E* im Wasser bis an die Grenzfläche gegen Luft und bildet dort den im Wasser reflektierten Strahl *R* und den in die Luft hinein gebrochenen Strahl *G*. Wir sehen, daß der Strahl *G* in der Luft immer schief verläuft als der Strahl *E* im Was-

ser. Wenn ich nun den Spiegel *T* drehe, so daß *E* auch immer schief wird, so nähert sich *G* immer mehr der Grenzfläche des Wassers, und bei einer bestimmten Stellung des Spiegels *T* gibt es gar keinen Strahl *G* mehr. Dann wird das ganze Licht, das an die Grenzfläche kommt, in das Wasser zurückreflektiert, man sieht zugleich den Strahl *R* sehr hell werden, und es wird nichts mehr gebrochen. Diese Erscheinung bezeichnet man als totale Reflexion des Lichtes. Sie tritt nur auf, wenn Licht aus Wasser oder Glas oder dergleichen in die Luft eintreten will, nicht umgekehrt, oder überhaupt, wenn Licht aus einem Körper mit größerem Brechungsindex in einen solchen mit kleinerem Brechungsindex einzudringen sucht, nie im umgekehrten Fall. Je größer der Brechungsindex einer Substanz ist, desto leichter tritt der Fall der totalen Reflexion ein. Das ist der Grund für das prächtige Leuchten von geschliffenen Diamanten. Das Licht, das in den Diamanten eingedrungen ist, bleibt durch totale Reflexion an seinen Schlißflächen größtenteils in ihm und erhellt ihn dadurch so prächtig, daß er ein unvergleichliches Feuer gibt.

Eine schöne Anwendung der totalen Reflexion ist in dem Experiment gemacht, das ich Ihnen jetzt vorführen will. Ich habe hier (Fig. 19) ein hohes Gefäß, das mit Wasser gefüllt ist. In der Nähe des Bodens ist eine

(verschließbare) Ausflußöffnung  $O$ , und an der Rückwand des Gefäßes ist ein Fenster, durch welches ich mittels einer Linse das Licht der Bogenlampe in das Gefäß hineinsende. Sowie ich das Wasser ausfließen lasse, was ja bekanntlich in einem parabolischen Strahl geschieht, wird das Licht in dem Strahl sukzessive immer total reflektiert, und der Strahl erscheint daher in seinem ganzen Verlauf sehr hell erleuchtet. Wenn ich ein rotes oder ein blaues Glas vor die Lampe halte, so erscheint der Strahl glänzend farbig. Bei den Fontaines lumineuses hat man dasselbe Prinzip im großen angewendet. Die totale Reflexion gibt uns also ein Mittel, um das Licht in einen gekrümmten Wasserstrahl oder auch in einem passend gebogenen Glasstab sukzessive weiterzuleiten.



Fig. 19.

Wir wollen nun verfolgen, was uns unser Brechungsgesetz ergibt, wenn wir jetzt das Licht durch Körper von bestimmten einfachen Formen hindurchgehen lassen. Zunächst will ich eine dicke rechteckige Glasplatte nehmen, deren gegenüberliegende Seiten parallel sind.

Wenn ein Lichtstrahl  $E$  (Fig. 20) auf die Fläche  $M$  der Platte  $MM^1$  fällt, so erscheint in der Platte der gebrochene Lichtstrahl  $B$ . Dieser kommt an die Fläche  $M^1$  und wird nach dem Brechungsgesetz nach  $A$  hinaus gebrochen. Das Licht verfolgt also den Weg  $EBA$ , während, wenn die Platte nicht vorhanden wäre, es den punktierten Weg  $EE^1$  verfolgt hätte. Man sieht, daß eine solche Platte den Lichtstrahl parallel mit sich verschiebt. Das Experiment wird diese Überlegung bestätigen.

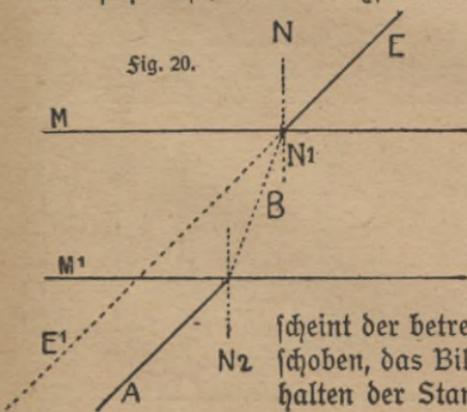


Fig. 20.

Ich verschließe die Öffnung meiner Bogenlampe (Fig. 21) durch ein Blech, aus welchem ein Pfeil ausgeschnitten ist, und kann nun durch eine Linse  $L$  ein scharfes Bild dieses Pfeiles, wie Sie sehen, auf den Schirm projizieren. Wenn ich jetzt eine rechteckige Glasstange  $G$  irgendwo vor den Pfeil halte, so erscheint der betreffende Teil des Pfeiles parallel verschoben, das Bild des Pfeiles ist also durch das Vorhalten der Stange gebrochen.

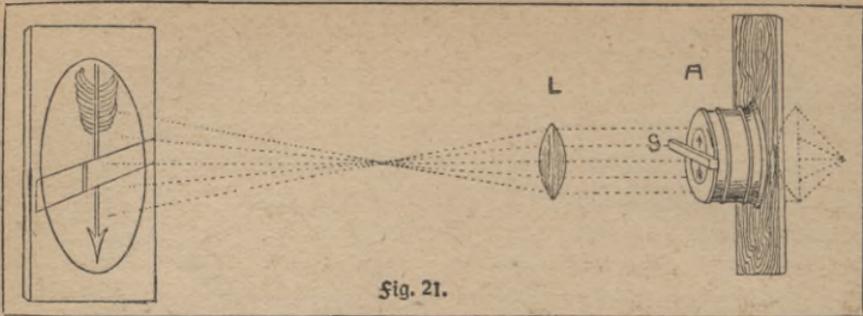
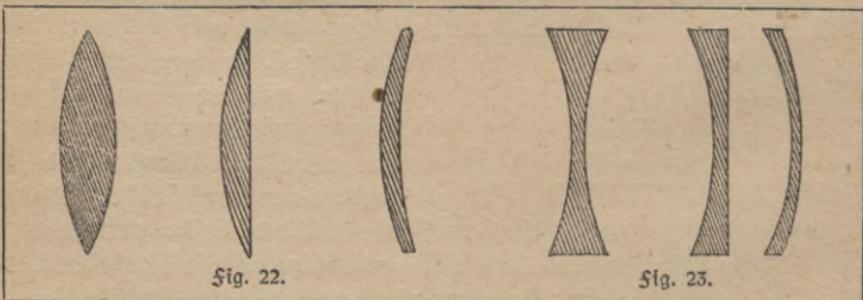


Fig. 21.

Solche Verschiebungen und Brechungen, die durch durchsichtige Platten hervorgebracht sind, kann man häufig beobachten. Unsere gewöhnlichen Fensterscheiben zeigen sie schon, noch besser aber die Fensterscheiben der Eisenbahnwagen, die gewöhnlich aus schlechtem, verzogenem Material bestehen. Schaut man durch diese z. B. auf die Schienen des nebenan befindlichen Geleises, so erscheinen diese in einer Weise verzerrt und gebrochen, daß, wenn man sich des optischen Grundes nicht bewußt wäre, man lebhaft seinen Feinden wünschen könnte, daß sie dieses Geleis benutzen müssen.

Bei weitem die wichtigste Anwendung aber des Gesetzes der Brechung machen wir in den Linsen. Man unterscheidet bekanntlich Konvexlinsen, wie in Fig. 22, die in der Mitte dicker sind als am Rande, und Konkavlinsen, wie in Fig. 23, die in der Mitte dünner sind als am Rande. Das Gemeinschaftliche bei beiden ist, daß ihre Grenzflächen entweder beide kugelförmig sind, oder daß eine kugelförmig, die andere eben ist. Ein wesentlicher Unterschied der beiden Arten von Linsen wird sofort sich ergeben, wenn wir versuchen, den Verlauf der Strahlen zu zeichnen, die von einem Punkt ausgehen, die Linse durchsetzen und dann wieder austreten. Machen wir das zuerst bei der Konvexlinse (Fig. 24).



Vom Punkte *A* aus zeichnen wir eine Reihe von Strahlen, die auf die Linse auffallen. An den Stellen 1, 2, 3 haben wir die Normalen angedeutet, und danach, da der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel ist, gehen die Strahlen in der Linse von 1 nach 1', von 2 nach 2', von 3 nach 3'. An den Stellen 1', 2', 3' haben wir

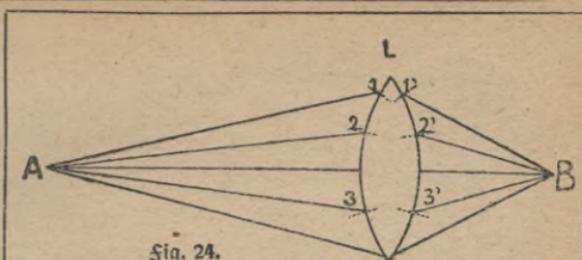


Fig. 24.

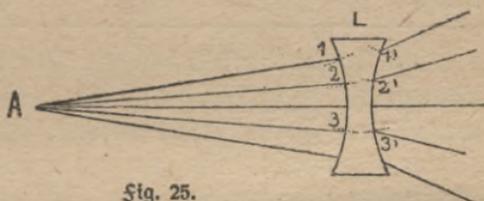


Fig. 25.

wieder die Normalen gezeichnet, und da dort die Strahlen aus Glas in Luft austreten, so ist der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel, d. h. die Strahlen laufen nun schärfer zusammen und treffen sich in einem Punkt. Also die von *A* ausgehenden Strahlen konvergieren wieder in einem Punkte *B*, sie sammeln sich dort. Diese Eigenschaft der Konvexlinsen ist die Ursache, daß man ihnen auch den Namen *Sammel-*linsen gibt. Ganz das Gegenteil tritt bei einer Konkavlinse auf (Fig. 25). Die von *A* ausgehenden Strahlen werden bei 1, 2, 3 weiter zerstreut, beim Austritt, nämlich bei 1', 2', 3' noch weiter zerstreut, so daß sie durchaus nicht zusammenlaufen, sondern noch mehr divergieren als bisher. Deshalb nennt man solche Linsen *Zerstreungslinsen*.

Mittels Konvexlinsen kann man also die Strahlen, die von einem Punkte ausgehen, wieder in einem Punkt vereinigen, d. h. man kann von einem Gegenstande durch sie ein *reelles* Bild bekommen. Das ist diejenige Eigenschaft, durch welche solche Linsen, die *Sammellinsen*,

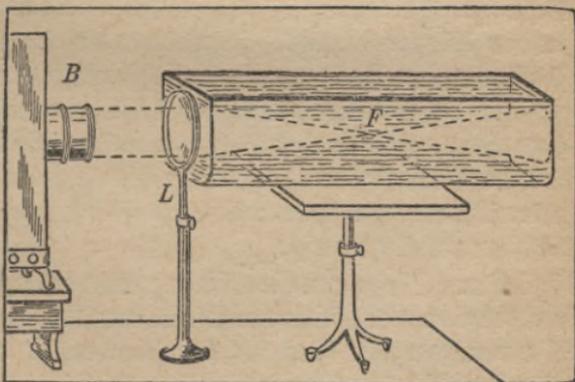


Fig. 26.

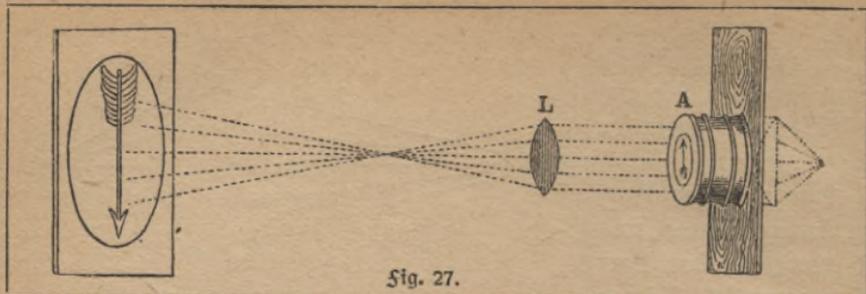
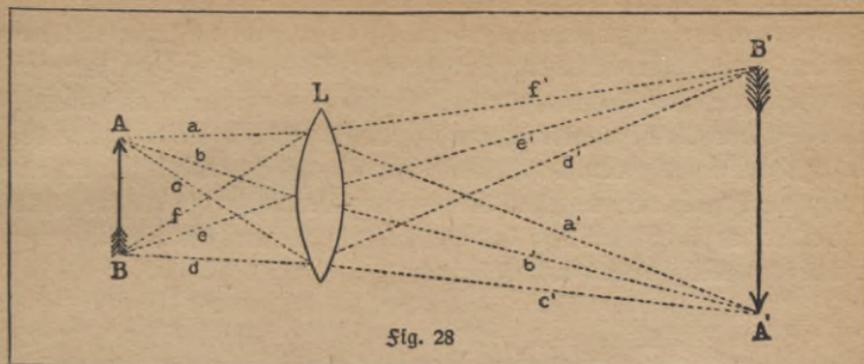


Fig. 27.

eine so große Anwendbarkeit besitzen. Wir wollen daher einmal eine solche Konverglinse  $L$  (Fig. 26), die ich hier in einer Fassung mit Fuß habe, experimentell auf ihr Verhalten prüfen. Ich mache das Licht unserer Bogenlampe  $B$  parallel, lasse es durch unseren Spalt gehen und stelle die Linse in den Weg der Strahlen. Ich lasse das Licht dann weiter in unsere Wanne mit Wasser, in dem Fluoreszein aufgelöst ist, eintreten, damit die Strahlen deutlich durch ihre grüne Färbung erkannt werden können. Sie sehen, daß nach dem Durchgang durch die Linse die vorher parallelen Strahlen sich in einem Punkt  $F$  treffen, der bei dieser Linse beiläufig etwa 25 cm von ihrer Mitte absteht. Diesen Punkt nennt man den Brennpunkt der Linse, den Abstand von 25 cm die Brennweite. Der Brennpunkt einer Linse ist also derjenige Punkt, in welchem sich parallele Strahlen nach dem Passieren der Linse vereinigen. Je stärker gekrümmt die Linsenflächen sind, desto näher liegt der Brennpunkt an der Linse, desto kleiner ist also die Brennweite. Ich habe hier Linsen von 5, 15, 25, 50 cm Brennweite. Man klassifiziert die Linsen nach der Brennweite. Wenn ich umgekehrt in den Brennpunkt einer Linse, also im Abstand der Brennweite, einen leuchtenden Körper aufstelle, so werden die Strahlen von ihm nach dem Passieren der Linse parallel. Jetzt verstehen wir also, wie wir bei unserer Bogenlampe paralleles Licht hervorbringen. Ich habe einfach eine Konverglinse in der Öffnung unserer Lampe angebracht, und die Lampe so verschoben, daß die glühenden Kohlen gerade im Abstand ihrer Brennweite stehen; dadurch ist das von den Kohlen ausgehende Licht parallel gemacht.

Ich verschließe nun die Öffnung unserer Bogenlampe durch das Blech mit dem ausgeschrittenen Pfeil, das ich schon vorhin benutzt habe. Wenn ich in den Weg der Strahlen meine Linse stelle, z. B. 40 cm von dem Pfeil entfernt (Fig. 27), so sehen wir durch die beleuchtete



Luft die Strahlen auch wieder zunächst in einem Punkt zusammenlaufen, und wenn ich jetzt einen Schirm vorschiebe, so finde ich leicht eine Stelle, wo ich ein ganz scharfes, aber umgekehrtes Bild des Pfeiles bekomme. Das Bild ist etwa 67 cm von der Linse entfernt. Wie es zustande kommt, geht aus Fig. 28 hervor. Von jedem Punkte des Pfeiles AB gehen nach allen Richtungen Strahlen aus. Die vom Punkte A ausgehenden Strahlen abc werden nach dem Passieren der Linse zu a'b'c' und vereinigen sich in A', ebenso die von B in B'. So bekommen wir ein umgekehrtes Bild A'B'. Das Bild ist hierbei größer als das Objekt. Stelle ich die Linse in 50 cm Abstand von dem Objekt, so ist das Bild auch in 50 cm und von derselben Größe; stelle ich endlich die Linse noch weiter, 60, 70 cm, von dem Objekt auf, so erhalte ich nun ein verkleinertes Bild, etwa 42 und 39 cm von der Linse entfernt. Also wir sehen, bei jedem bestimmten Abstand des Objekts von der Linse gibt es einen bestimmten Abstand, in welchem ein scharfes reelles Bild des Objekts erzeugt wird. An dieser Stelle kann ich also das Bild auf einem Schirm auffangen. Ist umgekehrt die Stellung des Objekts und die Lage des Schirms fest gegeben, so kann ich die Linse immer so verschieben, daß ich von dem Objekt auf dem Schirm ein scharfes Bild bekomme.

Nur mit Konverglinsen erhält man reelle Bilder, und zwar nur dann, wenn das Objekt sich außerhalb der Brennweite der Linse befindet. Konkavlinsen erzeugen stets nur virtuelle Bilder. Daher spielen die Konverglinsen in der angewandten Optik ein viel bedeutendere Rolle als die Konkavlinsen.

Die Wirkung der Linsen ist bekanntlich zu einer großen Reihe von optischen Instrumenten angewendet worden, von der einfachen Lupe an bis zum feinsten und wirkungsvollsten Mikroskop, von dem Theater-

Operngucker an bis zu den Riesenfernrohren unserer modernen Sternwarten, von der Laterna magica unserer Kinder bis zu den kinematographischen Projektionsapparaten. Doch ist es für eine allgemeine Übersicht der Optik nicht angebracht, in die Details dieser Apparate einzugehen, obwohl eine Darstellung der allmählichen Verbesserungen, welche menschlicher Scharfsinn bei ihnen angebracht hat, so daß sie heute auf einer ungeahnten Stufe der Vollendung stehen, ein Kapitel von besonderem Reiz bilden würde.

## Zweite Vorlesung.

### Farbenzerstreuung, Farbmischung, Spektren.

Es ist eine in der Geschichte seltene, vielleicht einzig dastehende Erscheinung, daß zwei Männer allerersten Ranges, zwei Männer mit unerreicht hohen Geistesgaben, über eine und dieselbe naturwissenschaftliche Tatsache tief und gründlich nachgedacht haben, und daß sie beide nicht zu denselben, sondern zu diametral entgegengesetzten Anschauungen gelangt sind. Diese beiden Männer sind Newton und Goethe, und der Gegenstand ihres Nachdenkens und ihrer Meinungsverschiedenheit sind die Farben und speziell die Natur des weißen Lichtes. Während Newton auf Grund von Experimenten behauptet, daß das weiße Licht kein einfaches Licht sei, sondern zusammengesetzt sei aus allen Farben, also gemischter Natur sei, behauptet Goethe, obwohl er die Versuche von Newton kennt, gerade im Gegenteil, daß das weiße Licht das einzig einfache sei, und daß die Farben nur durch Modifikationen entstehen, die an dem weißen Licht durch die Körper hervorgerufen werden. Der Gegensatz dieser Anschauungen ist wohl tief in der Natur, in der Geistesart dieser beiden Männer begründet und hat dadurch ein erhebliches psychologisches Interesse. Während der Künstler mit einem Blick das Ganze umfaßt und die einzelnen Teile des Ganzen, halb instinktiv, mit im Ganzen sieht und darstellt, sucht der Naturforscher gerade umgekehrt aus dem Ganzen die einzelnen Teile aus, welche es enthält, sucht die Teile erst genau zu verstehen, um aus ihnen das Ganze zusammenzusetzen. So sind für den Naturforscher die Farben das Erste, die Bausteine, aus denen er das weiße Licht zusammensetzt. Für den Künstler aber ist das weiße Licht das Erste, das Ganze. In diesem Gegensatz aber behält der analytische Naturforscher recht. Die Natur kann eben

nicht erraten, sondern nur erforscht werden. Es wird von Interesse sein, zu erkennen, auf welche Gründe sich diese Anschauung Newtons, die heute allgemein als richtig erkannt ist, stützt.

Wenn Sie unsere Linsenexperimente in der vorigen Vorlesung etwas schärfer beobachtet haben, so werden Sie wohl bemerkt haben, daß der Pfeil, den ich durch die Linse auf unserem Schirm abgebildet habe

(Fig. 27), im Bilde mit farbigen Rändern versehen war, auf der einen Seite war der Rand blau, auf der anderen rotgelb. Weit prächtiger aber erhält man bekanntlich die Farben, wenn man Licht durch ein Prisma gehen läßt. Ein Prisma ist für die Optik ein durchsichtiger Körper mit zwei gegeneinandergeneigten glatten Flächen; auf die dritte Fläche, die auch gewöhnlich mattiert ist, kommt es nicht an.

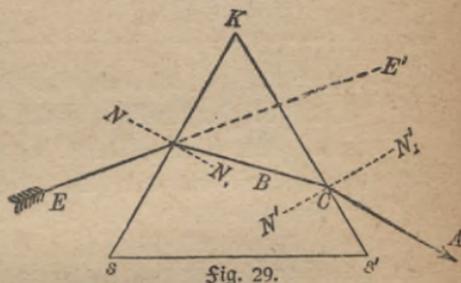


Fig. 29.

Die Kante, in der die beiden Flächen zusammenstoßen, nennt man die brechende Kante. Wenn ich durch ein solches Prisma einen Lichtstrahl gehen lasse, so werden wir aus dem Brechungsgesetz zunächst folgendes erwarten müssen: Wenn auf die Fläche  $Ks$  (Fig. 29) ein Lichtstrahl  $E$  fällt, so kann ich den gebrochenen Lichtstrahl  $B$ , der im Prisma verläuft, durch das Brechungsgesetz finden, wenn ich die Normale  $NN_1$  zeichne und den Brechungsindex kenne, der etwa  $\frac{3}{2}$  für Glas ist.  $B$  sei also der gebrochene Strahl. Wenn dieser an die zweite Fläche  $Ks'$  kommt, so wird er, wieder durch Konstruktion der Normalen  $N'N_1'$ , nach  $A$  hinaus gebrochen. Ein Lichtstrahl, der in der Richtung  $E$  auf das Prisma fällt, geht also nicht in der Richtung  $E'$  weiter, sondern bekommt nachher die Richtung  $A$ , eine ganz andere Richtung. Er wird, wie man sieht, von der Kante  $K$  fortgebogen. Wir werden also erwarten müssen, daß, wenn wir durch unseren Spalt eine Lichtlinie erzeugen und eine Linse so aufstellen, daß sie auf dem Schirm ein scharfes Bild dieses Spaltes entwirft, dann, wenn nun das Prisma in den Weg der Strahlen gestellt wird, nichts anderes geschieht, als daß wir das Bild des Spaltes stark seitlich abgelenkt finden, von der brechenden Kante  $K$  fort. Ich mache das Experiment (Fig. 30). Von der Bogenlampe  $B$  schicke ich das Licht durch den Spalt, lasse es durch die Linse  $L$  gehen und dann durch ein Prisma  $P$ . Wir sehen tatsächlich, daß wir ein Bild sehr stark seitlich abgelenkt bekommen. Aber wir erhalten nicht, wie wir erwarteten, das Bild des Spaltes, sondern wir

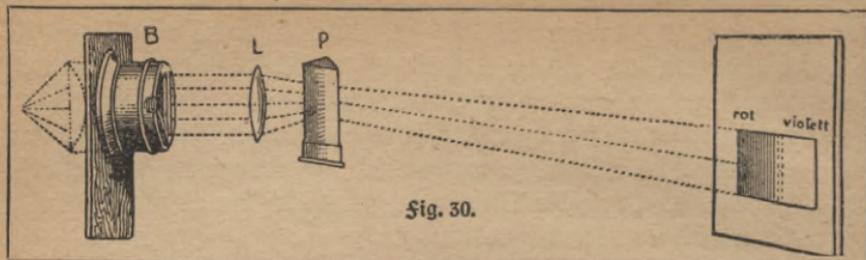


Fig. 30.

erhalten ein breites farbiges Band, in welchem wir oberflächlich hauptsächlich die Farben Rot, Grün, Blau und Violett sehen. Dieses breite Band nennt man ein Spektrum. Es ist, wie Sie bemerken, eine sehr glänzende Erscheinung, eine der glänzendsten, die die Optik kennt. Wenn wir näher zusehen, so finden wir, daß in dem Spektrum alle Farben und Farbenübergänge vorhanden sind. Zur Bequemlichkeit teilte Newton das Spektrum in sieben Farben ein, die er bezeichnete als: Rot, Orange, Gelb, Grün, Hellblau, Indigo, Violett. Aus der Lage der Farben sehen wir, daß der rote Teil des Spektrums am wenigsten aus der ursprünglichen Richtung des Strahles abgelenkt ist, der violette am meisten. Wir sagen deshalb, der rote Teil ist am wenigsten gebrochen, der violette am meisten. Wie haben wir uns das Zustandekommen eines solchen Spektrums zu erklären? Es sind offenbar nur zwei Möglichkeiten vorhanden: entweder enthält das weiße Licht selbst alle Farben, und das Prisma hat nur die Eigenschaft, das Gemisch in seine Teile zu zerlegen, oder das Prisma, die Substanz desselben, ist es, welche das weiße Licht so verschiedenartig färbt. Die erste Auffassung ist die von Newton, und sie ist die richtige, die zweite ist die von Goethe, und sie ist die falsche. Nach Newton also enthält das weiße Licht selbst alle Farben, und das Prisma zerstreut bloß dieselben, die vorher vereinigt waren. Da die Ablenkung eines Strahles durch das Prisma um so größer ist, je größer der Brechungsindex ist, so folgt also aus dieser Annahme, und das läßt sich direkt durch Messungen beweisen, daß der Brechungsindex des Glases für die verschiedenen Farben ein verschiedener ist, für die roten Strahlen ein geringerer als für die gelben, grünen usw., daß der Brechungsindex am größten ist für die violetten Strahlen. Man bezeichnet diese Eigenschaft der durchsichtigen Substanzen, daß ihr Brechungsindex für die verschiedenen Farben verschieden groß ist, als Dispersion und bezeichnet ebenso auch als Dispersion die Zerlegung des weißen Lichtes durch ein Prisma. Die Erscheinung des Spektrums erklärt sich also so,

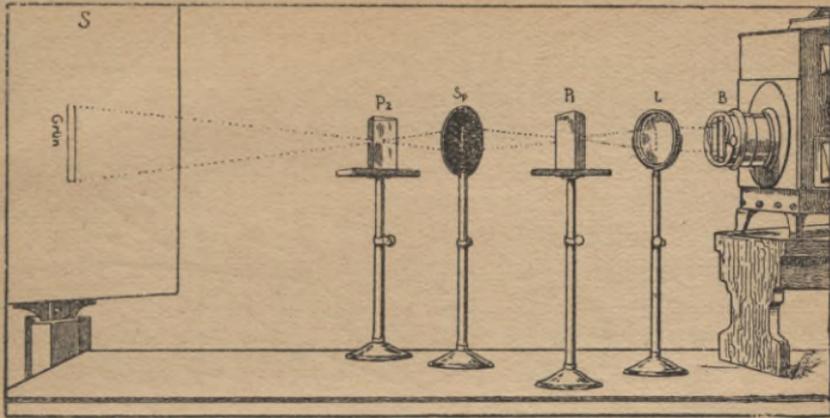


Fig. 31.

daß das Bild des Spaltes infolge der Dispersion des Glases für die verschiedenen Farben an verschiedene Stellen zu liegen kommt, so daß man also im Spektrum ein große Reihe von verschiedenfarbigen Spaltbildern nebeneinander hat.

Ist diese Erklärung richtig, sind die einzelnen Farben einfacher Natur, und ist nur das weiße Licht zusammengesetzt, so muß folgendes eintreten: Wenn wir jetzt irgendeinen Strahl von einfacher Farbe, einen roten oder grünen oder blauen aus dem Spektrum herausnehmen und ihn wieder durch ein Prisma gehen lassen, so darf dieser nicht wieder zu einem Spektrum ausgedehnt werden, überhaupt nicht in seiner Art verändert werden, sondern er darf nur eine Ablenkung erfahren. Wir wollen diesen Versuch machen. Ich erzeuge durch dieselbe Aufstellung, Lampe B mit Spalt, Linse L, Prisma  $P_1$  ein Spektrum, lasse aber (Fig. 31) die auseinandergehenden farbigen Strahlen, die Sie in der Luft des Zimmers einigermaßen erkennen können, auf einen schwarzen Schirm  $S_p$  fallen, in dem sich ein enger Spalt befindet, und kann nun diesen Spalt in alle Teile des Spektrums bringen. Dann geht nur rotes oder grünes oder blaues oder violettes Licht durch den Spalt hindurch. Dieses, z. B. das grüne, sende ich jetzt durch das Prisma  $P_2$ , und Sie sehen auf dem Schirm S hinten, daß wir von ihm nicht mehr ein Spektrum bekommen, sondern daß wir ein grünes, nur abgelenktes Bild des Spaltes erhalten. Es folgt also: die einzelnen Farben des Spektrums sind nicht mehr dispergierbar, sondern sie sind einfach. Bei der zweiten, Goetheschen Auffassung der Erscheinung ist dieses Resultat nicht wohl zu verstehen.

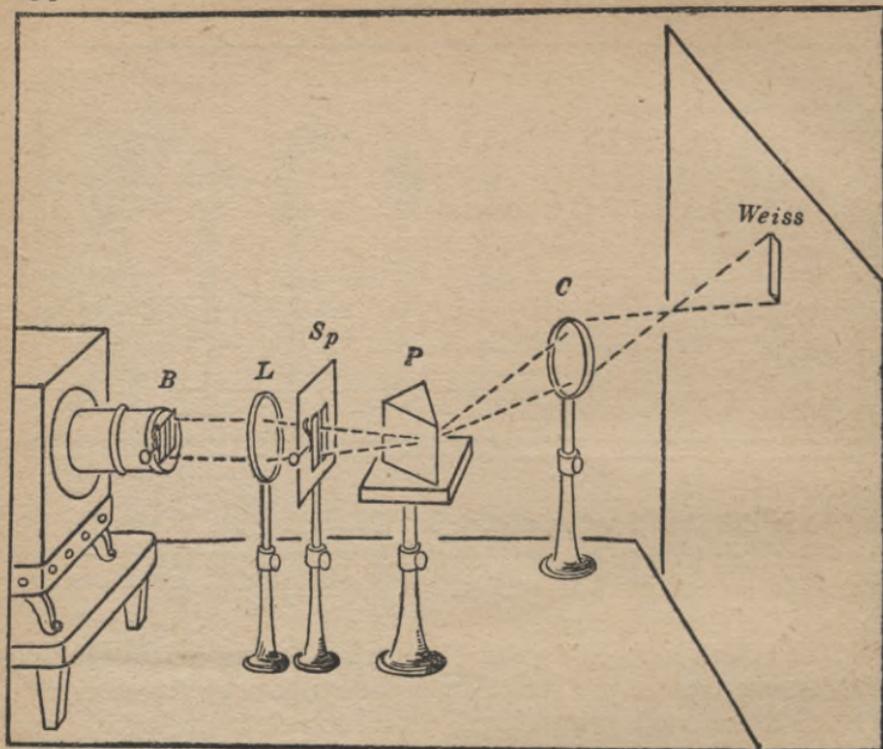


Fig. 32.

Eine weitere Folgerung der Newtonschen Auffassung ist aber die: Besteht das weiße Licht aus allen den einfachen Farben, ist es nur ein Gemisch aus ihnen, aus dem unser Auge die einzelnen Farben nicht mehr unterscheiden kann, so muß, wenn wir alle Farben des Spektrums zusammenmischen, wieder Weiß entstehen. Auch diese Folgerung können wir durch das Experiment bestätigen. Ich stelle zu dem Zweck (Fig. 32) kurz vor das Prisma einen Spalt *Sp*, der von der Linse *L* ganz erleuchtet ist, und lasse das aus dem Prisma *P* auseinandertretende Büschel von farbigen Strahlen auf eine Linse *C* fallen, die die Strahlen nach ihrem Durchgang wieder zu einem Bild des Spaltes konzentriert. Sie sehen, daß wir auf dem Schirm jetzt wieder ein weißes Bild des Spaltes bekommen: die Farben des Spektrums geben zusammen Weiß.

Da diese Auffassung des weißen Lichtes von besonderer Wichtigkeit ist, so wollen wir sie noch durch andere Experimente stützen. Wir be-

hauptein also: im Weiß sind alle Farben enthalten, wir können sie bloß mit dem Auge, ohne besondere optische Hilfsmittel nicht trennen, oder auch: wenn alle Farben des Spektrums gleichzeitig auf dieselbe Stelle des Auges fallen, so sieht das Auge die Farben nicht getrennt, sondern hat den Eindruck des Weißen. Da unser Auge den Eindruck einer Lichterscheinung eine kurze Zeit nachbehält, so können wir auch, statt gleichzeitig, vielmehr sehr rasch nacheinander die einzelnen Farben auf dieselbe Stelle unseres Auges fallen lassen und werden dann auch den Eindruck des Weißen bekommen müssen. Um dies auszuführen, habe ich hier einen drehbaren Spiegel *D* (Fig. 33), ein drehbares Kästchen, das auf seinen vier Seiten mit Spiegeln belegt ist, und auf welches ich das Spektrum fallen lasse. Von diesem wird es reflektiert auf die Wand hinten geworfen. Sobald ich nun den Spiegel drehe, bewegt sich das reflektierte Spektrum, und es kommt sukzessive und rasch hintereinander an die Stelle einer Farbe eine folgende und dritte usw. Sie sehen tatsächlich, daß Sie bei rascher Drehung des Spiegels die Farben nicht mehr unterscheiden können, sondern ein weißes Band auf der Wand sehen.

Noch auf eine dritte Art können wir daselbe beweisen. Newton hat auf eine kreisförmige Scheibe (Fig. 34) farbige Papiere so in Sektoren aufgeklebt, daß erstens die Hauptfarben des Spektrums unter ihnen vertreten waren, und daß zweitens die Größe der einzelnen Sektoren etwa der Ausdehnung der betreffenden Farben im Spektrum entsprach. Wenn ich diese Farbenscheibe durch ein Uhrwerk drehe, so verschwinden

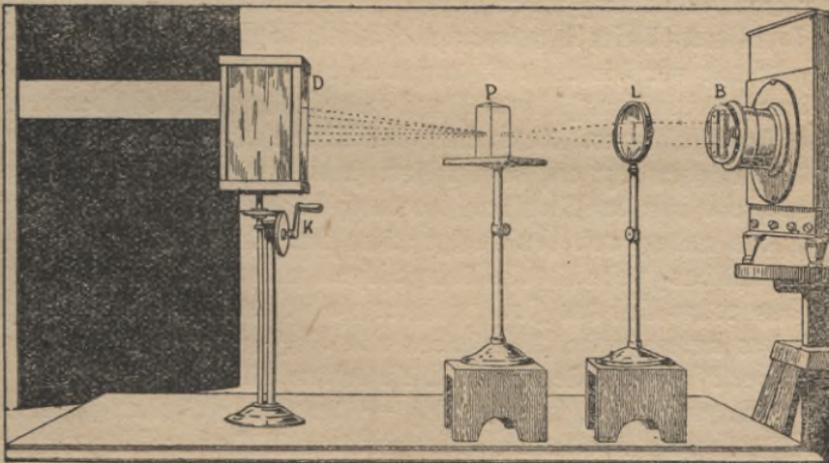


Fig. 33.

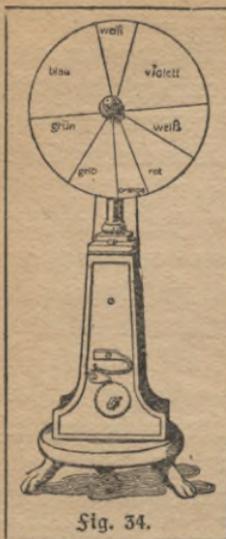


Fig. 34.

Ihnen auch die einzelnen Farben, und Sie sehen ein etwas graues Weiß. Der grauliche Ton kommt daher, daß wir es hierbei nicht mit reinen Spektralfarben zu tun haben.

Durch diese Experimente überzeugen wir uns von der Richtigkeit der Newtonschen Auffassung, daß das weiße Licht der Sonne, oder auch das weiße Licht des elektrischen Lichtbogens alle Farben enthält. Wenn wir nun aber aus den vielen Farben des Spektrums einige herausnehmen — und das können wir bei unserer Anordnung leicht —, was gibt dann die Mischung der anderen? Ich brauche bloß in unserer Anordnung Fig. 32, wo ich das Spektrum durch eine Linse wieder zu Weiß vereinigt habe, ein Kartenblatt vor der Linse C so zu verschieben, daß ich einzelne Teile des Spektrums nicht durch sie hin-

durchlasse. Ich halte z. B. das Kartenblatt so, daß ich das Rot nicht hindurchlasse; es gehen noch die gelben, grünen, blauen, violetten Farben hindurch, und Sie sehen, unser Bild auf dem Schirm ist schön grün gefärbt. Ich halte das Kartenblatt von der anderen Seite vor, so daß ich die violetten und blauen Strahlen abfange, das Bild auf dem Schirm ist orangegelb gefärbt. Also sagt dieses Experiment zunächst aus, daß wir durch Mischung von einigen der sieben Farben des Spektrums wieder eine der sieben Farben erhalten, keine neue.

Wir können dieses Experiment noch interessanter so gestalten (Fig. 35): Ich bringe vor die Linse C, auf welche der Farbenfächer fällt, ein kleines spitzwinkliges Prisma G, und zwar halte ich dieses in den blauen Teil des Spektrums. Dieses lenkt die blauen Strahlen zur Seite ab, und wir sehen jetzt auf dem Schirm zwei Bilder des Spaltes, eines herrührend von den Strahlen, die durch das kleine Prisma gegangen sind, das andere von den übrigen Strahlen. Das erstere ist blau gefärbt, und das zweite ist gelb. Bringe ich umgekehrt das kleine Prisma G in den roten Teil des Farbenfächers, so ist das abgelenkte Bild rot und das andere grün. Wir haben also die Farben des Spektrums in zwei verschiedene Teile geteilt. Diese beiden Bilder ergeben, wenn ich sie zusammenbringe, immer Weiß — denn sie enthalten zusammen alle Farben des Spektrums. Wir nennen zwei Farben, die zusammen den Eindruck des Weiß ergeben, komplementäre Farben und wir

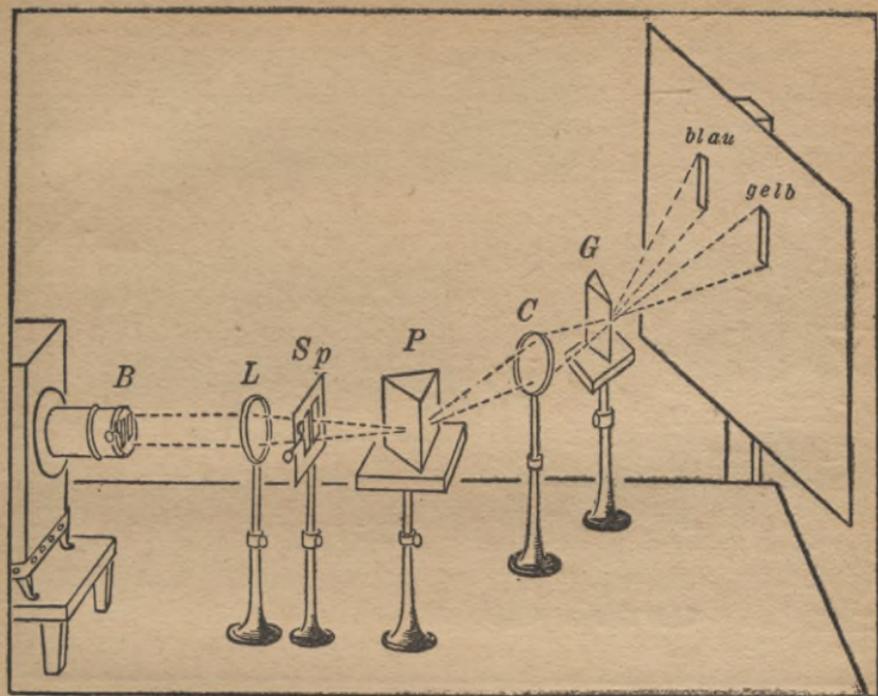


Fig. 35.

müssen also sagen, unsere beiden Bilder sind stets komplementär gefärbt. Komplementärfarben sind Rot und Grün, Gelb und Blau, Gelbgrün und Violett.

Wir sehen zugleich hieraus, daß eine Farbe, z. B. das Gelb, das wir aus allen Farben abzüglich des Blau zusammengemischt haben, uns durchaus nichts von den zusammengemischten Farben mehr erkennen läßt, sondern genau so aussieht wie ein reines spektrales Gelb. Unser Auge ist nicht imstande, aus einem Farbgemisch die einzelnen Farben herauszuerkennen, es ist in dieser Beziehung viel weniger empfindlich als das Ohr, das ja aus einem großen Tongemisch jeden einzelnen Ton heraushören kann.

Daß das eine unserer gefärbten Bilder aus einem Farbgemisch besteht, können wir einfach nachweisen, indem wir noch ein zweites spitzwinkliges Prisma anwenden und einen Teil seiner Farben nach der andern Seite ablenken. In Fig. 35 haben wir durch das Prisma G, das wir in den blauen Teil des Spektrums bringen, ein abgelenktes

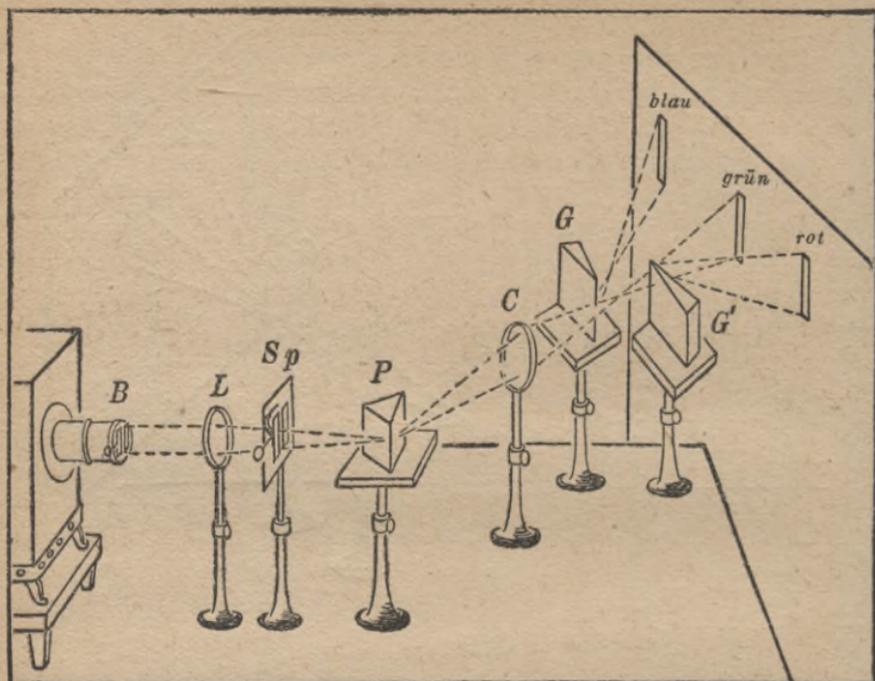


Fig. 36.

blaues Spaltbild und ein unabgelenktes gelbes erzeugt. Die letztere Farbe ist aus den Farben des Spektrums, abzüglich des Blau, gemischt. Wenn wir nun in Fig. 36 noch das Prisma  $G'$  in den roten Teil dieses Farbenfächers bringen, so finden wir ein seitlich abgelenktes rotes Bild, während das vorher gelbe Bild grün gefärbt ist. Diese drei Farben, rot, grün und blauviolett geben also auch zusammen weiß.

Was uns an der obigen Auseinandersetzung am meisten auffällt, ist die Behauptung, daß Gelb und Blau komplementäre Farben sind, daß sie zusammen Weiß ergeben. Alle unsere Erfahrungen, die wir von Jugend auf mit unseren ersten Tuschversuchen gewonnen haben, sprechen gegen die Richtigkeit dieser Behauptung. Alle unsere Erfahrungen und die aller Künstler sagen uns, daß Blau und Gelb gemischt nicht Weiß, sondern Grün geben.

Woher kommt dieser Widerspruch? Aus der näheren Betrachtung werden wir die Richtung erkennen können, in der wir suchen müssen. Das eine Mal haben wir es mit farbigen Lichtern, das andere Mal

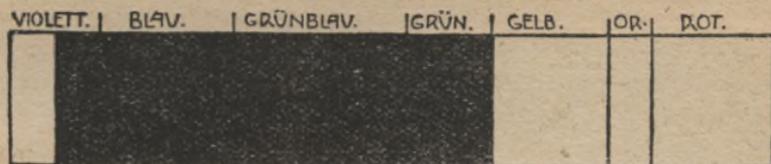


Fig. 37.

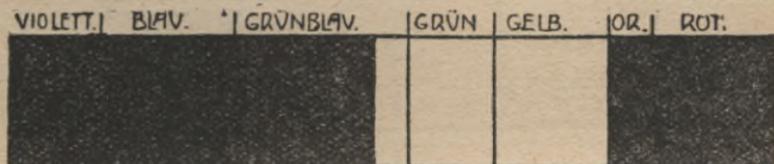


Fig. 38.

mit farbigen Körpern zu tun. In der That wird dieser Unterschied alles aufklären, und unsere nächste Aufgabe muß es nun sein, zu untersuchen, worin denn die Farben der Körper eigentlich bestehen.

Die Art und Weise, wie wir das untersuchen wollen, ist eigentlich sehr naheliegend. Wir wollen zunächst durchsichtige farbige Körper, z. B. gefärbte Gläser nehmen, unser weißes Licht durch diese hindurchgehen lassen und das aus ihnen austretende farbige Licht auf ein Prisma fallen lassen und so zerlegen. Ich brauche also nur bei unserer Anordnung in Fig. 30 vor den Spalt solche farbige Körper zu halten. Sehr gut eignen sich zu diesen Versuchen gefärbte Gelatineblätter, wie man sie jetzt im Handel bekommt. Ich setze also diese rote Gelatine vor meine Lampe; Sie sehen (Fig. 37), daß das Spektrum jetzt ein ganz eigenes Aussehen hat. Man sieht noch den roten Teil des Spektrums und den orangefarbenen und gelben, aber an Stelle des grünen Theils ist das Bild ganz dunkel, ebenso im blauen, und nur ein Teil des violetten erscheint wieder. Ich bringe zweitens diese grüne Gelatine (Fig. 38) vor den Spalt. Das Spektrum sieht wieder ganz anders aus. Hier ist der grüne und gelbe Teil und ein wenig vom blauen Teil noch vorhanden, aber der rote und violette ist verschwunden, an ihrer Stelle sehen wir nichts, Dunkelheit im Spektrum. Was können wir daraus schließen? Offenbar das, daß von allen Farben, die im weißen Licht enthalten sind, und die in die gefärbten Körper eintreten, ein Teil in diesen zurückgehalten wird und nur ein anderer Teil durch sie hindurchgelassen wird. Dieses Zurückhalten von einzelnen Farben, die also dann nicht durch die Gelatine durchdringen, nennen

	VIOLETT	DUNKELBLAU	HELLBLAU	GRÜN	GELB	OR	ROT
a							
b							

Fig. 39.

wir Absorption. Ein Teil des weißen Lichtes wird also in den farbigen Körpern absorbiert, und nur der Rest wird durchgelassen. Ein durchsichtiger Körper erscheint in der Mischung derjenigen Farben, welche er durch sich hindurchläßt. So ist die Farbe unserer roten Gelatine eine Mischung von Rot, Orange, Gelb und Violett, die unserer grünen eine Mischung von Grün, Blau und Gelb. Diese Spektren, in denen ein Teil der Farben fehlt, weil sie durch Absorption zurückgehalten sind, nennt man Absorptionsspektren.

Auch farbige Flüssigkeiten, wie Lösungen von Kupfervitriol, übermangansauerm Kali, zeigen die gleiche Art von Absorptionsspektren. Zwei besondere Spektren möchte ich Ihnen noch vorführen. Ich halte zuerst ein gelbes Glas vor meinen Spalt, und Sie sehen (Fig. 39 a), daß dieses das Rot, Orange, Gelb und Grün durchläßt, dagegen das Blau und Violett absorbiert. Zweitens halte ich ein blaues Glas vor den Spalt (Fig. 39 b), und Sie beobachten, daß dieses das Violett, Blau und einen Teil des Grün hindurchläßt, dagegen das Rot, Orange und Gelb absorbiert. Wenn ich jetzt die beiden Gläser übereinanderlege, was wird dann eintreten? Aus dem gelben Glas treten rote, gelbe und grüne Strahlen in das blaue ein. Das blaue Glas aber absorbiert die roten und gelben, und es treten also aus dieser nur die grünen Strahlen hindurch. Das Licht, das durch gelbe und blaue Körper hintereinander gegangen ist, ist grün in Folge der Absorption. Wir können sagen, daß wir hier eine Farbmischung durch Subtraktion haben. Von den aus dem ersten gefärbten Körper austretenden Strahlen hat der zweite wieder diejenigen fortgenommen, die er absorbiert, so daß das grüne durchgelassene bloß die Differenz des weißen Lichtes abzüglich der zwei Absorptionen ist.

Wir kennen nun auch eine Menge farbiger Körper, welche nicht durchsichtig sind, z. B. hier diese bunten Papiere. Woher entsteht diese Färbung? Wir können ohne weiteres sehen, indem wir ein Spektrum auf ein solches Papier fallen lassen, daß z. B. das rote Papier, von allen Strahlen, die im weißen Licht enthalten sind, nur die roten diffus zurückwirft. Die übrigen Strahlen absorbiert es. Um diese Absorption erklären zu können, müssen wir freilich annehmen, daß auch bei undurchsichtigen Körpern das auffallende Licht eine gewisse, wenn auch sehr kleine Strecke weit in den Körper eindringt, daß dabei die Absorption stattfindet, und daß das von dieser kleinen Tiefe aus zurückgeworfene Licht dann die Färbung des Körpers hervorbringt. Daraus werden wir nun auch jetzt die Tatsache leicht erklären können, daß die Malerfarben Blau und Gelb zusammen Grün ergeben. Diese Farben bestehen gewöhnlich aus pulferförmigen Substanzen. Die gelben Farbstoffe werfen nun hauptsächlich gelbe, grüne und rote Strahlen zurück, die blauen dagegen blaue, violette und grüne. Beim Zusammenwirken kommt das Licht in unser Auge nicht bloß aus der obersten Schicht, sondern auch aus tieferen Schichten, wobei die gelben und roten Strahlen von dem blauen Pulver, die blauen und violetten von dem gelben absorbiert werden, wodurch also vermittels der Subtraktion nur die grüne Farbe erscheint.

Man kann aber zwei Farben, auch wenn sie nicht einfach, sondern selbst schon zusammengesetzt sind, noch auf andere Weise mischen, nämlich so, daß sich ihre Lichter summieren, daß also, wie man es nennen kann, eine Mischung durch Addition anstatt der bisherigen durch Subtraktion entsteht. Dabei bekommt man auch ganz andere Resultate. Solche addierende Mischungen kann man sehr schön und in sehr einfacher Weise mit dem Farbenmischungsapparat (Fig. 40) hervorbringen und demonstrieren. Derselbe wird vor die Öffnung einer Bogenlampe für elektrisches Licht gesetzt. Er enthält drei Linsen, eine rote, eine grüne und eine blau gefärbte, die ihr Licht von der Bogenlampe durch je eine hinter ihnen angebrachte Öffnung bekommen. Man erhält dann getrennt einen roten, einen grünen und einen blauen Kreis. Durch Drehen der Scheibe, an der die Linsen befestigt sind, kann ich

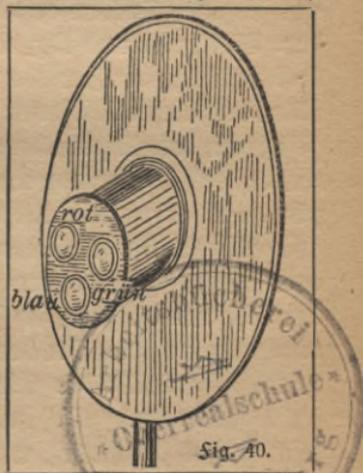


Fig. 40.

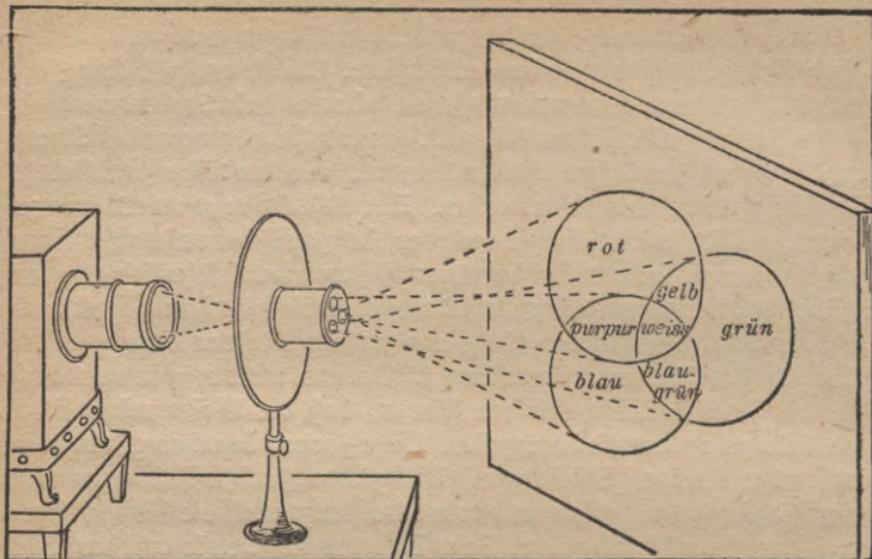


Fig. 41.

aber diese drei Kreise übereinandergreifen lassen und so die Farben durch Addition mischen. Sie sehen in Fig. 41 das Resultat dieser Mischungen. Wo der rote und grüne Kreis sich übereinanderlagern, erhalten wir durch Mischung Gelb, bei grün und blau erhalten wir helles Blaugrün, bei blau und rot Purpurrot und endlich erhalten wir durch die Mischung aller drei Farben in der Mitte Weiß. Sie erkennen, daß wir das Weiß auch aus je zwei Farben erhalten, nämlich aus dem Gelb und Blau, aus dem Blaugrün und Rot und endlich aus dem Purpur und Grün. Die drei Grundfarben sind eben so gewählt, daß sie zusammen Weiß ergeben. Aber daß dieses Weiß nur aus drei, nicht aus allen Farben zusammengesetzt ist, kann ich in überraschender Weise Ihnen dadurch nochmals beweisen, daß ich nun vor eine der drei Linsen einen schattengebenden Körper, z. B. einen Bleistift halte. Ich halte den Bleistift z. B. vor die grüne Linse. Sie sehen den Schatten desselben auf dem mittleren Teil, dem Weiß, schön purpur gefärbt, ich halte ihn vor die blaue Linse, der Schatten ist gelb, ich halte ihn vor die rote Linse, der Schatten ist blaugrün gefärbt. In der That, durch den Bleistift nehme ich für die betreffende Stelle des Schirmes eine von den drei Farben fort, und diese Stelle muß also in der Mischung der beiden anderen gefärbt sein. Außer dem Weiß, welches durch das Zusammenmischen aller drei

Farben erhalten wird, entsteht, wie Sie beobachten, aus den drei passend gewählten Grundfarben Rot, Grün, Dunkelblau noch ein schönes Hellgelb, das durch Abschwächung des Grün in Orange übergeht, dann ein schönes Blaugrün und endlich ein schönes Violett, das durch Abschwächen des Blau in Purpur übergeht. So können wir also, wenigstens im groben, alle Hauptfarben des Spektrums und das Weiß und Purpur durch drei passend gewählte Farben erzeugen. Davon ist bekanntlich in dem Dreifarbendruck eine wichtige Anwendung gemacht worden.



Fig. 42.

Wir haben hier durch additive Mischung des Rot und Blauviolett eine Farbe erzeugt, das Purpur, das im Spektrum nicht enthalten ist. Können wir durch Mischung von verschiedenen Farben noch andere neue Farben erzeugen, die wir noch nicht kennen? Gibt es überhaupt außer den Farben des Spektrums noch andere Farben? Diese Frage können wir beantworten, indem wir direkt die Farben zweier Spektren mischen. Ich setze vor meine Lampe einen Schirm, aus dem ich zwei parallele enge Spalte ausgeschnitten habe (Fig. 42). Ich erhalte dadurch zwei parallele Strahlenbündel. Den einen  $I$  breite ich nun (Fig. 43) durch Linse  $L_1$  und Prisma  $P_1$  direkt in einem Spektrum  $A$  aus, den andern lenke ich durch zwei Spiegel  $\beta$  und  $\sigma$  erst ab und breite ihn dann ebenfalls durch Linse  $L_2$  und Prisma  $P_2$  zu einem Spektrum  $B$  aus. Durch geringes Verschieben des Spiegels  $\sigma$  oder  $\beta$  kann ich aber nun das Spektrum  $B$  durch das Spektrum  $A$

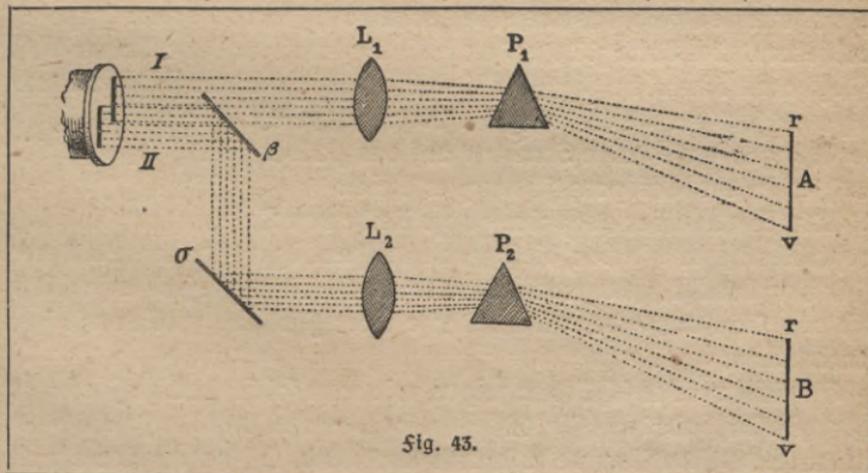


Fig. 43.

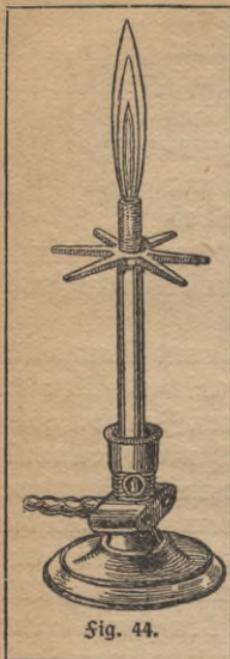


Fig. 44.

hindurchschieben, so daß ich alle Farben von *B* der Reihe nach mit allen Farben von *A* mische. Bei der Ausführung dieses Experiments sehen Sie, daß wir immer wieder dieselben sieben Farben und das Weiß durch Mischung erhalten, und daß nur noch, wenn sich das Rot des einen Spektrums über das Violett des andern Spektrums lagert, die Purpurfarbe als neue hinzukommt.

Manche Farben, die wir kennen und die nicht im Spektrum vorhanden zu sein scheinen, z. B. das Braun und das Rosa entstehen auch aus einer oder mehreren der Spektralfarben durch Zumischung von Weiß oder Schwarz. Rosa ist ein mit Weiß gemischtes Purpur, Braun ein mit Schwarz gemischtes Gelb.

Wir haben uns eine Zeitlang von dem eigentlichen Gegenstand unserer heutigen Untersuchung entfernt, welcher darin bestand, zu fragen, worauf die Farben der Körper eigentlich beruhen. Wir haben nun allerdings die Hauptsache bereits gefunden, daß bei allen durchsichtigen und undurchsichtigen Körpern, die nicht selbstleuchtend sind, sondern beleuchtet werden, die Färbung darauf beruht, daß die Körper Teile des auffallenden Lichtes absorbieren. Aus diesem Grunde muß auch ein farbiger Körper, wenn er vom Licht getroffen wird, das nur Strahlen enthält, die er absorbiert, schwarz erscheinen. Ich halte z. B. in das helle Licht unserer Bogenlampe diese Flasche mit Zinnober. Sie sehen ein lebhaft rot gefärbtes Pulver. Wenn ich aber jetzt vor die Öffnung der Bogenlampe ein grünes Glas halte, so daß gar keine roten Strahlen auf das Pulver fallen, so sehen Sie, daß es in der That ganz schwarz erscheint.

Wir kennen aber auch eine ganze Reihe von Lichtquellen, die selbst gefärbtes Licht aussenden, die sogenannten farbigen Flammen. Deren Färbung beruht offenbar nicht auf Absorption, denn sie sind es ja selbst, die das Licht aussenden. Die Ursache ihrer Färbung wollen wir jetzt untersuchen.

Zunächst möchte ich Ihnen zeigen, wie man solche farbige Flammen herstellt. Ich habe hier (Fig. 44) einen sogenannten Bunsenschen Gasbrenner. Dessen Flamme ist fast nichtleuchtend. Ich nehme nun mittels

einer Zange ein bißchen Glaubersalz und halte es in die Flamme. Die Flamme leuchtet sofort sehr schön hellgelb. Das ganze Zimmer ist mit gelbem Licht erhellt, und wenn Sie sich gegenseitig ansehen, so werden Sie finden, wie geisterhaft Sie alle aussehen, weil eben in dieser gelben Beleuchtung alle anderen Farben außer dem Gelb verschwinden und schwarz erscheinen. Ich halte ein anders Salz, Chlorlithium, in die Flamme. Sie leuchtet rot, ein drittes Salz, Thalliumchlorid, sie leuchtet grün, ein viertes, ein Zäsiumsalz, sie leuchtet blau. Also durch Einbringen von Salzen verschiedener Metalle können wir eine Flamme färben.

Welcher Art ist nun das Licht, das solche Flammen aussenden? Das Mittel, um diese Frage zu beantworten, kennen wir schon. Es besteht wieder darin, daß wir das Licht dieser Flammen durch ein Prisma gehen lassen und das Spektrum beobachten. Die Spektre, die ich durch diese gefärbten Gasflammen erhalten würde, wären zu schwach, als daß Sie sie deutlich sehen könnten. Ich will deshalb das Licht unserer Bogenlampe durch diese Salze färben. Zu dem Zwecke habe ich hier einen kleinen Apparat (Fig. 45), den ich an Stelle der unteren Kohle in die Bogenlampe einsetzen kann. Auf einem kreisförmigen Untersatz sind sechs kleine Kohlenstifte angebracht, die oben ausgehöhlt sind.



Fig. 45.

In die Höhlungen habe ich nun der Reihe nach die Salze gebracht von: Natrium, Lithium, Barium, Thallium, Strontium, Zäsium. Sobald der eine oder der andere dieser Kohlenstifte der oberen Kohle gegenübersteht, und der Strom durch beide Kohlen hindurchgeht, verdampfen die Salze und färben den Lichtbogen. Dieses Licht ist hell genug, so daß, wenn es durch unser Prisma geht, die Erscheinung im ganzen Saale sichtbar ist. Die übrige Aufstellung des Apparats ist also dieselbe wie in Fig. 30. Durch den Spalt trifft das Licht eine Linse und geht dann durch das Prisma, wodurch auf einem seitlichen Schirm ein Spektrum erzeugt werden soll.

Ich lasse erst die Kohle mit dem Natriumsalz in Wirkung treten. Wir erhalten natürlich von dem weißen Licht der glühenden Kohlen selbst ein vollständiges Spektrum, aber zu unserer Überraschung sehen wir auf dem Schirm in diesem Spektrum eine Reihe von getrennten sehr hellen Linien. Unter diesen fällt die eine hellgelbe Linie durch besondere Stärke auf, aber man erkennt auch eine grüne, eine grünblaue, zwei blaue und eine violette Linie (Fig. 46, 1). Was bedeutet das? Es bedeutet offenbar, daß unser leuchtender Natriumdampf nicht Licht

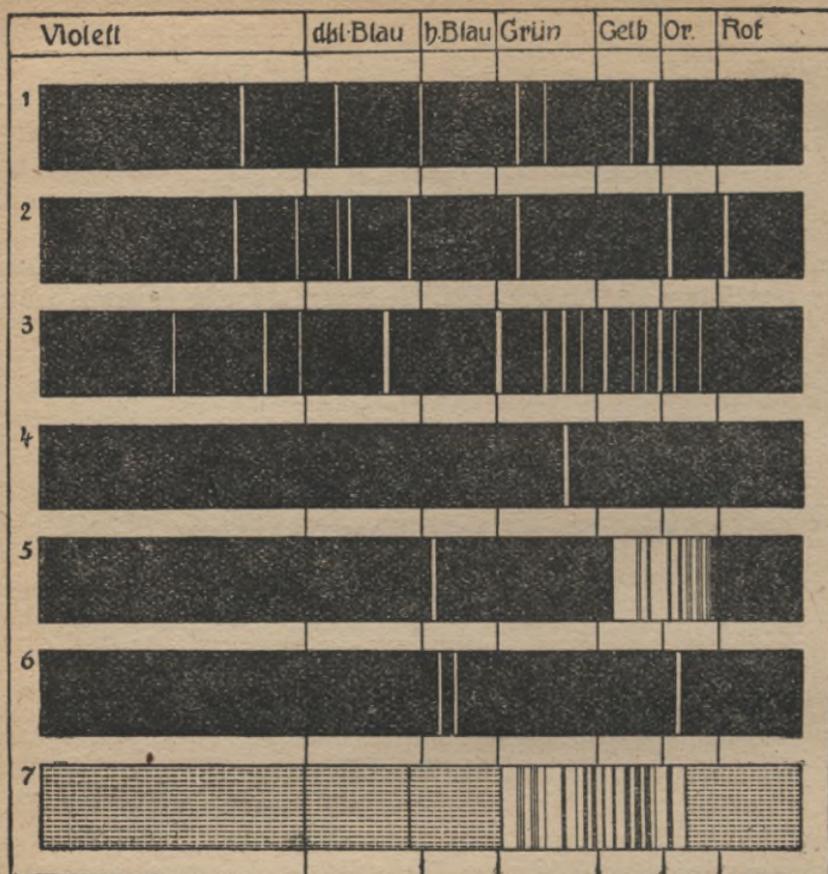


Fig. 46.

von allen möglichen Farben des Spektrums, sondern nur Licht von einigen bestimmten, nämlich den angegebenen Farben, ausendet. Das Spektrum dieser farbigen Flamme ist also ein ganz anderes als das des weißen Bogenlichtes. Es besteht tatsächlich nur aus einigen wenigen Linien. Ich nehme die Kohle mit dem Lithiumsalz. Wir sehen in dem ausgedehnten Spektrum der weißglühenden Kohle auch wieder einige besonders helle Linien erscheinen, darunter mit besonderer Intensität eine schöne rote und eine orangegelbe, außerdem aber noch einige blaue und violette Linien (Fig. 46, 2). Der glühende Lithiumdampf sendet also ebenfalls nur wenige Strahlenarten von verschiedener Farbe aus. Unser Thalliumsalz gibt uns bloß eine schöne grüne Linie (Fig. 46, 4). Es ist also das

Licht der Thalliumflamme durchaus einfarbig. Einfarbiges Licht bezeichnen wir als homogenes Licht. Unser sechstes Salz, Zäsium, gibt uns zwei verschiedene blaue und eine gelbrote Linie (Fig. 46, 6). Das Strontiumsalz gibt wieder mehr. Es gibt eine blaue Linie, die sehr hell ist, ferner eine gelbe und noch eine Anzahl Linien im Rot, die nahe beieinander liegen (Fig. 46, 5). Endlich das Bariumsalz gibt eine Anzahl roter, gelber, grüner, blauer und violetter Linien (Fig. 46, 3). Diese Spektre bestehen also nur aus einer, zweien oder mehreren hellen Linien. Man bezeichnet sie als Emissionspektre, zum Unterschied von den Absorptionspektren, bei denen das ganze helle Spektrum durchzogen ist von mehr oder minder vielen dunklen Streifen. Übrigens hängt die Zahl der Linien, die ein solches Emissionspektrum zeigt, wesentlich ab von der Temperatur des leuchtenden Körpers. Während z. B. das Natriumsalz in der hohen Temperatur der Bogenlampe die oben gezeichneten sieben Linien erkennen läßt, ist in der viel geringeren Temperatur des Bunsenbrenners von dieser nur die eine hellgelbe Linie zu sehen, die man deswegen auch kurzweg die Natriumlinie nennt. Ebenso zeigt ein Lithiumsalz in der Bunsenflamme nur die rote und die orange Linie. In der Bunsenflamme sieht man tatsächlich nur wenige Linien hell auf ganz dunklem Grunde, weil die Bunsenflamme selbst sehr schwach leuchtet. Dagegen erscheinen bei unserem Versuch die Linien als hellere Streifen auf dem hell leuchtenden Spektrum, das von der glühenden Kohle ausgeht. In Wirklichkeit sieht also z. B. das Bariumspektrum (Nr. 3) im Lichtbogen eher aus, wie es Fig. 46, 7 darstellt.

Eine wichtige Anwendung dieser Emissionspektre ergibt sich aus folgendem: Wenn ich zu gleicher Zeit in die Flamme ein Natriumsalz und ein Lithiumsalz bringe, so erscheinen die Linie des Natriums und die beiden Linien des Lithiums zugleich. Ebenso, wenn ich die Mischung verschiedener Salze anwende, so entstehen immer alle die Linien, welche die verschiedenen Salze zeigen, gleichzeitig. Ferner ist durch Versuche nachgewiesen, daß alle Salze, welche dasselbe Metall enthalten, immer das gleiche Spektrum in der Flamme ergeben. Ob ich Natriumchlorid oder Natriumbromid oder Natriumsulfat oder Natriumkarbonat anwende, immer bekomme ich in der Bunsenflamme nur die gelbe Linie. Daraus folgt nun, daß, wenn ich ein Salz habe, dessen Zusammensetzung mir unbekannt ist, daß ich dann, wenn ich es in die Flamme bringe und sein Emissionspektrum untersuche, ohne weiteres aus der Art

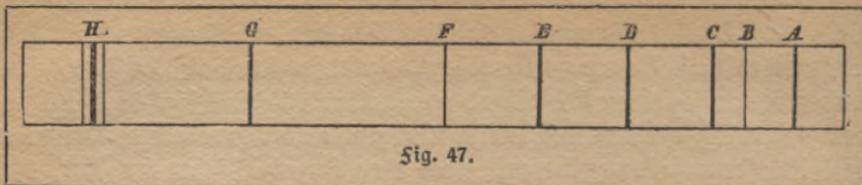


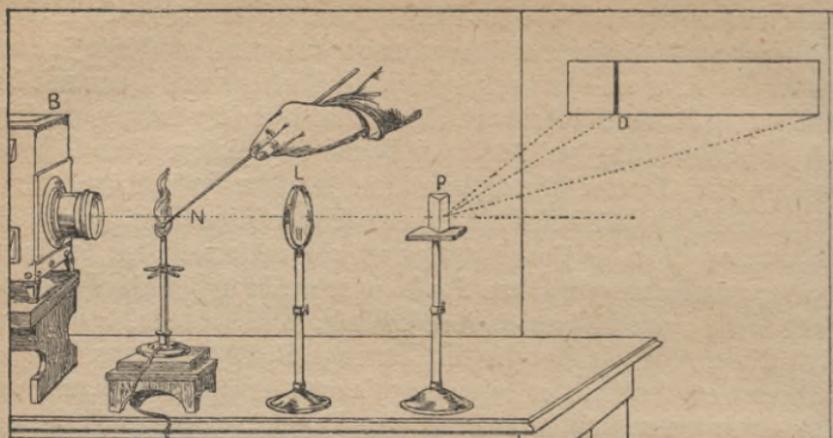
Fig. 47.

und Lage der hellen Linien, welche das Spektrum zeigt, schließen kann, welche Metalle in dem Salz enthalten sind. Vorausgesetzt ist dabei, daß ich vorher für alle bekannten Metalle ihre Linien mir in Tafeln oder Tabellen verzeichnet habe. Man kann auf diese Weise also durch die Spektralbeobachtungen eine unbekannte chemische Substanz analysieren, und da diese Flammenreaktionen äußerst empfindlich sind, da schon Spuren von Natrium genügen, um die gelbe, Spuren von Lithium genügen, um die rote und orange Linie hervorzubringen, so ist diese Spektralanalyse — so nennt man nach dem Vorgang von Kirchhoff und Bunsen diese Methode — ein mächtiges Hilfsmittel in der Hand des Chemikers. In der That hat auch die Spektralanalyse sofort nach ihrer Entdeckung und auch später im Laufe der Jahre sehr wichtige Resultate für die Wissenschaft hervorgebracht. Kirchhoff und Bunsen selbst fanden sofort zwei neue Metalle durch ihre Linien auf, nämlich das Zästrum, dessen Spektrum ich Ihnen eben gezeigt habe, und das Rubidium. Crookes fand später auf dieselbe Weise das Thallium, und so wurden allmählich noch eine Reihe weiterer Metalle, das Indium, Gallium usw. durch die Spektralanalyse entdeckt.

Diese Metalllinien haben aber eine noch viel weitergehende Bedeutung bekommen. Als wir das Spektrum unseres weißglühenden Bogenlichts entwarfen, so sahen wir die ganze Fläche des Spektrums von Farben verschiedener Art erfüllt. Auch bei genauem Zusehen, auch bei starker Vergrößerung kann man in diesem Spektrum nirgends eine Lücke entdecken. Anders dagegen ist es, wenn man nicht das weiße Licht einer Bogenlampe, sondern, was eigentlich das nächstliegende ist, das Licht der Sonne spektral zerlegt. Ich kann, wegen der Abendstunden dieser Vorlesungen, Ihnen das Experiment leider nicht zeigen, sondern Sie müssen mir hier auf das Wort glauben, ohne sich selbst zu überzeugen. Wenn man das Sonnenlicht durch einen Spalt und Prisma in ein Spektrum ausbreitet, so bietet das die Erscheinung, die Sie hier auf dieser Tafel (Fig. 47) abgebildet sehen. Das Spektrum ist durchzogen von einer Anzahl mehr oder minder kräftiger und breiter dunkler Linien.

Diese Linien waren lange ein Rätsel. Fraunhofer hat die Lage dieser Linien im Spektrum genau bestimmt, und man nennt sie nach ihm *Fraunhofersche Linien*. Er hat zugleich die stärksten von ihnen mit den Buchstaben *A* bis *H* bezeichnet. Die Linie *A* ist sehr kräftig und liegt am äußersten Ende des Rot, auch *B* und die stärkere Linie *C* liegen noch im Rot. *D*, eine sehr kräftige Linie, liegt im Gelb, *E* im Grün, *F* im Hellblau, *G* im Dunkelblau, *H*, eine sehr kräftige Linie, im Violett. Wenn man aber die Beobachtungsmethode verfeinert, das Spektrum weiter auseinanderzieht, den Spalt enger macht und sich nicht auf die Beobachtung mit bloßem Auge beschränkt, so findet man, daß erstens diese Linien, die wir hier als einzelne angeführt haben, zum Teil aus mehreren eng beieinander stehenden zusammengesetzt sind, und zweitens, daß außer diesen Hauptlinien noch eine Unzahl von feinen Linien das Spektrum durchschneiden. Wir wollen uns aber mit den Fraunhoferschen Hauptlinien *A* bis *H* begnügen. Solche schwarzen Linien in einem Spektrum sind, wie wir wissen, Zeichen von Absorption des Lichtes. Aber wie kommen in das Licht der Sonne Absorptionstreifen hinein? Daß die Absorption in der Atmosphäre der Erde diese Hauptlinien nicht verursacht, ließ sich leicht nachweisen. Man kennt jetzt genau diejenigen Linien, welche durch die Luftabsorption hervorgebracht sind. Die Linien *B* bis *H* gehören nicht zu diesen. Ganz besonders auffallend ist auch, daß die Linie *D* im Sonnenspektrum genau an derjenigen Stelle im Gelb liegt, in welcher die helle Linie des Natriumdampfes sich befindet. Diese Fraunhoferschen Linien waren also in der That ein sehr schwer lösbares Rätsel, dessen Auflösung durch Kirchhoff und Bunsen aber höchst überraschend werden sollte.

Wir hatten das Licht einer Bogenlampe durch gefärbte Substanzen, Gläser, Gelatine, Flüssigkeiten gehen lassen und die Absorptionen im Spektrum beobachtet. Kirchhoff fragte sich nun: was wird denn geschehen, wenn das Licht einer Bogenlampe durch eine gefärbte Flamme, also etwa durch glühenden Natriumdampf hindurchgeschickt wird? Wir wollen den Versuch von Kirchhoff, der sehr berühmt geworden ist, hier nachmachen. Zu dem Zweck bringe ich vor den Spalt der Bogenlampe, wie Fig. 48 zeigt, wieder eine Linse *L* und ein Prisma *P* und entwerfe dadurch das vollständige Spektrum des Bogenlichtes auf der Tafel. Nun aber bringe ich dicht vor den Spalt eine Gasflamme, in welche ich ein Löffelchen mit Natriummetall *N* einführe. Die Flamme leuchtet schön gelb, aber sofort sehen Sie, daß in dem Spektrum an der



Sig. 48.

Stelle *D*, die eben noch hell war, jetzt ein ganz dunkler Streifen erscheint. Das ist ein äußerst interessanter Versuch von weittragenden Folgen. Er sagt zunächst direkt aus, daß der glühende Natriumdampf gerade diejenige Farbe aus dem ganzen Spektrum absorbiert, welche er selbst aussendet. Die Farbe an der Stelle *D* wird von der Natriumflamme erzeugt, aber diese Farbe, die im Bogenlicht enthalten ist, wird von der Flamme auch absorbiert. Dasselbe können wir mit einer Thalliumflamme machen. Hier erhalten wir jetzt einen dunklen Streifen im Grün. Die schwarze Linie ist durch Absorption des Lichts entstanden. Wir können dieses Resultat verallgemeinern und aussprechen: Ein jeder Körper absorbiert gerade diejenigen Strahlen, welche er aussendet.

Was folgt nun daraus für das Sonnenspektrum, für dessen Fraunhofersche Linien? Nach der Analogie unseres Versuches folgt daraus, daß wir annehmen müssen, die Sonne enthalte einen weißglühenden Kern, der unserem Lichtbogen entspricht, und sei umgeben von einer dampfförmigen leuchtenden Hülle, die man die Chromosphäre nennt, in welcher eine Anzahl von Metalldämpfen enthalten sind. Diese absorbieren von dem weißen Licht des Kerns gerade diejenigen Strahlen, welche sie selbst aussenden würden. Da nun zunächst die Linie *D* des Sonnenspektrums mit der Natriumlinie genau übereinstimmt, so müssen wir schließen, daß in der Sonnenchromosphäre Natriumdampf enthalten sei. Wir werden überhaupt alle Linien des Sonnenspektrums mit denen der Metalle vergleichen und dadurch feststellen können, welche Stoffe in der Sonnenatmosphäre enthalten sind. Eisen z. B. gibt ein Emissions-

spektrum, welches über 2000 Linien enthält, und alle diese Linien sind als dunkle Fraunhofersche Linien im Sonnenspektrum gefunden worden. Man hat so eine große Reihe irdischer Stoffe, namentlich Eisen, Kupfer, Nickel, Mangan, Kohlenstoff, Lithium, Silber, Zinn in der Sonne nachweisen können. Dagegen fehlen auf ihr auch eine ganze Reihe irdischer Stoffe, insbesondere die schwersten Stoffe, Iridium, Osmium, Platin, Uran und, was besonders interessant ist, auch das Gold. Die auri sacra fames, der verwünschte Hunger nach Gold, wäre also auf der Sonne unbekannt, da man das Gold dort nicht kennt.

Wenn übrigens diese angeführte Anschauung von der Konstitution der Sonne, daß sie nämlich aus einem weißglühenden Kern und einer glühenden Dampfatmosphäre bestehen soll, richtig ist, so muß sie sich auch direkt prüfen lassen. Wenn bei einer Sonnenfinsternis der Kern der Sonne verdeckt ist, so sieht man bekanntlich von dem Rande aus die sogenannten Protuberanzen, wolkenförmige Gebilde, in die Höhe schießen. Diese wären also Teile der dampfförmigen Hülle, und wenn man das von dieser ausgehende Licht durch ein Prisma zerlegt, so muß das Spektrum genau so aussehen, wie das von glühendem Natriumdampf oder Lithiumdampf erzeugte, d. h.: es muß helle Linien enthalten, nicht dunkle. Denn das Licht des glühenden Sonnenkernes geht ja nicht durch diese Protuberanzen hindurch zu uns. Diese Folgerung ist tatsächlich bestätigt worden. Das Spektrum der Protuberanzen zeigt helle Linien, und zwar am stärksten die Linien des glühenden Wasserstoffs (eine rote, grüne, dunkelblaue und zwei violette). Aber man sah auch in diesem Spektrum immer kräftig eine gelbe Linie, welche man bei keinem irdischen Stoff gefunden hatte, und welche man deswegen einem besonderen, auf der Erde nicht vorkommenden Elemente zuschreiben mußte, das man deshalb als Helium (von Helios, die Sonne) bezeichnete. Erst seit zwanzig Jahren ist das Helium als ein gasförmiges Element auch auf der Erde gefunden worden und es spielt das jetzt sogar eine sehr wichtige Rolle, da die radioaktiven Stoffe, die wunderbaren Körper, die jetzt so vielfach untersucht werden, von selbst Helium entwickeln.

Wir haben also durch die Beobachtung des Spektrums ein Mittel erhalten, die Beschaffenheit der Sonne und aller ähnlichen Sterne, der Fixsterne, auch wenn sie noch so weit entfernt sind, hier auf Erden festzustellen, gewiß einer der großartigsten Beweise, welche weitgehenden Folgerungen aus gründlicher Beobachtung der uns umgebenden Natur gezogen werden können.

## Dritte Vorlesung.

**Interferenzen. Wellennatur des Lichts. Lichtäther.**

Als Newton an dem Fenster seines Wohnhauses bei London von Vorübergehenden oft beobachtet wurde, wie er Seifenblasen machte, da ging, wie erzählt wird, das Gerücht in London um, der große Newton sei kindisch geworden. Aber offenbar ist es etwas anderes, wenn ein Kind mit Seifenblasen spielt, etwas anderes, wenn sich ein Newton damit beschäftigt. In den Seifenblasen steckt ein großes optisches Problem, ein wichtiges optisches Fragezeichen. In der Tat denkt ein Kind nicht darüber nach, und auch die wenigsten Erwachsenen tun es, woher denn eigentlich die Farben bei den Seifenblasen ihren Ursprung haben, aber Newton tat es. Hier haben wir Farben, welche wir uns durch unsere bisherigen Kenntnisse nicht erklären können. Sie sind in Seifenlösung vorhanden, welche eine farblose Substanz ist, und sie entstehen nur unter den besonderen Umständen, daß aus der Seifenlösung eine dünne Haut gebildet wird. Außerdem zeigt dieselbe Stelle der Seifenblase bald rote, bald grüne usw. Farben, kurz, die Farben können nicht aus dem weißen Licht durch Absorption entstanden sein, wie wir bisher die Farben aller Körper erklärt haben. Also ist hier ein neues, ungelöstes Problem vorhanden.

Obwohl die Seifenblasen eine sehr bekannte Erscheinung sind, möchte ich sie doch hier projizieren, zumal da ich Ihnen zugleich zeigen möchte, daß man durch Anwendung der sogenannten Plateauschen Mischung Seifenblasen erzeugen kann, die nicht so leicht zerspringen, sondern sich in ruhiger Luft eine Viertelstunde lang halten können. Diese Plateausche Lösung stellt man sich folgendermaßen dar. Man löst 25 g Marseilleiseife in 1 l destilliertem Wasser bei gelinder Erhitzung auf, kühlt dann die Lösung wieder auf Zimmertemperatur ab und setzt 660 g bestes Glycerin zu. Nach tüchtigem Schütteln läßt man die Mischung eine Woche lang stehen, kühlt sie dann durch Eiswasser auf etwa  $3^{\circ}\text{C}$  ab und filtriert sie durch sehr durchlässiges Filtrierpapier, wobei man die trüben Teile so lange zurückgießt, bis die filtrierte Flüssigkeit ganz klar ist. Mit dieser Lösung erzeuge ich eine dünne Seifenhaut in der Weise, daß ich den gebogenen Draht S (Fig. 49) in die Lösung eintauche und herausziehe. Das Seifenwasser bildet dann eine ebene Fläche, die von dem kreisförmigen Draht begrenzt ist. Ich beleuchte nun diese

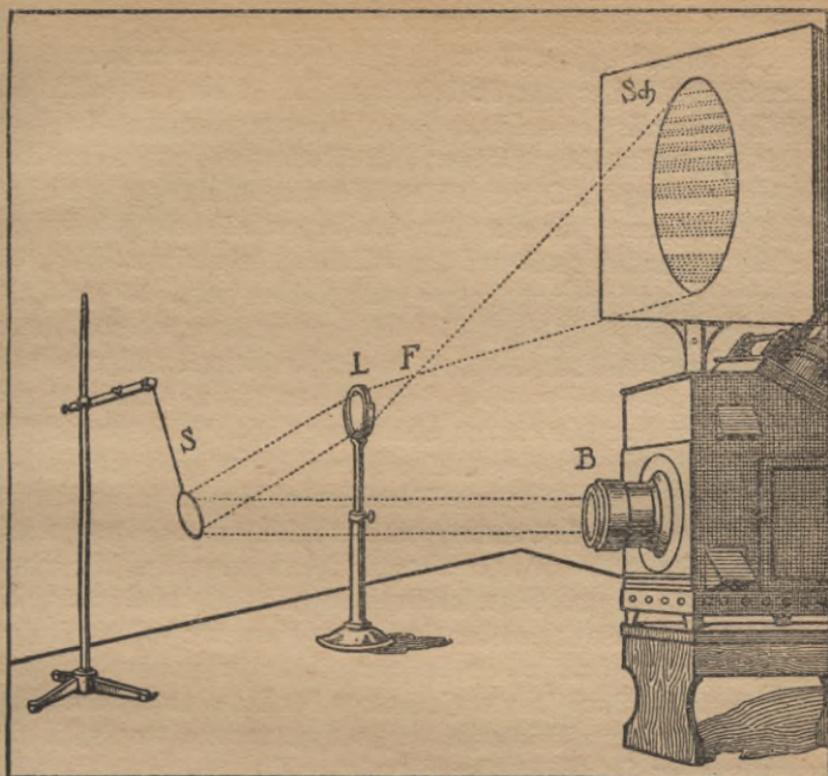


Fig. 49.

Seifenlamelle (Fig. 49) mittels des parallelen oder divergenten Lichts meiner Bogenlampe *B* und lasse die reflektierten Strahlen durch eine Linse *L* gehen, wodurch ich ein Bild von der beleuchteten Seite der Seifenblase auf dem Schirm *Sch* projiziere. Dieses Bild zeigt die Farben, und wir erkennen so, daß das von der Seifenblase reflektierte Licht die Farbenercheinungen gibt.

Wir sehen, wie beim allmählichen Dünnerwerden der Seifenhaut die Farben, die zuerst noch nicht vorhanden waren, allmählich entstehen und sich in parallelen, streifenförmigen Schichten anordnen.

Die Farben müssen offenbar davon abhängen, daß die Schicht der Seifenlösung so sehr dünn ist; denn solange sie noch dick ist, sehen wir in der Tat keine Farben. Also eine sehr dünne Schicht eines durchsichtigen Körpers zwischen zwei anderen durchsichtigen Körpern (der Luft auf beiden Seiten) zeigt Farben. Aus dieser Präzisierung erkennen

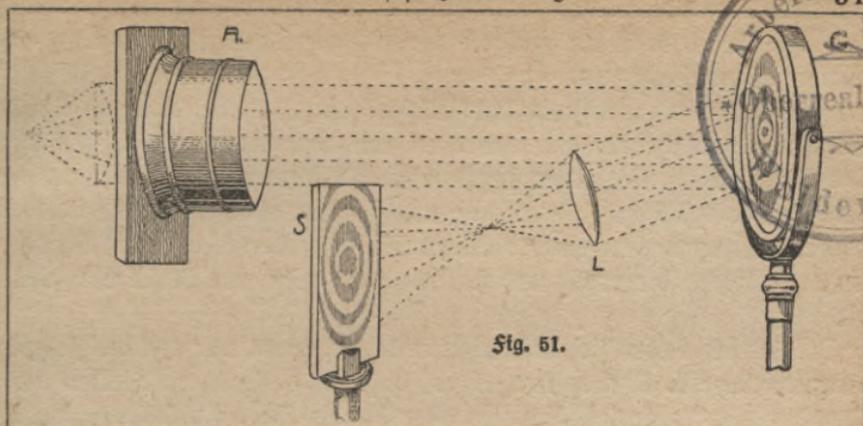
wir gleich, daß wir auch unter anderen Umständen schon Farben derselben Art bemerkt haben. Wenn im Winter die Fenster mit einer ganz dünnen Schicht Wasser oder Eis beschlagen sind, so bemerken wir beim Hinblicken ebenfalls Farben. Diese sind offenbar von derselben Art, denn wir haben eine dünne durchsichtige Schicht Wasser zwischen zwei anderen durchsichtigen Körpern, Luft und Glas. Wenn ich auf eine große Wasseroberfläche in einer Schale einen Tropfen Terpentinöl bringe, so breitet dieser sich bekanntlich rapid aus und bildet eine sehr dünne Schicht, die



Fig. 50.

auch Farben zeigt. Wissenschaftlich bezeichnet man deshalb auch die Farben dieser Art allgemein als „Farben dünner Blättchen“.

Wenn aber dies die einzige Bedingung dieser Farbenentstehung ist, und wenn, wie man vermuten kann, die verschiedenen Farben von der verschiedenen Dicke des Blättchens abhängen, so muß man, schloß Newton, die Erscheinung der Seifenblasen auch ganz stabil auf andere Art hervorbringen können. Wenn man eine sehr dünne Luftschicht zwischen zwei Glasplatten erzeugt, so sind dabei ja auch die Bedingungen zum Auftreten der Farben gegeben, nur daß die Farben dabei eben in Luft statt in dem Seifenwasser entstehen. Zugleich kann man auch die Abhängigkeit der Farbe von der Dicke des dünnen Blättchens dabei auf einen Blick ersichtlich machen, wenn man als die eine Begrenzung der Luftschicht eine Glasplatte (Fig. 50) nimmt, als die andere aber eine sehr flach gekrümmte Linse. Denn dann hat die Luftschicht an dem Berührungspunkte gar keine Dicke, von da an aber wächst die Dicke, wie es die Striche zwischen Platte und Linse angeben, so daß man alle verschiedenen Dicken nebeneinander hat. Zugleich sieht man, daß in je einem Kreise um den Berührungspunkt herum die Dicke immer dieselbe ist. Wenn also die Farbe nur von der Dicke abhängt, so muß man hierbei eine Erscheinung bekommen, die aus lauter Kreisen von verschiedener Färbung besteht. Ich will nun ein solches Newton'sches Farbglas *G*, wie man es nennt (Fig. 51), das in einen Rahmen gefaßt ist, den parallelen Strahlen meiner Bogenlampe *A* aussetzen, um es zu beleuchten, und das reflektierte Licht durch eine Linse *L* auf den seitlich stehenden Schirm *S* projizieren. Sie sehen tatsächlich hier die kreisförmigen bunten Ringe, die allerdings nicht ganz kreisförmig, sondern etwas verzerrt sind, weil ich ja das Farbglas schief gegen die einfallenden Strahlen stellen mußte, um das Bild projizieren zu können.



Damit ist nun tatsächlich bewiesen, daß in jedem dünnen durchsichtigen Körper, der zwischen zwei anderen durchsichtigen Körpern sich befindet, die Farben erzeugt werden, und daß die Färbung nur abhängt von der Dicke. Je nach der Dicke werden offenbar aus dem weißen auffallenden Licht andere und andere Strahlen verwendet, um die betreffende Farbe zu erzeugen.

Es wird von großem Interesse sein, zu versuchen, wie denn das Bild ausfällt, wenn ich auf das Farbglas nicht weißes, sondern einfarbiges Licht werfe. Wir können einfarbiges Licht für unsere Zwecke genügend leicht erzeugen, wenn wir vor die Öffnung unserer Bogenlampe einfach ein rotes oder ein blaues Glas bringen. Tun wir das, wenden wir nur rotes Licht an, so sehen wir jetzt (Fig. 52), daß unser Bild nur aus abwechselnd roten und schwarzen Ringen besteht. Beleuchten wir mit blauem Licht, so besteht es aus abwechselnd blauen und schwarzen Ringen, und bei genauerem Vergleichen bemerken wir, daß der erste zweite usw. blaue Ring enger ist, kleineren Durchmesser hat, als der erste, zweite usw. rote Ring.

Diese Erscheinungen sind sicher sehr merkwürdig. Wir werfen rotes Licht auf unseren Apparat, und obwohl in diesem nur farblose durchsichtige Körper, wie Glas und Luft, vorhanden sind, die also keine Absorption hervorbringen, wird



das rote Licht doch an einigen Stellen ganz ausgelöscht, und es entsteht Dunkelheit, und das blaue Licht wird an anderen Stellen ausgelöscht, und es entsteht dort Dunkelheit. Daß bei weißem Licht die Ringe farbig werden, verstehen wir nun leicht. Diese Farben sind Mischfarben. An einer bestimmten Stelle werden z. B. die roten Strahlen ausgelöscht, die grünen und blauen aber nicht, die Stelle erscheint blaugrün, an einer anderen Stelle werden die grünen Strahlen ausgelöscht, die roten und blauen aber nicht, die Stelle erscheint violett.

Die Farben lassen sich also leicht erklären, wenn nur erst die Frage beantwortet ist: Woher kommt es, daß an bestimmten Stellen des Farbenglases auffallendes rotes oder blaues Licht einfach vernichtet wird, so daß diese Stellen ganz schwarz erscheinen?

Newton selbst gelang es trotz seines fabelhaft sicheren Blickes nicht, diese Frage richtig zu beantworten; im Gegenteil, seine Autorität bewirkte, daß die richtige Erklärung, obwohl sie schon zu seiner Zeit von Hüngens gefunden war, über ein Jahrhundert unbeachtet blieb, bis neue Erscheinungen den Engländer Thomas Young und den Franzosen Fresnel schließlich dazu führten, die Hüngenssche Ansicht als richtig zu beweisen.

Analysieren wir die Erscheinung, die das Farbenglas bietet, etwas genauer. Auf das Farbenglas fällt das Licht der Bogenlampe, und wir wollen eine Stelle des Farbenglases betrachten, welche in rotem Licht uns ein helles Licht auf dem Schirm gibt. Das Licht rührt von der Reflexion der Strahlen an dieser Stelle des Farbenglases her. Aber offenbar sind an dieser Stelle des Farbenglases eine Reihe von Vorgängen vorhanden. Es wird nämlich das auffallende Licht zunächst zum Teil direkt an der Vorderfläche des Glases reflektiert, ein Teil aber dringt auch in das Glas und in die Luftschicht ein und wird dann erst an der Fläche des hinteren Glases reflektiert und kommt so auf unseren Schirm. Was durch diese kompliziert scheinende Betrachtung klargemacht werden soll, ist nur das, daß an jeder Stelle des Schirmes die dort vorhandene Erleuchtung nicht von einem einzigen Strahl herührt, sondern von zwei Strahlen, die nach Durchlaufung verschieden langer Wege schließlich in derselben Richtung austreten. Und nun können wir die Erscheinung, die unser Farbenglas bietet, auch folgendermaßen aussprechen, ohne mehr zu sagen, als das Experiment in Verbindung mit unserer Überlegung zeigt:

Das Zusammenwirken zweier Strahlen, die verschieden lange Wege durchlaufen haben, bringt an manchen Stellen des Schirmes Helligkeit, an anderen aber absolute Dunkelheit hervor.

Hier fällt uns der Schlusssatz als ganz besonders merkwürdig auf. Zwei Strahlen, die zusammenwirken, können unter Umständen Dunkelheit hervorbringen. Danach ist es also nicht wahr, daß Licht und Licht zusammen unter allen Umständen immer mehr Licht geben, sondern Licht und Licht zusammen können unter Umständen Dunkelheit ergeben, sich aufheben.

Diesen Schluß haben wir aus unserem Experiment mit Notwendigkeit zu ziehen, und jetzt tritt die Frage an uns heran, wie sie schon an Huyghens herangetreten ist: was kann denn die Natur des Lichts sein, so daß unter Umständen zwei Lichtstrahlen sich aufheben können?

Hier kommt uns in den Sinn, daß wir Vorgänge in der Natur bereits kennen, bei denen dasselbe stattfindet, daß nämlich zwei scheinbar ganz gleiche Erscheinungen, statt sich zu verstärken, sich vielmehr aufheben. Wenn wir eine Stimmgabel anschlagen, so hören wir einen Ton. Drehen wir aber die Stimmgabel vor unserem Ohr um ihre Achse, so hören wir deutlich bei gewissen Stellungen der Stimmgabel ihren Ton, bei anderen aber hören wir nichts, und zwar tritt das Verstummen bei einer Drehung immer viermal ein, ungefähr immer dann, wenn die Kanten der Stimmgabel vor unserem Ohr sich befinden. Von dem Schall weiß man aber schon seit dem Altertum, daß er in einer schwingenden Bewegung des tönenden Körpers besteht und sich in der Luft in Form einer Wellenbewegung ausbreitet. Dieses Verschwinden des Tones hat man daher schon lange dadurch richtig erklärt, daß von den beiden Zinken der Gabel aus die Luft in Wellenbewegung versetzt wird, und daß an den genannten vier Stellen, die man Interferenzstellen nennt, die beiden Wellenbewegungen sich gerade aufheben, daß da immer eine Erhebung der Welle von der einen Zinke her mit einer Vertiefung von der anderen Zinke her zusammentreffen und dadurch die Bewegung ganz aufgehoben wird.

Wenn wir die Wellen auf einem Teich beobachten, die durch hingeworfene Steine erzeugt sind, so können wir auch, obwohl die Erscheinung flüchtiger Natur ist, leicht erkennen, daß unter Umständen zwei Wellen sich so aufheben können, daß da, wo das geschieht, die Bewegung ganz aufhört. Wenn an zwei Stellen eines Teiches Steine

in denselben geworfen werden, so breiten sich von jeder Einwurfsstelle die Wellen in Kreisen aus, diese Kreise werden immer weiter, und schließlich laufen die von beiden Stellen ausgehenden Kreise durcheinander, jedoch so, daß man ganz gut unterscheiden kann, daß jede Wellenbewegung sich weiter so fortpflanzt, als ob die andere gar nicht vorhanden wäre. Es macht also jedes Wasserteilchen einerseits eine Bewegung, die von der einen sich ausbreitenden Welle hervorgerufen ist, und zweitens eine von der zweiten Welle hervorgerufene. Diese beiden Bewegungen summieren sich einfach. Daraus erkennt man, daß, wenn ein Wasserteilchen von der einen Welle etwa veranlaßt wird, sich gerade nach oben über den Wasserspiegel zu bewegen, und von der anderen gleichzeitig veranlaßt wird, sich nach unten zu bewegen, daß dann die wirkliche Bewegung nur die Differenz beider ist, und daß die Bewegung dabei ganz aufhören und Ruhe eintreten muß, wenn die Bewegung nach oben und die Bewegung nach unten genau gleich groß sind. Man sieht auch anderseits, daß, wenn ein Wasserteilchen von beiden Wellenzügen so angegriffen wird, daß es sowohl von dem einen wie von dem anderen gleichzeitig eine Bewegung nach oben oder nach unten erhält, daß dann seine wirkliche Bewegung stärker ist, als wenn es nur von einer Welle angegriffen würde.

Dieses Zusammenwirken zweier Wellen, welches unter Umständen Verstärkung, unter Umständen Schwächung der Bewegung der einzelnen schwingenden Teilchen hervorbringt, nennt man Interferenz der Wellen.

Die Wellenbewegung in jedem Körper, z. B. auch diejenige, die wir an der Oberfläche des Wassers beobachten können, hat eine ganz besondere Eigentümlichkeit. Wenn wir auf eine Stelle des Wassers, in welchem wir Wellenbewegungen erzeugen, ein Stück Papier oder einen Kork oder sonst einen kleinen schwimmenden Körper bringen, so werden wir leicht beobachten, daß dieses Papier oder dieser Kork, während die Wellen sich ausbreiten, gar nicht von seinem Platz fortgeführt wird, sondern daß es bloß nach oben oder unten, auf und nieder sich bewegt. Daraus folgt, daß die einzelnen Wasserteilchen auch nicht in fortschreitender, strömender, sondern nur in auf- und niedergehender Bewegung begriffen sind, denn sonst würden sie das Papier, den Kork mit sich nehmen. Und doch können wir die Welle in dem ganzen Wasser fortschreitend beobachten. Das ist gerade das Charakteristische der Wellenbewegung. Jedes Teilchen macht nur kleine Bewegungen um

seine Ruhelage herum, nach oben und unten, oder nach rechts und links, oder auch im Kreise herum, es entfernt sich nicht weit von seiner Ruhelage, aber jedes Teilchen veranlaßt das folgende, ebensolche Bewegungen zu machen, und so pflanzt sich die Bewegung durch den Körper beliebig weit fort, während doch kein Teilchen fortströmt. Jedes einzelne Wasserteilchen ist bald auf seiner höchsten Höhe, dann sinkt es herunter bis zur größten Tiefe und steigt dann wieder bis zur Höhe und so fort. Man bezeichnet die Erhebungen der Welle bekanntlich als Wellenberge, die Vertiefungen als Täler; beobachten wir unseren Kork von vornhin, so finden wir, daß dieser abwechselnd auf einem Wellenberg und in einem Wellental liegt. Wenn wir die Uhr herausnehmen und nach ihr beobachten, wie lange es dauert, bis der Kork von einem Wellenberg zum Tal und wieder hinauf zum Wellenberg geführt wird, so finden wir eine gewisse Zeit, sagen wir zwei Sekunden, und können bemerken, daß diese Zeit immer dieselbe bleibt, solange wir die Welle ungestört beobachten können. Diese Zeit nennt man die Schwingungsdauer oder Periode der schwingenden Teilchen oder der Wellenbewegung, es ist die Zeit, in welcher jedes Teilchen einen vollständigen Hin- und Hergang ausführt.

Den Abstand ferner von einem Wellenberg zum nächsten oder von einem Wellental bis zum nächsten — immer von gleichliegenden Punkten aus gerechnet — bezeichnet man als die Wellenlänge.

Wenn wir in irgendeinem Moment uns die Form der Wasseroberfläche, nicht im ganzen, sondern längs einer geraden Linie, die vom Mittelpunkt entlang der Oberfläche des Wasserspiegels gezogen ist, aufzeichnen, so wird diese ungefähr die Form der Fig. 53 haben. Die Wellenteilchen bei *a*, *e* und *i* sind gerade auf einem Wellenberg, die Teilchen *c* und *g* in einem Wellental, während die Teilchen *B*, *D*, *F*, *H* gerade in ihrer Ruhelage sind. In einer späteren Zeit wird die Wasseroberfläche so aussehen, wie in Fig. 54. Dort sind die Wasserteilchen *e* und *f* auf Wellenbergen, *d* und *h* in Wellentälern, während *ACEGI* in der Ruhelage sind. Wieder in einem anderen Moment wird die Wasseroberfläche die Form Fig. 55 haben. Dabei sind *c* und *g* auf Wellenbergen, *a*, *e*, *i* in Wellentälern, *BDFH* in Ruhe. Endlich in einem weiteren Moment erhalten wir die Fig. 56, bei der *d* und *h* auf Bergen, *b* und *f* in Tälern, *ACEGI* in Ruhe sind.

Diese vier Wellenlinien in Fig. 53—56 stellen zugleich die Form der Wasseroberfläche dar, während jedes Wasserteilchen einmal sich

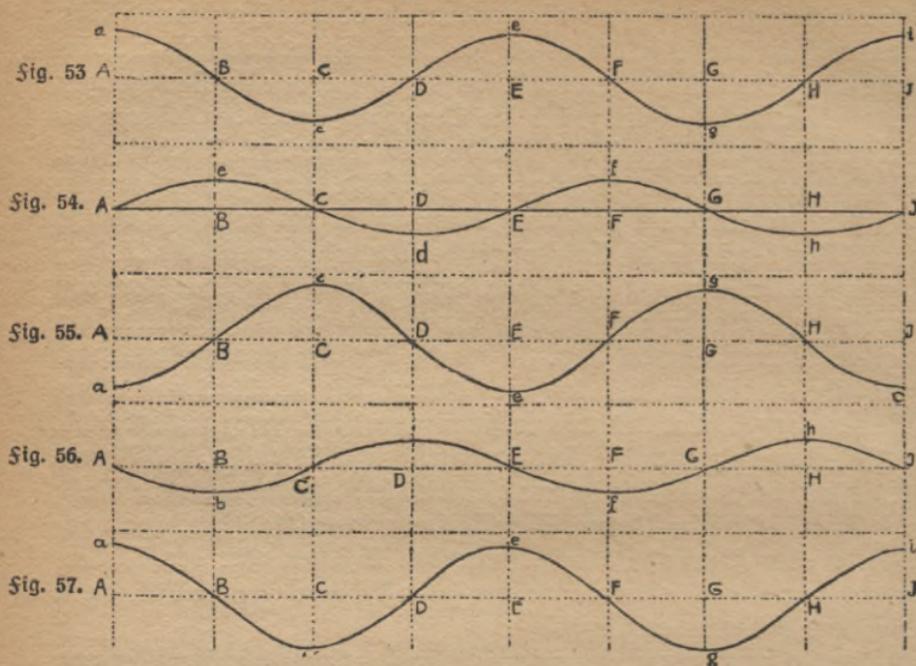


Fig. 53—57.

auf und ab bewegt, also während einer Periode. Denn im Anfang (Fig. 53) war das Teilchen *a* möglichst hoch oben, ging dann in Fig. 54 herunter bis zur Ruhelage, in Fig. 55 noch tiefer bis zur tiefsten Stelle, in Fig. 56 wieder herauf bis zur Ruhelage, und endlich kommt es wieder zur höchsten Lage in Fig. 57, wodurch die Fig. 53 wiederhergestellt ist.

Betrachten wir die Lage des ersten Wellenberges während dieser Zeit. In Fig. 53 war dieser Punkt in *a*, in Fig. 54 in Punkt *e*, in Fig. 55 in *e*, in Fig. 56 in *d* und endlich in Fig. 57 ist er in *e* angekommen, und zugleich ist ein neuer Wellenberg bei *a* entstanden.

Während der Dauer einer Schwingung, während einer Periode ist also der erste Wellenberg von *a* bis *e* fortgeschritten. Die Strecke *A* bis *E* bezeichneten wir aber als die Wellenlänge, also können wir sagen: unser Wellenberg ist während der Dauer einer Periode um eine Wellenlänge fortgeschritten. Dasselbe gilt ebenso auch von jedem anderen Wellenberg oder auch von jedem Wellental, also auch von der ganzen Welle.

Die Wellen haben eine gewisse Geschwindigkeit, mit der sie sich auf der Wasseroberfläche fortpflanzen. Diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit erhalten wir, wenn wir die Wellenlänge der Welle durch die Periode dividieren, so wie wir die Geschwindigkeit eines Eisenbahnzuges erhalten, wenn wir den zurückgelegten Weg (entsprechend der Wellenlänge) durch die dazu verbrauchte Zeit (entsprechend der Periode) dividieren.

Es war notwendig, diese Verhältnisse, die bei jeder Wellenbewegung auftreten, etwas ausführlich auseinanderzusetzen. Solange wir es mit sichtbaren Wellenbewegungen zu tun haben, ist die Schwingungsdauer, die Wellenlänge, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit leicht festzustellen und zu messen. Beim Schall aber, der ja auch in einer Wellenbewegung sich durch die Luft ausbreitet, können wir zunächst nur leicht feststellen, daß er Zeit braucht, um sich fortzupflanzen. Wir sehen den Blitz früher, als wir den gleichzeitig entstehenden Donner hören, weil der Schall des Donners eben eine meßbare Zeit braucht, um zu unserem Ohr zu gelangen. Wir sehen ebenso bei einer Kanone den Rauch eher, als wir den Knall hören, aus demselben Grunde. Aus solchen Beobachtungen konnte man leicht messen, daß die Geschwindigkeit, mit der der Schall sich fortpflanzt, 330 m pro Sekunde beträgt.

Die Schwingungen aber der einzelnen Luftteilchen können wir nicht direkt beobachten. Wohl aber hat man auf indirekte Weise feststellen können, daß, je höher ein Ton ist, um so mehr Schwingungen pro Sekunde von den Luftteilchen ausgeführt werden, um so kürzer also die Dauer einer Schwingung, die Periode ist. Je kürzer die Periode, um so höher der Ton. Hat ein Ton die Periode  $\frac{1}{400}$  Sekunde, so macht also jedes Luftteilchen in einer Sekunde 400 Schwingungen. Diese Zahl bezeichnet man als die Schwingungszahl der Wellenbewegung. Bei dem Schall gibt es Wellenbewegungen mit Schwingungszahlen zwischen 10 und 40 000. Danach können wir nun leicht ausrechnen, wie groß die Wellenlänge eines bestimmten Tones in der Luft ist. Denn es ist ja die Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich der Wellenlänge mal der Schwingungszahl. Also ein Ton von 440 Schwingungen pro Sekunde hat danach eine Wellenlänge von  $\frac{330}{440} \text{ m} = \frac{3}{4} \text{ m}$ , und ebenso kann man für jeden anderen Ton die Wellenlänge berechnen.

Wir haben uns weit vom Licht entfernt, das doch der Gegenstand unserer Untersuchung ist. Aber wir haben jetzt Einsichten gewonnen, die wir bei den optischen Erscheinungen sofort verwenden können.

Es schien uns nach dem Vorgang von Hüngens, als ob die Tatsachen der Farben dünner Blättchen sich erklären lasse als eine Interferenzerscheinung, was aber eben erforderte, daß das Licht ebenso wie der Schall eine Wellenbewegung sei. Die notwendigste Eigenschaft, die danach vom Lichte erfüllt sein muß, wäre aber dann die, daß es sich mit bestimmter Geschwindigkeit durch den Raum fortpflanze, daß wir ein Licht nicht sofort sehen, wenn es entzündet ist, einen Körper nicht sofort sehen, wenn er in die Richtung unserer Augen kommt, sondern eine gewisse Zeit später. Dem Anschein widerspricht diese Annahme durchaus, und ich glaube, ein noch so tiefsinniger Grieche oder Römer, ein Aristoteles oder Archimedes oder Lucretius, hätte diese Behauptung ungereimt gefunden. Und doch ist sie richtig, und doch läßt sich auf verschiedenfache Weise mit Sicherheit beweisen, daß das Licht Zeit braucht, um sich fortzupflanzen, ja es läßt sich die Geschwindigkeit dieser Fortpflanzung sehr genau messen, obwohl sie außerordentlich groß, 300 000 km pro Sekunde, ist.

Diese große Zahl ist auch der Grund dafür, daß wir von einer solchen Zeit, die das Licht gebrauchen soll, für gewöhnlich nicht eine Spur merken. Alle Entfernungen, die wir auf der Erde haben, werden von dem Licht in so kurzer Zeit durchlaufen, daß es nicht möglich ist, diese Zeit zu erkennen, außer wenn man ganz besonders feine physikalische Hilfsmittel dazu anwendet.

In der Tat wurde auch die Entdeckung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes zuerst auf astronomischem Gebiet gemacht, wo man es ja mit so großen Entfernungen zu tun hat, daß das Licht eine sehr bequem meßbare Zeit braucht, um sie durchzulaufen. Ein schwedischer Astronom, Olaf Römer, beobachtete 1675 die Umlaufszeit eines Mondes des Planeten Jupiter, und zwar dadurch, daß er die Zeiten bestimmte, in welchen dieser in den Schatten des Jupiters eintrat und nach einem Umlauf wieder in denselben eintrat. Diese Umlaufszeit ergab sich zu 42 Stunden 28 Minuten 36 Sekunden. Zur Zeit, als Römer diese Bestimmung machte, war die Erde gerade auf ihrer Bahn in der nächsten Nähe des Jupiters. Ungefähr ein halbes Jahr später, als die Erde in ihrer größten Entfernung von dem Jupiter war, wollte er das Eintreten des Mondes in den Schatten wieder beobachten, und da er genau wußte, wann er den Mond ein halbes Jahr vorher zum letztenmal hatte eintreten sehen, und da er die Umlaufszeit bestimmt hatte, so konnte er auf die Sekunde vorhersagen, wann der Mond

wieder in den Schatten eintreten mußte. Aber er wartete vergeblich, er mußte 986 Sekunden (16 Minuten 26 Sekunden) warten, bis der Moment des Eintretens in den Schatten kam. Da es nun bei den himmlischen Ereignissen nicht so wie bei unseren Eisenbahnen Verspätungen gibt, für die niemand etwas kann, so dachte Römer über die Ursache nach und fand sie darin, daß das Licht des Jupitermondes, um in sein Auge zu gelangen, das zweitemal ja einen größeren Weg zurückzulegen hatte als das erstemal, nämlich den Durchmesser der Erdbahn noch besonders zu durchlaufen hatte. Daraus schloß er, und fortgesetzte Beobachtungen bestätigten ihm dies, daß die Fortpflanzung des Lichts nicht momentan geschieht, sondern Zeit braucht, und daß dies die Ursache der Verspätung sei. Er konnte sogar daraus sofort die Geschwindigkeit des Lichts bestimmen. Denn da der Durchmesser der Erdbahn etwa 300 Mill. Kilometer ist, und da diese Strecke vom Licht in 986 (rund 1000) Sekunden durchlaufen wird, so beträgt die Geschwindigkeit des Lichtes

rund 300 000 km pro Sekunde.

Nachdem man einmal diese Zahl angenähert kennt, gelingt es heute sogar, durch verfeinerte Zeitmessungen, die Lichtgeschwindigkeit in dem Raum eines Zimmers zu messen.

Damit ist nun die erste Forderung, die wir aufgestellt haben, erfüllt. Das Licht braucht tatsächlich Zeit, um sich fortzupflanzen. Aber wir müssen nun näher zusehen, ob in der Tat durch unsere Annahme, daß das Licht eine Wellenbewegung sei, die Erscheinungen der Farben dünner Blättchen, von der wir ausgingen, erklärt wird, d. h., wann und unter welchen Umständen das Licht Interferenzen zeigt.

Interferenz tritt bei Wellenbewegungen immer nur dann auf, wenn zwei Wellenzüge sich in demselben Körper ausbreiten und dieselben Teile angreifen. Dabei ist es nun leicht einzusehen, wie sich zwei solche Wellen verhalten werden. Zu dem Zweck müssen wir noch eine Bezeichnung einführen. Die größte Entfernung, die ein in Schwingung versetztes Teilchen von der Ruhelage aus nach oben oder nach unten erreicht, nennt man die Amplitude der Wellenbewegung. In den Figuren 53—57 stellen also die Abstände *Aa*, *Bb*, *Cc* usw. diese Amplitüden dar. Wir wollen nun untersuchen, was geschieht, wenn zwei Wellen von gleicher Wellenlänge sich in derselben Richtung fortpflanzen, zwei Wellen, die durch die beiden punktierten Kurven I und II in Fig. 58 angegeben sind. Diese beiden Wellen haben gleiche Wellen-

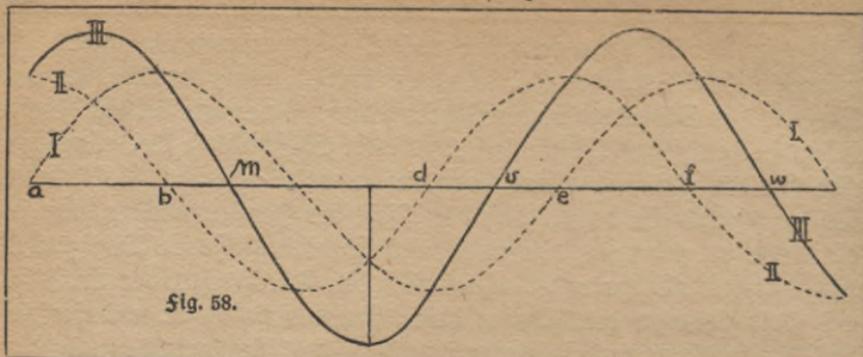


Fig. 58.

länge (die Strecke *ae* ist eben so groß wie *bf*), sie haben auch gleiche Amplitüden, aber sie unterscheiden sich in einer Hinsicht. Sie gehen nämlich nicht gleichzeitig durch die Ruhelage hindurch. Die Welle I z. B. geht bei *a* und *e* durch die Ruhelage nach oben, die Welle II bei *d*. Man sagt von zwei solchen Wellen, sie haben einen Gangunterschied, und dieser Gangunterschied ist gerade die Strecke *de*, die man aber nicht in Zentimetern, sondern in Teilen der ganzen Wellenlänge ausdrückt. Aus dem Zusammenwirken der beiden Wellen entsteht die Welle III, die stark ausgezogene Kurve. Jedes Teilchen macht eben die Bewegungen beider Wellen zusammen, und es bildet sich daher eine resultierende Welle. Diese hat, wie man sieht, auch noch dieselbe Wellenlänge, aber sie hat eine andere, und zwar hier größere Amplitude, und sie hat endlich einen Gangunterschied sowohl gegen die erste wie gegen die zweite Welle. Der Gangunterschied gegen die erste Welle wird durch die Strecke *ve*, der gegen die zweite durch *dv* angegeben. Das gilt allgemein: Durch das Zusammenwirken zweier Wellenbewegungen entsteht eine neue, welche im allgemeinen eine andere Amplitude und einen Gangunterschied gegen jede der komponierenden Wellen hat.

In zwei Fällen bringt nun eine solche Zusammensetzung besonders wichtige Resultate hervor. Zunächst in dem Falle, der in Fig. 59 ge-

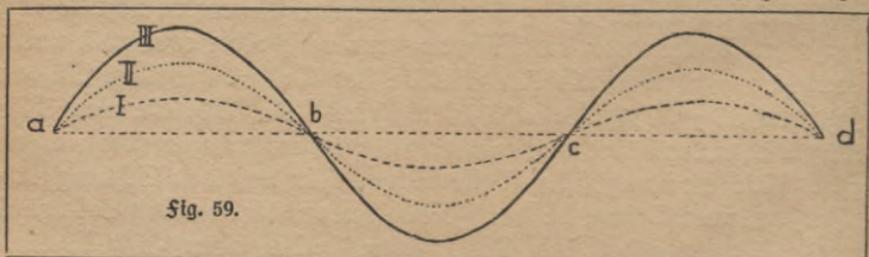
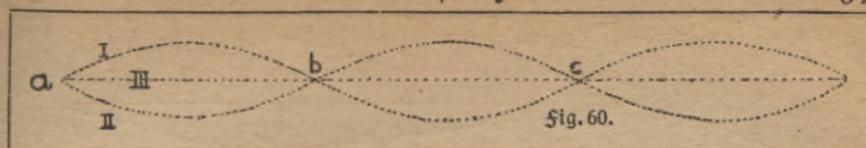


Fig. 59.



zeichnet ist, daß die beiden Wellen I und II keinen Gangunterschied haben. Die Welle I geht bei Punkt *a* nach oben, bei *b* nach unten, bei *c* nach oben, und die Welle II geht an denselben Punkten nach oben oder unten. Die beiden Wellen haben also keinen Gangunterschied. Es entsteht die Welle III, welche größere Amplitude hat und, wie man sieht, auch in denselben Punkten durch die Ruhelage geht; also in diesem Falle verstärken sich die beiden Wellen. Wenn wir dagegen die beiden Wellen I und II in Fig. 60 betrachten, so geht die Welle I bei *a* nach oben, bei *b* nach unten, bei *c* nach oben, während die Welle II bei *a* nach unten, bei *b* nach oben, bei *c* nach unten geht. Diese beiden Wellen haben also einen Gangunterschied. Die erste geht bei *a* durch die Ruhelage nach oben, die zweite bei *b*. Der Gangunterschied ist also die Strecke *ab*, welche gleich der Hälfte der Wellenlänge *ac* ist. Aus dem Zusammenwirken dieser beiden Bewegungen entsteht nun Ruhe. Die Teilchen, die sich von der ersten Welle aus nach oben, von der zweiten aus um ebensoviel nach unten bewegen sollen, bleiben überhaupt in der Ruhelage III. Es fallen eben dabei die Wellentäler der ersten Welle mit den Wellenbergen der zweiten zusammen, und umgekehrt.

Das Resultat unserer Betrachtung können wir so aussprechen: Zwei Wellenbewegungen von gleicher Amplitude vernichten sich vollständig, wenn sie einen Gangunterschied von einer halben Wellenlänge haben, sie verstärken sich am meisten, wenn sie den Gangunterschied Null haben.

Damit aber haben wir ein scharfes Kennzeichen erlangt, um zu entscheiden, ob die Hypothese, daß das Licht eine Wellenbewegung ist, wirklich Stich hält. Wir brauchten nur von zwei gleichstarken Lichtquellen — denn die Amplitude würde dabei von der Stärke des Lichtes abhängen — das Licht so auf eine und dieselbe Fläche zu werfen, daß wir Gangunterschiede bekämen, dann hätten wir auch Interferenzen. Indes zeigt es sich, daß man niemals Gangunterschiede und Interferenzen wirklich erhalten kann, wenn man versucht, das Licht von zwei verschiedenen Lichtquellen in passender Weise zusammenwirken zu lassen. Vielmehr ist es immer notwendig, die beiden Lichtquellen

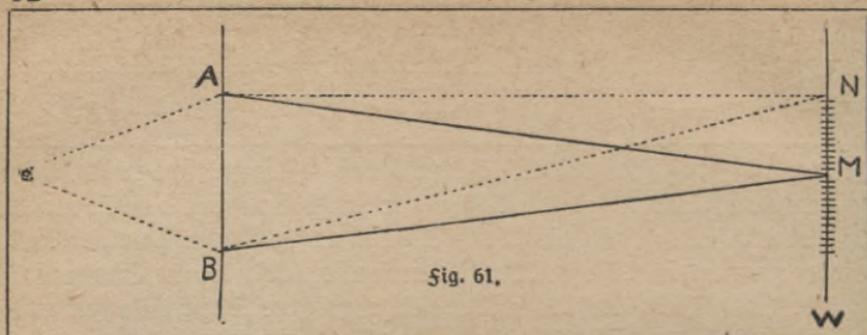


Fig. 61.

voneinander abhängig zu machen, indem man sie von einer einzigen Lichtquelle, sei es durch Spiegelung oder durch Brechung oder auf irgendeinem Wege erzeugt. Der Grund dafür liegt darin, daß wir bei zwei verschiedenen Lichtquellen es nie bewirken können, daß sie genau gleiche Periode und Amplitude und namentlich immer gleichen Gangunterschied haben. Bei zwei voneinander abhängigen Lichtquellen aber läßt sich das leicht hervorbringen.

Nach diesem Grundsatz kann man nun in der Tat merkwürdige Interferenzerscheinungen hervorbringen. Der übersichtlichste und deutlichste Versuch dieser Art rührt von dem Engländer Thomas Young her, einem der geistreichsten Physiker seiner Zeit (Ende des achtzehnten Jahrhunderts). Diesen Versuch kann ich Ihnen leider nicht objektiv zeigen, er ist dazu nicht geeignet. Ich führe ihn an, um zugleich eine Vorbereitung für einen im Prinzip ähnlichen Versuch zu haben, den ich nachher vorführen werde.

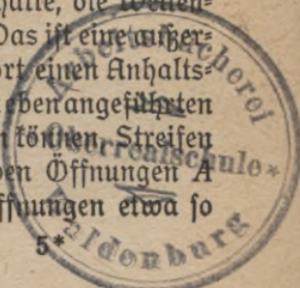
Young also erzeugte (Fig. 61) von der Sonne durch eine Linse einen leuchtenden Punkt  $S$  und ließ von diesem aus das Licht durch zwei kleine Öffnungen  $A$  und  $B$  eines schwarzen Schirmes in den Raum hinter dem Schirm eindringen. Die beiden leuchtenden Öffnungen ersetzen die beiden Lichtquellen, von denen wir eben sprachen. Die Öffnungen müssen sehr nahe beieinander sein. Auf einem Schirm  $W$  nun zeigen sich in diesem Falle farbige Streifen, welche, wenn die beiden Öffnungen  $A$  und  $B$  senkrecht übereinanderstehen, auf dem Schirm horizontal sich erstrecken.

Durch Anwendung von farbigen Gläsern, durch welche man aus dem weißen Licht angenähert homogene Farben herausnimmt, sieht man, daß die Färbung dieser Streifen durch Mischung hervorgerufen ist. Denn jetzt sind sie abwechselnd hell und dunkel. Dies sind nun Inter-

ferenzstreifen, die folgendermaßen zustande kommen. Die Mitte der Figur  $M$  wird von einem hellen Streifen eingenommen. In der That haben da die beiden Strahlen  $AM$  und  $BM$  keinen Gangunterschied. Sie haben gleiche Länge, und auf jedem von ihnen sind also gleich viele Wellenlängen. Geht man von der Mitte  $M$  aus aber nach oben oder unten, z. B. in der Richtung nach  $N$  zu, so wird der Weg  $BN$  immer etwas größer als der Weg  $AN$ . Auf dem ersteren liegt also immer eine größerer Anzahl von Wellen als auf dem zweiten, und daher haben die beiden Lichtbewegungen bei der Ankunft am Schirm einen Gangunterschied. Der Gangunterschied, der bei  $M$  den Wert Null hatte, wächst, wenn man von  $M$  nach unten oder nach oben geht, und da, wo der Gangunterschied gleich einer halben Wellenlänge des angewandten Lichts geworden ist, sieht man den ersten dunklen Streifen, oben und unten. Der Gangunterschied wächst dann, wenn man auf dem Schirm weiter fortschreitet, noch weiter, bis er gleich einer ganzen Wellenlänge geworden ist, was so viel ist, wie daß die Strahlen wieder keinen Gangunterschied haben. Dort erhält man also wieder einen hellen Streifen, wie in der Mitte. Beim weiteren Fortschreiten wieder einen dunklen usw. So kommen also diese Streifen direkt durch Interferenz der Wellen zustande und sie sind ein scharfer und entscheidender Beweis für die Wellennatur des Lichtes.

Aber dieses Experiment gibt uns noch mehr, wir können aus ihm auch direkt die Wellenlänge des Lichts berechnen. Denn, wenn z. B. der erste dunkle Streifen von der Mitte aus an der Stelle  $N$  liegt, so ist der Gangunterschied zwischen den beiden Strahlen  $BN$  und  $AN$  gleich der halben Wellenlänge des angewendeten Lichts. Der Gangunterschied dieser beiden Strahlen ist aber der Unterschied ihrer Längen; wenn man also die Länge der beiden Strahlen  $BN$  und  $AN$  und damit ihren Unterschied messen kann — was gar keine Schwierigkeit hat —, so kann man dadurch die Wellenlänge bestimmen.

Aus einem ähnlichen Experiment hat Fresnel zum erstenmal auf diese Weise bei rotem Licht, welches er angewendet hatte, die Wellenlänge bestimmt und fand diese gleich  $0,00067$  mm. Das ist eine außerordentlich kleine Zahl, aber sie gibt uns zunächst sofort einen Anhaltspunkt, unter welchen Umständen wir überhaupt bei dem oben angeführten Youngschen Versuch und bei ähnlichen darauf rechnen können, Streifen wirklich zu beobachten. Wenn der Abstand der beiden Öffnungen  $A$  und  $B$  und der Abstand der Wand  $W$  von den Öffnungen etwa so



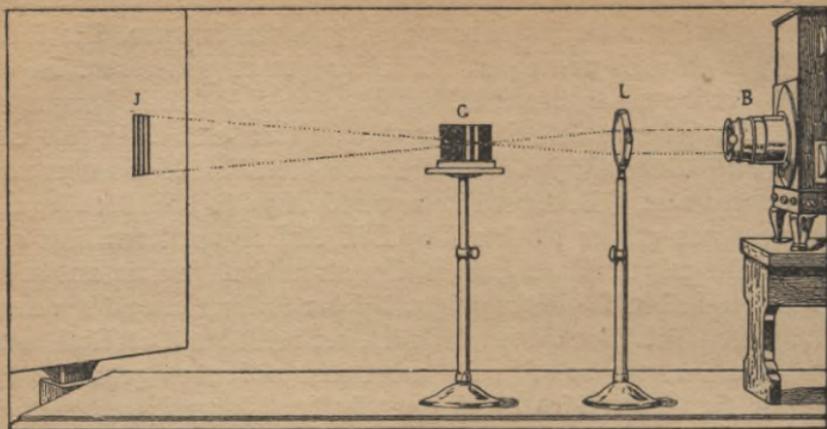


Fig. 62.

wäre, wie er in der Figur gezeichnet ist, so würden die abwechselnd hellen und dunklen Streifen so nahe aneinanderliegen, innerhalb der Tausendstel eines Millimeters, daß wir sie gar nicht erkennen könnten. Damit trotz der Kleinheit der Wellenlänge ein bequem erkennbarer Abstand zwischen dem hellen Streifen *M* und den ersten dunklen *N* entsteht, ist vielmehr notwendig, daß der Unterschied der beiden Strahlen *BN* und *AN* nur sehr wenig größer sei als der Unterschied der beiden Strahlen *BM* und *AM*, und das ist zu erreichen, wenn 1. die beiden Öffnungen *A* und *B* sehr nahe beieinanderliegen, 2. die Wand *W* sehr weit von den Öffnungen entfernt ist. Hält man diese zwei Bedingungen auch in ähnlichen Fällen ein, so kann man immer leicht Interferenzen hervorrufen. Ich möchte Ihnen einen derartigen Versuch zeigen, bei dem wir nach demselben Prinzip auf unseren Schirm von zwei Lichtquellen aus, die voneinander abhängig sind, Licht fallen lassen, und beobachten werden, daß dabei die Interferenzen auftreten. Ich habe eine sehr wenig gebogene Glasplatte, die, wie Sie sehen, bis auf zwei rechteckige Streifen ganz mit Tusche schwarz gefärbt. Ich will nun (Fig. 62) die Glasplatte *G* so in den Strahl meines Bogenlichts stellen, daß auf die beiden freigelassenen Teile das Licht streifend einfällt, möglichst nahe parallel mit der Glasfläche. Von jedem der beiden Streifen wird dann Licht nach der Wand reflektiert, und diese beiden reflektierten Strahlen durchdringen sich und bringen Interferenzen hervor. Die beiden Glasrechtecke meiner Glasplatte bilden die beiden Lichtquellen, die wir brauchen. Sie sind voneinander abhängig, da sie von derselben Quelle

gleichzeitig ihr Licht beziehen. In der That sehen Sie auf dem Schirm ein helles Rechteck und seitlich von demselben farbige Streifen, welches eben unsere Interferenzstreifen sind. Ich setze vor meine Lampe ein rotes Glas. Sie sehen abwechselnd schwarze und rote Streifen; ich setze ein blaues Glas davor, Sie sehen abwechselnd blaue und schwarze Streifen. Wenn wir scharf beobachten oder gar messend die Erscheinung verfolgen, so werden wir leicht erkennen, daß im ersten Falle beim roten Licht der Abstand des ersten schwarzen Streifens von der Mitte des Bildes größer ist als im zweiten Falle beim blauen Licht. Nun entsteht der erste dunkle Streifen immer dort, wo der Gangunterschied der beiden zusammenwirkenden Strahlen eine halbe Wellenlänge beträgt. Daraus folgt, daß die Wellenlänge des roten Lichts größer ist als die des blauen Lichts. Die Interferenzen für die einzelnen Farben fallen also nicht zusammen, und das ist gerade die Ursache, warum man bei weißem Licht nicht einfach weiße und schwarze, sondern farbige Streifen sieht.

Wir sind allmählich in unserer Erkenntnis viel weiter gekommen. Wir haben bewiesen, daß das Licht eine Wellenbewegung ist, wir haben die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes ermittelt und erkannt, daß die roten Strahlen größere Wellenlänge haben als die blauen. Wir haben auch die Wellenlänge von rotem Licht nach Fresnel kennen gelernt.

Solche Messungen, wie sie Fresnel für sein rotes Licht angestellt hat, kann man nun für alle möglichen Farben des Spektrums anstellen, und man hat dabei z. B. folgende Zahlen gefunden:

Rotes Licht	. .	(in der Nähe der Linie A)	hat die Wellenl.	0,000760 mm
" "	. .	( " " " " " B)	" " "	0,000687 "
" "	. .	( " " " " " C)	" " "	0,000656 "
Gelbes Licht	. .	( " " " " " D)	" " "	0,000589 "
Grünes Licht	. .	( " " " " " E)	" " "	0,000527 "
Hellblaues Licht	. .	( " " " " " F)	" " "	0,000481 "
Dunkelblaues Licht	( " " " " " G)	" " "	" " "	0,000431 "
Violettes Licht	. .	( " " " " " H)	" " "	0,000393 "

Da die Wellenlängen der einzelnen Farben nur kleine Bruchtheile eines Millimeters sind, so ist es zum Schreiben und zum Sprechen vortheilhaft, sie immer in Tausendsteln Millimeter auszudrücken. Der Buchstabe  $\mu$  ist in der Optik zur Abkürzung von einem Tausendstel Millimeter sowohl in der Schrift als beim Sprechen (Mü) eingeführt. Das Licht der D-Linie hat also die Wellenlinie  $0,589 \mu$ , das äußerste rote bei A die Wellenlänge  $0,760 \mu$ , dem äußersten Violett, welches noch etwas hinter H liegt, kann man die Wellenlänge  $0,380 \mu$ , welches

gerade die Hälfte von der Wellenlänge bei *A* ist, zuschreiben, so daß man kurz sagen kann, das (sichtbare) Spektrum enthält Wellenlängen von  $0,380 \mu$  bis  $0,760 \mu$ .

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts beträgt, wie wir gesehen haben,  $300\,000$  ( $3 \cdot 10^5$ ) km pro Sekunde. Das ist in Millimetern ausgedrückt  $3 \cdot 10^{11}$ , dreihundert Milliarden, in  $\mu$  ausgedrückt  $3 \cdot 10^{14}$  gleich dreihundert Billionen, eine fürchterlich große Zahl. Nun hängen ja, wie wir vorhin gesehen haben, die Wellenlänge, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und die Schwingungszahl bei der Wellenbewegung so zusammen, daß die Schwingungszahl gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit dividiert durch die Wellenlänge ist. Wir können danach berechnen, daß gelbes Licht von der Linie *D* die Schwingungszahl 500 Billionen ungefähr hat. Das heißt, wenn ein gelber Lichtstrahl sich von einer Natriumflamme durch den Raum ausbreitet, so macht jedes Teilchen der Natriumflamme und jedes Teilchen des Stoffes, durch welches das Licht hindurch sich fortpflanzt, in jeder Sekunde die angenehme Anzahl von 500 Billionen Schwingungen.

Welcher Stoff ist es nun aber, der die Wellenbewegungen ausführt, aus denen das Licht besteht? Darüber haben wir noch gar nicht gesprochen. Sind es die Teilchen der Körper selbst, welche schwingen, wie es bei der Schallbewegung der Fall ist? Sind es die Teilchen der Luft oder des Wassers oder des Glases selbst, welche sich bewegen? Die Antwort auf diese Frage muß verneinend lauten. Denn erstens geht das Licht auch durch alle Räume hindurch, aus welchen die gewöhnliche Materie so weit wie überhaupt möglich fortgeschafft ist. Wenn wir aus einem Glasgefäß die Luft, soweit wir nur können, auspumpen, so daß der Schall durch die so verdünnte Materie nicht mehr hindurchgeht, so ist für das Licht absolut keine Veränderung zu merken. Ferner gelangt das Licht von der Sonne und den Sternen doch zu uns, und in diesen interstellaren Räumen ist von solcher Materie, wie wir sie auf der Erdoberfläche haben, sicher nichts vorhanden, weil sonst die Bewegung der Planeten infolge des Widerstandes dieser Materie eine ganz andere wäre. Also die gewöhnliche Materie kann es nicht sein, welche in Wellenbewegung kommt und dadurch das Licht fortpflanzt.

Aus diesen Gründen muß man annehmen, daß der Träger der Lichtbewegung ein Stoff ist, den wir mit unseren Sinnen nicht wahrnehmen können, der sich uns eben nur durch diese Lichtfortpflanzung und durch einige andere Erscheinungen manifestiert. Diesen Stoff nennen

wirden Äther oder Lichtäther. Von ihm müssen wir voraussetzen, daß er überall im Raume vorhanden ist. Er muß nicht nur den Weltraum zwischen den Sternen erfüllen, wo man ihn den Weltäther nennt, sondern er muß auch bei unseren irdischen Körpern überall zwischen den kleinsten Körperteilchen existieren, weil eben diese Körper, wenigstens die durchsichtigen — und in genügend dünner Schicht sind alle Körper durchsichtig —, auch das Licht fortpflanzen.

Der Äther ist allerdings ein hypothetisches Element in der Naturforschung. Aber wir können eine ganze Anzahl von Vorgängen, und zwar zunächst alle optischen durchaus nicht begreifen, wenn wir nicht ein solches Element zu Hilfe nehmen. Welche Eigenschaften speziell dem Äther beizulegen sind, darüber können wir nicht viel aussagen, und es ist möglich, daß die eigentliche Natur dieses Lichtträgers uns noch große Überraschungen bieten wird. Aber für die Optik brauchen wir von dem Äther vorläufig nichts weiter zu wissen, als daß er Wellen von außerordentlich geringer Dauer und mit außerordentlich großen Schwingungszahlen durch sich hindurchschreiten läßt, und zwar mit einer enormen Geschwindigkeit. Es gibt allerdings viele Physiker, welche die Existenz des Äthers leugnen. Sie können sich nicht dazu entschließen, einen besonderen Stoff anzunehmen, bloß um die Fortpflanzung des Lichtes verständlich zu machen. Sie ziehen es vor, dem Raume selbst die Eigenschaften zuzuschreiben, durch die eine solche Fortpflanzung sich ergibt. Über solche Denkverschiedenheiten kann man aber nicht streiten. Die Aufklärung wird im Laufe der Zeit schon kommen.

Unsere Betrachtungen haben sich etwas weit entfernt von demjenigen, was wir direkt mit den Augen sehen können. Aus den Farben der Seifenblasen haben wir auf Interferenzen, aus der Interferenzerscheinung des Lichts haben wir auf seine Wellennatur geschlossen, aus der Annahme von Wellen sind wir zu der Einführung des Weltäthers gekommen und haben außer unserer direkt sichtbaren Welt noch eine unsichtbare uns konstruiert, die die sichtbare durchdringt und erweitert.

Bevor wir diese kühnen Schlüsse als sicher akzeptieren, wollen wir vorsichtigerweise zuerst untersuchen, ob denn wirklich die Wellentheorie geeignet ist, die Erscheinungen des Lichts vollständig und in jeder Hinsicht zu erklären. Doch dies soll Gegenstand der nächsten Vorlesung sein.

### Vierte Vorlesung.

## Einwände gegen die Wellentheorie. Beugungserrscheinungen.

Die Seifenblasen haben uns in der letzten Vorlesung zu sehr überraschenden und weitgehenden Folgerungen, zu der Erkenntnis von der Wellennatur des Lichtes geführt. Wollen wir aber dieser Erkenntnis recht froh werden, so wird es unbedingt notwendig sein, alle Einwürfe, die wir dieser Theorie etwa machen können, genau zu prüfen und sie, wenn möglich, experimentell zu widerlegen. In der That gibt es keinen anderen Weg in der Wissenschaft. Jeder Einwand, der logisch berechtigt ist, muß gemacht werden, und wenn ein einziger Einwand sich von einer Theorie nicht widerlegen läßt, so ist die Theorie falsch. Jeder Einwand hat das liberum veto gegen eine Theorie, ganz wie im ehemaligen polnischen Reichstag — wenn man ihn nicht totschlägt, ganz wie im ehemaligen Reichstag der Herren Polen.

Woher es kommt, daß an dünnen Blättchen Farben auftreten, haben wir bereits nach der Wellentheorie besprochen. In unser Auge kommt reflektirtes Licht, welches aus verschiedenen Strahlen zusammengesetzt ist. Nämlich sowohl solches Licht, welches direkt von der Vorderfläche des Blättchens (die unserem Auge am nächsten ist) reflektirt ist, wie solches, welches zuvor das Blättchen hin und zurück durchlaufen hat. Diese zwei zusammenwirkenden Strahlen besitzen Gangunterschiede, und so sieht man, daß die Bedingungen für die Interferenz gegeben sind.

Ist also ein solches Blättchen von homogenem Licht beleuchtet, so muß es, je nach seiner Dicke und je nach der Richtung, in welcher das Licht auf dasselbe fällt, bzw. in welcher das reflektirte Licht beobachtet wird, hell oder dunkel erscheinen. Ist es von weißem Licht beleuchtet, so muß es farbig erscheinen. Und hat das Blättchen nicht überall dieselbe Dicke, so muß es an verschiedenen Stellen verschieden gefärbt sein.

Aber gegen diese Erklärung erhebt sich ein gewichtiger Einwand. Warum spricht man nur von den Farben dünner Blättchen, warum zeigen sich diese Interferenzen nur bei dünnen Platten? Nach der Erklärung, die wir eben gegeben haben, müßten Platten jeder Dicke die Interferenzen zeigen. Denn immer müßten im reflektirten Strahl zwei Einzelstrahlen vereinigt sein.

Dieser Einwand ist sehr berechtigt. Eine nähere Betrachtung wird ihn aber widerlegen und sogar noch Beweise für unsere Erklärung

bieten. Für diese nähere Betrachtung müssen wir allerdings anführen, daß es sich aus rein geometrischen Gründen nachweisen läßt, daß ein Strahl, der im Glas verläuft und an der Luftgrenzfläche zurückgeworfen wird, dabei immer mit entgegengesetzt gerichteter Amplitude reflektiert wird, also eine halbe Wellenlänge Gangunterschied schon durch diese Reflexion bekommt. Nehmen wir nun erst einmal an, eine Platte sei mit weißem Licht beleuchtet. Hat eine noch sehr dünne Platte eine solche Dicke, daß sie etwa gleich einer halben Wellenlänge des violetten Lichts ist, also die Dicke  $0,190 \mu$ , so wird ein violetter Strahl beim Hin- und Hergang durch die Platte eine ganze Wellenlänge verbrauchen und infolge der unteren Reflexion noch eine halbe Wellenlänge, also wird er vernichtet werden. Ein roter Strahl dagegen von der Länge  $0,760 \mu$  wird eine halbe Wellenlänge beim Durchgang durch die Platte und eine halbe Wellenlänge bei der Reflexion verlieren, also im ganzen eine Wellenlänge verlieren, muß also verstärkt herauskommen. Die anderen Strahlen werden Gangunterschiede zwischen einer halben und einer Wellenlänge zeigen, d. h. sie werden geschwächt werden. Das heraustretende Licht wird also im wesentlichen aus Rot bestehen, während die anderen Töne sehr geschwächt, das Violett ganz ausgelöscht sein wird.

Hat aber die Platte die vierfache Dicke  $0,760 \mu$ , so wird der violette Strahl beim Hin- und Hergang 4 Wellenlängen verbrauchen, der rote 2, der gelbe von  $0,507 \mu$  3 Wellenlängen. Diese werden also vernichtet werden. Dagegen wird der orangefarbene Strahl mit der Wellenlänge  $0,608 \mu$  beim Durchgang  $\frac{5}{2}$  Wellenlängen, der blaue Strahl mit der Wellenlänge  $0,435 \mu$   $\frac{7}{2}$  Wellenlängen verbrauchen, so daß diese verstärkt herauskommen werden. Die übrigen Strahlen werden geschwächt. Das reflektierte Licht enthält Orange und Blau. Nun sei die Dicke noch einmal doppelt  $1,520 \mu$ , dann werden der rote Strahl von der Wellenlänge  $0,676 \mu$ , der gelbe von der Wellenlänge  $0,552$ , der blaue von der Wellenlänge  $0,468 \mu$  und die violetten von den Wellenlängen  $0,406$  und  $0,380 \mu$  verstärkt herauskommen.

Man sieht aus dieser Betrachtung: je dicker die Platte ist, um so mehr Wellen aus allen Teilen des Spektrums werden verstärkt reflektiert werden. Das heraustommende reflektierte Licht wird also bei dickeren Platten Farben aus allen Teilen des Spektrums enthalten und infolgedessen weiß erscheinen. Deswegen zeigen dicke Platten keine Färbung im weißen Licht.

Aber, so wird man sofort einwenden können, danach müßten Platten von jeder Dicke, ob dick oder dünn, im homogenen Licht immer Inter-

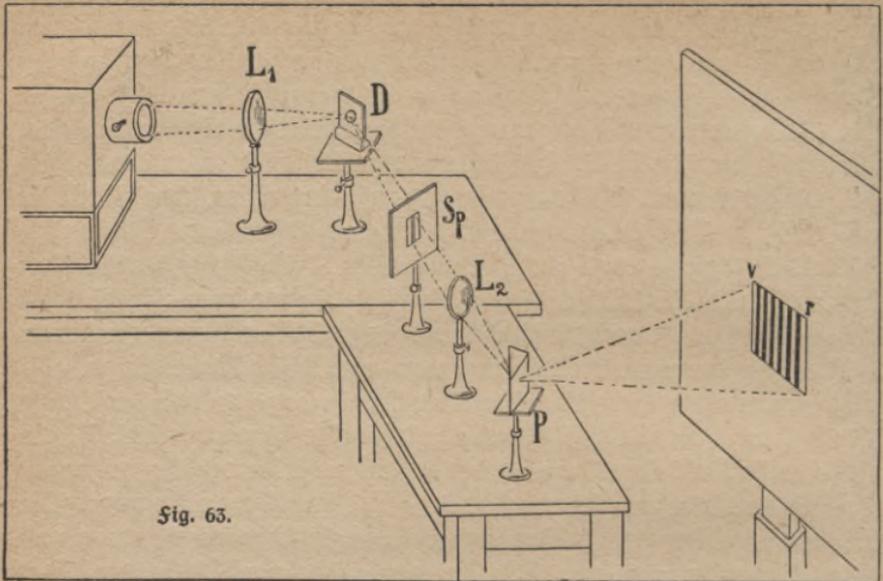


Fig. 63.

ferenzen zeigen, also entweder dunkel oder hell sein. Eine bestimmte dicke durchsichtige Platte müßte also im gelben Natriumlicht z. B. ganz schwarz erscheinen, was doch nicht der Fall ist. Als Entgegnung läßt sich darauf erstens sagen, daß man in der That im homogenen Licht die Interferenzen bei viel dickeren Platten noch beobachten kann, als bei weißem Licht, aber bei einer gewissen Dicke hören sie auch da auf. Das kommt aber nur daher, daß wir eben absolut homogenes Licht von nur einer einzigen Wellenlänge nicht haben. Auch das scheinbar homogene Natriumlicht besteht aus einer Anzahl Wellen. Man hat auch die  $D$ -Linie selbst in zwei gesonderte Linien zerteilen können. Dann muß natürlich, da jetzt unsere obige Betrachtung wieder voll in Geltung tritt, von einer gewissen Dicke an das Licht immer gelb reflektiert werden, ganz wie beim weißen Licht weiß. Ja noch mehr. Die Untersuchung der Interferenzerscheinungen an dicken Platten gibt uns sogar ein bequemes und äußerst empfindliches Mittel, über die größere oder geringere Homogenität von farbigen Spektrallinien uns Kenntnis zu verschaffen. Spektrallinien, welche man, selbst mit feinen Hilfsmitteln ausgerüstet, für einfache hält, erweisen sich, durch die Interferenzen an dicken Platten geprüft, als sehr kompliziert zusammengesetzt.

Also diese Einwände gegen unsere Erklärung zeigen sich hinfällig. Wir können aber umgekehrt, wenn unsere Betrachtung für das weiße Licht richtig ist, aus ihr mit Notwendigkeit einen weiteren Schluß ziehen.

Nach unserer Erklärung ist das Licht, das von einer dicken durchsichtigen Platte reflektiert wird, zwar weiß, aber es enthält doch nicht alle Farben des Spektrums, sondern es fehlen von diesen Farben alle diejenigen, für welche die doppelte Dicke der Platte einen Gangunterschied von einer Wellenlänge ergibt. Wenn wir also das von einer solchen Platte reflektierte weiße Licht durch ein Prisma gehen lassen und durch dasselbe spektral zerlegen, so müssen in dem Spektrum eine ganze Reihe von dunklen Linien in ungefähr gleichen Abständen auftreten. Dies wird ein Experimentum crucis für unsere Erklärung abgeben. Wir wollen den Versuch machen. In Fig. 63 konzentriere ich durch eine Linse  $L_1$  das von unserer Bogenlampe kommende Licht und lasse es auf die unter  $45^\circ$  gestellte Glasplatte  $D$  fallen. Das von dieser reflektierte Licht will ich nun spektral zerlegen. Zu diesem Zwecke lasse ich es durch einen Spalt  $Sp$  treten und dann durch das Prisma  $P$  gehen. Damit ich ein scharfes Spektrum bekomme, projiziere ich das Bild des Spaltes vermittels der Linse  $L_2$  auf den Schirm. Sie sehen jetzt das Spektrum und beobachten, daß es tatsächlich in allen Farben von einer großen Zahl von dunklen Linien durchzogen ist. Das ist ein glänzender Beweis für unsere Erklärung.

Denselben Anblick muß offenbar auch das von einer Seifenblase reflektierte Licht geben, wenn sie noch so dick ist, daß keine Farben auftreten. Ich stelle wieder eine Seifenlamelle her, indem ich wieder den kreisförmigen Draht von Fig. 49 in unsere haltbare Seifenlösung aus der vorigen Vorlesung eintauche und dann herausziehe. Das Seifenwasser bildet dann eine ebene Fläche, die von dem Drahtkreis begrenzt ist, und wenn ich jetzt diese Seifenlamelle an Stelle der Glasplatte  $D$  in Fig. 63 bringe, so sehen wir ebenfalls das Spektrum von einer Anzahl senkrechter gerader Linien durchzogen, wobei wir aber beobachten, daß diese Linien zu wandern beginnen, eine jede läuft vom roten zum violetten Ende des Spektrums durch dasselbe hindurch. Diese auffallende Erscheinung ist in Wirklichkeit zu erwarten gewesen und leicht zu erklären. Die Seifenlamelle behält ja nicht die gleiche Dicke überall bei, sondern das Wasser fließt allmählich abwärts, und so werden die oberen Teile der Scheibe allmählich dünner, die unteren dicker. Daher gehen am oberen Teil die dunklen Linien im Spektrum mehr auseinander, im unteren drängen sie sich mehr zusammen, die Streifen werden also schief, und da diese Dickenveränderung kontinuierlich fortgeht, so erscheint es uns, als ob die Streifen wandern. In Wirklichkeit bilden sich kontinuierlich neue Streifen an anderen Stellen des Spektrums.

So gibt also gerade die Betrachtung dickerer Platten, die zuerst unserer

Wellentheorie zu widersprechen schienen, einen sehr eklatanten Beweis für die Richtigkeit derselben.

Indessen vollkommen befriedigt dürften Sie noch nicht von der Wellentheorie sein. Ein schwerer Einwand gegen dieselbe ist ohne weiteres zu erheben, und vermutlich haben Sie denselben sich auch im Inneren schon gemacht. Daß der Schall eine Wellenbewegung ist, läßt sich leicht glauben. Wir wissen tatsächlich, daß sich der Schall von dem tönenden Körper nach allen Richtungen ausbreitet, und wenn er an irgend-eine Ecke kommt, so geht er um diese Ecke herum, ganz so, wie es die Wasserwellen auch tun, wenn sie an irgendein Hindernis kommen. Sie stauen sich an demselben und werden reflektiert, aber von den Rändern desselben breitet sich die Wellenbewegung auch in das Wasser hinter dem Hindernis aus. Beim Schall ist es genau so, eine begrenzende Wand ist kein Hindernis für denselben, die Schallbewegung biegt sich an den Ecken um, umgeht dieselben, und wir hören bekanntlich den Schall auch um Ecken herum. Das Licht aber tut das, wie es scheint, durchaus nicht. Das Licht geht nur geradlinig fort, wie wir in der ersten Vorlesung gesehen und direkt ausgesprochen haben. Ein Hindernis, z. B. ein begrenzter schwarzer Schirm in der geraden Linie, hält das Licht vollständig ab, hinter dem Schirm ist Schatten, also kommt das Licht nicht um die Ecken des Schirmes herum, wie es das Wasser und wie es der Schall tun würde. Das scheint ein gewichtiger Einwand gegen die Wellentheorie des Lichtes zu sein, und wenn wir ihn nicht widerlegen, oder wenn wir diese geradlinige Ausbreitung nicht auch mit der Wellentheorie erklären können, so steht unsere Theorie auf schwachen Füßen.

Aber zunächst: ist denn die Behauptung richtig, daß das Licht nicht um die Ecke geht? Im großen ganzen, in den gewöhnlichen Fällen, mit denen wir es zu tun haben, ist sie sicher richtig. Um einen Schirm herum geht das Licht nicht, hinter dem Schirm ist Schatten, es kommt keine Lichtbewegung um die Ränder des Schirmes nach hinten. Aber schon im Jahre 1665 hatte Grimaldi eine Beobachtung gemacht, die damit nicht genau stimmte. Er hatte von einer feinen Lichtlinie, einem Spalt, Licht auf einen undurchsichtigen Schirm fallen lassen, so daß die Lichtlinie nahezu parallel war der einen Kante des Schirmes. Es war zu erwarten, daß ein ganz schmaler Halbschatten und danach der Kernschatten hinter dem Schirm zu beobachten wären. Anstatt dessen fand Grimaldi, daß in dem Halbschatten, allerdings nur auf eine kurze Strecke, abwechselnd hellere und dunklere Streifen sich zeigten, und daß

auch in dem Kernschatten, zu dem gar kein Licht gelangen kann, wenn die geradlinige Fortpflanzung ganz streng gilt, noch eine kleine Strecke weit Helligkeit zu beobachten ist, diese aber gleichmäßig und rasch abnehmend nach dem Inneren des Kernschattens zu. Grimaldi sagte, um diese Erscheinung zu benennen, das Licht werde um den Rand etwas herumgebeugt, und man bezeichnet noch jetzt diese Erscheinung und die anderen, die auf derselbe Ursache beruhen, als Beugungs- oder Diffraktionserscheinungen.

Ohne weiteres erkennen wir, daß wir wohl hier dasjenige haben, was wir oben vermißt haben, das Um-die-Ecke-Gehen des Lichtes. An dem Rande des Schirmes scheint tatsächlich das Licht ein wenig um die Ecke zu gehen und einen Teil des eigentlichen Kernschattens noch zu erhellen. Aber unseren unwillkürlichen Erwartungen entspricht diese Erscheinung doch nicht ganz. Denn erstens ist das seitliche Umbiegen des Lichtes nur auf sehr kurze Distanz zu merken, und zweitens ist ganz überraschend das Auftreten von hellen und dunklen Linien, also von Interferenzen außerhalb des Kernschattens. Und doch sind gerade diese Beugungserscheinungen ein ausgezeichnete Beweis für die Wellentheorie geworden. Der französische Physiker Fresnel, dem die Wellentheorie des Lichtes das meiste verdankt, hat mit großem Scharfsinn diese Beugungserscheinungen und alle entsprechenden aus der Wellentheorie erklärt.

Schon Newton hatte die Beobachtung von Grimaldi nachgeprüft und hatte eine etwas andere, zweckmäßigere Anordnung dafür gewählt. Statt einen Schirm mit einem scharfen Rande zu nehmen, etwa eine Metallplatte, um in der Nähe dieses Randes die Beugung zu untersuchen, nahm er zwei eng nebeneinanderstehende Ränder, also einen engen Spalt, der von zwei scharfen Rändern begrenzt war. Als er durch einen solchen ganz engen Spalt das Licht von einer Lichtlinie hindurchgehen ließ, so erkannte er auf dem Schirm, auf dem er die Erscheinung beobachtete, daß er erstens das helle Bild des Spaltes bekam, daß aber dieses Bild verbreitert war und daß es zu beiden Seiten von bunten Streifen umgeben war, welche die ihm schon aus seinem Farbenglas bekannten Mischfarben zeigten. Ich will Ihnen dieses Experiment zunächst vorführen, damit wir für unsere weiteren Betrachtungen einen faßbaren Anhalt haben.

Vor die Öffnung meiner Bogenlampe A (Fig. 64) bringe ich einen engen Spalt S, so daß ich eine enge Lichtlinie habe, die ich durch die

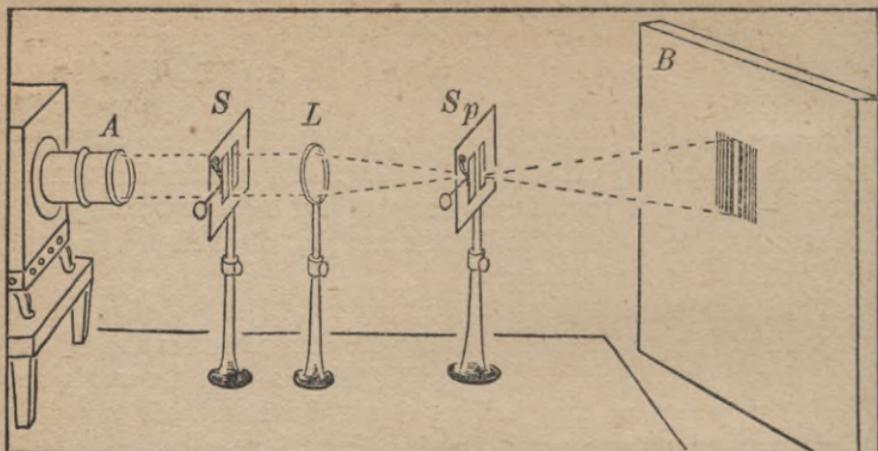


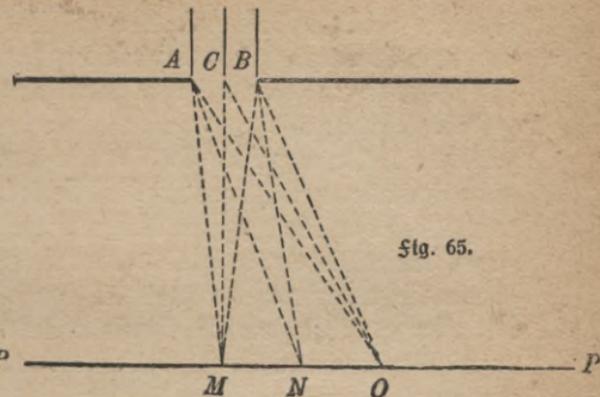
Fig. 64.

Linse *L* auf dem Schirm *B* scharf abbilden kann. In den Weg der Lichtstrahlen stelle ich aber nun einen zweiten Spalt *Sp*, der wie derjenige in Fig. 5 eingerichtet ist, so daß ich ihn durch eine Schraube enger stellen kann. Wir würden nun erwarten, daß, wenn ich den Spalt *Sp* enger und enger mache, daß auch das Bild der Lichtlinie auf dem Schirm *B* immer enger und enger wird. Das ist auch zunächst der Fall. Aber von einer gewissen Verengung des Spaltes *Sp* an erkennen wir, daß gerade umgekehrt das Bild auf dem Schirm wieder breiter wird und um so mehr, je enger ich den Spalt *Sp* mache, und wir erkennen weiter, wie es die Figur zeigt, daß außer diesem erweiterten Bild der Lichtlinie, seitlich von demselben bunte Streifen auftreten, und zwar da, wo eigentlich kein Licht mehr hinkommen könnte, wenn das Licht sich nur geradlinig ausbreiten könnte.

Daß diese bunten Streifen durch Mischung entstehen, können wir sofort wie früher dadurch beweisen, daß wir vor die Lampenöffnung ein rotes und dann ein blaues Glas halten. Im ersten Fall sehen wir das Bild der Öffnung rot, seitlich davon aber schwarze und rote Streifen, im zweiten Fall sehen wir es blau und seitlich davon abwechselnd schwarze und blaue Streifen, und wenn wir genau zusehen, so finden wir, daß die Lage der blauen und der roten Streifen etwas verschieden ist, so daß wir bei weißem Licht Mischfarben erhalten müssen.

Die Art und Weise, wie diese Beugungsbilder zustande kommen, ist nun eine sehr einfache. Von dem Spalt *S* der Bogenlampe geht das Licht nach allen Seiten aus. Jedes Ätherteilchen, das von der Licht-

Bewegung getroffen wird, beginnt zu schwingen und schwingt dauernd hin und her. Jedes solche schwingende Teilchen können wir als Quelle für eine Wellenbewegung ansehen, welche von ihr ausgeht. Denn so wie es anfängt, sich zu bewegen, setzt es vermöge des Zusammenhanges mit den



benachbarten Teilchen diese ringsherum ebenfalls in schwingende Bewegung. Also jeder Punkt eines von Licht durchzogenen Raumes ist selbst wieder Ausgangsstelle für eine Wellenbewegung. Nun kommt die Lichtbewegung von unserem Spalt  $S$  zu unserer feinen beugenden Öffnung  $Sp$ . Jeder Punkt dieser Öffnung ist also wieder Ausgangsstelle von Wellenbewegungen, d. h. von jedem Punkt geht Licht nach allen Seiten und insbesondere auch nach der Richtung zum Schirme zu. Danach müßten wir nun eigentlich erwarten, daß hinter der Öffnung der ganze Raum erhellt ist, was der geradlinigen Ausbreitung ganz direkt widersprechen würde, was aber allerdings beim Schall tatsächlich der Fall wäre. Beim Licht ist es nicht so, und das rührt her von der Kleinheit der Wellenlängen des Lichtes. Betrachten wir in der That auf dem Schirm, auf dem wir die Erscheinung auffangen, einige Stellen. In Fig. 65 sei  $AB$  die beugende Öffnung (d. h. unser Spalt  $Sp$  aus Fig. 64), welche von oben her Licht bekommt, und wir wollen untersuchen, welches die Helligkeit an einzelnen Stellen des Schirmes  $PP$  ist. Zunächst ist offenbar in der Mitte bei  $M$  Helligkeit vorhanden. Die Strahlen von  $A$  nach  $M$  und von  $B$  nach  $M$  verstärken sich dort, weil sie keinen Gangunterschied haben. Ebenso die Strahlen von je zwei anderen symmetrisch gelegenen Punkten zwischen  $A$  und  $B$ . Es ist noch der Strahl  $CM$  von dem mittelsten Punkt  $C$  der beugenden Öffnung gezeichnet.

Gehen wir jetzt auf dem Schirm weiter an eine Stelle  $N$ , so haben dort die Strahlen  $AN$  und  $BN$ , die vom Rande der Öffnung ausgehen, verschiedene Länge, also einen Gangunterschied, und wir wollen annehmen, daß dieser Gangunterschied an der Stelle  $N$  gerade eine halbe Wellenlänge betrage. Diese beiden Strahlen heben sich dann zwar auf,

aber die Strahlen, die von den mittleren Punkten der betreffenden Öffnung kommen, heben sich nicht auf, weil sie kleinere Gangunterschiede haben, und die Stelle  $N$ , obwohl sie schon im eigentlichen Schattengebiete liegt, ist also noch hell. Anders liegt die Sache an einer weiter seitlichen Stelle, etwa bei  $O$ . Dorthin kommen die Strahlen  $AO$ ,  $BO$ , und wir wollen annehmen, daß diese beiden Strahlen gerade einen Gangunterschied von einer ganzen Wellenlänge haben. Dann haben sie beide gegen den mittleren Strahl  $CO$  einen Gangunterschied von einer halben Wellenlänge des angewandten Lichtes, so daß sich  $AO$  und  $CO$  durch Interferenz vernichten und ebenso  $BO$  und  $CO$ . Auch für irgendeinen dazwischenliegenden Strahl gibt es immer einen anderen, der eine halbe



Fig. 66.

Wellenlänge Gangunterschied gegen ihn hat und ihn auch vernichtet. Nach der Stelle  $O$  kommt dann also gar kein Licht, dort entsteht ein dunkler Streifen. Für ein schiefes Strahlenbündel, bei welchem die Randstrahlen zwei Wellenlängen Gangunterschied haben, tritt daselbe ein. So findet man also rechts wie links von dem beugenden Spalt dunkle Streifen. Zwischen diesen muß Helligkeit auftreten, also in der Tat im eigentlichen Schatten; aber man erkennt auch, daß die Helligkeit sehr viel geringer sein muß als in dem mittleren Bild bei  $M$ . Denn während bei  $M$  alle Strahlen sich verstärken, die von  $A$ ,  $B$ ,  $C$  oder einem anderen Punkte kommen, werden sich an jeder seitlichen Stelle immer eine Menge Strahlen vernichten, weil sie Gangunterschiede von einer halben Wellenlänge haben, und es wird nur darauf ankommen, ob sich wirklich alle Strahlen oder nur sehr viele durch Interferenz aufheben. Also auch die hellen Stellen in dem Beugungsbild werden viel dunkler sein als die mittlere Stelle bei  $M$ , und um so dunkler, je weiter sie von der Mitte entfernt, je schiefere die Strahlen sind, die zu ihnen hinführen.

Das finden wir nun gerade in unserem Experiment von Fig. 64 bestätigt. Wir sehen (Fig. 66) um das helle mittlere Spaltbild herum im roten Licht erst einen dunklen Streifen rechts und links, dann ein sehr viel schwächeres helles Feld, an das sich wieder je ein dunkler Streifen anschließt, dann weiter helle Felder mit abnehmender Lichtstärke. Da der Abstand des ersten dunklen Streifens von der Mitte einem Gangunterschied der Randstrahlen von einer ganzen Wellenlänge entspricht, so muß dieser Abstand für die roten Strahlen größer sein als für

die blauen Strahlen. Denn die ersteren haben ja eine größere Wellenlänge. Deswegen erscheinen diese Beugungstreifen im weißen Licht bunt gefärbt.

Sie können solche Beugungserscheinungen sehr schön subjektiv beobachten, wenn Sie in ein Stanniolblatt mit einem Messer einen sehr schmalen Spalt einschneiden und durch diesen Spalt auf einen hell beleuchteten Punkt, z. B. eine Kerze od. dgl., hinsehen. Dann sehen Sie das Bild der Flamme umgeben von einem weit ausgedehnten farbigen Hof, der eben auf der Übereinanderlagerung der Beugungsbilder für die verschiedenen Farben beruht.

Sie werden wohl häufig schon beobachtet haben, daß, wenn Sie die Augen halb geschlossen halten, so daß die Augenwimpern vor dem Auge sich befinden, und Sie also durch die Augenwimpern hindurchsehen, daß Sie jede Straßenlaterne, jede Flamme, die Sie anblicken, von einem solchen weit ausgedehnten Hof mit farbigen Streifen umgeben sehen. Dies beruht ebenfalls auf der Beugung durch die Öffnungen der Augenwimpern. Ebenso wenn Sie durch eine Vogelfeder einen leuchtenden Gegenstand beobachten, werden Sie finden, daß er durch die Beugungserscheinung verbreitert und gefärbt erscheint. Es brauchen die Öffnungen durchaus nicht spaltförmig zu sein. Auch durch kreisförmige, dreieckige, vieleckige Öffnungen erhält man Beugungsbilder von zum Teil sehr komplizierter schöner Form.

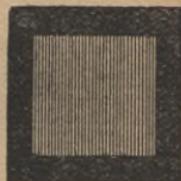
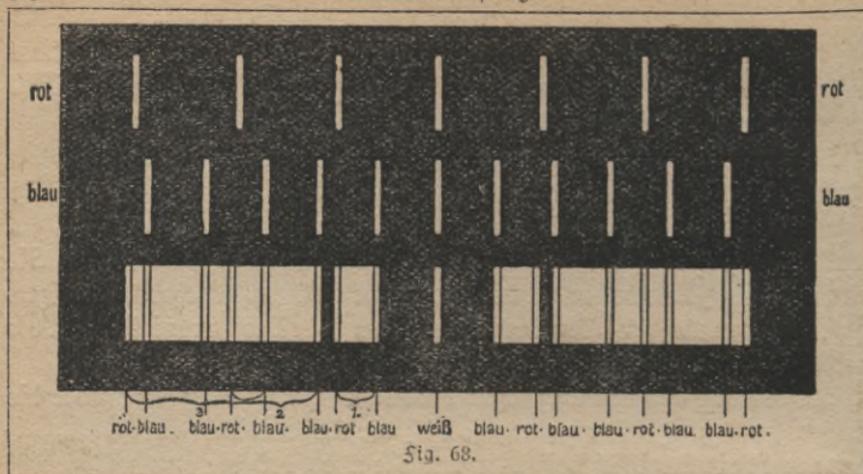


Fig. 67.

Fraunhofer war es, der bei der Untersuchung dieser Beugungserscheinungen zuerst statt eines einzelnen Spaltes eine sehr große Reihe von solchen sehr nahe beieinanderstehenden Spalten anwendete, wie sie etwa die Augenwimpern bilden. Eine solche optische Vorrichtung, eine Reihe von sehr engen, sehr nahe aneinander und im gleichen Abstand voneinander befindlichen Spalten nennt man ein Beugungsgitter. Ich zeige Ihnen hier (Fig. 67) ein einfaches Gitter, ein sogenanntes Drahtgitter, welches aus einer Reihe von feinen, nebeneinander befindlichen Drähten gebildet ist. Andere Gitter werden dadurch hergestellt, daß man auf einer beruhten Platte in nebeneinanderliegenden Strichen den Ruß fortnimmt, oder daß man mit dem Diamanten eine große Anzahl feiner Striche in gleichen Abständen auf Glas einritz. Die Erscheinung, die ein solches Glasgitter gibt, zeige ich Ihnen hier, indem ich das Licht von der Bogenlampe durch einen Spalt gehen lasse, diesen durch eine Linse scharf auf den Schirm abbilde und nun



in den Weg des Lichtstrahles das Beugungsgitter bringe. Ich setze vor die Lampe ein rotes Glas, und Sie sehen (Fig. 68 das oberste Bild) außer dem mittleren hellen roten Spaltbild noch rechts und links eine Reihe roter Streifen. Zwischen diesen hellen Streifen ist alles dunkel. Ich setze ein blaues Glas vor die Lampe, und Sie sehen (Fig. 68 das mittlere Bild) nun eine Reihe von blauen Streifen, die ebenso wie vorher die roten alle den gleichen Abstand haben. Sie bemerken auch, daß die blauen Streifen enger zusammengedrängt und näher an der Mitte sind als die roten. Je kleiner also die Wellenlänge ist, desto näher sind hier bei diesen Gittererscheinungen die hellen Streifen an der Mitte. Wenn ich nun weißes Licht durch das Gitter fallen lasse, so sehen Sie eine prachtvolle Erscheinung (Fig. 68 das untere Bild), nämlich sehr hell glänzende Spektra zu beiden Seiten des weißen Mittelbildes, des direkten Spaltbildes. Gehen wir von der Mitte aus, so sehen wir, und daselbe ergibt sich auch aus dem eben Ermittelten, daß in der Nähe des Mittelbildes rechts und links das sehr helle Spektrum mit Violett anfängt und durch Blau, Grün, Gelb zu Rot geht. Dieses bezeichnet man als das erste Gitterspektrum. Nun folgt ein kleiner dunkler Zwischenraum, dessen Erklärung Sie aus der Fig. 68 leicht erkennen, da eben zwischen dem ersten roten und dem zweiten blauen Streifen alles dunkel ist. Nun folgt ein helles zweites Spektrum, wieder beginnend mit Violett und Blau und endigend mit Rot. In diesem sind aber die Farben nicht alle rein ausgebreitet, sondern zum Teil gemischt. Denn über das Spektrum, das von Blau 2 bis Rot 2 geht, lagert sich noch ein Teil des dritten Spektrums, das von Blau 3 bis Rot 3 geht. Diese drei Spektra

sieht man leicht, die folgenden werden schon recht blaß. Das erste ist das reinste und hellste Spektrum, das zweite ist aber breiter ausgedehnt. Sie überzeugen sich durch den Augenschein leicht, daß diese Gitterspekttra eine andere Farbausdehnung zeigen als das prismatische Spektrum. Bei diesem war das Blau sehr ausgedehnt, Rot, Gelb und Grün waren sehr schmal zusammengedrängt. Hier ist es anders. Hier sind der rote, gelbe, grüne und blaue Teil alle ziemlich gleichweit ausgedehnt in jedem einzelnen der Spekttra. Die Breite einer jeden Farbe im Beugungsspektrum entspricht dem Bereich der verschiedenen Wellenlängen, die diese Farben zeigen. Deswegen nennt man auch die Beugungsspekttra normale Spekttra, zum Unterschied von den prismatischen.

Jede Farbe, die im weißen Licht enthalten ist, erscheint an einer bestimmten Stelle im ersten und ebenso in den folgenden Spektren. Daraus ergibt sich, daß in den Beugungsspektren, wenn man sie mit Sonnenlicht erzeugt, auch die Fraunhoferschen Linien entstehen müssen. An derjenigen Stelle des ersten, des zweiten usw. Spekttrums, welche z. B. das gelbe Licht der Natriumflamme ergeben würde, muß also ein dunkler Streifen entstehen, weil eben das Licht des Natriums im Sonnenlicht nicht enthalten ist. Da die Gitterspektren, wie Sie sich eben erzeugt haben, bei guten Gittern sehr weit ausgedehnt sind, die Farben alle sehr weit ausgezogen sind, so ist es mit Gittern leicht, eine große Zahl von Linien einzeln zu sehen, die im prismatischen Spektrum so zusammengedrängt sind, daß sie ohne weiteres nicht getrennt erscheinen.

Beleuchten wir ein Gitter nicht mit weißem Licht, sondern mit dem Licht einer gefärbten Flamme, die nur wenige Farben aussendet, so bekommen wir nur diese Farben getrennt in jedem Spektrum. Da nun ferner die Lage einer Farbe im Beugungsspektrum, im ersten sowohl, wie in jedem folgenden, nur von der Wellenlänge derselben abhängt, so kann man umgekehrt durch Bestimmung der Lage dieser Linie die Wellenlänge bestimmen. Tatsächlich werden die Wellenlängen der einzelnen Farben immer durch Messungen mit Beugungsgittern bestimmt. Die Messungseinrichtungen aber können wir im einzelnen hier nicht erörtern. Das würde uns zu weit führen.

Die Beugung durch Gitter ist übrigens eine Erscheinung, die in der Natur und auch in der Kunst bzw. Industrie zu beobachten ist. Die Farben der Schmetterlingsflügel und der Pfauenfedern, namentlich derjenigen, welche bei verschiedener Stellung des Beobachters zu wechseln scheinen und welche ganz besonders reizvoll sind, beruhen zum größten Teil auf Beugungsercheinungen. Die Farben der Perlmutter sind eben-

falls Gitterfarben, hervorgerufen durch sehr kleine regelmäßige Strichungen der Perlmutter. Die irisierenden Perlmutterknöpfe, die der Handel erzeugt, sind eine Nachahmung derselben, die ebenfalls durch Gitterstriche erzeugt sind.

Die Beugungserscheinungen beobachten wir öfter, als wir es glauben, Die Höfe um Sonne und Mond sind nichts anderes als Beugungserscheinungen, hervorgerufen durch die kleinen Wasserbläschen von dünnen, unsichtbaren Wolken, die in der Atmosphäre schweben. Der sogenannte Heiligenschein, den man zuweilen um den Schatten des eigenen Kopfes auf betauten Wiesen sieht, hat dieselbe Ursache.

Und nun bitte ich Sie, einen kleinen Rückblick auf unsere erste Vorlesung zu werfen. In dieser haben wir als durch das Experiment leicht nachweisbar den Satz aufgestellt, daß das Licht nur in gerader Linie von dem leuchtenden zu einem beleuchteten Punkt kommt, daß es sich also nur geradlinig ausbreitet. Wir sehen jetzt, wie schwer es ist, aus beobachteten Erscheinungen vollkommen dasjenige herauszuziehen, was in der Natur wirklich vor sich geht. Die geradlinige Ausbreitung war damals durch das Experiment bewiesen, und doch haben wir jetzt gefunden, daß wir Fälle beobachten, bei denen das Licht sich durchaus nicht in geraden Linien ausbreitet, sondern wo es um die Ecken herumgeht. Aber die eine Beobachtung widerspricht der anderen nicht, obschon es so scheint. Die Abweichung von der geradlinigen Bewegung geht, wegen der Kleinheit der Wellen, im allgemeinen nur auf sehr kurze Entfernungen vor sich. Deswegen ist die Beugung des Lichtes schwer und nur durch geeignete Maßregeln zu beobachten, während die des Schalles eine normale Erscheinung ist.

Alles, was wir bisher von optischen Erscheinungen beobachtet haben, fügt sich ungezwungen in die Wellentheorie ein, wenn es ihr auch anfangs zu widersprechen schien. Wir werden diese Theorie also nun als bewiesen ansehen und von jetzt an immer so von Lichtwellen sprechen und so mit dem Lichtäther operieren, als ob wir diese Wellen mit unseren Augen sehen könnten. In der That ersetzt uns unser Geist hier vollständig die Sinne. Wir brauchen die Wellen nicht zu sehen und wissen doch, wie sie sich unter allen Umständen verhalten werden. Der große Reiz, den die Naturwissenschaften besitzen, liegt gerade in dieser Unterordnung der Natur unter unseren Geist. Haben wir einmal das Gesetz gefunden, dem die Erscheinungen gehorchen, so können wir alle Konsequenzen dieses Gesetzes mit Sicherheit auf die Natur anwenden, nie wird sie uns im Stiche lassen.

## Fünfte Vorlesung.

**Ultrarote, ultraviolette Strahlen.  
Fluoreszenz. Phosphoreszenz. Photographie.  
Farbige Photographie.**

Es wäre gewiß eine unverständliche Tatsache, wenn der Äther, den wir als Träger aller Lichterscheinungen erkannt haben, keine anderen Schwingungen ausführen könnte, als gerade nur diejenigen, deren Wellenlängen zwischen 0,380 und 0,760  $\mu$  liegen, und welche wir als die äußersten Wellen im Spektrum, einerseits im Violett, andererseits im Rot gefunden haben. Würden wir annehmen müssen, daß der Äther tatsächlich nur diese Bewegungen ausführe und gar keine anderen, so wäre das ein ganz sicherer Beweis dafür, daß unsere Annahme eines Äthers falsch ist, weil sie nur eine sogenannte Erklärung ad hoc bieten würde. Vielmehr, wenn ein solcher die ganze Welt erfüllender Stoff wirklich existiert, der überhaupt in Wellenbewegung gelangen kann, so werden wir a priori annehmen müssen, daß er in Schwingungen von jeder beliebigen Periode geraten könne, daß er Wellen von Kilometern Länge ebensowohl enthalten müsse, wie die Wellen von Bruchteilen eines tausendstel Millimeters. Wir sehen an dem Wasser des Ozeans, daß es ebensowohl große gewaltige Wellen, wie die kleinen wellenförmigen Kräuselungen seiner Oberfläche zeigt, und dasselbe werden wir auch vom Äther voraussetzen müssen. Daß wir tatsächlich nur eine so geringe Anzahl von verschiedenen Wellen als Licht sehen, das ist dann nicht eine Eigenschaft des Äthers, sondern nur eine Eigenschaft unseres Auges. Auch vom Ohr wissen wir ja, daß es Luftwellen von sehr großer Länge einerseits und von sehr geringer Länge andererseits nicht mehr auffaßt, daß diese keine Schallwellen insofern sind, als sie nicht vom Ohre erkannt werden; aber Wellen genau derselben Art wie die Schallwellen sind sie deswegen doch. So werden wir auch vermuten dürfen, daß die Wellen, die wir als Farben sehen, nur ein gewisser Teil von allen möglichen Wellen sind, die im Äther erzeugt werden können. Und wenn wir versuchen, andere Wellen als die sichtbaren zu erzeugen und sie zu studieren, so werden wir, wenn uns das gelingt, sehen, daß das Licht, das uns zuerst als etwas ganz Besonderes entgegentritt, sich an bestimmter Stelle einreihet in die große Reihe der Naturerscheinungen und mit diesen zusammen eine Einheit höherer Ord-

nung bildet, und unsere Naturerkenntnis wird dadurch auf eine viel höhere Stufe gehoben werden.

Andeutungen dafür, daß es noch andere Wellen des Äthers gibt, als die sichtbaren, die Lichtwellen, fand zum erstenmal William Herschel, als er untersuchte, welche Wärmewirkung die einzelnen Farben des Spektrums zeigen. Daß das Licht erwärmend wirkt, ist eine so alte Erfahrung, daß sie jedermann geläufig ist. Offenbar kann aber ein Körper nur durch diejenigen Lichtstrahlen wärmer werden, welche er absorbiert, nicht durch diejenigen, welche er reflektiert oder durchläßt. Denn

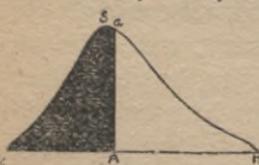


Fig. 69.

diese letzteren verlassen den Körper ja wieder ungeschwächt, können also keine Veränderung im Körper hervorgebracht haben. Nur das absorbierte Licht erzeugt Veränderungen in den Körpern. Da das Licht eine Bewegung ist, so ent-

hält es, wie jede Bewegung, Energie, und wenn also Licht in einem Körper absorbiert wird, also als Licht verschwindet, so geht die Energie des Lichtes in den Körper über, der Körper bekommt einen Zuwachs von Energie, und dieser äußert sich dadurch, daß der Körper wärmer wird. Die Erwärmung eines Körpers durch absorbiertes Licht hängt also direkt ab von der Energie der absorbierten Lichtstrahlen, und die Frage, die sich Herschel stellte, war die, in welchem Verhältnis die Energie des Sonnenlichtes auf die verschiedenen Farben verteilt ist. Zu dem Zwecke brauchte er bloß ein Thermometer, dessen Quecksilbergesäß recht schmal gemacht und mit Ruß überzogen war, damit es alles auffallende Licht absorbiere, in die verschiedenen Farben des Spektrums zu halten und zu sehen, um wieviel es sich erwärmt. Die Antwort, die das Experiment gab, war überraschend. Im Violett und Blau stieg das Thermometer fast gar nicht, im Grün begann es zu steigen, im Gelb stieg es mehr, im Rot noch mehr. Aber als das äußerste Rot bei der Linie A erreicht war und Herschel das Thermometer noch weiter in den unbeleuchteten Raum daneben brachte, so zeigte es sich, daß es noch weiter stieg bis zu einer bestimmten Stelle und dann noch weithin Erwärmungen anzeigte, die aber immer geringer wurden. Am deutlichsten wird dieses Verhalten aus der Fig. 69 hervorgehen. Dort sind die Grade, um die das Thermometer steigt, als Längen über die Linie ZH aufgetragen, und die krumme Linie ZSH verbindet deren Endpunkte. Im Violett an der Stelle H, welche die Fraunhofer'sche Linie H darstellt, ist die Einwärmung Null, im

Rot an der Stelle *A* ist sie durch die Linie *A a* dargestellt, also sehr groß. Geht man aber im Spektrum über *A* hinaus ins Unsichtbare, so ist noch immer Erwärmung vorhanden, welche durch den schwarzen Teil der Figur dargestellt wird, und zwar kann man mit dem Thermometer bis *Z*, also nahezu um dieselbe Strecke, die das ganze sichtbare Spektrum beträgt, von *A* nach links hinrücken, ehe die Erwärmung unmerklich wird. Diese Beobachtung sagt also direkt aus, daß jenseits des Rot im Sonnenspektrum noch Strahlen vorhanden sind, die man nicht sieht, die sich aber durch ihre erwärmende Wirkung merklich machen. Man bezeichnet diese Strahlen als ultrarote Strahlen. Da die Wellenlängen der Strahlen vom Violett zum Rot zunehmen, so haben die ultraroten Strahlen also noch größere Wellenlängen als die roten, also größere als  $0,760 \mu$ . Nicht bloß im Sonnenspektrum sind solche dunkle Strahlen vorhanden, sondern auch im Spektrum des Bogenlichts, ja im Spektrum jedes warmen Körpers.

Man nennt diese Strahlen Wärmestrahlen. Wenn diese gleicher Art wie die Lichtstrahlen sind, so muß man auch dieselben Erscheinungen mit ihnen hervorbringen können, wie mit dem Licht, also insbesondere muß man sie reflektieren und brechen lassen können. Ich will Ihnen einige Experimente vorführen, welche zeigen, daß das tatsächlich leicht möglich ist, Experimente, die in dieser Anordnung von Prof. Tyndall herrühren. So wie es Substanzen gibt, welche nur bestimmte sichtbare Farben durchlassen, die übrigen aber absorbieren, nämlich alle farbigen Stoffe, so gibt es auch Substanzen, welche alle sichtbaren Strahlen absorbieren, aber die ultraroten, unsichtbaren durchlassen. Diese Stoffe müssen dem Auge schwarz erscheinen, weil sie eben alles sichtbare Licht absorbieren. Eine solche Substanz ist eine ganz konzentrierte Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff. Diese ist ganz schwarz; sie läßt auch von intensivem Sonnen- oder Bogenlicht nicht eine Spur hindurchgehen. Aber die unsichtbaren, ultraroten Strahlen läßt sie hindurch. Wenn man also eine Linse mit dieser Jodlösung füllt und sie in den Weg der Strahlen einer Bogenlampe stellt, so muß sie die Wärmestrahlen in einem Punkt konzentrieren und dort also eine starke erwärmende Wirkung hervorbringen, obwohl dieser Brennpunkt durchaus nicht erleuchtet ist. Wir wollen dieses Experiment anstellen (Fig. 70). Um die Strahlen von den Kohlen unserer Bogenlampe parallel herauswerfen zu können, darf ich hier nicht eine Linse aus Glas anwenden, weil Glas die ultraroten Strahlen zu stark absorbiert. Ich benutze vielmehr eine

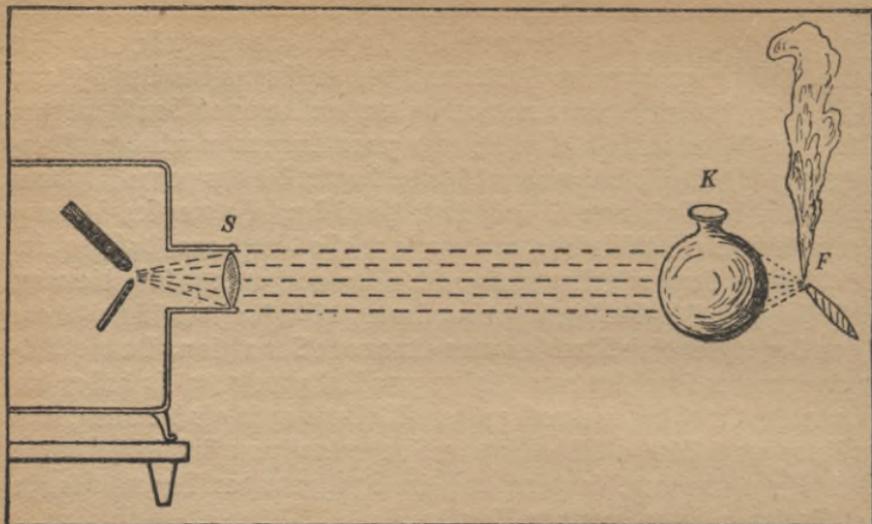


Fig. 70.

Linse aus Steinsalz, welches die ultraroten Strahlen sehr gut hindurchläßt. Ich stelle nun eine Kugel *K*, mit Jodlösung gefüllt, in den Weg der Strahlen. Sie wirkt als Linse und vereinigt die Strahlen in einem Brennpunkt *F*. Wenn ich ein Streichholz an diese Stelle halte, so flammt es auf, eine Zigarre zündet sich hier in der Luft von selbst an, ein wenig Pulver, das ich an die Stelle des Brennpunktes bringe, brennt an und verpufft.

Durch dieses Experiment ist die Brechung der unsichtbaren Wärmestrahlen durch die Linse bewiesen. Um auch ihre Reflexion deutlich zu zeigen, will ich meiner Bogenlampe einen Hohlspiegel (Fig. 71) gegenüberstellen. Dann kommen die Strahlen ziemlich parallel an diesem an und vereinigen sich nach der Reflexion im Brennpunkt *F*. In der That würden wir jetzt im Brennpunkt *F* ein Bild unserer leuchtenden Kohlenspitzen sehen. Nun aber stelle ich vor meine Lampe ein rechteckiges Gefäß *N* mit der dunklen Jodlösung. Jetzt geht kein Licht, sondern es gehen nur Wärmestrahlen hindurch, und diese werden auch im Brennpunkt *F* vereinigt, den man aber jetzt nicht erleuchtet sieht. In der That sehen Sie, daß jetzt ebenso wie früher ein Streichholz bei *F* aufflammt, daß das Pulver verpufft, und, wie Sie sehen, kann ich ebenso wie früher in der Luft mir an dieser Stelle ohne Feuer eine Zigarre anzünden.

Wenn wir das Sonnenlicht durch ein Prisma gehen lassen und zu einem Spektrum ausbreiten und ein Thermometer in die einzelnen Far-

ben bringen, wie Herschel getan hat, so erhalten wir also an den einzelnen Stellen des ultraroten Spektrums die Erwärmungen, wie sie durch Fig. 69 dargestellt sind. Wir können nun vermuten, daß es in dem ultraroten Teil des Spektrums auch dunkle Fraunhofersche Linien gibt, wie in dem sichtbaren Teil. An diesen Stellen würde also das Thermometer keine Erwärmung anzeigen, wohl aber an den unmittelbar benachbarten Stellen vorher und nachher. Indes ist ein Thermometer für diese Versuche nicht empfindlich genug. Wenn man das ultrarote Spektrum recht ausdehnen will, wie es für solche Versuche notwendig ist, so beträgt die Erwärmung an einer Stelle vielleicht nur ein Hunderttausendstel bis ein Millionstel eines Grades Celsius, und solche geringe Erwärmungen kann das Thermometer nicht anzeigen. Es gibt aber andere Apparate, die Thermoelemente und die Bolometer, welche ich Ihnen hier, weil es zu weitläufig wäre, zwar nicht vorführen kann, welche aber auf solche außerordentlich kleine Wärmemengen schon reagieren. Mit solchen Apparaten hat man tatsächlich Fraunhofersche Linien auch im ultraroten Spektrum konstatiert. Was dabei aber wichtig ist, das ist folgendes: Wenn man etwa das Spektrum durch ein Beugungsgitter statt durch ein Prisma erzeugt, so kann man dadurch die Wellenlänge dieser so bestimmten dunklen Streifen im Ultrarot bestimmen. So hat man leicht gefunden, daß im Sonnen-

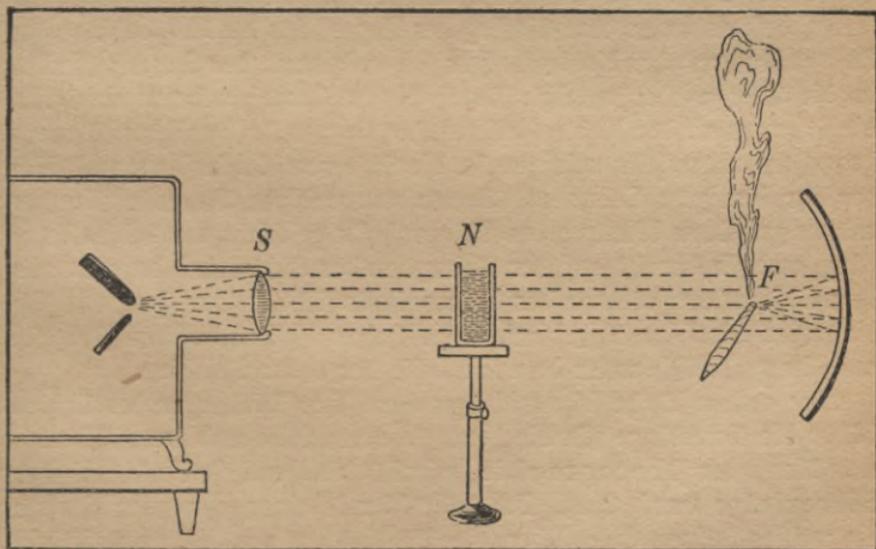


Fig. 71.

licht noch Strahlen bis  $5 \mu$  vorkommen. Aber das sind noch durchaus nicht die längsten Wärmestrahlen, die wir kennen. Vielmehr wurde durch Verfeinerung der Meßmethoden der Bereich noch weiter ausgedehnt, und wir können heute Wärmestrahlen bis über  $100 \mu$ , ja sogar bis  $300 \mu$  messen. Diese haben also eine Wellenlänge von  $0,1$  bis  $0,3$  mm, und diese Wellen sind daher schon so lang, daß wir sie mit dem Auge leicht beobachten könnten, wenn sie eben auf unser Auge wirken würden.

Die ultraroten Strahlen wurden also durch eine Wirkung des absorbierten Lichtes entdeckt, eben die Wärmewirkung. Nicht immer aber verwandelt sich die Energie des Lichtes, wenn es von einem Körper absorbiert wird, in Wärmeenergie. Wir wissen eine ganze Anzahl von Fällen, und sie spielen in der Natur sogar eine große Rolle, in denen das von einem Körper absorbierte Licht chemische Wirkungen hervorbringt. So ist es bekannt, daß, wenn man eine Mischung von Chlorgas und Wasserstoffgas dem Sonnenlicht ausgesetzt, dann eine plötzliche Explosion stattfindet, unter der sich die beiden Gase verbinden. Das ist eine chemische Verbindung, die durch das Licht hervorgerufen wird. Die ausgedehntesten chemischen Prozesse, die durch das Licht hervorgerufen werden, finden aber unter unseren Augen täglich bei den Pflanzen statt. In dem grünen Farbstoff der Pflanzen, den man Chlorophyll nennt. Dieses Chlorophyll nämlich hat die wunderbare Eigenschaft, daß es unter dem Einfluß des Tageslichts die Kohlensäure der Luft zerlegt und den Kohlenstoff in sich aufnimmt, den Sauerstoff aber in die Luft wieder entläßt. Durch diesen Prozeß nehmen einerseits die Pflanzen all den Kohlenstoff auf, den sie zum Aufbau ihres Körpers brauchen, andererseits reinigen sie die Luft von Kohlensäure und führen ihr den zum Leben und Atmen notwendigen Sauerstoff immer wieder zu. Diese Wirkung des Chlorophylls geschieht nur bei Beleuchtung, und sie beruht auf der Absorption des Lichts, und da man aus dem Absorptionsspektrum des Chlorophylls sieht, daß es hauptsächlich die roten Strahlen absorbiert, so geschehen diese chemischen Prozesse auch hauptsächlich unter dem Einflusse der roten Strahlen.

Eine andere Reihe sehr wichtiger chemischer Wirkungen des Lichtes bildet die Grundlage für die heute so verbreitete und vervollkommnete Kunst der Photographie, nämlich die chemische Zerlegung der Silbersalze durch Licht. Ich habe hier in einer schwarzen Flasche ein weißes Pulver, Chlorsilber, eine Verbindung von Chlor und Silber.

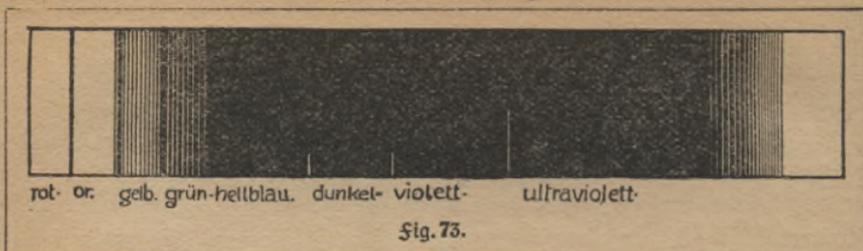
Ich schütte ein wenig von dem Pulver auf eine Schale und setze es dem Licht der Bogenlampe aus. In sehr kurzer Zeit werden Sie das Pulver grau werden sehen. Die Schwärzung kommt daher, daß sich aus dem Salz das metallische Silber abgeschieden hat, es findet also eine chemische Zerlegung unter dem Einfluß des Lichtes statt. Sie kann nur dadurch zustande kommen, daß eben das Silber Salz die Lichtstrahlen absorbiert. So wie hier das Chlorsilber



Fig. 72.

verhalten sich auch andere Silber Salze, insbesondere Jod Silber und Brom Silber. Diese Eigenschaft des Silbers, aus diesen Salzen sich auszuscheiden, wenn sie belichtet werden, benutzt man für die Photographie in folgender Weise: Die Silber Salze werden zum Zweck der Photographie auf Glasplatten oder Gelatineplatten (Films) oder auf Papier befestigt. Die Salze, gewöhnlich jetzt Brom Silber, werden mit Gelatine zu einer Emulsion verarbeitet, in welcher die Silber Salze sehr fein zerteilt sind, und diese Brom Silber gelatine wird fabrikmäßig auf Glasplatten gegossen und trocknen gelassen. Diese Platten nennt man photographische Trockenplatten. Für photographische Papiere wird gewöhnlich Chlorsilber angewendet, das entweder mit Albumin oder mit Kollodium oder mit Gelatine auf dem Papier befestigt ist. Diese Platten und Papiere müssen natürlich im Dunkeln aufbewahrt werden, da sie eben sonst geschwärzt werden. Es ist mit Zuhilfenahme solcher photographischen Papiere nun leicht, einige Eigenschaften dieser chemischen Lichtwirkung zu zeigen. Ich befestige ein solches Papier in einem Rahmen und stelle vor die eine Hälfte desselben ein rotes, vor die andere ein blaues Glas, damit wir uns überzeugen können, welche Teile des Spektrums, im großen ganzen gesprochen, photographisch wirksam sind. Dieses so vorbereitete Papier setze ich nun eine Minute dem vollen Licht unserer Bogenlampe aus, und Sie sehen das Resultat (Fig. 72). Diejenige Hälfte des Papiers, die unter dem roten Glas war, also nur rote Strahlen bekommen hat, ist ganz weiß geblieben, die andere Hälfte ist sehr schwarz geworden.

Es sind also die brechbareren, die blauen Strahlen hauptsächlich, die auf die Silber Salze wirken, und aus unserem Experiment können



wir nebenbei auch gleich die praktische Erfahrung entnehmen, daß wir in einem Raum, der mit rotem Licht erleuchtet ist, unsere Schachteln mit Trockenplatten oder photographischen Papieren ruhig öffnen dürfen. Das rote Licht wirkt nicht auf dieselben. Allerdings gilt dieser Satz nicht mit absoluter Sicherheit. Sehr lange Bestrahlung mit rotem Licht ist für die Platte ebenso verderblich, wie kurze Bestrahlung mit blauem.

Um nun aber genauer zu bestimmen, welche Strahlen des Spektrums photographisch wirksam sind, will ich jetzt auf ein großes photographisches Papier direkt durch ein Prisma ein Spektrum entwerfen. Dann können wir mit einem Blick übersehen, welche Stellen desselben geschwärzt werden. Der Versuch nimmt einige Zeit in Anspruch, weil ich hier die direkte Silberausscheidung auf dem Papier erzielen will, aber nach fünf Minuten können wir doch das Resultat schon sehen. Ich will die Zwischenzeit dazu benutzen, um auf dem Papier die Grenzen der einzelnen Farben ungefähr zu markieren, damit wir nachher wissen, in welchen Farben die Schwärzung eintrat. Das Resultat dieses Versuches sehen Sie in Fig. 73. Die Schwärzung beginnt erst merklich im Grün, sie wird stark im Blau und Violett, aber wir erkennen zu unserer Überraschung, daß sie noch weit über die Grenzen hinausgeht, die das sichtbare Spektrum auf dem Papier hatte und die in der Figur durch einen längeren weißen Strich angemerkt ist.

Daraus ersehen wir also, daß es auch außerhalb des violetten Endes noch Strahlen im Spektrum gibt, welche sich uns hier durch ihre chemischen Wirkungen verraten haben. Diese nennt man ultraviolette Strahlen, oft auch, aber mit Unrecht, chemische Strahlen. Denn es sind nicht immer diese Strahlen, welche chemische Wirkungen hervorbringen. Beim Chlorophyll sind es z. B., wie wir gesehen haben, gerade die roten Strahlen. Jedenfalls aber haben wir nun eine Ausdehnung des Spektrums nach beiden Seiten über die sichtbaren Grenzen hinaus ermittelt. Die ultravioletten Strahlen haben, wie aus ihrer Lage sich

ergibt, kleinere Wellenlängen als  $0,380 \mu$ . Auch im ultravioletten Gebiet kommen Fraunhofersche Linien vor, wenn man Sonnenlicht anwendet und spektral zerlegt, und diese Linien zeigen sich sehr schön, wenn man das Sonnenspektrum photographiert. Die ultravioletten Strahlen werden aber durch Glas ziemlich stark absorbiert, dagegen werden sie durch Quarz recht gut durchgelassen. Ich habe deswegen bei dem eben angestellten Spektralversuch nicht ein Glasprisma, sondern ein Quarzprisma angewendet und werde das auch im folgenden immer tun, wenn ich mit den ultravioletten Strahlen operieren will.

Der ultraviolette Teil des Spektrums sieht hier weit ausgedehnter aus, als der sichtbare. Aber wir sahen schon im sichtbaren Spektrum, daß, wenn dasselbe durch ein Prisma erzeugt wird, am roten Ende die Farben eng zusammengedrängt, am violetten weit auseinandergedehnt sind, und so ist auch der ultraviolette Teil besonders stark ausgedehnt. In der That aber hat die äußerste Wellenlänge, die man im Ultravioletten bestimmen konnte, nur den Wert  $0,10 \mu$ , ist also etwa ein Viertel der äußersten violetten bei *H*. Diese kleinsten Wellen werden von allen Körpern, ja sogar von der Luft sehr leicht absorbiert, so daß es nur mit ganz besonders eingerichteten Apparaten, die im luftleeren Raum arbeiten, möglich ist, diese äußerst kurzen ultravioletten Strahlen zu erhalten und die Länge ihrer Wellen zu messen.

So zeigt sich also das Gebiet der Strahlen nach beiden Seiten verlängert über das Spektrum der sichtbaren, farbigen Strahlen hinaus. Wenn die ultraroten und ultravioletten Strahlen sichtbar wären, also auf unser Auge wirkten, so würden viele Körper, die wir jetzt als schwarz bezeichnen, uns als farbig erscheinen. Denn die schwarzen Körper absorbieren alle sichtbaren Strahlen. Deswegen nennen wir sie eben schwarz. Aber von den unsichtbaren Strahlen im Ultrarot und Ultraviolett brauchen sie keinen zu absorbieren. Sie würden also im durchgelassenen oder im reflektierten Licht in der Farbe dieser nicht absorbierten Strahlen erscheinen, und der Physiker muß sogar einen Stoßseufzer zum Himmel senden, daß diese Strahlen nicht sichtbar sind. Es wäre ihm das sehr erfreulich. Denn eine große Anzahl von Eigenschaften der Körper, eben gerade diejenigen, die sich auf die Absorption beziehen, die man jetzt nur durch mühsame Experimentaluntersuchungen konstatieren kann, würde man dann durch den bloßen Anblick erkennen.

Die Wirkungen des absorbierten Lichtes waren es, die uns in diesen beiden Fällen, als wir sie näher untersuchten, über die bekannten Er-

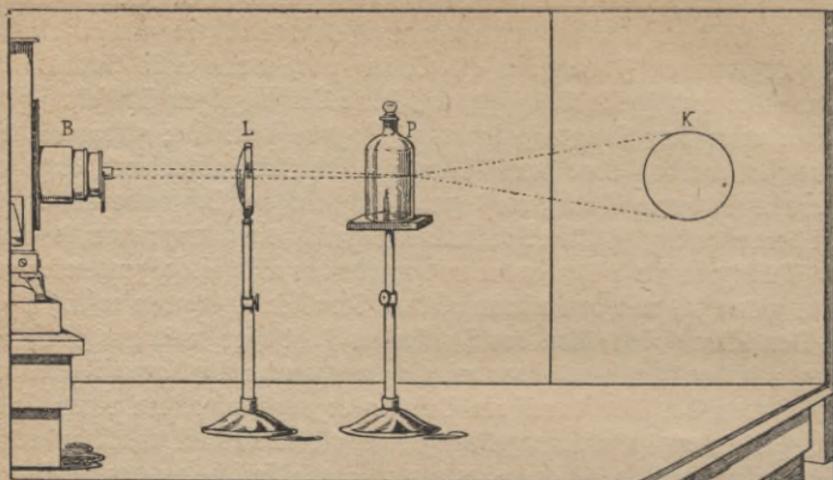


Fig. 74.

scheinungen hinausgeführt und uns Neues, nämlich die Verlängerung des Spektrums nach beiden Seiten hin, gelehrt haben. Wir werden naturgemäß fragen, ob es nicht noch andere Wirkungen des absorbierten Lichtes gibt, als die Wärme- und die chemischen Wirkungen, weil wir dadurch hoffen könnten, unsere Anschauungen noch mehr zu erweitern.

Beim Durchmustern aller Substanzen auf ihre optischen Eigenschaften hat man in der Tat eine Reihe von Stoffen gefunden, welche eigentümliche Erscheinungen anderer Art bieten, die auch auf der Wirkung des absorbierten Lichtes beruhen.

Ein erstes Beispiel für diese Körper bietet das Petroleum. Vielen von Ihnen wird schon einmal aufgefallen sein, daß das Petroleum, welches je nach seiner Reinheit wasserhell bis gelblich ist, hier und da einen schönen blauen Schimmer zeigt. Wenn man das Petroleum in einer Flasche beobachtet, so erblickt man, nicht gerade beim Durchsehen, sondern häufig beim schiefen Daraufliegen, einen solchen blauen Schein, der aber nicht in der ganzen Masse des Petroleums vorhanden zu sein scheint. Worauf beruht diese Farbenerscheinung? Wir wollen sie mit unseren experimentellen Mitteln untersuchen, um ihre Eigenschaften genauer festzustellen. Ich setze also eine Flasche mit reinem, wasserhellem Petroleum *P* direkt vor meine Bogenlampe (Fig. 74) und lasse mittels der Linse *L* ein Bündel Strahlen durch dasselbe hindurchgehen. Sie werden alle bemerken, daß die Bahn, welche dieses Bündel Strahlen in dem Petroleum abzeichnet, blau gefärbt ist. Und

doch bitte ich Sie, zu beobachten, daß das durchgelassene Licht, welches hinten auf dem Schirm das Bild *K* gibt, weiß ist. Würde das Petroleum blau erscheinen, weil es alle Strahlen außer Blau absorbiert, so würde das durchgelassene Licht, wie bei einem blauen Glase, blau erscheinen. Es erscheint aber weiß. Die blaue Färbung hat also einen anderen Grund. Wir sehen auch, daß nur da, wo das Strahlenbündel das Petroleum durchsetzt, die helle schöne blaue Färbung vorhanden ist, im ganzen übrigen Teil der Flasche ist das Petroleum wasserhell. Es macht ganz den Anschein, und es ist auch in der Tat so, als ob das Petroleum, da, wo es von dem weißen Licht getroffen wird, anfängt selbst zu leuchten, und zwar in blauer Farbe. Wenn Sie genau beobachten, werden Sie erkennen, daß der blaue Strahlenweg am Anfang, beim Eintritt des Lichts in das Petroleum, glänzender ist, als beim Austritt. Es scheint also, als ob das eintretende Licht, wenn es eine größere Strecke des Petroleums durchlaufen hat, nun schwächer die Eigenschaft hat, das blaue Leuchten zu erregen. Um das genauer zu konstatieren, haben wir ein einfaches Mittel. Ich stelle hinter unsere Flasche mit Petroleum eine zweite ganz gleiche und sende das Licht durch beide hindurch. Sie sehen in der Tat, daß der Strahlenweg in der ersten schön blau leuchtet, in der zweiten nur schwach. Also folgt, daß das durch die erste Flasche gegangene Licht die Fähigkeit zum Teil verloren hat, dieses Leuchten zu erzeugen, und das weist darauf hin, daß von dem einfallenden Licht gewisse Strahlen im Petroleum absorbiert werden, und daß diese es sind, welche das blaue Leuchten erzeugen. Wir werden das genauer untersuchen können, wenn wir das weiße Licht in seine Farben zerlegen und speziell untersuchen, welche Farben es sind, die dieses Leuchten hervorbringen. Bevor wir das aber tun, wollen wir uns zunächst noch nach anderen Körpern umschauen, welche diese Erscheinung ähnlich wie das Petroleum zeigen. Man nennt solche Körper fluoreszierende Körper. Die Bezeichnung kommt her von dem Kristall Flußspat (Fluorit), bei welchem sie zuerst beobachtet wurde. Dieser leuchtet auch schön blau, wenn er weiß bestrahlt wird. Man hat allmählich eine ganze Reihe von Stoffen gefunden, welche die Fluoreszenz zeigen, und zwar sowohl feste wie flüssige Stoffe. Ich habe hier eine Anzahl von solchen Substanzen und will sie Ihnen vorführen, wobei wir immer die Farbe des Fluoreszenzlichtes zu unterscheiden haben von der Farbe des durchgelassenen Lichtes. Der Weg des Strahlenbündels erscheint im Fluoreszenzlicht, dagegen hinten auf dem Schirm sehen Sie

die Farbe des durchgelassenen Lichtes, also die Eigenfarbe der Substanz. Ich stelle zuerst in den Strahl meiner Bogenlampe eine Lösung von Äskulin in Wasser. Eine Messerspitze des Äskulins genügt um einigen Litern Wasser die prachtvolle blaue Fluoreszenz zu geben. Eine Lösung von Eosin in Wasser fluoresziert gelbgrün, während die Lösung selbst im durchgelassenen oder auch im reflektierten Licht rosa erscheint. In konzentrierterer Lösung ist das Eosin sogar tiefrot, die Fluoreszenz aber grüngelb. Die grüne Chlorophylllösung gibt blutrote Fluoreszenz, die blaue Lösung von Resorzinblau gibt hochrote Fluoreszenz.

Außer diesen Flüssigkeiten fluoreszieren eine Reihe von festen Körpern mehr oder minder intensiv, so insbesondere die Uransalze. Das Uran enthaltende Glas, Uranglas, zeigt auch deutliche Fluoreszenz, es ist ein grünes Glas, das gelb fluoresziert. Eine große Bedeutung hat die Fluoreszenz des Bariumplatincyanürs gewonnen, deswegen, weil dieses Salz auch unter der Einwirkung der Röntgenstrahlen sehr schön fluoresziert. Es werden gerade für die Zwecke der Durchleuchtung mit Röntgenstrahlen sogenannte Fluoreszenzschirme fabriziert, wie ich Ihnen hier einen zeige. Auf einem Karton, der hinten schwarz überzogen ist, ist das Bariumplatincyanür in ziemlich dicker und möglichst feinkörniger Schicht durch ein Bindemittel aufgetragen. Die Fluoreszenz desselben ist sehr hell, weiß mit einem Stich ins Grüne.

Dieser Schirm eignet sich nun ausgezeichnet dazu, die Wirkung der einzelnen Farben des Spektrums in bezug auf ihre Fluoreszenzerregung zu zeigen. Ich bringe einfach, durch ein Quarzprisma, das Spektrum auf den Schirm. Wir sehen, daß fast in der ganzen Ausdehnung des Spektrums, mit Ausnahme des roten Teiles, der Schirm grünlich leuchtet, hauptsächlich aber sind es die blauen und violetten Strahlen, die die Fluoreszenz hervorbringen. Aber wir sehen weiter, daß das Leuchten des Schirmes weit ins Ultraviolette hineinreicht. Es sind also die ultravioletten Strahlen ebenfalls fluoreszenzerregend und sie sind es sogar meistens in besonderem Maße. Ich kann das sichtbare Spektrum durch einen vorgesezten Schirm ganz von dem Fluoreszenzschirm abblenden, und Sie sehen ihn nun allein unter dem Einfluß der unsichtbaren, ultravioletten Strahlen aufleuchten.

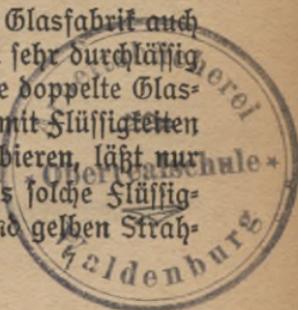
Aus diesen Versuchen erkennen wir nun erstens, daß die Fluoreszenz eine Erscheinung ganz besonderer Art ist. In den fluoreszierenden Körpern wird nämlich Licht einer Art in Licht anderer Art um-

gewandelt. Wenn ein solcher Körper bestrahlt wird, so absorbiert er gewisse Strahlen. Diese erzeugen aber nicht Wärme in ihm oder eine chemische Wirkung, sondern sie regen die kleinsten Teile des Körpers an, selbst so lebhaft zu schwingen, daß sie Licht ausenden können. Das ist die Auffassung, die man sich von der Fluoreszenz allmählich gebildet hat. Nicht alle Strahlen bringen einen Körper zum Fluoreszieren, sondern eben nur gerade diejenigen, die er absorbiert. Wir haben den Beweis vorhin an unseren beiden Flaschen mit Petroleum gehabt. Die wirksamen Strahlen des weißen Lichtes waren in der ersten Flasche fast ganz absorbiert und hatten dort die Fluoreszenz hervorgebracht. In die zweite Flasche kamen fast keine wirksamen Strahlen mehr hinein, und deshalb war auch in ihr fast keine Fluoreszenz zu merken.

Die Fluoreszenz wird hauptsächlich von ultravioletten Strahlen erregt. Die meisten Körper absorbieren diese, und daher gibt es auch viele, welche unter ihrem Einfluß fluoreszieren. Aber manche Körper fluoreszieren auch unter andersfarbigem Licht, z. B. die Lösung des Pflanzenchlorophylls fluoresziert sehr schön rot unter dem Einfluß roten Lichtes, welches es absorbiert.

Sie werden durch die Experimente vorhin mit dem Fluoreszenzschirm schon von selbst auf den Gedanken gekommen sein, daß es mit solchen fluoreszierenden Substanzen möglich ist, das ultraviolette Licht selbst zu sehen, oder eigentlich nicht dieses Licht selbst, da das Fluoreszenzlicht ja schon eine Umwandlung desselben ist, aber doch jedenfalls den Bereich zu erkennen, innerhalb dessen ultraviolettes Licht im Spektrum vorhanden ist. So können wir mit unserem Fluoreszenzschirm z. B. leicht erkennen, daß der Quarz viel mehr ultraviolette Strahlen hindurchläßt, als das Glas. Denn wenn ich das Spektrum einmal durch ein Glasprisma mit Glaslinse, das andere Mal durch ein Quarzprisma mit Quarzlinse auf den Schirm werfe, so sehen Sie, daß im letzteren Falle die Fluoreszenzerregung viel weiter geht, daß der ultraviolette Teil etwa dreimal so ausgedehnt ist wie im ersteren.

Es werden übrigens in der weltberühmten Jenaer Glasfabrik auch Gläser hergestellt, die für die ultravioletten Strahlen sehr durchlässig sind, sogenannte Uviolgläser oder U-V-Gläser. Eine doppelte Glasröhre aus solchem U-V-Glas, deren beide Kammern mit Flüssigkeiten gefüllt sind, die das sichtbare Licht vollständig absorbieren, läßt nur ultraviolette, also unsichtbare Strahlen hindurch. Als solche Flüssigkeiten nimmt man Kupfervitriol, welches die roten und gelben Strah-



len verschluckt, und Nitrosodimethylanilin, welches die grünen, blauen und violetten Strahlen verschluckt. Ich setze eine solche Küvette, die man ein U-V-Filter nennt, vor meine Bogenlampe, bei der ich die Glaslinse durch eine Quarzlinse ersetzt habe, und Sie beobachten, daß der ganze Raum vollständig dunkel ist. Es geht aber von der Lampe ein Bündel ultravioletter Strahlen aus. Denn wenn ich jetzt eine Platte aus Uranglas vor meine Lampe halte, so sehen Sie diese im vollen Dunkel gespenstig grün aufleuchten; ein Würfel aus Flußspat erscheint ebenso violett leuchtend, und so kann ich im Dunkeln noch eine Reihe anderer Substanzen plötzlich aufleuchten lassen. Durch solche Beobachtung mit dem U-V-Filter kann man aus einem Gemenge von Stoffen die verschiedenen Bestandteile durch ihr fluoreszierendes Leuchten heraus erkennen, man kann solche Stoffe also dadurch analysieren.

Nur ganz flüchtig möchte ich an diese Fluoreszenzerscheinungen anschließen, daß es gewisse Körper gibt, die auch wie die fluoreszierenden durch auffallendes Licht erregt werden, so daß sie selbst eigenes Licht ausenden, bei denen aber dieses eigene Leuchten auch noch anhält, wenn auch das erregende Licht schon ausgeschaltet ist. Solche Körper nennt man phosphoreszierende Körper, und den bekanntesten von ihnen, die Balmainische Leuchtfarbe, wendet die Industrie zum Bestreichen von Zifferblättern, Leuchtern usw. an, um diese in der Nacht zum Leuchten zu bringen. Ich habe hier einen Karton, der mit dieser Leuchtfarbe angestrichen ist. Ich setze ihn dem vollen Licht der Bogenlampe eine halbe Minute aus, wobei ich aber, um einen Teil des phosphoreszierenden Körpers vor der Bestrahlung zu schützen, meine Hand mit ausgebreiteten Fingern darüberlege. Nach der Belichtung sehen Sie jetzt im Dunkeln den ganzen Karton schön blauviolett leuchten und Sie sehen auf diesem hellen Grunde das schwarze Bild meiner Hand, zum Beweis, daß es nur die beleuchteten Teile sind, welche phosphoreszieren. Außer dieser Balmainischen Leuchtfarbe sind es eine Reihe von Schwefelverbindungen des Kalziums, Strontiums, Bariums und gewisse Zinkblenden, welche diese Phosphoreszenz gut und in verschiedenen Farben zeigen, wobei es merkwürdig ist, daß die Phosphoreszenz nur dann kräftig auftritt, wenn diesen Stoffen gewisse Beimengungen, wie Wismut, Zink usw., in kleineren Mengen beigegeben sind.

Die Ursache der Phosphoreszenz wie die der Fluoreszenz ist die, daß durch die eindringenden Lichtwellen die kleinsten Teilchen der betreffenden Körper selbst zum Schwingen, zum Aussenden von Wellen

veranlaßt werden. Ein jedes Atom eines Körpers macht, wenn es angeregt wird, nur bestimmte Schwingungen, je nach seiner Größe und Form. Ganz so wie eine Stimmgabel von bestimmter Größe nur eine bestimmte Schallschwingung mit bestimmter Periode macht, so macht auch ein Atom, wenn es angeregt wird, nur Schwingungen von einer bestimmten oder einer begrenzten Anzahl von bestimmten Perioden, sendet also Wellen von bestimmten Farben aus, die das Fluoreszenz- und Phosphoreszenzlicht bilden. Sind die Widerstände, die sich durch die Anordnung der Atome im Körper diesen Schwingungen entgegensetzen, groß, so kann das Atom nur, solange es angeregt wird, solange es von außen durch das auffallende Licht, durch die ankommende Wellenbewegung, immer wieder angestoßen wird, schwingen. Hören diese Stöße von außen auf, so vernichten die Widerstände des Körpers die Eigenschwingungen des Atoms, das Leuchten hört auf. Ein solcher Körper fluoresziert. Sind aber umgekehrt die Widerstände, die sich den Eigenschwingungen der Atome entgegensetzen, sehr klein oder sind gar keine solchen Widerstände vorhanden, so wird ein einmal angeregtes Atom sehr lange, im letzteren Falle sogar beliebig lange seine Schwingungen fortführen können, also noch leuchten, auch wenn die Bestrahlung aufgehört hat: ein solcher Körper phosphoresziert.

Sie sehen, daß in dieser Auffassung der Unterschied zwischen Fluoreszenz und Phosphoreszenz nur ein gradueller, quantitativer ist. Bei dem einen Körper hören die Atome vielleicht schon in einer millionstel Sekunde nach der Bestrahlung auf zu schwingen, bei einem anderen in einer tausendstel, bei einem dritten in einer Sekunde und bei einem vierten in einer Stunde. Das macht für die Erscheinung viel aus und ist doch bloß stufenweise verschieden.

Aber von unserem jetzigen Standpunkt aus können wir sogar uns klarmachen, worauf die verschiedenen Wirkungen des absorbierten Lichtes, die wir kennen gelernt haben, und worauf die Absorption selbst beruht. Wir sahen, daß in den meisten Fällen durch Absorption Wärme entsteht, in anderen chemische Wirkungen, und endlich jetzt Lichtwirkungen, nämlich Fluoreszenz- und Phosphoreszenzerscheinungen. Wir werden, so wie im letzten Fall, so allgemein in allen Fällen annehmen müssen, daß, wenn eine Lichtbewegung auf einen Körper fällt, der einen Teil derselben absorbiert, dieses absorbierte Licht immer zu der Bewegung der Moleküle und Atome verbraucht wird, oder vielmehr umgekehrt, daß nur deswegen Licht absorbiert wird, Lichtenergie verschwindet, weil eben

die Moleküle und Atome selbst durch die ankommenden Schwingungen in Bewegungen geraten. Diese Bewegungen werden zunächst im allgemeinen unregelmäßige sein, jedes Molekül wird, wenn es anfängt sich zu bewegen, bald an seine Nachbarmoleküle anstoßen, zurückprallen, in anderer Richtung sich bewegen, also kurz eine unregelmäßige Bewegung ausführen. Solche Bewegungen aber zeigen sich uns als Wärme an. Bei diesen Körpern, und das sind die meisten, wird also die Lichtabsorption nur Wärme erzeugen. Bei anderen Körpern, mit passend gelagerten und beschaffenen Molekülen und Atomen, wird die Bewegung eine regelmäßig periodische werden, und das sind die eben besprochenen fluoreszierenden und phosphoreszierenden Körper. Endlich bei manchen Körpern, wie den Silbersalzen, die aus zusammengesetzten Molekülen bestehen, ist die Möglichkeit vorhanden, daß einer der beiden Bestandteile des Moleküls, das Chlor oder das Silber, durch die Wellen in eine heftigere Bewegung kommt als der andere. Dann wird die Möglichkeit vorliegen, daß das Molekül zerfällt, wie wir es tatsächlich beobachten. Wenn ein Stück Holz und ein Stück Papier dicht nebeneinander auf dem Wasser liegen, und es kommen Wellen von passender Länge an, die die beiden schwimmenden Körper ergreifen, so wird ebenfalls nach einiger Zeit das Papier und das Holz einen gewissen Abstand voneinander haben, weil sie eben den Wellen ungleich folgen. Dies dürfte ein rohes Bild für die Zerlegung der Silbersalze sein.

Aber aus diesem Bilde kann man doch noch einen Umstand entnehmen, der bei dieser Zerlegung eine bedeutende und gerade für die praktische Photographie besonders wichtige Rolle spielt. Damit das Silber aus einem Silbersalz sich vollständig ausscheidet, dazu gehört eine ziemlich lange Einwirkung des Lichtes, wie Sie auch aus den Experimenten vorhin gesehen haben. Aber aus unserem Bilde geht die Möglichkeit hervor — und diese zeigt sich tatsächlich erfüllt —, daß eine kurze Einwirkung des Lichtes zwar das Silber noch nicht zum Ausschneiden bringt, aber doch einen gewissen, etwas größeren als den normalen Abstand zwischen dem Silber und dem Chlor oder Brom hervorbringt, oder allgemeiner gesprochen, um nicht gar zu bestimmte Behauptungen über Dinge auszusagen, die wir nicht sehen können, daß eine kurze Einwirkung des Lichtes eine gewisse Modifikation in den vom Lichte getroffenen Silbersalzmolekülen erzeugt, die nicht im gewöhnlichen, unbelichteten Silber vorhanden ist. In der That nämlich sind solche Erscheinungen gefunden worden, und diese haben die praktische Anwendung der Photo-

graphie wesentlich revolutioniert. Es hat sich nämlich gezeigt, daß, wenn ein solches Silbersalz, Chlor-, Brom- oder Jodsilber, auch nur eine kurze Zeit vom Lichte getroffen war, kleine Bruchteile einer Sekunde, so daß eine wirkliche Ausscheidung von Silber durchaus nicht zu erkennen war, daß dieses Salz sich doch anders als unbelichtetes erwies. Übergießt man nämlich solches belichtetes Salz mit einer Flüssigkeit, die, wie die Chemiker sagen, reduzierend wirkt, so scheidet sich aus ihm das Silber pulverförmig aus. Auf unbelichtetes Silbersalz aber wirken diese reduzierenden Mittel nicht. Solche reduzierende Mittel hat man allmählich in großer Zahl für die photographische Praxis geeignet hergestellt. Das meist benutzte und namentlich für die erste praktische Betätigung in der Photographie geeignete ist das sogenannte Hydrochinon. Aber es gibt eine große Anzahl anderer, Amidol, Pyrogallussäure, Eisenoxyalat, Rodinal usw., welche zum Teil sogar Vorzüge vor dem Hydrochinon haben. Man kann also belichtetes und unbelichtetes Silbersalz sofort dadurch unterscheiden, daß man sie mit einer von diesen Substanzen, die man Entwickler nennt, übergießt. Ganz unbelichtetes Salz bleibt in ihnen weiß, belichtetes, auch wenn die Belichtungszeit sehr kurz war, färbt sich infolge der Silberausscheidung nach einiger Zeit — eine halbe bis fünf Minuten und länger — schwarz.

Daß diese Entdeckung einen großen Einfluß auf die Entwicklung der Photographie haben mußte, ist leicht einzusehen. Denn nun hatte man ein Mittel, um schon bei sehr kurzer Belichtung oder, wie man es nennt, bei sehr kurzer Exposition, die nicht ausreicht, das Silbersalz zu zerlegen, doch Bilder zu erhalten.

Die Art und Weise, wie die Photographie in ihren Hauptzügen heute gehandhabt wird, ergibt sich nun eigentlich von selbst. Die photographische Platte ist jetzt fast durchgängig eine Trockenplatte, d. h. eine Glasplatte von bestimmter Größe, welche mit einer Schicht des Silbersalzes bedeckt und käuflich im Handel zu haben ist. Die meisten Platten enthalten Bromsilbergelatine. Statt auf Glas bringt man häufig auch die wirksame Schicht auf dünnen Membranen von Zelluloid oder Gelatine auf und bezeichnet diese als Films, die ebenfalls fabrikmäßig hergestellt werden. Diese haben den Vorteil, daß sie sich rollen lassen, und sie eignen sich daher besonders für solche Apparate, welche leicht tragbar sein sollen und einen geringen Raum einnehmen sollen. Die so vielfach verbreiteten Kodaks und Claks haben ihre Vorzüge zum Teil gerade durch die Anwendung von Films anstatt von Platten erlangt.

Die photographische Platte muß nun erstens vom Lichte verschont bleiben, solange man sie nicht benutzt, und darf dann, wenn sie verwendet wird, nur von denjenigen Lichtstrahlen getroffen werden, die von dem zu photographierenden Objekt ausgehen. Deswegen wird die Platte, solange sie nicht benutzt wird, in schwarzen Kartons aufbewahrt, und wenn sie benutzt werden soll, so wird sie dicht an die Rückwand eines dunklen Kastens, der Kamera, gebracht. Die Kamera enthält vorn eine Linse oder ein Linsensystem, das sogenannte Objektiv, durch welches die von jedem Punkt des zu photographierenden Objekts ausgehenden Strahlen gerade auf derjenigen Stelle der Kamera, an der die Platte sich befindet, ein Bild dieses Punktes erzeugen. Dadurch erhält man also von jedem äußeren Gegenstand, auf den man die Linse vorher eingestellt hat, an der betreffenden Stelle ein scharfes Bild. Um immer ein Bild gerade da zu erzeugen, wo die Platte hingebracht worden ist, sowohl von näheren als von entfernteren Objekten, verstellt man bei tragbaren (Hand-)Kameras gewöhnlich die Linse, bei feststehenden (Stativ-)Kameras verschiebt man die Hinterwand des Kastens. Die Linsen müssen für photographische Zwecke besondere, ziemlich schwierig zu erreichende Eigenschaften besitzen, und es hat gerade der Aufschwung der Photographie für die Technik der Linsenherstellung und -berechnung, sowie auch umgekehrt der Fortschritt in der Optik der Linsen auf die Photographie sehr befruchtend gewirkt.

Nachdem also das Objekt, die Linse und die photographische Platte, welche letztere bis dahin noch gewöhnlich durch einen aufrollbaren Deckel verschlossen ist, in die richtigen Abstände gebracht sind, setzt man nun die Platte den Lichtstrahlen, die von dem Objekt ausgehen, aus, indem man einen beweglichen Verschuß der Linse öffnet oder (bei Rollkassetten) vorher den Deckel aufrollt. Wie lange die Platte dem Licht zu exponieren ist, das hängt von der Helligkeit des Lichtes ab, von dem der Körper beleuchtet ist. Es lassen sich schon Bilder bei weniger als einhundertstel Sekunde Exposition herstellen, während bei sehr schwacher Beleuchtung mehrere Minuten notwendig sind.

Die so belichtete Platte ist nun scheinbar nicht verändert. Wenn man sie bei rotem Licht, welches, wie wir wissen, den Platten nicht schädlich ist, betrachtet, so erscheint sie ebenso weiß wie eine noch nicht belichtete Platte. Bringt man sie aber nun in den Entwickler, den man in einer Schale sich vorbereitet hat, und läßt sie eine Zeitlang darin, so scheidet sich nun an den belichteten Stellen das Silber aus, und es

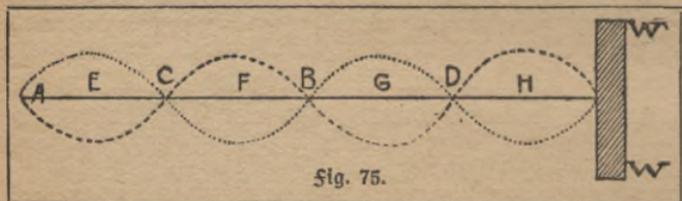
erscheinen diejenigen Stellen, welche am hellsten beleuchtet waren, schwarz, diejenigen, welche nicht beleuchtet waren, weiß. Es ist also ein negatives Bild erzeugt worden. Dieses Bild darf man aber noch nicht an das Licht bringen. Denn an den nichtbelichteten Stellen ist ja noch das Bromsilber vorhanden, welches dann auch wieder zersezt würde. Vielmehr ist es zunächst notwendig, das unzersezte Bromsilber aufzulösen und fortzuschaffen. Dazu dient das sogenannte Fixierbad, eine Lösung von unterschwefligsaurem Natron, welche die Silber- salze löst.

Nun kann das Negativ an das Tageslicht gebracht werden. Es muß aber noch gewaschen werden, um alles Fixiersalz zu entfernen, und dann getrocknet werden. Um nun von diesem Negativ ein Bild in der richtigen Verteilung von Hell und Dunkel, also ein Positiv, zu erzeugen, und zwar gewöhnlich auf Papier, hat man die photographischen Papiere, welche ebenfalls mit einer dünnen Schicht eines Silbersalzes, gewöhnlich von Chlorsilber, versehen sind. Das Papier wird mit seiner Schichtseite unter das Negativ gebracht und das Ganze dem Tageslicht ausgesetzt. Dann erscheint nach einiger Zeit das positive Bild auf dem Papier, welches nun noch ebenso wie das Negativ fixiert und gewaschen wird. Gewöhnlich gibt man dem Bilde noch durch ein Goldbad oder Platinbad einen schöneren Ton. Bei anderen Papieren exponiert man nicht so lange, bis ein Bild erscheint, sondern exponiert vielmehr das Papier unter dem Negativ nur sehr kurze Zeit, auch bei Lampenlicht, und entwickelt dann das Bild in Hydrochinon od. dgl. ganz wie das Negativ.

Die Photographie, wie sie hier beschrieben wurde, gibt bekanntlich nur die Helligkeitsabstufungen der Objekte wieder, nicht die Farben. Und auch die Helligkeiten gibt sie zunächst nicht in richtiger Art, wie sie unser Auge sieht. Denn da die Silbersalze für rotes Licht unempfindlich sind, wie wir gesehen haben, für blaues aber sehr empfindlich, so ist das Negativ am meisten geschwärzt da, wo blaues Licht aufgefallen ist, am wenigsten da, wo rotes Licht aufgefallen ist. Infolgedessen ist umgekehrt das Positiv am hellsten in den blauen, am dunkelsten in den roten Teilen des Objekts. Man hat aber jetzt auch Platten, welche für die meisten Farben, auch nach dem Rot hin, gut empfindlich sind. Diese werden dadurch hergestellt, daß man dem Silbersalz Stoffe beimengt, welche die grünen, gelben und roten Strahlen absorbieren. Da, wo die Absorption stattfindet, findet auch chemische Um-

wandlung statt. So bekommt man mit derartigen orthochromatischen Platten, wie man sie nennt, die Helligkeitsabstufungen auch bei verschiedenen Farben richtig.

Das Ideal der Photographie aber war seit langer Zeit die Herstellung von Bildern in natürlichen Farben, nicht durch künstliche Bemalung, sondern selbsttätig durch das Licht selbst. Dieses Ideal stellt aber zunächst ganz unerhörte Forderungen an das Licht. Denn um direkt auf der Platte ein farbiges Abbild eines Gegenstandes zu erzeugen, müßte ja ein roter Strahl, der auf die Platte fällt, diese ge-



rade rot färben, ein grüner müßte sie grün, ein blauer erblau färben. Man sieht zunächst durch-

aus nicht ein, wie man das erreichen kann. Und doch ist auf eine sehr geniale Weise das Licht gezwungen worden, gerade diese Funktionen zu übernehmen. Wenn auch diese Methode der farbigen Photographie, die nach ihrem Entdecker die Lippmannsche heißt, praktisch nicht von Bedeutung geworden ist, so ist sie doch wissenschaftlich von solchem Interesse, daß ich ihre Grundzüge Ihnen mitteilen und verständlich machen möchte.

Die Lippmannsche Methode ist eigentlich ein Triumph der Wellentheorie des Lichtes, sie führt uns gewissermaßen die Lichtwellen sichtbar vor unser Auge. Bei den gewöhnlichen Wasserwellen nämlich und bei den Schallwellen ist es sehr leicht, sogenannte stehende Wellen zu beobachten. Diese entstehen immer dadurch, daß eine Welle in einem Medium bis zu dessen Grenze hinläuft und von dort aus reflektiert wird und auf demselben Wege zurückläuft. Zwei solche Wellenbewegungen sind in Fig. 75 gezeichnet. Von A aus möge die punktiert gezeichnete Welle nach der Wand W hinlaufen, und von der Wand möge die gestrichelt gezeichnete Welle von derselben Länge zurücklaufen. An den Stellen C, B, D heben sich die beiden entgegengesetzten Bewegungen immer auf. Diese Punkte bleiben daher dauernd in Ruhe, während an den Stellen E, F, G, H immer die größte Bewegung herrscht. Das ganze schwingende System teilt sich daher an den Stellen C, B, D in Abschnitte ein, welche für sich hin und her schwingen. Eine solche Welle bezeichnet man als stehende Welle. Die in Ruhe bleibenden Stellen C, B, D nennt man die Knoten, die Stellen der größten Bewegung E,

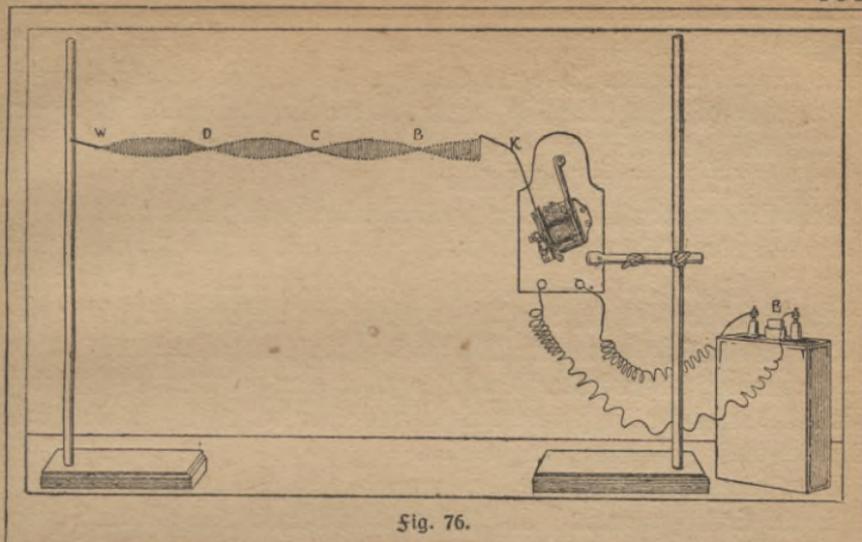


Fig. 76.

*F, G, H* die Bäuche der stehenden Welle. Der Abstand eines Knotens von dem folgenden, z. B. die Strecke *CB*, ist gleich der halben Wellenlänge (*AB*) der Schwingungen, und ebenso hat ein Bauch von dem nächsten eine halbe Wellenlänge Abstand. Ich möchte Ihnen eine solche stehende Welle, die aber immer nur dann zustande kommt, wenn zwei gleichartige Wellen in entgegengesetzter Richtung gegeneinander laufen, experimentell vorführen. Zu diesem Zwecke habe ich hier (Fig. 76) an dem Klöppel *K* einer elektrischen Klingel einen Faden befestigt, der mit seinem anderen Ende *W* an einem Stativ befestigt ist. Wenn ich den Faden ziemlich, aber nicht zu stark spanne, und die Klingel durch einen elektrischen Strom von dem Element *E* in Bewegung setze, so wird der Faden in hin und her gehende Bewegung gesetzt, es läuft eine Welle den Faden entlang bis zum Stativ, wird dort reflektiert und kehrt auf demselben Wege zurück, indem sie mit der ankommenden eine stehende Wellenbewegung bildet. Sie sehen, namentlich wenn ich den schwingenden Faden mit dem Licht der Bogenlampe beleuchte, deutlich die Abteilungen, in denen der Faden schwingt. Die Stellen *B, C, D* sind die Knoten. Da diese Stellen in Ruhe sind, kann ich sie mit einem Stab berühren, ohne die Wellenbewegung zu stören, während, wenn ich einen Bauch berühre, die ganze Bewegung sofort verändert wird.

Solche stehenden Wellen führen alle unsere musikalischen Instrumente aus. Jede Violine- oder Klaviersaite, die angeschlagen wird, macht stehende Wellen, indem zu der durch das Anschlagen oder das Anstreichen

erregten Welle eine entgegenlaufende von den Befestigungspunkten der Saite sich überlagert. Jede angeblasene Pfeife, jede Trompete, jede Posaune enthält stehende Schwingungen der Luftsäulen, die in ihnen sich befinden, jede Trommel, die geschlagen wird, tönt insoföge der stehenden Schwingungen des Kalbfelles.

Beim Licht waren solche stehenden Wellen lange nicht bekannt gewesen. Wenn aber das Licht eine Wellenbewegung ist, so müssen sie auch beim Licht erzeugt werden können, und zwar dann, wenn ein Lichtstrahl gegen eine Wand läuft, von der er genau in derselben Richtung reflektiert wird. Also wenn ein Bündel Lichtstrahlen senkrecht auf einen ganz ebenen Spiegel fällt, so muß es zusammen mit dem reflektierten Bündel den Äther in stehende Schwingungen versetzen. In der That ließ sich diese Folgerung nachweisen.

Die Anwendung nun, die Lippmann davon gemacht hat, ist überraschend. Er ließ nämlich solche stehenden Wellen innerhalb der Schicht einer photographischen Platte entstehen. Er brachte eine photographische Platte mit sehr gleichmäßiger und dünner Schicht in eine Kamera, die so eingerichtet war, daß die Glasseite der Platte auf Quecksilber lag, so daß sie dadurch außerordentlich gut reflektierend gemacht wurde. Fällt nun ein Lichtstrahl, z. B. ein gelber, senkrecht auf die Platte, so durchdringt er die Schicht und wird an der Rückwand reflektiert. Es geht also der reflektierte Strahl rückwärts durch die Schicht und bildet mit dem einfallenden Strahl stehende Lichtwellen. In diesen sind nun Knoten und Bäuche vorhanden. An den Knoten gibt es keine Lichtbewegung, folglich kann dort das Silbersalz nicht zerlegt werden, an den Bäuchen aber ist die lebhafteste Wellenbewegung vorhanden, folglich muß dort sich Silber ausscheiden. In der ganzen Dicke der photographischen Schicht muß also immer abwechselnd eine Schicht unzersehten Salzes und eine Schicht Silber folgen. Da die Wellenlänge des gelben Lichtes ungefähr  $0,6 \mu$  ist, und da jeder Bauch von einem nächsten um eine halbe Wellenlänge entfernt ist, so folgen also zwei Silberschichten aufeinander im Abstand von  $0,3 \mu$  und zwei unzersehte Schichten ebenfalls in demselben Abstand. Das Licht zerteilt also die ganze photographische Schicht in eine Reihe von dünnen Blättchen, jedes von der Dicke einer halben Wellenlänge der angewendeten Farbe. Fällt nun nicht gelbes, sondern anderes Licht, rotes oder blaues auf die Platte, so werden die Blättchen im ersten Fall dicker, im zweiten Fall dünner, jedesmal genau von der Dicke der halben Wellenlänge des angewendeten Lichtes.

Ein dünnes Blättchen von  $0,3 \mu$  Dicke reflektiert aber, bei senkrechtem Durchgang, nur einen Strahl von  $0,6 \mu$ . Denn nur ein solcher hat beim Hin- und Hergang durch das Blättchen einen Gangunterschied von einer ganzen Welle. Ein Strahl von jeder anderen Wellenlänge, der an diesem Blättchen ankommt, wird mehr oder minder geschwächt. Nun ist hier nicht bloß ein Blättchen vorhanden, sondern es sind mehrere übereinander gelagert. Die Farbensauslese wird dadurch noch verstärkt, und das Resultat ist, daß diejenigen Stellen, die von gelbem Licht in Schichten zerlegt waren, nun, wenn sie mit beliebigem, also weißem Licht beleuchtet werden, nur die gelben Strahlen zurückwerfen, also gelb erscheinen. Ebenso müssen die vorher durch rotes Licht in Schichten getheilten Stellen, wenn man sie ansieht, also in reflektiertem Licht, nun rot erscheinen, u. s. f.

Die Farbenphotographie ist damit prinzipiell gefunden. In der That, als Eippmann auf eine so angeordnete photographische Platte ein Sonnenspektrum brachte, so zeigte die Platte, nachdem sie in gewöhnlicher Weise entwickelt, fixiert, gewaschen und getrocknet war, das Bild des Sonnenspektrums in den natürlichen Farben. Auch andere farbige Gegenstände wurden in gleicher Weise fixiert. Aber so interessant und wichtig auch dieses Verfahren ist, so sieht man doch, daß es praktisch das Problem der Farbenphotographie nicht löst. Denn das Verfahren muß versagen bei Mischfarben, welche nicht eine bestimmte Wellenlänge, sondern mehrere aussenden, und die Farben, die die Gegenstände der Natur oder Kunst zeigen, sind durchgängig Mischfarben. In der That ist das Eippmannsche Verfahren, so schön und geistreich es ist, für die praktische Photographie bedeutungslos.

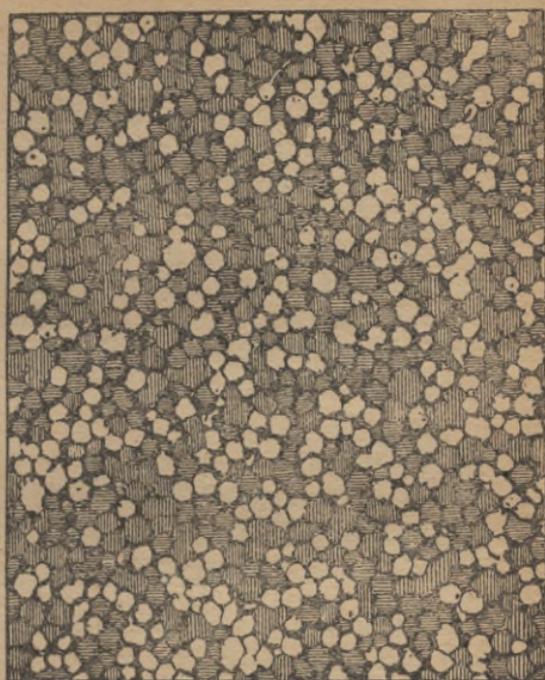
Die Forderung aber, welche bei der Eippmannschen Methode gelöst ist, daß die Photographie reine Spektralfarben wiedergibt, ist viel zu weitgehend für die praktischen Bedürfnisse. Die Farben aller Körper sind in Wirklichkeit nicht reine Spektralfarben, sondern gemischte Farben, und unser Auge ist nicht so empfindlich, daß es die einzelnen reinen Farben einer Mischung unterscheiden und heraussehen kann. Für den Eindruck auf unser Auge ist jede vorkommende Farbe durch eine Mischung mehrerer passender Farben zu ersetzen. Mit dem Farbmischungsapparat, den wir in der zweiten Vorlesung besprochen haben, hatte ich Ihnen gezeigt, daß durch drei passend ausgewählte Gläser, ein rotes, ein grünes und ein blaues, erstens durch Zusammenmischen aller drei Farben Weiß und zweitens durch je zwei Farben noch Purpur, Gelb und Blaugrün, also im ganzen eine Skala von sieben Farbentönen

erzeugt wird, wobei durch stärkeres oder minder starkes Abschwächen, oder durch Zuhilfenahme des Schwarz, noch eine große Reihe von Nuancen dieser Farbentöne hervorgebracht werden kann.

Durch diese additive Farbenmischung ist nun das Problem der Farbenphotographie, nachdem eine Reihe von Vorgängern den Weg dazu gebahnt haben, in sehr vollkommener Weise durch die Gebrüder Lumière in Lyon gelöst worden.

Nach langjährigen Vorbereitungen und Versuchen haben sie eine photographische Farbenplatte ausgearbeitet und auf den Markt gebracht, durch die es einem jeden möglich ist, die wunderbare Farbenpracht der Natur im Bilde festzuhalten und ebenso auch Gemälde, farbige Gegenstände aller Art naturgetreu zu photographieren. Das Wesentliche dieser Platten ist ein äußerst feiner Farbenfilter, der aus den drei Grundfarben rot, grün und dunkelblau besteht, und der so fein ist, aus so kleinen Elementen besteht, daß diese mit dem bloßen Auge nicht mehr zu erkennen sind. Um den Farbenfilter herzustellen, werden Stärkekörner zu ganz feinem Pulver vermahlen, so daß jedes Körnchen nur etwa  $\frac{1}{100}$  mm Durchmesser hat, und es wird eine Partie dieser Körnchen rot gefärbt, eine zweite grün, eine dritte blau-violett. Die Auswahl dieser drei Farbstoffe ist so vortrefflich geschahen, daß ihre additive Mischung ein reines Weiß ergibt. Diese farbigen Körner werden nun sehr sorgfältig ganz durcheinandergemischt, und die Mischung wird auf eine Glasplatte in feiner einfacher Schicht gesiebt und platt gedrückt. Es ist dann die ganze Platte mit einem solchen Farbenfilter versehen, bei welcher die roten, grünen und blauen Teile durchschnittlich regellos nebeneinanderliegen, und bei dem, eben wegen der Feinheit der Körner, auf jedes Quadratmillimeter eine sehr große Anzahl der drei gefärbten Körner zu liegen kommen, so daß das Auge diese Schicht als weiß ansieht. Fig. 77 zeigt eine starke Vergrößerung eines solchen Filters; es sind darin die roten Körner vertikal schraffiert, die grünen weiß gelassen, die blauen horizontal schraffiert. Auf diese Schicht wird nun die photographische Schicht gegossen, und nach dem Trocknen derselben ist die Farbenplatte fertig. Man nimmt einen Gegenstand durch das Glas hindurch auf, wobei, um die Empfindlichkeit der Platte für alle Farben gleichzumachen, die Aufnahme durch eine passend ausgewählte gelbe Scheibe hindurch geschieht. Trifft nun auf eine Stelle der Platte, von z. B. 1 Quadratmillimeter Größe, rotes Licht, so geht dieses durch die roten Körner, die auf diesem Quadrat-

millimeter liegen, hindurch, dagegen wird es durch die grünen und blauen nicht hindurchgelassen. Ebenso, wenn gelbes Licht auf diese Stelle fällt, so geht es je nach seinem Anteil an roten und grünen Strahlen durch die roten und grünen Körner hindurch, durch die blauen aber nicht. Die durch den Filter hindurchgelassenen Strahlen wirken nun auf die dahinterliegende photographische Schicht, und wenn diese entwickelt wird, so bildet sie zunächst ein Negativ, wobei die vom Licht getroffenen Stellen schwarz werden, die nichtgetroffenen weiß bleiben. Aber



▨ ROT □ GRÜN ▨ BLAU

Sig. 77.

es wird dann sofort durch eine zweite Entwicklung im Tageslicht das Bild umgekehrt, positiv gemacht, indem die vorher ausgeschiedenen Silberteilchen nun mehr oder minder aufgelöst werden, während die vorher weiß gebliebenen Stellen nun geschwärzt werden. Das Resultat ist ein positives Bild, bei welchem hinter denjenigen Körnern, durch die das Licht hindurchgegangen ist, die Platte hell ist, hinter denjenigen Körnern aber, durch die das Licht nicht hindurchgetreten ist, die Platte schwarz erscheint. Sieht man nun durch die so fertiggestellte Platte und den Farbensfilter hindurch, so erscheinen an jeder Stelle gerade diejenigen Farben — durch additive Mischung aus dem Farbensfilter —, welche von dem photographierten Gegenstand auf diese Stellen gefallen waren. Das Bild erscheint also im durchgehenden Licht farbig, und zwar in den natürlichen Farben.

Diese farbigen Photographien sind bei richtiger Exposition überraschend natürlich, und durch sie ist das jahrzehntelange Problem der

Farbenphotographie vortrefflich, wenn auch auf indirektem Wege gelöst. Allerdings erhält man durch jede Aufnahme nur immer ein einziges Bild, das man nicht reproduzieren kann, und ferner ist das Bild auf Glas statt auf Papier und muß immer in durchgehendem, nicht im reflektierten Licht beobachtet werden. Wenn auch weitere Fortschritte in dieser Hinsicht sehr erwünscht sind und wohl nicht ausbleiben werden, so ist doch das Wesentliche bei der Farbenphotographie nun ein realisiertes Wunder geworden.

Wir haben uns jetzt ein wenig auf das praktische Gebiet begeben, wir haben einige Anwendungen des Lichtes besprochen. Es ist Zeit, daß wir im nächsten Vortrag wieder zu unseren wissenschaftlichen Untersuchungen zurückkehren.

### Sechste Vorlesung.

#### Transversale Wellen. Doppelbrechung. Drehung. Elektrische Wellen.

Es dürfte scheinen, als ob wir in unseren bisherigen Vorlesungen eigentlich alles behandelt hätten, was das Licht uns zeigt. In der That werden wir kaum irgendeine optische Erscheinung direkt beobachten können, die sich nicht durch unser bisheriges Wissen erklären ließe, die sich nicht auf das eine oder andere der von uns behandelten Phänomene zurückführen ließ. Und ebenso dürfte es scheinen, als ob mit der Zurückführung aller optischen Vorgänge auf die Wellenbewegung des Äthers, die wir immer bis ins einzelne bestätigt gefunden haben, auch theoretisch uns nichts mehr zu tun übrigbliebe. Und doch ist das nicht der Fall. Vielmehr haben wir in beiden Richtungen, sowohl in bezug auf neue Erscheinungen wie auch in bezug auf die Wellentheorie noch wichtige Vertiefungen und Erweiterungen unserer Kenntnisse und Anschauungen vorzunehmen.

Ich sagte vorhin, daß wohl alle Lichterscheinungen, die uns aufstoßen, die wir rings um uns beobachten, durch unsere bisherigen Betrachtungen erklärt seien. Das ist auch im allgemeinen richtig. Aber wenn Sie zufällig ein Stück Kalkspat in die Hand bekommen und durch diesen hindurchsehen würden, werden Sie ebenso erstaunt sein, wie der Mönch Erasmus Bartholinus es war, daß Sie etwas ganz Neues, Unerwartetes beobachten.

Ich habe hier (Fig. 78) ein Stück eines solchen Kalkspats, wie er natürlich vorkommt. Es ist eine wasserhelle Platte eines Kristalls. Nun, wenn Sie diese Platte auf ein Stück Papier legen, auf dem Buchstaben geschrieben oder gedruckt sind, so werden Sie finden, daß Sie jeden Buchstaben durch den Kristall doppelt sehen, auch wenn Sie Antialkoholiker sind. Ich will Ihnen dies durch Projektion sichtbar machen. Ich habe hier auf eine photographische Platte, auf ein Diapositiv, die Buchstaben A bis N photographiert. Ich entwerfe von diesem Diapositiv durch eine Linse ein scharfes Bild auf dem Schirm, so daß Sie die Buchstaben deutlich sehen können. Und nun halte ich meine Kristallplatte vor die Schrift. Sie sehen sofort an dem Schirm, daß sich die verdeckten Buchstaben verdoppeln, daß Sie die ganze Schrift doppelt sehen,



Fig. 78.

wenn auch die beiden Bilder sich zum Teil übereinanderlagern. Das ist eine Erscheinung, die wir nach dem uns bisher Bekannten nicht vorhersehen konnten. Es wird jeder in den Kristall eintretende Lichtstrahl nicht wie bei jedem anderen durchsichtigen Körper bloß in seiner Richtung abgelenkt, gebrochen, sondern er wird in zwei Strahlen zerteilt, von denen jeder im Kristall einen andern Weg durchläuft, so daß sie beim Austreten aus dem Kristall, und auch schon in diesem selbst, mehr oder minder getrennt sind. Diese Erscheinung nennt man Doppelbrechung des Lichtes. Nicht bloß der Kalkspat zeigt sie, sondern eine große Anzahl anderer Kristalle. Aber am stärksten ist sie eben beim Kalkspat, wo sie auch zuerst von dem oben erwähnten Mönch entdeckt wurde. Da wir nun aber für gewöhnlich nicht die Welt durch Kalkspatstücke oder andere Kristalle anschauen, so konnte ich sagen, daß alles, was wir normal beobachten, erklärt sei. Diese Erscheinung aber ist neu und unerklärt. Sie kann aber nur durch seltenen Zufall oder durch Absicht von uns beobachtet werden.

Und gerade mit dieser neuen Erscheinung hängt nun auch eine Frage zusammen, die bei unserer Wellentheorie noch nicht besprochen worden ist, die aber, wenn wir ganz genaue Kenntnis der Natur uns verschaffen wollen, doch erledigt werden muß. Wir haben uns zwar überzeugt, daß das Licht in einer Wellenbewegung des Äthers sich fortpflanzt, daß die einzelnen vom Licht getroffenen Ätherteilchen hin und

her schwingen, aber dabei ist noch, wenn wir genau sein wollen, ein Fragezeichen unerledigt. Es gibt nämlich zwei verschiedene Arten, wie die Teilchen eines Körpers hin und her schwingen, wenn diese Schwingungen sich wellenförmig durch den Körper fortpflanzen. Nehmen wir als erstes Beispiel einen Teich, in dem wir durch einen hineingeworfenen Stein Wellen an der Oberfläche erregt haben. Jedes Wasserteilchen bewegt sich dabei auf und nieder, zunächst die direkt vom Stein getroffenen, dann die weiter entfernten. Die Bewegung jedes einzelnen Teilchens geschieht also in der vertikalen Richtung, auf und nieder. Die Welle aber pflanzt sich von dem Ausgangspunkt längs der ganzen Oberfläche des Teiches fort, also in horizontaler Richtung. Die Bewegung jedes einzelnen Teilchens ist also senkrecht auf der Richtung, in welcher die Welle fortschreitet. Eine solche Wellenbewegung nennt man eine transversale.

Nehmen wir dagegen einen Glasstab wie denjenigen in Fig. 79, den ich in der Mitte halte und an einem Ende durch ein Tuch oder mit den Fingern reibe. Sie hören einen sehr hellen schreienden Ton. Wir wissen, daß sich längs des Glasstabes und dann weiter in der Luft eine Wellenbewegung ausbreitet. Durch das Reiben versetze ich die Glasteilchen in Schwingungen, die hin und her gehen, wie meine Hand beim Reiben, also in der Richtung des Glasstabes. Und in derselben Richtung pflanzt sich auch die Welle in dem Glasstabe fort. Hier haben also die Schwingungen jedes Teilchens dieselbe Richtung, wie diejenige ist, in der die Wellenbewegung, der Schall, sich im Stabe fortpflanzt. Eine solche Wellenbewegung nennt man eine longitudinale.

Ein berühmter Physiker hat einmal folgendes nette Bild für diese beiden Arten von Wellen und ihre Fortpflanzung gebraucht. Es sei eine große Menschenmenge vor einem Schloß versammelt, aus dem der König (es war noch vor der republikanischen Zeit) herauskommen will. Sowie er erscheint, lüften die nächsten Reihen ihren Hut, und dieses Hautabnehmen pflanzt sich durch die Menschenmasse nach hinten fort, wenn die hinten Stehenden den König nicht selbst erblicken können, sondern bloß aus dem Hautabnehmen der Vor-

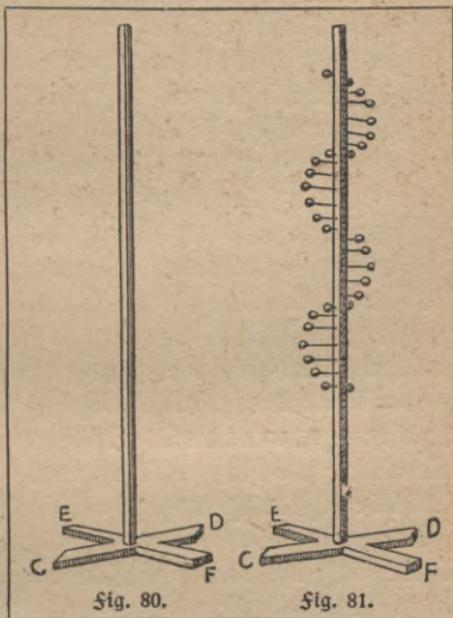


deren schließen, daß er herausgekommen ist. Die Richtung, in der dieses Hutabnehmen stattfindet, geht also von vorn nach hinten, d. h. in einer horizontalen Richtung. Wenn nun jeder einzelne seinen Hut senkrecht vom Kopf in die Höhe heben und dann wieder aufsetzen würde, so hätten wir eine transversale Welle. Denn die Bewegung jedes Hutes findet senkrecht statt zu der Richtung, in der das Hutabnehmen sich fortpflanzt. Wenn aber, was man allerdings nicht tut, ein jeder zum Zeichen des Grußes seinen Hut nach vorn zum König hin bewegen und dann wieder zurücknehmen würde, so wäre diese Bewegung longitudinal, weil die Bewegung jedes Hutes in derselben Richtung stattfindet, in der das Hutabnehmen sich fortpflanzt.

Da es also zwei verschiedene Arten von Wellenbewegungen, transversale und longitudinale, gibt, so ist offenbar unsere wissenschaftliche Einsicht in das Wesen des Lichtes noch nicht vollständig.

Wir wissen zwar, daß das Licht eine Wellenbewegung ist, aber wir könnten mit unseren bisherigen Erfahrungen die Gewissensfrage, ob das Licht aus transversalen oder aus longitudinalen Wellen besteht, nicht beantworten. Unsere Interferenzerscheinungen, aus denen wir auf die Wellennatur des Lichtes geschlossen haben, sind auch ganz unabhängig davon, ob der Äther transversal oder longitudinal schwingt, sie hängen nur ab von der Länge der Wellen und dem Gangunterschied, nicht von der Richtung der Schwingungen.

Auf welche Weise aber könnten wir zwischen einer transversalen und einer longitudinalen Bewegung unterscheiden? An diesem Stab (Fig. 80) können wir dies untersuchen. Wenn der Stab die Richtung darstellt, in der sich eine Welle fortpflanzt, so würde also bei einer longitudinalen Bewegung jedes Teilchen in der Richtung des Stabes oszillieren, und rings um den Stab herum würden sich alle Richtungen,



3. B.  $CD$  oder  $EF$ , ganz gleich verhalten. Wenn aber in dem Stab eine transversale Wellenbewegung stattfindet, wie es 3. B. Fig. 81 darstellt, wo die durch den Stab in der Richtung  $CD$  gesteckten Kugeln die Lage der einzelnen Theilchen bei den Schwingungen repräsentieren sollen, so ist das anders. Hier merkt man offenbar in der Richtung  $CD$  die Schwingungen, in der Richtung  $EF$  aber nicht. Die Richtung  $CD$ , in der die Schwingungen stattfinden, ist ausgezeichnet gegen jede andere Richtung, in der eben die Schwingungen nicht stattfinden. Was wir aus diesem Bild entnehmen wollen, ist bloß folgendes: Bei einer longitudinalen Wellenbewegung sind alle Richtungen um den Stab herum gleichwertig, bei einer transversalen Bewegung aber verhalten sich die verschiedenen Richtungen verschieden. Eine Richtung, nämlich diejenige, in der die Schwingungen stattfinden, ist ausgezeichnet. Ersetzen wir jetzt unseren Stab durch einen Lichtstrahl, so werden wir sagen können: Ist das Licht eine longitudinale Bewegung, so ist an einem Lichtstrahl keine Seite von der anderen, keine Richtung von der anderen zu unterscheiden. Ist es aber eine transversale Bewegung, so kann sich die eine Richtung, nämlich diejenige, in der die Schwingungen stattfinden, anders verhalten als alle anderen Richtungen, kurz, es werden dann vielleicht an dem Lichtstrahl Verschiedenheiten nach verschiedenen Richtungen zu erkennen sein.

Nun, wir haben bisher nichts bemerkt, was darauf schließen lassen könnte, daß um einen Lichtstrahl herum die verschiedenen Richtungen sich nicht ganz genau gleich verhalten. Insolgedessen dürften wir geneigt sein, das Licht für eine longitudinale Wellenbewegung zu halten, wie es der Schall auch ist. Und doch wäre das leichtsinnig geschlossen. Ein transversaler Lichtstrahl muß nicht, er kann bloß eine, wie man es nennen kann, Seitlichkeit zeigen. Ein negatives Ergebnis würde nichts beweisen, aber wenn wir positive Anzeichen hätten, daß unter Umständen ein Lichtstrahl eine Verschiedenheit in seinen verschiedenen Seiten zeigt, dann allerdings würde das auch ein positiver Beweis für die Transversalität der Schwingungen sein.

So seltsam es klingt, es läßt sich tatsächlich am Licht unter bestimmten Umständen zeigen, daß die verschiedenen Seiten um einen Strahl herum sich nicht gleich, sondern verschieden verhalten. Die Entdeckung dieser Eigenschaft des Lichtes war eine zufällige. Wir verdanken sie einem französischen Forscher Malus. Dieser beobachtete nämlich, daß ein Lichtstrahl, wenn er bereits einmal von einem Spiegel (nicht einem Metallspiegel, sondern etwa einer spiegelnden Glasfläche) unter einem

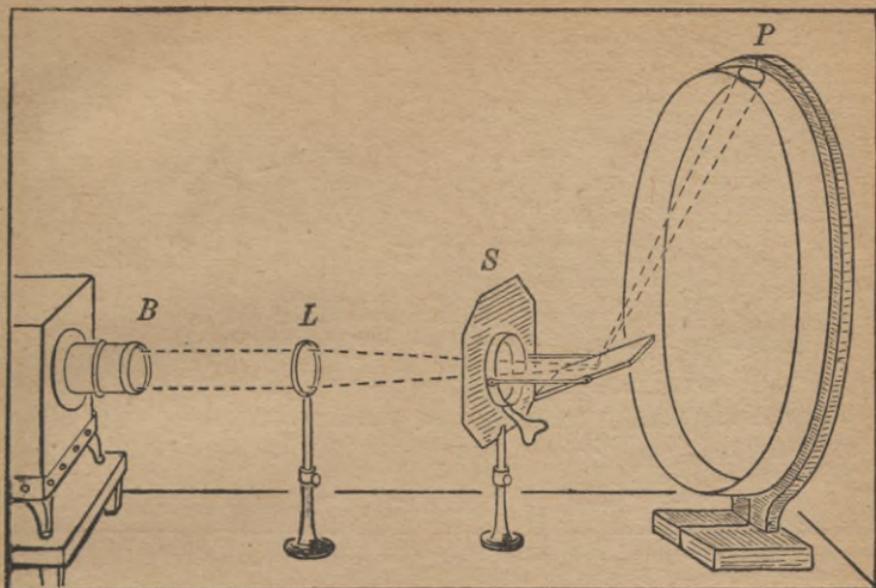


Fig. 82.

bestimmten Winkel reflektiert wurde, sich anders verhält, wie ein gewöhnlicher Lichtstrahl. Bei einem gewöhnlichen Lichtstrahl, der auf einen Spiegel fällt und reflektiert wird, ist der reflektierte Strahl immer genau gleich beschaffen und insbesondere immer gleich hell, wie auch der Spiegel steht, wenn nur der Einfallswinkel immer derselbe ist. Er wird bei anderer Stellung des Spiegels nach einer anderen Richtung zurückgeworfen, aber das reflektierte Licht zeigt, wie auch der Spiegel steht, immer dieselbe Helligkeit. Ganz anders aber ist es, wie Malus fand, wenn der Lichtstrahl, der reflektiert werden soll, schon einmal reflektiert war, wenn er selbst durch Reflexion entstanden ist. In diesem Falle tritt ein großer Unterschied ein, je nach der Richtung des zweiten reflektierenden Spiegels. Ist nämlich der zweite reflektierende Spiegel dem ersten parallel, so wird das Licht von ihm in gewöhnlicher Weise zurückgeworfen. Ist aber die Ebene des zweiten Spiegels senkrecht zu der des ersten, so wird das Licht überraschenderweise nicht zurückgeworfen und bei einer mittleren Stellung des zweiten Spiegels, zwischen diesen beiden Extremen, wird es nur geschwächt zurückgeworfen.

Die Art dieses Unterschiedes und überhaupt die hierbei in Betracht kommenden Verhältnisse werden Ihnen am besten durch das Experiment klar werden. Ich stelle hier (Fig. 82) einen Spiegel S aus schwar-

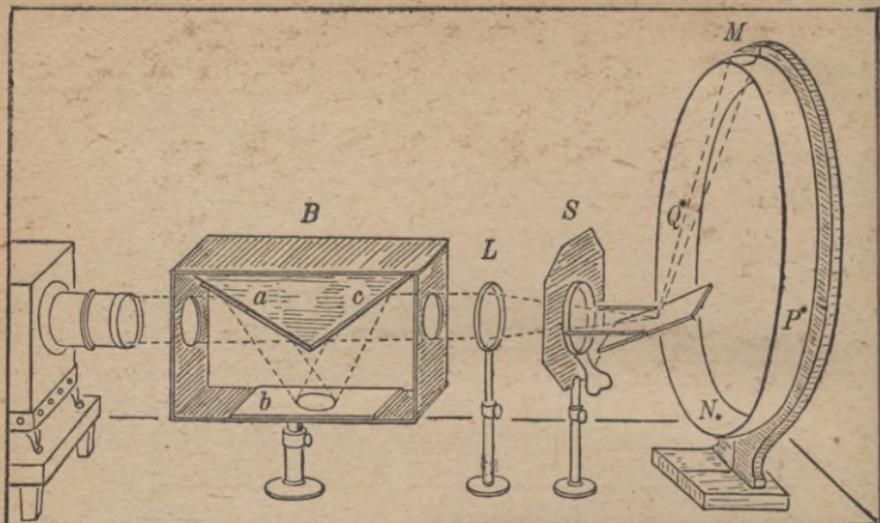


Fig. 83.

zem Glas so auf, daß das Licht meiner Bogenlampe *B*, wenn es durch das Loch der Irisblende und eine Linse *L* gegangen ist, einen Winkel von  $55^{\circ}$  etwa mit der Normale des Spiegels bildet. Um bei der Drehung des Spiegels das reflektierte Licht immer leicht verfolgen zu können, habe ich hier einen kreisförmigen Schirm aus durchsichtigem Papier *P* aufgestellt, auf den das reflektierte Bild fällt. Ich drehe den Spiegel so, daß seine Normale sich um den einfallenden Lichtstrahl im Kreise dreht. Dann bildet der einfallende Strahl mit der Normale immer denselben Winkel, bloß die Richtung der Normale im Raume ist verschieden, und daher wandert auch der reflektierte Lichtstrahl auf dem kreisförmigen Schirm *P* im Kreise herum, aber er bleibt immer gleich hell.

Daselbe Experiment will ich aber jetzt so anstellen, daß ich erst den Lichtstrahl meiner Bogenlampe von einem Spiegel reflektieren lasse und diesen reflektierten Strahl dann auf den drehbaren Spiegel *S* werfe. Um das in bequemer Weise tun zu können, dient mir der Apparat *B* in Fig. 83. Das Licht der Bogenlampe, das durch die Irisblende gegangen ist, wird zunächst auf einen schief gestellten Metallspiegel *a* geleitet, wird von diesem auf den unten befindlichen Metallspiegel *b* reflektiert und fällt von diesem auf den Spiegel *c*, der aber kein Metallspiegel, sondern eben ein Glasspiegel ist, und wird von diesem horizontal hinausreflektiert. Der heraustretende Strahl trifft nun wieder

unter  $55^{\circ}$  auf den im vorhergehenden Versuch benutzten Spiegel  $S$ , nachdem er vorher durch eine Linse  $L$  gegangen ist, die nur dazu dient, ein reelles Bild der Öffnung in passender Entfernung, nämlich auf dem kreisförmigen Schirm zu entwerfen. Der Spiegel  $S$  aber ist wie vorher in seinem Gestell drehbar um die Richtung des auf ihn fallenden Strahles. Infolgedessen bleibt zwar der Winkel, den der auffallende Strahl mit der Normale bildet, wie oben, immer derselbe, aber die Normale des Spiegels nimmt alle möglichen verschiedenen Richtungen an und infolgedessen auch der von  $S$  reflektierte Strahl. Drehe ich nun den Spiegel  $S$ , so sehen Sie mit einem Blick, daß das Bild der Öffnung bei  $M$  sehr hell ist, beim Weiterdrehen wird es dunkler und bei  $P$  ist es ganz verschwunden. Beim Weiterdrehen wird es wieder heller, erreicht bei  $N$  ein Maximum der Helligkeit, wird wieder dunkler, bei  $Q$  ist es ganz verschwunden, es erscheint dann wieder und ist endlich bei  $M$  wieder ganz hell. Man erkennt, daß für die Lagen bei  $M$  und  $N$  der Spiegel  $S$  parallel ist dem Spiegel  $c$ . In dieser Stellung der beiden Spiegel wird also das Licht am stärksten reflektiert. Dagegen für die Stellen  $P$  und  $Q$  ist die Normale des Spiegels  $S$  senkrecht zur Normalen des Spiegels  $c$ . In dieser Lage reflektiert der Spiegel  $S$  nicht mehr den Strahl, der von  $c$  gekommen ist. In allen Zwischenlagen wird das Licht geschwächt reflektiert.

Die erste Folgerung, die wir aus dieser auffallenden Erscheinung ziehen, ist die, daß der reflektierte Strahl, der von  $c$  ausging, sich ganz anders verhält wie ein gewöhnlicher Lichtstrahl.

Um diese Folgerung kurz zu präzisieren, wollen wir den reflektierten Strahl polarisiert nennen. Das soll jetzt nur eine kurze Bezeichnung dafür sein, daß er sich anders verhält, wie ein natürlicher.

Die zweite Folgerung aber ist diese: Der polarisierte Strahl, der auf  $S$  gefallen ist, wird anders von  $S$  reflektiert, mit anderer Intensität, je nach der Lage der Normale von  $S$  zu dem Strahl. Wenn in dem Strahl Bewegungen vorhanden wären, die nur in der Richtung des Strahles verlaufen, also longitudinale, so könnte die Lage der Normale des Spiegels  $S$  gar keinen Einfluß auf die Eigenschaften des Strahles haben. Wenn aber die verschiedenen Seiten des Strahles sich verschieden verhalten, wenn also etwa die Ätherteilchen in einer Richtung  $A$  (senkrecht zum Strahl) schwingen, in einer anderen Richtung  $B$  (senkrecht zum Strahl) aber nicht schwingen, so wird es natürlich für das Licht einen Unterschied machen, ob die Normale des Spiegels die Richtung von  $A$  oder die Richtung von  $B$  hat.

Kurz, diese Entdeckung von Malus zeigt uns sicher an, daß in dem reflektierten Strahl, den wir als polarisierten bezeichneten, die Schwingungen transversale sind. Nun aber, ein natürlicher Lichtstrahl, der noch nicht reflektiert war, zeigt ja die Malus'sche Erscheinung nicht. Sollte dieser etwa longitudinale Schwingungen besitzen? Es wäre unlogisch, das anzunehmen, da ja der polarisierte Lichtstrahl aus dem natürlichen entstanden ist, und die Annahme ist auch gar nicht nötig, daß ein Lichtstrahl eine total andere Bewegung enthalten solle, wenn er schon reflektiert ist, als wenn er es noch nicht ist. Um uns kurz ausdrücken zu können, wollen wir einen natürlichen Lichtstrahl, der sich also anders verhält, als ein polarisierter, einen unpolarisierten nennen. Nun liegt die Auffassung nahe, daß zwar auch in einem unpolarisierten Lichtstrahl alle Teilchen transversal, also senkrecht zum Strahle schwingen, daß aber, da es ja senkrecht zu einem Strahl noch alle möglichen Richtungen gibt, keine von diesen Richtungen bevorzugt ist. Die Schwingungsrichtung aller Teilchen eines unpolarisierten Strahles ist zwar immer senkrecht zum Strahl, aber kann für jedes Teilchen eine andere sein. Dagegen für einen polarisierten Lichtstrahl würden alle Teile in Reih und Glied, wie ein Regiment Soldaten marschiert, nach derselben Richtung schwingen.

Diese Betrachtungen erscheinen etwas schwierig, sind es aber im Grunde nicht. Experimentell namentlich ist es leicht, schon nach unseren bisherigen Kenntnissen polarisiertes Licht von unpolarisiertem zu unterscheiden. Wir brauchen bloß den zweiten Spiegel *S* unseres Apparates von Fig. 83, also überhaupt einen Glasspiegel anzuwenden. Lassen wir einen Lichtstrahl unter  $55^\circ$  auf diesen fallen und drehen wir den Spiegel um die Richtung des Lichtstrahls, so können nur zwei Fälle eintreten. Entweder das reflektierte Licht ändert seine Stärke beim Drehen des Spiegels, dann war das auffallende Licht polarisiert, oder es ändert seine Stärke nicht, dann war es unpolarisiert.

Nun sind wir so weit, daß wir den Zusammenhang zwischen unserer theoretischen Frage über die Transversalität des Lichtes und der Entdeckung von Bartholinus am Doppelspat rasch finden können. Wenn ein Lichtstrahl auf den Kalkspat fiel, so wurde er doppelt gebrochen, es kamen aus dem Kalkspat zwei getrennte Strahlenbündel heraus. Ich lasse z. B. ein kreisförmiges Strahlenbündel (Fig. 84) aus dem Loch unserer Lampe *B* auf den Kalkspat *N* fallen, nachdem ich es durch eine Linse *S* habe gehen lassen, und Sie sehen die zwei Strahlenwege in

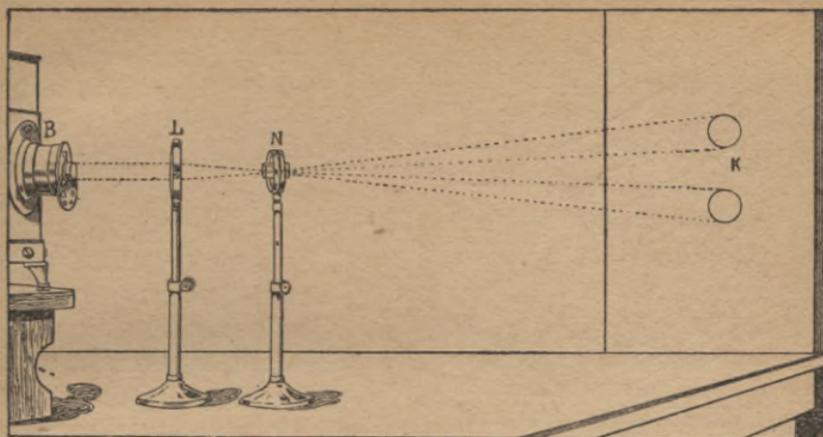


Fig. 84.

der Luft und die beiden Bilder *K* unseres Lochs auf dem Schirm. Das auf den Kalkspat auffallende Licht ist natürliches, unpolarisiertes. Die beiden gebrochenen Strahlen aber, die aus dem Kalkspat herauskommen, sind, wie ich Ihnen beweisen werde, polarisiert. Denn wenn ich meinen Spiegel *S* aus Fig. 83 in den einen oder den anderen der beiden Strahlenwege stelle, bekomme ich jedesmal bei bestimmter Stellung desselben ein Verschwinden des reflektierten Strahles. Daraus folgt also: Aus natürlichem Licht wird bei dem Durchgang durch einen solchen Kalkspat polarisiertes Licht, und zwar sind beide Strahlen polarisiert. Aber während bei dem einen der beiden Strahlen das Licht bei *P* und *Q* (Fig. 83) ausgelöscht wird, wird es bei dem anderen bei *M* und *N* ausgelöscht. Ich muß den Spiegel um einen rechten Winkel drehen, damit er einmal den ersten polarisierten Strahl, das andere Mal den zweiten nicht zurückwirft. Daraus müssen wir schließen, daß die beiden polarisierten Strahlen sich unterscheiden, und wir können auch leicht erkennen, wodurch sie sich unterscheiden können. Bei jedem polarisierten Strahl finden die Schwingungen aller Teilchen senkrecht zum Strahl statt, aber man erkennt, daß dabei noch eine wesentliche Verschiedenheit stattfinden kann. In den beiden Figuren 85 bedeute  $\alpha\beta\gamma\delta$  einen polarisierten Strahl. Durch diesen ist eine Ebene *AB* gelegt. Nun können, wie in Fig. I, die Schwingungen der Teilchen in dieser Ebene liegen, oder sie können, wie in Fig. II, senkrecht zu dieser Ebene liegen. Zwei solche Strahlen unterscheiden sich also durch die Richtung der Schwingungen. Man nennt sie zwei senkrecht aufeinander polarisierte Strahlen.

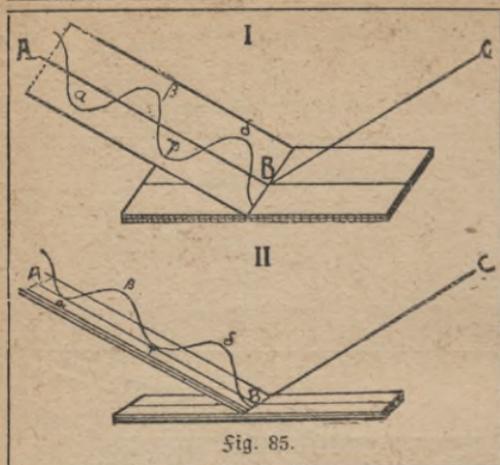


Fig. 85.

Es ist klar, daß, wenn man den einen Strahl um sich selbst herumdrehen würde, um einen rechten Winkel, daß er dann genau wie der andere würde.

Wir haben jetzt schon zwei Mittel, um polarisiertes Licht aus natürlichem zu erzeugen. Zuerst einen Glaspiegel, auf den wir das natürliche Licht unter einem Winkel von  $55^{\circ}$  auffallen lassen, und zweitens unseren Kalkspat. Dieser letz-

tere liefert uns sogar zwei senkrecht aufeinander polarisierte Strahlen. Wir wollen jede Vorrichtung, die aus natürlichem Licht polarisiertes macht, einen Polarisateur nennen. Unser Spiegel und unser Kalkspat sind also Polarisatoren. Unbequem ist es bei dem Kalkspat, daß immer beide Strahlen heraustreten, wenn man Licht polarisieren will. Diesen Übelstand aber hat Nicol dadurch beseitigt, daß er den Kalkspat in eine passende Form brachte, die aus Fig. 86 hervorgehen wird. Er schnitt nämlich einen gewöhnlichen Kalkspatkrystall so in der Mitte durch, wie es die Figur zeigt, und kittete die beiden Hälften dann mit Kanadabalsam wieder zusammen. Dadurch erreichte er folgendes: Der einfallende Lichtstrahl A teilt sich beim Eintritt in den Krystall in die beiden Strahlen AB und AC, die man als außerordentlichen und ordentlichen unterscheidet, um bequem von ihnen sprechen zu können. Der erste fällt auf die Balsamschicht und geht durch sie und den hinteren Teil des Kalkspats einfach hindurch und tritt bei B heraus. Der andere Strahl aber, AC, fällt unter solchem Winkel auf die Balsamschicht, daß er dort total zurückgeworfen wird. Es ist eben absichtlich als Kitt der Kanadabalsam wegen seines Brechungsindex gewählt, und die Winkel des Kalkspats absichtlich so abgemessen, daß dieses eintritt. Der Strahl wird also von C nach D geworfen, und sein Licht wird dann in der Fassung des Krystalls absorbiert. So tritt also aus einem solchen Nicol'schen Prisma oder kurzweg Nicol nur ein Strahl B heraus, der aber polarisiert ist.

Ein solches Nicol'sches Prisma ist sehr bequem anzuwenden, und es macht also aus natürlichem Licht polarisiertes; ganz so wie ein Spiegel aus

Glas unter  $55^\circ$  gegen den Strahl angewendet, das natürliche Licht polarisiert. Der Nicol ist daher auch ein Polarisateur. Um polarisiertes Licht als solches zu erkennen, haben wir bisher wieder einen Spiegel benutzt, nämlich unseren Spiegel S aus Fig. 83, der dann als Analysator bezeichnet wird. Ebenso aber, nur einfacher, kann man als Analysator wieder einen Nicol benutzen. Denn ein Nicol'sches Prisma macht aus natürlichem Licht polarisiertes, d. h. Licht, welches nur in einer bestimmten Richtung schwingt. Diese Richtung ist durch die Natur des Kalkspats gegeben. Ein Nicol in seiner Fassung sieht im Querschnitt so aus, wie es Fig. 87 zeigt. Man sieht, daß zwei gegenüberliegende Winkel des Kalkspats spitz, zwei stumpf sind. Das durch den Nicol hindurchgehende polarisierte Licht schwingt nun stets in der Richtung, die durch den Pfeil in der Figur angegeben ist, also in der Richtung der kurzen Diagonale. Diese Richtung bezeichnet man im Kristall als den Hauptschnitt des Nicols.

Nun erkennt man also folgendes: Wenn man den Nicol so aufstellt, daß der Hauptschnitt vertikal ist, so erhält man polarisiertes Licht, bei welchem die Teilchen vertikal auf und ab schwingen. Dreht man den ganzen Nicol, so daß der Hauptschnitt horizontal ist, so erhält man horizontal hin und her schwingendes Licht. Durch einen Nicol kann also nur Licht hindurchgehen, welches in der Richtung des Hauptschnittes schwingt. Läßt man nun also natürliches Licht durch einen Nicol polarisieren, so daß polarisiertes Licht aus ihm heraustritt, und läßt man dieses Licht auf einen zweiten Nicol fallen, so können verschiedene Fälle eintreten. Wenn der Hauptschnitt des zweiten Nicols so gestellt ist, daß er dem des ersten parallel ist, so geht das Licht ohne weiteres auch durch den zweiten Nicol hindurch. Wenn aber der zweite Nicol so gestellt ist, daß sein Hauptschnitt senkrecht steht zu dem des ersten, wenn z. B. der erste Hauptschnitt vertikal, der zweite horizontal gestellt ist, so geht von dem auffallenden Licht nichts durch den zweiten hindurch. Sieht man also dann durch beide Nicols hindurch auf eine Lichtquelle, so er-

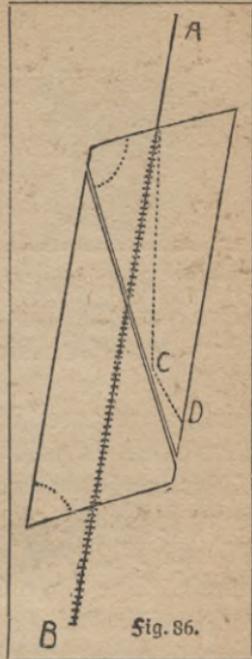


Fig. 86.



Fig. 87.

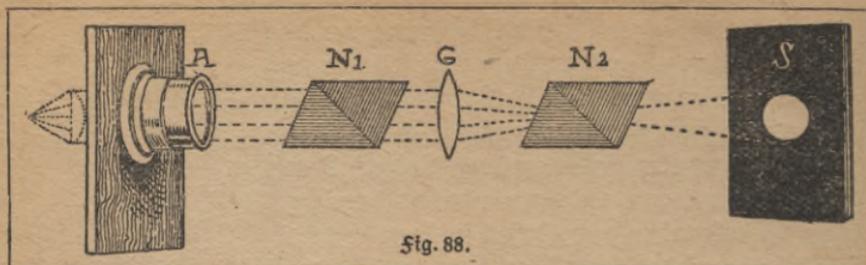


Fig. 88.

scheint diese dunkel. Man sagt im ersten Falle, die beiden Nicols seien parallel, im zweiten Falle, sie seien gekreuzt. Dreht man den einen der beiden Nicols von der Lage an, wo er dem anderen parallel ist, bis zu der gekreuzten Stellung, so wird das durch den zweiten Nicol hindurchgehende Licht immer schwächer und schwächer, bis es ganz verschwindet. Es geht nämlich dann nur ein Bruchteil des polarisierten Lichts durch den zweiten Nicol hindurch. Ich will Ihnen diese Erscheinungen zunächst experimentell zeigen. Ich habe hier zwei Nicols (Fig. 88)  $N_1$  und  $N_2$ , durch die ich das Licht der Bogenlampe auf den Schirm werfe. Eine Linse  $G$  macht das Bild scharf. (An den Fassungen der beiden Nicols habe ich je einen Pfeil in der Richtung der kurzen Diagonale angebracht, damit man sofort die Lage der Hauptschnitte erkennen kann.) Bei der parallelen Stellung des Nicols sehen Sie den hellen Kreis auf dem Schirm. Lasse ich den ersten Nicol  $N_1$  feststehen und drehe den zweiten, so wird das Bild dunkler und dunkler und jetzt ist es ganz verschwunden. Die Pfeile zeigen, daß die Hauptschnitte beider Nicols jetzt senkrecht zueinander stehen, die Nicols sind gekreuzt. Nun lasse ich den zweiten Nicol feststehen und drehe den ersten in dem einen oder anderen Sinne, das Bild erhellt sich wieder, und wenn die Nicols wieder parallel sind, ist die volle Helligkeit wieder da.

Der erste Nicol dient uns also dazu, das natürliche Licht zu polarisieren, er ist der Polarisator; der zweite dient uns dazu, die Polarisation des Lichtes zu erkennen, er ist der Analysator.

Daß in einer Zwischenstellung der beiden Nicols zwischen der parallelen und der gekreuzten das Licht noch durch den zweiten hindurchgeht, aber geschwächt, beruht auf einer Eigenschaft der Schwingungen, die sehr wichtig ist, und die ich Ihnen näher erläutern muß. Wenn ich ein Pendel aufhänge, wie in Fig. 89, und die Kugel in der Richtung  $ab$  stoße, so beschreibt sie den Weg  $ab$  hin und her. Halte ich sie an und stoße sie in der Richtung  $cd$ , die senkrecht zu der vorher-



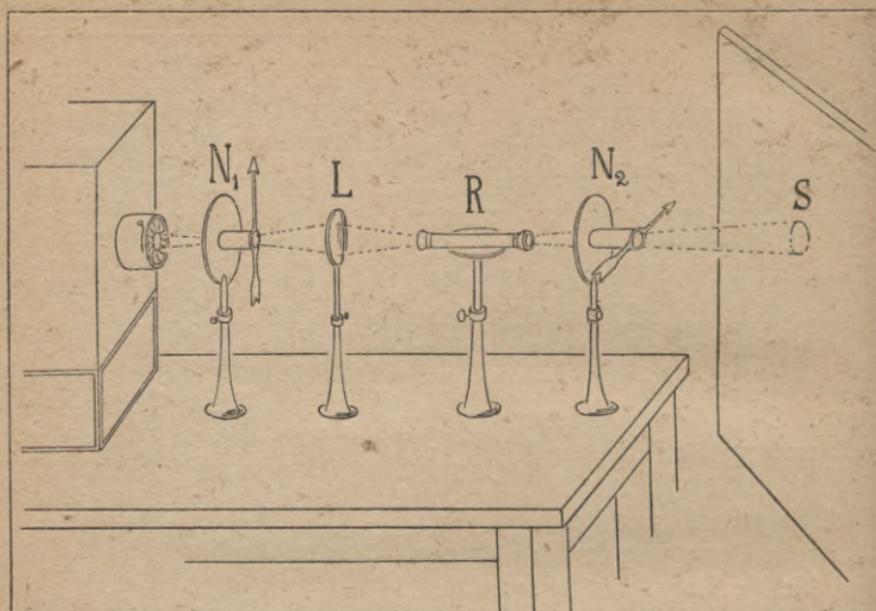


Fig. 91.

rade in der Richtung  $II$ , geht also durch den zweiten Nicol. Als Resultat finden wir, was wir oben schon im Experiment bestätigt gefunden haben, daß ein Teil, aber nur ein Teil des Lichtes, welches nach  $Of$  schwingt, durch den zweiten Nicol hindurchgeht, daß also bei schiefer Stellung des Nicols das durchgehende Licht geschwächt erscheinen muß.

Es könnte Ihnen vielleicht scheinen, als ob diese ganze Frage der Polarisation des Lichtes außer dem theoretischen Interesse, das sie besitzt, um eben die Transversalität des Lichtes zu beweisen, wenig Bedeutung habe. In der Natur spielt das polarisierte Licht, obwohl es vorhanden ist — denn das reflektierte Licht ist fast stets polarisiert —, offenbar keine besondere Rolle, da wir nichts von ihm merken, wenn wir nicht einen besonderen Analysator anwenden. Und doch können wir bald an einer Erscheinung, die das polarisierte Licht bietet, auch seine praktische Bedeutung erkennen. Ich bringe (Fig. 91) wieder meinen ersten Nicol vor die Lampe, polarisiere das Licht also, und zwar will ich den Hauptschnitt vertikal stellen, so daß das durchgegangene Licht vertikal auf und nieder schwingt. Durch eine Linse entwerfe ich ein scharfes Bild des Loches vor meiner Lampe auf den Schirm, lasse aber die Lichtstrahlen dann durch den zweiten Nicol  $N_2$  gehen. Wenn ich diesen gekreuzt zum ersten stelle, so geht durch ihn nichts

von dem polarisierten Licht hindurch. In der That bringen wir auf dem Schirm durch Drehen des zweiten Nicols in die gekreuzte Lage den vorher hellen Kreis zum Verschwinden. Ich bringe ein Glas zwischen die beiden Nicols, das Feld bleibt dunkel. Ich habe hier Röhren, die mit Glasplatten verschlossen sind (Fig. 92). Diese Röhren sind mit Wasser, mit Alkohol, mit Chloroform, mit Benzol gefüllt. Wenn ich sie einzeln dazwischenstelle, so bleibt das Feld immer dunkel.

Hier aber habe ich eine ebensolche Röhre, die mit einer Auflösung von gewöhnlichem Zucker in Wasser gefüllt ist. Ich setze sie (R) zwischen die gekreuzten Nicols  $N_1$  und  $N_2$  (Fig. 91), und zu unserer Überraschung sehen wir, daß das Bild auf dem Schirm sich aufhellt. Es geht also jetzt Licht durch den zweiten Nicol hindurch. Wie ist das möglich? Offenbar nur dadurch, daß das Licht, welches durch die Zuckerlösung gegangen ist, nicht mehr vertikal auf und ab schwingt, also senkrecht zum Analysator,

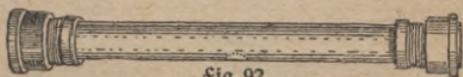


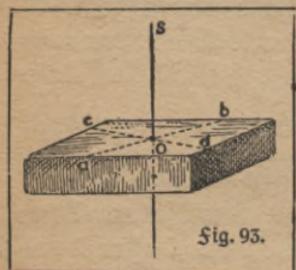
Fig. 92.

sondern in anderer Richtung, schief gegen den Analysator. Denn in diesem Fall geht ja, wie wir wissen, ein Teil des Lichtes durch den zweiten Nicol. Also muß die Zuckerlösung die Eigenschaft haben, die Ebene, in welcher die Schwingungen des Lichtes stattfinden, zu drehen. Wenn das aber wahr ist, daß das Licht, aus der Zuckerlösung herauskommend, in anderer Richtung schwingt als beim Eintritt, also mit dem Hauptschnitt des zweiten Nicols nicht mehr einen rechten, sondern einen anderen Winkel bildet, so muß es offenbar möglich sein, durch Drehen des zweiten Nicols jetzt wieder Dunkelheit hervorzu bringen. Machen wir diesen Versuch! Ich drehe den zweiten Nicol etwas herum, und in der That verschwindet das Bild, das Feld wird wieder dunkel. Also ist hiermit eine Eigenschaft der Zuckerlösung nachgewiesen, nämlich die Eigenschaft, die Schwingungsrichtung zu drehen, oder wie man es wissenschaftlich nennt, die Polarisationssebene zu drehen.

Es ist betrübend, es zu gestehen, aber es muß gesagt werden, daß von dieser scheinbar so weit von aller Praxis abliegenden Tatsache die einzelnen Staaten eine Anwendung gemacht haben, die dazu dient, um möglichst viel Steuern zu erzielen. Nämlich diese Drehung, die wir durch den zweiten Nicol messen können, indem wir den Winkel bestimmen, um den er aus der gekreuzten Lage herausgedreht werden muß, bis er wieder das Licht auslöscht, diese Drehung ist um so größer, bei gleicher Länge der Röhre, je größer der Zuckergehalt der Lösung ist. Für jedes Gramm Zucker in 100 ccm Lösung dreht eine solche

Röhre von 20 cm Länge, wenn sie mit der Lösung gefüllt ist, um etwa  $1\frac{1}{3}^{\circ}$ . Man kann also auch umgekehrt aus der Größe der Drehung den Gehalt der Lösung an Zucker bestimmen, und da der Staat den Zucker besteuert, so benützt er diese Eigenschaft, um die Menge von Zucker genau zu bestimmen, die in zuckerhaltigen Lösungen enthalten ist. Die Wissenschaft der Optik ist damit also in den Dienst der Zöllner gestellt und beweist so auch dem interesselosesten Banaußen, daß sie zu etwas gut ist.

Wir hatten bisher immer von dem Kalkspat allein gesprochen und beobachtet, daß er einen eintretenden natürlichen Lichtstrahl in zwei



polarisierte zerlegt, die verschieden stark gebrochen werden. Diese Eigenschaft besitzt aber nicht der Kalkspat allein, sondern es besitzen sie, wie erwähnt, die allermeisten Kristalle, nämlich alle Kristalle, die nicht zu dem sogenannten regulären System gehören. Der Kalkspat besitzt sie nur in höherem Grade als die meisten anderen Kristalle. Das eigentliche Wesen, der Charakter eines Kristalls, besteht ja darin, daß für ihn nicht alle Richtungen gleichwertig sind, sondern daß in ihm gewisse Richtungen vor anderen bevorzugt sind. Tritt nun ein natürlicher Lichtstrahl in irgendeiner Richtung in den Kristall ein, so findet er immer zwei bestimmte Richtungen im Kristall, die von der Struktur, von der Natur des Kristalls abhängen, nach denen das Licht im Kristall allein schwingen kann. Von dem eintretenden natürlichen Licht werden daher alle Schwingungen in die eine und die andere dieser beiden ausgezeichneten Richtungen zerlegt, im Kristall pflanzen sich zwei Strahlen fort, die polarisiert, und zwar senkrecht zueinander polarisiert sind. Diese beiden Strahlen erleiden verschiedene Brechung, ihre Geschwindigkeit und daher ihre Wellenlänge ist verschieden, ganz so, wie es beim Kalkspat der Fall ist.

Daraus erklären sich nun eine Reihe von interessanten Erscheinungen ganz leicht, welche man beobachtet, wenn man dünne Kristallplatten zwischen zwei Nicols bringt. Am besten eignen sich dazu Blättchen aus Gipskristallen, weil man diese leicht durch Spalten beliebig dünn erhalten kann. Ein solches Blättchen sei durch Fig. 93 in der Dicke stark vergrößert dargestellt. Für einen Lichtstrahl  $SO$ , der senkrecht auf das Blättchen fällt, seien  $ab$  und  $cd$  die beiden ausgezeichneten Richtungen im Kristall, nach denen nur die Lichtschwingungen geschehen können.



Wenn nun unsere beiden Nicols parallel stehen, und zwar so, daß das polarisierte Licht, das der erste liefert, etwa längs  $ab$  schwingt, so sieht man, daß dieses Licht einfach durch den Kristall und den zweiten Nicol hindurchgeht und zu keiner besonderen Erscheinung Veranlassung gibt. Durch den Kristall treten dann eben auch nur Strahlen, die parallel schwingen, hindurch, und sie gehen durch den zweiten parallelen

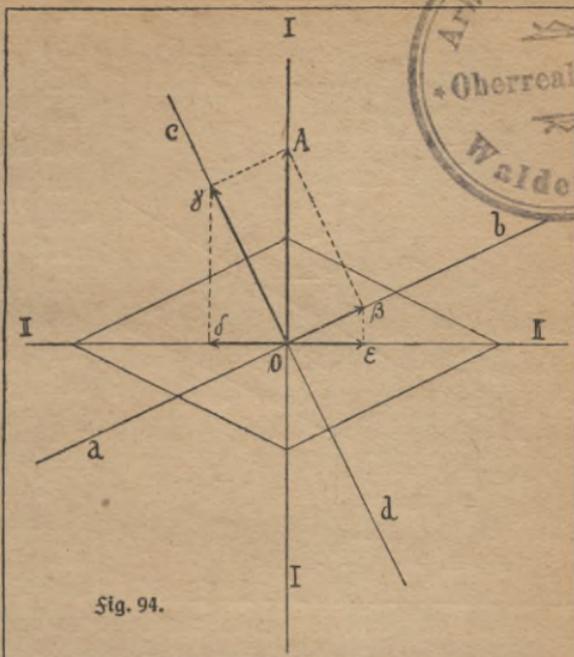


Fig. 94.

Nicol ohne weiteres hindurch. Dasselbe tritt ein, wenn die Nicols parallel zu  $cd$  stehen. Steht der erste parallel zu  $ab$ , der zweite parallel zu  $cd$ , also senkrecht zum ersten, so geht zwar das Licht durch den Kristall hindurch, schwingt dort in der Richtung  $ab$ , aber von diesem Licht geht nichts durch den zweiten Nicol hindurch. Ganz anders aber wird es, wenn die Hauptschnitte der Nicols nicht mit  $ab$  oder  $cd$  zusammenfallen. Nehmen wir zuerst an, die beiden Nicols seien gekreuzt. Fig. 94 möge durch  $I$  die Stellung des Hauptschnittes des ersten Nicols darstellen,  $II$  sei die des zweiten Nicols,  $ab$  und  $cd$  seien wieder die ausgezeichneten Richtungen in der Gipsplatte. Aus dem ersten Nicol kommt eine Lichtbewegung an den Kristall, die durch  $OA$  dargestellt sei. Diese muß sich in zwei zerlegen, eine  $O\beta$  längs  $ab$ , die andere  $O\gamma$  längs  $cd$ . Diese beiden treten aus dem Kristall aus. Durch den zweiten Nicol  $II$  gehen aber nur Bewegungen in der Richtung von  $II$ . Die erste Bewegung  $O\beta$  schießt daher die Bewegung  $O\epsilon$ , die zweite  $O\gamma$  schießt  $O\delta$  durch den zweiten Nicol. Diese beiden Bewegungen von  $O$  nach  $\delta$  und  $O$  nach  $\epsilon$  sind aber, wie man sieht, entgegengesetzt gerichtet. Sie haben zugleich den Kristall mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchlaufen, also müssen sie interferieren. Sie werden sich dann ganz aufheben,

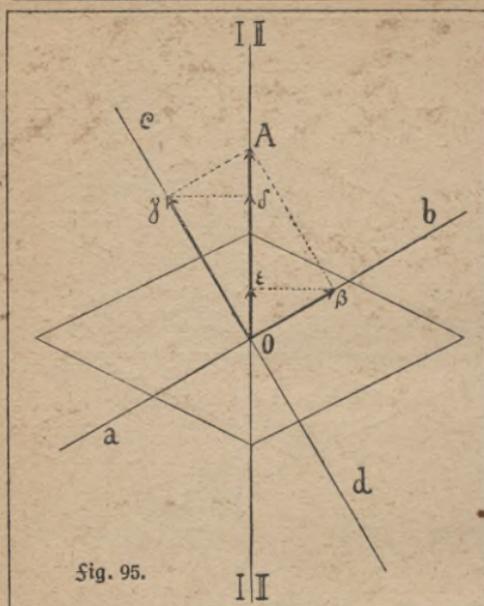


Fig. 95.

wenn ihr Gangunterschied eine halbe Wellenlänge beträgt. Je nach der Dicke des Kristalls wird das für verschiedene Farben der Fall sein. Diese Farben werden also, wenn das einfallende Licht weiß war, im durchgelassenen Licht fehlen. Die übrigen Farben werden je nach ihrer Wellenlänge in verschiedenen Proportionen im durchgelassenen Licht enthalten sein, also muß das hindurchgelassene Licht gefärbt erscheinen. Eine solche Kristallplatte, zwischen gekreuzte Nicols gestellt, bewirkt also, daß Licht durch sie hindurch-

geht, und erscheint je nach ihrer Dicke in bestimmter Weise gefärbt.

Untersuchen wir gleich, was geschieht, wenn die beiden Nicols parallel sind. Fig. 95 zeigt wieder das einfallende Licht  $OA$ , aus dem im Kristall  $O\beta$  und  $O\gamma$  werden. Durch den zweiten Nicol, der jetzt dem ersten parallel ist, gehen nur diejenigen Teile von  $O\beta$  und  $O\gamma$  hindurch, die in seiner Richtung schwingen, d. h. von  $O\gamma$  geht der Teil  $O\delta$ , von  $O\beta$  der Teil  $O\epsilon$  durch den zweiten Nicol. Diese beiden Bewegungen  $O\epsilon$  und  $O\delta$  gehen aber nach derselben Seite, sie verstärken sich also, sie addieren sich, während sie sich im vorhergehenden Falle subtrahiert, geschwächt haben. Diejenigen Farben also, die sich im früheren Falle vernichtet haben, werden jetzt am stärksten erscheinen, und umgekehrt. Also muß das Licht, das durch die Nicols hindurchgeht, jetzt die Komplen-

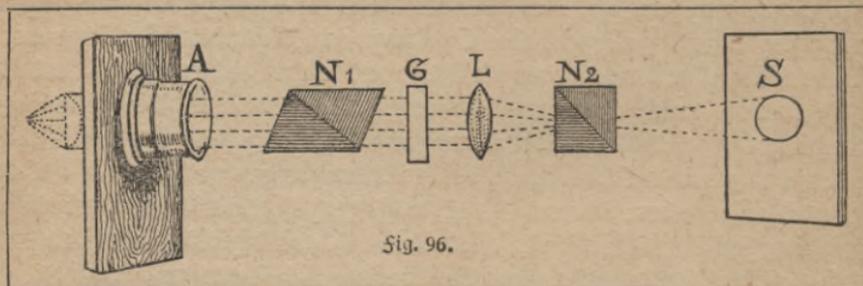


Fig. 96.

tärfarbe haben von der im früheren Falle.

Beobachten wir nun, ob unsere Folgerungen zutreffen. Ich habe hier ein Gipsblättchen von einer bestimmten Dicke. Ich stelle meine Nicols  $N_1$  und  $N_2$  (Fig. 96) so auf, daß der Hauptschnitt des ersten



Fig. 97.



Fig. 98.

vertikal, der des zweiten horizontal ist, bringe das Gipsblättchen  $G$  in seiner Fassung dazwischen und projiziere durch eine Linse  $L$  das Bild dieses Gipsblättchens auf den Schirm. Sie sehen, daß der helle Kreis, der das Bild unseres Gipsblättchens gibt, kräftig blau gefärbt ist. Ich drehe den Nicol  $N_2$  aus der gekreuzten Stellung in die parallele, das Bild wird blasser blau, wird bei einer bestimmten Stellung weiß und geht dann über in Orange, welches immer mehr gesättigt wird, bis ich in die parallele Lage gelangt bin. Ich kann dieselbe Farbenänderung erreichen, wenn ich den vorderen Nicol  $N_1$  drehe oder wenn ich das Gipsblättchen selbst drehe. Denn jedesmal ändere ich dadurch die Lage der Schwingungsrichtungen im Gips zu der in den Nicols. Ein anderes Gipsblättchen von anderer Dicke gibt mir statt Blau und Orange vielmehr Grün und Rot, ein drittes Dunkelblau und Gelb, ein viertes Violett und Gelbgrün. Ich habe hier einen Stern (Fig. 97), der aus sechs Gipsblättern verschiedener Dicke zusammengesetzt ist. Ich bekomme eine Anzahl von Farben zu gleicher Zeit, Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Violett, von oben rechts angefangen. Durch Drehen des Nicols erlangen sie ihre Komplementärfarben. Hier ist weiter (Fig. 98) eine hübsche Spielerei: ein Stiefmütterchen aus Gipsblättchen verschiedener Dicke kunstvoll zusammengesetzt. Die Blätter erscheinen rot, der Kelch ist gelb. Durch Drehen des einen Nicols kann ich aber sofort die Blätter grün, den Kelch blau machen. Sie sehen, unser polarisiertes Licht kann mit Leichtigkeit in sezeffionistischer Manier malen.

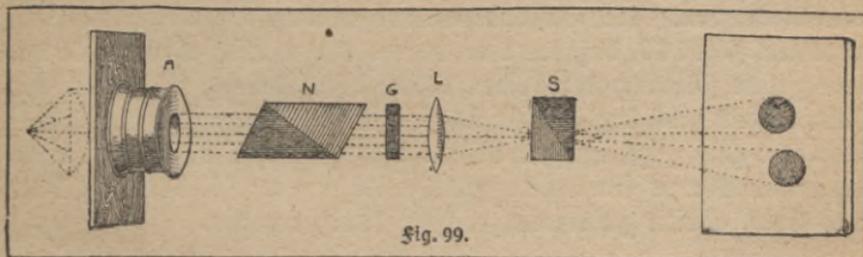


Fig. 99.

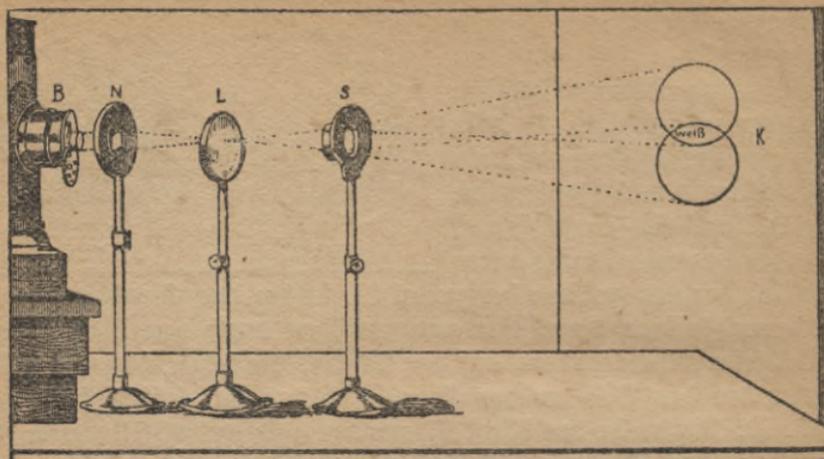


Fig. 100.

Wenn ich statt des zweiten Nicols  $N_2$  in Fig. 96 einen gewöhnlichen Kalkspatkrystall anwende, durch welchen beide Strahlen hindurchgehen, so kann ich die beiden komplementär gefärbten Bilder gleichzeitig erscheinen lassen. Diese Anordnung ist in Fig. 99 gezeichnet, in welcher das Licht der Bogenlampe durch den Nicol  $N$  polarisiert wird und dann durch das Gipsblättchen  $G$  hindurchgeht. Mittels der Linse  $L$  erzeuge ich ein helles Bild der Lampenöffnung auf dem Schirme. Bringe ich aber in die engste Stelle des konvergenten Lichtbündels jetzt einen Kalkspat  $S$ , so sehen Sie die zwei komplementär gefärbten Bilder. Der Kalkspat gibt mir ja zwei Strahlen, die senkrecht zueinander polarisiert sind. Er entspricht also zwei Nicols nebeneinander, von denen der eine parallel, der andere senkrecht zum ersten steht. Infolgedessen sind die beiden durch ihn hindurchgehenden Bilder komplementär gefärbt.

Indem ich einen anderen Kalkspat an die Stelle von  $N$  bringe, der die beiden Bilder nicht so stark getrennt erzeugt, kann ich bewirken, daß die beiden komplementär gefärbten Bilder sich zum Teil übereinanderlagern. Die Mischfarbe muß dann Weiß ergeben, und Sie beobachten, Fig. 100, daß das eine Gipsblättchen, welches eine rote und eine grüne Färbung der beiden Bilder hervorbringt, im Schnitt der beiden Weiß gibt, und daß ein anderes Gipsblättchen, das die Farben blau und gelb zeigt, auch im Schnitt Weiß gibt. Wir haben hier einen indirekten Beweis für unsere frühere Behauptung (S. 34), daß Blau und Gelb, additiv zusammengemischt, Weiß ergeben.

Es ist nicht meine Absicht, Ihnen weitere Erscheinungen vorzuführen, die sich noch in der mannigfaltigsten Art finden, wenn man polarisiertes Licht durch Kristalle gehen läßt. Die Anwendung des polarisierten Lichtes hat auf die Lehre von den Kristallen, auf die Kristallographie, unendlich befruchtend eingewirkt, und auch die Optik hat in Rückwirkung wiederum von der Kristallographie große Förderung erhalten. Aber es scheint mir, daß diese Erscheinungen, so interessant und so schön sie sind, und so sehr sie als ein Triumph der Wellentheorie anzusehen sind, da sie sich aus ihr bis in ihre feinsten Einzelheiten erklären lassen, doch zu speziell für unsere Zwecke sind.

Was ich vielmehr am Schlusse dieser Vorlesungen noch besprechen möchte, bezieht sich im Gegenteil auf die allgemeinen großen Fragen, zu denen die Theorie der Lichtwellen uns angeregt hat. Wir waren gezwungen, anzunehmen, daß die ganze Welt, soweit sie Licht durchläßt, also bis zu den fernsten Fixsternen, die wir sehen, erfüllt ist von dem feinen, für uns unsichtbaren, unwägbaren, unfühlbaren Stoff, dem Äther. Nicht bloß die sichtbaren Wellen des Lichtes sind Bewegungen dieses Äthers, sondern auch die unsichtbaren Wellen der ultraroten und ultravioletten Strahlung. Aber sollte dieser Äther wirklich keine anderen Wellen zeigen, als diese so winzig kleinen? Sollte dies die einzige Art und Weise sein, wie er sich bewegen kann? Das wäre gerade so, wie wenn wir glauben wollten, daß der Ozean nur immer und allein die ganz kleinen Kräuselungen seiner Oberfläche zeigen müßte, die er bei vollständiger Windstille zeigt, während wir doch wissen, daß er für gewöhnlich große meterlange Wellen enthält, und während wir doch oft zu unserem Schrecken erfahren, daß er noch in ganz andere turbulenter Bewegungen versetzt werden kann. Wenn wir die Mittel hätten, den Äther in schwingende Bewegung zu versetzen, von größerer Periode, als es die Natur im Lichte tut, so müßten wir in ihm auch Wellen von ganz anderen Längen, meterlange, kilometerlange finden und nachweisen können.

Und das können wir wirklich. Wir können den Äther außer durch Licht und Wärme auch durch Elektrizität in Bewegung, und zwar in schwingende Bewegung versetzen. Erst allmählich ist man darauf gekommen, aber jetzt wissen wir, daß, wenn wir einen elektrischen Funken erzeugen, dann immer von diesem aus Wellen durch den Äther sich fortpflanzen. Diese Wellen, die elektrischen Wellen, sind von genau derselben Art wie die Lichtwellen, sie enthalten transversale

Schwingungen wie diese, und sie pflanzen sich mit genau derselben großen Geschwindigkeit von 300 000 km pro Sekunde durch den Äther fort. Sie werden von Metallblechen ebenso reflektiert wie die Lichtwellen von Spiegeln, sie werden in Prismen gebrochen, sie zeigen Beugungserscheinungen und Polarisationserscheinungen ganz wie die Lichtquellen. Nur sind sie von viel größerer Wellenlänge als diese. Während Heinrich Herz, der diese Wellen entdeckte, zuerst solche von 300 bis 30 cm Länge erzeugte, werden heute in der Praxis der drahtlosen Telegraphie, die ja auf der Anwendung dieser Wellen beruht, solche von 1000, 2000, ja bis 10 000 m Länge täglich angewendet. Und andererseits ist es gelungen, elektrische Wellen von solcher Schwingungszahl zu erzeugen, daß sie nur 6 mm Wellenlänge besitzen, sich also schon sehr den äußersten ultraroten Wellen nähern.

Diese in den letzten zwanzig Jahren aufgefundenen Tatsachen enthalten nun aber, wie Sie leicht erkennen, eine großartige Erweiterung unserer bisherigen Einsichten, sie machen das Bild, das wir uns von der Natur ausmalen, weit reicher, farbiger und umfassender. Wir sehen jetzt nicht mehr bloß die winzigen Wellen im Äther verlaufen, die auf unser Auge wirken, oder die auf unsere feinen Thermometer oder auf unsere photographischen Platten Einfluß haben, sondern wir sehen, daß der Äther von Wellen aller Art durchzogen ist, daß er ein wahres unsichtbares Weltmeer, einen Ozean bildet, in dem wir leben, und von dem alles, was wir beobachten können, umspült wird. Der Äther verdient den Namen eines wahren Weltmeeres eher als unsere irdischen Gewässer, da er in Wirklichkeit Welten miteinander verbindet. In diesem Meer von unermesslicher Ausdehnung erscheinen wir als ein Punkt, als ein einziges, unbedeutendes Etwas. Wir sind dem Äthermeer gegenüber noch winziger als die Kinder dem Ozean gegenüber, an dessen Strände sie spielen. Aber gerade deswegen können wir uns doch mit um so größerem Stolz sagen, daß wir trotz unserer unscheinbaren Stellung in der Natur bereits verstanden haben, einen Teil des dichten Schleiers zu lüften, in dem sie uns zuerst erscheint, daß wir schon imstande sind, diesen großen Ozean in mancher Hinsicht zu beherrschen und zu bemeistern, und daß, was mehr gilt als die Herrschaft und was die Herrschaft erst ermöglicht, wir doch schon recht weit dringende Einsichten in die großen Geheimnisse der allumfassenden Mutter Natur gewonnen haben.

## Register.

- Absorption 38. 46. 82. 86. 91.  
Absorptionspektren 38 f.  
Additive Farbenwirkung 39 f. 104 f.  
Amplitude 59.  
Analytator 117.  
Bartholinus 106. 114.  
Beugungsercheinungen 73 ff.  
Beugungsgitter 77.  
Bogenlampe 2.  
Brechung 17 ff. 84.  
Brechungsindex 19.  
Brennlinie 14.  
Brennpunkt 24. 84.  
Brennweite 24.  
Bunsen 45.  
Camera obscura 7.  
Chemische Wirkung d. Lichts 86 f.  
Descartes 18.  
Dicke Blättchen 69 f.  
Diffraction 73 ff.  
Diffuse Zurückwerfung 15 f.  
Dispersion 28.  
Drehung der Polarisationsebene 121.  
Dreifarbenphotographie 104 f.  
Dünne Blättchen 50 ff. 68.  
Elektrischer Funke 127.  
Elektrische Wellen 127.  
Emissionspektren 43 f.  
Entwickler, photographische 97.  
Farben 28 ff.  
Farben dünner Blättchen 50 ff. 68.  
Farbenfilter 104.  
Farbenglas, Newtonsches 50.  
Farbenmischung 36. 37 f.  
Farbenmischungsapparat 37.  
Farbenphotographie 102. 104 ff.  
Farben von Gipsblättchen 123 ff.  
Filme 97.  
Flammen, farbige 40 ff.  
Fluoreszenz 89 ff.  
Fluoreszenzschirme 92.  
Sortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts 58 f.  
Fraunhofersche Beugungsercheinungen 77.  
Fraunhofersche Linien 45.  
Fresnel 63 f. 73.  
Gangunterschied 60.  
Geradlinige Ausbreitung des Lichts 5 f. 8. 80.  
Gitter 77.  
Gitterspektrum 78.  
Goethe 26.  
Halbschatten 8.  
Helium 47.  
Herschel, William 82.  
Homogenes Licht 43.  
Hüngens 52.  
Interferenz 53 f. 61 f.  
Irisblende 4.  
Kamera, photographische 98.  
Katakastik 14.  
Kernschatten 8.  
Kirchhoff 45.  
Körperfarben 35.  
Komplementäre Farben 23 ff.  
Lachkabinette 12.  
Lichtäther 67. 127 f.

- Linsen 22 ff.  
 Lippmannsche Farbenphotographie 102 f.  
 Lochkamera 7.  
 Longitudinale Wellen 108.  
 Lumière'sche Farbenphotographie 104 f.  
 Malus 110 f.  
 Newton 26. 29 ff. 48.  
 Newtonsches Farbenglas 50.  
 Nicol 116.  
 Normales Spektrum 79.  
 Paralleles Licht 3.  
 Periode 55.  
 Phosphoreszenz 94 f.  
 Photographie 86. 96 ff.  
 Polarisation 113 ff.  
 Polarisator 117.  
 Prismen 27 f.  
 Purpur 39 f.  
 Reelle Bilder 13. 23 f.  
 Reflexion 9. 84. 112 ff.  
 Römer, Olaf 58.  
 Sammellinsen 23.  
 Schatten 8.  
 Schwingungszahl 57.  
 Seifenblasen 48 ff. 71.  
 Snellius 18.  
 Sonnenspektrum 44 f.  
 Spalt 4.  
 Spektralanalyse 44.  
 Spektrum 28 f.  
 Spiegel 9 ff.  
 Stehende Wellen 101.  
 Subtraktion von Farben 40.  
 Subtraktive Farbmischung 36.  
 Totale Reflexion 20.  
 Transversale Wellen 108.  
 Trockenplatten 87. 97.  
 Ultrarote Strahlen 83 f.  
 Ultraviolette Strahlen 88 f. 93 f.  
 Umkehrung der Natriumlinie 45 f.  
 Uviolgläser 93.  
 U.V.-Filter 94.  
 Virtuelle Bilder 12. 13.  
 Wärmewirkung des Lichts 82 f.  
 Weißes Licht 27. 28 ff. 35.  
 Wellen 53 ff.  
 Wellenlänge 55. 63. 65. 79.  
 Young, Thomas 62.  
 Zerstreuungslinsen 23.  
 Zurückwerfung 9. 84. 112 ff.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA  
KRAKÓW

## Die angegebenen Preise

sind Grundpreise, die gegenwärtig (Oktober 1922), den jetzigen Herstellungs- und allgemeinen Unkosten entsprechend, mit der Teuerungsziffer 80 (für Schulbücher, mit \* bezeichnet, mit 50) zu vervielfältigen sind.

**Sichtbare und unsichtbare Strahlen.** Von Dr. *R. Börnstein*, weil. Prof. an der Technischen Hochschule Berlin. 3., Neubearb. Aufl. von Dr. *E. Regener*, Prof. an der Technischen Hochschule Stuttgart. Mit 71 Abb. im Text. [130 S.] 8. 1920. (ANUG Bd. 64.) Kart. M. 1.20, geb. M. 1.60

Behandelt nach einer einführenden Schilderung des Wesens der Wasser-, Luft-, Schall- und Lichtwellen die verschiedenen Arten der unsichtbaren Strahlen, vor allem die elektromagnetischen Schwingungen der drahtlosen Telegraphie wie die Kathoden- und Röntgenstrahlen.

**Vorlesungen über die Theorie des Lichtes.** Unter Rücksicht auf die elastische und die elektromagnetische Anschauung. Von Geh. Reg.-Rat Dr. *P. Volkmann*, Prof. an der Universität Königsberg i. Pr. [XV u. 432 S.] gr. 8. 1891. Geh. M. 11.20

Das Ziel der Vorlesungen ist, mit Hilfe der allgemein anerkannten Gesetze der Elastizität, der Elektrizität und des Magnetismus ohne weitere Hilfsannahmen eine Optik auf dem Boden der reinen Mechanik, soweit es angeht, zu entwickeln. Besonderer Wert ist auf eine übersichtliche Anordnung und Entwicklung des Stoffes gelegt, bei welcher zugleich die wesentlichen Fundamente der Theorie gesondert und deutlich hervortreten.

**Vorlesungen über Molekulardynamik und die Theorie des Lichts.** Von *Lord Kelvin*. Deutsch hrsg. von Geh. Reg.-Rat Dr. *M. B. Weinstein*, weil. Prof. an der Univ. Berlin. [XVIII u. 590 S.] gr. 8. 1909. Geb. M. 18.—

„Bewundernswert ist vor allem, wie er auch bei den schwierigsten Problemen, die uns dieses grundlegende Kapitel der Physik bietet, mit großer Klarheit die Vorgänge darzustellen vermag, bewundernswert auch die Leichtigkeit, mit der er die schwere mathematische Rüstung zu handhaben versteht.“

(Literarisches Zentralblatt.)

**Einführung in die theoretische Optik.** Von *A. Schuster*, Ph. D. (Heidelberg) S. C. D. (Cantab.), F. R. S., Prof. an der Univers. Manchester. Autorisierte deutsche Ausgabe übersetzt von Dr. *H. Koenen*, Prof. an der Univers. Bonn. Mit 185 Fig. im Text und 2 Taf. [XIV u. 413 S.] gr. 8. 1907. Geh. M. 12.—, geb. M. 13.—

Die deutsche Ausgabe des Schusterschen Lehrbuches will dem Anfänger ein Werk zugänglich machen, das sich durch Reichhaltigkeit bei einfacher und klarer Behandlung sowie durch scharfe und kritische Fassung der Begriffe auszeichnet.

**Lehrbuch der geometrischen Optik.** Von Geh. Reg.-Rat Dr. *A. Gleichen*, Berlin. Mit 251 Fig. im Text. [XIV u. 511 S.] gr. 8. 1902. (Teubn. Lehrb. d. mathem. Wiss. Bd. VIII.) Geb. M. 20.—

Um das Eindringen in die geometrisch-optischen Theorien zu erleichtern, geht Verf. vom Spezialfall aus, der möglichst anschaulich entwickelt wird, und schreitet dann zu den schwierigeren und allgemeineren Problemen fort. Dadurch wird das Buch den Anforderungen der reinen Theorie und den Bedürfnissen der optischen Praxis in gleicher Weise gerecht.

**Die optischen Instrumente.** (Lupe, Mikroskop, Fernrohr, photogr. Objektiv und ihnen verwandte Instrumente.) Von Dr. *M. v. Rohr*, Prof. an der Univ. Jena. 3., verm. u. verb. Aufl. Mit 89 Abb. im Text. [VI u. 137 S.] 8. 1918. (ANUG Bd. 88.) Kart. M. 1.20, geb. M. 1.60

„In ausgezeichnete Weise hat es der Verfasser verstanden, in die Grundbegriffe der Optik gemeinverständlich einzuführen.“

(Das Weltall.)

**Die Photographie, ihre wissenschaftlichen Grundlagen und ihre Anwendung.** Von Dipl.-Ing. Dir. Dr. *O. Prelinger*, Berlin-Steglitz. 2., verb. Aufl. Mit 64 Abb. i. Text. [120 S.] 8. 1919. (ANUG Bd. 414.) Kart. M. 1.20, geb. M. 1.60

Behandelt die wissenschaftlichen Grundlagen der Photographie wie die Eigenschaften der Objektive, die Herstellung der Platten, ihre Belichtung, Entwicklung und Fixierung sowie die der Erzeugung des positiven Bildes dienenden Verfahren mit Einschluß der Farbenphotographie.

Verlag von B.-G. Teubner in Leipzig und Berlin

Anfragen ist Rückporto beizufügen

sind Grundpreise, die gegenwärtig (Oktober 1922), den jetzigen Herstellungs- und allgemeinen Unkosten entsprechend, mit der Teuerungsziffer 80 (für Schulbücher mit \* bezeichnet 50) zu vervielfältigten sind.

**Physikalisches Wörterbuch.** Von Dr. *G. Berndt*, Prof. an der Techn. Hochschule Berlin. Mit 81 Fig. im Text. [IV u. 200 S.] 8. 1920. (Teubners kleine Fachwörterb., Bd. 5.) Geb. M. 6.—

Will schnell und treffend, ohne größere Vorkenntnisse vorauszusetzen, über alle wichtigeren physikalischen Erscheinungen und Begriffe unterrichten. Besonders berücksichtigt sind die Anwendungen der Physik im täglichen Leben und in der Technik.

**Lehrbuch d. Physikz.** Gebr. b. Unterr. bei akad. Vorles. u. z. Selbststud. I. 2 Bd. V. Prof. *E. Grimsehl*, weil. Dir. a. d. Oberrealsch. a. d. Uhlenhorst Hamburg. I. Bd. Mechanik, Wärmelehre, Akustik u. Optik. 6., verm. u. verb. Aufl. Hrsg. von Prof. Dr. *W. Hillers*, Studienr. am Realgymn. zu Hamburg, unter Mitarbeit v. Dr. *H. Starke*, Prof. a. d. Techn. Hochsch. Aachen. Mit 1049 Fig. i. T., 10 Fig. auf 2 farb. Tafeln u. 1 Titelbild. [U. d. Pr. 1922.] II. Bd. Magnetismus und Elektrizität. 5. Aufl. Hrsg. von Prof. Dr. *W. Hillers*, unter Mitarbeit von Prof. Dr. *H. Starke*. [Unter der Presse 1922.]

„Jede Seite des Werkes legt Zeugnis ab für die wunderbar klare und eindringliche Gestaltungskraft des Verfassers. Ausgezeichnete Abbildungen und treffend gewählte Beispiele erleichtern überall das Verständnis. Wer das Werk einmal in die Hand genommen hat, wird es nicht mehr missen wollen. In keiner naturwissenschaftlichen Bücherei sollte dieses ausgezeichnete Lehrbuch fehlen.“  
(Deutsche opt. Wochenschrift.)

**Kleiner Leitfaden der praktischen Physik.** Von Prof. Dr. *F. Kohlrausch*, weil. Präsident d. physikal.-techn. Reichsanstalt zu Berlin. 4. Aufl. bearb. von Dr. *H. Scholl*, Prof. an der Univ. Leipzig. Mit 165 Abb. im Text. [X u. 320 S.] gr. 8. 1921. Geh. M. 12.—, geb. M. 14.—

Die neubearbeitete Auflage stellt eine erhebliche Erweiterung dar, da das Buch neben dem Universitätspraktikum auch dem späteren Beruf nutzbar gemacht wurde. So haben die physikalischen Apparate des ärztlichen Berufes und des Schulunterrichts weitgehendste Berücksichtigung gefunden. Die den Abschnitten vorangestellten Bemerkungen ergeben in ihrer Gesamtheit zugleich ein Repetitorium der Experimentalphysik.

**Große Physiker.** Bilder aus der Geschichte der Astronomie und Physik. Von Prof. Dr. *J. Keferstein*, Dir. vom Realgymnasium des Johanneums, Hamburg. Mit 12 Bildnissen auf Taf. [V u. 234 S.] gr. 8. 1911. (TNB. Bd. 4.) Geb. M. 5.60

„Der Verfasser versteht es, die Leistungen des einzelnen in ihrer kulturellen Bedeutung für ihr Zeitalter und die Wissenschaft zu erklären und ihre geschichtlichen Zusammenhänge mit der Vergangenheit darzustellen.“  
(Blätter für das bayer. Gymnasialschulwesen.)

**Repertorium der Physik.** Von Dr. *R. H. Weber*, weil. Prof. an der Universität Rostock, und Prof. Dr. *R. Gans*, Dir. d. physik. Instituts der Universität La Plata. I. Bd.: Mechanik und Wärme. I. Teil: Mechanik, Elastizität, Hydrodynamik und Akustik. Bearbeitet von Prof. Dr. *R. Gans* und Dr. *F. A. Schulze*, Prof. an der Universität Marburg. Mit 126 Fig. im Text. [XII u. 434 S.] gr. 8. 1915. Geh. M. 9.50, geb. M. 11.50. II. Teil: Kapillarität, Wärme, Wärmeleitung, kinetische Gastheorie und statistische Mechanik. Bearbeitet von Prof. Dr. *R. H. Weber* und Dr. *P. Hertz*, Prof. an der Universität Göttingen. Mit 72 Fig. im Text. [XIV u. 613 S.] gr. 8. 1916. Geh. M. 17.—, geb. M. 19.— II. Bd.: [In Vorb.]

Das Repertorium soll mehr bringen als die elementaren Lehrbücher, indem es neuere Untersuchungen teils behandelt, teils wenigstens erwähnt, damit gewissermaßen das Studium der Einzelwerke über besondere Gebiete der Physik vorbereitet und Auffinden und Verständniss der Originalarbeiten erleichtert werden.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Anfragen ist Rückporto beizufügen

... Eine glückliche Ergänzung der Sammlung  
„Aus Natur und Geisteswelt“... sind:

## Teubners Kleine Fachwörterbücher

Sie geben rasch und zuverlässig Auskunft auf jedem Spezialgebiete und lassen sich je nach den Interessen und den Mitteln des einzelnen nach und nach zu einer Enzyklopädie aller Wissenszweige erweitern.

„Teubners kleine Wörterbücher haben sich in kurzer Zeit bei Laien und Fachleuten den Ruf der Unentbehrlichkeit erworben. Die Bündigkeit und wissenschaftliche Sachlichkeit, mit der hier auf engem Raume eine Orientierung auf dem betreffenden Wissenschaftsgebiet geboten wird, ist erstaunlich.“  
(Monatshefte für deutschen Unterricht.)

Bisher erschienen:

**Philosophisches Wörterbuch** von Studentat Dr. P. Thormeyer.  
3. Aufl. (Bd. 4.) Geb. *R.M.* 4.—

**Psychologisches Wörterbuch** von Privatdozent Dr. J. Giese. 2. Aufl.  
Mit 60 Fig. (Bd. 7.) Geb. *R.M.* 4.80

**Wörterbuch zur deutschen Literatur** von Oberstudientat Dr. H. Köhl  
(Bd. 14.) Geb. *R.M.* 3.60

**Musikalisches Wörterbuch** von Prof. Dr. H. J. Moser. (Bd. 12.)  
Geb. *R.M.* 3.20

**Kunstgeschichtliches Wörterbuch** von Dr. H. Vollmer. (Bd. 13.)  
Geb. *R.M.* 7.50

**Physikalisches Wörterbuch** von Prof. Dr. G. Berndt. Mit 81 Fig.  
(Bd. 5.) Geb. *R.M.* 3.60

**Chemisches Wörterbuch** von Prof. Dr. H. Remß. Mit 15 Abb. u.  
5 Tabellen. (Bd. 10/11.) Geb. *R.M.* 10.60

**Geographisches Wörterbuch** von Prof. Dr. O. Kende. Allgemeine  
Erdkunde. 2., vielfach verb. Aufl. Mit 81 Abb. (Bd. 8.) Geb. *R.M.* 6.—

**Zoologisches Wörterbuch** von Dr. Th. Knottnerus-Meyer.  
(Bd. 2.) Geb. *R.M.* 4.—

**Botanisches Wörterbuch** von Prof. Dr. O. Gerke. Mit 103 Abb.  
(Bd. 1.) Geb. *R.M.* 4.—

**Wörterbuch der Warenkunde** von Prof. Dr. M. Pietsch. (Bd. 3.)  
Geb. *R.M.* 4.60

**Handelswörterbuch** von Handelschuldir. Dr. V. Sittel u. Justiz-  
rat Dr. M. Strauß. Zugleich fünfssprachiges Wörterbuch, zusammen-  
gestellt v. V. Armhaus, verpsl. Dolmetscher. (Bd. 9.) Geb. *R.M.* 4.60

## Der Gang der Kultur über die Erde

Von Prof. Dr. A. Hettner. 2., umg. u. erw. Aufl. Geh. *R.M.* 6.—, geb. *R.M.* 8.—

Der Verfasser legt in objektiver, induktiver Untersuchung den Gang der Kultur über die Erde dar, von den Problemen des Ursprungs und der Ausbreitung der Menschheit und der Entstehung der Rassen ausgehend bis zu der heute die ganze Erde umfassenden einheitlichen wirtschaftlichen und geistigen Kultur führend.

## Geopolitik

Die Lehre vom Staat als Lebewesen. Von Prof. Dr. R. Hennig.

Mit 64 Karten i. T. Geh. *R.M.* 14.—, geb. *R.M.* 16.—

Das Buch bietet eine klare und allgemeinverständliche Einführung in die Wissenschaft vom Staat als Lebewesen und zeigt die geographischen Grundlagen für das politische und wirtschaftliche Leben der Staaten und Völker auf. Es bietet eine wertvolle, ja unentbehrliche Ergänzung zu jeder Weltgeschichte.

## Allgemeine Wirtschafts- u. Verkehrsgeographie

Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. K. Sapper. 2. Aufl. Mit zahlr. kartogr. Darst.

Geb. ca. *R.M.* 18.—

## Der Weltluftverkehr

Seine Entwicklung, Geographie und wirtschaftliche Bedeutung

Von Dr. E. H. Pollog. Kart. *R.M.* 5.—

Das vorliegende Buch will in gemeinverständlicher Weise die geschichtlichen und geographischen sowie politischen und wirtschaftlichen Vorbedingungen des Weltluftverkehrs und seine Auswirkungen darlegen, ohne jedoch die rein technischen oder betriebswirtschaftlichen Streitfragen zu behandeln.

## Anthropologie

Unter Mitarbeit hervorragender Sachgelehrter hrsg. von Geh. Med.-Rat Prof. Dr. G. Schwalbe u. Prof. Dr. E. Fischer. Mit 29 Abb.-Taf. u. 98 Abb. i. T. (Die Kultur d. Gegenw., hrsg. v. Prof. Dr. P. Hinneberg.

Teil III, Abt. V.) *R.M.* 26.—, geb. *R.M.* 29.—, in Halbl. *R.M.* 34.—

Eine Gesamtdarstellung der Urgeschichte, Menschen- und Völkertunde.

## Grundriss der Astrophysik

Von Prof. Dr. K. Graff

Mit 468 Textabb. u. 6 Lichtdrucktaf. Geh. *R.M.* 42.60, geb. *R.M.* 45.—

Das Buch behandelt in seinen drei Hauptteilen die wissenschaftlichen Grundlagen der astrophysikalischen Forschung, die Weltkörper des Sonnensystems sowie die Fixsterne, Nebelflecke und Sternhaufen.

## Leubners Naturwissenschaftliche Bibliothek

Die Bände dieser vorzüglich geleiteten Sammlung stehen wissenschaftlich so hoch und sind in der Form so gepflegt und so ansprechend, daß sie mit zum Besten gerechnet werden dürfen, was in volkstümlicher Naturkunde veröffentlicht worden ist. (Natur.)

## Mathematisch-Physikalische Bibliothek

Hrsg. von W. Liehmann u. A. Witting. Jeder Band *R.M.* 1.20,

Doppelband *R.M.* 2.40

Jede d. einzelnen Darstellungen ist mustergültig i. ihrer Art u. vermag den Zweck voll zu erfüllen, in leichtverständlicher u. angenehmer Weise zur Vertiefung d. mathematischen Bildung beizutragen. Die Sammlung wird auf das allernachdrücklichste empfohlen. (Die Quelle.)

Verzeichnisse v. Leubn. Nat. Bibl. u. d. Math.-Phys. Bibl. v. Verlag, Leipzig C), Poststr. 3, erhältl.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

# Künstlerischer Wandschmuck für Haus und Schule

## Teubners Künstlersteinzeichnungen

Wohlfeile farbige Originalwerke erster deutscher Künstler fürs deutsche Haus. Die Samml. enthält jetzt über 200 Bilder in den Größen 100×70 cm (*R.M.* 10.-), 75×55 cm (*R.M.* 9.-), 103×41 cm bzw. 93×41 cm (*R.M.* 6.-), 60×50 cm (*R.M.* 8.-), 55×42 cm (*R.M.* 6.-), 41×30 cm (*R.M.* 4.-). Geschmackvolle Rahmung aus eigener Werkstätte.

**Kleine Kunstblätter.** 24×18 cm je *R.M.* 1.-. Liebermann, Im Park. Prenal. Am Wehr. Hecker, Unter der alten Kastanie und Weihnachtabend. Treuter, Bei Mondenschein. Weber, Apfelblüte. Herrmann, Blumenmarkt in Holland.

## Schattenbilder

**R. W. Diefenbach** „Per aspera ad astra“. Album, die 34 Teilsb. des vollst. Wandfrieses fortlaufend wiedergebend (25×20 1/2 cm) *R.M.* 15.-. Teilsbilder als Wandfries (80×42 cm je *R.M.* 5.-, (35×18 cm) je *R.M.* 1,25, auch gerahmt i. versch. Ausführ. erhältlich. „Göttliche Jugend.“ 2 Mappen mit je 20 Blatt (34×25 1/2 cm) je *R.M.* 7,50. Einzelbilder je *R.M.* -60, auch gerahmt in verschiedenen Ausführungen erhältlich.

**Kindermusik.** 12 Blätter (34×25 1/2 cm) in Mappe *R.M.* 6.-, Einzelblatt *R.M.* -60. **Gerda Luise Schmidts Schattenzeichnungen.** (20×15 cm) je *R.M.* -50. Auch gerahmt in verschiedenen Ausführungen erhältlich. Blumenoratel. Reifenspiel. Der Besuch. Der Liebesbrief. Ein Frühlingsstrauß. Die Freunde. Der Brief an „Ihn“. Annäherungsversuch. Am Spinnet. Beim Wein. Ein Märchen. Der Geburtstag.

## Zur Ausschmückung von Kinderzimmern

„Die Wanderfahrt der drei Wichtelmännchen.“ Zwei farbige Wandfriesje von M. Ritter. 1. Abschied - Kurze Raft. 2. Hochzeit - Tanz. Jeder Fries mit 2 Bildern (103×41 cm) *R.M.* 6.-, jedes Bild einzeln *R.M.* 3.-

Serner sind erschienen: Herrmann: „Aschenbrödel“ und „Kottäppchen“; Baumseind: „Die sieben Schwaben“; Rehm-Vietor: „Wir wollen die goldene Brücke bauen“, „Schlaraffenleben“, „Schlaraffenland“, „Englein zur Wacht“ und „Englein zur Hut“ (103×41 cm, je *R.M.* 6.-)

**Zwei Weihnachtsbilder und zwei Osterbilder von R. Kämmerer.** 1. Morgen, Kinder, wird's was geben. 2. Vom Himmel hoch da komm ich her. / 1. Ostern, Ostern ist es heut! 2. Osterbale schleicht ums Haus (41×30 cm). Preis je *R.M.* 3.-. Postkartenausgabe je *R.M.* -15. Bilder einzeln gerahmt in weißem Rahmen unter Glas je *R.M.* 9.-, die zusammengehörigen Bilder, als Wandfries gerahmt je *R.M.* 17.-. Postkarten unter Glas mit schwarzer Einfassung, mit Aufhängechnur je *R.M.* -65, in schwarz poliertem Rahmen mit Glas je *R.M.* -85

## Rudolf Schäfers Bilder nach der Heiligen Schrift

Der barmherzige Samariter, Jesus der Kindesfreund, Das Abendmahl, Hochzeit zu Kana, Weihnachten, Die Bergpredigt (75×55 bzw. 60×50 cm). *R.M.* 9.- bzw. *R.M.* 8.-. Diese Blätter (außer: Der barmherzige Samariter) erschienen als **Biblische Bilder** in Format 36×28 cm Jedes Blatt *R.M.* -75

## Karl Bauers Federzeichnungen

Charakterköpfe zur deutschen Geschichte. Mappe, 32 Bl. (36×28 cm) *R.M.* 5.-  
12 Bl. *R.M.* 2.-  
Aus Deutschlands großer Zeit 1813. In Mappe, 16 Bl. (36×28 cm) *R.M.* 2,50  
Führer und Helden im Weltkrieg. Einzelne Blätter (36×28 cm) *R.M.* -50  
2 Mappen, enthaltend je 12 Blätter, je *R.M.* 1,25

## Teubners Künstlerpostkarten

Jede Karte *R.M.* -10, Reihe von 12 Karten *R.M.* 1.-  
Jede Karte unter Glas mit schwarzer Einfassung und Schnur edig oder oval, teilweise auch in feinen Holzrahmchen edig oder oval. Ausführliches Verzeichnis vom Verlag in Leipzig. Ausführl. illustr. Wandschmuckatal. f. *R.M.* 1.- vom Verlag, Leipzig C1, Poststr. 3, erbältl.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



I-301528



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000295886