

II. *Stehende Lichtwellen* *und die Schwingungsrichtung polarisirten Lichtes;* *von Otto Wiener.*

(Im Auszug mitgetheilt auf der 62. Versammlung deutscher Naturforscher
und Aerzte 1889.¹⁾)

(Hierzu Taf. II.)

Bei der Untersuchung electrodynamischer Wellen im Luftraume²⁾ hat Hertz in einfacher Weise die durch Reflexion eintretende Phasenänderung der electricen Schwingungen bestimmt, indem er die einfallende und reflectirte Welle zur Interferenz brachte und damit die Erscheinung stehender electricer Wellen dem Experiment unterwarf. Die entsprechende Frage in der Optik, nach der Phasenänderung des Lichtes bei senkrechter Reflexion, hatte bis jetzt immer noch keine entscheidende Antwort gefunden.³⁾ Da dieselbe mich schon früher beschäftigte, so erweckte die Hertz'sche Untersuchung in mir den Wunsch, auf gleichem Wege, d. h. gleichfalls mit Hülfe stehender Wellen, die optische Streitfrage zur Entscheidung zu bringen.

Stehende Lichtwellen waren aber bisher dem Experiment noch nicht zugänglich gemacht. Ich dachte also darüber nach, ob dies nicht auf irgend eine Weise zu ermöglichen sei. Wie zu der Erforschung stehender electrodynamischer Wellen von Hertz eine Strombahn mit eingeschalteter Funkenstrecke, und wie für die Messung stehender Luftwellen von Kundt ein leicht bewegliches Pulver angewendet worden war, so kam es für den Nachweis stehender Lichtwellen nur darauf an, ein geeignetes Anzeichen dafür zu finden, dass an einem gegebenen Ort eine Lichtbewegung vorhanden sei.

Von den uns bekannten Verfahren, Lichtbewegung objectiv nachzuweisen, wie durch Wärmewirkung, Fluorescenz, Hauchbilder und durch chemisch-photographische Wirkung schien mir die letzte am geeignetsten.

1) Tageblatt der Versammlung p. 209.

2) H. Hertz, Wied. Ann. **34**, p. 609, 1888.

3) Vgl. die Anmerkung in § 6. p. 237.

Die gebräuchlichen Gelatineplatten freilich konnten für den vorliegenden Zweck nicht in Frage kommen. Denn, abgesehen von ihrer Undurchsichtigkeit, zählt die Dicke einer solchen Platte nach Hunderteln eines Millimeters¹⁾, während der Abstand zweier aufeinander folgenden Schwingungsknoten einer stehenden Lichtwelle sich nach Zehntausendteln berechnet. Es könnten demnach etwa hundert Wellenzüge längs der Dickenausdehnung einer Gelatineplatte Platz finden. Würde man also die Platte der Wirkung einer stehenden Lichtwelle aussetzen und nach dem Entwickeln betrachten, so müsste man an jeder Stelle der Platte die Wirkung von 100 Wellenzügen übereinandergedeckt sehen; die Platte wäre anscheinend gleichförmig geschwärzt. Eine Untersuchung der stehenden Welle ist vielmehr nur dann denkbar, wenn man ihre Wirkung auf einer Strecke, die einen kleinen Bruchtheil der Wellenlänge beträgt, gesondert erhalten kann. Die nächste Aufgabe war also, zu suchen, ob es möglich sei, *eine durchsichtige lichtempfindliche Schicht herzustellen, deren Dicke gegen die Länge einer Lichtwelle hinreichend klein ist.*

Bei dem dazu unternommenen Studium der photographischen Literatur stiess ich schon bei der Daguerreotypie auf Angaben, die den Gedanken nahe legten, es möchten die stehenden Lichtwellen bereits bei diesem ersten Verfahren der Photographie unerkannterweise eine Rolle gespielt haben.

Ein Daguerreotyp wird bekanntlich durch schwaches, oberflächliches Jodiren einer Silberplatte hergestellt. Die dabei erhaltene Färbung der Platte ist nun nach den Angaben der Autoren für deren Lichtempfindlichkeit massgebend.²⁾ Jene Färbung entsteht, wie bekannt, durch Interferenz und hängt von der Dicke der Jodsilberschicht ab. Durch diese Dicke wird aber gleichzeitig der in der Oberfläche der Jodsilberschicht bestehende Schwingungszustand der stehenden Wellen bestimmt, welche durch die Reflexion des Lichtes am Silber verursacht sind. Insofern könnten also die stehenden Wellen für die Empfindlichkeit des Daguerreotyps von Bedeutung sein.

1) Nach einer Angabe von Eder, Ausführliches Handbuch der Photographie. 3. p. 195. 1886.

2) Vgl. Eder; l. c. 2. p. 69.

Der einzige, welcher stehende Lichtwellen ausgesprochenmassen zur Erklärung gewisser Erscheinungen benutzte, ist, soweit ich die Literatur verfolgt habe, Zenker. In seinem Buch über Photochromie¹⁾ suchte er die Wiedergabe der natürlichen Farben durch Chlorsilber mittelst stehender Lichtwellen zu erklären. Hiergegen von Schultz-Sellack²⁾ erhobene Bedenken sind meines Wissens noch nicht beseitigt. Die Lösung dieser Frage wäre gewiss von hohem Reize; nicht minder die, inwiefern überhaupt stehende Lichtwellen für das Problem der farbigen Photographie nutzbar gemacht werden könnten.

Wir kommen auf die oben bezeichnete Aufgabe der Herstellung einer äusserst dünnen, lichtempfindlichen Schicht zurück. Es gelang mir nunmehr nach angestellter Literaturdurchsicht und empfangener Belehrung durch Fachmänner dieselbe auf drei verschiedenen Wegen zu lösen. Als geeignetster erwies sich die Herstellung eines Häutchens aus Chlorsilbercollodium, dessen Dicke ohne zu grosse Beeinträchtigung seiner Lichtempfindlichkeit auf $\frac{1}{20}$ bis $\frac{1}{40}$ der Wellenlänge des Natriumlichtes gebracht werden konnte.

Solche Häutchen habe ich bei allen im folgenden mitgetheilten Versuchen verwendet und werde daher auch mit der Beschreibung ihrer Herstellungsweise und Eigenschaften beginnen (§ 1). Die beiden anderen Verfahren schliessen sich daran kurz an. Es folgt darauf der einfachste Versuch zum Nachweis stehender Lichtwellen (§ 2). Da derselbe nicht ganz einwandfrei ist, wurde er in einer Reihe von Experimenten umgestaltet (§ 3), welche, wie ich glaube, jeglichen Zweifel ausschliessen, dass das Vorhandensein stehender Lichtwellen durch sie wirklich zur Erscheinung gebracht wird.

Auf der so geschaffenen Grundlage gelang es weitere Versuche anzustellen, die darauf abzielten, einerseits über die absolute Phasenänderung des Lichtes bei senkrechter Reflexion durch die Bestimmung der Lage der Schwingungsknoten und -Bäuche zur spiegelnden Fläche (§ 4) und andererseits über die Schwingungsrichtung polarisirten Lichtes durch die *Interferenz zweier sich rechtwinklig trennenden polari-*

1) Dr. Wilhelm Zenker, Lehrbuch der Photochromie. 1868. p. 77.

2) Schultz-Sellack, Pogg. Ann. 143. p. 449. 1871.

sirten *Lichtwellen* (§ 5) Anschluss zu schaffen. Inwiefern ein solcher durch die dabei gefundenen Thatsachen wirklich gewonnen wurde und die Lösung der alten Fresnel-Neumann'schen Streitfrage enthält, wird sodann eingehend besprochen (§ 6, I). Zuletzt wird festgestellt, wie diese Thatsachen in der Sprache der electromagnetischen Lichttheorie auszudrücken sind (§ 6, II).

Bei den technischen Schwierigkeiten dieser Arbeit wurde ich von Herrn Photographen A. Hruschka dahier in der förderlichsten und entgegenkommendsten Weise unterstützt. Ich spreche ihm dafür an dieser Stelle meinen aufrichtigen Dank aus.

§ 1. Die dünne lichtempfindliche Schicht.

I. Das lichtempfindliche Collodiumhäutchen.

a. Herstellung. Es findet sich im Handel Chlorsilbercollodium¹⁾ in getrennten Lösungen, von denen die eine allein das Silber-, die andere das Chlorsalz gelöst enthält. Von jeder werden kleine und gleiche Quantitäten entnommen und beide auf das 15 bis 20fache mit einer Mischung von gleichen Theilen Alkohol und Aether verdünnt. Erst dann werden die verdünnten Lösungen im Dunkelzimmer zusammengegossen. Von der so bereiteten Flüssigkeit bringt man ein Paar Tropfen auf eine Glasplatte. Das Lösungsmittel verdunstet rasch und hinterlässt auf der Platte ein feines Häutchen. Um diesem möglichst überall die gleiche Dicke zu geben, bedient man sich mit Vortheil eines kleinen Kunstgriffes. Man nimmt eine zweite Glasplatte von ungefähr gleicher Grösse zur Hand. Nachdem man einige Tropfen der Lösung darauf gegossen, deckt man die andere Platte darüber, sodass die Flüssigkeit sich capillar zwischen den beiden Platten ausbreitet. Hat sie den Zwischenraum völlig ausgefüllt, so zieht man dieselben rasch auseinander, dreht die obere um und legt sie horizontal. Nach Verdunsten des Lösungsmittels bleibt jetzt auf den Glasplatten eine überall nahe gleich dicke Schicht zurück.

b. Eigenschaften des Häutchens. Dieses Collodiumhäutchen entspricht allen Anforderungen, die man für den vorliegenden Zweck an dasselbe stellen kann.

1) Ich bezog dasselbe von der Berliner Firma J. F. Schippang u. Co.

Zunächst: *das Häutchen ist vollkommen durchsichtig.*¹⁾ Eine damit überzogene Glasplatte kann man kaum auf den blossen Anblick hin von einer nicht überzogenen unterscheiden. Dies wird wohl begreiflich, wenn ich mittheile, dass die zur Herstellung des Häutchens dienende verdünnte Lösung, auf einen Augenblick ans Licht gebracht, in keiner Weise von einer farblosen wasserklaren Flüssigkeit unterschieden werden kann. Sie hat den Charakter einer wirklichen Lösung und nicht den einer Emulsion.

Zweitens erhält das Häutchen auf die beschriebene Weise die *nöthige Feinheit*. Um ein bestimmtes Beispiel zu wählen, so wurden drei Tropfen (= 0,09 cm³) einer 19fach verdünnten Collodiumlösung auf zwei Platten von je 35 cm² Oberfläche vertheilt. Dadurch entstand ein *Häutchen von einer Dicke = ca. $\frac{1}{30}$ einer Wellenlänge des Natriumlichtes*.

Die Ermittlung dieser Dicke geschah mittelst eines einfachen optischen Verfahrens.²⁾ Man wische von dem Häutchen mit einem weichen Stückchen Holz einen Streifen weg, lege eine zweite Glasplatte auf und betrachte das Plattenpaar im annähernd senkrecht reflectirten Natriumlicht. Hält man die Platten auf der einen Seite etwas zusammengepresst, so entsteht dadurch zwischen denselben eine keilförmige Luftschicht, welche zur Entstehung von Interferenzstreifen Veranlassung gibt. Denselben kann man durch geeignetes Pressen eine solche Richtung geben, dass sie die Grenzlinien der vom Collodium entblösten Stelle senkrecht durchkreuzen; ah diesen Grenzen nimmt man dann eine kleine Verschiebung der Interferenzstreifen wahr. Ist die Verschiebung kleiner als eine Streifenbreite³⁾, so gibt die Grösse derselben, in Bruchtheilen einer Streifenbreite ausgedrückt, unmittelbar an, den wievielten Theil einer halben Natriumwellenlänge (λ_{Na}) die Dicke des Häutchens beträgt. Diese Verschiebung betrug im oben angeführten Beispiele etwa $\frac{1}{15}$ Streifenbreite, woraus sich die Dicke des Blättchens zu $\frac{1}{30} \lambda_{Na}$ ergab.

Das Ergebniss kann nicht überraschen, wenn man die

1) Dies gilt auch von den photographisch wirksamsten Strahlen, was u. a. auch aus den Versuchen zu Fig. 4 u. 5, p. 220 u. 221, hervorgeht.

2) Vgl. O. Wiener, Wied. Ann. 31. p. 632. 1887.

3) O. Wiener, l. c. p. 633 u. 636.

Kleinheit der zur Erzeugung des Häutchens verwendeten Substanzmenge bedenkt. 1 cm^3 der verdünnten Lösung enthielt im angeführten Beispiel etwa 25 mg feste Substanz; die 19fach verdünnte Lösung also $\frac{25}{19}$ mg. Zur Verwendung kamen $0,09 \text{ cm}^3$ Lösung, d. h. $0,09 \cdot \frac{25}{19} = 0,12$ mg feste Substanz. Wäre das spezifische Gewicht des Häutchens = 1, so würde sich das aufgewandte Volumen zu $0,12 \text{ mm}^3$ ergeben. Dieses Volumen wurde, wie gesagt, auf zwei Platten von je 35 cm^2 Oberfläche, also im ganzen auf eine Fläche von 7000 mm^2 vertheilt. Daraus berechnet sich die Dicke des Häutchens zu $0,12/7000 \text{ mm}$ gleich rund $20 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$. Die Wellenlänge der Natriumlichtes ist rund $600 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$, somit die Dicke des Blättchens rund $\frac{1}{30} \lambda_{\text{Na}}$, wie auch die Bestimmung aus Interferenzen ergab. Thatsächlich dürfte das spezifische Gewicht des Blättchens grösser als 1 sein und somit die Dicke bei obiger Rechnung noch kleiner ausfallen. Dieselbe verfolgt natürlich nur den Zweck, den Leser davon zu überzeugen, dass die Dicke eines solchen Collodiumhäutchens wirklich nur einen kleinen Bruchtheil einer Lichtwellenlänge beträgt.

Trotz solcher Feinheit behält das Häutchen eine für die Versuche völlig ausreichende *Lichtempfindlichkeit*. Das Licht einer electricen Bogenlampe erzeugt auf demselben nach wenigen Minuten von einem darauf gelegten durchbrochenen Schirm einen zunächst unsichtbaren Eindruck, welcher sich mit einer Hervorrufungsflüssigkeit zu einem kräftigen Bild entwickeln lässt. Für die unten folgenden Versuche, bei denen das electriche Licht nicht ungeschwächt wirkte, sondern Spalt und dispergirendes Prisma zu durchsetzen hatte, musste natürlich eine grössere Belichtungsdauer gewählt werden, welche gewöhnlich zwischen 20 und 35 Minuten lag.

Als Hervorrufungsflüssigkeit diente ein kurz vor Gebrauch hergestelltes Gemisch von gleichen Theilen einer zweiprocentigen Lösung von salpetersaurem Silber in Wasser und einer Pyrogallollösung, enthaltend 1 g Pyrogallol und 1,3 — 1,5 g Citronensäure auf 300 cm^3 Wasser.

Die *Festigkeit* des Blättchens wird in vortheilhafter Weise durch den schützenden Ueberzug eines Gelatinehäutchens vergrössert, das noch dünner als das Collodiumhäut-

chen selbst sein darf. Dieser Ueberzug wird in ähnlicher Weise wie jener aus ein Paar Tropfen einer sehr verdünnten wässerigen Gelatinelösung gewonnen. Zu der letzteren waren behufs Verminderung der Reibung beim Auseinanderziehen der Platten (vgl. p. 206) in der Regel 30—50 Proc. Alkohol zugesetzt worden; ein wesentlicher Kunstgriff, ohne den das Collodiumhäutchen bei der Herstellung des Gelatineüberzuges Noth leiden muss.

II. Andere Herstellungsweisen einer dünnen lichtempfindlichen Schicht.

Wie schon oben erwähnt, hat Daguerre Silberplatten durch schwaches oberflächliches Jodiren lichtempfindlich gemacht. Dass die dabei entstehende Jodsilberschicht äusserst dünn ist, war gleichfalls bekannt. Um dieses Verfahren dem vorliegenden Zweck anzupassen, brauchte man also nur das Silber gleichfalls dünn genug zu machen. Dazu wurde Silber auf chemischem Wege in äusserst feiner durchsichtiger Schicht auf einer Glasplatte niedergeschlagen. Nachdem jene zum Theil in Jodsilber verwandelt worden war, konnte sie mit Erfolg bei den ersten Versuchen verwendet werden.

Ein weiteres Verfahren verdanke ich dem gütigen Rath von Hrn. Prof. Rose. Dasselbe beruht darauf, dass eine homogene Jodsilberschicht an ihrer Oberfläche durch eine sie benetzende Lösung von salpetersaurem Silber lichtempfindlich gemacht wird. Auch dieses Verfahren diente mit Erfolg bei einigen Versuchen.

Bei beiden Verfahren besitzt indess die lichtempfindliche Schicht verhältnissmässig kräftig reflectirende Grenzflächen, was für die meisten Versuche nicht erwünscht ist. Aus diesem Grunde, sowie der Handlichkeit wegen wurde dem Collodiumhäutchen der Vorzug gegeben.

§ 2. Einfachster Versuch zum Nachweis stehender Lichtwellen (Fig. 1).

Zum Verständniss des Versuches sei die folgende Uebersetzung vorausgeschickt. Dabei bediene ich mich der einfacheren Darstellung halber, ebenso wie bei gleichem Anlass

in späteren Paragraphen, der Ausdrucksweise der mechanischen Lichttheorien.

In der Nähe eines Spiegels, auf den ein paralleles einfarbiges Lichtbündel senkrecht auftrifft, durchdringen sich zwei Lichtwellen — die einfallende und die zurückgeworfene. Dieselben pflanzen sich in entgegengesetzten Richtungen fort und müssen, wofern überhaupt unsere Grundanschauungen über das Wesen des Lichtes — seine periodische Natur und Interferenzfähigkeit — zutreffen, einen Bewegungszustand hervorrufen, den man mit dem Namen der „stehenden Wellen“ belegt hat. Das heisst der Raum vor dem Spiegel wird durch die Wellen in feststehende Abschnitte zerlegt. In solchen Abständen vom Spiegel, wo der gesammte¹⁾ Gangunterschied der beiden Wellen das Vielfache einer ganzen Wellenlänge beträgt, haben ihre Schwingungen stets die gleiche Richtung, und ihre gegenseitige Verstärkung ist am grössten; hier liegen die Schwingungsbäuche; in solchen Abständen dagegen, wo der Gangunterschied eine halbe Wellenlänge mehr als das Vielfache einer ganzen beträgt, haben die Schwingungen der beiden Wellen stets entgegengesetzte Richtung und ihre gegenseitige Vernichtung ist am stärksten; hier liegen die Schwingungsknoten.

Ist der Spiegel eben, so herrscht in einer zu ihm parallelen Ebene überall der gleiche Schwingungszustand, und Schwingungsbäuche und -Knoten liegen gleichfalls in dazu parallelen Ebenen und erfüllen so zwei Scharen paralleler Ebenen. Der Abstand zweier aufeinanderfolgenden Ebenen derselben Schar beträgt eine halbe Wellenlänge und wird von einer solchen der anderen Schar halbirt.

Dieses System von stehenden Wellen denke man sich nun von einer gegen den Spiegel geneigten Ebene durchsetzt. Auf dieser werden dann die beiden Scharen von Ebenen mit Schwingungsbäuchen und -Knoten zwei Scharen von parallelen, untereinander gleich weit abstehenden Geraden ausschneiden, bei denen ebenso Gerade mit Schwingungsbäuchen und solche mit -Knoten abwechseln.

1) D. h. der wirkliche Wegunterschied, vermehrt um den durch Reflexion bedingten scheinbaren Gangunterschied.

Der Abstand dieser Geraden wird abhängen von der Neigung, welche man der kreuzenden Ebene gegen den Spiegel ertheilt. Stellt man sie senkrecht zum Spiegel auf, so sind die Abstände ebenso klein, wie die entsprechenden der schneidenden Ebenen. Gibt man derselben aber eine geringere Neigung, so werden die Abstände grösser. Wählt man die Neigung schwach genug, so muss es möglich sein, die Geraden mit Schwingungsbäuchen und -Knoten so weit auseinander treten zu lassen, dass sie mit unbewaffnetem Auge getrennt wahrgenommen werden könnten. Es handelt sich nur darum, sie dem Auge sichtbar zu machen.

Dazu ist uns aber in dem beschriebenen, äusserst feinen lichtempfindlichen Häutchen ein Mittel an die Hand gegeben. Man denke sich dieses Häutchen auf jene gegen den Spiegel schwach geneigte Ebene ausgebreitet und so der Wirkung der stehenden Wellen durch eine Belichtung ausgesetzt. Längs der Geraden mit Schwingungsbäuchen wird dann die stärkste, längs derjenigen mit Schwingungsknoten die geringste Lichtwirkung eintreten. Es muss dann die photographische Entwicklung auf dem Häutchen ein System von abwechselnd hellen und dunkeln Streifen hervortreten lassen. Und das ist es, was man in der That beobachtet.

Der Versuch wurde in folgender Weise angestellt. Als Spiegel diente eine kräftig reflectirende Silberschicht, welche auf eine ebene Glasplatte chemisch niedergeschlagen und dann mit einem weichen Lederlappen polirt worden war. Auf einer zweiten ebenen Glasplatte befand sich das dünne lichtempfindliche Häutchen (s. § 1). Dieselbe wurde auf die erste Platte aufgelegt, das Häutchen dem Silberspiegel zugewandt.

Um der Ebene des Häutchens eine passende Neigung gegen den Spiegel zu geben, wurde das Plattenpaar in gleicher Weise wie oben bei der Dickenbestimmung (p. 207) im reflectirten Natriumlicht betrachtet und den dabei auftretenden Interferenzstreifen durch geeignetes Pressen der Gläser der gewünschte Streifenabstand, gewöhnlich zwischen $\frac{1}{2}$ und 2 mm gegeben.

Innerhalb einer solchen Strecke ändert sich dann der Abstand des empfindlichen Häutchens vom Spiegel um eine halbe Wellenlänge des Natriumlichtes. Damit ist aber die

gewünschte schwache Neigung von Häutchen gegen Spiegel erreicht. Denn der Abstand zweier aufeinanderfolgenden Ebenen mit Schwingungsbäuchen der stehenden Wellen beträgt gleichfalls eine halbe Wellenlänge des einfallenden Lichtes. In dieser Lage nun werden die Platten mit Hülfe eines harten Wachs- und Colophoniumkittes festgehalten.

Als einfarbige Lichtquelle konnte eine Natriumflamme nicht benutzt werden, da diese selbst bei langer Expositionszeit nicht merklich auf Chlorsilbercollodium einwirkt. Dagegen erwies sich merkwürdiger Weise das Licht einer electrischen Bogenlampe für den vorliegenden Zweck als annähernd homogen. Das ist dem Umstande zu verdanken, dass es gerade die auf das Chlorsilbercollodium photographisch kräftigst einwirkenden violetten Strahlen in besonderer Intensität aussendet und die Wellenlänge dieser wirksamen Strahlen ziemlich eng begrenzt ist, wobei wohl die Absorption der ultravioletten Strahlen durch die Glasplatte noch in Betracht kommt.

Demnach gestaltet sich die Versuchsanordnung einfach so: das Licht der electrischen Lampe trifft, durch eine Linse parallel gemacht, in einer Entfernung von 1—2 m auf das beschriebene Plattenpaar senkrecht auf und durchsetzt so das vor dem Spiegel gelegene Häutchen auf Hin- und Rückweg. Nach einer Belichtungszeit von 1—2 Minuten werden die Platten auseinander genommen und das photographische Häutchen entwickelt. *Dabei entstehen auf dem Häutchen Streifen*, welche entsprechend der kürzeren Wellenlänge des violetten Lichtes etwas enger beisammen liegen, als die im Natriumlicht vorher beobachteten Interferenzstreifen.

Die so erhaltenen photographischen Streifen zeichneten sich begreiflicher Weise nicht durch grosse Schärfe aus. Dazu waren doch zu verschieden farbige Strahlen wirksam. Es fielen verschiedenartige Schwingungszustände für verschiedene Farben an eine und dieselbe Stelle des Häutchens, wodurch das Bild verwaschen werden musste. Nur seiner Einfachheit halber wurde dieser Versuch hier mitgetheilt.

Für die endgültigen Versuche benutzte ich ausschliesslich spectral zerlegtes Licht. Dabei wurde das durch einen Spalt tretende Licht mit einem achromatischen Linsensystem parallel gemacht, von einem Flintglasprisma zerlegt und mit

einem zweiten achromatischen System auf dem Plattenpaar concentrirt. Das Ganze befand sich in einem Dunkelzimmer, welches von photographisch unwirksamem Licht schwach erhellt war, während die electriche Lampe im Nebenzimmer aufgestellt war und nur durch den Spalt ein paralleles Strahlenbündel in das Dunkelzimmer treten liess.

Der Wahl dieser Versuchsanordnung hatte anfangs das Bedenken entgegengestanden, dass ja das Licht dabei nicht mehr parallel, sondern convergent auf das Plattenpaar auftraf. Indess erwies sich die Convergenz bei den gewählten Bedingungen als zu gering, um einen merklichen Mangel zu verursachen. Das bei der letzten Linse vor den Platten austretende Lichtbündel beschränkte sich im wesentlichen auf einen grössten Durchmesser von etwa 8 mm. Der übrige Theil der Linse konnte ohne merkliche Verminderung der Lichtwirkung abgeblendet werden. Der Abstand der Platten von der Linse betrug etwa 220 mm. Daraus berechnet sich der grösstmögliche Oeffnungswinkel des auf einen Punkt der Platten fallenden Lichtbündels auf etwa 2° . Dies verursacht bei dem kleinen Abstand von Häutchen und Spiegel für Strahlen verschiedenster Neigung eine nur geringe Verschiebung der photographischen Streifen. Nimmt man den Abstand zwischen Spiegel und Häutchen zu 0,02 mm an, eine Grösse, welche, nach einigen Messungen zu urtheilen, wohl selten überschritten wurde, so berechnet sich daraus die Verschiebung auf etwa $\frac{1}{30}$ Streifenbreite.

In der That beseitigte auch gleich der erste Versuch mit dieser Anordnung jene Bedenken aufs gründlichste. Beim Entwickeln entstanden jetzt *Streifen von ausgezeichnete Schärfe*. Dieselben erschienen, wenn man die Platte im durchfallenden Lichte betrachtete, als dunkle Striche, die sich scharf gegen die *hellen Streifen* abhoben. Die letzteren waren nicht merklich weniger durchsichtig geblieben, als die vom Lichte überhaupt nicht getroffenen Stellen der Platte.

Hier sei auf Fig. 1 der Figurentafel verwiesen, welche, auf mechanischem Wege hergestellt (s. p. 215), positive Abdrücke der Originalnegative wiedergibt; d. h. die auf diesen vom Licht am stärksten betroffenen dunkeln Partien sind hier auf der Figur hell, und umgekehrt, die auf dem Ori-

ginal vom Licht nicht veränderten hellen Partien sind hier dunkel wiedergegeben.

Zur Erläuterung der Figuren diene Folgendes. Die Richtung von links nach rechts auf denselben entspricht der Ausdehnung des Spectrums von Roth nach Violett; die verticale Richtung der Figuren lief beim Versuch dem Spalt parallel. Die verticalen Linien auf den Bildern (Fig. 3 ausgenommen) sind Spectrallinien, welche dem Spectrum des angewandten electrischen Bogenlichtes eigenthümlich sind. Von diesen Linien werden zwei etwa millimeterweit auseinander liegende, gleich links neben der hellsten Partie im Spectrum auf den meisten Bildern in's Auge springen. Dieselben fallen — wenigstens innerhalb der Genauigkeit meiner Messungen — mit den beiden H-Linien im Sonnenspectrum zusammen und reichen damit für den Leser zur Orientirung im photographirten Spectrum aus.

Die Verschiedenheit der Lichtwirkung in verschiedenen Spectralbezirken ist zum Theil durch die Eigenthümlichkeit des Bogenlichtes, zum Theil durch die verschiedene Lichtempfindlichkeit des Chlorsilbercollodiums für verschiedene Farben bedingt. Eine gleichförmigere Lichtwirkung kann mit Hülfe von Sonnenlicht oder durch Verwendung von Sensibilisatoren erzielt werden. Auf ersteres verzichtete ich indess bei der Herstellung der vorliegenden Bilder wegen seiner Unzuverlässigkeit, auf letztere aus anderen Rücksichten.

Die von den stehenden Wellen herrührenden Streifen verlaufen auf den meisten Bildern (wie Fig. 1) schräg. Dabei entsprachen die hellen Streifen, wie aus dem Gesagten schon hervorgeht, den Stellen stärkster, die dunkeln den Stellen geringster Lichteinwirkung der stehenden Wellen. Der Verlauf der Streifen hängt einerseits von der Dispersion des verwendeten Spectrums, andererseits von der Form des zwischen Häutchen und Spiegel gelegenen Zwischenraumes ab. Beugungsspectrum und genau keilförmiger Zwischenraum müssten geradlinige Streifen ergeben. Prismatisches Spectrum und Keil mit einer zu den Spectrallinien geneigten Schneide müssen Streifen von der Form einer Dispersionscurve liefern. Dieser Fall war bei vielen Bildern (wie Fig. 1)

verwirklicht. Ist die Schneide den Spectrallinien parallel, so müssen die Streifen gleichfalls denselben parallel werden. Dieser Fall trifft auf Fig. 3 zu.

Allgemeines über die Figurentafel.

Für die Reproduction der auf dem Collodiumhäutchen entstandenen Figuren musste, wenn sie dabei ihre Beweiskraft nicht einbüßen sollten, ein mechanisches Verfahren angewendet werden. Beim Aufsuchen eines geeigneten Weges unterstützte mich wieder Hr. Hruschka; es wurde schliesslich der folgende eingeschlagen. Hr. Hruschka fertigte von den negativen Bildern des Collodiumhäutchens positive Abdrücke auf photographischem Papier an. Dieselben wurden auf Karton zu einer Tafel zusammengestellt und gelangten so zur Reproduction durch Lichtdruck, welchen Hr. J. Schober in Karlsruhe mit dankenswerther Sorgfalt ausführte.

Bei diesem Verfahren wird bekanntlich von dem Original zunächst ein photographisches Negativ angefertigt, welches sich vermöge eines vor die photographische Kamera gesetzten totalreflectirenden Prismas zum Original wie ein Spiegelbild verhält. Unter dem Negativ wird sodann eine Gelatineplatte, deren Herstellung dem Lichtdruckverfahren eigenthümlich ist, bei diffusem Tageslicht exponirt. Die Gelatineplatte wird dann derart behandelt, dass die belichteten Stellen aufgetragene Druckerschwärze nach Maassgabe der Belichtungsstärke annehmen, während die unbelichteten dieselbe nicht aufzunehmen vermögen. Die schwarze Farbe überträgt sich unter der Presse auf Papier, welches dann das ursprüngliche Bild wiedergibt.

Bei der Reproduction wurde jegliche Retouche ausgeschlossen. Infolge dessen finden sich auf den vorliegenden Abbildungen auch alle Schäden der Originalbilder wieder; z. B. Verletzungen des Collodiumhäutchens wie in dem oberen Felde der Fig. 7; oder die hellen Pünktchen auf den Figuren 6, 10 und 12, und der kometenartige Streif links oben auf Fig. 4, lauter Flecken, welche durch Fehler im Collodiumhäutchen entstanden und vermuthlich durch Unregelmässigkeiten beim Verdunsten des Lösungsmittels verursacht sind, indem ein-

zelle zurückbleibende Tropfen einen stärkeren Rückstand hinterliessen.

Die Originalbilder sind durch vorliegenden Lichtdruck zum Theil mit staunenswerther Genauigkeit wiedergegeben; z. B. in den Figuren 8 und 9 die äussersten engen Ringe, welche eine Lupe erfordern, um gut getrennt wahrgenommen werden zu können. Nur wenig wurde bei der Reproduction verloren; so in den untern Feldern der Figuren 2 und 3, bei denen die Originalbilder eine grössere Ausdehnung der Streifen erkennen lassen. Das Wesentliche ist durchweg wiedergegeben.

Jeder wichtige Versuch dieser Arbeit wurde öfters wiederholt und findet sich in der Tafel durch mindestens ein Bild vertreten. Wo zwei Bilder vorliegen, dienen sie sich wegen theilweiser Mängel zur gegenseitigen Ergänzung.

Die Schärfe der Bilder ist verschieden, genügt indess bei allen in Anbetracht der mehr qualitativen Natur der Experimente. Dass die hier angewendete Methode gleichwohl auch bei einer quantitativen Untersuchung ausreichen würde, zeigt z. B. die Feinheit der Linien im oberen Felde der Fig. 5. Und es dürfte selbst hier die Grenze der möglichen Feinheit des Bildes noch nicht erreicht sein.

§ 3. Unterscheidung der beobachteten Erscheinung von Interferenzen gewöhnlicher Art (Fig. 2—7).

Der beschriebene Versuch lässt einen wesentlichen Einwand gegen seine Beweiskraft für das Vorhandensein der stehenden Wellen zu. Die Luftschicht zwischen dem empfindlichen Häutchen und dem Silberspiegel bedingt zwei Reflexionen des einfallenden Lichtes, eine im Collodium an Luft (oder Gelatine an Luft; vgl. p. 208), die andere in Luft an Silber. Diese beiden Lichtbündel gelangen ebenfalls zur Interferenz, und diese Interferenzen gewöhnlicher Art könnten es allein sein, welche sich auf dem Collodiumhäutchen abbilden. In ihm besitzt ja die einfallende Welle gegenüber der an Luft reflectirten nur den durch die Reflexion bedingten Phasenunterschied, welcher entweder gleich Null oder gleich einer halben Wellenlänge ist. Die Interferenz dieser Wellen mit der am Silber reflectirten erzeugt aber einerseits die stehenden Wellen, andererseits die gewöhnlichen Inter-

ferenzen fortschreitender Wellen. Die beiden Interferenzsysteme fallen also im Collodiumhäutchen entweder zusammen oder sind um eine halbe Streifenbreite gegeneinander verschoben; ihr Verlauf aber ist jedenfalls derselbe. Dieser Einwand, dass die erhaltenen photographischen Streifen nicht in erster Linie durch stehende Wellen, sondern allein durch Interferenzen gewöhnlicher Art entstanden, bedarf natürlich einer Widerlegung.

Dazu verweise ich zunächst auf die bereits mitgetheilte Beobachtung (p. 213), dass die Streifen der geringsten Lichtwirkung sich an Helligkeit nicht merklich von den ausserhalb des Spectralbildes gelegenen Stellen der Platte unterschieden, auf die gar kein oder höchstens schwach diffuses Licht gefallen war (s. Fig. 1). Diese Beobachtung aber ist mit der Annahme der Entstehung der Streifen durch gewöhnliche Interferenzen allein unverträglich; denn über die Wirkung der Interferenzen musste sich ja die ungeschwächte Wirkung des einfallenden Lichtes legen, auch an den Stellen der Interferenzminima; auch hier müsste man also eine Lichtwirkung beobachten; dass man keine findet, ist eben ein Beweis dafür, dass die Wirkung des einfallenden Lichtes durch Interferenz mit dem kräftig am Silberspiegel reflectirten vernichtet wurde, d. h. für das Auftreten der stehenden Wellen.

Versuch zu den Figuren 2 und 3.

Dieser Beweis kann noch schlagender gemacht werden, wenn man den Silberspiegel durch Glas ersetzt und die bei gleicher Intensität des einfallenden Lichtes auf beide Arten erhaltenen Bilder miteinander vergleicht.¹⁾ Stehende Wellen müssen dann dunklere Minima für die Reflexion an Silber ergeben, weil hier das einfallende Licht durch ein intensiveres Lichtbündel geschwächt werden kann, als bei der Reflexion an Glas.

Wäre dagegen die Erscheinung durch gewöhnliche Interferenzen allein hervorgerufen, so müsste sie umgekehrt dunk-

1) Zu diesem, sowie dem später folgenden zu Fig. 5 gehörigen Versuch wurde ich durch Hrn. Prof. Hertz angeregt, als ich ihm gelegentlich meine bis dahin gewonnenen Ergebnisse mittheilte.

lere Minima für die Reflexion an Glas ergeben. Denn hier handelt es sich um die Aufhebung des im Collodium an Luft¹⁾ reflectirten Lichtes. Dasselbe besitzt nämlich einen von Glas nur wenig abweichenden Brechungsexponent und veranlasst somit eine reflectirte Welle von annähernd gleicher Amplitude, wie die an Glas reflectirte. Bei Interferenz der beiden reflectirten Bündel Collodium-Luft und Luft-Glas hat das Minimum nahe die Intensität Null. Bei der Interferenz der Bündel Collodium-Luft und Luft-Silber bleibt aber noch ein beträchtlicher Ueberschuss des am Silber reflectirten Lichtes.

Die dunkleren Minima müssen also bei gewöhnlichen Interferenzen die Reflexion an Glas, bei stehenden Wellen die Reflexion an Silber liefern.

Das Unterscheidungsmerkmal für beide Erscheinungen lässt sich indess noch schärfer bestimmen. Eine einfache Rechnung lehrt, dass bei gewöhnlichen Interferenzen sogar die Minima für Reflexion an Silber noch grössere Intensität besitzen müssen, als die Maxima für Reflexion an Glas. Die Rechnung ergibt, die Intensität des einfallenden Lichtes gleich Eins gesetzt, für die Intensitäten der Maxima und Minima²⁾ bei den Interferenzen Collodium-Luft, Luft Silber bezüglich die Werthe: 0,90 und 0,80; bei den Interferenzen Collodium-Luft, Luft-Glas: 0,18 und 0. Um die im Collodiumhäutchen wirksamen gesammten Lichtmengen zu erhalten, muss man zu jeder noch die Intensität des einfallenden

1) Das Collodiumhäutchen war zwar mit einem Gelatinehäutchen überzogen; da indess seine Dicke gering gegen die Lichtwellenlänge war, so musste die Reflexion Collodium-Gelatine und Gelatine-Luft in Summe die nämliche Amplitude für das reflectirte Licht liefern, wie eine einfache Reflexion Collodium-Luft. Uebrigens wich der Brechungsexponent der Gelatine nicht mehr als eine Einheit in der zweiten Decimale von dem des Collodiumhäutchens ab.

2) Dieselben berechnen sich unter Berücksichtigung mehrfacher Reflexionen beziehungsweise nach den Formeln $((a_1 + a_2)/(1 + a_1 a_2))^2$ und $((a_1 - a_2)/(1 - a_1 a_2))^2$, wobei a_1 und a_2 die absoluten Werthe für die Amplituden der an der ersten und zweiten Grenze stattfindenden Reflexionen bedeuten. Diese Amplituden sind für Glas und Collodium = 0,22 zu setzen, berechnet aus dem für beide Medien geltenden Brechungsexponent 1,55; für Silber = 0,93, wobei nach Jamin die Intensität des am Silber senkrecht zurückgeworfenen Lichtes zu 0,87 angenommen ist. Alle diese Angaben gelten für violettes Licht.

Lichtes 1 addiren, woraus sich der Reihe nach die Werthe ergeben: 1,90 und 1,80; und 1,18 und 1. Die zweite und dritte dieser Zahlen geben bezüglich das Minimum für Silber- und das Maximum für Glasreflexion. Die erstere ist also um mehr als die Hälfte grösser wie die andere.

Nun ist zwar die photographische Wirkung für verschiedene Lichtstärken der gleichen Farbe diesen nicht genau proportional. Doch steht so viel fest, dass grössere Lichtstärken auch kräftiger wirken, wenigstens so lange man nicht eine gewisse maximale Lichtstärke und Belichtungszeit überschreitet, wovon ich bei den vorliegenden Versuchen weit entfernt war. Wir gelangen somit zu diesem Ergebniss:

Wäre die vorliegende Erscheinung allein durch die bekannte Interferenz fortschreitender Wellen zu erklären, so müssten die Maxima bei Glasreflexion dunkler als die Minima bei Silberreflexion ausfallen; liegt dagegen die Erscheinung der stehenden Lichtwellen vor, so müssen die Minima bei Silberreflexion noch dunkler als die Minima bei Glasreflexion ausfallen.

Beim Versuch konnte Silber- und Glasreflexion unmittelbar nebeneinander erhalten werden, indem einfach an Stelle der bisher vollständig versilberten eine nur zur Hälfte versilberte Glasfläche trat. Die Rückseite des frei gebliebenen Theiles der Glasplatte war zur Verminderung der Reflexion von dieser Seite mit schwarzem Lack überzogen.

Das Ergebniss zweier von diesen Versuchen wird in Fig. 2 und 3 dargestellt. Auf beiden Bildern zieht eine horizontale Grenze durch, welche der Grenze von Silber- und Glasfläche beim Versuch entspricht und bei Fig. 2 etwas über der Mitte, bei Fig. 3 in ein Drittel der Höhe der Figur, von oben gerechnet, gelegen ist.¹⁾ Die oberen Theile der Figuren geben die Erscheinung für Silber-, die unteren für Glasreflexion wieder. Zum Vergleiche sind bei der horizontalen Grenze aneinanderstossende Theile derselben Stelle im Spectrum in's Auge zu fassen.²⁾ Hier ist die Intensität des

1) Die Grenze ist hier nur in der hellsten Partie der Figuren scharf, während sie bei den Originalen längs des ganzen Bildes hervortritt. Vgl. auch das Allgemeine über die Figurentafel p. 216.

2) In vorliegendem Abdruck nur rechts an den hellsten Stellen der Figuren möglich.

einfallenden Lichtes für beide Felder dieselbe. Man sieht auf den ersten Blick:

Die Maxima für Glasreflexion sind weit davon entfernt, dunkler als die Minima für Silberreflexion zu sein; im Gegentheil, die letzteren sind noch dunkler wie die Minima für Glasreflexion.

Der Versuch entscheidet also in schlagender Weise gegen die Annahme, dass die Erscheinung durch gewöhnliche Interferenzen allein zu Stande käme; er findet nur in der Annahme stehender Wellen seine Erklärung.

Nebenbei möchte ich hier auf die Verschiebung der Streifen an der horizontalen Grenze in Fig. 3 aufmerksam machen. Dieselbe führt sich zum Theil auf den um die Silberdicke verschiedenen Abstand der Silber- und Glasfläche von dem Collodiumhäutchen, zum Theil aber auch auf die Verschiedenheit der Phasenänderung des Lichtes bei Reflexion an Glas und an Silber zurück. Da die Bestimmung der Silberdicke keine Schwierigkeit bietet und unter geringer Aenderung der Versuchsanordnung auch zu umgehen ist, so gestattet diese Methode auch für ultraviolette Strahlen die Phasenänderung des Lichtes bei Reflexion an Silber und anderen Metallen zu beobachten. Natürlich muss man dann statt Glas ein Material benutzen, das solche Strahlen hindurchlässt.

Versuch zu Fig. 4.

Um zu sehen, wie die Erscheinung ausfallen würde, wenn nur die Interferenzen fortschreitender Wellen auf dem dünnen Häutchen zur Abbildung kämen, überzog ich mit einem solchen die beiden Seiten einer nicht ganz 1,5 mm dicken Glasplatte und legte diese wie früher auf eine zweite, vollständig versilberte Glasplatte. Das von dem Spiegel entferntere Häutchen bildet dann allein die gewöhnlichen Interferenzen der dünnen Luftschicht zwischen den Platten ab. Denn eine Streifenbildung durch stehende Wellen ist bei einer solchen Entfernung von der reflectirenden Wand durch den mangelhaften Parallelismus des einfallenden Lichtes (vgl. p. 213) ausgeschlossen.

Gäbe es also auch für das nähere Häutchen keine Wir-

kung stehender Wellen, so müssten die beiden Bilder gleich ausfallen.

Der Versuch lehrt aber ein anderes. Fig. 4 gibt in der oberen Hälfte das Bild des dem Spiegel entfernter gelegenen, in der unteren des näher gelegenen Collodiumhäutchens wieder. Während das untere, wie bisher, scharfe Streifen aufweist, sind in der oberen auf den ersten Blick überhaupt keine Interferenzstreifen wahrzunehmen. Nur bei genauem Zusehen kann man noch eben Anzeichen davon bemerken. Dass dies nicht von einem unscharfen Spectralbild herrührt, erkennt man an dem Vorhandensein der Spectrallinien. Es kam ausserdem bei den gewählten Versuchsbedingungen auf einige Millimeter bei der Einstellung der Platten nicht an.

Der wahre Grund für das Fehlen der Streifen ist nicht schwer zu finden. Den Interferenzen der in Collodium an Luft und in Luft an Silber reflectirten Bündel mangelt schon deshalb die Schärfe, weil die Reflexion am Silber diejenige im Collodium an Stärke bedeutend übertrifft; über diese ohnehin matte Interferenzerscheinung deckt sich aber im Collodiumhäutchen noch die ganze Intensität des einfallenden Lichtes. Kein Wunder also, dass dabei eine deutlich erkennbare Streifenbildung nicht entstehen kann. Wenn trotzdem auf dem anderen, dem Spiegel näher gelegenen Häutchen scharf ausgeprägte Streifen vorhanden sind, so muss man zugeben, dass hier die Wirkung der stehenden Lichtwellen vorliegt.

Versuch zu Fig. 5.

Der wesentliche Unterschied zwischen stehenden Wellen und der Interferenz fortschreitender Wellen, welcher schon durch diese Bezeichnungen ausgedrückt ist, gibt einen weiteren Versuch an die Hand.¹⁾ Bei den letzteren schreitet der reflectirte Strahl mit gleich bleibender Intensität voran, während nebeneinander liegende Strahlen verschiedene Intensität besitzen.

Anders bei den stehenden Wellen. Hier herrscht die gleiche Intensität an allen Punkten einer zur reflectirenden Fläche parallelen Ebene, während sie längs eines reflectirten Strahles von Ort zu Ort wechselt.

1) Vgl. Anmerkung auf p. 217.

Wählt man also die Dicke des empfindlichen Häutchens grösser als bisher, z. B. gleich einer halben Wellenlänge, so darf das an der Erscheinung, wenn allein durch Interferenzen fortschreitender Wellen hervorgerufen, nichts ausmachen. Maxima und Minima müssen in der gleichen Weise wie zuvor ausgebildet sein.

Anders, wenn die Erscheinung in erster Linie durch stehende Wellen erzeugt ist. Schwingungsbäuche und Knoten müssen dann an jeder Stelle des Häutchens in seiner Dickenausdehnung gleichzeitig Platz finden, da der Abstand eines Schwingungsbauches vom benachbarten -Knoten nur eine viertel Wellenlänge beträgt; ja sogar sämtliche Schwingungszustände zwischen diesen Extremen müssen an jeder Stelle eines Häutchens von Halbwellenlänge Dicke vertreten sein. Es wird also dann der bereits in der Einleitung (p. 204) besprochene Fall eintreten, dass ein solches Häutchen eine gleichförmige Schwärzung aufweist, da das aus verschiedenen Tiefen desselben kommende Licht sich für den Beobachter übereinander deckt. Diese Schlussfolgerung wird durch folgenden Versuch bestätigt.

Eine Glasplatte wurde zur Hälfte mit einer dickeren Colloidiumschicht von etwas über Halbwellenlänge Dicke (ca. $0,6 \lambda_H$ im Colloidium), zur Hälfte mit einer dünnen Schicht wie früher überzogen. Die reflectirende Wand bildete wieder ein Silberspiegel.

Fig. 5 zeigt das Ergebniss. Die untere Hälfte¹⁾ derselben entspricht der dickeren, die obere der dünneren Colloidiumschicht. Auf letzterer erkennt man die Streifen, wie früher, während die andere Hälfte eine gleichförmige Lichtwirkung aufweist. Das Originalbild gestattet auch auf dieser Hälfte noch die Spectralstreifen zu unterscheiden — was auf dem vorliegenden Abdruck nicht mehr möglich — während von den Interferenzstreifen keine Spur zu finden ist. Dieselben hätten, da sie weiter als die Spectrallinien auseinanderliegen, noch leichter erkennbar sein müssen. Der

1) Die grössere Helligkeit auf dieser ganzen Hälfte ist durch die grössere Dicke und die dadurch gesteigerte Empfindlichkeit des Colloidiumhäutchens bedingt; infolge dessen wirkte hier das Nebenlicht störender, welches bei den dünnen Häutchen nicht in Betracht kam.

Versuch durfte nicht in dieser Weise ausfallen, wenn die Erscheinung durch die Interferenz fortschreitender Wellen allein zu Stande kam. Er findet nur seine Erklärung durch die Annahme stehender Wellen, welche eben bei der Dicke des Häutchens eine Uebereinanderlagerung der Wirkung von Schwingungsbäuchen und -Knoten hervorbringen.

Versuch zu den Figuren 6 und 7.

Das wirksamste Mittel zur Beseitigung jedes Einwandes, welcher aus der im Collodium stattfindenden Reflexion entspringt, war offenbar die Beseitigung dieser Reflexion selbst.

Dazu wurde zwischen das Collodiumhäutchen und den Spiegel eine Flüssigkeit gebracht. Als solche diente Benzol mit einem Brechungsindex für die Linie D gleich 1,50. Für dieselbe Linie wurde der Brechungsindex des verwendeten Chlorsilbercollodiums in festem Zustande mit Hilfe des Abbe'schen Totalreflectometers gleich 1,53 bis 1,54 gefunden; derjenige der Glasplatte, welche das Collodiumhäutchen trug, war gleich 1,53. Für das brechbarere Licht, welches bei den Versuchen zur Verwendung kam, wurde der Unterschied der Brechungsindizes noch etwas geringer, da Benzol eine grössere Dispersion als Chlorsilbercollodium und Glas besitzt; diese letzteren Körper stimmten untereinander merklich in der Dispersion überein.

Die Amplitude der jetzt noch im Collodium an Benzol stattfindenden Reflexion berechnet sich demnach zu etwa $\frac{1}{100}$ der Amplitude des einfallenden Lichtes, eine Grösse, der hier keine Bedeutung mehr zukommt.

Damit konnte die lichtempfindliche Schicht als in einen mit ihm optisch nahe homogenen Körper eingebettet, und jede störende Reflexion für beseitigt gelten.

Thatsächlich gelingt es bei einem derartigen Plattenpaar, dessen Zwischenraum mit Benzol ausgefüllt war, nicht mehr — weder im Natriumlicht, noch in spectral zerlegtem Licht — die Interferenzen dünner Blättchen wahrzunehmen.

Es fragte sich jetzt, ob auch unter diesen Umständen die photographischen Streifen auftreten. Dem Versuch setzten sich zwei Schwierigkeiten entgegen. Erstens verändert die Flüssigkeit durch capillare Kräfte leicht den Abstand

und die Neigung der Platten gegeneinander während des Exponirens. Dies tritt besonders dann ein, wenn sie Gelegenheit zum Verdunsten hat. Die Flüssigkeit wurde deshalb nach aussen mittelst eines Kittes abgesperrt. Dazu diente mit Erfolg ein eisenoxydhaltiger Wachs- und Colophoniumkitt (sogenannter Mendelejeff-Kitt), der zugleich die Platten in ihrer gegenseitigen Lage festhielt.

Eine zweite Schwierigkeit tritt bei der Entwicklung des Häutchens auf, welche in Gegenwart von Benzol nicht sauber vollzogen werden kann. Das Benzol wurde deshalb zunächst durch Alkohol entfernt, der Alkohol hinwieder durch Wasser. Erst dann wurde zum Entwickeln der Platte geschritten. Waren diese Vorsichtsmassregeln aber gut befolgt, so erhielt man jetzt die *photographischen Streifen in derselben Schärfe wie früher*.

Zur Gegenprobe für die ausreichende Beseitigung der störenden Reflexion durch das Benzol wurde die reflectirende Platte in gleicher Weise wie bei dem Versuch zu den Figuren 2 und 3 zur einen Hälfte von ihrer Silberbelegung entblösst, sodass hier die Reflexion an Glas stattfand. Da dieses fast den gleichen Brechungsexponenten wie das Chlor-silbercollodium besass (s. p. 223), so musste, falls eine merkliche Reflexion im Collodium an Benzol noch stattfand, auch in Benzol an Glas eine solche erfolgen. Es hätten dann also auch dem Glas gegenüber auf dem Häutchen Streifen sich bilden müssen. Das Ausbleiben der Streifen an dieser Stelle dagegen war ein Beweis für die hinreichende Vernichtung der störenden Reflexion.

Die Figuren 6 und 7¹⁾ zeigen das Ergebniss des Versuches. Die oberen Felder geben die Bilder auf den empfindlichen Häutchen wieder, die dem Glas — die unteren, die dem Silber gegenüberstanden. Während auf den ersteren keine Streifen wahrgenommen werden können, weisen die

1) Die beiden Figuren dienen einander zur Ergänzung. Auf Fig. 6 sind die Minima der unteren Hälfte, auf Fig. 7 die ganze obere Hälfte insbesondere die beiden H-Linien besser ausgeprägt. Man sieht daraus, dass Streifen, wenn überhaupt vorhanden, hier auch erkennbar sein würden. Andererseits hat gerade Fig. 7 mehr schadhafte Stellen, worauf schon oben hingewiesen wurde.

letzteren solche in der gleichen Weise wie bei den früheren Versuchen auf. Das Fehlen der Streifen in den oberen Hälften beweist die optische Homogenität der vor dem Spiegel gelegenen Körper. Die unteren Hälften geben somit *das Ergebniss der Lichtwirkung auf ein empfindliches Häutchen, das, in ein optisch homogenes Medium eingebettet, sich vor einem Silberspiegel befindet. Auf ein solches wirkt nur noch das einfallende und das am Spiegel zurückgeworfene Licht. Diese beiden Lichtbündel erzeugen also die scharf hervortretenden Interferenzstreifen der unteren Hälften der Figuren 6 und 7. Somit ist die Interferenz von einfallendem und reflectirtem Licht unmittelbar nachgewiesen, d. h. das Vorhandensein der stehenden Lichtwellen.*

§ 4. Die Lage der Schwingungsknoten und -Bäuche zur spiegelnden Fläche und die Frage nach der absoluten Phasenänderung des Lichtes bei senkrechter Reflexion (Fig. 8 u. 9).

Nachdem nachgewiesen war, dass man wirklich mit Hülfe des dünnen lichtempfindlichen Häutchens stehende Lichtwellen untersuchen kann, dachte ich zunächst daran, mit diesem Hilfsmittel die Entscheidung der alten Streitfrage nach der absoluten Phasenänderung des senkrecht reflectirten Lichtes herbeizuführen. Die bisherigen Versuche waren daran gescheitert, dass es nicht glückte, den Schwingungssinn des reflectirten Lichtes unmittelbar mit demjenigen des einfallenden zu vergleichen. Diese Möglichkeit lag jetzt vor. Wird der Schwingungssinn durch die Reflexion umgekehrt, so wirkt unmittelbar an der reflectirenden Fläche die zurückgeworfene Welle der einfallenden entgegen; und es muss daselbst ein Schwingungsknoten entstehen. Wird der Schwingungssinn aber bei der Reflexion nicht umgekehrt, so unterstützen sich in unmittelbarer Nachbarschaft der reflectirenden Fläche die einfallende und zurückgeworfene Welle; und es muss daselbst ein Schwingungsbauch entstehen.

Zur Entscheidung wurde eine mit dem empfindlichen Häutchen überzogene Glasplatte auf eine schwach gekrümmte Glaslinse so stark aufgepresst, bis die Mitte der dabei entstehenden Newton'schen Ringe im reflectirten Licht dunkel erschien und auch bei weiterem Pressen dunkel blieb — ein

Zeichen dafür, dass sich jetzt die Platten an dieser Stelle berührten. Die Rückseite der Linse wurde wieder zur Abschwächung der Reflexion schwarz lackirt.

Nach Belichtung mit spectral zerlegtem Licht und Entwicklung entstand auf dem Häutchen ein Ringsystem, dessen Centrum, wie aus den Figuren 8 und 9 zu ersehen, einem Minimum der Lichtwirkung entspricht. Die Ringe sind bei den helleren Stellen der Figuren weniger scharf ausgebildet. Dies erklärt sich aus dem Umstand, dass die Reflexion bei dem vorliegenden Versuch nicht wie bei den meisten früheren an Silber, sondern an Glas stattfand. Die unter den gleichen Versuchsbedingungen entstandenen Streifen auf den unteren Hälften der Figuren 2 und 3 lassen das gleiche erkennen, worauf schon früher hingewiesen wurde.

Gegen die Beweiskraft vorliegenden Versuches könnte man einen Einwand erheben wegen der dabei im Collodium an Luft stattfindenden Reflexion. Indess nehme ich hier als durch die früheren Versuche bereits erwiesen an, dass die Interferenz einfallenden und reflectirten Lichtes bei dem auf dem Häutchen entstehenden Bild zum Ausdruck kommt. Dann wird sich aber auch die Amplitude des im Collodium an Luft reflectirten Lichtes zu der des einfallenden Lichtes addiren oder subtrahiren. Da dies längs der ganzen Fläche des Häutchens in der gleichen Weise geschieht und die reflectirte Amplitude nur einen kleinen Bruchtheil der einfallenden ausmacht, so ist der Erfolg der Reflexion im Collodium der gleiche, als ob die Amplitude des einfallenden Lichtes ein wenig geändert worden wäre. Auch nach dieser Aenderung bleibt dieselbe auf alle Fälle grösser, als die Amplitude des an der gekrümmten Glasfläche reflectirten Lichtes. Die Reflexion im Collodium kann demnach wohl eine Aenderung in der Intensität des ganzen Bildes, keinesfalls aber eine Vertauschung der Maxima und Minima, auf deren Lage es hier ankommt, zur Folge haben.

Ein anderer Einwand könnte vielleicht daraus entspringen, dass das Häutchen an der Stelle des Centrums der Ringe längere Zeit gepresst wird, wodurch ein Unterschied in der Empfindlichkeit oder Entwicklungsfähigkeit entstehen könnte. Dieser Einwand wird durch *Messung der Abstände*

der Stellen maximaler und minimaler Lichtwirkung von der reflectirenden Fläche an anderen Punkten als der Mitte der Ringe beseitigt.

Zu diesem Zwecke wurden vor der wirksamen Belichtung des Plattenpaares die dunkeln Ringe im senkrecht reflectirten Natriumlicht gemessen, in einem Falle zur Controle auch nach der Belichtung mit einem innerhalb der Beobachtungsfehler übereinstimmenden Ergebniss. Sodann wurden auch die bei der photographischen Entwicklung des Häutchens entstandenen Ringe der Messung unterzogen, und zwar längs eines Durchmessers derselben, welcher der Belichtung durch die nämliche Spectralfarbe ausgesetzt gewesen war. Längs des gleichen Durchmessers hatte vorher die Messung der Newton'schen Ringe im Natriumlicht stattgefunden.

Diese Messung der Newton'schen Ringe erlaubt die Entfernung des Häutchens von der reflectirenden Fläche an jedem Punkte zu bestimmen. Denn z. B. an den Punkten des ersten dunklen Ringes im senkrecht reflectirten Natriumlicht beträgt jene Entfernung $\frac{1}{2}\lambda_{\text{Na}}$, an den Punkten des zweiten $\frac{3}{2}\lambda_{\text{Na}}$ u. s. f.¹⁾

Es wurden nun in geeignetem Maassstabe diese Abstände als Abscissen und die zugehörigen Ringweiten als Ordinaten aufgetragen und die erhaltenen Punkte durch eine Curve verbunden. Diese Curve gestattete also zu jedem gegebenen Abstand des Häutchens vom Spiegel die zugehörige Ringweite zu finden. Dies war nöthig, weil für die Weite der photographisch entwickelten Ringe nicht die Wellenlänge des Natriumlichtes, sondern der bei der Belichtung wirksamen Farbe im Violetten (λ) massgebend war. Und zwar erforderte der vorliegende Zweck die Kenntniss der Ringweiten, welche Abständen des Häutchens vom Spiegel gleich einem Vielfachen von $\lambda/4$ entsprachen.

Diese der Curve entnommenen Ringweiten sind zum Vergleich mit den gemessenen Weiten der photographischen Ringe in den folgenden Tabellen zusammengestellt und zwar die letzteren in den ersten Spalten als „gemessene“, die

1) Dies ist bekanntlich eine Thatsache und nicht abhängig von einer besonderen Theorie.

ersteren in den zweiten Spalten als „graphisch interpolirte“ bezeichnet. Die dritten Spalten geben die zu den interpolirten Ringweiten zugehörigen Abstände des empfindlichen Häutchens vom Spiegel in Viertelwellenlängen der wirklichen Farbe (λ).

Die beiden Tabellen entsprechen zwei verschiedenen Versuchen und erforderten daher auch zwei verschiedene Curven zur Interpolation, da ja die gleichen Newton'schen Ringe bei der verschiedenen Krümmung der Platten gegeneinander in beiden Fällen verschieden weit waren. Bei dem einen, der Tab. 1 entsprechenden Versuch (Fig. 9) wurde die Weite der photographischen Ringe nur für solche maximaler Lichtwirkung, bei dem anderen der Tab. 2 entsprechenden Versuch (Fig. 8) auch für solche minimaler Lichtwirkung gemessen.

Tabelle 1.

Gemessene Ringweiten für Stellen maximaler Lichtwirkung ($\lambda = 399 \mu\mu$)	Graphisch interpolirte Ringweiten, entsprechend den in der dritten Spalte gegebenen Abständen des empfindlichen Häutchens vom Spiegel	Abstände ($\lambda = 399 \mu\mu$)
3,4 mm	3,1 mm	$1 \lambda/4$
	4,3 „	$2 \lambda/4 = 1 \lambda/2$
5,1 „	5,1 „	$3 \lambda/4$
	5,8 „	$4 \lambda/4 = 2 \lambda/2$
6,3 „	6,4 „	$5 \lambda/4$
	6,9 „	$6 \lambda/4 = 3 \lambda/2$

Tabelle 2.

Gemessene Ringweiten für Stellen maximal., minimal. Lichtwirkung ($\lambda = 409 \mu\mu$)	Graphisch interpolirte Ringweiten, entsprechend den in der dritten Spalte gegebenen Abständen des empfindlichen Häutchens vom Spiegel	Abstände ($\lambda = 409 \mu\mu$)
4,4 mm	4,1 mm	$1 \lambda/4$
	5,2 „	$2 \lambda/4 = 1 \lambda/2$
5,9 „	5,9 „	$3 \lambda/4$
	6,5 „	$4 \lambda/4 = 2 \lambda/2$
7,0 „	7,0 „	$5 \lambda/4$
	7,5 „	$6 \lambda/4 = 3 \lambda/2$

Wie man sieht, sind die auf gleicher Höhe stehenden Zahlen der ersten und zweiten Spalte fast identisch. Die Abweichungen in der obersten Reihe erklären sich sehr wahrscheinlich daraus, dass hier die Zahl der zweiten Spalte

durch Extrapolation und nicht durch Interpolation gefunden ist; denn der engste im Natriumlicht gemessene Ring entspricht der Dicke $\lambda_{\text{Na}}/2$, während jene obersten Zahlen der zweiten Spalten zu der Dicke $\lambda/4$ gehören, wobei $\lambda = \text{ca. } \frac{2}{3}\lambda_{\text{Na}}$. Die beiden Platten sind aber gerade hier, in der Nähe ihrer Berührungsstelle, am stärksten deformirt. Die beiden Tabellen lehren demnach das Folgende:

Bei Reflexion am optisch dichteren Medium befinden sich die Stellen minimaler Lichtwirkung der stehenden Lichtwellen in Abständen gleich dem Vielfachen einer halben Wellenlänge von der reflectirenden Fläche; die Stellen maximaler Lichtwirkung liegen inmitten dazwischen, nämlich in Abständen gleich dem ungeraden Vielfachen einer viertel Wellenlänge.

Damit in Uebereinstimmung ist das schon oben mitgetheilte Ergebniss, dass sich in der reflectirenden Fläche selbst ein Minimum der Lichtwirkung befindet.

Nimmt man an, dass die maximale Lichtwirkung der stehenden Wellen in den Schwingungsbäuchen, die minimale in den Schwingungsknoten stattfindet¹⁾, so folgt weiter: Bei Reflexion am optisch dichteren Medium liegen die Schwingungsknoten der stehenden Wellen in Abständen gleich dem Vielfachen einer halben Wellenlänge von der reflectirenden Fläche; die Schwingungsbäuche liegen inmitten dazwischen, nämlich in Abständen gleich dem ungeraden Vielfachen einer viertel Wellenlänge.

Da dann auch in der reflectirenden Fläche selbst ein Schwingungsknoten gelegen ist, so folgt, dass in dieser eine Umkehr des Schwingungssinnes bei der Reflexion erfolgen muss, d. i. in Uebereinstimmung mit der Fresnel'schen Theorie.

§ 5. Interferenz zweier sich rechtwinklig kreuzenden geradlinig polarisirten Lichtwellen, und die Frage nach der Schwingungsrichtung polarisirten Lichtes (Fig. 10—12).

Mit der Frage nach der Phasenänderung des senkrecht reflectirten Lichtes hängt diejenige nach der Schwingungsrichtung geradlinig polarisirten Lichtes aufs innigste zusammen (vgl. unten p. 239). Durch den zuletzt mitgetheilten Versuch schien die erste Frage im Fresnel'schen Sinne entschieden. Dann war auch die Antwort auf die zweite im

1) Eingehenderes darüber siehe unten p. 236.

gleichen Sinne zu erwarten. Indess schien mir diese Frage wichtig genug, um eine unmittelbare Entscheidung durch das Experiment zu verlangen. Die folgende Ueberlegung führte zu dem weiterhin mitgetheilten Versuch.¹⁾

Man denke sich ein Bündel geradlinig polarisirter Lichtstrahlen unter einem Einfallswinkel von 45° auf einen ebenen Spiegel auftreffen; dabei mögen zunächst die Lichtschwingungen senkrecht zur Einfallsebene, d. i. parallel zu dem Spiegel erfolgen; dann müssen dieselben auch nach der Reflexion dem Spiegel parallel verlaufen. Die Schwingungen des einfallenden und reflectirten Lichtes sind dann gleichfalls einander parallel, und es müssen deshalb sich durchkreuzende Strahlen des einfallenden und reflectirten Bündels miteinander zur Interferenz gelangen in der Weise, dass je nach dem Gangunterschied der Wellen eine gegenseitige Zerstörung oder Verstärkung der Schwingungen stattfindet. In diesem Falle muss also wie bei der normalen Incidenz ein Wechsel der resultirenden Schwingungsintensität von Ort zu Ort mit dessen Abstand vom Spiegel eintreten.

Anders, wenn die Schwingungen des unter 45° einfallenden Lichtes in der Einfallsebene selbst erfolgen. Die Schwingungen des reflectirten Lichtes finden dann gleichfalls in dieser statt. Da aber die einfallende und reflectirte Welle bei einer Incidenz von 45° auf einander senkrecht stehen, so müssen dann auch die Schwingungsrichtungen der beiden Wellen zu einander senkrecht verlaufen. Die beiden Schwingungen sich kreuzender Strahlen werden jetzt zwar ebenfalls sich zu einer einzigen zusammensetzen, aber eine Interferenz in der Weise, dass eine gegenseitige Vernichtung oder Unterstützung der Schwingungen eintreten könnte, ist ausgeschlos-

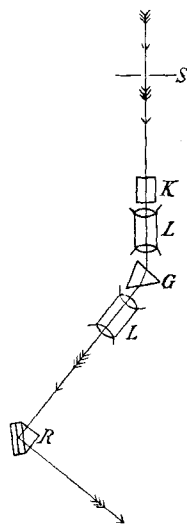
1) Nachdem mir dieser Versuch bereits geglückt war, erfuhr ich durch private Mittheilung, dass Hr. Dr. Wilhelm Zenker einen ähnlichen Versuch, auf gleicher Ueberlegung fussend, schon im Jahre 1867 vorgeschlagen — aber nicht ausgeführt — und dafür von der Pariser Akademie eine Medaille erhalten hat (s. Compt. rend. **66**, p. 932—934 und p. 1255; **67**, p. 115. 1868). Zenker empfiehlt als Untersuchungsmethode gleichfalls die Photographie, meint aber, im Gegensatz zu dem hier beschriebenen Verfahren, man könne dicke Schichten benutzen und solle die darauf entstehenden, um nicht ganz Wellenlänge von einander entfernten Interferenzstreifen mit dem Mikroskop untersuchen.

sen. Die resultirende Schwingungsintensität bleibt stets gleich der Summe der Intensitäten der zu einander senkrechten Componenten, welchen Gangunterschied auch diese gegeneinander haben mögen. In diesem Falle ist also die resultirende Intensität an jedem Ort die gleiche, unabhängig von dessen Entfernung vom reflectirenden Spiegel.

Denkt man sich nun wie bei früheren Versuchen in der Nähe des Spiegels, schwach gegen denselben geneigt, ein lichtempfindliches Häutchen angebracht, so sind für die beiden Fälle verschiedene Ergebnisse zu erwarten. Im ersten, bei dem einfallendes und reflectirtes Licht parallel schwingen, und infolge dessen Interferenz eintritt, müssen wie früher beim Entwickeln des Häutchens Streifen entstehen; im zweiten kann dies nicht eintreten, weil hier eine Interferenz der beiden Wellen, da sie zu einander senkrecht schwingen, ausgeschlossen ist.

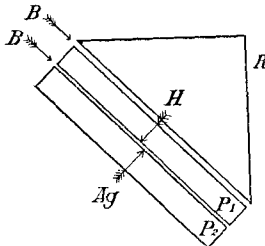
Auf dieser Ueberlegung fusst der folgende Versuch. Zwischen Spalt und erster Linse der früheren Versuchsanordnung wurde ein Kalkspathprisma *K* eingeschaltet (siehe beistehende Figur), sodass an Stelle des einen Spectrums zwei vertical übereinanderliegende Spectra traten. Zur Vermeidung eines Uebereinandergreifens derselben war der Spalt etwas verkürzt worden. Die beiden Spectra enthielten geradlinig polarisirtes Licht, dessen Polarisationssebene im einen horizontal, im anderen vertical lag.

Um bequem einen Einfallswinkel von 45° zu erzielen, bediente ich mich eines rechtwinkligen Glasprismas, auf dessen eine Kathetenfläche das Licht senkrecht aufiel. Dann wurde die Hypotenusenfläche von demselben unter 45° getroffen. Auf diese Fläche wurde das Plattenpaar der früheren Versuche aufgekittet (siehe umstehende Figur, p. 232), nachdem zuvor zwischen Prisma und Platten Benzol gebracht war, um eine Totalreflexion des Lichtes zu vermeiden.



S : Spalt.
K : Kalkspathprisma.
L : Achrom. Linsensysteme.
G : Gleichseit. Glasprisma.
R : Rechtwinkliges Glasprisma mit Doppelpolplatten.

Zum gleichen Zwecke war auch der Zwischenraum zwischen dem Häutchen und dem Silberspiegel mit Benzol ausgefüllt worden. Da die sämtlichen so zusammengefügtten Körper,



- R* : Rechtwinkliges Glasprisma.
*P*₁ : Glasplatte mit lichtempfindlichem Häutchen (*H*).
*P*₂ : Glasplatte mit Silberspiegel (*Ag*).
B : Benzol zwischen den Platten.

Prisma, Benzol, Glasplatte, Colloidumhäutchen annähernd übereinstimmende Brechungsverhältnisse hatten, so stellten sie einen *nahe optisch homogenen Körper* dar, welcher im wesentlichen nur vom einfallenden und dem vom Silberspiegel zurückgeworfenen Licht durchsetzt wurde. In dem davor befindlichen Colloidumhäutchen durchdringen sich demnach zwei rechtwinklig gekreuzte Lichtwellen, deren Schwingungen längs eines Flächenstückes

des Häutchens miteinander parallel, längs des anderen zu einander senkrecht erfolgten.

Einstellung der Platten. — Um den Polarisations Ebenen der aus dem Kalkspathprisma austretenden beiden Bündel die Richtung parallel und senkrecht zum Spalt zu geben, wurde dasselbe um eine horizontale Axe so weit gedreht, bis die identischen Linien der beiden Spectralbilder ihre gegenseitige Verlängerung bildeten.

Zur Orientirung des rechtwinkligen Prismas sammt Plattenpaar wurde dasselbe auf das Tischchen eines Spectrometers gesetzt und mit seinen Flächen zur Axe desselben parallel eingestellt. Mit Hülfe der Fusschrauben konnte der Axe des ganzen Apparates eine zur Richtung der einfallenden Strahlen senkrechte Lage gegeben werden. Durch eine Drehung des Tischchens gelangte dann die eine Kathetenfläche des Prismas in eine solche Lage, dass sie das einfallende Lichtbündel in sich selbst zurückwarf. Da indess die beiden aus dem Kalkspathprisma austretenden Strahlenbündel einen kleinen Winkel einschliessen, konnte die ganze Orientirung nur für das eine Bündel genau vollzogen werden. Aus später leicht ersichtlichen Gründen geschah dies für das senkrecht zur Einfallsebene polarisirte Bündel.

Dieser Orientirung zufolge durchsetzte das Licht die Hypothenusenfläche des Prismas unter 45° und somit auch

das ihr parallele Collodiumhäutchen annähernd unter demselben Winkel, da der Brechungsexponent des Collodiumhäutchens mit ca. 1,53 von dem des Prismas mit 1,52 (für D) nahe zusammenfiel.

Zuletzt war noch das Plattenpaar in eine solche Entfernung von der projicirenden Linse zu rücken, dass das Spectralbild auf dem Häutchen entworfen wurde. Da die Ebene des letzteren gegen das einfallende Lichtbündel unter 45° geneigt war, so konnte dies genau nur für eine Farbe erreicht werden, wozu die Stelle maximaler photographischer Wirkung im Spectrum ausersehen wurde. Zur Einstellung des Häutchens war auf dem ihm anliegenden Silberspiegel ein kleines Kreuz¹⁾ eingeritzt. Dasselbe konnte durch die zweite von den reflectirten Strahlen durchsetzte Kathetenfläche des rechtwinkligen Prismas beobachtet und mittelst Parallelverschiebung des ganzen Apparates so orientirt werden, dass es gegen die im Spectrum sichtbaren Linien keine Parallaxe zeigte.

Die ganze Orientirung war, so weit thunlich, schon vor Einsetzen des empfindlichen Häutchens vorbereitet. Die endgültige Einstellung geschah möglichst rasch mit sehr eng geschraubtem Spalt. Die dabei stattfindende Belichtung kam bei der Expositionsdauer von etwa einer halben Stunde bei weiter geöffnetem Spalt nicht in Betracht.

Versuchsergebniss (Fig. 10 und 11).

Die Figuren 10 und 11 stellen Bilder dar, welche auf zwei unter den beschriebenen Bedingungen belichteten Häutchen beim Entwickeln entstanden. Man gewahrt auf jedem zwei übereinander liegende Spectra. Dabei lag die *Polarisationsebene für die oberen Spectren zur Einfallsebene parallel, für die unteren zu derselben senkrecht. Wie man sieht, sind die ersteren von scharfen Interferenzstreifen durchzogen, während die unteren keine solchen aufweisen.*²⁾

1) Dieses bildete sich auf dem Häutchen ab und ist auf den unteren Feldern der Figuren 10—12 erkennbar.

2) Fig. 10 zeigt die ganze Erscheinung deutlicher; Fig. 11 hat dagegen den Vorzug der schärferen Einstellung der Spectralstreifen; die Orientirung des Häutchens scheint dagegen hier nicht so genau gewesen zu sein, da bei aufmerksamem Betrachten auch auf dem unteren Feld Streifen bemerklich sind, wenn auch nur sehr schwach angedeutet (vgl. das Folgende).

Die Bildung der Streifen tritt also ein, wenn die Polarisationssebene mit der Einfallsebene zusammenfällt; sie bleibt aus, wenn die erstere zur letzteren senkrecht steht.

Das exacte Gelingen dieses Versuches hängt von der richtigen Orientirung des Häutchens ab. Ich hatte bei den ersten Versuchen der Art auf diesen Umstand nicht geachtet und erhielt infolge dessen auch in dem anderen Spectrum Streifen, wenn auch nur ganz verwaschene. Als ich indess die Orientirung in der beschriebenen Weise ausführte, wobei die Abweichung des Einfallswinkels von 45° wohl höchstens 2° betragen mochte, entstanden die in den Fig. 10 u. 11 wiedergegebenen Bilder.

Bei einem weiteren Versuch drehte ich absichtlich das Häutchen aus der richtigen Lage um etwa 6° heraus. Dies hatte zur Folge, dass die Streifen auch in dem Spectrumbild, dessen zugehörige Polarisationssebene zur Einfallsebene senkrecht stand, wieder auftraten, nur weniger deutlich, als im anderen Spectrum.

Versuch zu Fig. 12.

Um mich auch hier zu überzeugen, dass die geringe noch verbleibende Reflexion im Collodium an Benzol nicht von störendem Einfluss ist, wurde ähnlich wie bei einem früheren Versuch bei senkrechter Incidenz (zu Fig. 6 und 7) die reflectirende Silberschicht zur Hälfte entfernt, sodass an der entblössten Stelle die Reflexion an Glas stattfand. Die Glasplatte wurde hier wieder auf der Rückseite schwarz lackirt. Die Reflexion in Benzol an Glas kommt derjenigen in Collodium an Benzol annähernd gleich (s. p. 223). Wäre dieselbe von merklichem Betrag, so müsste sie Anlass zu Streifenbildung auf dem empfindlichen Häutchen geben; wo nicht, so ist hier das einfallende Licht das einzig wirksame und es können keine Streifen auftreten.

Für diesen Versuch wurde das Kalkspathprisma der vorigen Anordnung durch ein Nicol ersetzt, welches zur Einfallsebene parallel polarisirtes Licht auf das Plattenpaar gelangen liess. Fig. 12 zeigt das Versuchsergebniss; das obere Feld der Figur entspricht der Reflexion an Glas, das untere derjenigen an Silber. Während auf dem letzteren

genau so, wie auf den oberen Partien der Figuren 10 und 11 die Streifen scharf ausgebildet sind, können auf dem anderen Feld der Fig. 12 keine solchen, oder wenigstens nur schwache Andeutungen davon wahrgenommen werden, zum Zeichen dafür, dass die Reflexion in Benzol an Glas und mithin diejenige im Collodium am Benzol auch bei einem Einfallswinkel von 45° nicht von Belang ist.

Formulirung des Versuchsergebnisses.

Wie schon oben gesagt, und wie die Figuren 10 und 11 beweisen, tritt die Streifenbildung ein, wenn die Polarisationssebene des einfallenden Lichtes mit der Einfallsebene zusammenfällt, sie bleibt aus, wenn die erstere zur letzteren senkrecht steht. Mit anderen Worten:

Wenn sich zwei geradlinig polarisirte, cohärente Lichtwellen unter rechtem Winkel durchkreuzen, so erfährt ein an der Kreuzungsstelle aufgestelltes lichtempfindliches Häutchen eine mit dem Gangunterschied periodisch wechselnde chemische Lichtwirkung, wofern die Polarisationssebenen der beiden Wellen zusammenfallen, dagegen erfolgt eine vom Gangunterschied unabhängige, gleichförmige Lichtwirkung, wenn die Polarisationssebenen der Wellen aufeinander senkrecht stehen.

Dies der unmittelbare Ausdruck der Thatsachen. Um in den Vorgang tiefer einzudringen, erinnere ich an die eingangs dieses Paragraphen angestellte Ueberlegung. Dieselbe hatte dargethan, dass die Interferenz der beiden Wellen dann ausgeschlossen ist, wenn ihre *Schwingungen in der Einfallsebene* stattfinden, da diese dann gegen einander in senkrechten Richtungen erfolgen. Der Versuch ergab nun, dass eine Interferenz thatsächlich nicht eintritt, wenn die *Polarisationsebene* der einfallenden Wellen *zur Einfallsebene senkrecht* steht. Zur gleichen Zeit erfolgen also die Schwingungen des einfallenden Lichtes in der Einfallsebene, während seine Polarisationssebene zu dieser senkrecht steht. Das heisst also: *die Lichtschwingungen stehen gleichfalls zur Polarisationssebene senkrecht.*

Diese Darstellung bedarf indess einer wesentlichen Erläuterung. Es sind ja nicht unmittelbar die Lichtschwingungen, sondern deren photographisch-chemische Wirkungen, die

beim Experiment in die Erscheinung treten. Die obige Darstellung wird also streng richtig erst, wenn man die „Lichtschwingungen“ ersetzt durch diejenigen Schwingungen, welche die photographisch-chemische Wirkung hervorbringen, oder kurz die „*chemisch wirksamen Schwingungen*“. Dabei bleibt unentschieden, was schwingt; ob das einfach materielle Theilchen sind oder verwickeltere Bewegungszustände oder Spannungszustände, die einem periodischen Wechsel längs einer bestimmten Richtung unterliegen. In diesem Sinne kann das Versuchsergebniss auf folgende Weise formulirt werden:

Die chemisch wirksamen Schwingungen einer geradlinig polarisirten Lichtwelle stehen auf deren Polarisationsebene senkrecht.

Macht man die Annahme, dass die chemisch wirksamen Schwingungen mit den Lichtschwingungen selbst zusammenfallen, so folgt weiter: die Lichtschwingungen stehen zur Polarisationsebene senkrecht.

Das ist wieder in Uebereinstimmung mit der Fresnel'schen Theorie.

§ 6. Ergebnisse der Versuche für die Theorien des Lichtes.

I. für die mechanischen Lichttheorien.

Der Einfachheit der Darstellung halber sprach ich bisher kurzweg von Lichtschwingungen und verstand darunter in Uebereinstimmung mit der Grundannahme der mechanischen Lichttheorien die Schwingungsbewegungen desjenigen Mediums, welches die Fortpflanzung des Lichtes durch den sogenannten leeren Raum vermittelt. Die beiden Hauptvertreter dieser Theorien gelangen nun bekanntlich bezüglich der absoluten Phasenänderung des senkrecht reflectirten Lichtes und bezüglich der Schwingungsrichtung geradlinig polarisirten Lichtes zu verschiedenen Ergebnissen. Die in den beiden letzten Paragraphen mitgetheilten Versuche scheinen im Fresnel'schen Sinne zu entscheiden. Um diese Folgerung streng zu machen, musste in beiden Fällen noch eine Annahme zugezogen werden.

Für den ersten Streitpunkt hatte sich als unmittelbarer Ausdruck der Thatfachen ergeben, dass bei senkrechter Reflexion am optisch dichteren Medium ein Minimum der

Lichtwirkung der stehenden Wellen unmittelbar an der reflectirenden Fläche lag, dass hier ein Knotenpunkt der chemisch wirksamen Schwingungen auftrat. Um hieraus den Schluss ziehen zu können, dass die Schwingungsrichtung des Lichtes bei der Reflexion umgekehrt wird, muss man offenbar die Annahme zuziehen, dass die Minima der Lichtwirkung in den Schwingungsknoten der stehenden Lichtwellen liegen, dass die Knotenpunkte der chemisch wirksamen Schwingungen mit den Knotenpunkten der Lichtschwingungen zusammenfallen.

Für den zweiten Streitpunkt konnte aus dem Experiment mit Sicherheit gefolgert werden, dass die chemisch wirksamen Schwingungen einer geradlinig polarisirten Lichtwelle auf deren Polarisationssebene senkrecht standen. Das gleiche kann von den Lichtschwingungen selbst nur ausgesagt werden, wenn man annimmt, dass sie mit den chemisch wirksamen Schwingungen zusammenfallen.

Die Einsicht in diese Vorgänge kann noch einen Schritt weiter gefördert werden, wenn man den Lloyd'schen¹⁾ Versuch oder den bezüglich der zulässigen Folgerungen gleich bedeutenden Fresnel'schen Dreispiegelversuch²⁾ zuzieht. Beim Lloyd'schen Versuch gelangt bekanntlich die unmittelbar von einer Lichtquelle kommende Welle mit der bei streifendem Einfall an einem Spiegel zurückgeworfenen Welle zur Interferenz. Die Mitte der daraus entstehenden Interferenzerscheinung, welche gleichen Wegen der beiden Lichtwellen entspricht, bleibt dunkel. Daraus folgt, dass der Schwingungssinn des Lichtes bei streifender Reflexion am optisch dichteren Medium umgekehrt wird.

Hieraus kann aber für die Phasenänderung bei senkrechter Reflexion ohne weiteres ein Schluss nicht gezogen werden.³⁾ Dies hängt davon ab, von welcher Annahme über

1) Lloyd, Pogg. Ann. 45. p. 95. 1838.

2) Fresnel, Pogg. Ann. Ergbd. 2. p. 345. 1845.

3) Diesen Fehler hatte ich in einer früheren Arbeit (Wied. Ann. 31. p. 657. 1887) begangen. Hr. Voigt hat die Freundlichkeit gehabt, mich darauf aufmerksam zu machen (Wied. Ann. 35. p. 99. 1888) und dabei auf eine Arbeit Hrn. Mascart's (Journ. de phys. 8. p. 183. 1888) zu verweisen, welcher die oben folgende Darstellung über den Zusammenhang der Phasenänderung bei senkrechter Reflexion mit der Schwingungsrichtung des polarisirten Lichtes entnommen ist. Die Angabe Hrn.

die Schwingungsrichtung des polarisirten Lichtes man ausgeht. Bekanntermassen erleidet die Phasenänderung des senkrecht zur Einfallsebene *polarisirten* Lichtes bei stetig wechselndem Einfallswinkel im Augenblick des Durchgangs durch den Polarisationswinkel eine fast sprungweise Aenderung um eine halbe Schwingungsperiode. Betrachtet man also beispielsweise das senkrecht zur Einfallsebene *schwingende* Licht, dessen Phase dem Lloyd'schen Versuch zufolge bei streifender Reflexion um eine halbe Schwingungsperiode sich ändert, so wird daraus für die senkrechte Reflexion entweder die Phasenänderung einer ganzen Schwingungsperiode, d. i. gleich bedeutend mit der Phasenänderung Null, oder diejenige einer halben folgen: je nachdem beim Durchgang durch den Polarisationswinkel ein Sprung der Phasenänderung stattgefunden hat oder nicht.

Das hängt aber davon ab, ob das senkrecht zur Einfallsebene *schwingende* Licht auch für solches gilt, das senkrecht zu derselben *polarisirt* ist oder vielmehr in derselben. Neumann macht die erstere, Fresnel die letztere Annahme. Nach der ersteren erleidet deshalb das am optisch dichteren Medium senkrecht reflectirte Licht die Phasenänderung Null, nach der letzteren die Phasenänderung einer halben Schwingungsperiode.

Aus dieser Darlegung, welche, von jeder Theorie absehend, allein auf den Lloyd'schen Versuch und das Verhalten der Phasenänderung bei Reflexion unter dem Polarisationswinkel gestützt ist, wird ersichtlich, dass die Annahmen,

Voigt's, als hätte ich das Newton'sche Experiment der Farbenringe für entscheidend zwischen der Fresnel'schen und Neumann'schen Theorie angesehen, beruht auf einem Missverständniß. Dieses Experiment war an der citirten Stelle meiner Arbeit nur in dem Sinne angeführt, dass es die Phasenänderung Null für die Reflexion am optisch dünneren Medium ergäbe, wenn für die Reflexion am optisch dichteren die Phasenänderung einer halben Wellenlänge feststand, wobei eben das letztere als durch den Lloyd'schen Versuch bewiesen angesehen worden war. Die von Hrn. Voigt in der nämlichen Arbeit (Wied. Ann. **35**. p. 97. 1888) erhobenen Einwände gegen meine Versuche über die Phasenänderung bei sehr dünnen Metallschichten (Wied. Ann. **31**. p. 667. 1887) erachte ich nicht für zutreffend und behalte mir vor, an anderer Stelle darauf zurückzukommen.

welche über die Phasenänderung bei senkrechter Reflexion und über die Schwingungsrichtung des polarisirten Lichtes gemacht werden können, nicht voneinander unabhängig sind. Nimmt man an: Schwingungsrichtung zur Polarisationssebene parallel, so folgt: Phasenänderung bei senkrechter Reflexion am optisch dichteren Medium gleich Null; nimmt man aber an: Schwingungsrichtung zur Polarisationssebene senkrecht, so folgt: Phasenänderung gleich einer halben Schwingungsperiode.

Diese Beziehung ist auch für die beiden oben besprochenen Annahmen über das Verhältniss der Lichtschwingungen zu den chemisch wirksamen Schwingungen massgebend. Nimmt man die Parallelität der letzteren zu den Lichtschwingungen an, so ist man durch die Versuche gebunden, auch anzunehmen, dass die Schwingungsbäuche der Lichtwellen die maximale chemische Wirkung ausüben. Denn bei dieser Annahme lehrt der Versuch über die Interferenz rechtwinklig gekreuzter Lichtwellen (§ 5 p. 236), dass die Lichtschwingungen zur Polarisationssebene senkrecht stehen müssen. Daraus folgt vermöge des Lloyd'schen Versuches die Umkehr der Schwingungsrichtung bei senkrechter Reflexion am optisch dichteren Medium. Dann beweist aber der Versuch über die Entfernung der Punkte maximaler Lichtwirkung von der reflectirenden Fläche (§ 4 p. 229), dass die Knotenpunkte der stehenden Lichtwellen mit den Knotenpunkten der chemisch wirksamen Schwingungen zusammenfallen, d. h. also:

Aus der Annahme, dass die Lichtschwingungen mit den chemisch wirksamen Schwingungen zusammenfallen, folgt vermöge der Experimente, dass die maximale chemische Wirkung stehender Lichtwellen in den Schwingungsbäuchen derselben stattfindet, und umgekehrt.

Wollte man annehmen, dass die Lichtschwingungen auf den chemisch wirksamen Schwingungen senkrecht stehen, so müsste man auch zugeben, dass die maximale chemische Wirkung stehender Lichtwellen in den Schwingungsknoten stattfindet, und umgekehrt.

Man wird zugeben, dass von diesen beiden Annahmen sammt der jeweils daran geknüpften Folgerung die erstere eine anschaulichere Auffassung der in Rede stehenden Vor-

gänge gewährt; man wird sie denselben mit Recht zu Grunde legen, so lange nicht neue Thatsachen ein anderes beweisen. Thut man dies aber, so entscheiden die mitgetheilten Versuche in schlagender Weise im Sinne der Fresnel'schen Theorie: die Lichtschwingungen stehen zur Polarisations-ebene senkrecht.

II. Ergebnisse für die electromagnetische Lichttheorie.

Ehe ich zu den ersten Experimenten dieser Arbeit schritt, waren mir an deren Gelingen im Hinblick auf die electromagnetische Lichttheorie Zweifel aufgestiegen. Bekanntlich hat Hertz gezeigt, dass bei stehenden electromagnetischen Wellen die Schwingungsknoten der electricen Kräfte mit den Schwingungsbäuchen der magnetischen zusammenfielen. Wären nun beiderlei Kräfte in gleicher Weise an der chemischen Wirkung beteiligt gewesen, so hätten stehende Lichtwellen durch dieselbe nicht nachgewiesen werden können. Dass in Wirklichkeit nur die eine Art von Kräften chemische Wirkungen hervorbringen konnte, ist durch das Gelingen der Versuche dargethan. Es fragt sich nur noch, welche Kräfte.

Nach Hertz liegt nun ein Schwingungsknoten der electricen Kräfte nahezu in der reflectirenden Wand, die übrigen davon in Entfernungen gleich dem Vielfachen einer halben Wellenlänge. Diese Wand bestand aus einer metallischen Fläche. Zum Vergleich dieser Versuche mit den meinen wird man die Reflexion der electricen Schwingungen an der metallischen Wand mit der Reflexion des Lichtes am optisch dichteren Medium vergleichen müssen und nicht am optisch dünneren. Das erstere fand aber bei meinen entsprechenden Versuchen (§ 4) statt. Dieselben ergaben, dass ein Punkt minimaler chemischer Wirkung in der reflectirenden Fläche, die übrigen davon in Entfernungen gleich dem Vielfachen einer halben Wellenlänge lagen. Setzt man also Lichtwelle und electromagnetische Welle als gleichbedeutend, so folgt:

In den Schwingungsknoten der electricen Kräfte findet ein Minimum, in den Schwingungsbäuchen derselben ein Maximum der chemischen Wirkung statt; oder: die chemische Wirkung der

Lichtwelle ist an das Vorhandensein der Schwingungen der electricen und nicht der magnetischen Kräfte geknüpft.

Zu einem damit übereinstimmenden Ergebniss gelangt man, wenn man die Versuche von Trouton¹⁾ zum Vergleich mit den meinen heranzieht. Derselbe fand, dass electriche Schwingungen bei allen Einfallswinkeln an einer dicken Wand (Mauer) zurückgeworfen werden, wenn die *Schwingungen* zur Wand parallel, d. i. senkrecht zur Einfallsebene erfolgten; fanden sie *in der Einfallsebene* statt, so gab es einen Einfallswinkel, den Polarisationswinkel, bei welchem keine Reflexion eintrat. Da nun bekanntlich für die Reflexion des Lichtes beim Polarisationswinkel eine Auslöschung erfolgt, wenn seine *Polarisationsebene zur Einfallsebene senkrecht* steht, so folgt nach Trouton, dass die *Schwingungen der electricen Kräfte zur Polarisationsebene senkrecht stehen*. Nun haben aber meine Versuche (§ 5 p. 236) gezeigt, dass die *chemisch wirksamen Schwingungen einer geradlinig polarisirten Lichtwelle zu deren Polarisationsebene gleichfalls senkrecht stehen*. Die Vereinigung dieser beiden Sätze ergibt daher:

Die chemisch wirksamen Schwingungen und die Schwingungen der electricen Kräfte sind gleich gerichtet; oder auch in genauer Uebereinstimmung mit dem schon oben gefundenen Ergebniss: die chemische Wirkung der Lichtwelle ist an das Vorhandensein der Schwingungen der electricen und nicht der magnetischen Kräfte geknüpft.

Wenn sich das Ergebniss der vorliegenden Untersuchung in solch einfacher Weise mit der Sprache der electromagnetischen Lichttheorie ausdrücken lässt, so fehlt dieser Darstellung bei unserer Unbekanntschaft mit dem Wesen der Electricität doch die Anschaulichkeit. Während bei der electromagnetischen Lichttheorie die aufeinander senkrecht stehenden Schwingungen der electricen und magnetischen Kräfte einer geradlinig polarisirten Lichtwelle als gleichberechtigt erscheinen, treten bei dieser Untersuchung die zur Polarisationsebene senkrecht erfolgenden Schwingungen in den Vordergrund. In Anbetracht des Strebens der Physik, alle Erscheinungen als Bewegungsvorgänge auffassen zu ler-

1) Trouton, Nature **39**. p. 393. 1889.

Ann. d. Phys. u. Chem. N. F. **XL**.

nen, und insbesondere auch unserer Vorstellungen über die kinetische Natur der chemischen Zersetzung wird man die Wechselwirkung zwischen dem lichtvermittelnden Medium und den Körpertheilchen am leichtesten verstehen können, wenn man sich Schwingungen der letzteren durch gleichgerichtete Schwingungen des ersteren hervorgerufen denkt.

§ 7. Zusammenfassung und Schluss.

Durch vorstehende Arbeit wurde der experimentelle Nachweis für das Vorhandensein stehender Lichtschwingungen geliefert. Ein lichtempfindliches, vollkommen durchsichtiges Collodiumhäutchen, von einer gegen die Lichtwellenlänge geringen Dicke, befand sich, zwischen optisch mit ihm nahezu homogenen Körpern eingebettet, in geringer Entfernung vor einem Metallspiegel, gegen diesen schwach geneigt. Nach längerer Belichtung mit spectral zerlegtem Licht wurde das Häutchen der photographischen Entwicklung unterzogen, welche auf demselben Streifen entstehen liess, die, wie nachgewiesen wurde, allein durch die Wirkung stehender Lichtwellen veranlasst sein konnten.

Eine genauere Untersuchung der stehenden Wellen (§ 4) lehrte, dass bei senkrechter Reflexion am optisch dichteren Medium die Knotenpunkte der chemischen Lichtwirkung in Abständen gleich dem Vielfachen einer halben Wellenlänge von der reflectirenden Fläche, die Bäuche inmitten dazwischen, nämlich in Abständen gleich dem ungeraden Vielfachen einer viertel Wellenlänge lagen.

Versuche, bei welchen zwei geradlinig polarisirte Lichtwellen sich rechtwinklig durchkreuzten (§ 5), zeigten, dass eine durch die chemische Wirkung auf das empfindliche Häutchen erkennbare Interferenz der beiden Wellen eintrat, wenn ihre Polarisations Ebenen zusammenfielen, dagegen ausblieb, wenn dieselben aufeinander senkrecht standen. Es war daraus zu folgern, dass die chemisch wirksamen Schwingungen einer geradlinig polarisirten Lichtwelle zu deren Polarisations Ebene senkrecht stehen.

Zuletzt wurden die Ergebnisse der Versuche für die Theorien des Lichtes besprochen (§ 6). Davon sei nur hervorgehoben, dass man zu der anschaulichsten Vorstellung

der bei den Versuchen zu Tage tretenden Vorgänge geführt wird, wenn man annimmt, dass Schwingungen des lichtvermittelnden Mediums gleichgerichtete Schwingungen der Körpertheilchen hervorrufen, welche die photographisch-chemische Veränderung des empfindlichen Häutchens bewirken. Mit Zugrundelegung dieser Annahme führen die Experimente eine Entscheidung zwischen den mechanischen Lichttheorien zu Gunsten der Fresnel'schen herbei.

In der Sprache der electromagnetischen Lichttheorie ausgedrückt, lehren die Versuche, dass die chemische Wirkung einer geradlinig polarisirten Lichtwelle an das Vorhandensein der electricen und nicht der magnetischen Schwingungen geknüpft ist.

Was die hier angewendete Untersuchungsmethode betrifft (vgl. darüber auch p. 216), so stellt das dünne, lichtempfindliche Häutchen gewissermassen ein durchsichtiges Auge dar, welches gleichzeitig von entgegengesetzten Seiten Lichteindrücke aufnehmen kann. Während man bisher für die Untersuchung der Lichtbewegung an einem Orte darauf angewiesen war, aus der von dort in unser Auge fortgepflanzten Bewegung einen Schluss zu ziehen, ist jetzt die Möglichkeit gegeben, die Lichtbewegung an Ort und Stelle nach Amplitude, Phase und Schwingungsrichtung zu untersuchen.

Phys. Inst. d. Univ. Strassburg i. E.



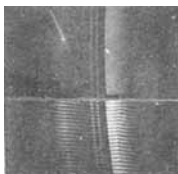
1.



2.



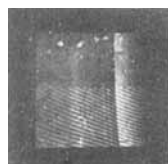
3.



4.



6.



7.



8.



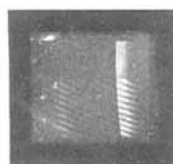
9.



10.



11.



12.