ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 16.

**1. *Der Hertz'sche Gitterversuch
im Gebiete der sichtbaren Strahlung;
von Ferdinand Braun.***

(Hierzu Taf. I, Figg. 1—3.)

(Aus den Sitzungsberichten¹⁾ der kgl. Akademie der Wissenschaften zu Berlin vom 21. Januar 1904.)

1. Seitdem Hertz im Jahre 1888 gezeigt hat, das elektrische Schwingungen, welche aus Luft auf Gitter aus Metalldrähten senkrecht auffallen, in zwei Komponenten zerlegt werden, von welchen die den Drähten parallele Schwingung reflektiert, die dazu senkrechte dagegen nahezu ungeschwächt durchgelassen wird, lag es nahe, diese im Gebiet der Optik unbekannte Erscheinung auch dort aufzusuchen, um damit einen Beweis für die Identität der sichtbaren Schwingungen mit elektrischen zu erbringen. Die Schwierigkeit lag in der Kleinheit der optischen Wellen. Rubens vermied diese, da es ihm gelang, mittels seiner eleganten Methode aus der Strahlung leuchtender Körper „Reststrahlen“ abzusondern, welche die mittleren optischen Wellen um das 40 fache an Länge übertreffen. Für diese (Wellenlänge ca. 0,024 mm) führte er in Gemeinschaft mit Nichols²⁾ den Nachweis, daß sie an auf Glas hergestellten Silbergittern von 0,005 mm Stabbreite und ebensolchen Zwischenräumen wie Hertz'sche Wellen reflektiert werden, daß sich

1) Mit Erlaubnis der Berliner Akademie lasse ich diesen Aufsatz wesentlich unverändert abdrucken. Ich füge demselben nur einige Ergänzungen hinzu, welche ich durch die Form von Anmerkungen kenntlich mache.

2) H. Rubens u. E. F. Nichols, Wied. Ann. 60. p. 418 und insbesondere p. 456. 1897. Diese Arbeit hatte ich in meiner ersten Mitteilung leider übersehen und auf dieselbe erst in einem Zusatz (Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin, April 1904) hingewiesen.

also diese Wärmestrahlen Metallgittern gegenüber wie elektromagnetische Wellen verhalten.¹⁾

Im Gebiete der *sichtbaren* Lichtstrahlen fehlte bis jetzt ein direkter entsprechender Beweis. Die vor den obigen gelegenen Versuche von H. du Bois²⁾ und du Bois und Rubens³⁾ können als ein solcher nicht betrachtet werden. Denn diese Messungen waren gemacht an Gittern, welche aus Drähten von 0,025 mm Dicke hergestellt waren und ebenso breite Zwischenräume hatten; jeder Zwischenraum und jeder Stab umfaßte daher etwa 40 Wellenlängen sichtbaren und immerhin noch vier Wellenlängen der größten damals von ihnen benutzten Wellen ($\lambda = 0,006$ mm).⁴⁾ Wenn auch zu erwarten ist, daß eine exakt durchgeführte Theorie durch die genannten Versuche würde bestätigt werden, so fehlt dieser Vergleich doch noch zurzeit.

Näher an die optische Erscheinung kam Hr. Ambronn⁵⁾ (in wesentlicher Wiederholung eines Fizeauschen Versuches) durch mikroskopische Beobachtungen eines sehr feinen Spaltes, den er auf höchstens 0,0001 mm Breite schätzt, in einer Silberschicht, wo er Polarisationerscheinungen fand, welche den elektrischen Beobachtungen von Hrn. Waitz⁶⁾ entsprechen würden. Breitere Spalten verhielten sich umgekehrt.

2. Im Jahre 1886 hat Kundt⁷⁾ das Folgende mitgeteilt. Kundt hatte sich auf Glasplatten, welche horizontal im Ab-

1) Vgl. dazu die fast gleichzeitig mit meiner obigen Publikation erschienene Arbeit von H. du Bois und H. Rubens (Verhandl. d. Deutsch. Physik. Gesellsch. 22. Januar 1904), in welcher ein Platingitter von 0,025 mm dicken Drähten mit Wellenlängen von 0,025 mm und 0,051 mm untersucht ist.

2) H. du Bois, Wied. Ann. 46. p. 542. 1892; 48. p. 546. 1893.

3) H. du Bois u. H. Rubens, Wied. Ann. 49. p. 593. 1893. Bezüglich weiterer Literatur verweise ich auf diese Arbeiten.

4) Es kann nicht verwundern, daß damit keine einfachen Resultate erzielt werden, wenn man bedenkt, daß sich ein solches Gitter gegen Lichtwellen verhalten wird, wie sich gegen Hertz'sche Wellen von einem halben Meter Länge eine Anordnung verhält, die aus Metallsäulen von 20 m Durchmesser besteht, die in 20 m Abstand voneinander angeordnet sind. Für die größte Wellenlänge würden die Durchmesser und Abstände der Säulen immerhin noch 2 m sein.

5) H. Ambronn, Wied. Ann. 48. p. 717. 1893.

6) K. Waitz, Wied. Ann. 63. p. 234. 1897; 66. p. 308. 1898.

7) A. Kundt, Wied. Ann. 27. p. 59. 1886.

stand von wenigen Millimetern unter einem dünnen vertikalen Metalldraht lagen, der im luftverdünnten Raume als Kathode diente, durch dessen Zerstäubung dünne Metallspiegel hergestellt, welche im allgewein die Gestalt eines außerordentlich flachen Kegels besaßen. Untersuchte er eine solche Metallschicht in nahezu parallelem Lichte zwischen zwei gekreuzten Nicols, so fand er, daß die Metallplatte das Gesichtsfeld erhellte; er beobachtete aber gleichzeitig ein dunkles Kreuz, dessen Arme den Polarisationssebenen parallel lagen; die Durchkreuzungsstelle lag immer genau an der Spitze der konischen Metallschicht, also in dem Punkte, über welchem sich die Kathode (bei der Herstellung des Spiegels) befunden hatte. Kundt deutete die Erscheinungen als die Folge einer Orientierung der abgeschleuderten Teilchen und bezeichnete sie als Doppelbrechung, wenn er auch die Schwierigkeit, wie eine solche in sonst isotropen Metallen entstehen sollte, klar erkannte und aussprach.

3. Eine ungezwungene Erklärung für die Kundtsche Beobachtung würde sich ergeben, wenn man annehmen dürfte, daß die radial orientierten Metallteilchen, obschon sie nach Kundts Versuchen unter dem Mikroskop wie eine homogene Schicht erscheinen, sich dennoch wie Hertz'sche Gitter verhalten.

Nach dieser Auffassung müßte man erwarten, daß die parallel den Polarisatorschwingungen ¹⁾ gelegenen Metallstäbchen das Licht reflektierten, und der entscheidende Versuch würde in dem Nachweis gelegen sein, daß, auch ohne Gegenwart eines Analysators, sich ein dunkler Streifen, parallel zur Schwingungsrichtung, vorfände, welcher z. B. den Drehungen des Polarisators folgen müßte.

4. Wie einem Beobachter von der Umsicht, welche Kundt auszeichnete, eine derartige Erscheinung sollte entgangen sein, schien mir zwar schwer verständlich. Aber andererseits erklärt die supponierte Auffassung, daß Kundt keine der Kalkspatfigur entsprechenden Ringe beschreibt; und endlich schien eine Beobachtung von Hrn. Dessau ²⁾ meine Annahme zu unter-

1) Ich rede im folgenden der Einfachheit der Darstellung wegen meist von den Schwingungen des Lichtes und verstehe darunter den Fresnel'schen Vektor, welcher senkrecht zur Polarisationsebene liegt und mit dem elektrischen Vektor der elektromagnetischen Theorie koinzidiert.

2) B. Dessau, Wied. Ann. 29. p. 353, insbesondere p. 373. 1886.

stützen. Dieser beobachtete, daß bei einer geringen Drehung des Analysators aus der gekreuzten Stellung heraus das dunkle Kreuz sich „in zwei Hyperbelarme“ auflöste.

5. Als ich die in der hiesigen Sammlung noch vorhandenen, von Kundt und Hrn. Dessau hergestellten Präparate einer Prüfung unterwarf, wurde mir das negative Resultat von Kundt erklärlich. Die Helligkeit des von ihm benutzten Sonnenlichtes wird nämlich bei parallel gestellten Nicols oder Weglassen des Analysators im allgemeinen so unerträglich, daß man nur an ein Arbeiten mit objektiv entworfenem Bilde denken kann und daher schon besonders nach einer derartigen Erscheinung suchen muß.

Eine Durchmusterung in dieser Art der mehr als zwanzig vorhandenen Präparate lieferte aber auch kein positives Resultat. Dieser negative Befund wurde aber erklärlich durch die Tatsache, daß ich auch nicht imstande war, die Kundtsche Erscheinung an denselben mit irgendwelcher Sicherheit nachzuweisen.¹⁾

Auch durch die Herstellung neuer Präparate kam ich dem Ziele nicht näher²⁾, ich überzeugte mich nur, daß die Technik nicht ganz einfach ist und Erfahrung zu verlangen scheint. Nachdem auch Zerstäubung von galvanisch im Vakuum glühend gemachten Palladiumdrähten sowie eine große Anzahl nach dieser Art im hiesigen Institut von Hrn. Aeckerlein hergestellter Palladiumspiegel kein besseres Resultat ergeben hatten, habe ich versucht, ob nicht Metallbeschläge, wie man sie dadurch erhält, daß man eine kräftige Flaschenentladung durch einen dünnen Metalldraht schickt, geeigneteres Material sein könne.

1) Schon bei einer mehrere Jahre früher vorgenommenen Durchprüfung zeigte sich nur noch an zwei Exemplaren und auch da nur an einigen Stellen die Kundtsche Erscheinung.

2) Neuerdings hat Hr. F. Kämpf (Sitzungsber. d. k. sächs. Akad. vom 29. Februar 1904) Doppelbrechung in Kundtschen Kathodenzerstäubungen direkt kompensiert und durch mechanischen Zug nachgeahmt. Es bestätigen sich die von Hrn. Dessau gemachten Beobachtungen und deren Deutung als Doppelbrechung (von denen ich früher annahm, sie seien in anderer Weise zu erklären). Danach ist meine Deutung der Kundtschen Beobachtungen, von der ich mich im Gang der Versuche leiten ließ, hinfällig geworden. Für das Resultat meiner Arbeit ist das ohne Belang. Ich reproduziere sie im ursprünglichen Wortlaut gerade, um frühere Angaben klar zu stellen.

In der Tat glaubte ich bei einem sicher über 50 Jahre alten derartigen Goldpräparate Spuren der gesuchten Erscheinung zu finden, während mir dies an einer ähnlichen Silberzerstäubung nicht gelingen wollte.

6. Diese Zerstäubungen lassen sich sehr leicht herstellen. Man spannt einen dünnen Metalldraht über eine Glasplatte (die selber meist wieder auf einer dickeren Glasplatte auflag), kittet am besten die Enden mit etwas aufgetropftem Siegelack fest und belastet zwei Stellen des Drahtes mit an ihrer Unterflache ebenen Gewichten, die als Elektroden dienen. Ich habe gewöhnlich Metalldrähte von einigen Zentimetern Länge gewählt, aber auch Silberdrähte von über ein Drittel Meter Länge glatt zerstäuben können. Die Dicke des Metalldrahtes spielt eine wesentliche Rolle; 0,1 mm ist schon nicht mehr günstig, 0,06 mm und 0,04 mm pflegen gute Dimensionen zu sein.

Durch diese Drähte habe ich Entladungen von 7, 9 und 20 parallel geschalteten Flaschen, die auf eine Schlagweite von 6—10 mm mit einer Influenzmaschine geladen waren, hindurchgehen lassen. Die Kapazitäten entsprachen etwa 20000, 27000 und 40000 cm. Ich habe immer nur *einen* Entladungsschlag benutzt.

Sobald die Funkenstrecke durchschlagen wird, erscheint ein helles Licht über dem ganzen Draht. Ich vermute, daß zuerst eine Stelle des Drahtes durchbrochen wird und ein Gleitfunke von da aus den Draht bis an die Elektroden zerstäubt. Aber auch unterhalb der Elektroden findet sich derselbe häufig verändert, wenn ich mich nicht täusche, sogar unter Umständen jenseits derselben. Diese Erscheinungen müssen aber für sich weiter verfolgt werden.¹⁾

1) Es hat sich dabei gezeigt, daß der Strom auch den anderen Drahtteil durchflossen hatte. Man beobachtet die Zerstäubung des scheinbar stromfreien Drahtstückes öfters, wenn man z. B. auf eine Glasplatte einen Draht auflegt, denselben aber auch auf der Unterseite teilweise zurückführt und nur dem oberen durch aufgesetzte Metallstücke die Entladung zuführt. Man

Fig. 1.

Ändere diese Anordnung in folgender Weise. Man lege zwei Glasplatten

Bedeckt man den Draht mit einer zweiten, einfach darauf gelegten Glasplatte, so kann man feine Zerstäubungen bis zu mehreren Zentimetern Abstand von der Drahtachse erhalten.

7. Die optische Untersuchung geschah mittels eines (Seibertschen) Mikroskopes, wie es für mineralogische Zwecke gebräuchlich ist.¹⁾ Unterhalb des Objektisches befindet sich der feststehende Polarisator, welcher ein schwach konvergentes Licht auf die Platte wirft. Der Objektisch kann genau zentriert werden und ist dann gut zentrisch drehbar. Zwischen Objektiv und Kollimatorlinse kann ein Nicol (gegen den Polarisator gekreuzt) von außen eingeschoben werden. Bei meinem Instrument war durch das Einschieben dieses Analysatornicols keine störende Verschiebung des Bildes gegen das Fadenkreuz des Okulars bemerkbar.

Eine einwandfreie Untersuchung kann nur geschehen in der zentrierten Partie des Objektes. Das Gesichtsfeld muß gleichmäßig hell sein; für die meisten Zwecke ist am besten diffuses Tageslicht, als Ersatz dafür kann auch das von einem weißen Papierschirme zurückgeworfene Licht eines Auerbrenners dienen. Ich finde aber, daß es für feinere Nuancierungen nicht ausreicht. Bei Benutzung künstlichen Lichtes hat man dafür zu sorgen, daß der Mikroskopspiegel von keinem direkten Licht getroffen wird (man schiebe ein mattes Glas davor); ebenso muß in allen Fällen der ganze obere Teil des Objektisches und das Auge (durch einen schwarzen, gebogenen Pappschirm) vor Beleuchtung geschützt sein.

Die fast ausschließlich verwendete Vergrößerung war 28fach (linear).

8. Ein zerstäubter Draht zeigt dann etwa folgendes Bild²⁾:

aufeinander, schiebe zwischen dieselben ein die Glasplatten überragendes Stück Karton (den Querschnitt der Anordnung deutet Fig. 1 an) und leite den Elektroden *A* und *B* die Entladung zu. Ist dann auch der untere Draht zerstäubt, so zeigt sich, daß in der Nähe von *B* der Karton durchlöchert ist, d. h. der Entladungsstrom hat sich von *B* aus mittels eines „Gleitfunkens“ verzweigt.

1) Die leihweise Überlassung dieses Instrumentes, ebenso wie der zugehörigen photographischen Apparate verdanke ich den Herren Kollegen Bücking und Bruhns. Die ersten Photographien war Hr. Dr. Söllner so freundlich für mich anzufertigen.

2) Eine Abbildung gibt M. Töpler, Wied. Ann. 65. p. 874. 1898.

In der Achse, wo er auflag, einen hellen Strich; das Glas scheint dort Veränderungen erlitten zu haben; rechts und links davon ein schmales Metallband; von diesem gehen, senkrecht zum Draht, feine, aber noch durchsichtige, sich allmählich verjüngende Metallstreifen (also in der Form sehr spitzer gleichschenkliger Dreiecke) aus; endlich darüber hinaus sehr dünne breite Metallstaubbeschläge.

Die zentrale Partie (in welcher sich z. B. bei Silber Flecken von wunderschöner Färbung befinden) lasse ich außer Betracht. Es handelt sich vorzugsweise um diejenigen Stellen, wo die dichteren, in diffusem Licht noch ziemlich dunklen Streifen in den feinen, kaum merklich absorbierenden Metallbeschlagen auslaufen.

Als ich diese Stellen bei einem zerstäubten Silberdraht (0,07 mm Durchmesser) absuchte, indem ich die Streifen abwechselnd parallel und senkrecht zur Schwingungsrichtung des Polarisators drehte, gelang es mir, Partien aufzufinden, welche dunkler waren für Parallelstellung¹⁾, heller, wenn sie um 90° gedreht waren. Am besten war es bei offen zerstäubten Drähten. Aber auch bedeckt zerstäubte zeigten die Erscheinung. Bei letzteren glaubte ich auch noch in Partien, welche etwa 2 cm von der Drahtachse entfernt waren, einen Unterschied im Verhalten der Streifungen je nach ihrer Orientierung erkennen zu können. Sie macht sich hier geltend als mehr oder weniger starke Differenzierung gegen die Umgebung. Deutlicher wurde die Erscheinung, wenn zwei solcher Partien mit ihren Metallfäden, die Streifenrichtung gekreuzt, aufeinander gelegt wurden. Dann waren immer die jeweils den Polarisatorschwingungen parallelen deutlicher.

9. Man wird natürlich, solange man die Struktur der Streifen, die man erzeugen will, nicht nach Willkür in der Hand hat, auch nur auf ein tastendes Absuchen nach günstigen Partien angewiesen sein. Denn während einerseits nach den Anschauungen, von denen wir ausgehen, eine Orientierung nach einer Richtung hin gefordert wird, muß man andererseits verlangen, daß die feinen mikroskopisch voraussichtlich nicht mehr auflösbaren Metallstreifchen durch ganz oder nahezu metallfreie Streifen getrennt sind. Die Methoden von Sieden-

1) Dies soll immer heißen: die Striche parallel zu den auffallenden Lichtschwingungen.

topf und Zsigmondy¹⁾ werden, wenigstens in gewissen Partien, mit Vorteil herangezogen werden.

Die Auffindung passender Stellen wird nun sehr erleichtert, wenn man den Analysator Nicol einschiebt. Dreht man das Präparat so, daß die Streifenrichtung 45° mit den gekreuzten Polarisationssebenen bildet, so findet man eine Anzahl Büschel (vgl. Taf. I, Fig. 3), welche hell auf dunklem Grund erscheinen und bei Drehung um $\pm 45^\circ$ verschwinden, d. h. die Kundtsche Erscheinung zeigen. Wenn unter diesen eine gut ausgesprochene, nicht zu kleine Stelle ausgesucht, auf den Schnittpunkt des Fadenkreuzes geschoben und dann nur im Lichte des Polarisators beobachtet wurde, so zeigte diese Stelle immer — diffuses Tageslicht vorausgesetzt — schwach, aber unverkennbar (wie ich durch andere Beobachter kontrollieren ließ) sich dunkler in Parallelstellung als senkrecht dazu.

10. Verschiedene Variationen des Versuches führten nicht wesentlich weiter als zu der sicheren Überzeugung der Richtigkeit der Beobachtung, es fehlte aber noch die Prägnanz der Erscheinung. Auch Drähte von Gold (0,1 und 0,06 mm) gaben kein wesentlich besseres Resultat.

Erst als ich in Besitz dünner Platindrähte von 0,04 mm Durchmesser gekommen war, konnte ich die Erscheinung so stark erhalten, daß jeder Zweifel beseitigt war. Nach meinen Erfahrungen gelingt der Versuch mit ihnen sicher. Ich fand am günstigsten bei den erwähnten 20 Flaschen eine Funkenstrecke von 6—8 mm Länge, den Draht glatt auf die Glasplatte ausgespannt, knoten- und knickfrei, nicht über 3 cm lang, offen zerstäubt.

Man wird kaum ein Präparat finden, welches die Erscheinung nicht zeigt, das eine freilich besser als das andere. Die Bedingungen habe ich noch nicht viel variiert, insbesondere im Vakuum noch gar keine Versuche gemacht.

Man sucht am sichersten in der angegebenen Weise zwischen gekreuzten Nicols, schiebt eine passend scheinende Stelle in die Achse des Mikroskopes, entfernt dann den Analysator und beobachtet nur im Lichte des Polarisators.

Im Sinne der Tatsachen gesprochen wird man finden: die

1) H. Siedentopf u. R. Zsigmondy, Ann. d. Phys. 10. p. 1. 1903.

Stellen mit gut ausgesprochener Aufhellung sind intensiv dunkel (sammetschwarz) gefärbt, wenn ihre Strichrichtung senkrecht zur Polarisationssebene liegt, sie werden relativ hell (etwa schwach zimmtbraun), wenn sie der Polarisationssebene parallel liegen.

Im Sinne der elektromagnetischen Lichttheorie gesprochen: sie lassen wenig Licht durch, wenn die Streifen parallel dem elektrischen Vektor liegen, viel dagegen, wenn sie senkrecht zu demselben gestellt sind.

Die Figuren geben eine Reproduktion photographischer Aufnahmen; die Platten von Fig. 1 und 2, Taf. I sind genau gleich lange, bei gleichem sehr schwachem, aber außergewöhnlich konstantem Tageslicht (Nebel) exponiert worden (8 m); Fig. 3, Taf. I zeigt die Streifen zwischen gekreuzten Nicols (über eine Stunde in teilweise hellerem Lichte exponiert). Die Kopien sind gleichfalls in genau identischer Weise hergestellt. Natürlich zeigt sich, direkt gesehen, der Unterschied ungleich stärker als in der Reproduktion; man erkennt aber doch, daß in Fig. 1, Taf. I die Platindreiecke nur sehr schwach erscheinen; nach Drehen des Präparates (Streifen parallel den auffallenden Lichtschwingungen) werden sie scharf und deutlich; Fig. 3, Taf. I erläutert, daß die Erscheinung auftritt an denjenigen Stellen, welche das Kundtsche Phänomen zeigen.

11. Auch bei den besten Präparaten, welche ich bis jetzt erhalten habe, ist das den Streifen parallel schwingende Licht nicht völlig ausgelöscht. Es setzen sich daher beide Komponenten wieder, falls sie — wie dies, wenigstens bei Platin, in erster Annäherung der Fall zu sein scheint — ohne Phasendifferenz hindurchgehen, wieder zu einer linearen Schwingung zusammen. Diese wird je nach der Dichte der Streifungen verschiedenes Azimut haben. Man beobachtet dies am besten, wenn man den Analysator aus dem Rohre entfernt und durch einen *drehbaren* Okularnicol ersetzt. Kreuzt man denselben gegen den Polarisator (die Streifen im Azimut 45°), so daß man die Fig. 3, Taf. I sieht, und dreht ihn dann um kleine Winkelbeträge, so wandert eine dunkle Stelle über die Nadeln hinweg.

Daß die Figg. 2 und 3, Taf. I nicht vollkommen identisch sind, erklärt sich hieraus.

Ob auch Phasendifferenzen vorhanden sind, so daß eine der wirklichen Doppelbrechung durchaus äquivalente Erscheinung auftritt, habe ich noch nicht entscheiden können.¹⁾

1) Ich habe mich, speziell für die Platinzerstäubungen durch Verwendung von Okularirisblenden, mittels welchen ich die mit ihnen erreichbaren kleinsten Partien des Bildes ausschnitt, überzeugt, daß das Licht durch den Okularnicol ebenso vollkommen ausgelöscht werden kann, wie es möglich ist, auch bei ganz leerem Objektisch.

Prüft man auf Doppelbrechung mittels eines Gipsplättchens, das zwischen gekreuzten Nicols Rot erster Ordnung zeigt, und verfährt in der gewöhnlichen Weise (Nicols gekreuzt, Gitterstriche im Azimut 45° , Gipsplatte ebenso), so sieht man, wenn die Gitterstriche in einen Quadranten liegen, dieselben in einem geänderten z. B. einem schönen violetten Ton gegen die rote Umgebung; derselbe geht in einen gelbgrünlichen über, wenn man das Objekt um 90° dreht, so daß es in den anderen Quadranten kommt. Man wird also auf Phasendifferenzen schließen. Jedoch ist bei diesem Versuch zu beachten, daß das Gitter selber das Azimut der Schwingung verdreht hat (bei guten Präparaten bis über 20°). Daher ist die Polarisationssebene des auf das Gipsplättchen auffallenden Lichtes an der entscheidenden Stelle weder senkrecht zur Polarisationssebene des Analysators, noch unter 45° gegen den Hauptschnitt des Gipses geneigt.

Man kann sich von diesem Fehler frei machen, indem man zunächst ohne eingeschobenes Gipsplättchen den Polarisator so lange verdreht, bis eine zu prüfende Gitterstelle möglichst dunkel ist, und dann erst den Gips einschiebt. Man ist dann für diese Stelle unter den günstigsten Bedingungen, aber natürlich nicht mehr für das die Gitterfläche umgebende Feld. Untersucht man in dieser Weise, so fallen die Farbenänderungen viel geringer aus; die Farbe des Gitters ist aber doch noch gut zu unterscheiden von derjenigen, welche es zeigt, wenn man bei rechtwinklig gekreuzten Nicols und eingeschobenem Gips die Striche in das Azimut 0° dreht. Durch Untersuchung einer großen Zahl von Zerstäubungsgittern, die sich bezüglich der Stärke der Gitterpolarisation sehr verschieden verhielten, habe ich mich überzeugt, daß Phasendifferenzen vorhanden sind.

Es entsteht daher der Verdacht, daß sie von einer Doppelbrechung der Metalle herrühren und damit des weiteren die Unsicherheit, ob diese nicht die Erscheinungen mehr oder weniger trübe oder gar direkt hervorrufe.

Zum Glück erledigt sich dieses letztere Bedenken sehr einfach. Hr. Dessau und Hr. Kämpf haben übereinstimmend gefunden, daß in den doppelbrechenden Kundtschen Schichten der in der Richtung der Kathodenzerstäubung schwingende Lichtstrahl (elektrische Amplitude) gegen den tangential schwingenden *verzögert* ist. Die in den Gittern auftretenden Phasendifferenzen liegen aber gerade umgekehrt: Der in der Zerstäubungsrichtung schwingende Strahl ist gegen den anderen *beschleunigt*. Die Richtung der Gitterstriche verhält sich nämlich wie die Druckrichtung in gepreßtem Glas. Dieses Verhalten habe ich, soweit

12. Während das in 10. angegebene Verhalten die Regel ist, kommen aber doch Fälle vor, welche sich derselben noch nicht zu fügen scheinen. Ich habe an einzelnen sehr dünnen Stellen von Gold- und Platinpräparaten, wenn auch schwach, aber doch, wie ich glaube, deutlich beobachten können, daß das parallel zu den supponierten Streifen schwingende Licht mit größerer Intensität hindurchging als die senkrechte Komponente. Ich habe dies an manchen Stellen, namentlich in unmittelbarer Nähe des Drahtes, gefunden. Es scheinen dort, worauf auch das makroskopische Aussehen der Metallzerstäubung hinweist, Unregelmäßigkeiten vorhanden zu sein, herrührend von Knickungen oder schlechtem Aufliegen des Drahtes auf der Platte. Die Aufklärung dieses Punktes ist, solange man auf mikroskopische Beobachtung angewiesen ist, penibel und bedarf noch weiterer Versuche, möglichst mit gleichmäßigen, größeren Flächen.¹⁾

13. Gleichzeitig in der Richtung der Zerstäubung wirkende konstante oder in der Periode der Flaschenentladung wechselnde (aber freilich gegen den Strom um 90° in Phase verschobene) elektrische Felder, ebenso gleichzeitiges galvanisches Anwärmen des Drahtes bis zu dunkler Rotglut gaben kein erkennbar anderes Bild der Zerstäubung.

Platin ist dasjenige Metall, welches auch nach Angabe des Entdeckers das Kundtsche Phänomen am deutlichsten zeigt. Warum andere Metalle weniger günstig sind, ob hier die Brechungsexponenten eine Rolle spielen, kann vielleicht aus weiteren Versuchen erklärt werden.²⁾

Versuche über verschiedene Metalle von mir gemacht wurden (vorzugsweise Platin, Silber und Palladium), durchgängig und unabhängig von der Natur des Metalles gefunden (vgl. bez. des weiteren den § 2 des in Nr. 2 folgenden Aufsatzes).

1) Ich habe es später in sicherer Weise nur noch an einigen Stellen von einem einzigen Präparat (Silber) gefunden, das aber leider durch Unvorsichtigkeit verdorben wurde, ehe ich es ausführlicher untersucht hatte. Die Erscheinung war mit Farbenänderung verknüpft.

2) Wahrscheinlicher ist mir jetzt, daß für die Gitterwirkung in erster Linie die mechanische Natur des Metalles entscheidend ist, d. h. wie es sich bei plötzlicher, über den Schmelzpunkt hinausgehender Erhitzung verhält. An Drähten aus Platin, Silber und Eisen, welche auf oder zwischen Glasplatten dem Entladungsstrom ausgesetzt werden, erkennt man deutlich wie mit kontinuierlich gesteigerter Entladungsenergie zuerst das Schmelzen,

Durch Bedecken mit Wasser, Schwefelkohlenstoff oder Methylenjodid konnte ich keine sichere Änderung erkennen. Auch einen Einfluß der Farbe (roten und blauen Glases) habe

nachher erst das Zerstäuben eintritt. Man kann gut das Stadium abpassen, wo der Draht anfängt zu sintern und sich (wie Seifenwasser auf einem Seidefaden) zu Kügelchen zusammenzieht, welche sich oberflächlich in das Glas einschmelzen. Dann finden sich nur in unmittelbarster Nähe des Drahtes Spuren von „verdampftem“ Metall. Dämpft man eine energische Flaschenentladung durch eingeschalteten Ohmschen Widerstand entsprechend ab, so läßt sich bewirken, daß nur die erste Halbschwingung den Draht beweglich erhält. Im Magnetfeld wird er dann herausgeschleudert nach der aus der Stromrichtung der ersten Halbschwingung und der Richtung des Feldes folgenden Regel. In einem nicht homogenen Feld bildet er dieses ab. Die Fig. 2 zeigt eine derartige durch einen

Fig. 2.

Platindraht hergestellte Kurve, die zwischen den abgerundeten Spitzpolen eines Ruhmkorffschen Magneten erzeugt wurde. Die Figur erläutert, daß die Joulesche Wärme ohne merkbare Zeitdifferenz mit dem Strom einsetzt. Sie tritt hier, wie die Elektrolyse, nicht als eine Folge, sondern nur als eine Erscheinungsform des Stromes auf. Ob dies auch für beliebig kleine Zeitdifferenzen gültig ist, bleibt noch offen. Dämpft man die Entladung weniger, so macht sich auch noch die zweite Halbschwingung durch eine entsprechende, nach der anderen Seite gelegene Kurve bemerkbar. Eisen zeigt dabei keinen bemerkbaren Unterschied gegen Platin. Ich halte es für gut möglich, auf diesem Wege dünne, durchsichtige Metallprismen herzustellen. Es soll im hiesigen Institut versucht werden, ob man mittels solcher Prismen die Brechungsexponenten der Metalle nochmals bestimmen kann. — Bei passend dimensionierten Entladungsströmen läßt sich Messing in seine Bestandteile, Zink und Kupfer, zerlegen. Das Zink bleibt fast ausschließlich in der Mitte, das Kupfer wird weiter hinausgeschleudert. Man kann es sogar außerhalb der den Draht bedeckenden Platten auf senkrecht gegen dieselben gestellten Platten in Form feiner Streifen auffangen. Ich hoffe über die Fortsetzung dieser Versuche bald berichten zu können.

ich bei Platin nicht beobachtet. Scheinbare Änderungen waren auf geänderte Lichtintensität zurückzuführen und konnten auch durch eingeschobenes berußtes Glas hervorgerufen werden.

Die etwa vorhandenen Beugungswirkungen konnten bisher, mangels genügenden Sonnenlichtes, nicht verfolgt werden; ebensowenig die feinen, oft wunderbar zarten und schön gefärbten Interferenzerscheinungen, welche sich nach Unterlegen eines feinen Spaltes bei Silberpräparaten unter dem Mikroskop zeigen und von dem Öffnungswinkel des auffallenden Lichtes abhängig zu sein scheinen.

14. Unter dem Mikroskop habe ich mit 100- und etwa 500facher Vergrößerung eine Struktur, welche die Erscheinungen erklären könnte, nicht mit Sicherheit nachweisen können.

Im gewöhnlichen Tageslicht sah ich gar keine Differenzierung. Unter Verwendung direkten Auerlichtes habe ich feine Streifungen beobachten können, welche auch beim Drehen ihre Helligkeit änderten; dazwischen aber Felder ohne erkennbare Struktur, welche fast gleichmäßig heller und dunkler wurden. Diese letzteren Flächenfelder waren *keineswegs* immer da besonders hervortretend, wo auch sichtbare Streifen sich befanden. Man wird also nicht annehmen dürfen, daß ihre Helligkeitsänderung durch die sichtbaren Streifen bedingt sei.

Mir selbst fehlte hinreichende Erfahrung in der Untersuchung so feiner Präparate mit noch stärkeren Vergrößerungen sowie in der Beurteilung der Bilder. Hr. Dr. H. Siedentopf von der Firma Carl Zeiss in Jena hatte die Gefälligkeit, ein Präparat im hiesigen Institut zu prüfen. Mit der homogenen Immersion von 2 mm und der Apertur 1,3 zeigte sich bei Untersuchung im Auerlicht sowie in dem einer Bogenlampe das folgende Bild: eine Anzahl Körnchen, welche ohne erkennbare Regelmäßigkeit verteilt waren; zwischen denselben ein nicht mehr auflösbares gleichmäßig helles Feld, welches die charakteristischen Erscheinungen der Gitterpolarisation und scheinbaren Doppelbrechung noch sehr scharf erkennen ließ.

15. Das Interesse, welches die Erscheinungen bieten, ist nicht auf den Nachweis des optischen Analogons zum elektrischen beschränkt; sie beanspruchen, wie mir scheint, auch ein selbständiges optisches Interesse. Ich bin überzeugt, daß

schon Beobachtungen, z. B. auf mineralogischem Gebiete, vorliegen, welche jetzt unter einem andern Gesichtspunkte erscheinen werden. In der Tat zeigte mir Hr. Kollege Bücking, nachdem er meine Präparate gesehen hatte, sofort ein ähnliches mineralogisches.

Eine Lasoulxsche Beobachtung an Würfeln von Chlorsilber, welche in einer Richtung gepreßt wurden, führt sich vielleicht auf entstehende Silberlamellen zurück.¹⁾ Daß in Brom-, Jod- und Chlorsilber durch Druck eine Zersetzung eintritt, haben Myers und ich gezeigt.²⁾

Auch Beobachtungen, über welche kürzlich Hr. Schmauss³⁾ im Anschluß an Versuche des Hrn. Majorana berichtete, lassen sich vermutlich auf Gitterpolarisation zurückführen.

16. Sieht man von dem einen in 10. erwähnten Punkte ab, so ist die vollkommene optische Analogie zu den Hertzschens elektrischen Gittern festgestellt.

Ich möchte noch auf einige Anwendungen hinweisen. Wenn es z. B. gelingen würde, sehr dünne Kristallplättchen einer hochmolekularen organischen Goldverbindung derart zu zerstören, daß nur die Goldmoleküle, und zwar wesentlich an ihrem Orte, erhalten blieben, so müßte ein Metallgitter resultieren, aus dessen optischem Verhalten man, namentlich an der Hand einer durchgeführten elektromagnetischen Gittertheorie⁴⁾, einen Schluß auf den Abstand der Metallteilchen machen könnte. Ich habe eine Anzahl Versuche in dieser Richtung hin unternommen, z. B. Bleiacetat in sehr dünner Schicht auf Glas auskristallisieren lassen und dann mit einem Schälchen, das eine konzentrierte Lösung von Kaliumsulfhydrat enthielt, zusammen unter eine Glasglocke gestellt. Man dürfte hier erwarten, daß ein Gitter aus Bleisulfid bleibt,

1) Ich kenne den Versuch nur aus H. Ambroun, Sitzungsber. d. k. sächs. Akad. d. Wissensch. 7. Dezember 1896.

2) J. E. Myers u. F. Braun, Phil. Mag. (5) 44. p. 172. 1897; vgl. Carey Lea, *ibid.*

3) A. Schmauss, Ann. d. Phys. 10. p. 658. 1903; 12. p. 186. 1903. Vgl. dazu F. Braun, Physik. Zeitschr. 5. p. 203. 1904.

4) Vgl. J. J. Thomson, Recent Researches in Electricity and Magnetism. Oxford 1893. p. 425; insbesondere Phasenänderung betreffend.

während die Essigsäure und das Kristallwasser zur Sulphydratlösung wanderte. Dieser und eine Reihe ähnlicher Versuche haben aber bisher noch keine sicheren Schlüsse ziehen lassen.

17. Dagegen glaube ich auf einem anderen Gebiete einen Schritt weiter gekommen zu sein. Hr. Ambronn¹⁾ hat beobachtet, daß dünne Schnitte aus dem Holze der Koniferen oder aus den Sehnen von Mäuseschwänzen, die mit 2 proz. Goldchloridlösung getränkt und nach dem Trocknen dem Sonnenlichte ausgesetzt wurden, sehr hübschen Dichroismus zeigen. Er hat mit Recht nach dem damaligen Standpunkte unserer Kenntnisse sich für die Erklärung damit begnügt, anzunehmen, daß das eingelagerte Metall für sich oder in Verbindung mit der Grundsubstanz zu einem anisotropen Gebilde werde.

Wenn wir aber berechtigt wären, anzunehmen, daß sich hier Gitter aus metallischem Gold im Gewebe bildeten, und diese nach den hier beschriebenen Versuchen die Erscheinung hervorrufen, so würden wir umgekehrt aus den Polarisationserscheinungen bei so gefärbten Schnitten einen Schluß ziehen können auf eine gitterartige Molekularstruktur, deren Auflösung selbst mit den stärksten Mikroskopsystemen vielleicht schon eine prinzipielle Grenze gesetzt wäre.

18. Ich habe die Ambronn'schen Versuche mit Spänen der gewöhnlichen Holzwolle wiederholt. Diese Späne sind noch zu dick und müssen in Zukunft durch dünnere Schnitte ersetzt werden. Trotzdem konnte ich an denselben die Ambronn'schen Angaben bestätigen.

Wurden nach vorherigem Trocknen solche Fasern in einem Glasrohre erhitzt, das in die Dämpfe von siedendem Quecksilber eintauchte, und durch welches ein Strom von Kohlensäure (mit Bleiacetat und doppeltkohlensaurem Natron gewaschen, mit Chlorcalcium getrocknet und durch Watte filtriert) hindurchgeleitet wurde, so habe ich an den Präparaten nachher folgendes beobachtet:

a) Zwischen gekreuzten Nicols sind sie (die Streifen in mittlere Azimute gedreht) an dünnen Stellen hell mit einem

1) H. Ambronn, Sitzungsber. d. k. sächs. Akad. d. Wissensch. 7. Dezember 1896. In dieser Literatur bin ich selbstverständlich nicht bewandert.

prachtvollen Rubinrot¹⁾, das an die Farbe der Gläser alter Fenster erinnert. Die Hauptmasse wird dunkel, wenn ihre Fasern parallel oder senkrecht zu den Schwingungen des Polarisators stehen.

b) Ich habe, auch ohne Analysator, an einzelnen Fasern, schwach, aber deutlich die oben beschriebene Gitterwirkung beobachten können.

c) Bei derselben Anordnung, wie sub b), zeigte sich mit Drehen des Präparates, daß Zeichnungen für gewisse Stellungen undeutlich werden, bisweilen fast ganz verschwinden; bei einer Drehung um 90° aus dieser Lage heraus werden sie dagegen deutlich und dunkel. Die ausgezeichneten Lagen waren meistens nahezu parallel oder senkrecht zur einfallenden Schwingungsebene.

Im Sinne unserer Auffassung würden sich damit feine Gitterstrukturen verraten, welche (falls die mikroskopische Auflösung versagt) teils parallel, teils senkrecht zur Faserrichtung verlaufen.

Das Bedenken, daß Aschenbestandteile Ursache der Erscheinungen sein möchten, hatte ich anfangs. Ich habe es fallen lassen a) infolge von Kontrollversuchen; b) ich habe Späne genommen, welche einfach in der Ambronschen Weise behandelt waren; andere, welche gut ausgewässert waren; wieder andere, welche mit verdünnter Salzsäure, endlich solche, welche mit verdünnter Salzsäure, nachher mit verdünnter Flußsäure behandelt und dann ausgewaschen waren — alle mit demselben Ergebnis. Auch ein Imprägnieren (nach dem Auswaschen) mit einprozentiger Chlorkaliumlösung (in der Absicht, dadurch ein besseres Skelett zu erzielen) änderte nichts.

19. Wenn es gestattet ist, anzunehmen, daß organische Goldverbindungen bei der Temperatur des siedenden Quecksilbers zerstört werden²⁾, so dürfen wir schließen, daß das Gold

1) Vgl. dazu die in Nr. 2 folgende zweite Abhandlung § 3.

2) Um diese an und für sich wahrscheinliche Annahme zu prüfen, habe ich eine Verbindung, welche wohl zu den beständigsten organischen Goldverbindungen gehören dürfte, nämlich Amylmercaptangold (im CO_2 -Raum), im Quecksilberdampfbad geprüft. Sie zeigte sich vollständig zersetzt.

als Gitterbildner wirkt. Falls es aber, wie wahrscheinlich, die gleiche Rolle auch in anderen Fällen übernimmt, so wird die Deutung von Bildern im polarisierten Lichte vielfach eine ganz andere werden; die Polarisationserscheinungen selber wird man aber vielleicht mehr, als meines Wissens bisher geschah, zur Aufklärung heranziehen.

Es ist anzunehmen, daß erst mit Abständen, die gleich oder kleiner sind als eine halbe Wellenlänge, die Gitterpolarisation eintritt in der Weise, daß die parallel den Gitterstäben schwingende Komponente stärker reflektiert wird; dies ist in Übereinstimmung mit einem direkten Versuche des Hrn. Ambronn.¹⁾ Wenn es gestattet ist, nach Analogie der elektrischen Gitter zu schließen, und wenn wir ein derartiges als Schema zugrunde legen dürfen, so sollte die Gitterpolarisation mit zunehmender Feinheit des Gitters wachsen, um einen Maximalwert zu erreichen und dann rasch in der Weise abzunehmen, daß beide durchgelassene Komponenten gegen Null konvergieren. Dann sind wir aber wahrscheinlich schon in der Nähe molekularer Dimensionen.

Eine praktische Beobachtungsregel würde dann etwa so lauten. Man untersuche ein Goldpräparat bis zu den Grenzen der mikroskopischen Leistung. Findet sich keine Struktur mehr, aber Gitterpolarisation, so darf auf eine submikroskopische Gitterstruktur geschlossen werden, deren Fasern parallel den stärker ausgelöschten Schwingungen liegen.

Eine Kontrolle gegen wirkliche Doppelbrechung (und natürlich auch Gitterpolarisation mit Phasenänderung) besteht darin, daß die Farbe nicht in die komplementäre umspringt durch Drehung des Analysators..

Die gekreuzten Nicols spielen dann eine andere Rolle, als man seither annahm. Der Analysatornicol stellt nur das bequemste Mittel dar, um durch eine Differenzmethode kleine Unterschiede in der Helligkeit beider Komponenten (parallel und senkrecht zu den Gitterstäbchen) zu erkennen. Man braucht, um die „Doppelbrechung“ zu sehen, sehr intensives Licht. Hat man mit dieser Lichtstärke ohne gekreuzte Nicols gearbeitet, so ist man meist so geblendet, daß man nach Ein-

1) H. Ambronn, Wied. Ann. 48. p. 717. 1893.

schieben des Analysatornicols anfangs nichts erkennt. Man wird nicht überschätzen, wenn man annimmt, daß man von dieser Intensität noch leicht 0,0001 zu bemerken vermag unter Bedingungen, wie sie die gekreuzten Nicols hervorbringen. Ganz anders wird es aber, wenn man verlangt, daß man selbst einige Prozent der Lichtstärke, addiert zu einer schon vorhandenen endlichen Lichtintensität, nach Drehen des Präparates soll unterscheiden können.¹⁾

Der Analysator müßte ersetzbar sein durch eine Vorrichtung, welche die beiden durch das Gitter ausgespaltenen Komponenten zwei getrennten Gesichtsfeldern zuführt und sie dort, ähnlich wie bei einer dichroskopischen Lupe, nebeneinander legt. Eine solche Anordnung würde wichtig sein, wenn es sich um die Entscheidung handelt, ob wahre Doppelbrechung (ohne verschiedene Absorption) oder Gitterpolarisation vorliegt — an Empfindlichkeit und Bequemlichkeit wird sie die gekreuzten Nicols jedoch nicht leicht übertreffen, weil man bei ihnen zu enormen auffallenden Lichtstärken übergehen kann.²⁾

20. Die oben gemachte Bemerkung ist auch zu beachten bei der Beurteilung vorstehender Versuche. Sie sind naturgemäß nur die ersten Anfänge mit noch nicht ad hoc ausgebildeten Methoden, und ich verkenne nicht, daß meine Schlüsse bisher der Lösung einer Gleichung mit zwei Unbekannten ähnlich sind. Doch hat die Gleichung etwas vom Charakter einer diophantischen. Es kommen noch Nebenbedingungen hinzu, welche die Lösungsmöglichkeiten einschränken. In der Tat scheint sich immer die supponierte submikroskopische Struktur auch wieder makroskopisch zu reproduzieren, was

1) Berücksichtigt man die in Betracht kommenden trigonometrischen Faktoren, so ergibt sich für das Azimut 45° und gekreuzte Nicols die von der auffallenden Intensität J hindurchgehende $= \frac{1}{4} J \gamma^2$, wenn angenommen wird, daß das senkrecht zu den Gitterstäbchen schwingende Licht ohne Schwächung hindurchgeht und γ einen echten Bruch bedeutet. Bei Betrachtung ohne Analysator wird dann in einem Falle J , nach Drehung um 90° dagegen $J(1 - \gamma)^2$ beobachtet. Setzt man $\frac{1}{4} \gamma^2 = 0,0001$, so ergibt dies für direkte Betrachtung im bloßen Lichte des Polarisators eine Differenz der Lichtstärken von 4 Proz.

2) Ein dichroskopisches Okular hat schon, wie ich später erfuhr, H. Ambronn im Jahre 1888 angegeben. (Vgl. über ein solches die in Nr. 2 folgende Fortsetzung § 32.)

bei nahezu parallel neben- und übereinander gelegten feinsten Fasern auch erklärlich ist. Immerhin wird sich der ganze Kreis der Beweise erst allmählich schließen. Das bisher Beobachtete hat sich aber, in sich selber widerspruchsfrei, derart aneinandergesetzt, daß ich am positiven Endergebnis nicht zu zweifeln vermag. Wie weit die mineralogische und insbesondere die biologische Forschung aus dem Mitgeteilten glaubt Nutzen ziehen zu können, muß ich dem Urteil der auf diesem Gebiete Orientierten überlassen.

(Eingegangen 25. Dezember 1904.)

Zwischen gekreuzten Nicols
(Azimut 45°)

Schwingungen zu den Gitterstrichen
senkrecht parallel

Fig. 3.

Fig. 2.

Fig. 1.