

Die Geschichte der Auffindung der Röntgenstrahlinterferenzen.

Von W. Friedrich, Freiburg i. B.

Die ersten Versuche, Beugungs- oder Interferenzerscheinungen der Röntgenstrahlen zu erhalten, sind schon von dem Entdecker der Strahlen selbst gemacht worden; denn er war sich wohl bewußt, daß mit der Auffindung einer Interferenzerscheinung die Wellennatur seiner Strahlen bewiesen war. Vermutete er doch in ihnen die von *Helmholtz* erwarteten longitudinalen Ätherschwingungen. Indessen waren die mit mannigfachen Versuchsbedingungen angestellten Versuche an engen Spalten ohne die Resultate, die ihn von der Existenz einer Beugung der Strahlen überzeugen konnten.

In der nächsten darauffolgenden Zeit wurden von verschiedener Seite analoge Versuche mit Beugungsspalten angestellt. So fanden *Fomm*, *Sagnac*, *Calmette* und *Lhullier* Verbreiterungen bzw. helle und dunkle Streifen in den Spaltbildern, die sie als Beugungserscheinung deuteten; von *Fomm* wurde sogar die Wellenlänge der Röntgenstrahlen auf Grund seiner Photogramme berechnet zu etwa 10^{-6} cm. Die Erscheinungen erwiesen sich jedoch später als subjektive optische Täuschungen, die durch ganz andere Erscheinungen als durch Beugung zustande gekommen waren.

Trotz dieser Mißerfolge hatte die Auffassung von den Röntgenstrahlen als Wellenvorgang ihre Anhänger. Die von *Wiechert* und *Stokes* aufgestellte Theorie der Röntgenstrahlen fand immer mehr Verbreitung. War es doch eine notwendige Folge der Maxwell-Lorentzschen Elektrodynamik, daß, wo elektrische Ladungen ihre Geschwindigkeit verändern, elektromagnetische Wellen entstehen. Eine derartige Geschwindigkeitsänderung einer Ladung findet ja statt in der Röntgenröhre, wo die Kathodenstrahlenteilchen, die Elektronen, an der Antikathode plötzlich von großer Geschwindigkeit zur Ruhe kommen. *W. Wien* war es dann, der eine Berechnung der Wellenlänge der Röntgenstrahlen versuchte an Hand der elektrodynamischen Theorie in Verbindung mit der damals neu entstandenen Quantentheorie. Der Wert von 10^{-9} bis 10^{-10} cm schien auch die auffallenden Erscheinungen der Röntgenstrahlen, wie das große Durchdringungsvermögen und die Nichtbrechbarkeit, erklären zu können.

Diese Überlegungen bewogen *Haga* und *Wind* 1899, die Beugungsversuche am Spalt mit wesentlich feineren Hilfsmitteln wieder aufzunehmen. Sie benutzten einen konvergierenden, sich keilförmig zuspitzenden Spalt, der es gestattete, in einem Photogramm sozusagen die Beugungs-

effekte an unendlich vielen Spalten von kontinuierlich veränderlicher Breite zu überblicken. Dieselbe Anordnung verwendeten dann später *Walther* und *Pohl* 1908 und verfeinerten die Herstellung und die Justierung des Beugungsspaltes noch weiterhin. Während nun *Haga* und *Wind* aus ihren Versuchen auf ein positives Resultat schlossen und die Wellenlänge der Röntgenstrahlen aus der Verbreiterung des Spaltbildes an der Spitze der Größenordnung nach zu 10^{-8} cm bestimmen zu können glaubten, deuteten *Walther* und *Pohl* ihre Versuche negativ und schlossen, nur auf eine obere Grenze der Wellenlänge von 10^{-9} cm. So schienen denn auch bei den *Haga* und *Winds*chen Photogrammen Täuschungen vorzuliegen, die bei der visuellen Beurteilung unter dem Mikroskop zustande gekommen waren. Erst die Ausmessungen der Photogramme durch *P. P. Koch* mit seinem registrierenden Photometer und die Verwertung der Ausmessung durch *Sommerfeld*, um sie mit seiner Beugungstheorie eines Impulses an einem konvergierenden Spalte in Einklang zu bringen, zeigten, daß tatsächlich eine Verbreiterung des Spaltbildes vorlag, die als Beugung gedeutet werden konnte. Die Bestimmung der Wellenlänge zu etwa $4 \cdot 10^{-9}$ cm stimmte durchaus mit der theoretisch zu erwartenden Wellenlänge bzw. Impulsbreite, wie man damals sagte, der Größenordnung nach überein, und unsere heutige genauere Kenntnis der Wellenlänge der Röntgenstrahlen zeigt, daß der von *Sommerfeld* berechnete Wert durchaus richtig war.

Unterdessen waren durch die experimentelle Forschung, besonders durch die Arbeiten *Barklas* weitere Momente gewonnen, die als Stütze der Wellentheorie der Röntgenstrahlen dienen konnten. Die elektrodynamische Theorie der Röntgenstrahlen ließ eine Polarisierung der Strahlen vermuten. Diese Polarisierung entsteht ja dadurch, daß die Bremsrichtung für alle Elektronen nahezu die gleiche ist. In der Tat gelang *Barkla* der Nachweis einer derartigen Polarisierung. In der Optik besitzt man vielfache Mittel, um die Polarisationsverhältnisse zu studieren. Da die gebräuchlichen davon alle auf Reflexion und Brechung beruhen, so müssen sie im Gebiet der Röntgenstrahlen versagen. Der Nachweis der Polarisierung ist jedoch auch hier möglich; man bedient sich hierbei der schon von *Röntgen* entdeckten Eigenschaft der Röntgenstrahlen, einen von ihnen getroffenen Körper wiederum zur Aussendung von Röntgenstrahlen, der sogenannten zerstreuten

Strahlung, anzuregen. Diese Strahlung ist analog dem an trüben Medien zerstreuten Lichte. In der Optik kann das trübe Medium für Polarisationsbestimmungen herangezogen werden, indem man die Intensität des Lichtes in einer senkrecht zum auffallenden Lichte stehenden Ebene untersucht. Ist das auffallende Licht polarisiert, so ist die Verteilung der Intensität des Streulichtes in dieser Ebene nicht gleichmäßig, sondern es sind zwei jeweils senkrecht aufeinanderstehende Maxima bzw. Minima vorhanden. Diese Methode wurde von *Barkla* auf Röntgenstrahlen übertragen, wobei als zerstreuer Körper Kohle oder Paraffin verwendet und die Intensität der gestreuten Röntgenstrahlung durch ein Ionisationsverfahren gemessen wurde.

Weiterhin sprachen die Eigenschaften der charakteristischen Sekundärstrahlen oder Eigenstrahlen der Elemente für eine dem Lichte wesensgleiche Wellennatur der Röntgenstrahlen. Es sei nur an das serienartige Auftreten der Eigenstrahlung, besonders bei den Elementen von höherer Atomzahl, sowie an die Gültigkeit der Stokesschen Regel bei der Anregung hingewiesen.

Obgleich alle diese Tatsachen für die Wellentheorie der Röntgenstrahlen ein immer festeres Fundament schufen, gab es eine Reihe von Forschern, an ihrer Spitze *W. H. Bragg*, die an eine korpuskulare Natur der Röntgenstrahlen glaubten und diese Auffassung durch experimentelle Forschungsergebnisse zu stützen suchten. Wenn sie auch für die Polarisation nur eine sehr gezwungene Erklärung fanden, so konnten sie jedoch eine Reihe von Erscheinungen anführen, für die die Wellentheorie zum Teil auch bei den analogen optischen Erscheinungen eine Erklärung schuldig geblieben ist. Besonders ist es die Energie des sekundären Kathodenstrahles, die nur mit der Wellenlänge der auslösenden Strahlung verbunden zu sein scheint und unabhängig ist von anderen Faktoren, wie Art und Zustand des Körpers, bei dem sie entsteht, auch unabhängig von der Intensität der Strahlung. Hier findet die Theorie des „neutralen Paares“ von *Bragg* leicht eine Erklärung. Die Energie des primären Kathodenstrahles bleibt konzentriert; es ändern sich nur bei der Neutralisation des Elektrons durch einen äußeren Anlaß die Eigenschaften des Strahles; die große Durchdringungsfähigkeit, die Nichtbrechbarkeit usw. erklärt sich. Durch einen weiteren Anlaß kann sodann die Neutralisation wieder aufgehoben werden, und der Strahl hat wiederum die Eigenschaft des ursprünglichen Kathodenstrahles. Die Wellentheorie steht hier vor einem Rätsel. Die Energie der Strahlung breitet sich mit der Entfernung von der Strahlenquelle über immer größere Flächen aus, die Intensität wird immer kleiner, und dennoch ist die Geschwindigkeit des sekundären Kathodenstrahles immer die gleiche. Woher kommt diese Energie? Zwar kennen wir beim Lichte die gleiche Erscheinung im lichtelektrischen Effekt, aber hier

haben wir ja eine große Fülle der Interferenzerscheinungen, die uns die Wellennatur des Lichtes beweisen, die bei den Röntgenstrahlen fehlen. Solange nicht eindeutig die Wellennatur der Röntgenstrahlen bewiesen war, war es wohl zu verstehen, daß eine Korpuskulartheorie ihre Anhänger hatte.

Übrigens wissen wir auch heutzutage über das Wesen der Elektronenemission durch die Röntgenstrahlen bzw. das Licht noch herzlich wenig. Wenn auch die Quantentheorie in der Einstein-Planckschen Formel eine Beziehung gibt zwischen der Energie der sekundären Kathodenstrahlen einerseits und der Frequenz der Strahlung und des Planckschen Wirkungsquantums andererseits, so ist doch dieser Zusammenhang ein rein formaler. Das Geheimnis der Quantentheorie ist noch ungeklärt.

Um dem Leser ein möglichst anschauliches Bild der Auffindung der Röntgenstrahlinterferenzen zu geben, sei es mir gestattet, die Verhältnisse in München zur Zeit der Laueschen Entdeckung zu skizzieren.

Die Anwesenheit *W. C. Röntgens* selbst als Vertreter der Experimentalphysik brachte es mit sich, daß im physikalischen Institut viel über Röntgenstrahlen gearbeitet wurde. Es mögen hier nur die schönen Arbeiten *v. Angers* über die Energiemessung und die *Baßlers* über die Polarisation der Röntgenstrahlen erwähnt werden. Mich selbst hatten die Röntgenstrahlen, mit denen ich mich schon während meiner Gymnasialzeit beschäftigt hatte, an die Wirkungsstätte ihres Entdeckers gezogen, und ich hatte das Glück, mit einer Arbeit über die azimutale Intensitätsverteilung der Röntgenstrahlen, die gleichfalls als Stütze der Wellentheorie herangezogen wurde, promovieren zu können. Die Vorliebe für die Röntgenstrahlen ist dann auch weiterhin für meinen wissenschaftlichen Werdegang entscheidend gewesen, wenn auch meine jetzige Tätigkeit sich nicht so sehr mit dem Gebiete der reinen Physik, als mit dem des physikalisch-biologischen Grenzgebietes befaßt.

Als Vertreter der theoretischen Physik wirkte schon damals *A. Sommerfeld* als Nachfolger *Boltzmanns* in München, dessen mannigfaltige Arbeiten über die Theorie der Röntgenstrahlen und ihrer Beugung bekannt sind. Gerade in die Zeit vor der Laueschen Entdeckung fallen auch seine Arbeiten über eine Hypothese, die er zur Vervollständigung der Impulstheorie gemacht hatte, daß nämlich der Bremsvorgang des Kathodenstrahlelektrons durch das Plancksche Wirkungsquantum reguliert werden sollte. Auf Grund dieser Hypothese kann man je nach der Geschwindigkeit des gebremsten Elektrons einen bestimmten Wert der Impulsbreite berechnen, wenigstens für den polarisierten Teil der Röntgenstrahlen.

Die Optik hatte ihren berufensten Vertreter in

M. v. Laue. Wie er selbst in seiner Nobelpredlesung sagt, bestand bei ihm die Vorliebe für die Optik, im besonderen die Interferenzerscheinungen von Jugend auf, und er bezeichnet es als ein glückliches Moment, daß er zur Zeit der Entdeckung mit der Niederschrift des Encyclopädieartikels der mathematischen Wissenschaften über Wellenoptik beschäftigt war.

Von nicht zu unterschätzender Bedeutung für die Geschichte der Entdeckung der Röntgenstrahlinterferenzen war fernerhin die Anwesenheit des Altmeisters der Kristallographie *P. v. Groth.* Die außerordentlich interessanten Vorlesungen *Groths* über den Bau der Kristalle und über Kristalloptik wurden gern besucht, und in Verbindung mit der Vorliebe *Röntgens* für Kristalle und Kristallphysik bedingten sie eine eingehende Kenntnis dieses Forschungsgebietes bei den Münchener Physikern.

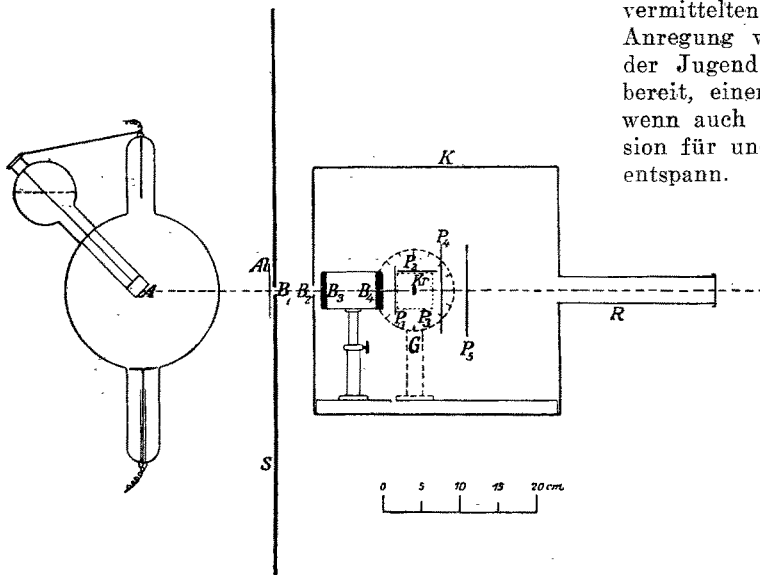


Fig. 1. Versuchsanordnung von *Friedrich* und *Knipping*.

So war denn der Boden für die Lauesche Entdeckung in der glücklichsten Weise wie wohl nirgends wo anders vorbereitet.

Den äußeren Anlaß zu dem glänzenden, so außerordentlich fruchtbaren Gedanken *Laues*, daß beim Durchgang von Röntgenstrahlen durch Kristalle Interferenzerscheinungen ähnlicher Art, wie beim Durchgang des Lichtes durch ein Beugungsgitter, auftreten müssen, bildete die Arbeit *P. P. Ewalds* über das Verhalten langer elektromagnetischer Wellen in einem Raumgitter, die dieser auf Veranlassung *Sommerfelds* begonnen hatte und später als Doktorarbeit herausgegeben hat. Wie wir von *Laue* wissen, kam er bei einer Besprechung dieses Problems mit *Ewald* auf den Gedanken, nach dem Verhalten von Wellen zu fragen, welche gegen die Gitterkonstanten des Raumgitters klein sind. Hier sagte ihm sein optisches Gefühl sogleich, um mit ihm zu sprechen,

dann müssen die Gitterspektren auftreten. Die Größenordnung der Gitterkonstante eines Kristalles von 10^{-8} cm war aus der Dichte, dem Molekulargewicht und der Masse des Wasserstoffatoms bekannt. Die aus den *Walther-* und *Pohl-*schen Beugungsversuchen sowie aus den theoretischen Überlegungen von *Wien* und *Sommerfeld* zu erwartende Größenordnung der Wellenlänge der Röntgenstrahlen betrug 10^{-9} cm. Demnach waren die Bedingungen für das Zustandekommen von Interferenzerscheinungen beim Durchgang von Röntgenstrahlen durch Kristalle außerordentlich günstig, und *Laue* sprach auch sogleich *Ewald* gegenüber seine Vermutung aus.

Ich selbst erfuhr von dem Gedanken *Laues* gelegentlich einer der wissenschaftlichen Aussprachen, die sich an unser Colloquium angeschlossen und den so erstrebenswerten Kontakt zwischen experimenteller und theoretischer Physik vermittelten, und die so reich an gegenseitiger Anregung waren. Mit dem Enthusiasmus, der der Jugend eigen ist, erklärte ich mich sofort bereit, einen einschlägigen Versuch zu machen, wenn auch zunächst sich die lebhafteste Diskussion für und wider die Realisierbarkeit der Idee entspann. Selbst die Einwände, die von be-

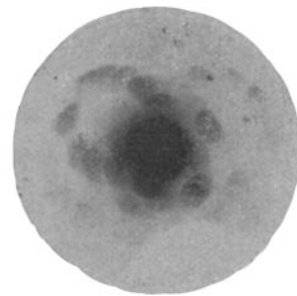


Fig. 2. Erste Interferenzaufnahme beim Durchgang von Röntgenstrahlen durch Kristalle.

rufenster Seite gemacht wurden, konnten *Laue* und mich nicht von dem Plane des Versuches abbringen. Zwar war ich als Assistent *Sommerfelds* zurzeit beschäftigt mit dem Aufbau einer Versuchsanordnung zur Untersuchung eines Problems zur Bremsstrahlung, der meine Zeit sehr in Anspruch nahm; indessen fanden wir bald eine willkommene Hilfe in *P. Knipping*, der soeben seine Doktorarbeit abgeschlossen hatte, und dem daher mehr Zeit zur Verfügung stand. So konnten Herr *Knipping* und ich die bekannte einfache Anordnung zusammenstellen, die hier nochmals in einer zwar etwas feineren Ausführung in Fig. 1 schematisch abgebildet sei.

Von den von der Antikathode einer Röntgenröhre ausgehenden Röntgenstrahlen wird ein schmales Bündel durch Blenden ausgeblendet. Dieses Bündel durchsetzt den Kristall *Kr*. Um den Kristall waren in verschiedenen Richtungen

photographische Platten angebracht, auf denen sich die Intensitätsverteilung der Sekundärstrahlen registrieren sollte. Gegen nicht gewollte Strahlen war die Anordnung durch Bleiwände geschützt.

Meine Erfahrungen über die Intensität der Sekundärstrahlen sagten mir, daß recht beträchtliche Expositionszeiten notwendig waren, um ein Resultat erwarten zu dürfen. Sonst wäre ja die Erscheinung längst gefunden worden, da gelegentlich des Suchens nach Doppelbrechung und Polarisation schon des öfteren Kristalle mit Röntgenstrahlen durchstrahlt worden waren. Glücklicherweise stand uns aus dem Institut für theoretische Physik ein größerer Induktor sowie eine Intensivröhre von Gundelach dank dem Entgegenkommen *Sommerfelds* zur Verfügung. Schwieriger gestaltete sich schon die Wahl eines geeigneten Kristalles. Wir glaubten anfangs, es mit einer Erscheinung der charakteristischen Sekundärstrahlung des Kristalles zu tun zu haben. Infolgedessen bewegten sich die ersten Versuche in einer ungünstigen Richtung. Die parallel zum Primärstrahl aufgestellten photographischen Platten zeigten nur wenig charakteristische Schwärzungserscheinungen. Wenn auch die Theorie der Interferenzerscheinung im Prinzip schon fertig war, so war sie doch von *Laue* noch nicht genauer durchgearbeitet; vor allen Dingen war die Form der Erscheinung noch nicht bekannt. Erst als wir auch eine Platte hinter dem Kristall aufstellten, erhielten wir nach mehrstündiger Expositionszeit das bekannte erste Photogramm der Interferenzerscheinung, das in Fig. 2 nochmals abgebildet sei. Es ist mir ein unvergeßliches Er-

lebnis, als ich spät abends ganz allein in meinem Arbeitszimmer des Institutes vor der Entwicklungsschale stand und die Spuren der abgelenkten Strahlen auf der Platte hervortreten sah. Am nächsten Tage war mein erster Gang in aller Frühe zu *P. Knipping*, um ihm die Platte zu zeigen. Wir eilten zu *Laue* und zu meinem Chef, wo die Aufnahme naturgemäß auf das lebhafteste besprochen wurde. Dank dem großen Interesse und Entgegenkommen *A. Sommerfelds* war es uns möglich, mit den reichlichen Mitteln des Institutes die Untersuchung weiter fortzusetzen. In hochherziger Weise wurde ich von meiner begonnenen Bremsstrahlenarbeit dispensiert. Auch *Röntgen* und *Groth*, die gleichfalls von den Versuchen erfahren hatten, ließen es an Unterstützungen durch Rat und Tat nicht fehlen. So wurde denn eine neue bessere Versuchsanordnung gebaut und bald zeigte uns die Durchstrahlung regulärer Kristalle in den kristallographisch ausgezeichneten Richtungen die volle Schönheit der Interferenzerscheinung in den bekannten Diagrammen. Unterdessen hatte *Laue* auch die Theorie der Erscheinung niedergeschrieben, und am 8. Juli 1912 konnte *Sommerfeld* der Münchener Akademie unsere bekannte Arbeit über Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen vorlegen, durch die die Wellennatur der Röntgenstrahlen endgültig bewiesen wurde.

Die außerordentliche Bedeutung der Laueschen Entdeckung für die Wissenschaft und Technik ist bekannt. Ganz neue Forschungsgebiete sind dadurch erschlossen worden. Ich schätze mich glücklich, daß ich einen, wenn auch bescheidenen, Teil zur Entdeckung beitragen konnte.

Zehn Jahre Röntgenspektroskopie.

Von Paul Knipping, Berlin-Dahlem.

Nun sind zehn Jahre verflossen seit dem Tage, an dem das erste Lauediagramm zum erstenmal sichere Kunde gab von zwei vorher lange umstrittenen Tatsachen, von der Wellennatur des Röntgenlichtes und der geordneten Struktur der Kristalle. Zehn Jahre sind eine kurze Zeit, gemessen am Fortschritt der Wissenschaft, und der größte Teil dieser Spanne war nicht sonderlich dazu angetan, wissenschaftliche Arbeiten leicht zu machen. Aber trotz aller Hemmungen ist unsere Erkenntnis in Riesensprüngen vorwärts gegangen, wie es selten bei einem Wissenszweig in gleich kurzer Zeit vorkommt.

Der Lauesche Gedanke war gleichsam der Schlüssel, mit dem früher verschlossen gewesene Gebiete von weit umfassender Bedeutung, wie das des Atombaues, der Strahlung, der Spektroskopie, des Kristallbaues aufgetan wurden. Die Spektroskopie des sichtbaren, wie des ultravioletten und ultraroten Teiles beispielsweise, die vordem jahr-

zehntelang im Dunkeln tastend, eine ganz eigenartige Wissenschaft, fast jeder führenden Theorie bar, gewesen war, wurde durch die Röntgenspektroskopie im Verein mit der fast gleichzeitig bekanntgewordenen Bohrschen Theorie auf eine verständliche Grundlage gehoben. Das Atom selbst, also der Körper, welcher ein Spektrum aussendet, vor zehn Jahren noch ein Buch mit sieben Siegeln, nach einem klassischen Ausspruch „komplizierter als ein Klavier“, ist uns jetzt bis in viele kleine Einzelheiten bekannt. Heute spricht jeder mann vom Atomkern und seinen Elektronenhüllen, ja sogar beginnt man, dem Kern zu Leibe zu rücken und ihn weiter zu zerlegen. (In diesem Zusammenhang soll die *Astonsche* Massenspektroskopie, obwohl nicht hierher gehörend, nicht unerwähnt bleiben.) Angesichts der wunderbaren Errungenschaften, die sich wesentlich auf die Röntgenspektroskopie aufbauen, möge es heute erlaubt sein, in kurzen