4. *Zur Frage der Beugung der Röntgenstrahlen; von B. Walter und R. Pohl.*

(Hierzu Taf. V, Figg. 1 u. 2.)

Die Herren Haga und Wind haben in mehreren Abhandlungen den Nachweis zu führen gesucht, daß die Röntgenstrahlen — ebenso wie diejenigen des Lichtes — einer Beugung fähig sind; und ihre Versuche werden auch in neuerer Zeit vielfach als ein endgültiger Beweis für das Vorhandensein dieser Erscheinung angesehen. Demgegenüber glauben wir nun aber dartun zu können, daß die von den genannten Beobachtern einer Beugung der Strahlen zugeschriebenen Erscheinungen sämtlich auf ganz andere Ursachen zurückzuführen sind, und daß demnach bis jetzt irgend ein experimenteller Anhalt für eine Beugung dieser Strahlengattung nicht vorhanden ist.

Die erste Veröffentlichung von Haga und Wind stammt aus dem Jahre 1899¹⁾; und die damals von ihnen benutzte Versuchsanordnung war kurz die folgende. Von den Strahlen einer Röntgenröhre wurde durch einen Spalt, der 14, 18 oder 25 μ weit gemacht wurde, und dessen Höhe 1 cm betrug, ein schmales Bündel ausgeblendet. Dieses fiel in 75 cm Abstand auf einen zweiten Spalt, den sogenannten Beugungsspalt, dessen Höhe 3 cm war, und dessen Weite sich von 14 bis zu einigen μ keilförmig verjüngte. Zumeist in 75 cm Abstand hinter dem Beugungsspalt war ferner eine photographische Platte angebracht, auf der nach Belichtungszeiten von 29—200 Stunden Bilder dieses Spaltes erzeugt wurden. Diese „Beugungsbilder“, von denen eines, welches sich auf eine Spaltweite von oben 10 und unten 6 μ bezieht, nach der Originalabhandlung in Fig. 1, Taf. V, in etwa 14facher Vergrößerung wiedergegeben ist, zeigten an einigen Stellen, von denen diejenige der Fig. 1 durch einen Pfeil gekennzeichnet ist; schwache seitliche Verbreiterungen, welche die Beobachter eben nicht anders als durch eine

1) H. Haga u. C. H. Wind, Kon. Akad. te Amsterdam, 25. April 1899 und Wied. Ann. 68. p. 884. 1899.

Beugung der zur Darstellung des Bildes benutzten Röntgenstrahlung erklären zu können vermeinten. Aus den Abständen, sowie den zugehörigen Weiten des Beugungsspaltess ermittelten sie für die Wellenlängen der Strahlen in erster Annäherung Werte zwischen $0,012$ und $0,27 \mu\mu$, während Hr. Sommerfeld nach einer etwas anderen Theorie aus der deutlichsten ihrer Verbreiterungen $\lambda = 0,13 \mu\mu$ berechnete.¹⁾

Die Versuche wurden später von Walter²⁾ in erheblich vervollkommneter Weise wiederholt, indem er zunächst die Weite des ersten Spaltess auf 9μ verengerte, ferner zweitens die beiden Spalte und die photographische Platte zusammen auf eine starre Eisenschiene setzte und endlich drittens eine viel stärkere Strahlung (Wasserkühlröhren) und daher erheblich kürzere Expositionszeiten anwandte. Die erhaltenen Bilder, von denen eines, welches sich auf ungefähr die gleichen Spaltweiten und Abstände wie das der Fig. 1 bezieht, in Fig. 2, Taf. V, in gleicher Vergrößerung abgebildet ist, wiesen — trotz ihrer viel größeren Schärfe — doch in keinem Falle jene lokalen Verbreiterungen auf, aus denen Haga und Wind auf eine Beugung geschlossen hatten, und Walter kam deswegen zu der Ansicht, daß jene Unregelmäßigkeiten lediglich auf die ungleichmäßige Empfindlichkeit der photographischen Schicht der Haga und Windschen Originalaufnahmen zurückzuführen seien. Dieselbe Erscheinung könne man nämlich in kleinerem Maßstabe fast auf jeder derartigen Aufnahme beobachten; und das verhältnismäßig starke Auftreten derselben bei den Bildern der genannten Beobachter erkläre sich ungezwungen durch die übermäßig lange photographische Entwicklung, welche die Verfasser für ihre Aufnahmen für nötig erachtet hatten. Walter selbst hatte nämlich seine Platten stets nur so lange entwickelt, bis in den nicht belichteten Teilen derselben die ersten Spuren des Schleiers auftraten.

Diese Erklärung der lokalen Verbreiterungen der ersten Bilder von Haga und Wind darf jetzt wohl für um so sicherer gelten, als auch die neueren Aufnahmen dieser Beobachter, die ganz nach Art der Walterschen hergestellt

1) A. Sommerfeld, *Physik. Zeitschr.* 1. p. 105. 1900 u. 2. p. 58. 1901.

2) B. Walter, *Physik. Zeitschr.* 3. p. 157. 1902.

wurden, und auf die wir sogleich näher eingehen werden, in keinem Falle eine solche Verbreiterung zeigen; und wenn daher diese Erscheinung in der von Wind herrührenden schematisierten Form¹⁾ noch gegenwärtig sogar in Lehrbüchern²⁾ abgebildet wird, so ist dies nach unserem Dafürhalten in keiner Weise durch die Versuche gerechtfertigt.

Kommen wir sodann zu den neueren Versuchen von Haga und Wind³⁾, die in Veranlassung des Walterschen Einspruches gegen ihre ersten Aufnahmen unternommen wurden, so benutzten nun die Beobachter für die drei Aufnahmen, mit denen sie sich diesmal begnügten, stets dieselben beiden Spalte, von denen der zweite, der Beugungsspalt, sich — bei einer Länge von 4 cm — von 27μ bis zum vollständigen Schlusse verjüngte, während die Weite des ersten Spaltes stets 15μ betrug. Die Entfernungen blieben die früheren.

Die aufgenommenen „Beugungsbilder“ zeigten nun diesmal zwar nicht, wie erwähnt, jene lokalen Verbreiterungen der früheren, dafür aber glaubten die Verfasser jetzt für das letzte Ende derselben, da, wo sie die Weite ihres Beugungsspaltess von $8-3,5\mu$ abnehmend angeben, eine ziemlich plötzlich einsetzende und auch ganz außerordentlich rasch zunehmende Verbreiterung dieser Bilder feststellen zu können, während die letzteren für das Gebiet von $27-8\mu$ Spaltweite hin nahezu die von der rein geometrischen Theorie, d. h. ohne Berücksichtigung von Beugung, verlangte Keilform zeigen sollten.

Zur besseren Übersicht haben wir die Haga und Wind'schen Ausmessungen ihrer genannten drei Bilder in umstehender Fig. 3 durch die drei punktierten Kurven wiedergegeben, während die ausgezogene Linie derselben die sich bei rein geometrischem Strahlengang ergebende Breite des Bildes darstellt. Von den an der Abszisse der Figur angeschriebenen Zahlenreihen gibt die obere die von Haga und Wind zur Orientierung auf ihren röntgenographischen Aufnahmen des

1) C. H. Wind, *Physik. Zeitschr.* 2. p. 298. 1901.

2) Vgl. z. B. J. J. Thomson, „Elektrizitätsdurchgang in Gasen“. Deutsch von E. Marx, Leipzig 1906. p. 546.

3) H. Haga u. C. H. Wind, *Kon. Akad. te Amsterdam*, 22. Oktober 1902; *Ann. d. Phys.* 10. p. 305. 1903.

Beugungsspalt¹⁾ angebrachten Teilstrichmarken und die untere die zugehörigen Weiten dieses Spaltes an. Die Ordinaten der Fig. 3 endlich stellen die gemessenen bzw. berechneten Breiten der „Beugungsbilder“ dar.

Fig. 3.

Der Vergleich der drei punktierten mit der ausgezogenen Kurve der Fig. 3 zeigt nun sofort, daß nach den Messungen der Beobachter in ihren drei in Rede stehenden Beugungsaufnahmen von einer Spaltweite von etwa 6μ an plötzlich eine ganz gewaltige Verbreiterung des Beugungsbildes einsetzt, eine Verbreiterung, die, wenn sie der Wirklichkeit entspräche, natürlich kaum anders als durch eine Beugung der Strahlen zu erklären sein würde, wenn es allerdings auch schon sehr auffällig wäre, daß diese Erscheinung hier plötzlich in so un-

1) Diese „Spaltaufnahmen“, die im Gegensatz zu den „Beugungsaufnahmen“ nur den Zweck haben, die genaue Gestalt des Beugungsspalt¹⁾ kennen zu lernen, werden in der Weise hergestellt, daß die photographische Platte — bei unveränderter Stellung des ersten und zweiten Spaltes — möglichst dicht hinter letzterem angebracht und also dieser mit einem X-Strahlenbündel von derselben Art abgebildet wird wie dasjenige ist, mit welchem auch das Beugungsbild hergestellt wird. Diese Art der Spaltausmessung ist jedoch, wie weiter unten gezeigt werden wird, nicht ganz zuverlässig.

geheurem Maßstabe einsetzt. Es läßt sich nun aber leicht der Nachweis führen, daß jene Verbreiterung in den fraglichen Bildern tatsächlich gar nicht vorhanden, *sondern den Beobachtern lediglich durch eine optische Kontrastwirkung vorgetäuscht worden ist.*

Um sich hiervon zu überzeugen, hat man nur auf ein Stück weißes Papier einen geradlinigen, schwarzen Strich von ungefähr $\frac{1}{4}$ mm Breite zu ziehen und auf diesen eine jener 17fachen Vergrößerungen zu legen, welche Haga und Wind selbst von ihren in Rede stehenden Beugungsbildern auf photographischen Platten hergestellt und auch nach verschiedenen Seiten hin verschickt haben. Der schwarze Strich muß dabei möglichst durch die Mitte des Spaltbildes — bis zu seinem letzten Ende hin — gehen und ferner die Platte auch ein wenig gegen das Papier angedrückt werden, so daß Strich und Spaltbild möglichst zusammenfallen. Dann erscheint die in Rede stehende pinselartige Verbreiterung des letzten Endes dieser Bilder plötzlich wie weggeblasen, während demgegenüber der entsprechende Randschleier in den oberen Teilen der Bilder mit solcher Deutlichkeit hervortritt, daß dieselben hier auch ohne Messung sofort erheblich breiter erscheinen als unten.

Damit aber ist nun auch die von den Beobachtern so sehr vermißte Keilform ihrer Bilder — soweit wenigstens eine solche hier überhaupt erwartet werden kann — durchaus gewahrt; und eine Notwendigkeit aus ihren letzten Aufnahmen auf eine Beugung der Röntgenstrahlen zu schließen, liegt also nicht vor.

Was aber ferner die Ursache jener optischen Täuschung anbetrifft, welche die Veranlassung dazu war, daß Haga und Wind für das obere Ende ihrer Beugungsbilder eine viel zu geringe Breite maßen, so ist dieselbe darin zu suchen, daß hier der schwache Randschleier des Bildes gegenüber dem sehr kräftigen Kern desselben leicht übersehen wird, während man in den unteren Teilen des Bildes, wo der letztere fehlt, den ersteren natürlich auch stets in seiner ganzen Breite ausmißt. Bringt man jedoch jenen Kern nach der oben angegebenen Methode auch für die oberen Teile des Bildes zum Verschwinden, so tritt der Randschleier auch hier sofort in seiner ganzen Größe hervor.

Mit dieser Auffassung der Haga und Windschen Bilder stimmen übrigens auch die geometrischen Grundlagen derselben auf das beste überein; denn nach den oben angegebenen Spaltweiten und Entfernungen ergibt sich, daß der Kernschatten ihrer Bilder sich bis etwa $7,5\mu$ Spaltweite hinab erstreckte; und gerade von dort ab beginnt nun auch die von den Beobachtern an ihren Bildern gemessene Verbreiterung.

Eine besondere Diskussion verlangen ferner noch die *Unterschiede*, welche Haga und Wind bei ihren drei in Rede stehenden Bildern gefunden haben; und zwar um so mehr, als sie daraus sogar auf eine verschiedene Wellenlänge der harten und weichen Röntgenstrahlen schließen. Wir werden indessen sehen, daß auch diese Unterschiede sich von unserem Gesichtspunkte aus ganz einfach erklären.

Die letzteren selbst bestehen darin, daß bei den drei Aufnahmen *A*, *B* und *C* der Beobachter die von ihnen gemessene Verbreiterung nicht an derselben Stelle, sondern bei bzw. der Teilstrichmarke $10\frac{1}{2}$, 12 und 11 ihres Spaltbildes, entsprechend einer Spaltweite von bzw. 7, 4 und 6μ , beginnt, so daß sie demnach auch für die dem Beginne der Verbreiterung entsprechenden Wellenlänge bzw. 0,16, 0,05 und $0,12\mu\mu$ berechnen. Und da nun ferner die Aufnahmen *A* und *C* nach ihren Angaben in der Hauptsache mit weichen, *B* dagegen vorzugsweise mit harten Röntgenstrahlen angefertigt wurde, so schließen die Beobachter demnach, daß der letzteren Strahlung die kleinere Wellenlänge zukomme, wie man es ja auch vom Standpunkte der von ihnen angenommenen Theorie wohl erwarten könnte.

Nach unserem Dafürhalten steht nun aber mit dieser Annahme zunächst schon die Tatsache in Widerspruch, daß die Breite des letzten Endes der drei Aufnahmen der Beobachter nach ihren eigenen Messungen in allen drei Fällen die gleiche ist (vgl. Fig. 3); denn nach jener Theorie müßte man doch offenbar erwarten, daß die Verbreiterung des Spaltbildes bei der mit härteren Strahlen hergestellten Aufnahme — ebenso wie sie erst bei einer kleineren Spaltweite einsetzt — so sich auch für das Ende des Spaltes in schwächerem Maße als bei den beiden anderen Aufnahmen zeigen sollte.

Im übrigen läßt sich nun aber auch zeigen, daß die er-

wähnten Unterschiede der in Rede stehenden drei Aufnahmen einfach dadurch entstanden sind, daß der Beugungsspalt selbst sich in den drei Monaten, welche zwischen den Aufnahmen lagen, entsprechend geändert hat. Für diese Annahme spricht nämlich zunächst schon der Umstand, daß auch die beiden röntgenographischen „Spaltaufnahmen“ der Beobachter, von denen die eine vor Beginn und die andere nach Schluß ihrer drei Beugungsaufnahmen hergestellt wurden, sich hinsichtlich der Länge des Beugungsspaltens ganz beträchtlich unterscheiden, denn in der einen dieser Aufnahmen reicht nämlich das spitze Ende des Spaltbildes nur bis zur Marke 13, in der anderen dagegen bis nahe an 14 heran. Fast zur Gewißheit aber wird unsere Auffassung schließlich dadurch, daß auch die drei Beugungsbilder selbst sich um so weiter nach unten hin erstrecken, je später in ihnen die (scheinbare) Verbreiterung beginnt; denn das letzte Ende der drei Aufnahmen liegt bzw. bei den Teilstrichmarken $12\frac{1}{2}$, $13\frac{1}{4}$ und $12\frac{3}{4}$, d. h. der Spalt hatte sich eben an seinem unteren Ende bei der Aufnahme *B* erheblich weiter aufgetan als bei den beiden anderen.

Somit kommen wir also zu dem Schluß, daß auch die neueren Beugungsaufnahmen von Haga und Wind bei genauerer Kritik in keiner Hinsicht einen Grund zu der Annahme einer Beugung der Röntgenstrahlen liefern — ebensowenig wie dies die älteren Bilder der genannten Beobachter, noch die zahlreichen Aufnahmen Walters aus dem Jahre 1901, noch auch endlich unsere vielfachen Versuche aus neuester Zeit getan haben.

Denn wenn man vielleicht noch darauf hinweisen wollte, daß die neueren Aufnahmen der erstgenannten Beobachter nach ihren in Fig. 3 dargestellten Messungen die aus rein geometrischen Gründen am unteren Ende zu erwartende Breite jedenfalls ganz erheblich übertrafen, so haben wir dagegen zu bemerken, daß dies nach den obigen Darlegungen in gleichem Maße auch für die oberen Teile der betreffenden Bilder gilt, so daß es sich also hier nur um eine allgemeine Verbreiterung des ganzen Bildes handelt, eine Verbreiterung, auf die auch Haga und Wind niemals irgendwelchen Wert gelegt haben, da sie wohl wußten, daß eine geometrisch absolut vollkommene Abbildung eines solchen, außerordentlich feinen und noch dazu selbst durchaus nicht fehlerfreien Gebildes, wie es der Beugungs-

spalt darstellt, auf einer in so beträchtlichem Abstand dahinter aufgestellten photographischen Platte einfach unmöglich ist. Wir wollen daher an dieser Stelle auch nur noch auf eine einzige der vielen hierbei auftretenden Schwierigkeiten hinweisen, da uns diese von den genannten Beobachtern nicht genug hervorgehoben zu sein scheint. Dieselbe betrifft die genaue Parallelstellung des ersten, die Strahlenquelle bildenden Spaltes mit dem zweiten, dem abzubildenden: die Wichtigkeit dieses Punktes leuchtet ein, wenn man berücksichtigt, daß eine Verdrehung der beiden Spalte um nur *einen* Winkelgrad unter den vorliegenden Verhältnissen schon eine Verbreiterung des ganzen Beugungsbildes um etwa 50μ bewirkt, während es sich hier doch um die Abbildung eines Objektes von 5μ Breite und darunter handelt.

Alle diese Schwierigkeiten, vor allem aber auch die der Erlangung eines bei den in Rede stehenden Dimensionen noch genügend genauen Spaltes, die u. E. von Haga und Wind ebenfalls nicht in genügendem Maße gewürdigt worden ist, sind nun auch der Grund gewesen, warum auch wir trotz sehr zahlreicher, in neuester Zeit angestellter Versuche doch bisher nicht erheblich über die schon von Walter im Jahre 1901 erreichte Genauigkeit, wie sie etwa durch Fig. 2 der Taf. V dargestellt wird, hinausgekommen sind; wir hoffen jedoch, demnächst in Besitz eines nach gänzlich neuen Prinzipien hergestellten, wesentlich genaueren Spaltepaares zu gelangen, und gedenken dann diese Versuche noch einmal wieder aufzunehmen.

Schließlich sei noch eine weitere bei diesen Versuchen auftretende Fehlerquelle erwähnt, die von Haga und Wind nicht berücksichtigt worden ist, und die allerdings nicht die Herstellung des Beugungsbildes, sondern vielmehr nur die Ausmessung des Beugungsspalt selbst anbetrifft. Es läßt sich nämlich leicht zeigen, daß die von den Beobachtern zu diesem Zwecke angewandte, auf p. 718 Anmerkung beschriebene Methode, für die hier in Betracht kommenden sehr kleinen Spaltweiten nicht mehr brauchbar ist, da sich nämlich mit Hilfe derselben einesteils für Spalte unter 4μ Weite überhaupt kein adäquates Bild mehr erzielen läßt und da anderenteils auch die Breite des auf diese Weise erzeugten Bildes eines weiteren Spaltes mit der Größe der dabei auf-

gewandten Strahlungsenergie wächst. Zur Begründung dieser Behauptungen führen wir in nachstehender Tab. I unter B_o und B_u die Breiten der auf diese Weise erhaltenen Bilder des oberen bzw. unteren Teiles eines sehr vollkommenen, unter dem Mikroskope an den betreffenden Stellen bis auf etwa $0,5\mu$ Unsicherheit bzw. 7 und 1μ breiten Spaltes von etwa 12 mm Länge an. Die photographische Schicht befand sich bei allen in der Tabelle angeführten Aufnahmen in 6 mm Abstand hinter diesem Spalte, während der in 75 cm Abstand davor aufgestellte Lichtspalt jeweilig die unter s_1 angegebene Breite hatte. Endlich ist noch in der Tabelle unter $s_1 i t$ das Produkt aus der Spaltbreite s_1 in μ , der die Röntgenröhre durchsetzenden, mittleren Stromstärke i in Milliampères und der Expositionszeit t in Minuten angegeben, ein Produkt, das als Maß der bei der betreffenden Aufnahme benutzten Röntgenenergie dienen kann, da die Härte der Röhre in allen Fällen annähernd die gleiche war.

Tabelle I.

Röntgenographische Breiten, B_o und B_u , zweier bzw. 7 und 1μ breiten Teile eines Beugungsspaltcs bei verschiedener Strahlungsenergie $s_1 i t$.

Abbildung	I	II	III	IV	V
s_1	7	100	100	100	400 μ
$s_1 i t$	3360	6500	7800	9300	20000
B_o	10	12	12	13	14 μ
B_u	4	5	6	7	8 μ

Man ersieht aus dieser Tabelle zunächst, daß das untere, etwa 1μ weite Ende des Spaltes selbst bei der kleinsten aufgewandten Strahlungsenergie (Aufnahme I) im Bilde schon eine Breite von etwa 4μ hatte, so daß also von einer adäquaten Abbildung des betreffenden Spaltteiles selbst in diesem Falle keine Rede mehr sein kann. Das so erzeugte Bild wird ferner bei Anwendung größerer Energiemengen immer breiter, so daß die Breite des genannten Spaltstückes bei der Aufnahme V sogar 8μ betrug, d. h. also um etwa 6μ zu breit war; denn nach der geometrischen Berechnung — auf Grund des angegebenen Wertes von s_1 und der angeführten Ab-

stände — sollte nämlich auch in diesem Falle das Bild höchstens um 1μ breiter sein als der Spalt selbst. Statt dessen ist es aber an beiden Enden um ungefähr 6μ , d. h. also um nahezu dieselbe Größe, zu breit. Diese letztere Beziehung gilt übrigens auch für die anderen Aufnahmen, wie man einfach daraus ersieht, daß die Differenz $B_o - B_u$ für alle nahezu die gleiche und zwar gleich der Differenz der in Frage kommenden Spaltbreiten selbst ist.

Indem wir uns hinsichtlich der Ursache dieser Verbreiterung eine besondere Untersuchung vorbehalten, entnehmen wir daraus in bezug auf die hier in Rede stehende Frage schließlich noch das, daß die von Haga und Wind angegebenen Weiten zumal des letzten Endes ihres Beugungsspaltcs sämtlich um ein beträchtliches zu groß waren, so daß sich demnach auch die Größe der von ihnen aus ihren Beugungsversuchen berechneten Wellenlängen um ein ganz beträchtliches erniedrigt; denn diese Wellenlänge nimmt, wie die Beugungsformel zeigt, *quadratisch* mit der Spaltbreite ab.

Da jedoch die Haga und Windschen Versuche nach unseren obigen Darlegungen in keiner Weise auf eine Beugung und also auch ebensowenig auf eine Wellenlänge der Röntgenstrahlen schließen lassen, so kann also dieses letztere Resultat nach unserem Dafürhalten höchstens in dem Sinne verwertet werden, daß danach *die fragliche Wellenlänge — falls überhaupt eine solche existiert — jedenfalls noch weit unter der von Haga und Wind gefundenen Größenordnung, d. h. also weit unter $0,1\mu$ gelegen sein muß* — und das ist also schließlich auch das Resultat dieser Abhandlung.

Hamburg, Physik. Staatslaboratorium, im Januar 1908.

(Eingegangen 16. Januar 1908.)