

19. Die Beugung der Röntgenstrahlen; von H. Haga und C. H. Wind.

Die früher ¹⁾ von Hrn. Fomm beschriebenen Versuche bildeten den Ausgangspunkt für eine Reihe von Experimenten, welche im hiesigen Institute angestellt wurden in der Hoffnung, die Wellenlänge der Röntgenstrahlen genauer bestimmen zu können.

Es ergab sich aber, dass die von Fomm beobachteten Streifen nicht durch Beugung zu Stande kamen und zwar in folgender Weise. ²⁾ Die von einer Focusröhre austretenden Röntgenstrahlen durchsetzten zunächst einen 0,5 mm breiten Spalt, dann den in einer Entfernung von 20 cm befindlichen, 0,14 mm breiten Beugungsspalt und trafen zuletzt auf die photographische Platte, welche sich in einer Entfernung von 20—50 cm vom Beugungsspalte befand. Der Versuch zerfiel in zwei Theile: zuerst wurde die untere Hälfte der photographischen Platte mittels einer Bleiplatte gegen die Einwirkung der Röntgenstrahlen geschützt; darauf wurde die obere Hälfte mit der Bleiplatte bedeckt und der Beugungsspalt durch Verschiebung des einen Spaltrandes bis auf 9 mm erweitert.

Die Platte zeigte also das Bild (Fig. 1) des schmalen Spaltes unmittelbar oberhalb des Bildes des weiten Spaltes; man sah die Fomm'schen Streifen *a* und *b*, *c* und *d*; aber *b* erschien in der Verlängerung von *c*! Es machte den Eindruck, als ob zu jeder Kante ein Streifen gehörte, sodass beim allmählichen Verschmälern des Spaltes der Streifen, *d* auf *c* (in welchem Falle nur ein Streifen zu sehen wäre) und jenseits *c* zu liegen käme, wodurch man das Bild des oberen Theiles

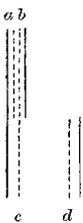


Fig. 1.

erhielte. Es lag natürlich nahe, zu prüfen, ob diese Ansicht richtig sei: statt eines geraden Spaltes wurde ein keilförmiger Spalt als Beugungsspalt gewählt und in der That

1) L. Fomm, Wied. Ann. 59. p. 350. 1896.

2) P. G. Tiddens, Verslagen Kon. Akad. Wetenschappen. Amsterdam. Februar 1897; Beibl. 21. p. 603. 1897.

erhielt man ein Bild, das schematisch in Fig. 2 abgebildet ist, worin die punktirten Linien die Fomm'schen Streifen darstellen. Aus diesen Versuchen ging klar hervor, dass man es mit keinen Beugungserscheinungen zu thun hat. Es entstanden aber zwei Fragen:

1. Giebt es Beugungserscheinungen bei Röntgenstrahlen?

2. Wie erklären sich die Fomm'schen Streifen?

Um der ersten Frage näher zu treten, wurde ausgegangen von einer sich aus der Beugungstheorie des Lichtes leicht ergebenden Erwägung¹⁾: dass man mit denselben Spalten — Lichtspalt und Beugungsspalt — ganz genau dieselben Beugungserscheinungen erhalten muss bei Strahlen einer Wellenlänge $\frac{1}{n}\lambda$ wie bei Strahlen einer Wellenlänge λ , falls die Entfernungen, Lichtspalt bis Beugungsspalt und Beugungsspalt bis Schirm (eventuell bis photographische Platte), n -mal grösser genommen werden. Es wurden nun bei kleiner Entfernung mittels gewöhnlichen Lichtes ein Beugungsbild, z. B. ein Minimum zwischen zwei Maximis entworfen, dieselben Spalten wurden in 5, 10, 15, 25, 50 etc. mal grösserer Entfernung voneinander aufgestellt und die Lichtquelle durch eine Röntgenröhre ersetzt: kein Beugungsbild erschien, nur ein scharfes Bild des Spaltes, woraus folgt, dass die Wellenlänge mehr als 50 mal kleiner als die der Lichtstrahlen sein musste.

Was die zweite Frage anbelangt, so wurde vergebens versucht, durch magnetische Kräfte, durch zur Erde abgeleitete oder elektrisirte Aluminiumschirme irgend eine Aenderung in den Fomm'schen Streifen zu verursachen.

Es gelang aber einem von uns zu zeigen, dass aus der Beugungstheorie bei Berücksichtigung einer merklichen Breite des ersten Spaltes²⁾ ähnliche Maxima wie die fraglichen sich ergeben,



Fig. 2.

1) P. G. Tiddens, Verslagen Kon. Akad. Wetenschappen. Amsterdam. 21. April 1897; Beibl. I. c.

2) Es ergibt sich nämlich folgende allgemeine graphische Regel für die Berücksichtigung der Breite des Lichtspaltes in ihrem Einfluss auf das zu erhaltende Beugungsbild: Man zeichne die Intensitätscurve des („primären“) Beugungsbildes, welches einem unendlich engen Lichtspalte entsprechen würde, zweimal nebeneinander auf einer und derselben Abscissenaxe und zwar die eine Curve um $(b/a)\sigma$ gegen die andere verschoben (Bedeutung der Buchstaben p. 889). Ein Maass für die Intensität des wirklichen

und es zeigte sich alsbald die nächstliegende Folgerung, dass nämlich die Fomm'schen Streifen mit Licht leicht nachzuahmen sein müssten, als vollkommen zutreffend. Es wurde angewandt als Lichtquelle ein Zirconbrenner, ein 4 mm breiter Lichtspalt, ein 1,5 à 7 mm breiter Beugungsspalt und eine Entfernung beider Spalte von 70 cm. Auf einem 300 cm entfernten Schirme sah man deutlich zwei ganz mit den Fomm'schen Streifen übereinstimmende Maxima; beim keilförmigen Spalt verhielten sich diese Maxima ganz genau, wie es oben von den mit Röntgenstrahlen entstandenen Streifen erwähnt wurde. Objectiv kann man diese Erscheinungen mit elektrischem Lichte im Hörsaale demonstrieren; auch photographische Aufnahmen lassen sich bequem machen.

In *einer* Beziehung aber bestand ein Widerspruch zwischen der erweiterten Beugungstheorie und den Versuchen: die Theorie konnte nämlich nicht erklären, dass die beiden Maxima beim keilförmigen Spalte nach der Kreuzung sich wieder trennten. Experimentell aber waren die Erscheinungen bei Licht und Röntgenstrahlen so völlig dieselben, dass wir in dieser Uebereinstimmung einen sicheren Grund zu finden meinten für die Wellennatur der Röntgenstrahlen und dass wir hofften, aus den Fomm'schen Streifen dennoch eine Wellenlänge ableiten zu können.

Bei der Ausmessung der Abstände der Maxima bei den Versuchen mit Licht und mit Röntgenstrahlen stiessen wir aber auf eigenthümliche Schwierigkeiten, welche zusammen mit dem oben erwähnten Widerspruch Zweifel an der Realität des Phänomens aufsteigen liessen; und es gelang schliesslich, den Beweis zu liefern, dass die Fomm'schen Streifen und somit auch deren Nachahmung mit Licht einer, wie wir meinten, bis dahin unbekannten, optischen Täuschung zugeschrieben werden müssten.¹⁾

(„secundären“) Beugungsbildes findet man für jeden Punkt der Abscissenaxe in dem von den beiden Curven und der Ordinate des betreffenden Punktes eingeschlossenen Flächeninhalt, wobei die Flächentheile als positiv oder negativ anzunehmen sind, je nachdem die eine oder die andere Curve der Abscissenaxe am nächsten liegt. Vgl. weiter: C. H. Wind, Verslagen Kon. Akad. v. Wetensch. Amsterdam. 5. p. 448; 6. p. 79. 1897.

1) Nachdem diese Versuche publicirt waren, zeigte es sich, dass E. Mach diese optische Täuschung schon 1866 beschrieben hat in den

Die Erklärung der Streifen ist folgende (vgl. Fig. 3): Seien s_1 und s_2 die beiden Spalte, S der Schirm; bei geradliniger Ausbreitung der Strahlen wird die Bestrahlungsintensität in AB ein Maximum sein und allmählich abnehmen von A bis C , von B bis D . Die objective Intensität kann also dargestellt werden durch die ausgezogene Linie in Fig. 4, wo angegeben ist, dass ausserhalb CD der Schirm noch eine gleichmässige Bestrahlungsintensität besitzt.

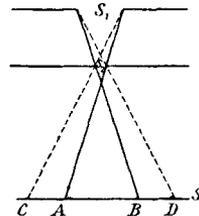


Fig. 3.

Subjectiv aber erscheint uns in allen solchen Fällen¹⁾ das Feld bei A und B , wo die maximale Intensität an die Uebergangszone grenzt, von grösserer Helligkeit, während bei C und D die Helligkeit geringer scheint, als im übrigen Theile des Schirmes. Auf dem photographischen Negativ erscheinen in A und B dunkle Streifen, und dies sind die Fomm'schen Streifen; C und D erscheinen hell; merkwürdigerweise hatten diese helle Streifen, obgleich sie nicht weniger auffällig sind als die dunkeln, früher kaum die Aufmerksamkeit auf sich gezogen.

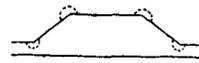


Fig. 4.

Das Erkennen der optischen Täuschung konnte nun vieles erklären; es machte aber unseren früheren Schluss über die Wellennatur der Röntgenstrahlen ganz hinfällig. Auch erwiesen sich nun die zahlreichen, behufs Ausmessung der Wellenlänge angestellten Versuche — wobei die Entfernungen zwischen Röhre und Platte bis 24 m, die Expositionszeit bis 80 Stunden ausgedehnt wurden und zu denen wegen der grossen Entfernungen doppelseitig gegossene Trockenplatten und Films und auch Verstärkungsschirme benutzt wurden — fast werthlos; nur gestatteten sie den Schluss, dass die oberste Grenze einer eventuellen Wellenlänge der Röntgenstrahlen noch mehr herabgesetzt werden konnte als durch Hrn. Gouy²⁾ schon angegeben war.

Sitzungsberichten der Wiener Akademie der Wissenschaften unter dem Titel: „Ueber die physiologische Wirkung räumlich vertheilter Lichtreize“.

1) C. H. Wind, Verslagen Kon. Akad. Wetenschappen. Amsterdam. Mai 1898; Beibl. 22. p. 853. 1898.

2) Gouy, Compt rend. 123. p. 43. 1896.

Es wurde nun vor allem bei gewöhnlichem Lichte der Einfluss der entdeckten optischen Täuschung auf mit weitem Lichtspalte zu erhaltende Beugungserscheinungen studirt. Als dann nachher neue, mittels Röntgenstrahlen erhaltene Bilder eines keilförmigen Beugungsspaltess im Lichte sämmtlicher gewonnenen Erfahrungen sorgfältig discutirt wurden, ergab sich einerseits, dass als eine oberste Grenze für die eventuelle Wellenlänge ein Werth von $0,2 \mu\mu$ zu betrachten sei; andererseits wiesen die Aufnahmen einige, allerdings sehr wenig auffällige, Einzelheiten auf, welche man als Folgen einer Beugung deuten könnte und welche alsdann auf eine Wellenlänge von ungefähr $0,15 \mu\mu$ hinwiesen.¹⁾ Und als noch bei weiteren Versuchen eine Andeutung einer Verbreiterung im engen Theile des Bildes eines keilförmigen Spaltess erhalten wurde und wiederum eine Wellenlänge von derselben Grössenordnung vermuthen liess, konnten die Bedingungen zur Erhaltung besserer Resultate angegeben werden und wurden die endgültigen Versuche folgenderweise angestellt²⁾:

Auf einem festen Pfeiler ruhte von drei Säulen getragen eine quadersteinerne Platte ($200 \times 40 \times 3$ cm), auf welcher drei schwere Stative mit Gips befestigt wurden. Auf einem der Stative war der erste Spalt angebracht, hinter welchem eine ausgezeichnete Röntgenröhre mit automatischer Vacuumregulirung von Müller (Hamburg) stand.

Die Röhre und das Stativ waren von allen Seiten durch dicke Bleiplatten umgeben, ausgenommen an der Rückseite, wo die Zuleitungsdrähte zum Funkeninductor sich befanden. Durch eine kleine rechteckige Oeffnung in der vordersten Bleiplatte traten die Strahlen aus, durchsetzten den auf dem mittleren Stative befestigten Beugungsspalt und gelangten zu der in lichtdichtes Papier eingewickelten auf dem dritten Stative fest geklemmten photographischen Platte.

Der Inductor war ein vorzüglich functionirender Apparat von Siemens und Halske von 30 cm Funkenlänge und wurde durch 6 Accumulatoren getrieben. Mit der grössten Sorgfalt

1) C. H. Wind, Verslagen Kon. Akad. Wetenschappen. Amsterdam. Juni 1898.; Beibl. I. c.

2) H. Haga u. C. H. Wind, Kon. Akad. Wetenschappen. Amsterdam. Maart 1899.

waren die Spalte in der Werkstätte des Institutes bearbeitet; sie wurden gebildet aus $\frac{1}{2}$ mm dicken, auf plan geschliffene Messingplatten geschraubten Platinstreifen.

Der erste Spalt war 14, 18 oder 25 μ breit; die Höhe war durch einen Bleischirm bis auf 1 cm begrenzt. Der 3 cm lange Beugungsspalt war keilförmig, oben 14 μ , unten 1 bis 2 μ ; ober- und unterhalb dieses keilförmigen Theiles befand sich noch ein gerader, 3 mm breiter Spalt, in der Verlängerung des Beugungsspaltes; und es wurde die Röntgenröhre so hinter den ersten Spalt aufgestellt, dass auf einem fluorescirenden Schirme diese weiteren Theile deutlich zu sehen waren und demnach der Beugungsspalt durch die Strahlen durchsetzt wurde.

Die Entfernung a beider Spalte war bei sämtlichen Versuchen 75 cm, die zwischen dem Beugungsspalt und der photographischen Platte ist in Centimetern in folgender Tabelle unter b angegeben.

Es bedeutet σ die Breite des ersten, s die des zweiten Spaltes in Mikrons.

$$a = 75 \text{ cm, } s = 2 \text{ bis } 14 \mu$$

σ	b	Stunden, Expositionszeit	Nummer des Versuches
25 μ	1 cm	29	5
25	20	57	3
25	45	66	4
14	75	60	1
14	75	100	2
25	105,5	150	6
18	1	30	8
18	75	130	7
18	75	200	9

Nur beim Versuche Nr. 1 wurde eine doppelseitig gegossene Röntgenplatte benutzt; weil das Bild auf der Rückseite aber viel schwächer und die Platte durch den ziemlich starken Schleier wenig durchsichtig war, wurde die eine Schicht entfernt; bei den übrigen Versuchen wurden stets Lombergplatten benutzt. Es wurde immer lange (wenigstens $\frac{1}{2}$ Stunde) entwickelt mit Rodinal (1 auf 35), mit Bromkalium.

Da es nothwendig war, die Breite des mit jedem Punkte des Spaltbildes correspondirenden Theiles des Beugungsspalteltes angeben zu können, so wurden in den einen der den Beugungsspalt bildenden Platinstreifen, nahe dem Spalte, drei kleine Löcher gebohrt und zwar oben, in der Mitte, und unten. Bei Nr. 5 und Nr. 8, die zur Ausmessung der Spaltbreite dienten, verursachten die durch diese Löcher gegangenen Strahlen kreisrunde und bei den übrigen Versuchen, wegen der Höhe der Strahlenquelle, längliche Bilder. Mittels der Theilmaschine wurden die Entfernungen der Mitten dieser Bilder in ein und dieselbe Anzahl gleicher Theile vertheilt; die Breite der Spaltbilder 5 und 8 wurde mittels eines Mikroskopes von Zeiss (Objectiv *D* Compensationsocular 6 mit Mikrometer) ausgemessen, wodurch die Breite des Spalteltes an jeder Stelle bekannt war.

Betrachtet man nun z. B. das Bild Nr. 2 bei nicht zu starker Vergrößerung — Objectiv *a**, Index auf 10, Compensationsocular 6 — so zeigt sich das Spaltbild im breiten Theile als ein schwarzer, in der Mitte dunklerer Streifen mit verwaschenen Rändern; verschiebt man die Platte allmählich auf dem Objecttische, so verschwindet an einer Stelle der dunkle Kern, während das Spaltbild sich zwar wenig aber deutlich verbreitert und über eine relativ grosse Breite wenig Unterschied in der Intensität zeigt. Von diesem Punkte an bleibt die Breite des Bildes nicht überall dieselbe; es zeigen sich abwechselnd Stellen von geringerer und grösserer Breite, während doch der Spalt fortwährend schmaler wird.

Nicht nur bei Nr. 2, sondern auch bei den übrigen Aufnahmen zeigt sich dieselbe Erscheinung, am deutlichsten bei Nr. 2, 6 und 9.

Woher kommen diese Verbreiterungen des Bildes beim schmaler werden des Spalteltes? Wir haben eingehend verschiedene Ursachen erwogen, die eine Verbreiterung hätten veranlassen können und den möglichen Einfluss betrachtet: von einer photographischen Irradiation, von einer ungleichen Empfindlichkeit der photographischen Schicht in einander benachbarten Theilen, von secundären Strahlen (Sagnac), von einer Erschütterung der Stative bei den oft mehr als 10 Tage dauernden Versuchen — aber es war uns unmöglich durch diese Ursachen unser Versuchsergebniss zu erklären.

Es lässt sich allerdings voraussagen, dass bei einem keilförmigen Beugungsspalt und bei geradliniger Fortpflanzung der Strahlen eine scheinbare Verbreiterung des Bildes zur Wahrnehmung gelangen könnte, obgleich die Linien gleicher Intensität des Bildes in Wirklichkeit genau parallel den Spalt-rändern verlaufen müssten. Jene scheinbare Divergenz der Bildränder könnte durch den contrastirenden Einfluss des nach unten immer schwächer werdenden aber sich gleichzeitig verbreiternden Kernes des Bildes bedingt werden; sie könnte aber, wie eine nähere Ueberlegung lehrt, nie stärker sein als die wirkliche Converganz der Spaltränder; sie wäre also in unserem Falle äusserst schwach und keineswegs zu verwechseln mit den wirklich beobachteten viel stärkeren localen Verbreiterungen.

Es bleibt also nur übrig, die beobachteten Verbreiterungen einer *Beugung der Röntgenstrahlen* zuzuschreiben. Die verschiedenen auf einem Bilde vorkommenden Verbreiterungen weisen auf Strahlen von sehr verschiedener Wellenlänge von ungleicher Intensität hin: das Spectrum ist ein sehr ausgedehntes mit einigen Maximis. Infolge der oben schon erwähnten geringen Intensität des Spaltbildes an den Stellen der Verbreiterungen, trotz der ausserordentlich langen Versuchsdauer, wird eine genaue Bestimmung der Wellenlängen unmöglich; zu einer Schätzung aber der Wellenlängen von einigen der intensivsten Strahlengruppen des Spectrums glauben wir in folgender Weise gelangen zu können.

Bekanntlich benutzt Fresnel in seiner Beugungstheorie eine Grösse „ v “; eine ähnliche Grösse v_s definiren wir als:

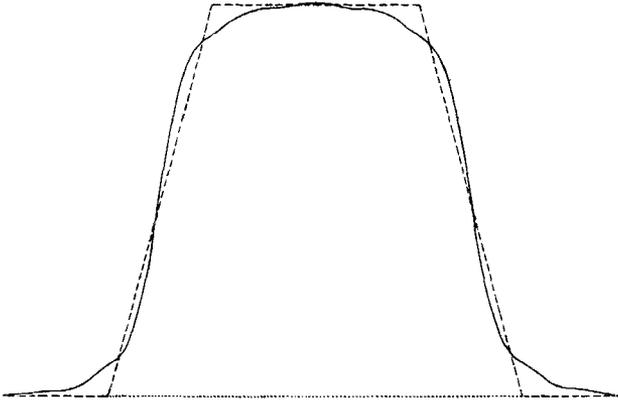
$$v_s = s \sqrt{\frac{2(a+b)}{ab\lambda}}.$$

Sind s , a , b und λ bekannt, so ist man im Stande, z. B. mittels der von Cornu construirten Spirale, aus dem Werthe von v_s das Beugungsbild abzuleiten. Solches geschah für die Werthe von $v_s = 2, 1,5$ und 1 . Die Breite des ersten Spaltes musste aber berücksichtigt werden, es musste aus dem zuerst gefundenen „primären“ Beugungsbilde das „secundäre“ abgeleitet werden. Um eine Uebersicht der verschiedenen uns interessirenden Fälle zu erhalten, haben wir die Rechnung

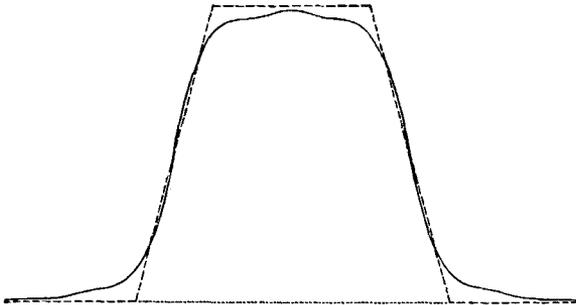
und Construction durchgeführt für drei Werthe des Verhältnisses

$$\delta = \frac{\frac{a}{b} \sigma}{\frac{a+b}{a} s}$$

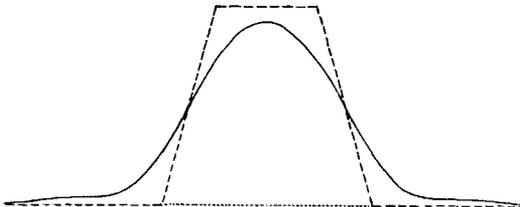
und zwar für $\delta = 3$, $\delta = 1$, $\delta = 0,6$.



a
 $V_{s-2}, \delta=3.$

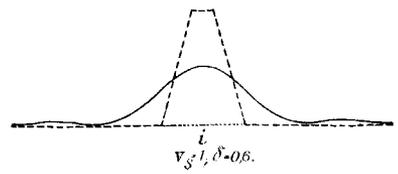
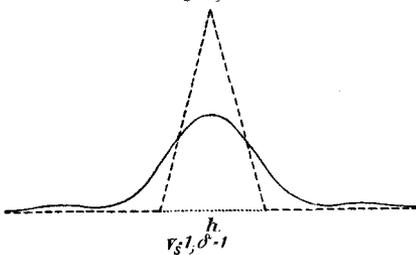
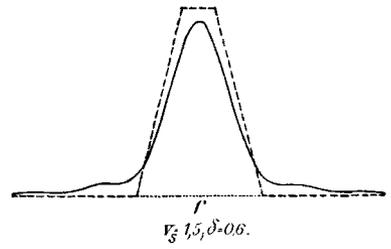
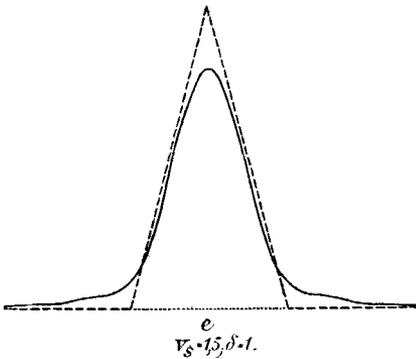
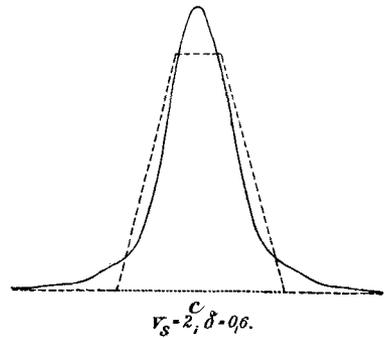
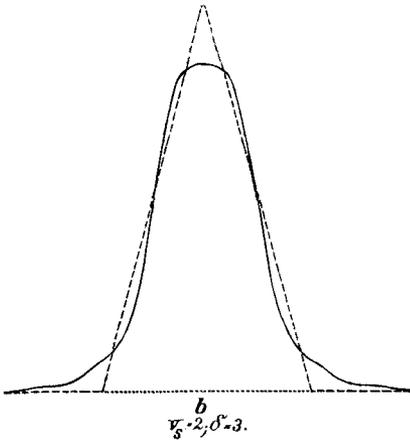


a
 $V_{s-1,5}, \delta=3.$



g
 $V_{s-1}, \delta=3.$

Die Bedeutung von δ ist klar; man sieht, dass die Breite des ersten Spaltes für $\delta = 3$ gross, für $\delta = 0,6$ klein ist im Verhältniss zur Breite des Beugungsspalt. Die Intensitätscurven der in diesen neun Fällen stattfindenden Beugungsbilder sind dargestellt in beistehenden Figg. a—i.



In diesen Figuren ist durch eine punktirte Linie die Intensitätsvertheilung angegeben für den Fall, dass keine Beugung stattfindet (der Inhalt der Fläche zwischen der Axe und der Intensitätscurve ist mit und ohne Beugung gleich gross zu nehmen).

Es ergibt sich aus diesen Figuren, dass schon bei grossen Werthen von v_s eine Verbreiterung des Spaltbildes entsteht, falls die geringste wahrnehmbare Intensität sehr klein ist im Verhältniss zur maximalen Intensität. Bei den uns interessirenden Verbreiterungen ist aber die Intensität in der Mitte des Bildes so gering, dass ein ziemlich grosser Bruchtheil derselben nothwendig ist um bemerkbar zu sein. Für diesen Fall schliesst man aus den Figuren, dass für $v_s = 1$ bei jedem Werthe von δ sich eine deutliche Verbreiterung zeigen muss, für $v_s = 2$ wahrscheinlich nie, für $v_s = 1,5$ nur unter günstigen Umständen.

Wir meinen somit dem Sachverhalt am besten zu entsprechen wenn wir $v_s = 1,3$ setzen jedesmal dann, wenn das Spaltbild sich verbreitert. Daraus berechnet sich dann mittels

$$\lambda = \frac{1}{1,3^2} \frac{2(a+b)}{ab} s_1^2$$

die Wellenlänge, wo s_1 die Breite des Beugungsspaltens an der mit der Verbreiterung correspondirenden Stelle bedeutet.

Nummer des Versuches	s_1 in μ	λ in $\mu\mu$	Nummer des Versuches	s_1 in μ	λ in $\mu\mu$
2	7	0,15	6	8	0,17
	6	0,11		7	0,13
	5	0,08		4,5	0,05
	4	0,05		3	0,025
4	8	0,27	9	4	0,05
	(5)	(0,10)		2	0,012
	3	0,04			
	2,5	0,025			

Die Wellenlänge der Röntgenstrahlen liegt also unter einigen Zehntel $\mu\mu$.

Falls bei der Ausmessung von s_1 infolge photographischer Irradiation die Breite zu gross gefunden wäre, würden sich die Wellenlängen noch kleiner ergeben.

Wie sehr wir auch gewünscht hätten, die Wellenlänge der Röntgenstrahlen mit grösserer Bestimmtheit angeben zu können, so scheint uns solches mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich. Nur wenn es gelingt, Röntgenröhren anzufertigen, die so lange, wie die unseren, gut functioniren, überdies aber Strahlen von grösserer Energie aussenden, oder wenn photographische Platten erfunden werden, die noch weit empfindlicher sind als die jetzt bekannten, wird man nach unserer Meinung die Schätzung durch eine Messung ersetzen können.

Groningen, Physikalisches Institut der Universität.

(Eingegangen 26. Mai 1899.)
