4. Bolometrische Untersuchungen über die Energie der X-Strahlen; von Ernst Angerer.

(Auszug aus der Münchener Inaugural-Dissertation.)

(Hierzu Taf. III—V.)

Bei Beginn dieser Untersuchungen waren folgende Arbeiten über die Energie der X-Strahlen bereits veröffentlicht:

1. Die Arbeit von Dorn¹⁾, der zur Messung der Absorptionswärme eine Art Luftthermometer mit zwei durch eine Töplersche Libelle verbundenen Gefäßen benützte. Dorn berechnet die Energie der Gesamtstrahlung (die sich von der Antikathode aus auf einer Halbkugel ausbreitet) bei jeder Entladung des Induktors zu 0,18 mg-cal bez. (bei einer zweiten Röhre) 0,30 mg-cal.

2. Messungen von Schöps²⁾, die mit Platinbolometern von 4,2 cm² Oberfläche ausgeführt wurden und für die Gesamtstrahlung bei einer Entladung 0,195 mg-cal ergaben.

3. Untersuchungen von Rutherford, Macdonald und McClung³⁾, die gleichfalls mit einem Platinbolometer arbeiteten, das 90 cm² Oberfläche hatte. Es fand ein Wehneltunterbrecher und ein großer Induktor Verwendung. Resultat: Die Energie bei einer Gesamtstrahlung: 0,193 mg-cal.

4. Ein Versuch von Leininger⁴⁾, der im Würzburger Physikalischen Institut vorgenommen wurde und resultatlos blieb; es ließ sich mit einem Platinbolometer keine Warmwirkung nachweisen.

Fast ebenso auffällig, wie das negative Resultat dieser

1) E. Dorn, Wied. Ann. **63**. p. 160. 1897.

2) K. Schöps, Zeitschr. f. Naturw. **72**. p. 145—196. 1899; Dissertation Halle 1899.

3) E. Rutherford, Macdonald und McClung, Philosophical Transactions **196**. A. 1901; Proc. Roy. Soc. **67**. p. 245—250. 1900; Physik. Zeitschr. **2**. p. 53—55. 1900.

4) F. Leininger, Physik. Zeitschr. **2**. p. 691. 1901.

letzten Arbeit, ist die Übereinstimmung der vorhergehenden, die doch zum Teil mit ganz verschiedenen Instrumenten gemacht wurden. Ich habe deshalb die bei der Absorption der X-Strahlen entstehende Wärme neuerdings mit einem Platinbolometer gemessen. Es sei mir an dieser Stelle gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Geheimen Rat Röntgen, für die Anregung zu dieser Arbeit, für das große Interesse, das er meinen Untersuchungen entgegenbrachte, sowie für seine vielseitigen Ratschläge und Unterstützungen meinen ehrerbietigsten Dank auszusprechen.

Nach der Vollendung meiner Arbeit erschienen die Untersuchungen von Wien¹⁾, der zur Messung der Absorptionswärme ein Platinbolometer von 225 cm² Oberfläche, sowie außerdem eine Thermosäule verwendet. Er bestimmt die Gesamtstrahlung bei jeder Entladung zu 0,05 mg-cal.

Endlich wurden Untersuchungen von Bumstead²⁾ veröffentlicht, der von der Annahme ausgeht, es könne die bei der Absorption der X-Strahlen frei werdende Wärmemenge zum Teil von dem Zerfall der Atome des absorbierenden Körpers herrühren.

Um diese Hypothese zu prüfen, vergleicht er mittels eines Radiometers die Erwärmung von zwei Metallen, deren Dicken so gewählt sind, daß beide die X-Strahlen gleich stark absorbieren (Zink 0,82 mm, Blei 0,30 mm). Bumstead findet, daß das Blei unter diesen Umständen etwa doppelt so stark erwärmt wird, als das Zink. Die Gleichheit der Absorption wird mit Hilfe der ionisierenden Wirkung der durch die Bleche dringenden X-Strahlen bestimmt.

Diese Methode der Absorptionsmessung dürfte nicht frei von einiger Willkür sein. Photographiert man z. B. zwei Bleche der angegebenen Art mit X-Strahlen, so erscheint das Zinkblech deutlich durchlässiger. Versuche mit schwachen und sehr intensiven, sehr harten und mittelharten X-Strahlen ergaben das gleiche Resultat. Erst als die Dicke des Zinkbleches auf 1,25 mm erhöht wurde, gab die photographische Platte Gleichheit der durchdringenden Strahlen an.

1) W. Wien, Ann. d. Physik 18. p. 991. 1905.

2) H. A. Bumstead, Phil. Mag. 11. p. 292. 1906.

I. Aufstellung und Vorversuche.

Die Vorversuche ergaben, daß folgende Prinzipien maßgebend für die Aufstellung der Instrumente sind:

1. das Galvanometer muß möglichst weit von dem Induktorium entfernt werden, damit dessen magnetische Wirkungen unmerklich werden.

2. Sämtliche hin- und hergehenden Leitungen des Bolometerkreises müssen dicht beieinanderliegen, weil sonst von dem Eisenkern des Induktors elektrodynamische Störungen erregt werden.

3. Sämtliche Leitungen müssen auf das sorgfältigste gegen die elektrostatischen Wirkungen der Röhre und ihrer Zuleitungen geschützt werden.

4. Die Kupferleitungen sollen einigermaßen, alle Verbindungsstellen dagegen sorgfältig isotherm gehalten werden, um die bedeutenden Wirkungen der Thermostrome abzuschwächen.

5. Die Bolometer sind so gut als möglich symmetrisch zu montieren und vor einseitiger Erwärmung zu schützen, welche eine stundenlang andauernde Wanderung des Galvanometer-Skalenbildes hervorruft.

1. Beschreibung der Apparate.

Die *Bolometer* bestanden genau wie bei Rutherford und Leininger aus Platinband von 0,03 mm Dicke, 5 mm Breite und etwa 2,5 m Länge. Dieses Band wurde von einem Rähmchen aus Glimmer getragen, dessen äußere Dimensionen 100.96 mm^2 waren. In der Mitte des Rahmens, senkrecht zu der Windungsrichtung, wurde ein dünnwandiges Kapillarröhrchen aus Glas durchgezogen, das die hinlaufenden Windungen von den zurücklaufenden trennte. Die fertig gewickelten Rahmen konnten in Falze gesteckt werden, die in zwei auf einer Hartgummiplatte ($110.160.10 \text{ mm}$) stehende Hartgummi-schienen gefräßt waren. Jedes Bolometer bot den Strahlen eine Fläche von $84,4 \text{ cm}^2$ dar. Es wurden vier Bolometer gefertigt, welche, um eine günstige Temperaturverteilung zu erzielen, hintereinander montiert und zunächst in der Art, wie dies von Lummer und Kurlbaum angegeben ist¹⁾, als Wheatstonesche Brücke geschaltet wurden. (Fig. 1.)

1) O. Lummer u. F. Kurlbaum, Wied. Ann. 46. p. 204. 1892.

Um die beiden hinteren Bolometer vor der Bestrahlung zu schützen, waren sie während des ersten Teiles der Arbeit durch einen flachen Bleikasten überdeckt. Die den Strahlen ausgesetzte Stirnfläche desselben bestand aus Bleiblech von 7,6 mm Stärke. Rück- und Seitenflächen waren aus 3 mm starkem Bleiblech gebildet und trugen oben und unten viele große Löcher, um eine genügende Zirkulation der Luft zu gestatten.

Fig. 1.

Es betrugen die Widerstände

von Bolometer	A:	1,90 Ω ,
"	"	B: 1,83 Ω ,
"	"	C: 1,83 Ω ,
"	"	D: 1,88 Ω .

Um die Bolometer so gut als möglich vor äußeren ungleichen Wärmeeinflüssen zu schützen, wurden sie von drei ineinanderstehenden Eisenblechkästen umschlossen, die gegenseitig durch Tafelwatte thermisch isoliert und einzeln zur Erde abgeleitet waren. Zum Einlaß der X-Strahlung trugen die Kästen Fenster aus 0,03 bez. 0,2 mm starkem Aluminiumblech.

Die fünf Leitungen, die zu den Bolometern führten, bestanden aus Starkstromlitzen und trugen an ihren Enden durchlochte Kupferbleche, mit denen sie direkt auf die Verteilungsdrähte aufgeschraubt waren. Sie waren durch enge Löcher in den innersten Kasten gesteckt, welche durch Wackskitt luftdicht verschlossen wurden.

Die Bolometer waren einander so ähnlich wie möglich hergestellt worden. Trotzdem war es nötig, zur genauen Abgleichung ein Stück Schleifdraht *s*, Fig. 1, in den einen Bolometerkreis einzuschalten.

Dieser Schleifdraht bestand aus blankem Neusilber und lag auf einer schwachen eisernen T-Schiene, welche auf ihrer oberen Seite mit dünnem Hartgummi bedeckt war. Die Schiene war in einem 4 cm weiten, etwa 1 m langen Messingrohr festgeklemmt, in welchem ein Schlitten die Stromzuführung ermöglichte.

Der Neusilberdraht bildete eine Schleife, deren Enden beieinander lagen und nach Angabe von Lummer und Kurlbaum durch einen dünnen, kurzen Draht verbunden wurden. Infolge dieses Nebenschlusses konnte der Schleifkontakt um eine viel größere Strecke verschoben werden, bis an den Enden der Galvanometerleitung dieselbe Potentialdifferenz herrschte. Die feine Abgleichung wurde durch einen kurzen Quecksilberwiderstand S (Fig. 1) ermöglicht.

Die Stromlosigkeit der Brücke wurde mit einem *Kugelpanzergalvanometer* kontrolliert, das in einer arretierbaren Juliusschen Aufhängung verwendet wurde. Der Widerstand der beiden Spulen des Galvanometers betrug 6,1 und 5,8 Ohm. Bei 2,9 Ohm innerem Widerstand (Parallelschaltung) und bei einer Astasierung des leichten Magnetsystems bis zu 5 Sek. einfacher Schwingungsdauer zeigte das Instrument eine Empfindlichkeit von $2 \cdot 10^{-10}$ Amp. pro Skalenteil Ausschlag. Der Abstand der Skala von dem Spiegel betrug 2,6 m. Um das Bild im Fernrohr genügend hell zu bekommen, war eine besondere Anordnung zur Beleuchtung der Skala nötig. — Lästig war bei der hohen Empfindlichkeit nur die geringe Konstanz des Nullpunktes, der einerseits von der herrschenden Temperatur abhängig war, andererseits sich oft wochenlang stetig nach derselben Seite verschob.

Um das Galvanometer zu schonen, waren Ballastwiderstände erforderlich, welche nacheinander ausgeschaltet werden konnten. Zwei Widerstände zu ca. 500000 und 14000 Ohm wurden aus Graphit hergestellt, zwei andere zu 450 und 35 Ohm aus Nickelindraht gespult.

Das Induktorium, das in diesem ersten Teile der Arbeit verwendet wurde, war ein älteres Instrument von Keiser und Schmidt. Mit einem Turbinenunterbrecher gab es bei 40 Volt und 4 Amp. primär etwa 20 cm Funkenlänge. Der Unterbrecher war von der Allg. E.-G. bezogen und trug der rotierenden „Turbine“ gegenüber vier Segmente. Bei normalem Betrieb erfolgten 107 Unterbrechungen in der Sekunde.

Die verwendete X-Strahlenröhre war von Siemens & Halske (Gundelach) und hatte ein regulierbares Vakuum.

Die Aufstellung der Apparate ist in Fig. 2 im Grundriß skizziert.

Induktorium *J* und Galvanometer *G* kamen in die entgegengesetzten Zimmerecken. Von den Sekundärklemmen des Induktors führte eine Leitung *H* von blankem Aluminiumdraht in 2,5 m Höhe entlang an zwei Hanfschnüren, die in Paraffin

Fig. 2.

ausgekocht waren, bis zu dem Tisch, auf welchem die X-Strahlenröhre *R* ihren Platz hatte.

Dicht bei dieser, in einer Entfernung von 1—20 cm, war der Kasten mit den Bolometern *B* aufgestellt, von dem aus folgende Verbindungen gehen: durch den Quecksilberwiderstand *Q* hindurch zu dem Abgleichungsdrahte *A* und von da durch den eingeschalteten Rheostaten *W* und den Akkumulator *E* zu *B* zurück; ferner durch die Ballastwiderstände *D* zu dem Galvanometer *G*. Sämtliche Litzen wurden vor ihrer Verwendung mit geschmolzenem Paraffin getränkt, um die Isolationsfähigkeit zu verbessern, und dann durch sogenannte Bergmannrohre gezogen — Röhren aus geteertem Papier, welche mit Messingblech überzogen sind. Die kurzen Stücke, wo die Litzen aus den Rohren heraustraten, waren mit Watte um-

wickelt und mit Stanniol bedeckt. Alle Rohre waren durch die Wasserleitung zur Erde abgeleitet.

2. Nachweis der Wärmewirkung der X-Strahlen.

Die Versuche, welche mit dieser empfindlichen Anordnung gemacht wurden, lassen nun zweifellos eine deutliche Einwirkung der X-Strahlen auf die Bolometer erkennen, die einen Galvanometeraus Schlag im Sinne einer Erwärmung verursacht und der weder elektrostatische noch elektromagnetische Störungen zugrunde liegen.

Einige Stunden vor dem Versuch wurde der Prüfstrom geschlossen, dessen Stärke gewöhnlich 0,24 Amp. betrug.

Wenn die Brücke mit Hilfe des Galvanometers abgeglichen war, so blieb das Bild der Skala nicht längere Zeit bei derselben Marke stehen. Vielmehr zeigte sich, wie auch bei der hervorragenden Empfindlichkeit, vor allem wegen der Stärke des Prüfstromes zu erwarten war, ein langsames, ruhiges Wandern des Skalenbildes. Weil jedoch dieses Wandern, wie graphische Darstellungen erkennen lassen, ein sehr gleichmäßiges war, gestattete dieser Fehler doch ein genügend exaktes Arbeiten.

Die Expositionszeit war anfangs häufig 30 Sek., später stets 15 Sek. Die Höhe der Kurve konnte nach kurzem Verlauf, nach 15—30 Sek., genügend sicher extrapoliert werden.

1. *Versuch mit X-Strahlen.* Von den vielen Versuchen, welche gemacht wurden, um die gesuchte Wirkung der X-Strahlen zu studieren, möge hier nur ein einziges Diagramm diskutiert werden: Versuch 19, Taf. III. Die ersten fünf Kurvenpunkte ($\frac{5}{4}$ Minuten) sind Ablesungen des Galvanometers vor der Bestrahlung. Unmittelbar nach der fünften Beobachtung setzt die Bestrahlung ein und dauert die folgende Viertelminute. Die Kurve biegt unter diesem Einfluß nach $\frac{1}{2}$ bis 1 Sekunde um und verläuft steil nach unten. Als nach Ablauf der 15 Sekunden die Bestrahlung unterbrochen wird, steigt die Kurve erst schnell, dann langsamer und es stellt sich asymptotisch die frühere Temperaturverteilung wieder her. Leider ist bei diesem Versuch die Ruhe vor der Bestrahlung nicht vollkommen. Doch zeigt er im übrigen sehr deutlich das charakteristische, momentane Eintreten der Wirkung wie auch den allmählichen Verlauf der Abkühlungskurve.

2. Zwei ungewollte Wirkungen könnten gleichfalls das Galvanometer ähnlich beeinflussen: die Strahlung der heiß werdenden Antikathode und die hohe elektrische Spannung an der Röhre. Daher wurde durch sorgfältige Kontrollversuche gezeigt, daß solche Nebenerscheinungen nicht existierten:

a) *Einfluß der Wärmestrahlung*: Versuch Nr. 15, Taf. III. Ein *Bunsenbrenner* wird in 18 cm Entfernung von dem äußersten Kasten angebracht und nach der fünften Beobachtung angezündet. Während die Wirkung der *X-Strahlen* fast momentan einsetzt, dauert es hier, wie aus der Kurve ersichtlich, $1\frac{1}{2}$ Minuten, bis der Wendepunkt eintritt. In diesem Moment wird die Flamme wieder gelöscht. Da sich aber die einzelnen *Hüllen* der Bolometer mit erwärmt haben, dauert die Wirkung noch lange nach dem Auslöschen der Flamme fort, bis endlich die Kurve ihre frühere Richtung wieder annimmt. — Über diese Kurve ist eine zweite gezeichnet, Versuch 16, (Taf. III), welche zeigt, wie ganz anders die Wirkung der *X-Strahlen* sich darstellt. — Bei beiden Versuchen war das Wärmegleichgewicht vor dem Beginn der Bestrahlung sehr unvollständig, doch günstig für diese Versuche.

b) *Einfluß der hohen Spannung an der Röhre*: Bei einem Versuche (Versuch 7, Taf. III) wird die Röhre um 180° gedreht, so daß die Strahlung von den Bolometern fortgerichtet ist. Es läßt die Kurve bei dem Arbeiten der Röhre keine Richtungsänderung erkennen.

Bei einem anderen Versuch (Versuch 11, Taf. III) werden die *X-Strahlen* durch Bleiblech vor den Bolometern abgeblendet. Es zeigt sich auch hier kein Ausschlag.

Die folgenden Versuche, die zu den quantitativen überleiten, können doch deren Genauigkeit nicht erreichen, da das gleichmäßige Arbeiten der Röhre in keiner Weise kontrolliert werden konnte.

3. *Versuch bei einfacher und doppelter Entfernung der Röhre von den Bolometern*. Da die Entfernung der Antikathode von den Bolometern nur angenähert gemessen werden konnte, dürfen diese Versuche keine große Präzision beanspruchen. Doch zeigte sich in befriedigender Übereinstimmung mit der Theorie bei der doppelten Entfernung der Röhre von den Bolometern der vierte Teil des Galvanometerausschlages.

4. Versuch mit vorgeschaltetem Platinblech (Versuch 17, Taf. III). Ein Platinblech von 0,1 mm Dicke, das etwa der Dicke der durchstrahlten Bolometer entspricht, wurde in den Weg der X-Strahlen gestellt, bevor diese die Bolometer trafen. Der Ausschlag betrug $\frac{1}{11}$ des vollen Ausschlages.

3. Methode zur Messung der Wärmewirkung.

Um den Betrag der absorbierten Energie zu messen, wurden nun die Bolometer nach der Methode von Rubens und Paalzow¹⁾ geschaltet (Fig. 3). Es wird hier bekanntlich der Brückenweig, der von einem Heizstrom erwärmt werden

Fig. 3.

soll, als eigene Wheatstonesche Brücke ausgebildet. Es empfiehlt sich dabei, auch den symmetrisch gegenüberliegenden Brückenweig als Wheatstonesches Trapez auszugestalten.

Zur Ausführung der Doppelbrücke wurden nur die vier bereits gefertigten Bolometer verwendet. Alle übrigen Zweige bestanden aus aufgespultem, blankem Nickelindraht von 1,5 mm Dicke, ca. 8 m Länge und ca. 1,9 Ω Widerstand.

Vier Endpunkte der Bolometer waren mit einer Kupferschiene verbunden, welche dem Punkte D entspricht. Von hier aus ging auch eine Litze, welche den Diagonalzweig d bildete und zu dem Akkumulator E führte. Die anderen Enden

1) H. Rubens u. A. Paalzow, Wied. Ann. 37. p. 529. 1889.

der Bolometerstreifen waren mit Kupferdrähten von etwa 3 mm Stärke verschraubt. Diese Drähte führten, mit Gummischlauch isoliert, durch alle Hüllen hindurch vertikal nach unten in den Raum, in welchem die Nickelinspulen 1—6 sich befanden.

Die Empfindlichkeit der Bolometer war bei dieser Schaltung etwa $\frac{1}{10}$ der früheren.

Um zwei der Bolometer vor der Bestrahlung zu schützen, wurde zwischen ihnen und den vorderen Bolometern eine Bleiplatte aufgestellt. Dieselbe war streng symmetrisch angeordnet und, um für die Wärme ein möglichst kleines Hindernis zu bilden, auf beiden Seiten rauh geschlagen und dann mit Lampenruß geschwärzt. Ihre Dicke betrug 6 mm.

Die X-Strahlenröhre wurde nun auf der linken Seite des Bolometerkastens (vgl. Fig. 2 p. 92) montiert und mit einem gefensterten Bleischirm umgeben; der zweite Abgleichungsdraht mit seinen Zuleitungen wurde gleichfalls elektrostatisch geschützt.

Die folgenden messenden Versuche wurden mit einem neuen 40 cm-Klingelfussinduktor gemacht, der primär 450 Watt vertrug und sehr intensive X-Strahlen erzeugte. Für die Leitung von dem Induktor zu der X-Strahlenröhre wurden von Versuchsreihe V an hoch isolierende Kabel von Siemens & Halske verwendet.

Es zeigte sich bei den Vorversuchen, daß es bei der großen Empfindlichkeit der Anordnung nicht möglich war, die kleine Wheatstonesche Brücke (Fig. 3) genügend lange Zeit abgeglichen zu halten, wodurch während eines Versuches die Deutung des Galvanometerauschlages unsicher wurde. Deshalb mußte als Heizstrom ein *symmetrischer Wechselstrom* Verwendung finden.

Wenn wir den Versuch machen, die erwärmende Wirkung der X-Strahlen durch die eines Stromes zu messen, müssen wir uns in erster Linie vergegenwärtigen, ob man diese beiden Wirkungen miteinander vergleichen kann. Die Zeitdauer, während welcher von der Antikathode X-Strahlen ausgesandt werden, beträgt nach französischen Forschern $\frac{1}{10000}$ bis $\frac{1}{125000}$ Sekunde. Es folgt daher auf eine verhältnismäßig sehr kurze Zeit, in welcher Energie zugeführt wird, eine etwa 100 mal längere ohne Energiezufuhr. — Jeder dieser Impulse möge nun bei der Absorption momentan in Wärme verwandelt

werden. Es ist anzunehmen, daß die Ausstrahlung unter diesen Umständen einen viel größeren Prozentsatz der zugestrahlten Energie fortführt, als wenn die Energie kontinuierlich zugeführt würde. Daß diese Unstetigkeit schon einen Unterschied zwischen Gleichstrom und Sinuswechselstrom ausmacht, wird durch eine Beobachtung von Schöps bestätigt, welcher den äußeren Wärmeleitungskoeffizienten bei Wechselstrom um 7 Proz. höher findet. Er legt jedoch seinen Berechnungen die Beobachtungen mit Gleichstrom zugrunde.

Um diese Verhältnisse bei der Erwärmung mittels des Heizstromes nachzubilden, wurde derselbe aus *Kondensator*-entladungen gebildet. Die Kollektorplatte eines Kondensators wird abwechselnd mit einer Batterie auf 100 Volt geladen und zur Erde abgeleitet. Die Kondensatorplatte desselben ist durch die Bolometer hindurch zur Erde abgeleitet. Dann fließt der Ladungs- und Entladungsstrom durch die Bolometer hindurch.

Die Joulesche Wärme dieser Ströme verteilt sich auf den Schließungskreis dem Widerstande der einzelnen Leiterteile proportional. Der Teil der Wärmemenge, welcher auf die Bolometer trifft, kann also durch Einschalten eines variablen Widerstandes aufs genaueste reguliert werden.

Die Elektrizitätsquelle H (Fig. 4) bestand aus zweimal 50 Hochspannungsakkumulatoren, die zu 100 oder 200 Volt geschaltet werden konnten. Von der Batterie führte eine etwa 60 cm lange Litzenleitung (aa) von 4 mm^2 nach den Klemmen eines Umschalters. In diese Leitung war, um einen eventuellen Kurzschluß der Akkumulatoren bei Verletzung der Isolation aufzuheben, eine Abschmelzsicherung (S) eingeschaltet, die bei einer Stromstärke von $\frac{1}{2}$ Amp. durchschmolz. An die Enden der Litze waren je eine Glühlampe ($G\ G$) angeschlossen, welche einen Widerstand von 1060 bez. 1130 Ohm besaßen. *Glühlampen* waren wegen ihres kleinen Selbstinduktionskoeffizienten einem anderen Vorschaltwiderstand vorzuziehen. Ladung und Entladung des Kondensators fand bei dieser Schaltung durch fast denselben Widerstand statt.

Hinter den Glühlampen kam der rotierende Umschalter (I, II, III), der von dem Turbinenunterbrecher getrieben wurde. Von ihm, bez. von dem Kondensator führte eine 5 m lange Leitung b von 4 mm^2 Litze zu dem Beobachtungstisch. Hier befand sich ein selbstinduktionsfreier Rheostat R , ferner ein Ausschalter A .

Es wurde eingehend geprüft:

1. daß dieser Wechselstrom bei der Schaltung Fig. 3 auf das Galvanometer G nur infolge seiner Joulesschen Wärme wirkte,

2. daß unter bestimmten Bedingungen, die bei den folgenden Versuchen erfüllt waren, die mittlere Intensität, sowie die Wärmewirkung des Stromes der verwendeten Kondensatorkapazität proportional war.

Ferner ergab eine Berechnung der Stromkurve bei mittlerer Kapazität und Widerstand das Diagramm Taf. III, Fig. 1. Die Maximalstärke des Stromes beträgt unter diesen Bedingungen etwa 0,1 Amp.

Unter Berücksichtigung folgender Daten:

Kondensatorspannung	107 Volt,
Kondensatorkapazität	$a/10$ Mikrofara-
Anzahl der Stromstöße in der Sekunde . . .	107,
Widerstand des Schließungskurses . . .	$b \cdot 1000$ Ohm,
Äquivalenter Widerstand der Bolometer .	0,94 Ohm

wurde für die in den Bolometern umgesetzte Energie des Heizstromes die Formel berechnet:

$$\frac{a}{b} \cdot 0,0138 \text{ mg-cal/sec.}$$

Die Bolometer waren so geschaltet, daß *zwei* von den X-Strahlen getroffen wurden, die beiden *anderen* dagegen von dem Heizstrom erwärmt werden konnten, so daß die im Galvanometer beobachteten Ablenkungen durch Heizstrom und Bestrahlung entgegengesetzt waren. Ich wollte versuchen, die eine Einwirkung durch die andere zu *kompensieren*.

Diese Idee wurde in allen Hauptversuchen zur Ausführung gebracht und hat sich als eine sehr glückliche erwiesen.

Es wurde einmal der Versuch gemacht, die Schwankungen des Galvanometerstromes während eines Kompensationsversuches aufzuzeichnen (Taf. III, Fig. 2). Der Primärstrom betrug 3,7 Amp. bei 110 Volt, die Röhre wurde also beträchtlich angestrengt. Es wurde berechnet, daß der Heizstrom *allein* in 30 Sek. eine Galvanometerablenkung von etwa 240 Skt. — in der Figur nach abwärts — hervorgerufen hätte. Unter dem gleichzeitigen Einfluß von X-Strahlen und Heizstrom, die in der Figur beide bei 0 Sek. einsetzen, wandert das Bild der Skala nach den größeren Zahlen zu, das heißt, der Heizstrom hätte etwas stärker genommen werden sollen. Zieht man das aber in Rechnung, indem man die Symmetrielinie *s* einzeichnet, so erkennt man, daß die Abweichungen in den ersten 55 Sek. nur gering sind, daß die Röhre jedoch später, wenn sie warm wird, bei diesem Versuche etwas weniger Energie ausstrahlt.

Hand in Hand mit der Energiemessung mit dem Bolometer gingen Versuche über die ladende Wirkung der X-Strahlen und deren Abhängigkeit von der bolometrisch gemessenen Energie. Zu diesem Zwecke bedienten wir uns der von Curie und Sagnac angegebenen Methode.¹⁾ Fig. 5 zeigt die Röhre,

1) E. Dorn, Abh. d. naturf. Ges. zu Halle 22. p. 39. 1900; Beibl. 24. p. 576. 1900; 25. p. 316. 1901; P. Curie u. G. Sagnac, Compt. rend. 130. I. p. 1018. 1900; G. Holtzmark, Ann. d. Phys. 10. p. 522. 1903; vgl. auch K. Hahn, Ann. d. Phys. 18. p. 140. 1905.

die uns für die folgenden Versuche zur Verfügung stand. Die X -Strahlen durchdringen, von rechts durch die Glaswand tretend, die auf einen Drahring gespannte Aluminiumfolie A und werden in dem Platinblech P , das mit Blei hinterlegt ist, absorbiert. Der Abstand A bis P betrug 14 mm, der Radius von P 20 mm. Man leitet A zur Erde ab und mißt mit dem Elektrometer die auf P entstehende positive Ladung. Der Abstand der Platinplatte von der Antikathode der X -Strahlenröhre betrug 265 mm. Die Fläche der Platinplatte, die 12,6 cm²

Fig. 5.

beträgt, wird daher von dem 350. Teil der Gesamtstrahlung getroffen. Folie und Schutzkasten wurden zur Erde abgeleitet.

Um das Elektrometer und seine Zuleitungen vor einer Beeinflussung durch X -Strahlen zu schützen, wurde die X -Strahlenröhre auf drei Seiten mit einem 4,5 mm starkem Bleischirm umgeben und auch der Blechkasten der Curie'schen Röhre überall bis auf die Stirnfläche mit 3 mm starkem Bleiblech belegt. Unmittelbar vor das Elektrometer kam ein gleicher Bleischirm von 4,5 mm Stärke zu stehen, der zur Ablesung des Elektrometers eine kleine Öffnung erhielt.

Störungen der Elektrometerablenkung durch den influenzierenden Einfluß der Induktorleitung auf die Quecksilberpumpe machten einen elektrostatischen Schutz der Glasröhre nötig.

Zur Messung der auf der Platinplatte entstehenden elektrischen Spannung wurde ein Hallwachselektrometer verwendet, das bei einer Nadel-schaltung von 400 Volt eine Empfindlichkeit von 128 Skt. pro Volt zeigte. Die Schwingungsdauer der Nadel betrug 5,7 Sekunden.

Als mit den nun folgenden Versuchsreihen begonnen wurde, war das Vakuum in der Röhre von Curie bereits

$2\frac{1}{2}$ Monate aufrecht erhalten worden. In einem Zeitraum von 8 Tagen verschlechterte sich dasselbe auf etwa $\frac{1}{1000}$ mm.

II. Quantitative Versuche.

1. Über die Abhängigkeit der Wärmewirkung von der Stärke des Primärstromes.

Die interessantesten Resultate schienen Versuchsreihen zu versprechen, die eine allmähliche Steigerung der dem Induktor zugeführten Primärenergie zur Grundlage hatten. Denn im Gegensatz zu den früheren Experimentaluntersuchungen war der Galvanometerausschlag, der durch die intensivsten X-Strahlen bewirkt wurde, selbst bei dieser unempfindlicheren Schaltung (Fig. 3) so groß, daß sich noch $\frac{1}{400}$ desselben wahrnehmen ließ. Eine Gruppe von solchen Versuchsreihen bildete das nächste Ziel der Arbeit.

Bei den folgenden Tabellen wird in der ersten Spalte die Nummer des Versuches angegeben. Dann folgt die Angabe der Stärke des Primärstromes sowie der maximalen Funkenstrecke, welche, parallel zu der Röhre geschaltet, zwischen Zinkkugeln durchschlagen wurde. In der vierten und fünften Spalte sind die verwendete Kapazität in Mikrofarad und der Gesamtwidestand des Heizstromkreises angegeben. Hierauf kommt die in 15 Sekunden Bestrahlung entstandene Ablenkung des Galvanometers, die, wenn die Kompensation vollständig gelungen, = 0 ist, endlich die aus den drei letzten Daten berechnete Energie der X-Strahlen. In der letzten Spalte steht die beobachtete Ablenkung des an die Curiesche Röhre geschalteten Elektrometers.

Hierbei ist noch folgendes zu bemerken: Wenn die Kapazität des Heizstromkondensators zur Kompensation der intensivsten X-Strahlen nicht ausreichte, so wurde die Kondensatorspannung verdoppelt (214 Volt) und dadurch die vierfache Energie verfügbar. Das wird bei den Versuchen 83 und 84 in den Tabellen, wie später durch die Schreibweise: $4 \cdot \frac{3}{10}$ ausgedrückt.

Versuchsreihe I.

Donnerstag, 8. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 60 Volt. Röhre I von Siemens & Halske. Mittelhart.

Nr.	Amperé	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
75	1,1	1,2	$\frac{1}{10}$	3800	- 1,5	0,0036	5,5	
76	1,1	1,2	$\frac{1}{10}$	8400	+ 0,0	0,0041	6,0	5,75
77	1,5	1,7	$\frac{1}{10}$	1900	+ 4,0	0,0107	28,5	
78	1,5	1,7	$\frac{1}{10}$	1700	0,0	0,00813	26,9	27,7
79	1,95	3,0	$\frac{2}{10}$	1200	- 3,8		51,5	
80	1,95	3,0	$\frac{2}{10}$	1600	+ 8,0	0,0311	58,4	55,0
81	2,5	5,0	$\frac{2}{10}$	1100	+ 19,0		122,0	
82	2,5	5,0	$\frac{2}{10}$	1100	- 7,0	0,0661	121,0	121,5
83	2,8	7,0	$4 \cdot \frac{2}{10}$	1200	+ 6,0		163,0	
84	2,8	7,0	$4 \cdot \frac{2}{10}$	1150	- 36,0	0,1389	152,9	158,0

Versuchsreihe II.

Freitag, 9. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 60 Volt. Röhre II von Siemens & Halske. Hart.

Nr.	Amperé	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
85	1,1	1,6	—	—	+ 1,2		2,4	
86	1,1	1,6	$\frac{1}{10}$	10100	- 2,0	0,00	2,6	2,5
88	1,45	3,2	$\frac{1}{10}$	4100	0,0	0,0034	12,7	12,7
89	1,9	6,8	$\frac{1}{10}$	1100	- 6,0		36,5	
90	1,9	6,8	$\frac{1}{10}$	1200	+ 5,3	0,0122	38,6	37,55
91	2,5	10,0	$\frac{2}{10}$	1200	- 17,5		83,8	
92	2,5	10,0	$\frac{2}{10}$	1300	- 6,0	0,0506	88,2	89,0
93	2,5	10,0	$\frac{2}{10}$	1700	+ 25,0		95,1	
94	2,8	11,0	$\frac{2}{10}$	1100	- 5,5	0,0865	116,3	117,9
95	2,8	11,0	$\frac{7}{10}$	1150	+ 13,0		119,5	

Diese Versuchsreihe zeigt, daß die harte Röhre fast dieselbe Energie ausstrahlt wie die weiche.

Versuchsreihe III.

Samstag, 10. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 110 Volt. Röhre II.

Nr.	Amperé	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
96	2,0	—	$\frac{1}{10}$	1200	0,0	0,0115	35,0	35,0
97	3,0	10,0	$\frac{2}{10}$	1300	- 14,5		110,8	
98	3,0	10,0	$\frac{2}{10}$	1300	+ 8,0	0,0783	112,8	111,8
99	3,4	11,0	$\frac{10}{10}$	1100	- 3,0	0,1255	135,5	135,5
100	3,7	9,0	$4 \cdot \frac{2}{10}$	1100	- 46,5	0,1482	151,2	155,0
101	3,7	9,0	$4 \cdot \frac{2}{10}$	1150	+ 47,5		159,8	

Versuchsreihe IV.

Montag, 12. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 110 Volt. Röhre II.

Nr.	Ampère	Schlagweite cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
102	2,3	6,5	$\frac{2}{10}$	1200	- 8,5	0,0345	69,1	66,9
103	2,3	6,5	$\frac{2}{10}$	1600	0,0	0,0259	64,8	
104	2,6	8,0	$\frac{4}{10}$	1150	+ 7,0	0,0488	94,4	91,7
105	2,6	8,0	$\frac{4}{10}$	1100	- 13,5		89,0	
106	3,15	9,0	$\frac{9}{10}$	1200	- 6,6	0,0998 _s	126,9	129,2
107	3,15	9,0	$\frac{9}{10}$	1170	- 11,0		131,5	
108	3,85	10,4	$4 \cdot \frac{4}{10}$	1100	- 19,0	0,200	161,9	167,2
109	3,85	10,4	$4 \cdot \frac{4}{10}$	1110	+ 26,0		172,5	
110	3,90	(10,4)	$4 \cdot \frac{4}{10}$	1110	+ 18,0	0,2690	178,2	174,6
111	3,95	10,0	$4 \cdot \frac{5}{10}$	1150	+ 7,0		171,0	
112	4,05	10,0	$4 \cdot \frac{5}{10}$	1100	+ 21,5		196,0	196,0

Versuchsreihe V.

Montag, 12. Dezember 1904. Betriebsspannung des Induktors 110 Volt. Röhre I.

Nr.	Ampère	Schlagweite cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
114	2,0	4,0	$\frac{1}{10}$	1300	- 6,0	0,0095	26,6	26,3
115	2,0	4,0	$\frac{1}{10}$	1400	0,0	0,0099	26,0	
116	2,45	8,0	$\frac{2}{10}$	1100	- 5,0	0,0242	68,9	69,5
117	2,45	8,0	$\frac{2}{10}$	1300	+ 16,0		70,0	
119	2,95	9,0	$\frac{9}{10}$	1200	+ 16,0	0,0706	127,0	127,0
120	3,5	9,5	$4 \cdot \frac{9}{10}$	1100	- 13,5	0,1496	189,0	190,5
121	3,5	9,5	$4 \cdot \frac{9}{10}$	1120	+ 22,5		192,0	
122	3,85	10,5	$4 \cdot \frac{6}{10}$	1200	+ 24,0	0,2810	222,0	230,1
123	3,85	10,5	$4 \cdot \frac{6}{10}$	1150	- 42,0		238,3	
125	3,0	9,0	$\frac{7}{10}$	1100	+ 10,0	0,0975	134,0	136,0
126	3,0	9,0	$\frac{9}{10}$	1100	- 3,0		138,0	

Auf Taf. III, Figg. 3 und 4 wurde die Abhängigkeit der X-Strahlenenergie von der an dem eingeschalteten Ampèremeter abgelesenen Stromstärke des Primärstromes graphisch dargestellt. Es zeigen diese Kurven, daß die emittierte Energie erst sehr langsam, bei höheren Stromstärken aber ungemein schnell wächst, ferner, daß die weiche Röhre bei derselben Stromstärke eine nur wenig größere Energie auszusenden scheint. Die Kurve III der Fig. 3 hat in ihrem oberen Teil einen Wendepunkt, eine Erscheinung, die sich zwanglos aus dem Auftreten starker Büschelentladungen an den Zuführungsdrähten erklären läßt, das bei dieser Versuchsreihe beobachtet wurde.

Die vorliegenden Resultate sind nicht reduziert:

1. auf die Absorption der Strahlung in der Glaswand der Röhre,

2. auf die Absorption in den Schutzhüllen der Bolometer,

3. auf die *unvollständige* Absorption in den Bolometern.

Die zweite Korrektur dürfte gegen die erste zu vernachlässigen sein, die leider nicht bestimmt werden konnte. Der Absorptionskoeffizient der Bolometer wurde dagegen am Ende der Arbeit (vgl. p. 113) für zwei Fälle bestimmt. Nach den dort gewonnenen Resultaten darf man für die Strahlen der Röhre I eine Absorption von 95 Proz., für die Röhre II eine Absorption von 85 Proz. annehmen.

Berechnung der Gesamtstrahlung.

Die Fläche der Bolometer betrug $84,4 \text{ cm}^2$ und war 22 cm von der Antikathode entfernt. Wenn man annehmen will, daß sich die X-Strahlen halbkugelförmig von einer Stelle der Antikathode ausbreiten, so findet man, daß die Bolometer von $\frac{1}{36,1}$ der Gesamtstrahlung getroffen werden.

Wenn nun in einem speziellen Falle die in den Bolometern absorbierte Energie $0,2 \text{ mg-cal/sec}$ betrug, so berechnet sich die Gesamtenergie einer Einzelentladung zu

$$\frac{0,2 \cdot 36,1}{107} = 0,0675 \text{ mg-cal.}$$

Es wird in dieser Arbeit später gezeigt werden, daß diese Energie in $5 \cdot 10^{-4} \text{ Sek.}$ verausgabt wird. Daher berechnet sich

die Energie einer gedachten, 1 Sek. dauernden Strahlung von dieser Stärke zu

0,135 gr-cal.

Bestimmung des Nutzeffektes der X-Strahlenröhre.

Mit der Kenntnis der als X-Strahlung aus der Röhre austretenden Energie läßt sich der *Wirkungsgrad* der X-Strahlenröhre ermitteln, wenn man durch den Versuch bestimmt, wieviel elektrische Energie in der Röhre in Wärme verwandelt wird.

Um diese Wärmemenge messen zu können, brachte ich die verwendete X-Strahlenröhre in horizontaler Lage in ein doppelwandiges Kalorimetergefäß aus Weißblech.

Als kalorimetrische Flüssigkeit wählte ich Paraffinöl wegen seiner isolierenden Eigenschaften, seiner verhältnismäßig geringen Feuergefährlichkeit und seiner geringen Verdampfung an der Oberfläche.

Die Temperatursteigerung wurde mit einem Beckmannthermometer gemessen. Bei den Versuchen wurde konstatiert, daß dasselbe keine durch elektrostatische Einflüsse bedingte Änderung seiner Einstellung zeigte. Ein schildförmiges, doppelwandiges Gefäß aus Zinkblech, das mit Wasser gefüllt war, beseitigte den Einfluß des Beobachters auf die Temperatur des Kalorimeters.

Die Versuche zeigen, daß die in der Röhre freiwerdende Wärmemenge sich erst in etwa $\frac{1}{2}$ Stunde auf das ganze Kalorimeter verteilt hat, obwohl fast ununterbrochen gerührt wurde.

Als einwandfrei möchte ich folgende Versuche anführen:

Versuch Nr.	Amperé, primär	Härte der Röhre	X-Strahlenenergie aus Taf. III, Fig. 4	Gesamtenergie der X-Strahlen pro Sekunde	Temperatursteigerung in Kalorimeter
				mg-cal/sec	pro 2 Min.
5	3,0	hart	$0,07 + 15\% = 0,080$	2,88	0,254°
6	2,8	etwas härter	$0,06 + 20\% = 0,072$	2,59	0,257
7	2,1	weich	$0,02 + 5\% = 0,021$	0,76	0,190
8	2,8	mittelhart	$0,08 + 10\% = 0,088$	3,17	0,403
9	3,7	hart	$0,17 + 15\% = 0,195$	7,03	0,575
10	2,6	mittelhart	$0,05 + 10\% = 0,054$	1,99	0,180
11	1,9	„	0,005	0,18	0,115

Um auf einfache Weise die dieser Erwärmung äquivalente Energie zu ermitteln, wurde eine ähnliche Temperatursteigerung durch einen Heizstrom hervorgebracht.

Die Stärke des Heizstromes sowie sein Spannungsverlust zwischen den Enden des Manganinheizdrahtes wurde mit Präzisionsinstrumenten gemessen und so die Wärmekapazität des Kalorimeters zu 6,33 Kal. pro Grad Temperatursteigerung bestimmt. Daraus ergibt sich folgendes Resultat:

Versuch Nr.	Temperatur- steigerung im Kalorimeter	Verbrauchte Energie	In X-Strahlen verwandelte Energie	Nutzeffekt
		mg-cal/sec	mg-cal/sec	Promille
5	0,254°	13 380	2,88	0,21
6	0,257	13 530	2,59	0,19
7	0,190	10 010	0,76	0,08
8	0,403	21 240	3,17	0,15
9	0,575	30 280	7,03	0,23
10	0,180	9 485	1,99	0,20
11	0,115	6 059	0,18	0,03

Diese Zahlen lassen erkennen: 1. daß der Nutzeffekt der X-Strahlenröhre sehr klein ist, 2. daß er sich bei höherer Stromstärke verbessert.

2. Über die Proportionalität zwischen Wärmewirkung und sekundären Kathodenstrahlen.

Gleichzeitig mit den Beobachtungen am Galvanometer war die Elektrizitätsmenge, welche von den Kathodenstrahlen in der Röhre nach Dorn-Curie erzeugt war, elektrometrisch gemessen worden (letzte Spalte der vorangehenden Tabellen).

Auf der Fig. 5 der Taf. III sind nun die bolometrisch gemessenen mg-cal als Abszissen, die dabei beobachteten Elektrometerlenkungen als Ordinaten gewählt. Sie gibt also den wichtigen und interessanten Zusammenhang zwischen der bolometrisch gemessenen Energie der X-Strahlen und ihrer laden- den Wirkung. Es scheint, als ob die beiden entwickelten Energieformen einander nicht proportional seien.

Durch eingehende Versuche ließ sich jedoch nachweisen, daß die intensiv bestrahlten Luftreste in der Dorn-Curieschen Röhre gleichzeitig mit dem Auftreten einer elektrischen Spannung einen *Ionisationsstrom* zwischen den beiden Platten zustande kommen lassen.

Um nun die Verluste infolge des Ionisationsstromes hintanzuhalten, wurde bei den folgenden Versuchsreihen die durch Bestrahlung entstehende Spannung herabgedrückt. Zu diesem Zweck wurde hinter den Bleischirm, dicht bei dem Elektrometer ein Luftkondensator nach Kohlrausch montiert, der bei einem Scheibendurchmesser von 14,6 cm und einem Plattenabstand von 0,12 mm eine Kapazität von 1104 cm besaß. Die Kapazität des Systemes wurde dadurch etwa 6—7 mal so groß.

Mit dieser Versuchsanordnung wurden die beiden Versuchsreihen VI und VII, vom 24. und 25. Januar 1905, gemacht, beide mit der Röhre I.

Versuchsreihe VI.

Nr.	Ampère	Schlagweite cm	Kapazität Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Elektrometer	
127	2,2	5,5	$\frac{1}{10}$	5100	+ 7,0	0,0085	4,6	4,45
128	2,2	5,5	$\frac{1}{10}$	1100	- 4,5		4,3	
129	2,75	9,0	$\frac{2}{10}$	1100	- 9,3	0,0181	9,6	9,57
130	2,75	9,0	$\frac{2}{10}$	1200	- 6,2	0,0171	9,5	
131	2,75	9,0	$\frac{2}{10}$	2200	+ 10,0		9,6	
132	3,7	—	$\frac{3}{10}$	1100	0,0	0,1005	49,9	49,9

Versuchsreihe VII.

133	3,55	—	$\frac{3}{10}$	1100	+ 20,0	0,1175	50,8	50,8
134	3,1	7,5	$\frac{5}{10}$	1200	- 3,0	0,0550	19,9	19,9
135	3,9	—	$4 \cdot \frac{5}{10}$	1100	- 17,0	0,2368	89,3	89,3
136	4,15	14,0	$4 \cdot \frac{8}{10}$	1100	- 23,0	0,3674	117,2	117,2
137	2,85	—	$\frac{4}{10}$	1100	- 1,0	0,0421	21,5	21,5
138	3,4	—	$\frac{7}{10}$	1100	+ 24,5	0,1050	36,5	38,0
139	3,4	—	$\frac{8}{10}$	1100	+ 4,6		39,8	

Die Abhängigkeit der bolometrisch gemessenen *X*-Strahlenenergie von der Primärstromstärke bietet bei diesen Versuchen nichts prinzipiell Neues. Erwähnung mag höchstens der Versuch 136 finden, welcher die höchste beobachtete *X*-Strahlenenergie lieferte.

Interessant sind dagegen die Beziehungen zwischen der bolometrisch gemessener Energie und der erzeugten Spannung: denn diese Kurven nähern sich bedeutend mehr geraden Linien. Taf. III, Fig. 6. Es schien wahrscheinlich, daß diese Kurven in Gerade übergehen würden, wenn die Spannung in der Dorn-Curieschen Röhre noch mehr vermindert werden könnte.

Es boten sich nun zwei Wege dar, die Messungen bei genügend kleiner Spannung mit genügender Genauigkeit durchzuführen. Der erste war, die isolierte Platte in der Curieschen Röhre durch ein Galvanometer hindurch zur Erde abzuleiten. Der entstehende Strom wurde zu etwa $4 \cdot 10^{-11}$ Amp. berechnet. Da aber die Aufstellung eines zweiten Panzergalvanometers zu umständlich schien, wurde dieser Weg verworfen und der zweite gewählt.

Dies war *die Kompensation der entstehenden Elektrizitätsmenge mit dem piezoelektrischen Quarz von Curie.*¹⁾

Wie bekannt, werden bei diesem Apparat durch Belastung einer Schale Elektrizitätsmengen erzeugt, die dieser Belastung genau proportional sind. Die langsam steigende Belastung, die hier zur Erzielung einer Kompensation nötig war, wurde durch ausfließendes Quecksilber bewirkt.

Der Apparat wurde bei den Versuchsreihen VIII, IX, X, XI, XII (XIII und XIV) verwendet, welche unter den verschiedensten Umständen eine gute Proportionalität zwischen der in den Bolometern erzeugten Absorptionswärme und der in der Röhre von Dorn-Curie auftretenden Elektrizitätsmenge ergaben.

1) J. Curie, Lum. électr. 29. p. 62—69. 1888; Fortschritte 44. II. p. 431.

Versuchsreihe VIII.

Samstag, 28. Januar 1905. Röhre I. Mittelhart, nicht absorbiert Teil der Strahlung (10 Proz.):¹⁾

Nr.	Ampère	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Quarz- belastung g
140	(2,2)	$\frac{1}{10}$	3100	0,0	0,0045	17
141	(2,75)	$\frac{2}{10}$	1800	— 2,6	0,0151	43
142	(2,75)	$\frac{2}{10}$	1700	— 3,4	0,0133	43
143	(3,1)	$\frac{5}{10}$	1200	— 32,5	0,0805	83
144	(3,1)	$\frac{5}{10}$	1500	— 20,0	0,0290	75
145	(3,1)	$\frac{4}{10}$	1100	— 29,0	0,0260	70
146	(3,1)	$\frac{4}{10}$	1600	— 7,0	0,0287	68
147	(3,4)	$\frac{5}{10}$	1100	— 17,0	0,0485	134
149	(3,7)	$\frac{6}{10}$	1100	+ 56,0	0,1213	258
150	(3,7)	$\frac{7}{10}$	1100	+ 56,0	0,1338	286
151	(3,7)	$\frac{9}{10}$	1100	+ 30,0	0,1380	335
152	(3,7)	$\frac{10}{10}$	1100	+ 15,0	0,1383	338
155	(3,9)	4. $\frac{4}{10}$	1100	— 12,0	0,2110	543
156	(4,15)	4. $\frac{6}{10}$	1100	+ 62,5	0,3528	833
157	(4,15)	4. $\frac{7}{10}$	1100	— 35,0	0,322 ₀	899

Versuchsreihe IX.

Sonntag, 29. Januar 1905. Röhre I. Die Röhre wurde für die Versuche so weich gemacht, daß sich das blaue Kathodenlicht zeigte. Leider arbeitete sie in diesem Zustande sehr ungleichmäßig, besonders wenn sie von dem Bleischirm umgeben war. Nicht absorbiert Teil der Strahlung (2 Proz.):

Nr.	Ampère	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Quarz- belastung g
158	(2,7)	$\frac{2}{10}$	1100	0,0	0,0251	90
159	(3,4)	$\frac{6}{10}$	1170	0,0	0,0708	208
160	(3,7)	4. $\frac{2}{10}$	1600	— 7,8	0,0970	303
161	(3,9)	4. $\frac{4}{10}$	1600	— 15,3	0,1253	375
163	(4,15)	4. $\frac{2}{10}$	1100	+ 30,0	0,1755	490
164	(4,15)	4. $\frac{2}{10}$	1100	+ 70,0	0,2085	590

1) Aus späteren Versuchen (p. 118) geschätzt nach der Durchsichtigkeit der Handknochen auf dem Fluoreszenzschirm.

Versuchsreihe X.

Montag, 30. Januar 1905. Röhre III von Siemens & Halske. Die Versuche wurden mit einer ganz neuen Röhre gemacht, welche leider nach dem letzten Versuch ihr Vakuum bis zur Bildung des roten positiven Lichtes verminderte. Nicht absorbiertes Teil der Strahlung (5 Proz.):

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Quarz- belastung g
165	1,95	2,5	$\frac{2}{10}$	1800	0,0	0,0153	47
166	2,35	3,5	$\frac{3}{10}$	1120	0,0	0,0370	92
167	2,55	5,0	$\frac{6}{10}$	1220	— 2,0	0,0663	179
168	2,90	9,0	$\frac{9}{10}$	1200	+ 27,0	0,1265	315
169	3,30	12,0	$4 \cdot \frac{3}{10}$	1240	— 40,0	0,1005	330

Versuchsreihe XI.

Dienstag, 31. Januar 1905. Röhre IV von Siemens & Halske. Gleichfalls eine ganz neue Röhre, welche nach jedem Versuch aufs neue weich gemacht wurde, derart, daß die Knochen der Hand auf dem Fluoreszenzschirm als fast strukturlose schwarze Schatten erschienen. Von dem Bleischirm umgeben arbeitete die Röhre äußerst ungleichmäßig. Daher wurde der Schirm mit der Innenseite nach der Curieschen Röhre gekehrt und durch Kontrollversuche gezeigt, daß Bolometer und Elektrometer gegen die Strahlung trotzdem genügend geschützt sind. Nicht absorbiertes Teil der Strahlung (0 Proz.):

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Quarz- belastung g
170	2,6	7,5	$\frac{2}{10}$	1100	— 20,7	0,0076	38
171	2,6	7,5	$\frac{1}{10}$	1100	+ 2,8	0,0148	57
172	3,0	11,0	$\frac{2}{10}$	1100	— 12,5	0,0137	54
173	3,0	11,0	$\frac{2}{10}$	1100	+ 7,5	0,0312	65
174	4,0	12,0	$\frac{1}{10}$	1100	+ 4,2	0,0160	46

Die emittierte Energie ist so gering, daß es scheint, als ob der größte Teil der Strahlen bereits in den Glaswänden der Röhre absorbiert werde.

In auffälliger Weise zeigte sich bei dieser Versuchsreihe, daß bei einem größeren Induktor die Schlagweite fast gar nicht von der Härte der Röhre, wohl aber von der Primärstromstärke abhängig ist, ferner daß die Primärstromstärke bei denselben Verhältnissen im Primärstromkreis um so größer ist, je weicher die Röhre ist. Die ausgestrahlte Energie endlich scheint hier mit der Primärstromstärke kaum in Zusammenhang zu stehen.

Versuchsreihe XII.

Mittwoch, 1. Februar 1905. Röhre II, die inzwischen noch härter geworden war. Die Handknochen auf dem Fluoreszenzschirm noch gut durchsichtig. Nicht absorbierter Teil der Strahlung 25 Proz.:¹⁾

Nr.	Ampère	Schlagw. cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Quarz- belastung g
175	2,7	5,5	$\frac{1}{10}$	1700	0,0	0,0082	25
176	3,3	10,5	$\frac{4}{10}$	1100	+ 6,0	0,0551	148
177	3,4	8,5	$4 \cdot \frac{3}{10}$	1260	- 30,0	0,1065	350
178	3,5	—	$4 \cdot \frac{4}{10}$	1280	- 41,0	0,1385	492
179	3,55	—	$4 \cdot \frac{5}{10}$	1330	+ 6,0	0,2139	785

Die vorstehenden Versuchsreihen wurden auf Taf. IV, VIII bis XII graphisch dargestellt. Dabei ist zu bemerken, daß als Abszissen, wie bisher, die pro Sekunde die Bolometer treffenden Energien aufgetragen sind, als Ordinaten dagegen die zur Kompensation der Elektrizität in 15 Sek. benötigte Quecksilbermasse.

Die Versuchsreihen zeigen sämtlich eine bemerkenswerte Proportionalität der durch sekundäre Kathodenstrahlen entstehenden Elektrizitätsmenge mit der in den Bolometerstreifen in Wärme umgewandelten Strahlungsenergie. —

Der von dem ersten Bolometerpaar durchgelassene Teil der X-Strahlen sollte ursprünglich dadurch bestimmt werden, daß man ihn durch das zweite Bolometerpaar absorbieren ließ.

1) Resultat des kurz darauf gemachten Versuches; vgl. p. 113.

(Versuchsreihen XIII und XIV.) Als jedoch eine Beobachtung mit dem Fluoreszenzschirm zeigte, daß auch durch die vier Bolometer noch X-Strahlen hindurch drangen, wurde zu den Absorptionsmessungen die *ionisierende Wirkung der X-Strahlen* benutzt.

Ein Kondensator wurde hergestellt aus zwei Messingplatten von 90×90 mm Seitenlänge. Die Luftschicht zwischen denselben war etwa 30 mm dick. Die Platten waren auf Paraffin montiert und wurden in einen Kasten aus Weißblech gehängt, der eine schlitzförmige, mit Aluminiumfolie verschlossene Öffnung besaß.

Für die Messungen wurde der Kasten ähnlich wie die Dorn-Curiesche Röhre durch den starken Bleischirm mit quadratischer Öffnung vor Bestrahlung geschützt.

Die eine Platte des Kondensators war mit einem Hochspannungsakkumulator verbunden, dessen zweiter Pol durch einen Lampenwiderstand hindurch zur Erde abgeleitet war. Von der zweiten Kondensatorplatte führte die Leitung durch ein Drehspulengalvanometer von $6 \cdot 10^{-10}$ Amp./Skt. Empfindlichkeit zur Erde.

Zunächst wurde konstatiert, daß während der Bestrahlung des Kondensators im Galvanometer kein Strom zu beobachten war, wenn keine Potentialdifferenz zwischen den Platten herrschte. Dann wurde das Potential der Kollektorplatte um je 100 Volt vergrößert bis der Ionisationsstrom sein Maximum erreicht hatte (Sättigungsstrom). Dies fand statt bei 400 Volt. Die Messungen wurden bei 500 Volt Kondensatorspannung ausgeführt.

Die Versuchsanordnung war so getroffen worden, daß die Stärke des durch die X-Strahlen ausgelösten Ionisationsstromes mit ihrer bolometrisch gemessenen Energie verglichen werden konnte. Denn nur, wenn sich der Ionisationsstrom dieser Energie proportional erwies, durfte er später als Maß für ihre Intensität benutzt werden.

Bei der folgenden Versuchsreihe, welche den linearen Zusammenhang bewies, wurde mit Röhre I gearbeitet und wegen der großen Schwingungsdauer des Drehspulengalvanometers 30 Sek. exponiert.

Versuchsreihe XV.

Nr.	Amperé	Schlagweite cm	Kapazität in Mikrof.	Gesamt- widerstand	Ausschlag des Galvano- meters	Energie mg-cal/sec	Ionisations- stromstärke Skt.
188	2,5	—	$\frac{4}{10}$	1100	+ 3,5	0,0580	37,0
189	3,7	—	$4 \cdot \frac{4}{10}$	1100	— 3,0	0,2010	143,0
190	3,8	—	$4 \cdot \frac{5}{10}$	1100	— 42,0	0,2160	162,0
191	3,8	—	$4 \cdot \frac{6}{10}$	1240	0,0	0,2670	180,0
192	3,2	—	$4 \cdot \frac{9}{10}$	1300	+ 1,0	0,1280	90,0

Trägt man die mg-cal als Abszissen, die Ionisationsstromstärken als Ordinaten auf, so resultiert eine *Gerade*. Taf. IV, Kurve XV.

Danach schien es berechtigt, den Strom in ionisierter Luft zu Messungen der Absorption der X-Strahlen in den Bolometern zu verwenden.

Es wurden nun die beiden den X-Strahlen ausgesetzten Bolometer von ihren Verbindungen gelöst und aufeinander befestigt. Auf eine Bestimmung der Ionisationsstromstärke wie bisher folgte jetzt eine andere, bei der die Bolometer in den Weg der Strahlen gehalten wurden. Hierauf kam eine Kontrollmessung ohne und eine zweite mit den vorgehaltenen Bolometern.

Aus diesen Versuchen berechnet sich eine Absorption der aus der Röhre austretenden Strahlen von 90 Proz.

Derselbe Absorptionsversuch wurde dann noch mit der ganz harten Röhre II gemacht, leider ohne daß vorangehend eine Vergleichung des Ionisationsstromes mit der Absorptionsenergie mehr möglich gewesen wäre. Der Versuch ergab in derselben Weise eine Absorption von 75 Proz.

III. Photographische Versuche über die Emissionsdauer der X-Strahlen.

Um den *Effekt* der X-Strahlen, ihre Energie pro Zeiteinheit zu bestimmen, war es erforderlich, die Zeit zu messen, während der bei jeder Entladung des Induktors X-Strahlen von der Antikathode emittiert werden.

Es stand mir für diesen Zweck ein Apparat zur Verfügung, der im wesentlichen aus einer Stahlscheibe bestand, die mittels vieler Zahnräder durch zwei schwere Kurbeln in schnelle Rotation versetzt werden konnte.

Die Stahlscheibe hat einen Radius von 123 mm und ist 18 mm breit. Das Übersetzungsverhältnis wurde zu 600 ermittelt, ihre maximale Peripheriegeschwindigkeit zu 38,6 m/sec bestimmt.

Um diese Maschine für die Versuche verwenden zu können, wurde sie von einem lichtdichten Messingkasten umschlossen. Der höchste Teil der Stahlscheibe war nur einige Millimeter unter dem Deckel des Kastens.

Auf dem Deckel wurde ein 3 mm starkes Bleiblech befestigt, welches senkrecht über der Drehungsachse der Stahlscheibe einen etwa 0,7 mm breiten Spalt erhielt.

Unmittelbar über dem Bleiblech wurde die X-Strahlröhre montiert, so daß ihre Antikathode möglichst genau in die Richtung Drehungsachse $\rightarrow$ Spalt zu liegen kam.

Zur Ausführung eines Versuches wurde ein Filmstreifen auf der Peripherie der Scheibe befestigt, der Deckel aufgeschraubt und die Scheibe in Rotation gesetzt.

Es schien wünschenswert, die Entladungsdauer unter möglichst ähnlichen Umständen zu studieren, unter denen die bisherigen Untersuchungen gemacht worden waren. Deshalb lief z. B. auch während dieser Versuche der Umschalter auf dem Turbinenunterbrecher mit, weil er vielleicht die Rotationsgeschwindigkeit desselben etwas beeinflusste.

Wenn die Scheibe eine passende Umdrehungszahl hatte, wurde der Primärkreis des Induktors möglichst kurze Zeit geschlossen. Da die Entladungen in Abständen von $\frac{1}{107}$ Sek. einander folgten, so kamen immer mehrere (5—10) Spaltbilder auf den Film, aus deren gleichmäßigen Abständen am besten die Filmgeschwindigkeit bestimmt werden konnte.

Die Größenordnung der Rotationsgeschwindigkeit des Films wurde außerdem aus der Dauer einer Viertelskurbelumdrehung bestimmt.

Zur Berechnung der Emissionsdauer wurden vier Filmstreifen ausgemessen, von denen Taf. V, Film 3 und 4 zeigt.

Diese Aufnahmen zeigen eine unerwartete Anomalie: Kurz

nach einer Entladung folgt fast immer, viermal unter fünf Bildern, eine zweite, schwächere.

Es schien möglich, daß diese Nebenentladungen bei einem länger dauernden Betrieb der Röhre verschwinden würden. Um dies zu untersuchen, wurde über dem Spalt ein Rahmen aus Blei angebracht, der beim Auslösen einer Sicherung durch eine Feder verschoben wurde, so daß etwa $\frac{1}{10}$ Sek. lang der Spalt der X-Strahlung ausgesetzt war. Versuche, die 5 und 10 Sek. nach dem Ingangsetzen der Röhre gemacht wurden, ergaben, daß die Begleiter zwar schwächer und seltener wurden, daß sie aber doch immer noch vorhanden waren.

Um zu untersuchen, ob die Begleiter durch die Eigenart der Unterbrechung bedingt wären, wurde der Turbinenunterbrecher durch einen Motorunterbrecher von Voltohm ersetzt. Die so gewonnenen Bilder der Entladungen auf dem Filmstreifen waren jedoch von den früheren nicht verschieden.

Die zweite Entladung dürfte demnach bei allen vorhergehenden Versuchen dabei gewesen sein und deshalb muß sie bei der Bestimmung der Emissionsdauer so gut als möglich in Rechnung gezogen werden.¹⁾

Die Ausmessung der Films ergab folgende Resultate:

Dauer der Hauptentladung im Mittel $3,3 \cdot 10^{-4}$ Sek.

Die Zeit, die von dem Maximum einer Hauptentladung bis zu dem Maximum ihrer Nebenentladung verstreicht, betrug $7,7 \cdot 10^{-4}$ Sek.²⁾

Für die Nebenentladungen ergaben die Berechnungen eine Emissionsdauer von $2,0 \cdot 10^{-4}$ Sek.

Vergleicht man diese aus den Films berechneten Emissionszeiten mit der Zeit, in welcher der früher beschriebene Heizstrom der Bolometer abklingt (vgl. Taf. III, Fig. 1, wo das schraffierte Gebiet die Dauer der X-Strahlenemission bedeutet), so findet man, daß die Größenordnung dieser beiden Aktionszeiten die gleiche ist.

1) Hr. Geheimrat Röntgen hatte die Güte, mir mitzuteilen, daß er 1897 bei ähnlichen Untersuchungen gleichfalls diese Verdoppelung bei einigen Entladungen gefunden habe.

2) F. Kligelfuss gibt in einer Broschüre die Schwingungsdauer seiner 40 cm-Induktorien zu $4 \cdot 10^{-4}$ Sek. an.

Um einen Mittelwert der Zeit anzugeben, in der die X -Strahlenenergie einer Entladung ausgestrahlt wird, kann man vier Entladungen zu $5,3 \cdot 10^{-4}$ Sek. rechnen, die fünfte jeweils zu $3,3 \cdot 10^{-4}$ Sek. (weil ohne Nebenentladung). So erhält man das Mittel $5,0 \cdot 10^{-4}$ Sek.

Die photographischen Resultate können jedenfalls nur einen *Mittelwert* der Entladungsdauer geben, sie können nur dazu dienen, ihre Größenordnung zu schätzen. Die photographische Wirkung war so schwach, daß der stärkste Primärstrom genommen werden mußte, der Verwendung finden durfte. Ob bei den bedeutend schwächeren X -Strahlen, mit denen in einem großen Teile der Untersuchung gearbeitet wurde, die Emissionsdauer nicht kleiner ist, konnte nicht bestimmt werden.

Die Resultate dieser Arbeit lassen sich in folgender Weise zusammenstellen:

1. Die bei der Absorption der X -Strahlen entstehende Wärme ist deutlich nachweisbar.

2. Die durch die Erwärmung eines Zweiges der Wheatstoneschen Brückenschaltung mittels X -Strahlen hervorgerufene Galvanometerablenkung läßt sich durch die Erwärmung des entsprechenden Zweiges mittels eines Heizwechselstromes aus Kondensatorentladungen vollständig kompensieren und dadurch messen.

3. Die emittierte X -Strahlenenergie wächst viel schneller als die Energie des Primärstromes des Induktors. Der höchste Wert der Strahlung wurde bei der Betriebsspannung des Induktors 110 Volt und der Primärstromstärke 4,15 Ampères beobachtet. Die Reduktion der dabei gemessenen X -Strahlenenergie auf die *halbkugelförmig* von der Antikathode ausgehende Strahlung sowie auf eine einzelne Entladung ergibt

0,15 mg-cal.

4. Von der in der X -Strahlenröhre verbrauchten elektrischen Energie werden etwa $0,2\%$ in X -Strahlenenergie verwandelt.

5. Die in der Dorn-Curieschen Röhre durch X-Strahlen erzeugte Elektrizitätsmenge ist proportional der bolometrisch gemessenen Energie dieser X-Strahlen.

6. Bei einer Unterbrechung des Primärstromes emittiert die Antikathode die X-Strahlung häufig in zwei Intervallen, die durch eine meßbare Zeit getrennt sind. Die gesamte Emissionsdauer wurde zu etwa 5×10^{-4} Sek. bestimmt.

7. Aus 3. und 6. berechnet sich der beobachtete Maximal-effekt der X-Strahlen zu 0,26 g-cal pro Sekunde.

München, Physikal. Institut der Universität.

(Eingegangen 14. Juni 1906.)

Film 3 u. 4.

E. Angerer.