ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 61.

1. Zur Hochvakuumentladung; von J. E. Lilienfeld.

Inhaltsübersicht: I. Der Anlaß. — II. Allgemeines über die Untersuchungsmethode. — III. Lineare Verteilung des Gefälles längs der Achse. — IV. Temperaturmessung an der Anode. — V. Rohr mit zwei Anoden im nämlichen zylindrischen Teil. — VI. Die Charakteristiken. — VII. Der Grenzwert des Gefälles. — VIII. Charakteristiken eines Hochvakuumventils. — IX. Isolatoren und Hochvakuumentladung. — X. Zusammenfassung. — XI. Tabellen.

I. Der Anlaß.

Geschichtliches.

§ 1. Die Entladungserscheinungen im höchsten erreichbaren Vakuum sind zum ersten Male von mir unter Benutzung von Glühkathoden hergestellt und untersucht worden. Meine ersten Arbeiten datieren vom Jahre 1907. Daran anschließend folgt eine Reihe von Untersuchungen, über die in zusammenfassender Form in den Annalen der Physik im Jahre 1910 (1) und 1914 (2) berichtet wurde. Ein ähnlicher Bericht über die nach dem Jahre 1914 veröffentlichten Untersuchungen liegt noch nicht vor. Sofern diese Untersuchungen in das Gebiet der Röntgenstrahlenerzeugung spielen, werden sie demnächst im „Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik“ zusammengefaßt erscheinen.

Die Erscheinung, welche den Anlaß bot, mich mit dem Gebiete der Hochvakuumentladung zu befassen, war die Tatsache, daß die zur Durchleitung einer gewissen Stromstärke erforderliche Klemmenspannung mit fortschreitender Gasverdünnung ansteigt, wenn erst einmal eine bestimmte Gasdichte unterschritten ist. Schon in meinen ersten Arbeiten¹⁾ führte ich die Zunahme des Spannungsabfalles auf die Ab-

1) Es erscheint erforderlich zu betonen, daß ich *von allem Anfang an diese Auffassung* vertreten habe in Anbetracht einer Anzahl späterer vom Jahre 1913 an veröffentlichter Arbeiten anderer Forscher, in denen diese Deutung der Beobachtungen als etwas überraschend Neues dargestellt wird.

wesenheit hinreichender Ionenbildung in den Gasresten und auf das infolgedessen stattfindende Auftreten einer von den Elektronen herrührenden *Raumladung* zurück. Dieser mein Standpunkt befand sich im Gegensatz zu einer kurz darauf von Soddy (3) vertretenen Auffassung, derzufolge die gedachte Spannungszunahme daher rühren sollte, daß die Glühkathode im höchsten Vakuum ihre Wirksamkeit verliert. Nachdem meine Entgegnung (4) auf die Soddysche Arbeit veröffentlicht war, gelang es mir, nachzuweisen, daß bei weiter fortgesetzter Gasverdünnung die gesamten Entladungsvorgänge letzten Endes *vom Gasdrucke unabhängig* werden. Damit war die Erkenntnis gegeben, auf welcher sich die Hochvakuumtechnik (Röntgenröhren, Ventilröhren usw.) in den darauf folgenden Jahren aufbaute. Ich persönlich zog die Konsequenz für die Röntgentechnik bereits im Herbst 1911 (5).

Das quadratische und dreihalbe Gesetz.

§ 2. Gleichzeitig mit der Beobachtung, daß bei Unterschreitung einer bestimmten Gasdichte die Klemmenspannung an der Röhre zu wachsen beginnt und schließlich vom Gasdrucke unabhängig wird, stellte ich fest, daß die *Entladungscharakteristik* im Hochvakuum einen Anstieg des Gefälles mit der Stromzunahme aufweist. In meinen daran anschließenden Arbeiten wurde dargetan, daß zwischen dem Strom und einer Potenz des Gefälles in der Regel eine lineare Abhängigkeit besteht. Für den Exponenten dieser Potenz wurden von mir verschiedene Werte beobachtet; als interessante Fälle erörterte ich ganz besonders in ihrer Beziehung zur Raumladung den Wert 2 sowie den Wert $3/2$. Hauptsächlich gefesselt wurde meine Aufmerksamkeit durch das erstgenannte quadratische Gesetz; denn die Versuche, insbesondere Messungen des Potentialgefälles längs der Entladungsachse erwiesen, daß in dem Gültigkeitsbereiche dieses Gesetzes eine Raumladung nicht besteht. Es ist einleuchtend, daß vom grundsätzlich naturwissenschaftlichen Standpunkte die Tatsache, daß die Raumladung ohne irgendwie erhebliche Ionisation der Gasreste zu verschwinden imstande ist, sehr viel wichtiger erscheinen mußte, als die Untersuchung desjenigen Gebietes, in welchem die von vornherein zu erwartende, keinesfalls überraschende, von den Elektronen verursachte Raumladung vorhanden ist.

Die Arbeitsteilung.

§ 3. Im Gegensatz zu der meinerseits unternommenen Durchforschung des raumladungslosen Entladungsgebildes befaßten sich seit dem Jahre 1913 zahlreiche andere Forscher mit denjenigen Erscheinungen, bei denen das Bestehen einer Raumladung zu beobachten ist. Es trat eine Arbeitsteilung in dem Sinne ein, daß außer in meinen Arbeiten das raumladungslose Gebilde von keiner anderen Seite einer Untersuchung unterworfen wurde. Die Folge davon ist, daß zurzeit von einer Anzahl Fachgenossen, hauptsächlich aber in der Industrie und in der Patendliteratur die Meinung vertreten wird, es sei die Gültigkeit des Dreihalbgesetzes geradezu das notwendige, aber auch das hinreichende Kriterium für das Bestehen eines Hochvakuums.

Erster Einwand: Ungenügendes Vakuum.

§ 4. Die Forscher, welche diese Meinung vertraten, pflegten zweierlei Argumente meinen Arbeiten entgegen zu setzen. Das erste dieser Argumente wurde von Langmuir in seiner ursprünglichen Publikation (6) gebracht, sonderbarerweise aber nicht in seiner späteren deutschen (7) Veröffentlichung wiedergegeben [vgl. auch meine Er widerungen (8, 9)]. Langmuir meint, meinen Untersuchungen hätte überhaupt kein genügend hohes Vakuum zugrunde gelegen, da es mir sonst mit keiner technisch herstellbaren Spannung hätte gelingen können, in den engen, mit mehreren Knicken versehenen Entladungsröhren eine Entladung zu erzeugen. Dieses Argument kann nicht anders widerlegt werden, als indem man irgendeine der von mir beschriebenen Röhren oder eine der Formgebung nach gleichwertige Modifikation derselben beliebig lange an den besten heute bekannten Hochvakuum pumpen, gegebenenfalls unter Kühlung der Glaswände in flüssiger Luft ¹⁾, zu betreiben versucht. Auf diesem und nur auf diesem Wege kann sich jedermann mit Leichtigkeit überzeugen, daß der Langmuirsche Einwand gegenstandslos ist und daß Spannungen von der Größenordnung von einigen wenigen Kilovolt vollauf genügen, um die von mir beschriebene, mit einer weiteren Abnahme der Gasdichte sich nicht mehr ändernde Charakteristik aufzunehmen.

1) Diese Kühlung wurde zum Zwecke des Herabminderens der Gasdichte im Hochvakuum von mir zuerst noch vor 1910 angewandt (1).

Zweiter Einwand: Unzuverlässigkeit der Sondenmessung.

§ 5. Die *zweite* der mir entgegengebrachten Einwendungen ist — soviel ich heute sehen kann — die bei weitem häufigere. Wenn sie auch in der Literatur nur bedingterweise ausgesprochen sich vorfindet, so habe ich persönlichen Äußerungen entnommen, daß sie doch einen gewissen Kreis von Anhängern hat. Es ist dies die Ansicht, daß meine Meßresultate durch die Benutzung der Sondenmeßmethode getrübt sind. Von Rechts wegen liegt freilich die Sache so, daß die Berechtigung der Sondenmessung in einem Entladungsgebilde, welches einen linearen Potentialverlauf aufweist, über jeden Zweifel erhaben sein müßte, besonders da das Vorhandensein einer hochwertigen Isolation der Sonden von mir stets besonders betont wurde.

Gegenstand vorliegender Arbeit.

§ 6. Ich habe mich nichtsdestoweniger entschlossen, meine Untersuchungen nach Möglichkeit ohne Benutzung einer Sondenmessung zu wiederholen. Nicht etwa, weil ich mir eine größere Genauigkeit davon versprach — tatsächlich ist eine jede andere Messung bedeutend ungenauer als gerade die Sondenmessung — sondern um der gegen diese Methode nun einmal bestehenden Voreingenommenheit zu begegnen.

II. Allgemeines über die Untersuchungsmethode.

Beschränkung der Untersuchung auf zylindrische Röhren.

§ 7. Wenn man sich für die Bestimmung des Potentialgefälles nicht einer Sondenanordnung bedienen will, so liegt der Gedanke am nächsten, es zu versuchen, mit der Messung der *gesamten* Spannung auszukommen, indem man einfach an die Klemmen der Entladungsröhre ein passendes Voltmeter anschließt. Bekanntlich sind aber die Erscheinungen längs der Entladungsbahn nicht so einheitlicher Natur, daß eine solche Messung ohne weiteres die gewünschten Aufschlüsse zu bringen geeignet wäre.

Zunächst ist es bekannt, daß im allgemeinen an den Elektroden andere Vorgänge stattzufinden pflegen als in der eigentlichen Entladungsbahn. Diese Vorgänge machen sich dadurch bemerkbar, daß sie einen besonderen Anoden- bzw. Kathodenfall verursachen. Wird z. B. eine Glühkathode benutzt, dann können je nach ihrer Beschaffenheit, ihrer

Temperatur, aber auch infolge der Eigenart, in welcher Elektronen an ihr freigemacht werden, Komplikationen auftreten. Es ist in der Tat einfacher, den Einfluß der Elektroden mit Hilfe der Sondenmessung zu eliminieren, als — einen besonders günstigen Fall vorausgesetzt — nachzuweisen zu versuchen, daß kein erheblicher Fehler begangen wird, wenn das Gefälle in der näheren und weiteren Umgebung der Elektroden mitgemessen wird.

Die Hauptursache aber, weshalb ich meine bisherigen Arbeiten nicht auf die Messung des gesamten Spannungsabfalls in der Röhre aufgebaut habe, ist die folgende. Schon der bloße Anblick einer Hochvakuumentladung lehrt, daß in weiten Röhrenteilen und bei geringen Stromdichten andere Vorgänge sich abspielen als in engen Röhrenteilen und bei großen Stromdichten. Das wird von der Messung bestätigt. Im ersten Falle hat man es mit Gebilden zu tun, welche einen größeren oder geringeren Betrag an Raumladung aufweisen und häufig (wenn auch nicht immer) dem Dreihalbesetz folgen. Im zweiten Falle hat man es mit Raumladungsfreiheit und mit dem quadratischen Gesetz zu tun.

Besonders verwickelt wird das Bild durch den sich mit der Röhrenform von Fall zu Fall ändernden Einfluß der den weiten Röhrenteil mit dem engen zylindrischen verbindenden Verjüngung. Der Erfahrung gemäß pflegen sich die Glaswände dieser Verjüngung negativ aufzuladen und nach Art einer eigenen Kathode¹⁾ einen Kathodenstrahl zu bilden, ähnlich wie man ihn bei der gewöhnlichen Gasentladung als „Striktions“-Kathodenstrahl zu beobachten Gelegenheit hat. Die geordnete Bewegung eines solchen Striktionskathodenstrahles pflanzt sich längs der Achse des zylindrischen Röhrenteiles fort bis zu einer Tiefe, welche durch die Fähigkeit des hier bestehenden raumladungslosen Gebildes, langsame Kathodenstrahlen zu zerstreuen (10) begrenzt ist. Diese Eindringungstiefe beträgt — je nach der Form der Verjüngung — den gelegentlich vorliegender Untersuchungen gewonnenen Erfahrungen zufolge für einen zylindrischen Querschnitt von etwa 20 mm Durchmesser reichlich 5 cm bis zu

1) Über die Größe des hier stattfindenden, von der Form der Einengung weitgehend abhängigen Spannungsabfalles wolle man Abschnitt VII, § 29, vergleichen.

10 cm von dem Anfange des zylindrischen Teiles an gemessen. Außer dem Striktionsstrahl kommen im erweiterten Röhrenteil noch andere Umstände hinzu, von denen einige bereits angedeutet wurden und welche die Sachlage noch verwickelter gestalten.

Die Sondenmessung und Möglichkeiten sie durch Klemmspannungsmessung zu ersetzen.

§ 8. All das sind neue Gründe, welche sich zu dem im Abschnitt I genannten hinzugesellen und mich veranlaßt haben, meine weiteren Untersuchungen auf das Gebiet von Entladungen bei *gleicher Stromdichte*, also in *zylindrischen Röhren* zuzuspitzen. Nach der vorausgegangenen Auseinandersetzung wird es auch erneut verständlich erscheinen, weshalb ich stets darauf hinwies, daß die Messungen in einer praktisch unendlichen Entfernung von den Elektroden innerhalb der zylindrischen Bahn auszuführen sind, und weshalb ich dementsprechend den kurzen, nur 30 mm langen Sondenmeßbereich in der Mitte eines zylindrischen Rohres anzuordnen pflegte, welches bis zu 30 cm lang war und 10—11 mm lichte Weite besaß. Es ist schließlich klar, daß, wenn ohne Sondenmessung, einfach unter Zugrundelegung der Bestimmung der Klemmspannung gearbeitet werden soll, der Beitrag, den der an den Elektroden und bis zur Verjüngung stattfindende Spannungsabfall zur Gesamtspannung liefert, irgendwie ausgeschaltet werden muß.

Am einfachsten würde — falls der Abfall an den Elektroden vernachlässigt werden könnte — eine Röhre mit einer von Kathode zu Anode gleichbleibenden lichten Weite es ermöglichen, mit einer einzigen Klemmspannungsmessung auszukommen. Solche Röhren können aber aus rein technischen Gründen kaum hergestellt werden, besonders aber dann nicht, wenn eine Glühkathode angewandt werden soll. Denn die Glühkathode kann nicht den vollen Querschnitt des Rohres ausfüllen. Sie besteht in der Regel aus Drahtwindungen und muß in einer kugelförmigen Erweiterung untergebracht werden, so daß die Röhren die charakteristische, aus den Figg. 1, 2 und 3 ersichtliche Form erhalten.

Ein zweiter naheliegender Gedanke ist der, den zylindrischen Röhrenteil außerordentlich lang und nicht allzu

weit zu gestalten, so daß auf ihn ein bei weitem überwiegender Teil des gesamten Spannungsabfalls entfällt. Wäre man in der Lage, die Länge dieses Teiles und somit den gesamten Spannungsabfall an den Rohrklemmen auf jedes erforderliche Maß zu bringen, dann könnte tatsächlich der Einfluß der Vorgänge an den Elektroden und in der Verjüngung beliebig herabgesetzt werden. In der Praxis besteht eine solche Möglichkeit aber nicht, und zwar allein schon deshalb nicht, weil die im Leipziger Institut verfügbare, stehende Gleichspannung unserer Hochspannungsdynamos nicht viel mehr als 10000 Volt beträgt, wobei noch ein erheblicher Teil in einem Vorschaltwiderstand zum Zwecke der Stabilisierung der Vorgänge verbraucht wird. Andererseits ist die glastechnische Herstellung und die Handhabung, besonders aber die Entgasung sehr langer Röhren nicht einfach. Auch begegnet das Zünden der Entladung in sehr engen und sehr langen Röhren Schwierigkeiten.

Aus allen diesen Gründen ist zurzeit die obere Grenze der Länge bei allerhöchstens 1 m erreicht für Röhren von ungefähr 20 mm lichter Weite. Die längste, im folgenden beschriebene, zylindrische Entladungsbahn betrug aber 63 cm. Bei dieser Entladungsbahn findet für die Stromstärke von 10 M.A. ein gesamter Spannungsabfall von etwa 6500 Volt statt. Davon entfallen auf den weiten Teil von der Glühlampe bis 25 mm jenseits der Einengung etwa 2600 Volt, also rund 40 Proz. der Gesamtspannung. Man sieht aus diesen Angaben, daß es unmöglich sein dürfte, durch Verlängerung des Rohres den störenden Spannungsabfall unterhalb einer erträglichen Fehlergrenze herabzudrücken. Angesichts dessen ist es sehr beachtenswert, daß bereits bei den hier benutzten Längen und Querschnitten die an den Rohrklemmen aufgenommene Charakteristik sich um so mehr dem quadratischen Gesetze nähert, je länger und enger das Rohr ist. So betrug der Exponent bei dem genannten 63 cm langen Rohre bereits 200, wie aus Diagramm Fig. 6 ersichtlich.

Aber selbst wenn die Benutzung hinreichend langer Röhren sich praktisch ermöglichen ließe, würde man nicht alle Fragen mit ihrer Hilfe beantworten können. So würde die für den Nachweis der Raumladungsfreiheit unentbehrliche Feststellung der Verteilung des Gefälles längs der Entladungssache an einer solchen Röhre nicht ausgeführt werden können.

Die Subtraktionsmethoden — Voraussetzungen ihrer Anwendbarkeit und ihre Mängel.

§ 9. Aus all diesen Gründen ist es unumgänglich nötig, entweder die klassische Methode der längs der Achse verschiebbaren Elektroden zu benutzen, also eine Röhre von der in der Fig. 1 (S. 231) dargestellten und beschriebenen Form. Oder aber Röhren mit mehreren Anoden. Entweder solche mit unbeweglichen Anoden und mehreren, voneinander verschiedenen zylindrischen Entladungsbahnen nach Fig. 2 (S. 237) oder solche mit einer einzigen zylindrischen Entladungsbahn und mindestens zwei Anoden, von denen die eine während der Messung je nach Bedarf in die Entladungsbahn hineingebracht und benutzt oder aus ihr entfernt und beiseite geschafft werden kann (vgl. Fig. 3, S. 240).

Die Anordnungen nach Fig. 1, 2 und 3 seien zusammenfassend „Subtraktionsmethoden“ genannt. Und zwar deshalb, weil die Charakteristik des zylindrischen Entladungsteiles durch Subtraktion der Spannungen zweier Meßreihen gewonnen wird, von denen die eine mit der Anode in der Nahlage, die andere mit der Anode in der Fernlage gemacht wird. Durch die Subtraktion heben sich die Vorgänge an den Elektroden heraus, freilich unter verschiedenen Voraussetzungen, die durchaus nicht in selbstverständlicher Weise erfüllt zu sein brauchen.

Erstens müssen die beiden, bei verschiedenen Lagen der Anode zeitlich nacheinander vorgenommenen Meßreihen sich auf den nämlichen Zustand beziehen. Das ist der größte Nachteil der Subtraktionsmethoden gegenüber der Sondenmessung, die in einer einzigen Meßreihe die Charakteristik wiedergibt. Das Wort „Zustand“ ist dabei im weitesten Sinne zu verstehen. Es bezieht sich auf den Abfall an den Elektroden, die Aufladung der Rohrwand in dem sich verjüngenden Teile, auf den Gasdruck, und für den Fall, daß verschiedene Entladungsäste koexistieren, auch darauf, daß in beiden Fällen auf dem nämlichen Aste der Charakteristik gemessen wird.

Zweitens ist für den Fall, daß Meßreihen an verschiedenen langen Rohransätzen des nämlichen Rohres, wie in Fig. 2, miteinander verglichen werden, unumgängliche Voraussetzung,

daß die Formgebung sämtlicher Verjüngungsstellen genau die gleiche sei, und auch ihre Oberflächenbeschaffenheit die gleiche (§ 29), damit die unter „Erstens“ genannten Bedingungen erfüllt werden können.

Drittens muß aber die Anode bereits in der Nahlage so weit von der Einschnürung entfernt sein, daß die wenig übersichtlichen Vorgänge in den erweiterten Röhrenteiln keinerlei Störungen der eigentlichen, zylindrischen Meßbahn mitteilen können.

Es ist einleuchtend, daß, wenn irgendeine dieser Bedingungen nicht erfüllt ist, — was sehr wohl eintreten kann — durch die Subtraktion der in beiden Anodenlagen gemessenen Spannungen keinesfalls der Einfluß der Elektroden herausgehoben wird, so daß der Spannungsabfall im zylindrischen Teile als Differenz übrigbleibt, sondern es geht dann aus der Rechnung etwas physikalisch Undefiniertes hervor.

Einer der größten Mängel der Subtraktionsmethoden ist aber, daß durch ihre Anwendung die Fehlergrenzen nicht nur absolut, sondern erst recht prozentuell erweitert werden. Deshalb ist es erwünscht, den Spannungsabfall in der Nahlage möglichst gering, den in der Fernlage möglichst groß zu halten. Es ist daher verständlich, daß ich bestrebt war die Nahlage der Anode nicht weiter als unbedingt erforderlich in den zylindrischen Teil hereinzurücken.

Die Erwägungen dieses Paragraphen lassen es jedenfalls wiederholt klar hervortreten, wie sehr eine Sondenmessung allen anderen Methoden überlegen ist, so daß für genaue Bestimmungen nichts anderes als eine Sondenanordnung in Frage kommen kann.

Gemeinsame Fehler der benutzten Röhrenexemplare.

§ 10. Eine richtige Vorstellung von der Ausdehnung des Bereiches der bereits in großen Zügen besprochenen, vom erweiterten Teile in die zylindrische Meßbahn hineingreifenden Unregelmäßigkeiten habe ich erst im Laufe der vorliegenden Messungen gewonnen. Am einwandfreiesten in dieser Hinsicht war die Anordnung gemäß Fig. 2, wenn auch hier die naheliegende Anode mit ihrer Entfernung von 5 cm gegenüber der Erweiterung noch nicht weit genug in den zylind-

drischen Teil zurückgezogen war. Ich schätze den erforderlichen Mindestabstand bei der lichten Weite von 18—20 mm auf 8—10 cm.

Hingegen ist die Röhre mit der verschiebbaren Anode nach Fig. 1 aus dem gleichen Grunde zwar genügend, um die Linearität des Potentialgefälles längs der Achse innerhalb erträglicher Fehlergrenzen nachzuweisen; für die Bestimmung der Entladungscharakteristik im zylindrischen Teile ist das zurzeit vorliegende Röhrenexemplar aber wenig brauchbar. Zu dem letzteren Zwecke müßte das Rohr sehr viel länger gemacht werden, was jedoch aus den weiter unten auseinander-gesetzten technischen Gründen nicht — wenigstens nicht ohne große Kosten — ausführbar ist.

Auch das vorhandene Exemplar der Röhre nach Fig. 8 besitzt eine viel zu nahe an der Erweiterung sitzende Anode. Die an der Röhre angestellten Messungen sind hauptsächlich deshalb interessant, weil bereits die einfache Messung der Klemmenspannung mit großer Annäherung das quadratische Gesetz ergab. Eine Bestimmung der Charakteristik durch Subtraktion der Spannungen ist jedoch an Hand der vorliegenden Versuchsreihen noch nicht angängig.

Da sich aber bereits aus den gegenwärtig vorliegenden Messungen vollkommen sichergestellte Folgerungen allgemeiner Tragweite — Linearität des Gefälles längs der Achse, Unabhängigkeit der Anodentemperatur von der Länge der zylindrischen Bahn — ergeben, berichte ich hierüber im folgenden. Gleichzeitig wird die Herstellung ergänzender Meßreihen angestrebt. So sind Arbeiten, um die Röhren nach Figg. 2 u. 3 durch tieferes Einrücken der Nahlage der Anode in den zylindrischen Teil von dem Einfluß der Vorgänge im weiten Röhrenteil zu befreien, im Gange. Ich hoffe, in einer zweiten Mitteilung demnächst darüber berichten zu können.

III. Die lineare Verteilung des Potentialgefälles längs der Achse.

Wichtigkeit des Nachweises.

§ 11. An dieser Stelle interessiert in allererster Linie der Nachweis, daß in den zylindrischen Teilen der Entladungsbahn selbst im höchsten Vakuum das Gefälle längs der Achse linear verteilt ist. Denn ein solcher Nachweis genügt, um

die Zulässigkeit der Sondenmessung aufs Neue einwandfrei zu beweisen und somit meinen früheren Arbeiten eine neue Stütze zu geben. Außerdem ist der lineare Verlauf die Hauptgrundlage, aus der auf die naturwissenschaftlich wichtigste Folgerung meiner Untersuchungen, nämlich auf die Raumladungsfreiheit, geschlossen wird.

Die Röhre.

§ 12. Für die Messung des Potentialverlaufes wurde die klassische Methode einer verschiebbaren Anode benutzt. Die Anordnung ist in Fig. 1 dargestellt. Die Anode *A* ist mit

Fig 1.

zwei parallel verlaufenden Drähten *B* und *C* fest verbunden. Diese Drähte gleiten längs einem aus ebensolchen Drähten *D* und *E* bestehenden Schlitten, welcher an einem Quarzstabe *F* befestigt ist. Die Drähte *D* und *E* sind an den Stellen *G* und *H* mit Hilfe der üblichen Platinkontakte nach außen geführt, so daß sie leitend an die Meßanordnung angeschlossen werden können. Hinter der Anode *A*, welche mit einem Spielraum von 1 mm in dem zylindrischen Teile des Entladungsrohres angeordnet ist, befindet sich ein Quarzteller *J*, welcher die ganze lichte Weite des Rohres ausfüllt und zu einer genau zentrischen Führung der Anode *A* dient. Die lichte Weite des zylindrischen Rohrteiles beträgt etwa 23 mm, seine Gesamtlänge 230 mm. Die Messungen werden in drei Stellungen

der Anode *A* ausgeführt. Diejenige Stellung von *A*, welche der schematisch angedeuteten Glühlampe *H* am nächsten liegt, ist um 25—30 mm¹⁾ gegen die Erweiterung *K* in das zylindrische Rohr zurückgezogen. Eine zweite, am weitesten von *H* entfernte Stellung von *A* ist von der genannten vordersten Stellung von *A* um 157 mm entfernt. Schließlich wird eine dritte Lage der Anode tunlich genau in der Mitte zwischen ihrer vorderen und hinteren Lage eingestellt, also in einem Abstand von je 77—78 mm von den erstgenannten Lagen. Die Verschiebung der Anode erfolgt einfach durch Schütteln der Röhre.

Lediglich zur Evakuierung dient der Tantaldraht *L*, von welchem aus die Drähte *B*, *C*, *D* und *E* mit Elektronen beworfen und so zum Glühen gebracht werden. Das Pumpen der Röhre geschieht deshalb in vertikaler Lage, so daß die ebenfalls aus Tantal bestehende Glühlampe *J* oben, das mit *G* und *H* bezeichnete Ende unten sich befindet. Die Anode liegt also beim Pumpen in der mit *A*₁ bezeichneten Stellung und wird durch eine von der Glühlampe *J* aus eingeleitete Entladung bis nahe an den Schmelzpunkt des Kupfers, aus welchem sie besteht, erhitzt. So gelingt es, zum Teile von *J*, zum Teile von *L* aus das gesamte in der Röhre enthaltene Metall während des Pumpprozesses auf eine hohe Temperatur zu erhitzen.

Die Betriebs- und Meßanordnung.

§ 13. Die elektrische Anordnung ist ebenfalls aus der Zeichnung ersichtlich. Die Glühlampe *J* wird von der Akkumulatorenbatterie *B* geheizt. Die Entladung wird von zwei hintereinander geschalteten Gleichstromhochspannungsdynamos *S* der Siemens-Schuckert-Werke aufrechterhalten, welche insgesamt bis zu 10000 Volt liefern. Der Strom wird durch Änderung der Erregung geregelt, er geht über einen bis zu 0,5 Megohm betragenden variablen Vorschaltwiderstand *T* und über das Milliampereometer *MA* (ein in Spitzen gelagertes Zeigerinstrument von Siemens & Halske) durch die Röhre. Die Spannungsmessung erfolgt ebenfalls mit Hilfe eines Galvanometers *V*. Es ist dies ein Millivoltmeter mit aufgehängtem

1) Diese Entfernung ist sehr wahrscheinlich viel zu gering, vgl. Abschnitt II, § 10.

System von Siemens & Halske, wie es für thermoelektrische Messungen benutzt zu werden pflegt. Dieses Instrument wird in Reihe mit einem Hochspannungswiderstand U benutzt, der bis zu 200 Megohm beträgt und aus Widerstandselementen besteht, welche ich an einer anderen Stelle demnächst zu beschreiben gedenke.

Die Messung. — Beschränkung ihres Bereiches.

§ 14. Vor der Ausführung der Messung wurde das Rohr durch einen mehrstündigen Betrieb auf eine befriedigende Konstanz gebracht; die Messung selbst wurde so gemacht, daß in jeder Stellung der Anode die Meßreihe solange hin- und zurück wiederholt wurde, bis eine Übereinstimmung vorlag. Aus der wiedergegebenen Tabelle 1a, S. 258, ist ersichtlich, daß das in einem befriedigenden Maße erreicht werden konnte. Die Tabelle enthält die einzelnen Ablesungen in derjenigen Reihenfolge, in welcher sie tatsächlich angestellt waren. Ich fing mit der hinteren Stellung der Anode A an, nahm daraufhin der Reihe nach die vordere und mittlere Stellung vor und kehrte dann wieder zu der hinteren Stellung zurück. Auch das wurde so lange wiederholt, bis die erste Beobachtungsreihe befriedigend mit der letzten übereinstimmte. Die vier in der Tabelle wiedergegebenen Meßreihen konnten, nachdem das Rohr sich eingelaufen hatte, glatt ohne Fehlmessung etwa im Laufe einer Stunde erledigt werden.

Die Strombelastung der Röhre, welche in der ersten Kolonne Tabelle 1b auf Milliampères umgerechnet ist, ist sowohl nach den großen wie auch nach den geringen Stromstärken zu begrenzt. Nach den großen Stromstärken zu infolge der durch die Erhitzung verursachten Gasabgabe, welche sich dahin äußert, daß das Gefälle abzunehmen beginnt. Ein Beispiel dafür sieht man in der zweiten Reihe; nachdem eine Stromstärke von 21,6 M.-A. durch das Rohr gegangen war, stellt sich für 18,0 M.-A. nicht mehr die sonstige konstante Ablesung 102, sondern nur der Wert 100 ein.

Nach den geringen Stromstärken zu ist aber die Messung begrenzt infolge des Auftretens von labilen Kurvenästen, wie ich sie schon vor Jahren beschrieben habe. Und zwar tritt im vorliegenden Falle die Labilität am ehesten — bereits bei einer Stromstärke von 10,8 M.-A. — bei der vorderen Anodenlage auf.

Das Meßergebnis.

§ 15. Zwischen den beiden genannten — sämtlichen in vorliegender Arbeit beschriebenen Versuchen gemeinsamen — Grenzen findet sich aber die lineare Verteilung des Gefälles längs der Achse so genau bestätigt, wie das bei dieser verhältnismäßig ungenauen Anordnung überhaupt erwartet werden kann. Tab. 2 enthält in der ersten Kolonne die Stromstärken, in der zweiten Kolonne die für die mittlere Anodenlage berechnete Spannung. Dabei ist die Berechnung so ausgeführt, daß die Spannung der vorderen Anodenstellung jedesmal von derjenigen der hinteren Anodenstellung abgezogen, dann halbiert und zu der Spannung der vorderen Anodenstellung addiert ist. Die dritte Kolonne enthält die tatsächlich beobachtete Spannung in der mittleren Stellung. Die Übereinstimmung zwischen den beiden letztgenannten Kolonnen ist befriedigend.

Ist die Anordnung verbesserungsfähig?

§ 16. Der Anwendung verschiebbarer Anoden im Hochvakuum sind leider infolge mehrerer Umstände ziemlich enge Grenzen gezogen. Zur Erzielung größerer Genauigkeit wäre vor allem die Vergrößerung der äußersten Anodenabstände erforderlich. Das begegnet aber erheblichen Schwierigkeiten, da dann die Röhre nicht nur glasbläserisch schwer herstellbar, sondern auch unhandlich werden würde. Bereits bei der von mir verwirklichten Länge läßt es sich nicht vermeiden, daß die Anode sich gelegentlich festklemmt und ihre Fortbewegung die größte Anforderung an die Geduld stellt.

Die Messung mit der verschiebbaren Anode ist selbstverständlich den in Abschnitt II, § 9, erörterten, sämtlichen Subtraktionsmethoden gemeinsamen Fehlern ausgesetzt. Eine besondere, nur der verschiebbaren Anode eigene Fehlerquelle ist aber die, daß bei dem zur Verschiebung der Anode erforderlichen Schütteln und Klopfen der Röhre unvermeidliche Staubeilchen in die Entladungsbahn geraten und eine zwar geringe, aber doch die Messung störende Gasabgabe verursachen. Aus allen diesen Gründen reichen die hier wiedergegebenen Meßreihen zwar hin, um den linearen Spannungsverlauf innerhalb erträglicher Fehlergrenzen nachzuweisen; für weitergehende Ansprüche an Genauigkeit dürfte man ohne die Anwendung von Sonden kaum auskommen.

IV. Temperaturmessung an der Anode.

Das Problem.

§ 17. Die Frage nach der Temperatur der Anode, besonders der Vergleich derjenigen Temperaturen, welche einer bestimmten gegebenen Strombelastung des Rohres, aber verschiedenen Stellungen der verschiebbaren Anode entsprechen, ist von einem grundsätzlichen Interesse. Ist nämlich einmal — beispielsweise an Hand der vorausgegangenen Messungen — erwiesen, daß das Gefälle linear längs der Entladungsachse verteilt ist, und hat man dann daraus sowie aus den früher von mir publizierten Messungen den Schluß gezogen (1, 2), daß in dem Entladungsgebilde eine Raumladung nicht besteht, so ist der weitere Schluß unvermeidlich, daß man es hier mit einer Elektrizitätsleitung zu tun hat wie sie in einem jeden raumladungsfreien dissoziierten Medium oder noch besser — angesichts der Abwesenheit einer elektrolitischen Abscheidung an den Elektroden — im Metall vorliegt. Ich habe schon im Jahre 1914 darauf hingewiesen (1), daß die gesamte, hier sehr erhebliche, in einem Querschnitt frei werdende Energie in Form von Wärme an die Gefäßwand im nämlichen Querschnitte abgegeben wird ähnlich wie die Joulesche in einem stromdurchflossenen Drahte erzeugte Wärme sich an der Drahtoberfläche der umgebenden Luft mitteilt. Schon die oberflächliche Betrachtung einer möglichst langen Entladungsröhre (es sind solche bis zu 1 m Länge hergestellt worden) lehrt in der Tat, daß eine durchaus gleichmäßige Erwärmung der Glaswand auf der ganzen Länge des Rohres auftritt. Die in dem Entladungsgebilde bestehende Bewegung ist also als eine durchaus ungeordnete aufzufassen, der sich die den Elektrizitätstransport besorgende Bewegung überlagert. Schneidet man einen beliebigen Teil der Entladungsbahn aus, indem man zwei beliebige Schnitte quer zur Röhrenachse legt, so wird dem herausgegriffenen Volumen an dem einen Querschnitte der gleiche Energiebetrag zugeführt, der an dem anderen Querschnitte abgeführt wird. Mit anderen Worten: es ist — ungeachtet des zwischen den genannten Querschnitten bestehenden recht erheblichen Gefälles — die durch den einen Querschnitt dem Volumen zugehende Energie der *geordneten* stromtransportierenden Bewegung gleich der am anderen Querschnitte in der gleichen

Form abgegebenen Energie. Diese Überlegung zeigt, daß die Erhitzung der Anode bei gleicher Strombelastung des Rohres vollständig unabhängig sein muß von der Länge der Entladungsbahn, und von der gesamten an der Röhre anliegenden Spannung, also beispielsweise von der Stellung, welche von einer verschiebbaren Anode in einer beliebig langen zylindrischen Bahn eingenommen wird.

Der experimentelle Nachweis, daß diese Schlußfolgerung zutrifft, würde aber auch umgekehrt einen hinreichenden Beweis für die Richtigkeit der Voraussetzungen bieten, aus welchem die Schlußfolgerung abgeleitet wurde. Also u. a. einen indirekten Beweis für den linearen Verlauf des Potentialgefälles, für die Raumladungsfreiheit, für die ungeordnete Bewegung im Entladungsgebilde und eine metallähnliche Leitung.

Die Anordnung.

§ 18. Das in Fig. 1 (S. 231) abgebildete Rohr enthält eine — im vorausgegangenen Abschnitt noch nicht erörterte — Anordnung zur Messung der Anodentemperatur. Der eine der beiden 2 mm starken zur Anode führenden Drähte *B* besteht ebenso wie derjenige Draht, auf welchem *B* gleitet, nämlich *D*, aus Konstantan, die entsprechenden Drähte *C* und *E* sind aus Kupfer. Die mit den Zahlen 1—6 bezeichnete Wippe ermöglicht es, die Anode entweder mit der Hochspannungsquelle *S* oder mit einem Voltmeter *T* von der für thermoelektrische Messungen üblichen Art zu verbinden, so daß jeden Augenblick die Entladung unterbrochen und die jeweils erreichte Anodentemperatur abgelesen werden kann.

Am Rohre der Fig. 1 konnte ein solcher Nachweis nicht erbracht werden. Es stellte sich nämlich heraus, daß die Wärmeleitung längs der Drähte *B*, *C*, *D*, *E* von der Anode *A* nach außen viel größer ist, wenn die Anode sich in einer größeren Entfernung von der Lampe befindet, als wenn sie näher daran liegt. Das war verursacht durch den in der erstgenannten Stellung bedeutend besser wärmeleitenden Kontakt zwischen den längs des Schlittens gleitenden Drähten und dem Schlitten selbst. So konnte beobachtet werden, daß die Abklingungszeit, welche zwischen zwei gegebenen Temperaturen verlief, in der hinteren Anodenlage zwei- bis dreimal kürzer war, als bei der vorderen Anodenlage. Demgemäß war auch die bei einer gewissen Stromstärke eintretende Erwärmung der Anode

in der der Lampe näheren Lage, also bei einer kürzeren Entladungsbahn, ganz erheblich größer als bei einer längeren Entladungsbahn. Nebenbei sei bemerkt, daß die Wärmestrahlung der Glühlampe auf die Anode zu vernachlässigen war, da die Glühlampe ebenso wie in Fig. 2 gezeichnet ausgeführt und so gestellt war, daß die Anode vom breiten Kupferrahmen der Lampe vollständig abgeschattet wurde.

Nachdem es sich erwiesen hatte, daß eine verschiebbare Anode für die Temperaturmessung nicht geeignet ist, wurde eine andere Versuchsanordnung zu diesem Zwecke ausgeführt. Die Röhre ist in der Fig. 2 dargestellt, während die elektrische

Fig. 2.

Anordnung genau dieselbe wie in Fig. 1 blieb. Die Röhre besteht aus einer Glaskugel, in deren Mitte die aus der Figur ohne weiteres ersichtliche Tantallampe *T* angeordnet ist. Die Glaskugel besitzt außerdem drei Verjüngungen, die mit größter Sorgfalt schlank verlaufend und so ausgeführt sind, daß ihre Gestalt möglichst gleich ist. An diese Verjüngungen sind drei zylindrische Glasröhren von gleicher Weite (18 mm) angeschlossen. Diese Röhren besitzen verschiedene Längen und tragen an ihren entgegengesetzten Enden je eine Anode. Die drei Anoden haben absolut gleiche Form. Ihre Stiele stecken in Quarzzwischenstücken *Q*, damit die Befestigungsstellen im Glas beim Ausglühen der Platten nicht gefährdet

werden. An den Anodenplatten sind in der aus der Figur ohne weiteres ersichtlichen Weise die für die Temperaturmessung bestimmten Kupfer- und Konstantandrähte befestigt.

Am kürzesten Ansatz ist die Anodenplatte um 50 mm von der Kugelerweiterung entfernt, so daß also der zylindrische Teil des Rohres zwischen Platte und Kugelkörper die genannte Länge hat. Am zweiten Ansatz beträgt diese Länge 255 mm. Am dritten, längsten Teil aber 530 mm.

Es war ursprünglich geplant, mit Hilfe der drei verschiedenen Längen die Verteilung des Potentialgefälles längs der Achse auch mit dieser Methode nachzuprüfen. Doch konnte wegen einer bei der Herstellung des Rohres untergelaufenen Versehens der längste Röhrenteil nicht in Betrieb genommen werden. Ich hoffe, in einer zweiten Publikation über derartige Messungen berichten zu können. Vor der Hand wurde nur an den zwei ersten kürzeren Röhren gemessen. Tab. 3a enthält die an diesen zwei Teilen vorgenommenen Ablesungen, während Tab. 3b die umgerechneten Werte sowie die mit Hilfe der Subtraktion der Spannungen bestimmte Charakteristik des zylindrischen Teiles bringt. Über die Zulässigkeit der Subtraktion in diesem Spezialfalle vergleiche man Abschnitt VI.

Die Meßergebnisse.

§ 19. Die Messungen der Temperatur der beiden Platten wurden bei drei verschiedenen Milliamperebelastungen des Rohres vorgenommen; nachstehende Tabelle A enthält die Ergebnisse. In der ersten Kolonne ist die Stromstärke in Milliampères, in der zweiten die gesamte Voltzahl, in der dritten die nach erreichtem stationären Temperaturzustand am Millivoltmeter gemessenen Millivolts des Thermoelementes angegeben.

Tabelle A.

Milliampere	Kürzeres Rohr		Längeres Rohr	
	Volt	Millivolt	Volt	Millivolt
10,0	2070	20,0	3960	18,6
13,4	2500	23,6	4620	22,0
15,0	2660	25,4	4970	23,8

Zur Orientierung über die Temperaturen selbst diene die Angabe, daß

13,	Millivolt	300° C
19,	„	400 „
25,	„	500 „
31,	„	600 „

entsprechen.

Aus der Tabelle ist zu entnehmen, daß die Erwärmung bei gleichen Milliamperezahlen mit Rücksicht auf die Fehlerquellen in beiden Fällen sehr nahe gleich genannt werden kann. Da das lange Rohr beinahe den doppelten Energiebetrag bei der Entladung verbraucht wie das kurze Rohr, so unterliegt es gar keinem Zweifel, daß das Plus an Energie im langen Rohre einfach in Form ungeordneter Bewegung an die Glaswand abgegeben wird.

Die vorhandene Abweichung der bei gleichen Strombelastungen beobachteten Temperaturen liegt insofern im umgekehrten Sinne, als die Anode im kürzeren, weniger Energie verbrauchenden Rohre sich etwas mehr erhitzt als in dem längeren, mehr Energie verbrauchenden. Das kann zum Teil an der Abschnitt II, § 10 erörterten, noch immer nicht genügend in den zylindrischen Teil zurückgezogenen Stellung der Anode liegen, wodurch sie dem Striktionskathodenstrahl oder der Wärmeübertragung seitens der besonders hoch erhitzten Glaswand der Verjüngung ausgesetzt ist. Zum Teil kann die geringe Differenz aber auch von einer kleinen, unvermeidlichen individuellen Abweichung in der Anordnung beider Anoden herrühren. Daß ein solcher Unterschied vorhanden war, ist aus der Bestimmung der Abklingungszeiten zu ersehen. Während die Zeit, welche erforderlich war, um einen Rückgang der Spannung des Thermoelements von 23,6 auf 19,6 Millivolt zu verursachen, beim längeren Rohre 45 Sekunden betrug, dauerte die Abklingung zwischen den nämlichen Temperaturgrenzen beim kürzeren Rohre 49 Sekunden. Dieser kleine Unterschied ist jedenfalls für einen Teil der in der Tabelle A enthaltenen Abweichungen verantwortlich.

V. Rohr mit zwei Anoden im nämlichen zylindrischen Teil.

Die Anordnung.

§ 20. Diese Möglichkeit, die Subtraktionsmethode zu verwirklichen, ist in Fig. 3 dargestellt. Das Rohr besteht,

wie immer, aus einem weiten, kugelförmigen, die Tantal-lampe *T* enthaltenden Teile *K* und einem zylindrischen Teile *Z*, der in diesem Falle 22 mm weit ist und an seinem Ende die ein für allemal festgemachte, plattenförmige Nickelanode *A* enthält, die so befestigt ist, daß sie beim Entgasen auf helle Rotglut erhitzt werden kann.

Fig. 3.

Das Eigenartige an diesem Rohre ist, daß unweit der Stelle, an welcher die Kugel in den zylindrischen Teil übergeht, in dem mit *SS* bezeichneten Querschnitt durch passendes Bewegen des Rohres eine lose Hilfsanode je nach Bedarf angeordnet oder entfernt werden kann. Diese Hilfsanode *H* ist während des Pumpprozesses an einem für diesen Zweck besonders vorgesehenen Haken *I* so aufgehängt, daß sie in die Lampenkugel hineinragt, also bei der Entladung mit Elektronen beworfen und so ausgeglüht werden kann. Nachdem die Röhre von der Pumpe abgeschmolzen ist, wird die lose Anode durch Neigen der Röhre vom Haken abgehängt und kann nun nach Belieben entweder, wenn die feste Anode *A* benutzt wird, irgendwo in der Lampenkugel liegen bleiben. Oder aber sie kann durch passendes Bewegen der Röhre so in ihren zylindrischen Teil *Z* hineingesenkt werden, daß die aus dünnem Platindraht bestehenden 15 mm von der Erweiterung zur Kugel angebrachten Häkchen *S* in die kreisförmige

Rille *B* der Hilfsanode hineingreifen. Diese Rille und der überstehende Rand der Quarzplatte *Q* gewährleisten eine gut zentrierte Stellung der Hilfsanode im Rohre *Z*. Die Entfernung der beiden Anoden beträgt dabei 595 mm.

Vorzüge und Mängel der Anordnung.

§ 21. Diese Art, die Subtraktionsmethode zu verwirklichen, teilt mit der Methode der verschiebbaren Anode nach Fig. 1 den Vorteil, daß nur eine einzige, allen Strombahnen gemeinsame Verjüngung vorhanden ist (§ 29), besitzt aber nicht manche ihrer Nachteile. Denn man ist hier durch keinerlei technische Schwierigkeiten darin beschränkt, dem zylindrischen Rohrteil eine beliebige Länge zu geben. Auch leidet man in diesem Falle nicht unter den Stäubchen, die bei der umständlichen Anordnung der Fig. 1 besonders dann in die Entladungsbahn geraten, wenn die Anode sich festklemmt und das Rohr geschüttelt werden muß, um sie fortzubewegen. Freilich gestattet es diese Methode nicht, die Messung innerhalb eines einzigen zylindrischen Teiles in drei verschiedenen Anodenstellungen auszuführen und somit die Verteilung des Gefälles zu messen. Für diesen Zweck müßte die Methode noch weiter ausgebaut werden, oder aber man müßte sie durch Messungen an zwei verschiedenen Ansätzen ähnlich der Fig. 2, S. 237, ergänzen.

Als Fehlerquelle der Anordnung nach Fig. 3 ist hingegen der Umstand hervorzuheben, daß das aus drei Platindrähten bestehende Gerüst *SS* in der Strombahn liegt und möglicherweise als Einengung oder durch seine Aufladung dahin wirkt, daß der Spannungsabfall sich erhöht. Irgendwelche Anzeichen in Form von Fluoreszenz oder Erhitzung, daß an dieser Stelle tatsächlich ein bedeutender Abfall stattfindet, fehlen aber.

Die Meßergebnisse.

§ 22. An dem ersten gegenwärtig vorliegenden Exemplar der Röhre nach Fig. 3 war die Subtraktionsmethode nicht anwendbar, weil die Einengung *E* zu eckig verläuft. Ferner, weil die vordere, durch die Platinhäkchen *S* gegebene Lage der Hilfsanode — wie in Abschnitt II erörtert — zu nahe an der Einengung liegt. Dessen ungeachtet sind die mit diesem Rohr vorgenommenen Messungen von Interesse. Denn die einfache Klemmspannungsmessung an der festen Anode in der Fern-

lage, wie sie in Tab. 4 wiedergegeben ist, liefert bei dem zurzeit benutzten Rohrexemplar das quadratische Gesetz. Es werden hier die an beiden Anoden gewonnenen Meßreihen mitgeteilt; sie sollen demnächst durch Beobachtungen an einer verbesserten Form des Rohres ergänzt werden.

VI. Die Charakteristiken.

Darstellungsweise der Diagramme.

§ 23. In den Diagrammen der Figg. 4, 5, 6 und 8 sind die an den verschiedenen vorbeschriebenen Röhren beobachteten Funktionen so dargestellt, daß auf der Abszissenachse die Logarithmen der abgelesenen (nicht der in Milliampere umgerechneten!) Stromstärke, auf der Ordinatenachse die Logarithmen der Spannung aufgetragen sind. Die Werte auf der Abszissenachse sind für alle Kurven des nämlichen Diagramms dieselben. Hingegen sind die Kurven um willkürliche Beträge parallel zur Ordinatenachse verschoben. Es kommt hier ausschließlich auf die Kurvenform und nicht auf die Lage der Kurve im Koordinatensystem an; die gewählte Anordnung war erforderlich, um zueinandergehörende Kurven in einer gemeinsamen Figur so unterzubringen zu können, daß ihr Vergleich auf den ersten Blick möglich ist.

Das Gesetz.

§ 24. Die Logarithmierung der beiden Variablen wurde in der Voraussetzung ausgeführt, daß — gemäß meinen älteren Erfahrungen — die Stromstärke im allgemeinen eine lineare Funktion einer Potenz der Spannung ist

$$i = a \cdot v^n + b,$$

wobei b bei einigermaßen bedeutenden Werten der Variablen vernachlässigt werden kann. Manchmal besitzt die Charakteristik verschiedene Zweige, die mit einem scharfen Knick ineinander übergehen, so daß einem jeden der Zweige ein anderer Wert des n entspricht.

Aus verschiedenen, bereits erwähnten Gründen ist der mit Hilfe der Subtraktionsmethode sich erforschen lassende Bereich erheblich beschränkter als der der Sondenmessung zugängliche. Es ist aber bemerkenswert, daß, soweit der enge Meßbereich es zu beurteilen gestattet, die Kurven tatsächlich sich der angegebenen Gesetzmäßigkeit fügen. Der

Exponent n jeder einzelnen Kurve ist auf zwei Dezimalen genau neben der Kurvennummer direkt über jedem einzelnen Linienzuge angegeben.

Aus meinen gesamten Erfahrungen folgt, daß dieser Exponent sich um so mehr dem Wert 2 nähert, je sorgfältiger das Vakuum hergestellt wird. Ferner, je einwandfreier die Röhrenform ist. Das heißt, für direkt gemessene, nicht durch Subtraktion korrigierte Charakteristiken wird der Wert 2 mit einer um so größeren Annäherung erreicht, einen je größeren Teil der Gesamtspannung die zylindrische Entladungsbahn aufnimmt, also — gleichen Querschnitt vorausgesetzt — je länger der zylindrische Röhrenteil ist. Unter Anwendung der Subtraktionsmethode aber ist eine um so größere Annäherung an den Wert 2 zu erwarten, je tiefer die Nahlage der Anode in dem zylindrischen Teile angeordnet ist und selbstverständlich wieder je länger dieser zylindrische Teil ist.

Diskussion der Diagramme.

Rohr Fig. 1.

§ 25. In der Fig. 4 sind die Charakteristiken des Rohres mit verschiebbarer Anode nach Fig. 1 dargestellt. Die Kurve I

Fig. 4.

entspricht der Nahlage, II der Fernlage, III der mittleren Lage der Anode. III und II verlaufen durchweg geradlinig, während bei I entsprechend der unmittelbaren Nachbarschaft der Einengung die Punkte geringerer Stromstärken von der Geraden abweichen. Der Exponent n ist in allen drei Fällen 172–173. Wegen der verhältnismäßig geringen Länge des Rohres dürfte eine größere, Ausführung der Subtraktion ermöglichende Genauigkeit nicht gefordert werden.

Rohr Fig. 2.

Fig. 5 bringt die Charakteristiken des Rohres mit mehreren zylindrischen Ansätzen nach Fig. 2. Es entspricht hier Kurve I der weiter entfernten, Kurve II der näher gelegenen Anode. An diesem Rohr habe ich die Subtraktion ausgeführt. Die naheliegende Anode steckt ziemlich weit im zylindrischen Teile und insoweit erscheint die Subtraktion berechtigt. Freilich weiß man nicht, ob die einzelnen Verjüngungsstellen nicht doch — ungeachtet tunlich gleicher Formgebung — Unter-

Fig. 5.

schiede im Spannungsabfall bedingen, welche die Subtraktion unzulässig machen (vgl. hierüber Abschnitt VII, § 29). Läßt man das zunächst dahingestellt sein, so sieht man, daß die durch die Subtraktionsmethode gewonnene, mit III bezeichnete Charakteristik des zylindrischen Teiles mit ihrem Exponenten von 1,86 sich erheblich mehr der zu erwartenden quadratischen Funktion nähert, als die Kurven der Fig. 4. Es sei hier wiederholt darauf hingewiesen, daß dieses Rohr schon unter Berücksichtigung neuerer Erfahrungen gebaut wurde und besonders die Verjüngung eine möglichst schlank verlaufende Form in der in Fig. 2 angedeuteten Weise erhalten hat. Das prägt sich hauptsächlich in einem verhältnismäßig geringen Spannungsabfall bei der Nahlage (vgl. § 29) aus.

Rohr Fig. 3.

In Fig. 6 ist die Charakteristik des Rohres mit einer festen und einer frei bewegten Anode nach Fig. 3 wiedergegeben.

I gibt die Charakteristik der vollen Rohrlänge, welche in diesem Falle *genau eine quadratische Funktion* ist. Die Nahlage der Anode ist bei diesem Modell, wie bereits hervorgehoben, zu wenig in den zylindrischen Röhrenteil zurückgezogen; außerdem ist die Form der Einengung eine sehr

Fig. 6.

eckige. Diese beiden Umstände verhindern die Gewinnung glatt reproduzierbarer Messungen bei der Nahlage der Anode, während im Gegenteil in der Fernlage befriedigende Übereinstimmungen erzielt werden. In der Tab. 4 sind die Grenzen angegeben, zwischen denen die Meßreihen der Spannung sich zu bewegen pflegen. Von den Aufzeichnungen einer logarithmischen Charakteristik für die Nahlage ist naturgemäß abgesehen worden, folglich auch von der Anwendung der Subtraktionsmethode zwecks Gewinnung der Charakteristik des zylindrischen Teiles. Ich bin aber der Meinung, daß — geeignete Ausführung vorausgesetzt — diese Konstruktion eine besonders vorteilhafte Anwendung der Subtraktionsmethode ermöglichen wird.

VII. Der Grenzwert des Gefälles.

Vergleichende Zusammenstellung der Zahlen.

§ 26. Ich habe im Jahre 1910 (1) sowie 1914 (2) ein umfangreiches Beobachtungsmaterial zusammengestellt, aus welchem hervorging, daß die für die Aufrechterhaltung einer bestimmten Stromdichte erforderliche Spannung von der Gestalt und Weite der Röhren unabhängig ist und sich mit fortschreitender Luftleere einem Grenzwerte zustrebt, welcher in dem mit technisch zugänglichen Mitteln herstellbaren Hochvakuum bereits mit großer Annäherung erreicht ist. Aus den damals angegebenen

Zahlen läßt sich das Gefälle berechnen, welches in dem gedachten Grenzfalle für eine bestimmte Stromstärke in den hier beschriebenen Röhren stattzufinden hätte. Es wurde seinerzeit gefunden, daß für 10 M.-A. in einem Rohre, dessen lichte Weite etwa 10,5 mm war, zwischen zwei um 80 mm voneinander entfernten Sonden ein Spannungsabfall von 405 Volt bestand. Beachtet man die lineare Verteilung des Potentialgefälles längs der Achse und die von mir 1910 angegebene und experimentell bestätigte Beziehung¹⁾, daß bei gleicher Stromstärke das Gefälle umgekehrt proportional der lichten Weite ist, so ergibt sich zunächst, daß bei einer Stromstärke von 10 M.-A. das Gefälle in einem Rohre von 10 mm lichter Weite auf die Länge von 10 mm 405 Volt beträgt. Die Rechnung liefert ferner für die in vorliegender Arbeit benutzten lichten Weiten die in der dritten Kolonne der folgenden Tabelle B angeführten Werte des Spannungsabfalles für je 10 mm Rohrlänge. Die vierte und fünfte Kolonne enthält die entsprechenden, tatsächlich beobachteten Werte des Gefälles, wobei unter „alt“ die zur Zeit der Fertigstellung vorliegender Veröffentlichung beobachteten Werte, unter „neu“ die an verbesserten Röhrenformen in der Zeitspanne zwischen der Abfassung der Publikation und ihrer Korrektur gefundenen Zahlen aufgeführt sind.

Tabelle B.

Rohrtype	Lichte Weite mm	Volt cm berechnet	Volt cm beobachtet	
			alt	neu
Fig. 2	18	78	94	—
" 3	22—23	64—60	69—70	55,5
" 1	23	60	51,5	—

Bemerkungen zu der Tabelle B.

§ 27. Es ist vor allem zu beachten, daß die Bestimmung der lichten Weite langer, von freier Hand gezogener Glasröhren von vornherein einem Fehler von etwa 5 Proz. — in ungünstigen Fällen mehr — unterworfen ist. Ferner, daß die früheren

1) Diese Beziehung ist eine einfache Folgerung aus der Tatsache, daß die Charakteristik lediglich durch die Stromdichte bestimmt ist und der anderen Tatsache, daß die Stromstärke dem Quadrat der Spannung proportional ist (§ 24).

Messungen, aus welchen die in der zweiten Kolonne angegebenen Werte berechnet wurden, vermutlich bei einem höheren Vakuum als die Messungen dieser Arbeit ausgeführt waren. Während ich gegenwärtig an von der Pumpe abgetrennten, in Luft frei aufgehängten Röhren arbeitete, sind die Werte der früheren Publikationen in Verbindung mit Luftpumpe und mit in flüssiger Luft beziehungsweise flüssigem oder festem Wasserstoff tauchendem Absorptionskohlegefäß gemacht worden, vielfach, indem die Wände der Entladungsbahn ebenfalls in flüssiger Luft gekühlt waren. Demgemäß wäre zu erwarten gewesen, daß die Spannungswerte vorliegender Arbeit bedeutend geringer ausfallen würden als diejenigen der früheren Untersuchungen. Wenn das zum Teil nicht zutrifft, so liegt es wohl an den bereits erwähnten Mängeln der ersten hier benutzten Röhrenexemplare.

Es ist beispielsweise in dem Rohr nach Fig. 2 eine Fehlerquelle darin enthalten, daß die zu den verschiedenen Anoden führenden Verjüngungsstellen nicht in genau der gleichen Form geblasen werden können und auch darin, daß man keine Gewähr dafür hat, daß die Aufladung der Glasoberfläche an jeder Verjüngungsstelle sich in der gleichen Weise ausbildet.

Ferner ist am Rohre Fig. 3 beim alten Exemplar die Anode in der Nahlage dicht an der sehr ungünstig geformten, weil steil verlaufenden Verjüngungsstelle angebracht gewesen (vgl. §§ 20 und 22), was den in § 10 erörterten Mangel bedingt. In der Tat ist an einem neuen Rohrexemplar dieser Type, bei welchem die Nahlage der Anode erheblich weiter (um 10 cm) von der diesmal sehr allmählich verlaufenden Erweiterung der Kugel entfernt war und die Entfernung der beiden Anoden 60 cm betrug, der unter „neu“ wiedergegebene Wert beobachtet worden. Die an diesem neuen Rohr gefundenen Beobachtungsreihen selbst sind der bei der Korrektur nachgefügteten Tab. 6 zu entnehmen. Man sieht, daß an dieser Röhrentype tatsächlich — wie erwartet — niedrigere Gefälle gemessen wurden. Diese Röhrentype verkörpert wohl die beste Art und Weise, die Subtraktionsmethode zu verwirklichen.

Vergleich der Werte der Tabelle B.

§ 28. Obwohl von einer Übereinstimmung der beobachteten Werte mit den berechneten im eigentlichen Sinne des Wortes nicht gesprochen werden kann, so ist doch bemerkenswert, daß alle beobachteten Werte in naher Umgebung um die be-

rechneten herumliegen. Vergegenwärtigt man sich ferner, daß die Versuchsbedingungen — besonders diejenigen der Herstellung des Vakuums — die im vorigen Paragraphen angeführten Unterschiede aufwiesen, daß die Meßmethoden grundverschieden waren und daß man einen Teil der in vorliegender Arbeit beobachteten Werte als durch nebensächliche Umstände (§ 10) zu hoch gegriffen bezeichnen kann, so ist mit großer Wahrscheinlichkeit zu erwarten, daß die Subtraktionsmethoden in ihrem weiteren Ausbau das Vorhandensein des mit der Sondenmessung im Jahre 1910 und 1914 ermittelten Grenzwertes und auch die quadratische Charakteristik mit einer größeren als der bei diesen ersten Versuchen erreichten Genauigkeit zu bestätigen imstande sein werden. Die kurz vor der Korrektur vorgenommene, unter „neu“ angeführte Messung sowie Tab. 6 lassen diese Vermutung gerechtfertigt erscheinen. Es wird also voraussichtlich auch mit Hilfe der Subtraktionsmethoden möglich sein, die durch den Grenzwert des Gefälles gegebene Naturkonstante als vorhanden nachzuweisen und wenigstens in erster Annäherung zu bestimmen. Insofern ist es wünschenswert, daß diese Methoden weiter ausgebaut werden, wenn ich auch nach wie vor der Ansicht bin, daß die genaue und vollständig befriedigende Bestimmung des Grenzwertes des Gefälles nicht anders als mit Hilfe der Sondenmessung in der in meinen früheren Publikationen beschriebenen Weise ausgeführt werden kann.

Spannungsabfall an Verjüngungen verschiedener Form.

§ 29. Besonders für die Beurteilung, inwiefern die Ausführung der Subtraktionsmethode an einem Rohr gemäß Fig. 3 zulässig ist, aber auch, um sich ein Urteil über die Subtraktionsmethoden überhaupt zu bilden, ist es von Interesse, auf den an Verjüngungen verschiedener Form auftretenden, von Fall zu Fall recht verschiedenen Spannungsabfall näher einzugehen.

Im allgemeinen ist der Spannungsabfall um so größer, je steiler die Übergangsstelle geformt ist. Diese Formgebung war in ausgeprägtestem Maße bei dem Rohre nach Fig. 3 in seiner ersten Ausführung verwirklicht; hier war der Spannungsabfall bis zur Nahlage der Anode bei 10 M.-A. 2970—3100 Volt. Im Gegensatz dazu war bei dem Rohre nach Fig. 2 die Gestalt der Verjüngung eine besonders günstige schlanke. Entsprechend betrug der Abfall bei 10 M.-A. nur 1980 Volt, trotz-

dem bei diesem Rohre die lichte Weite von 18 mm geringer war als diejenige des Rohres nach Fig. 3 (22—23 mm) und ferner trotzdem im Rohre nach Fig. 2 die Anode in der Nahlage erheblich weiter von der Verjüngungsstelle entfernt war (50 mm) als im Rohre nach Fig. 3 (25 mm). Der Einfluß der Formgebung ist eben sehr viel größer als derjenige der anderen, immerhin schon recht nennenswerten Abweichungen. Schließlich ist beim Rohr nach Fig. 1, das seiner Gestalt nach die Mitte zwischen den beiden vorgenannten Röhren hält, der Abfall bis zur Nahlage der Anode bei 10 M.-A. 1920 Volt, wobei noch zu berücksichtigen ist, daß die lichte Weite größer und die Entfernung der Anode in der Nahlage bedeutend geringer war als bei dem Rohre nach Fig. 2.

VIII. Charakteristiken einer Hochvakuum-Ventilröhre.

Die Fragestellung.

§ 30. Im Gegensatz zu meinen, die Erkenntnis der Vorgänge in unendlicher Entfernung von der Anode innerhalb der zylindrischen Bahn anstrebenden Versuchen führen zahlreiche Arbeiten anderer Forscher Messungen zwischen Glühdraht und einer nahe ihm gegenüber gelegenen Anode aus. Es ist von Interesse, darauf einzugehen, wie die Frage der Charakteristik und der Konstanz bei solchen Anordnungen liegt, denn erst ein derartiger Einblick macht es möglich, sich ein Urteil über die hier mitgeteilten Resultate zu bilden.

Gegenwärtig scheint von vielen Seiten die Physik der Hochvakuumladung kurz und bündig dahin verstanden zu werden, daß das Dreihalbe Gesetz ein notwendiges und hinreichendes Kriterium für das Vorhandensein höchsten Entlüftungsgrades sei. Und zwar gemäß den ersten Arbeiten von Langmuir unabhängig von jeder besonderen Röhren- und Elektrodenform.

Demgegenüber ist zunächst einmal — ohne auf die theoretische Berechtigung der Langmuirschen Behauptung einzugehen — an Hand der vorliegenden Literatur folgendes zu betonen. Nur in den ersten Langmuirschen Veröffentlichungen (6) sind Messungen zu finden, die an einer anderen Anordnung angestellt worden sind als an dem aus theoretischen Gründen klassischen Falle, bei welchem die Anode ein Zylinder ist, in dessen Achse der Glühdraht ausgespannt ist. Während

nun aber in diesem klassischen Falle tatsächlich auch meiner Erfahrung nach das Dreihalbe Gesetz sich meistens bestätigt findet, und zwar bereits bei Entlüftungsgraden, die noch bei weitem nicht dem höchsten erreichbaren Vakuum entsprechen, hat Langmuir bei einer wesentlich von der klassischen abweichenden Anordnung ein Ergebnis erhalten, welches *nicht* als Bestätigung des Dreihalbe Gesetzes angesprochen werden kann. Langmuir führt seine abweichende Beobachtung auf den zufälligen Mangel an genügendem Vakuum zurück. Er und seine Mitarbeiter haben aber seit jener Zeit meines Wissens andere Ergebnisse als die mit der konaxialen Anordnung erlangten nicht veröffentlicht.

Nun liegen aber die Dinge meiner Erfahrung nach so, daß, wenn man die Elektronen von der Glühkathode aus nicht entweder divergieren oder parallel verlaufen läßt, das Dreihalbe Gesetz durchaus nicht immer erfüllt ist. Es erscheint mir deshalb sicher unzulässig, einen jeden Mißerfolg des Dreihalbe Gesetzes bei anderen als bei den Langmuirschen Anordnungen bestätigt zu finden, einfach damit abzutun, daß sekundäre Umstände (z. B. ungenügendes Vakuum) daran schuld seien.

Im folgenden werden Messungen mitgeteilt, aus denen sich klar ergibt, daß das Dreihalbe Gesetz und extremes Hochvakuum keinesfalls unbedingt miteinander verkettet sind. Es gelingt in ein und derselben Anordnung, das Dreihalbe Gesetz zu beobachten bei einem nicht sehr weit vorgeschrittenen Vakuum, dann aber nach Erreichung des höchsten Entlüftungsgrades eine davon recht abweichende Charakteristik. Während das quadratische Gesetz mit einer um so größeren Annäherung erfüllt ist, je höher das Vakuum, trifft das für das Dreihalbe Gesetz durchaus nicht bei jeder beliebigen Anordnung zu.

Die Röhre.

§ 31. Die Messungen, die ich zum Nachweis dieses Sachverhaltes hier anführen will, sind an einem Rohre gemäß Fig. 7 vorgenommen.¹⁾ Es ist dies ein Ventilrohr, wie es für die Verriegelung höchster Spannungen von mir in mehreren

1) Die Messungen wurden nicht besonders für den Zweck der vorliegenden Publikation ausgeführt, sondern sie geben Beobachtungen wieder, die ich im Laufe der Zeit für mehr technische Studienzwecke

Exemplaren hergestellt wurde. Der ursprüngliche Anwendungszweck des Rohres war, die Glühlampentemperatur auf einen derartigen Wert einzustellen, daß unabhängig von der Spannung stets ein vorgegebener Sättigungsstrom durch die Röhre floß. Dementsprechend mußten die Anoden in der aus der Figur ohne weiteres verständlichen Weise mit dicken, wärmeableitenden Kupferstäben und Radiatoren ausgestattet werden, um die beträchtlichen freiwerdenden Wärmemengen abzuführen

Fig. 7.

zu können. Die Anodenplatten haben einen Durchmesser von 50 mm. Die Glühdrahtwindungen liegen in der Symmetrieebene zwischen den Anoden, damit der Draht von einer statischen Beeinflussung nicht zerrissen werden kann. Deshalb ist die Glühlampe in Fig. 7 nur im Profil zu sehen. ihre Ausführung ist aber genau dieselbe wie die aus der Aufsicht Fig. 2 ersichtliche. Der Glühlampenhals ist entsprechend den hohen, zu verriegelnden Spannungen 400 mm lang. Das Rohr arbeitet vollständig befriedigend und verriegelt effektive Wechselspannungen von 80—100 Kilovolt auf die Dauer vollständig. Es ist 1500 Stunden in Betrieb gewesen, ohne daß die geringste

ausgeführt habe. Daraus erklärt sich, daß nicht immer in denselben Stromstärkegebieten gearbeitet wurde, sondern daß die Meßgebiete nur zum Teil ineinandergreifen. Für die Beurteilung der Gesetze ist das aber ohne jeden Belang.

Änderung (Zerstäubung!) aufgetreten wäre. Daraus ist zu ersehen, daß das Vakuum als ein sehr hohes bezeichnet werden kann.

Die Charakteristiken.

§ 32. Bei den Versuchen wurde der Glühdraht so hoch geheizt, daß der Sättigungsstrom weit über 100 Milliampere lag. Die mit dem Rohr an stehender Gleichspannung aufgenommenen Charakteristiken sind aus den Tabellen 5a und 5b zu ersehen. Sie sind in der nämlichen Weise wie die in Abschnitt VI behandelten Charakteristiken logarithmiert in Fig. 8

Fig. 8.

wiedergegeben. Diagramm I ist nach der ersten Evakuierung der Röhre aufgenommen, nach welcher die Röhre bereits vollständig befriedigend als Ventil arbeitete, also vom Gesichtspunkte des Kriteriums der Undurchlässigkeit des Vakuums für die Hochspannung als hochevakuiert bezeichnet werden konnte. Man sieht, daß das Dreihalbengesetz mit großer Annäherung ($n = 1,48$) erfüllt ist. Die absoluten Werte der Spannungen sind aber, wie aus der Tabelle entnommen werden kann, im Vergleich mit den späteren Messungen, niedrig.

Das nämliche Rohr wurde nun zum zweiten Male evakuert, da erfahrungsgemäß nach einer wiederholten Evakuierung ein höheres Vakuum sich einzustellen pflegt. Alle übrigen Diagramme sind mit der Röhre in diesem Zustande aufgenommen. Zuerst das Diagramm II, welches ungeachtet des bedeutend besseren Vakuums mit seinem Exponenten $n = 1,66$ weit

mehr vom quadratischen Gesetz abweicht, als das Diagramm I. Das im Vergleich mit I höhere Vakuum ist hauptsächlich daran zu erkennen, daß bei II die der nämlichen Stromstärke entsprechenden Spannungen ungefähr das Doppelte betragen.

Diagramm III enthält die mehrere Wochen später aufgenommene Charakteristik bei höheren Stromwerten, der Exponent $n = 1,46$.

Mehrere Tage später wurde das Diagramm IV aufgenommen. Die absoluten Werte der Spannung sind merklich größer als im Diagramm III, wenn auch der Unterschied bedeutend geringer ist als zwischen I und III. Demnach ist das Vakuum auf keinen Fall schlechter geworden, sondern wahrscheinlich besser. Der Exponent n ist in diesem Falle aber 1,57, weicht also vom Dreihalbengesetze bedeutend mehr ab als der von dem sicher bei viel schlechterem Vakuum aufgenommenen Diagramm I und auch mehr als der des Diagramms III, obwohl auch bei letzterem das Vakuum eher schlechter als besser war.

Auffallenderweise war die unter IV gegebene Charakteristik nicht die einzige, welche beobachtet werden konnte. Es stellte sich ebenso häufig in Zeitabständen von wenigen Sekunden beim Aus- und Einschalten des Rohres eine andere Charakteristik ein, die durch die Gerade V mit dem Exponenten 1,31 wiedergegeben ist. War eine der beiden Charakteristiken aber einmal eingestellt, dann konnten in beiden Fällen gleich gut übereinstimmende Meßreihen erzielt werden. Ich nehme mit großer Wahrscheinlichkeit an, daß der Unterschied der beiden Charakteristiken dadurch bedingt war, daß es bei dem Rohr Fig. 7 der Entladung freigestellt ist, verschiedene Bahnen zu wählen. Vermutlich liegt die Sache so, daß bei der einen der Charakteristiken die Entladung ziemlich direkt von der Glühlampe nach den Anoden übergeht und gar nicht oder verhältnismäßig wenig die Glaswände berührt. Bei der anderen Charakteristik nimmt die Entladung aber einen größeren Querschnitt ein, so daß sie ausgiebig die Glaswände bespült. Je nachdem, wie die Aufladung der Glaswand zufällig stattfindet, wird die eine oder die andere Charakteristik von der Entladung befolgt. Gestützt wird diese Auffassung durch einen durch die Gerade VI dargestellten Versuch, bei welchem die eine Anodenplatte entweder vollständig ohne Zuleitung gelassen oder mit der Glüh-

lampe verbunden wurde, so daß nur eine Platte als Anode wirksam war. Bei einer solchen Arbeitsweise ist es unvermeidlich, daß die Entladung ausgiebig mit der Glaswand in Berührung kommt. Es stellt sich hier tatsächlich für den Exponenten genau der nämliche Wert ein wie bei V, nämlich 1,81

Allgemeine Folgerung.

§ 33. Daraus ergibt sich in absolut einwandfreier Weise, daß im nämlichen, wenn auch extrem hohen Vakuum je nach der Beschaffenheit der Entladungsbahn ganz verschiedene Gesetzmäßigkeiten bestehen können. Man erkennt auch hieraus, wie berechtigt das in meinen Arbeiten verfolgte Bestreben ist, nur in „unendlicher Entfernung von den Elektroden“ und nur in einer definierten zylindrischen Bahn zu beobachten. Es ist in der Tat nicht möglich, den Gegenstand der Untersuchung anders als in dieser Weise eindeutig zu definieren.

Bedenkt man ferner, daß das Dreihalbesetz mit größter Annäherung im Falle I, also bei verhältnismäßig schlechtestem Vakuum erfüllt war, so sieht man ein: *Das Dreihalbesetz ist keineswegs ein notwendiges und hinreichendes Kriterium für das Bestehen höchster Entlüftungsgrade.* Es gibt eine ganze Anzahl von Werten für den Exponenten der Spannung, die sich in Wirklichkeit zum mindesten nicht weniger häufig als das Dreihalbesetz einzustellen pflegen. Nur ein besonderer Fall, in welchem meine Erfahrungen aber nicht weit genug reichen, könnte hiervon ausgenommen sein. Nämlich die Langmuirsche konaxiale Anordnung, als deren Spezialausführung vielleicht der Versuch von Germershausen (11) angesehen werden kann, bei welchem die Elektronenbahnen parallel verlaufen. Für derartige Anordnungen geht meine Kenntnis nur so weit, daß ich mit Bestimmtheit angeben kann, daß hier das Dreihalbesetz schon bei verhältnismäßig hohem Gasdrucke in großer Annäherung besteht.

IX. Isolatoren und Hochvakuumentladung.)

Bekannte Beobachtungen.

§ 34. Dem Verhalten von Isolatoren unter dem Aufprall von Elektronen im Hochvakuum ist bisher wenig Beachtung

1) Es ist für alle geschilderten Beobachtungen unerläßliche Bedingung, daß die Entladungsbahn von Isolatoren umgeben sei, Metallbelege — beispielsweise solche, die sich durch Zerstäubungen zu bilden pflegen — bringen außerordentliche Fehlerquellen mit sich und stören die Beobachtungen aufs empfindlichste.

geschenkt worden. Tatsächlich kann in jedem, noch so hoch evakuierten Glühkathodenrohr, wenn es die geometrische Anordnung nur irgendwie zuläßt, die Glaswand durch Elektronenaufprall nicht nur zur intensiven grünen Fluoreszenz erregt, sondern auch bis auf Schmelztemperatur erhitzt werden. Die nämliche Glaswand fluoresziert rot (1), nach Ermüdung blauviolett, wenn sie mit dem raumladungslosen Entladungsgebilde in Berührung gebracht wird. Es tritt auch dabei eine intensive Erhitzung des Glases ein. Das Hochvakuum verhindert es also keinesfalls, daß der Isolator die ihm zugeführte Ladung irgendwie abgibt, ganz ohne daß eine Ionisation sich bei dem Ausgleich der Ladungen beteiligen würde. Ich habe seit Anfang 1914 des öfteren (12, 13, 14) auf diesen Umstand hingewiesen und darauf aufmerksam gemacht, daß eine Aufladung der Glaswand keinesfalls an der Abwesenheit der grünen Fluoreszenz gegenüber dem Brennfleck der Hochvakuum-Röntgenröhren verantwortlich gemacht werden kann, wie das wiederholt von Coolidge und seinen Mitarbeitern mit einer gewissen Selbstverständlichkeit behauptet wird.¹⁾

Ein neuer Versuch.

§ 35. Ein hübscher Versuch, der es beweist, daß selbst der beste, hitzebeständige Isolator, nämlich Quarz, sich nicht annähernd auf ein Potential aufladen läßt, welches den weiteren Aufprall der Elektronen verhindern würde, ist in Fig. 9 dargestellt. Es ist dies nichts anderes als eine Röntgenröhre meiner Konstruktion, bei welcher an Stelle der Antikathode eine auf langem Quarzstiel isoliert befestigte Quarzplatte an-

Fig. 9.

1) Auf diesem Wege ist von mir Anfang 1914 zum ersten Male auf das Vorhandensein einer Doppelschicht im Brennfleck von Röntgenröhren geschlossen worden.

geordnet ist. Es ist selbst im höchsten herstellbaren Vakuum möglich, diese Quarzplatte auf jede beliebige Temperatur zu erhitzen, wenn zwischen Glühlampe *G* und Lochkathode *K* eine Entladung eingeleitet wird. Dem bestehenden Sprachgebrauch nach würde man die Erscheinung so beschreiben, daß in der Öffnung der Lochkathode ein Striktionskathodenstrahl entsteht, welcher auf den Quarz aufprallt. Daß aber die Quarzplatte sich nicht im ersten Moment der Entladung auflädt und dann die nachfolgenden Elektronen abstößt, das ist eine Tatsache, die nur durch die Annahme einer positiven, die negative Aufladung ausgleichenden Ladung erklärt werden kann.

Die Beziehung zum Hauptthema.

§ 36. Jedenfalls verdienen die in der vorliegenden Arbeit behandelten Erscheinungen im zylindrischen Teile von Glasröhren auch von dem Gesichtspunkte des Verhaltens der Isolatoren im Hochvakuum aus behandelt zu werden. Tatsächlich bringt der Versuch mit der Quarzplatte den Beobachter auf den Gedankengang (§ 4), demzufolge Langmuir meinen Versuchen ein hinreichendes Vakuum absprechen wollte. Und es sind sicherlich nicht die Gasreste dafür verantwortlich, wenn die von mir verwendeten engen Glasröhren sich selbst im Badeflüssiger Luft, bei deren Temperatur sie besonders gut isolieren, nicht aufladen und einen fernerer Entladungsdurchgang nicht versperren, wenn ferner in der Hochvakuumröntgenröhre eine Aufladung der Glaskugel und in dem Versuch mit der Quarzplatte eine Aufladung der letzteren nicht stattfindet.

X. Zusammenfassung.

A. Es wird für die Untersuchung der Hochvakuumentladung in zylindrischen Entladungsbahnen an Stelle der früher von mir benutzten Sondenmessung die Subtraktionsmethode in drei verschiedenen konstruktiven Ausführungen an von der Pumpe abgeschmolzenen Röhren angewandt. Nach gegenwärtigem Stande der Ergebnisse kann das Gesetz der linearen Verteilung des Potentialgefälles längs der Entladungsachse als durch die Subtraktionsmethode neu erwiesen angesehen werden.

B. Die neuen Versuche ergeben eine erhebliche Annäherung an das quadratische Gesetz, obwohl die Apparate für die Aufnahme ganz genauer Charakteristiken nach der Subtraktions-

methode noch verbessert werden müssen. Bei einer der Versuchsröhren liefert aber bereits *die direkt an den Röhrenklemmen vorgenommene Messung der Spannung das quadratische Gesetz.*

C. Durch Temperaturmessungen an den Anoden wird das Vorhandensein einer absolut ungeordneten Bewegung und einer Elektrizitätsleitung nach Art der metallischen innerhalb des Entladungsgebildes erneut nachgewiesen. Außerdem folgt aus diesen Messungen in unabhängiger Weise ein Rückschluß auf die Raumladungsfreiheit und somit auf die lineare Verteilung des Potentialgefälles im Entladungsgebilde.¹⁾

D. Durch Versuche an einem besonderen Hochvakuumventil wird erwiesen, daß dem Dreihalbengesetz nur eine beschränkte Gültigkeit zukommt und es keinesfalls im allgemeinen Falle ein notwendiges, um so weniger ein hinreichendes Kriterium für das Bestehen höchster Vakua ist. Es werden Versuche mitgeteilt, bei denen in einem verhältnismäßig schlechten Vakuum das Dreihalbengesetz gilt, bei einer vollkommeneren Entlüftung des nämlichen Rohres aber sich eine erhebliche Abweichung von ihm einstellt.

F. Um die Tatsache, daß durch enge, lange Rohre selbst im höchsten Vakuum mit Spannungen von der Größenordnung von nur 1000 Volt erhebliche Stromstärken durchgeschickt werden können, verständlich zu machen, wird auf anderweitige Erfahrungen und einen neuen, besonderen Versuch hingewiesen, denen zufolge selbst die besten Isolatoren (Quarz, in flüssiger Luft gekühltes Glas) unter dem Anprall der Elektronen im Hochvakuum sich nicht annähernd auf das der Elektronengeschwindigkeit entsprechende Potential aufladen.

G. Die Versuche verdienen es, an den Erfahrungen gemäß umkonstruierten Röhren hauptsächlich in der Richtung fortgesetzt zu werden, ob mit Hilfe der Subtraktionsmethoden das quadratische Gesetz mit voller Genauigkeit zuverlässig reproduzierbar gezeigt werden kann. Besonders aber, ob in von der Pumpe abgeschmolzenen freihängenden Röhren ein

1) Diese Tatsachen habe ich in meinen früheren Arbeiten mit den Werten zusammengefaßt, daß selbst im höchsten Vakuum ein Entladungsgebilde bestehen kann, das alle Merkmale der bei höherer Gasdichte bekannten positiven Lichtsäule trägt.

genügendes Vakuum verwirklicht werden kann, um dieses Gesetz sowie den in meinen früheren Arbeiten mit Hilfe von Sondenmessungen ermittelten Grenzwert des Gefälles mit noch größerer Annäherung wiederzufinden.

XI. Tabellen.

In den folgenden Tabellen werden die Versuchsergebnisse des öfteren doppelt wiedergegeben, wobei die zusammengehörenden Reihen mit der gleichen Zahl, aber entsprechend mit dem Buchstaben a oder b bezeichnet sind. Die mit a bezeichneten Reihen enthalten die Ablesungen genau in derselben Reihenfolge, in welcher sie gewonnen wurden, damit man Einblick habe in die jedesmal erzielte Übereinstimmung. Die Reihen unter b geben aber die in Milliampères und Volts umgerechneten Ablesungen in der Reihenfolge der wachsenden Zahlen.

Abgewichen von diesem System wurde nur in wenigen Fällen, so im Falle von Tab. 4a und 4b, welche die Werte enthält, zwischen denen die hier wenig konstanten Beobachtungsreihen zu schwanken pflegten.

Tabelle 1a.
Rohr mit verschiebbarer Anode.

Hint. Stellung Anfangsmessung		Vordere Stellung		Mittlere Stellung		Hintere Stellung Schlußmessung	
i	v	i	v	i	v	i	v
100	149	100	102	60	93	60	110,5
60	110	60	78	70	101,5	70	120,5
70	121	70	84	80	109,5	80	130,5
80	130	80	90	90	118	90	140,5
90	140	90	96,5	100	125,5	100	149,5
100	149	100	102	60	93,5	60	110,5
60	110	60	78	70	101	70	120,5
70	120	70	84	80	109	80	130,8
80	130	80	90	90	118	90	140,5
90	140	90	96	100	125,5	100	149,5
100	149	100	102	110	133	110	158
110	157	110	108,5	120	140	120	166,5
120	165,5	120	113,5	100	125	20	86
100	147	100	100	20	80	30	96
		20	73	30	88,5	40	102
		30	82,5	40	91	50	100
		40	65	50	103	60	110
		50	83	60	93	70	121
		60	93,5	70	102	100	149,5
		70	84	100	126		
		100	102				

Tabelle 1b.

Milliampere	Vordere Stellung Volt	Mittlere Stellung Volt	Hintere Stellung Volt
10,8	2070	2460	2920
12,3	2250	2680	3210
14,4	2370	2900	3450
16,2	2550	3150	3700
18,0	2700	3320	3950
19,8	2870	3520	4160
21,6	3000	3710	4370

Diese Tabelle enthält die Umrechnung der unter 1a verzeichneten Werte außer denjenigen, welche der Stromablesung 50 sowie kleineren Stromstärken entsprechen, weil bei diesen geringeren Stromstärken andere labile, hier nicht interessierende Kurvenäste bestehen.

Tabelle 2.

Rohr mit verschiebbarer Anode,
Nachweis der linearen Verteilung des Potentialgefälles
aus der Tabelle 1a.

	$B - A$	$A + \frac{B - A}{2}$ (= C berechnet)	C (beobachtet)
i	v	v	v
100	47	125,3	125
60	32,5	94,0	93
70	36,5	102,2	101,5
80	40,5	110,3	109,5
90	44	118,7	118
110	48,5	157,3	158
120	53	166,5	166,5

Die *erste* Kolonne enthält die Stromablesung; die *zweite* die Differenz $B - A$ der der betreffenden Stromstärke entsprechenden Spannungsablesungen in der hinteren und vorderen Lage; die *dritte* die Spannung in der vorderen Lage, vermehrt um die Hälfte der gedachten Differenz, also $A + \frac{B - A}{2}$, die *vierte* schließlich die Spannung C, welche in der mittleren Lage der Anode beobachtet wurde.

Tabelle 3a.

Rohr mit verschiedenen Anodenansätzen gemäß Fig. 2.

Kürzerer Ansatz		Längerer Ansatz	
<i>i</i>	<i>v</i>	<i>i</i>	<i>v</i>
30	30	80	105
40	35	90	113
50	40	100	118
60	45	110	124
70	49,5	80	105
80	54	70	97
90	58	60	88,5
100	62	50	80
110	66	40	70
120	69	30	60
80	54	20	49
30	30	80	105
40	35	100	118
50	40	20	49
60	45	30	60
70	49,5	40	70
80	54	50	80
30	30	60	90
20	25	70	97,5
80	54	80	105,5
		90	113
		100	118
		110	127
		120	130
		80	105
		90	112,5
		80	105

Tabelle 3b.

Umrechnung von 3a.

Milliampere	Kürzerer Ansatz Volt	Längerer Ansatz Volt	Differenz Volt
3,3	1060	2150	1090
5,0	1320	2640	1320
6,7	1540	3080	1540
8,3	1760	3510	1750
10,0	1980	3910	1930
11,7	2180	4270	2090
13,4	2380	4640	2260
15,0	2550	4960	2410
16,7	2720	5200	
18,4	2900	5590	
20,0	3040	5710	

Die Differenzen der drei letzten Zahlen sind infolge der jedenfalls durch die große Stromstärke verursachten großen Erhitzung nicht mehr gut brauchbar.

Tabelle 4a.

Rohr mit zwei Anoden gemäß Fig. 3.

Gesamtlänge mit fester Anode		Entfernbarer Anode (in Nahlage)	
i	v	i	v
70	112	30	labil
80	119	40	40—43
90	126,5	60	43—45
70	112	70	47—49
60	104	80	48—51
50	95	90	51—53
40	85		
30	77,5		
50	96		
60	104		
70	113		
80	119		
90	127		
80	119		
40	85,5		
80	119		
70	112		
60	104		
50	96		
40	86		
80	119		
90	127		
80	119,5		

Tabelle 4b.

(Entspricht Tab. 4 a umgerechnet.)

Milliampere	Gesamtlänge mit fester Anode Volt	Entfernbarer Anode in Nahlage Volt	Differenzen Volt
5,0	5350	labil	—
6,7	5900	2790—2820	3080—3110
8,3	6600	2790—2970	3630—3810
10,0	7190	2970—3100	4090—4220
11,7	7800	3270—3380	4420—4530
13,3	8150	3350—3520	4630—4900
15,0	8750	3520—3680	5070—5230

Tabelle 5a.

Die Beobachtungsreihen dieser Tabelle sind übereinstimmend mit den Kurven des Diagramms Fig. 8 numeriert.

I		II		III		IV		V		VI	
i	v	i	v	i	v	i	v	i	v	i	v
90	64	90	130	130	155	60	89	80	47	80	92
100	68	50	91	110	139	50	80	60	38	70	83
		70	111	90	123	40	69	70	42,5	60	74
110	73	90	129	70	105	80	107	80	47	30	43,5
		110	144	50	85	90	115	90	51	40	55
120	77	130	159	130	155	70	98	100	56	50	65
130	81	30	67	120	148	60	89	110	60	60	74
140	84	50	90	100	132	90	115	120	64,5	70	83
80	labil	110	145	60	95	70	98	130	68	80	92
100	68	100	137	70	105	40	69	110	60	30	44
80	labil					90	115	100	55,5	40	55
140	84					100	122	60	38	50	64,5
130	80					90	115	70	42,5	60	74
120	76					70	98	80	47	70	84
110	72					40	69	90	51	80	92
100	67					30	57	110	60	90	101
90	63					20	45	100	55,5	80	92
						60	89	120	64,5	50	64
						80	107	130	68	30	44
						90	115	60	38	20	33
						100	121	50	33		
						Nach		41	29		
						längerer		60	38		
						Belastung		120	64,5		
						mit 100:					
						90	130				

Tabelle 5b.

(Umrechnung von 5a.)

I		II		III		IV		V		VI	
M.A.	V.	M.A.	V.	M.A.	V.	M.A.	V.	M.A.	V.	M.A.	V.
15,0	845	8,3	1200	20,9	1740	11,3	1420	28,3	1040	17,0	1380
16,7	898	11,7	1460	26,0	1950	17,0	1790	34,0	1200	22,7	1730
18,4	963	15,0	1700	29,2	2150	22,7	2170	39,7	1340	28,3	2040
20,1	1026	16,7	1810	37,5	2520	28,3	2520	45,3	1480	34,0	2330
21,7	1070	18,4	1900	41,7	2710	34,0	2800	51,0	1610	39,7	2650
23,4	1110			45,9	2850	39,7	3090	56,7	1750	45,3	2900
				50,0	3060	45,3	3370	62,3	1890	51,0	3180
				54,2	3180	51,0	3630	68,0	2040		
						56,7	3850	73,7	2140		

Tabelle 6.

(Bei den Korrekturen nachgetragen, vgl. § 26 und 27.)

Rohr mit zwei Anoden gemäß Fig. 3, verbesserte Ausführung.

Milliampere	Gesamtlänge mit fester Anode Volt	Entfernbarer Anode in Nahlage Volt	Differenzen Volt
5,00	4820	3000	1820
6,67	4640	2030	2610
8,35	5220	2260	2960
10,00	5740	2410	3330
11,70	6250	2590	3660
13,38	6750	2790	3960
15,00	7250	3000	4250
16,70	7710	3200	4510
18,40	8150	3370	4780
20,00	8620	3550	5070
21,70	8980	3700	5280

Literaturverzeichnis.

1. J. E. Lilienfeld, Ann. d. Phys. **32**. S. 673—738. 1910.
2. J. E. Lilienfeld, Ann. d. Phys. **43**. S. 24—46. 1914.
3. F. Soddy, Phys. Zeitschr. **9**. S. 1. 1908.
4. Lilienfeld, ebenda, **9**. S. 193. 1908.
5. Lilienfeld u. Rosenthal, Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstr. **18**. 4. S. 256—261. 1912; vgl. auch D.R.P. 256534 (1911).
6. Langmuir, Physic. Review (2) **2**. S. 450. 1913.
7. Langmuir, Phys. Zeitschr. **15**. S. 348. 1914.
8. Lilienfeld, Physic. Review **3**. S. 364—365. 1914.
9. Lilienfeld, Phys. Zeitschr. **15**. S. 744—746. 1914.
10. Lilienfeld, Ber. d. math.-phys. Klasse d. Sächs. Ges. d. Wiss. Leipzig, **64**. S. 420ff. 1912.
11. Germershausen, Ann. d. Phys. **51**. S. 705ff., 847ff. 1916.
12. Lilienfeld, Sächs. Ges. d. Wiss. **66**. S. 76—79. Leipzig, Febr. 1914.
13. Lilienfeld, Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstr. **23**. S. 383 1915.
14. Lilienfeld, Ber. d. Sächs. Ges. d. Wiss. **69**. S. 45—56. Leipzig 1917.

(Eingegangen 11. August 1919.)