

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Zusammenhang zwischen Stromdichte und Kathodenfall der Glimmentladung bei Verwendung einer Schutzringkathode und Korrektur der Temperaturerhöhung des Gases.

Von A. Güntherschulze in Berlin-Charlottenburg.

Mit 9 Abbildungen. (Eingegangen am 26. April 1928.)

1. Die Kathode der Glimmentladung bestand aus einem flachen Eisenzylinder von 3,0 cm Dicke, 11,3 cm Durchmesser und 2,3 kg Gewicht, der nach dem Schutzringprinzip unterteilt war und eine so große Wärmekapazität hatte, daß er sich während einer Versuchsreihe nur unwesentlich erwärmte. 2. Die mittlere Übertemperatur des Gases wurde berechnet. Aus ihr ergab sich die mittlere freie Weglänge im Fallraum statt des früher benutzten Gasdruckes als maßgebende Variable. 3. Die benutzten Gase (He , Ne , Ar , H_2 , N_2 , O_2) wurden im Entladungsraum selbst durch eine Glimmentladung mit Alkalikathode (mit Ausnahme von O_2) gereinigt. Die Kathode wurde durch langdauernde Kathodenzerstäubung von allen Verunreinigungen und Fremdgasen befreit. 4. Der Kathodenfall wurde durch Nähern von Anode und Kathode bis zum völligen Verschwinden der Anodenglimmhaut (nicht bis zum Spannungsminimum!) ermittelt. 5. Die Messungen ergaben, daß einzig und allein beim Helium die Ähnlichkeitsgesetze $l\sqrt{j} = \text{const}$ und $\frac{d}{l} = \text{const}$ (l mittlere freie Weglänge, j Stromdichte, d Fallraumdicke) bei konstantem Kathodenfall erfüllt sind. Infolgedessen läßt sich nur bei Helium der Zusammenhang zwischen Kathodenfall, Stromdichte und mittlerer freier Weglänge durch eine einzige Kurve darstellen. Diese Kurve läßt sich nicht durch eine einfache analytische Formel wiedergeben. Bei allen anderen untersuchten Gasen gelten die Ähnlichkeitsgesetze keineswegs. Vielmehr steigt bei ihnen allen die Stromdichte mit abnehmender Weglänge viel schneller, als es den Ähnlichkeitsgesetzen entspricht. Es finden also bei all diesen Gasen in der Entladung mit der Stromdichte beschleunigt zunehmende Vorgänge statt, die die Entladung erleichtern. 6. Diese Störungen werden sich nur vermeiden und die ungestörten Gesetzmäßigkeiten nur dann ermitteln lassen, wenn mit viel kleineren Stromdichten, d. h. bei viel geringeren Gasdrucken gearbeitet wird, als in dieser Untersuchung. Das bedingt aber Kathoden, die nach Quadratmetern, und Gefäße, die nach Kubikmetern messen.

Über den Zusammenhang zwischen Kathodenfall und Stromdichte der Glimmentladung liegen eine größere Anzahl von Untersuchungen vor. Die mitgeteilten Werte sind jedoch undefiniert, weil sie auf den Gasdruck bezogen sind, während sie nicht von diesem, sondern von der mittleren freien Weglänge abhängen, mit anderen Worten, weil bei ihnen weder die Temperaturerhöhung der Kathode, noch die des Gases berücksichtigt ist und auch die durch die Randwirkung der Kathode hervor-

gerufenen Störungen nicht vermieden worden sind, von den Schwierigkeiten der Messung des Kathodenfalls ganz abgesehen.

Es erübrigt sich also, auf die Versuche näher einzugehen. Im folgenden habe ich versucht, sämtliche Fehlerquellen möglichst zu eliminieren. Diese sind:

I. Randstörungen und Temperaturerhöhung der Kathode.

Die Randstörungen lassen sich durch das Schutzringprinzip vermeiden. Die Kathode wird in eine zentrale Kreisfläche und einen diese konzentrisch in möglichst geringem Abstand umhüllenden Ring unterteilt. Beide werden parallel geschaltet und der von jedem der beiden Teile aufgenommene Glimmstrom für sich mit gleichen Amperemetern gemessen. Aus praktischen Gründen empfiehlt es sich, beiden Teilen gleiche Oberflächen zu geben.

Da die Glimmentladung nur von der Stirnfläche der Kathode ausgehen soll, muß die zylindrische Seitenfläche des Schutzringes gegen das Übergreifen der Entladung geschützt sein. Das geschieht am saubersten, indem um den Schutzring ein weiterer isolierter Metallring in sehr geringem Abstand gelegt wird. Ist der Abstand zwischen beiden kleiner als die Fallraumdicke der Glimmentladung, so kann diese nicht in den Zwischenraum hineingreifen und bleibt vollständig auf die Stirnfläche von Mittelkathode und Schutzring beschränkt.

Sollen sich die unvermeidlichen Temperaturerhöhungen des Gases im Fallraum in engen Grenzen halten, so muß die Stromdichte und damit der Gasdruck gering sein. Das bedingt wiederum eine große Kathodenfläche. Es wurden für die Versuche eine Mittelkathode von 50 cm^2 und ein Schutzring von gleicher Oberfläche benutzt. Die Gesamtfläche betrug also 100 cm^2 , der Gesamtdurchmesser der Kathode $11,5\text{ cm}$.

Damit sich die Kathode während der Versuche nur wenig erwärmt, ist erstens eine große Wärmekapazität und zweitens eine gute Kühlung erwünscht. Die Kathode hatte deshalb eine Dicke von $3,0\text{ cm}$ und ein Gewicht von 2300 g . Sie bestand aus Eisen. Eine Wattsekunde erwärmte sie um $0,001^\circ\text{C}$.

Die ganze Anordnung stand, durch eine dünne isolierende Schicht von ihr getrennt, auf der Messinggrundplatte eines großen Rezipienten. Die Grundplatte wurde durch Kühlwasser gespült.

Über die Kühlwirkung einer Unterlage auf eine daraufgesetzte Scheibe bestehen vielfach irrtümliche Ansichten. Wird eine ebene Scheibe

auf eine ebene Unterlage gelegt, so berührt sie diese bekanntlich nur in sehr wenigen Punkten. An allen übrigen Punkten befindet sich eine außerordentlich dünne Luftschicht zwischen beiden. Bei Atmosphärendruck schwächt diese trennende Luftschicht infolge ihrer außerordentlich geringen Dicke den Wärmestrom zwischen Scheibe und Unterlage nur sehr wenig. Wird jedoch evakuiert, so beginnt infolge des von Kundt und Warburg* entdeckten, von Smoluchowski** gemessenen Temperatursprunges schon bei einem Drucke von mehreren Millimetern Quecksilber die Wärmeleitung durch die Luft abzunehmen, um bei geringen Drucken Null zu werden. Es bleibt dann nur noch die Wärmeleitung durch die wenigen sich berührenden Punkte übrig, so daß der Wärmestrom unter Umständen auf den zehnten Teil und weniger des Wärmestromes bei Atmosphärendruck sinkt. Es ist leicht möglich, eine solche Scheibe auf einer auf Zimmertemperatur befindlichen Unterlage auf 100° C und mehr zu erhitzen.

Die Wärmeleitung wird in diesem Falle verbessert, wenn erstens die Scheibe schwer gemacht wird, so daß sich die Berührungsfläche vergrößert, und zweitens eine dünne weichere Zwischenschicht eingeschoben wird, die sich beiderseits besser anschmiegt. Als solche diene die isolierende Glimmerschicht.

Eine Kontrolle der Anordnung während der Messungsreihen mit Hilfe eines Thermoelementes ergab Temperaturanstiege von weniger als 2° C.

II. Die Ermittlung der Übertemperatur des Gases im Fallraum.

a) Die Erwärmung des Gases selbst. Für die Ermittlung der Übertemperatur des Gases müssen vereinfachende Annahmen gemacht werden, die in Verbindung mit den Unsicherheiten hinsichtlich der Feldverteilung im Fallraum zur Folge haben, daß die Berechnung keine große Genauigkeit beanspruchen kann. Infolgedessen wird als erster Zweck der Temperaturberechnung die Möglichkeit angesehen, einen Überblick über die Größe der Temperaturerhöhung zu gewinnen und dadurch die Messungen auf das Gebiet zu beschränken, in dem die Temperaturerhöhungen so gering sind, daß auch eine ungenaue Kenntnis der Temperaturerhöhung genügt.

* A. Kundt und E. Warburg, Pogg. Ann. **156**, 177, 1875.

** M. Smoluchowski, Wied. Ann. **64**, 101, 1898; Wiener Ber. **107**, 304, 1899; **108**, 5, 1899.

Folgende vereinfachende Annahmen werden gemacht:

1. Die Feldstärke im Fallraum ist eine lineare Funktion des Abstandes von der Kathode, die an der Glimmlichtkante praktisch Null wird, wie es Aston fand.

2. Die Energieabgabe der positiven Ionen an das Gas im Fallraum ist an jedem Aufpunkt der an ihm herrschenden Feldstärke proportional. Diese Annahme trifft in erster Annäherung zu, da die mittlere freie Weglänge der positiven Ionen im Vergleich zur Fallraumdicke sehr klein ist und die positiven Ionen bei jedem Stoße im Mittel ein Viertel ihrer Energie abgeben. In zweiter Annäherung schleppen die positiven Ionen die Energie näher an die Kathode heran, als der vereinfachenden Annahme entspricht, wodurch die berechnete Übertemperatur ein wenig zu groß wird.

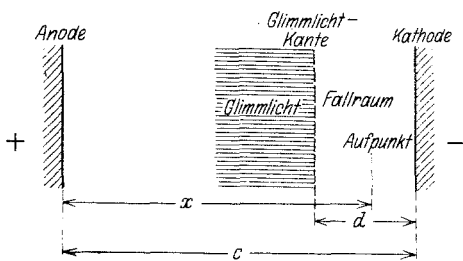


Fig. 1.

3. Rund 80 % der Kathodenfallenergiedichte $V \cdot j$, wo V der Kathodenfall und j die Stromdichte ist, werden im Fallraum an das Gas abgegeben, der Rest geht teils unmittelbar in die Kathode, teils wird er durch die von der Kathode kommenden Elektronen in das negative Glimmlicht und darüber hinaus verschleppt. Der Zahlenwert 80 % hat sich für mittlere Kathodenfälle aus früheren Messungen ergeben. Mit weiter steigendem Kathodenfall nimmt er ab.

4. Für das Wärmeleitvermögen des Gases wird der der mittleren Übertemperatur entsprechende Wert benutzt. Da die Übertemperatur mit Hilfe dieses Wertes erst gefunden werden soll, ist unter Umständen eine sukzessive Näherung nötig.

Bei diesen Annahmen ergibt sich die Temperaturerhöhung u des Gases als Funktion des Abstandes x von der Anode nach der in Fig. 1 gegebenen Bezeichnung aus der Gleichung

$$u = \frac{0,8 \cdot Q}{3 k \cdot d^2} \left\{ \frac{d^3 x}{c} - (x - c + d)^3 \right\}, \quad (1)$$

worin d die Dicke des Fallraumes, c der Abstand Anode-Kathode, k das Wärmeleitvermögen des Gases bei der Temperatur $u + w_0$ [siehe b]) und $Q = V \cdot j$ ist.

Fig. 2 gibt u als Funktion von x , wenn $V = 800$ Volt, $p = 1$ mm Hg, $j = 10,6$ mA/cm², $d = 0,4$ cm, $c = 2,00$ cm, $Q = 8,48$ Watt gesetzt werden. Die Temperatur der Kathode und Anode wird zu 20°C angenommen und der Temperatursprung zunächst außer acht gelassen.

Ist $c > 5d$, so ist die Form dieser Kurve nur noch wenig von c abhängig. Eine Planimetrierung der Kurve ergibt für die mittlere Erwärmung u_m des Gases im Fallraum $u_m = 0,80 u_c$, wo u_c die Temperatur an der Glimmkante ist.

Die Kurve der Fig. 2 ist für das Verständnis der Erscheinungen an der Kathode wichtig. Denn in ganz analoger Weise wie u ändert sich

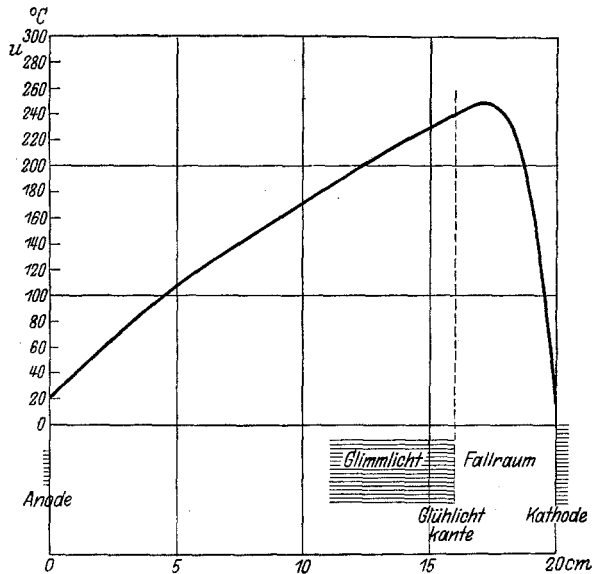


Fig. 2.

vor der Kathode die Gasdichte und die mittlere freie Weglänge der Ionen und Elektronen.

Offenbar können nun mit Hilfe der bekannten Ähnlichkeitsgesetze der Glimmentladung zwei verschiedene Zustände nur dann miteinander verglichen werden, wenn u so klein ist, daß die mittlere freie Weglänge noch nicht wesentlich vom Aufpunkt abhängt. Ist dagegen z. B. $u = 600^\circ\text{C}$, die mittlere freie Weglänge also an der Glimmkante rund dreimal so groß als unmittelbar vor der Kathode, so müssen für eine derartige Entladung andere Gesetzmäßigkeiten gelten, als wenn bei sonst ähnlichen Parametern $u_c = 6^\circ\text{C}$ und die Weglänge konstant ist. Es ist in diesem

Fälle nicht möglich, durch Berechnung und Berücksichtigung von u_c die beiden Fälle mit Hilfe der Ähnlichkeitsgesetze ineinander überzuführen.

Auch aus diesem Grunde sind die Verhältnisse so zu wählen, daß die Übertemperatur des Gases klein bleibt.

b) Die Ermittlung des Temperatursprunges. Ist der Druck eines Gases sehr gering und besteht im Gase ein Temperaturgefälle nach der Gefäßwand hin, so geht die Temperatur des Gases nicht stetig, sondern gemäß Fig. 3 in die der festen Oberfläche über. Seltsamerweise wird in der Literatur nicht die Temperaturdifferenz t_s , sondern die Länge ξ als Temperatursprung bezeichnet. Im folgenden wird t_s Temperatursprung genannt. ξ ist der mittleren freien Weglänge λ des Gases und anscheinend auch der Wurzel aus dem Molekulargewicht proportional. Den Rechnungen sind die folgenden ξ - und λ -Werte zugrunde gelegt:

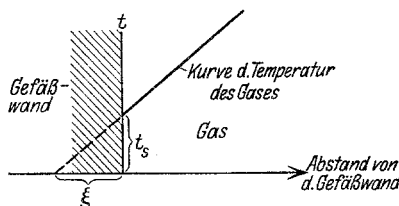


Fig. 3.

	ξ	λ 20° C, 1 mm Hg cm
Helium	4,9	$14,73 \cdot 10^{-3}$
Neon	2,2	10,32
Argon	1,6	5,20
Wasserstoff	6,96	9,20
Stickstoff	1,7	4,91
Sauerstoff	1,7	5,30

Der Temperatursprung t_s ist dann gegeben durch

$$t_s = \xi \lambda \frac{dt}{dl}, \quad (2)$$

wo $\frac{dt}{dl}$ das Temperaturgefälle pro Zentimeter Weg im Gase vor der Gefäßwand ist.

Die mittlere Übertemperatur des Gases im Fallraum ergibt sich dann zu

$$t_m = t_s + u_m. \quad (3)$$

Zur Ermittlung der hierdurch bedingten Änderung der mittleren freien Weglänge empfiehlt sich die Anwendung der Formel von Sutherland:

$$l = \frac{1}{\sqrt{2} N \pi \sigma^2 \left(1 + \frac{C}{T}\right)}, \quad (4)$$

worin N die Zahl der Moleküle in der Volumeneinheit, σ der Molekulardurchmesser, T die absolute Temperatur und C die Sutherlandsche Konstante ist. Da nun bei konstanter Temperatur $N = C_1 \cdot p$ ist, ergibt sich

$$l = \frac{1}{\text{Const.} \cdot p \left(1 + \frac{C}{T}\right)}, \quad (5)$$

$$\frac{l_1}{l_0} = \frac{p_0}{p_1} \frac{\left(1 + \frac{C}{T_0}\right)}{\left(1 + \frac{C}{T_1}\right)}. \quad (6)$$

Wird als p_0 der Druck 1 mm Hg, T_0 die Temperatur 295° abs. (22° C) gewählt und die zugehörige Weglänge $l_0 = 1$ gesetzt, so wird

$$l_T = \frac{1 + \frac{C}{295}}{p_{295} \left(1 + \frac{C}{T}\right)} \frac{T}{295}. \quad (7)$$

Dabei ist p_{295} der bei Zimmertemperatur gemessene Druck und $T = t_m + 273$ die mittlere absolute Temperatur des Gases im Fallraum.

In die Tabellen, die die Messungsergebnisse enthalten, ist jedoch nicht l_T , sondern $1/l_T$ als Variable eingetragen. Das bietet den Vorteil, daß aus dem Vergleich von p und $1/l_T$ sogleich die Größe der Korrektur abgelesen werden kann. Denn da p_0 und l_0 beide gleich 1 gesetzt worden sind, sind p und $1/l_T$ einander gleich, wenn $t_m = 0$ ist. Mit anderen Worten, es lassen sich die Werte $1/l_T$ der Tabellen auch als derjenige Druck in Millimeter Quecksilber ansehen, der in der Entladung vorhanden gewesen wäre, wenn die mittlere Temperatur des Fallraumes bei festgehaltener freier Weglänge auf Zimmertemperatur gesenkt worden wäre.

III. Reinigung des Gases und der Kathode.

Bei der Größe der Kathode, die durch die Abmessungen des Fallraumes bei geringen Drucken bedingt war, kam ein verblasenes Gefäß nicht in Frage. Es mußte ein Rezipient verwandt werden. Dieser hatte einen Durchmesser von 23 cm und eine lichte Höhe von 27 cm. Bei der Verwendung von Hahn Fett, das viele Stunden hindurch im Vakuum auf 200° C erhitzt worden war, zeigte sich, daß ein derartiges Fett einwandfrei ist, solange es nicht von den Elektronen und Ionen der Entladung

erreicht wird, daß es aber im entgegengesetzten Falle kräftig flüchtige Kohlenwasserstoffe entwickelt. Es mußte also der Rezipient ohne Fett aufgesetzt werden. Es gelang, ihn durch Umgießen mit Klebwachs vollständig vakuumdicht zu bekommen, ohne daß Klebwachs in den Innenraum hineingelange.

Da bei einer derartigen Zusammensetzung des Gefäßes eine Reinigung von Gefäßwänden und Elektroden durch starke Erhitzung nicht in Frage kam, mußten die Gase im Rezipienten selbst gereinigt werden. Das geschah dadurch, daß eine besondere Na-K-Kathode oben auf der Anode und isoliert von ihr angeordnet wurde. Bei Versuchen mit Edelgasen wurde diese Kathode so lange mit einer Glimmentladung belastet (in der Regel 24 Stunden lang), bis die letzten Spuren von Fremdgasen beseitigt waren. Dabei ruhte die Anode auf dem äußersten, die Kathode umhüllenden Ring, der diese um 0,1 mm überhöhte, so daß die Kathode vollständig gegen eventuell auftretende Alkalidämpfe abgedichtet war. Zur größeren Sicherheit wurde jedoch nach der Reinigung der Gase eine kräftige Glimmentladung an der eigentlichen Kathode viele Stunden lang unterhalten, so daß sich die Kathode durch Kathodenzerstäubung noch einmal gründlich reinigte. Erst wenn sich dabei Strom und Spannung mit der Zeit nicht mehr änderten, wurde mit den Versuchen begonnen.

Im übrigen sind Spuren von Alkali, die auf eine Eisenkathode gelangen, sehr leicht an den helleren Flecken des Glimmlichtes zu erkennen, denn die Stromdichte der Glimmentladung ist *ceteris paribus* an Alkali viel größer als an Eisen.

Die Kathode enthielt also bei den Versuchen weder eine Wasserhaut, noch fremde adsorbierte Gase, sondern befand sich mit den zu untersuchenden Gasen annähernd im Adsorptionsgleichgewicht.

Untersucht wurden die Gase He, Ne, Ar, H₂, N₂, O₂.

H₂ wurde elektrolytisch entwickelt und ebenfalls mit der Alkali-kathode gereinigt, N₂ wurde aus NaN₃ hergestellt. Das elektrolytisch erzeugte O₂ wurde durch Glimmentladung bei Gegenwart von P₂O₅ und durch Goldfolie im Entladungsgefäß von den letzten Spuren von Wasser- und Quecksilberdampf befreit.

Bei den übrigen Gasen sorgte das Alkali für Beseitigung der Quecksilberdämpfe.

IV. Messung des Kathodenfalles.

Die gewöhnlichen Sondenmessungen sind endlich, mit Recht, hinreichend in Verruf gekommen. Die Messungen mit der Langmuirsonde, d. h. die Aufnahme einer statischen Charakteristik für jeden Meßpunkt

kommt nicht in Frage, wenn es sich, wie bei den vorliegenden Versuchen, um Hunderte von Messungen handelt. Es bleibt diejenige Methode, die mir überhaupt die einwandfreieste zur Ermittlung des Kathodenfalles zu sein scheint, nämlich die kontinuierliche Verringerung des Abstandes zwischen den planparallelen Elektroden. Sobald dabei die anodische Glimmhaut vollständig verschwunden ist und falls störende Gefäßwände

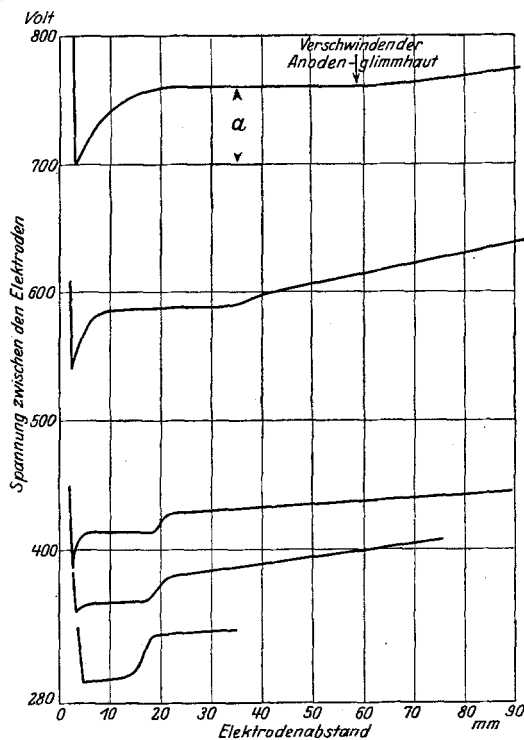


Fig. 4.

der Entladung nicht zu nahe sind, ist die Spannung zwischen den Elektroden gleich dem Kathodenfall.

Diese Spannung ist beim normalen Kathodenfall mit dem Spannungsminimum zwischen den Elektroden identisch, nicht aber beim anomalen Kathodenfall bei höheren Spannungen. Wie sehr hier Vorsicht und Kritik bei der Messung geboten sind, zeigt die Fig. 4, die ich aus einer früheren Arbeit* reproduziere. Die unterste Kurve dieser Figur gibt die Elektrodenspannung als Funktion des Abstandes beim normalen Kathodenfall.

* ZS. f. Phys. 40, 414, 1926.

Der plötzliche Abfall der Spannung bei etwa 16 mm Elektrodenabstand ist durch das Verschwinden des Anodenfalls verursacht. Bei 10 mm Elektrodenabstand ist nur noch der Kathodenfall vorhanden. Der steile Anstieg bei 5 mm wird durch die Behinderung der Entladung durch zu geringen Elektrodenabstand verursacht.

Für die Verhältnisse beim anomalen Kathodenfall und bei höheren Spannungen ist die oberste Kurve der Fig. 4 typisch. Hier verschwinden die Anodenglimmhaut und der Anodenfall bei 60 mm Abstand. Die Spannung wird vom Abstand unabhängig. Bei a ist nur noch der Kathodenfall selbst vorhanden. Bei weiterer Verringerung des Elektrodenabstandes kommt es jedoch zu einer neuen Erscheinung. Die Spannung fällt weiter ab, anfangs langsam, schließlich sehr schroff, bis sie plötzlich in den steilen Anstieg übergeht. In der genannten Arbeit ist gezeigt worden, daß die Ursache dieser Erscheinung darin zu suchen ist, daß die von der Kathode ausgehenden schnellen Primärelektronen bei genügender Nähe der Anode in der auf ihr befindlichen adsorbierten Gas- und Wasserdampfhaut mehr Ionen zu bilden vermögen, als wenn sie im freien Gas ionisieren müßten.

Es ist deshalb im Gebiet des anomalen Kathodenfalls vollständig verfehlt, zur Messung des Kathodenfalls die Anode der Kathode bis zum Erreichen des Spannungsminimums zu nähern und dieses als reinen Kathodenfall anzusehen. Vielmehr darf die Anode der Kathode nur so weit genähert werden, bis die Anodenglimmhaut vollständig verschwunden ist, was sich sehr scharf beobachten läßt. Gleichzeitig wird die Spannung konstant. Diese Spannung ist der reine Kathodenfall.

V. Apparatur und Meßverfahren.

Fig. 5 zeigt eine Skizze des benutzten Apparats. K ist die isoliert auf die Grundplatte G aufgesetzte unterteilte Eisenkathode, a und b die Stromzuführungen zu Mittelkathode und Schutzring. Die gegenseitige Berührung beider wurde durch eingeschobene Glimmerstückchen unmöglich gemacht. A ist die mit Hilfe des Drehschliffes D vertikal verstellbare Anode, die aus einer kreisförmigen Kupferscheibe von 12 cm Durchmesser und 0,1 cm Dicke bestand, F ein großes Kühlgefäß aus Zink mit Wasserfüllung. Das Volumen des Rezipienten betrug 11 Liter. Die beiden mit flüssiger K-Na-Legierung gefüllten Porzellantiegel Q dienten als Reinigungskathoden. Sie erhielten den Strom von der Grundplatte G durch eine kleine Hängekette H aus Kupfer. Das Einfüllen der Legierung geschah

dadurch, daß aus dem Na- und K-Vorrat möglichst schnell saubere Würfel herausgeschnitten und sofort in Stanniol eingewickelt wurden. Dadurch wurde ihre Oxydation verhindert und es konnte in aller Ruhe mit ihnen manipuliert werden. Sobald dann später zur Reinigung der Gase die Glimmentladung eingeleitet wurde, schmolz das Stanniol und gab das K und Na frei, die sich zu der bei Zimmertemperatur flüssigen K-Na-Legierung vereinigten. Nachdem durch eine längere Glimmentladung sämtliche in ihr vorhandenen Kohlenwasserstoffe unschädlich gemacht

waren, reinigte sie die Gase in kürzester Zeit. Da dabei, wie erwähnt, die Anode *A* fest auf der Kathode *K* auflag, konnte kein Na oder K auf diese gelangen.

Strom und Spannung wurden mit Präzisionsdrehspulinstrumenten von Siemens & Halske gemessen. Als Spannungsquelle diente eine Akkumulatorenbatte-rie von 1500 Volt, zur Messung der Abstände ein Kathetometer, zur Druckmessung ein sehr ge-
naues MacLeod.

Die Messungen spielten sich in der Weise ab, daß nach völliger Reinigung des Gases und Wiederabkühlung des Gefäßes nach dem Einschalten die Anode

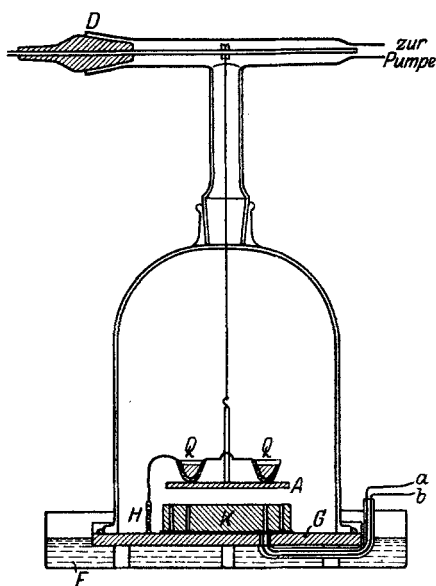


Fig. 5.

der Kathode genähert wurde, bis die Anodenglimmbaut verschwunden war, und dann im Hin- und Rückgang auf die gewünschten Werte des Kathodenfalls eingestellt und der zugehörige Strom j , die Dunkelraumdicke d , der Elektrodenabstand c abgelesen wurden.

Hin- und Rückgang unterschieden sich in der Regel um einige Pro-
zente. Die Ursache dürfte darin zu suchen sein, daß der Kathodenfall durch die Gasbeladung der Kathode beeinflusst wird. Ist eine Kathode hinreichend lange Zeit bei gegebenem Gasdruck mit konstanter Belastung eingeschaltet, so stellt sich offenbar auf ihrer Oberfläche ein den ein-
gestellten Verhältnissen entsprechendes Gasadsorptionsgleichgewicht her. Wird jetzt die Belastung oder der Gasdruck geändert, so stellt sich all-
mählich ein neues Gasgleichgewicht ein. Diese Einstellung dauert jedoch

so lange, daß sie nicht für jeden Meßpunkt abgewartet werden kann. Es bleibt nur übrig, aus Hin- und Rückgang das Mittel zu nehmen.

Nach einer solchen Messungsreihe wurde ausgeschaltet, der Gasdruck abgelesen, auf den nächstniederen Druck gepumpt und die nächste Meßreihe aufgenommen.

VI. Die Messungen.

1. Helium. Als Beispiel seien zunächst zwei Meßreihen in der folgenden Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1.

Druck mm Hg	Kathodenfall Volt	Stromdichte		Mittel mA/cm ²	d cm	c cm
		Hingang mA/cm ²	Rückgang mA/cm ²			
1,855	200	5,8 · 10 ⁻²	6,4 · 10 ⁻²	6,1 · 10 ⁻²	0,490	5,5
	300	24,2	27,2	25,7	0,414	5,5
	500	56,4	59,0	57,7	0,417	5,5
	700	77,0	74,6	75,8	0,502	5,5
	900	91,2	88,6	89,9	0,524	5,5
	1100	107,4	106,6	107,0	0,570	5,5
1,258	200	2,4 · 10 ⁻²	2,4 · 10 ⁻²	2,4 · 10 ⁻²	0,828	8,8
	300	10,4	11,4	10,9	0,620	8,8
	500	24,0	25,4	24,7	0,625	8,8
	700	35,4	35,6	35,5	0,653	8,8
	900	45,4	44,4	44,9	0,739	8,8
	1100	55,4	55,0	55,2	0,766	8,8

Um derartige wiederholt mit erneuerten Gasfüllungen aufgenommene Meßreihen, die untereinander gut übereinstimmen, mitteln zu können, wurden die Werte in großem Maßstabe in Millimeterpapier eingetragen, die Kurven der Stromdichte als Funktion des Gasdruckes bei konstantem Kathodenfall gezogen und aus diesen die in der Tabelle 2 zusammengestellten Werte abgelesen.

Für diese Werte wurden dann nach dem angegebenen Verfahren die Übertemperaturen des Gases und daraus die mittleren freien Weglängen l in einer Form berechnet, die sie ohne weiteres mit dem ursprünglich gemessenen Druck vergleichbar macht. So ergaben sich die Werte der Tabelle 2.

Die Tabelle zeigt, daß sich bei Helium und den angewandten Gasdrucken die Übertemperaturen innerhalb erträglicher Grenzen halten. Erst bei den höchsten Kathodenfällen beginnt die Differenz zwischen p und $1/l$ über 10 % zu steigen, um im äußersten Falle 26 % zu erreichen.

Tabelle 2. Helium mit Eisenkathode. Normaler Kathodenfall 153 Volt.

p mm Hg	j mA/cm ²	d cm	c cm	t_s °C	u_m °C	t_m °C	$1/l$	$1/\sqrt{j}$	$d \cdot l$
1. $V_a = 160$ Volt.									
6,0	16 · 10 ⁻²	0,188	0,8	0,1	5,5	5,6	5,86	0,650 · 10 ⁻¹	11,02
8,0	25,7	0,139	0,8	—	—	7,0	7,77	0,652	10,80
10,0	39,8	0,113	0,7	0,2	8,5	8,7	9,67	0,653	10,90
12,0	54,7	0,095 *	0,7	—	—	10,2	11,52	0,641	—
14,0	72,5	0,082 *	0,7	0,3	12,2	12,5	12,32	0,639	—
Mittel . . .								0,647	10,9
2. $V_a = 180$ Volt.									
6,0	39 · 10 ⁻²	0,17 *	0,8	0,4	14,9	15,4	5,64	1,107 · 10 ⁻¹	—
8,0	66	0,13 *	0,8	—	—	19,2	7,42	1,094	—
10,0	100	0,10 *	0,7	0,6	22,4	23,0	9,13	1,096	—
12,0	139	0,08 *	0,7	—	—	28,6	10,75	1,098	—
14,0	188	0,08 *	0,7	0,8	35,0	35,8	12,22	1,123	—
Mittel . . .								1,103	—
3. $V_a = 200$ Volt.									
1,0	2,0 · 10 ⁻²	0,90	8,8	—	—	1,0	0,996	1,422 · 10 ⁻¹	0,956
2,0	8,0	0,49	6,3	—	—	2,0	1,984	1,423	0,973
4,0	34	0,25	1,7	—	—	2,4	3,96	1,473	0,950
6,0	72	0,16 *	0,8	0,14	3,0	3,1	5,92	1,432	—
8,0	117	0,12 *	0,8	—	—	3,9	7,87	1,374	—
10,0	173	0,096 *	0,7	0,07	4,6	4,7	9,78	1,346	—
12,0	243	0,080 *	0,7	—	—	5,3	11,73	1,328	—
14,0	328	0,070 *	0,7	0,17	5,85	6,0	13,63	1,329	—
Mittel . . .								1,391	0,960
4. $V_a = 300$ Volt.									
1,0	8,0 · 10 ⁻²	0,80	8,8	0,8	2,7	3,5	0,984	2,875 · 10 ⁻¹	0,784
2,0	32	0,40	6,3	1,7	5,4	7,1	1,938	2,920	0,776
3,0	80	0,28	3,0	2,6	8,9	11,5	2,863	3,125	0,784
4,0	146	0,21	1,7	—	—	14,0	3,765	3,213	0,790
5,0	219	0,166	0,8	3,7	12,7	16,4	4,675	3,163	0,775
Mittel . . .								3,059	0,782
5. $V_a = 400$ Volt.									
1,0	16 · 10 ⁻²	0,80	8,8	2,4	5,5	7,9	0,967	4,140 · 10 ⁻¹	0,773
1,5	34	0,53	8,8	2,9	10,1	13,0	1,422	4,100	0,753
2,0	58	0,41	6,3	—	—	17,0	1,863	4,085	0,763
2,5	87	0,33	6,3	4,9	15,9	20,8	2,297	4,063	0,757
3,0	126	0,28	3,0	—	—	23,6	2,727	4,125	0,764
3,5	168	0,23	3,0	5,8	20,6	26,4	3,153	4,115	0,757
Mittel . . .								4,105	0,761
6. $V_a = 500$ Volt.									
0,8	11,5 · 10 ⁻²	0,97	8,8	2,5	7,7	10,2	0,767	4,420 · 10 ⁻¹	0,744
1,2	23,2	0,675	8,8	3,5	10,6	14,1	1,132	4,260	0,764
1,6	41,7	0,506	8,8	4,5	14,4	18,9	1,480	4,360	0,749
2,0	66,4	0,414	6,3	5,5	17,9	23,4	1,818	4,480	0,753
2,5	105,0	0,360	6,3	6,8	23,4	30,2	2,217	4,630	0,761
Mittel . . .								4,450	0,754

* Interpolierte Werte.

p mm Hg	j mA/cm ²	d cm	c cm	t_s °C	u_m °C	t_m °C	$1/l$	$l \cdot \sqrt{j}$	$d \cdot l$
7. $V_a = 700$ Volt.									
1,0	$24,7 \cdot 10^{-2}$	0,83	8,3	5,8	18,9	24,7	0,904	$5,50 \cdot 10^{-1}$	0,750
1,5	50,0	0,58	6,3	7,8	25,1	32,9	1,318	5,36	0,763
2,0	88,5	0,44	6,3	9,3	31,8	41,1	1,710	5,50	0,752
						Mittel . . .	5,453		0,755
8. $V_a = 900$ Volt.									
0,8	$21,7 \cdot 10^{-2}$	1,075	8,8	8,0	26,6	34,6	0,699	$6,66 \cdot 10^{-1}$	0,751
1,0	29,7	0,880	8,8	8,5	29,3	37,8	0,864	6,31	0,760
1,4	53,5	0,627	6,3	10,2	36,1	46,3	1,173	6,23	0,763
1,8	85,0	0,521	6,3	12,1	45,0	57,0	1,457	6,32	0,759
						Mittel . . .	6,38		0,758
9. $V_a = 1100$ Volt.									
0,8	$29,0 \cdot 10^{-2}$	1,17	8,8	13,0	45,0	58,0	0,646	$8,33 \cdot 10^{-1}$	0,756
1,0	38,7	0,965	8,8	17,9	48,8	66,7	0,783	7,94	0,755
1,4	65,6	0,706	6,3	16,5	60,0	76,5	1,064	7,61	0,751
1,8	101,0	0,550	6,3	18	68	86	1,326	7,59	0,735
						Mittel . . .	7,87		0,749

Die Ursache der geringen Übertemperaturen liegt erstens in dem großen Wärmeleitvermögen und zweitens der relativ sehr geringen Glimmstromdichte des Heliums.

Weiter zeigt die Tabelle 2, daß das Ähnlichkeitsgesetz $j = \frac{C}{l^2}$ durchweg so gut erfüllt ist, wie man es bei den trotz aller Vorsichtsmaßregeln immer prekären Gasentladungsmessungen (Gasadsorptionsgleichgewicht!) erwarten kann. Doch beginnen bei den höchsten Kathodenfällen von 1100 Volt die $l \cdot \sqrt{j}$ -Werte bereits einen deutlichen Gang, zu zeigen.

Diese Gültigkeit des Ähnlichkeitsgesetzes ermöglicht, die gesamten Beziehungen zwischen V_a , j und l durch eine einzige Kurve

$$V_a = f(j) \quad \text{für} \quad l = 1$$

darzustellen.

Fig. 6 zeigt diese Kurve. Die Hoffnung, hier auf einen einfachen gesetzmäßigen Zusammenhang zu stoßen, hat sich leider nicht erfüllt. Die Hoffnung war allerdings auch nur gering, denn für die Gestalt dieser Kurve ist offenbar die in Fig. 7 nach Messungen von Hughes und Klein* wiedergegebene Ionisierungsausbeutekurve maßgebend. Sie stellt die Zahl der von einem Elektron der durch die Abszisse gegebenen

* A. Ll. Hughes und Elias Klein, Phys. Rev. 23, 450, 1924.

Geschwindigkeit auf einem Wege von 1 cm im Gase von 1 mm Druck bei 0° C erzeugten Ionenpaare dar. Jenseits von 300 Volt nehmen

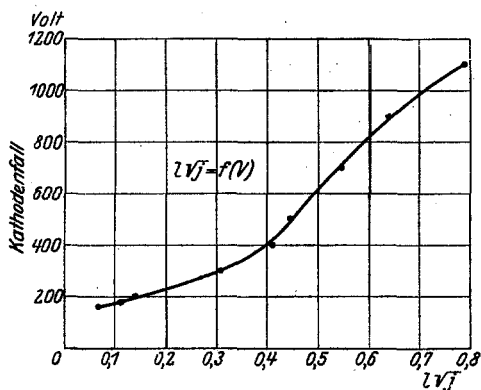


Fig. 6.

sämtliche Kurven weiter ab. Infolge des komplizierten Verlaufs dieser Kurven kann kaum eine einfache $V_a = (fj)$ -Kurve erwartet werden.

In ganz gleicher Weise wie j_a läßt sich auch die (optisch gemessene) Dicke des Fallraums behandeln. Auch hier ist die aus den Ähnlichkeitsgesetzen folgende

$$\text{Beziehung } \frac{d}{l} = \text{Const}$$

gut erfüllt. Es läßt sich also auch für den Zusammenhang zwischen V_a , d und l eine einzige Kurve angeben. Sie ist in Fig. 8 wiedergegeben.

Hiernach nimmt d bei konstantem l vom normalen Kathodenfall bis 400 Volt schnell ab und bleibt dann völlig konstant.

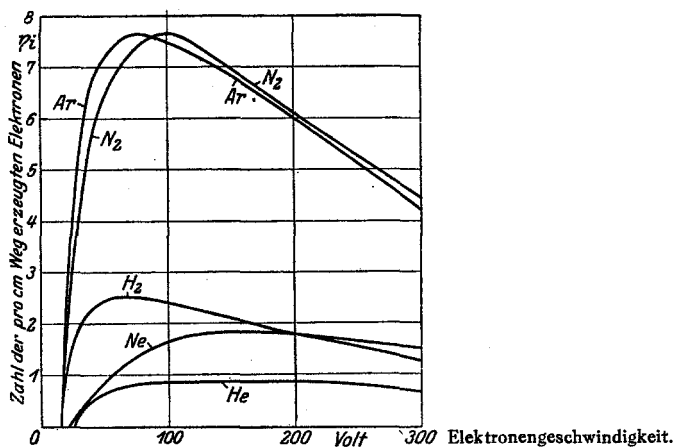


Fig. 7.

Hier zeigt sich, wie unklar die Verhältnisse werden, wenn nicht die freie Weglänge, sondern der Druck als Variable benutzt werden. Tabelle 1, die die bei konstantem Druck aufgenommenen Werte enthält, zeigt, daß in diesem Falle d ein Minimum durchläuft und mit höheren Kathodenfällen wieder beträchtlich ansteigt. Dieser Anstieg ist lediglich durch

die Verringerung der Gasdichte infolge der Erwärmung verursacht und verschwindet, sobald auf die mittlere freie Weglänge umgerechnet wird. Die gute Konstanz von d bei höheren Kathodenfällen spricht dafür, daß die Temperaturberechnung richtig ist.

2. Neon. Die in ganz der gleichen Weise wie bei Helium ermittelten Werte sind für Neon in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3. Neon mit Eisenkathode.

p mm Hg	j mA/cm ²	d cm	c cm	t_s °C	v_m °C	t_m °C	$1/l$	$l\sqrt{j}$	d/l
1. $V_a = 160$ Volt.									
1,40	$3,0 \cdot 10^{-2}$	0,55	4,7	—	—	—	1,40	$1,237 \cdot 10^{-1}$	0,77
2,00	6,9	0,335	0,88	—	—	1,0	1,99	1,318	0,64
3,00	20,5	0,16	0,88	—	—	2,7	2,97	1,524	0,48
4,00	46,0	0,12	0,88	0,6	3,9	4,5	3,93	1,725	0,47
2. $V_a = 200$ Volt.									
1,00	$6,7 \cdot 10^{-2}$	0,60	4,7	—	—	4,0	0,983	$2,633 \cdot 10^{-1}$	0,59
1,50	15,7	0,37	2,0	—	—	5,9	1,465	2,706	0,54
2,00	29,5	0,225	0,88	0,9	5,8	6,7	1,944	2,797	0,44
3,00	75,0	0,13	0,88	—	—	10,0	2,883	3,005	0,37
4,00	155,0	0,10	0,88	2,5	13,4	15,9	3,755	3,32	0,38
3. $V_a = 300$ Volt.									
0,4	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,98	7,6	—	—	6,5	0,390	$5,50 \cdot 10^{-1}$	0,38
0,6	12,7	0,60	5,6	2,0	9,1	11,1	0,574	6,21	0,34
0,8	24	0,42	5,6	—	—	15,1	0,753	6,51	0,32
1,2	61	0,24	4,7	3,8	18,6	22,4	1,102	7,09	0,26
4. $V_a = 500$ Volt.									
0,2	$3,0 \cdot 10^{-2}$	2,22	7,6	2,3	10,3	12,6	0,1904	$9,10 \cdot 10^{-1}$	0,42
0,3	11,8	1,10	7,6	6,2	23,8	30,0	0,2683	12,82	0,30
0,4	33,0	0,640	7,6	—	—	52,6	0,3308	17,27	0,21
0,6	98,5	0,284	7,6	22,3	52,0	74,3	0,465	21,35	0,133
0,8	190	0,220	5,6	52,2	71,8	124,0	0,5364	25,72	0,118
5. $V_a = 700$ Volt.									
0,15	$3,9 \cdot 10^{-2}$	2,68	17,0	5,0	24,3	29,3	0,1343	$14,7 \cdot 10^{-1}$	0,36
0,20	7,8	1,80	17,0	—	—	46,4	0,1687	16,5	0,30
0,25	17,0	1,20	10,0	13,6	62,7	76,3	0,1920	21,4	0,23
0,35	79,3	0,55	7,6	43,0	97,6	140,6	0,2255	39,5	0,12
6. $V_a = 900$ Volt.									
0,15	$8,0 \cdot 10^{-2}$	2,48	17,0	11,3	59,0	71,0	0,1168	$24,2 \cdot 10^{-1}$	0,29
0,20	15,5	1,64	17,0	18,0	78,0	96,0	0,1450	27,7	0,24
0,25	38,5	1,07	17,0	35,2	117,0	152,2	0,1622	33,3	0,17
0,30	75,0	0,68	7,6	50,8	134,0	184,8	0,1727	50,1	0,12
7. $V_a = 1100$ Volt.									
0,15	$9,5 \cdot 10^{-2}$	2,27	17,0	15,9	73,7	89,6	0,1110	$27,8 \cdot 10^{-1}$	0,25
0,20	35,0	1,45	17,0	43,6	157,4	201,0	0,1113	53,1	0,16
0,25	70,0	0,90	17,0	58,9	169,1	228	0,1338	62,5	0,12

Die Tabelle zeigt erstens hinsichtlich der Erwärmung im Fallraum, daß diese bei den höheren Kathodenfällen so groß wird (im äußersten Falle 228°C), daß von einer gleichmäßigen Gasdichte im Fallraum nicht mehr die Rede sein kann.

Zweitens zeigt sich, daß die Ähnlichkeitsgesetze weder bei der Stromdichte, noch bei der Fallraumdicke irgendwie erfüllt sind. Das liegt nicht etwa an einer falschen Temperaturkorrektur. Ohne Korrektur ist der Gang in den Werten $l\sqrt{j}$ und $\frac{d}{l}$ noch größer. Werden andererseits die Übertemperaturen mit einem solchen Faktor multipliziert, daß

der Gang verschwindet, so ergeben sich unmögliche Temperaturerhöhungen.

Es nimmt also tatsächlich j schneller zu und d schneller ab, als den Ähnlichkeitsgesetzen entspricht, und diese Abweichung ist um so stärker ausgeprägt, je größer der Kathodenfall ist. Das heißt, die Entladung wird mit zunehmender Stromdichte immer mehr erleichtert. Ob die Ursache hierfür in der zunehmenden Bildung von Atomen mit metastabilen Elektronenbahnen oder in lichtelektrischer Einwirkung auf die Kathode oder noch anderen Dingen zu suchen ist, muß dahingestellt bleiben.

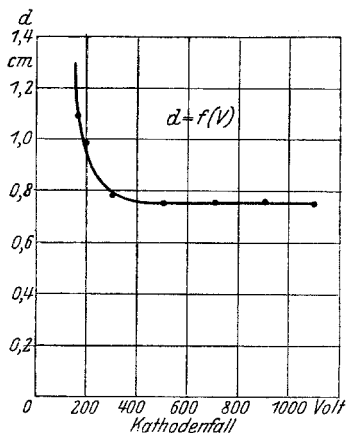


Fig. 8.

Es scheint mir wenig Zweck zu haben, die Werte der Tabelle 3 zu Interpolationsformeln zusammenzufassen.

Vielmehr scheint mir ein anderes Verfahren nötig zu sein. Die Stromdichten und infolgedessen die Gasdrucke müssen so gering gewählt werden, daß erstens keine merkliche Übertemperatur und zweitens keine Begünstigung der Entladung durch sekundäre Prozesse vorhanden ist. Als Kriterium hat die Gültigkeit der Ähnlichkeitsgesetze zu dienen. Da nun aber die Fallraumdicke und der richtige Elektrodenabstand dem Gasdruck annähernd umgekehrt proportional ist, sind für diese Versuche Kathoden nötig, deren Oberfläche von der Größenordnung eines Quadratmeters ist, und Gefäße, deren Inhalt nach Kubikmetern rechnet.

Nur wenn man sich zu solchen Maßnahmen entschließt, wird man die ungestörten primären Entladungserscheinungen erfassen können.

3. Argon. Tabelle 4 enthält die Ergebnisse der Messungen. Sie zeigt, daß beim Argon infolge seines geringen Wärmeleitvermögens die Übertemperaturen schon bei mittleren Kathodenfällen Werte annehmen, bei denen keine einfachen Gesetzmäßigkeiten mehr zu erwarten sind. Es ist deshalb die Tabelle schon mit 700 Volt abgebrochen worden, obwohl bis 1300 Volt beobachtet wurde. Schon bei 700 Volt erreicht die Übertemperatur den Betrag von 250°C .

Ferner zeigt die Tabelle, daß ganz wie bei Neon die Ähnlichkeitsgesetze keineswegs erfüllt sind. Auch hier wächst die Stromdichte mit der Gasdichte schneller, als den Ähnlichkeitsgesetzen entspricht. Es wird

Tabelle 4. Argon mit Eisenkathode.

p mm Hg	j mA/cm ²	d cm	c cm	t_s °C	u_m °C	t_m °C	$1/l$	$l\sqrt{j}$	d/l
1. $V_a = 170$ Volt.									
1,5	$21 \cdot 10^{-2}$	0,133*	1,5	0,8	3,5	4,3	1,465	$3,13 \cdot 10^{-1}$	—
2,0	41	0,10*	1,0	—	—	7,4	1,89	3,39	—
3,0	110	0,067*	0,5	1,9	13,4	15,3	2,79	3,76	—
4,0	216	0,05*	0,4	—	—	22,2	3,59	4,10	—
5,0	336	0,04*	0,4	3,1	24,4	27,5	4,41	4,16	—
2. $V_a = 200$ Volt.									
0,5	$6,0 \cdot 10^{-2}$	0,53	4,0	—	—	7,0	0,482	$5,09 \cdot 10^{-1}$	0,256
1,0	27	0,22	2,0	1,5	12,3	13,8	0,935	5,55	0,206
1,5	68	0,13	1,5	3,0	18,9	21,9	1,353	6,09	0,176
2,0	128	0,085*	1,0	3,9	23,0	26,9	1,77	6,40	—
2,5	200	0,068*	0,7	—	—	33,0	2,15	6,58	—
3,0	297	0,03*	0,5	5,5	33,8	39,3	2,50	6,89	—
3. $V_a = 300$ Volt.									
0,2	$3,1 \cdot 10^{-2}$	1,19	8,0	1,6	12,7	14,3	0,186	$9,47 \cdot 10^{-1}$	0,221
0,4	19,5	0,52	4,0	4,2	31,8	35,0	0,341	12,95	0,177
0,6	52	0,30	4,0	6,9	43	50,0	0,481	14,97	0,144
0,8	98	0,20	2,0	8,0	52,0	60,0	0,616	16,07	0,123
1,0	162	0,16	2,0	1,5	62,4	73,9	0,733	17,4	0,117
4. $V_a = 500$ Volt.									
0,1	$2,4 \cdot 10^{-2}$	2,0	10,0	3,6	22,4	26,0	0,0887	$17,47 \cdot 10^{-1}$	0,177
0,2	14	0,99	8,0	9,3	59,7	69,0	0,149	25,1	0,147
0,3	41	0,59	6,0	15,6	100,4	116,0	0,191	33,5	0,113
0,4	98	0,37	4,0	23	141	164	0,224	44,3	0,083
0,45	146	0,31	4,0	31	160	191	0,236	51,3	0,073
5. $V_a = 700$ Volt.									
0,15	$13,2 \cdot 10^{-2}$	1,3	8,0	14,2	93,4	108	0,0978	$37,2 \cdot 10^{-1}$	0,127
0,20	30,4	0,90	8,0	24,2	139,7	164	0,1122	49,2	0,101
0,25	55,3	0,65	6,0	30	170	200	0,1283	58,0	0,083
0,30	87,0	0,55	6,0	35	212	247	0,1378	67,7	0,076

* Extrapolierte Werte.

also auch hier die Entladung durch sekundäre, mit der Stromdichte schnell zunehmende Prozesse erleichtert.

4. Wasserstoff. Tabelle 5 enthält die Messungen. Die Übertemperaturen sind hier infolge des großen Wärmeleitvermögens des Wasserstoffs wesentlich geringer als bei den vorhergehenden Gasen und stören eine exakte Berechnung noch nicht wesentlich.

Bei dem kleinsten eingestellten Kathodenfall von 270 Volt, dicht über dem normalen, scheint $l\sqrt{j}$ noch konstant zu sein. Bei 300 Volt steigt es bereits ebenso wie bei Ne und Ar mit der Stromdichte an. Hier beim Wasserstoff kommt als Komplikation vielleicht noch hinzu, daß das Verhältnis $\frac{H}{H_2}$ oder $\frac{H^+}{H_2^+}$ von der Stromdichte abhängig ist, woraus allein schon die Ungültigkeit der Ähnlichkeitsgesetze folgen würde.

Tabelle 5. Wasserstoff mit Eisenkathode.

p mm Hg	j mA/cm ²	d cm	c cm	t_s °C	u_m °C	t_m °C	$1/l$	$l\sqrt{j}$	d/l
1. $V_a = 270$ Volt.									
2,5	$50 \cdot 10^{-2}$	0,37*	1,1	—	—	5,3	2,44	$2,90 \cdot 10^{-1}$	—
3,0	71	0,30*	1,1	1,1	5,1	6,2	2,92	2,89	—
4,0	122	0,24*	0,8	—	—	11,0	3,83	2,88	—
5,0	186	0,20*	0,7	2,2	11,9	14,1	4,72	2,89	—
2. $V_a = 300$ Volt.									
0,8	$4,4 \cdot 10^{-2}$	1,20	5,0	—	—	1,0	0,797	$2,63 \cdot 10^{-1}$	0,958
1,0	7,8	0,96	4,5	—	—	1,8	0,992	2,82	0,952
1,5	24,5	0,60	3,0	—	—	5,0	1,468	3,37	0,882
2,0	58	0,41	1,8	1,7	6,7	8,4	1,933	3,94	0,793
3,0	159	0,25	1,3	—	—	14,0	2,836	4,45	0,710
4,0	290	0,215	1,0	4,3	17,7	22,0	3,675	4,64	0,790
3. $V_a = 500$ Volt.									
0,4	$10 \cdot 10^{-2}$	1,89	9,0	—	—	12,0	0,381	$8,61 \cdot 10^{-1}$	0,720
0,5	17,0	1,41	8,0	4,3	11,6	15,9	0,469	8,80	0,661
1,0	85,5	0,665	4,5	9,2	27,1	36,3	0,868	10,0	0,575
1,5	208	0,435	3,0	15,0	42,0	67,0	1,173	12,3	0,511
4. $V_a = 700$ Volt.									
0,25	$7,6 \cdot 10^{-2}$	2,83	7,5	—	—	16,5	0,2337	$11,8 \cdot 10^{-1}$	0,662
0,40	23	1,70	7,5	7,0	23,2	30,2	0,356	13,5	0,605
0,60	60	1,03	6,0	—	—	50,0	0,497	15,6	0,512
0,80	120	0,75	5,0	21,2	54,6	75,8	0,608	18,0	0,453
5. $V_a = 1000$ Volt.									
0,20	$9,6 \cdot 10^{-2}$	3,10	7,5	8,0	19,2	27,2	0,1865	$16,6 \cdot 10^{-1}$	0,578
0,30	28,0	2,25	7,5	15,9	51,1	66,0	0,2357	22,5	0,530
0,40	53,5	1,56	7,5	—	—	81,4	0,2988	24,5	0,466
0,50	85,5	1,25	6,0	30,8	81,5	112,3	0,3403	27,2	0,460

* Extrapolierte Werte.

5. Stickstoff. Werte in Tabelle 6. Danach verhält sich Stickstoff ganz ähnlich wie Argon.

Tabelle 6. Stickstoff mit Eisenkathode.

p mm Hg	j mA/cm ²	d cm	c cm	t_s °C	u_m °C	t_m °C	$1/l$	$l/\sqrt{j}$	d/l
1. $V_a = 250$ Volt.									
0,5	$7,0 \cdot 10^{-2}$	0,59	3,0	0,7	5,6	6,3	0,487	$5,43 \cdot 10^{-1}$	0,293
1,0	26,2	0,30	2,0	—	—	12,2	0,952	5,37	0,285
1,5	54	0,21	2,0	1,7	21,0	22,7	1,36	5,41	0,286
						Mittel	. . .	5,40	0,288
2. $V_a = 300$ Volt.									
0,25	$5,0 \cdot 10^{-2}$	0,95	4,0	—	—	5,0	0,245	$9,18 \cdot 10^{-1}$	0,233
0,50	15,7	0,457	3,0	1,2	14,9	16,1	0,471	8,42	0,215
0,75	36,8	0,273	3,0	—	—	22,9	0,682	8,90	0,186
1,00	66,5	0,200	2,0	3,5	27,5	31,0	0,883	9,23	0,184
						Mittel	. . .	8,93	
3. $V_a = 500$ Volt.									
0,1	$3,0 \cdot 10^{-2}$	1,82	10,0	3,1	17,7	20,8	0,092	$18,8 \cdot 10^{-1}$	0,167
0,2	13,0	0,91	6,0	6,5	38,5	45,0	0,168	21,5	0,153
0,4	66,7	0,40	4,0	13,1	81,6	94,7	0,284	28,8	0,113
4. $V_a = 700$ Volt.									
0,10	$5,4 \cdot 10^{-2}$	2,0	10,0	7,4	45,5	53,0	0,0816	$28,5 \cdot 10^{-1}$	0,163
0,15	15,4	1,1	8,0	14,0	72,9	86,9	0,1088	36,1	0,120
0,20	32,0	0,87	6,0	19,1	108	127	0,1287	40,8	0,112
0,25	53,4	0,70	4,0	23	131	154	0,1492	49,0	0,104

6. Sauerstoff. Tabelle 7 enthält die Ergebnisse. Hiernach verhält sich der Sauerstoff ähnlich wie Stickstoff. Dicht oberhalb des normalen Kathodenfalles scheinen die Ähnlichkeitsgesetze wenigstens annähernd zu gelten.

7. Luft. Für trockene Luft lagen die Werte zwischen denen von Stickstoff und Sauerstoff.

VII. Vergleich der einzelnen Gase.

Da bei den meisten Gasen die Ähnlichkeitsgesetze nicht gelten, ist der Vergleich der Kurven Kathodenfall/Stromdichte willkürlich und von der zugrunde gelegten Gasdichte abhängig. Um aber doch einen wenigstens der Größenordnung nach treffenden Vergleich zu ermöglichen, werden die Kurven für $1/l = 0,2$ inter- oder extrapoliert. Sie sind in Tabelle 8 und Fig. 9 wiedergegeben. Helium hat bei weitem die kleinste

Tabelle 7. Sauerstoff mit Eisenkathode.

p mm Hg	j mA/cm ²	d	c	t_s °C	u_m °C	t_m °C	$1/l$	$l\sqrt{j}$	d/l
1. $V_a = 360$ Volt.									
0,25	$3,5 \cdot 10^{-2}$	1,04	4,0	—	—	10,0	0,240	$7,49 \cdot 10^{-1}$	0,251
0,50	12	0,56	3,0	1,7	14,0	15,7	0,468	7,40	0,262
0,75	26	0,386	1,4	2,3	23,6	25,9	0,675	7,56	0,292
1,0	47,3	0,237	1,4	3,3	26,0	29,3	0,849	8,10	0,201
1,5	100,4	0,150	1,4	4,2	37,1	41,3	1,272	7,89	0,191
Mittel . . .								7,65	
2. $V_a = 400$ Volt.									
0,25	$10,0 \cdot 10^{-2}$	0,877	4,0	3,4	22,0	25,4	0,225	$14,1 \cdot 10^{-1}$	0,197
0,50	40,5	0,44	2,0	5,9	41,6	47,5	0,414	15,4	0,182
0,75	88,7	0,26	1,4	8,7	53,5	62,2	0,587	16,1	0,153
1,0	155	0,20	1,4	11,1	72,7	83,8	0,730	17,1	0,146
3. $V_a = 500$ Volt.									
0,1	$3,7 \cdot 10^{-2}$	1,70	7,0	3,6	18,8	22,4	0,091	$21,1 \cdot 10^{-1}$	0,155
0,2	22	0,77	4,0	10,4	48,6	59,0	0,158	29,6	0,122
0,3	56	0,48	2,7	17,4	73,7	91	0,214	35,0	0,103
0,4	101	0,33	2,7	19	92	111	0,268	37,6	0,088
0,5	156	0,24	2,0	25	100	125	0,321	39,0	0,077
4. $V_a = 700$ Volt.									
0,05	$2,4 \cdot 10^{-2}$	3,28	20,0	5,8	35,4	41,2	0,0424	$36,6 \cdot 10^{-1}$	0,139
0,10	12,8	1,44	7,0	14,0	69,0	83,0	0,0732	48,9	0,105
0,15	40	0,81	5,0	30,6	111,4	142	0,092	68,7	0,075
0,20	82,5	0,59	4,0	40	150	190	0,108	84,0	0,064
0,25	141	0,43	4,0	48	183	231	0,123	96,4	0,053

Tabelle 8. Kathodenfall, Stromdichte und Fallraumdicke an einer Eisenkathode bei $1/l = 0,200$ in den verschiedenen Gasen.

Helium			Neon			Argon		
V	j	d	V	j	d	V	j	d
Volt	mA/cm ²	cm	Volt	mA/cm ²	cm	Volt	mA/cm ²	cm
160	$0,65 \cdot 10^{-2}$	1,09	160	$1 \cdot 10^{-2}$	1,0	170	3	—
200	1,39	0,96	200	2,7	0,70	200	4,8	0,30
300	3,06	0,78	300	5,0	0,45	300	9,6	0,21
500	4,45	0,75	500	9,5	0,40	500	37	0,11
700	5,45	0,75	700	22	0,20	700	180	0,03
900	6,38	0,75	900	90	0,08			
1100	7,87	0,75						
Wasserstoff			Stickstoff			Sauerstoff		
V	j	d	V	j	d	V	j	d
Volt	mA/cm ²	cm	Volt	mA/cm ²	cm	Volt	mA/cm ²	cm
270	—	—	250	$5,4 \cdot 10^{-2}$	0,29	360	$7,7 \cdot 10^{-2}$	0,25
300	—	—	300	8,9	0,24	400	14	0,20
500	$8 \cdot 10^{-2}$	0,80	500	24	0,14	500	34	0,10
700	11,3	0,69	700	68	0,09	700	130	0,03
1000	18	0,55						

Stromdichte, die auch am langsamsten mit der Spannung ansteigt. Es folgen Wasserstoff, Neon, Stickstoff, Sauerstoff, Argon, d. h. es ist im wesentlichen die Reihenfolge der Molekulargewichte innegehalten.

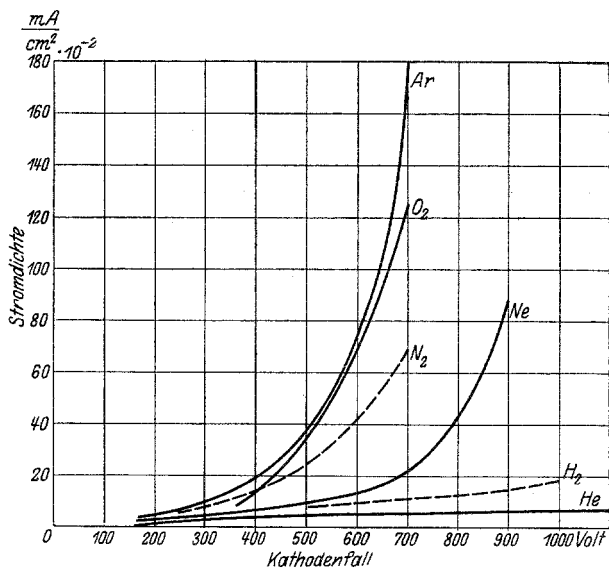


Fig. 9.

Große Verschiedenheiten zeigen sich auch im Verhalten der Fallraumdicke. Während diese bei Helium schon von 300 Volt an konstant ist, nimmt sie bei Neon und Argon mit zunehmendem Kathodenfall sehr stark ab.