**6. Zur Kenntnis des Funkenpotentials in
Gasen bei höherem Druck;
von F. Hayashi.**

§ 1. Einleitung.

Obgleich die Funkenentladung in Gasen schon eingehend untersucht worden ist, ist ihr Verhalten bei hohem Druck noch wenig bekannt, es stimmen sogar die Resultate von verschiedenen Autoren nicht überein.

Wolf¹⁾ hat gefunden, daß bei Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Luft und Kohlensäure das Funkenpotential bei Drucken bis zu 10 Atm. *linear mit dem Druck ansteigt*; also entsprechend dem Gesetz, das Paschen für niedrigen Druck aufgestellt hat. Bei seinen Versuchen benutzte er ein Metallgefäß mit halbkugelförmigen Elektroden von 10 cm Durchmesser, und der Funkenabstand war immer 1 cm. Als Elektrizitätsquelle diente eine Influenzmaschine, und die Spannung wurde mit einem Righischen Elektrometer gemessen.

Alex. Hemptinne²⁾ hat die oben genannten Gase bis zu Drucken von 80 Atm. untersucht und gefunden, daß auch dann das Entladungspotential immer noch *mit dem Druck linear ansteigt*. Er benutzte als Elektroden sehr feine Platindrähte von ca. 0,2 mm Durchmesser in einem Glasgefäße, und der Elektrodenabstand war sehr klein. Als Elektrizitätsquelle benutzte er ein Induktorium, und die Spannung wurde mit einem Vergleichsfunkenmikrometer gemessen.

Ch. Eng. Guye und H. Guye³⁾ haben ebenfalls Luft, Sauerstoff und Kohlensäure bis zu Drucken von 65 m Quecksilber untersucht. Sie haben gefunden, daß die Entladungs-

1) M. Wolf, Wied. Ann. 57. p. 306. 1889.

2) Alex. Hemptinne, Bull. de Science de l'Acad. Belgique 8. p. 603. 1902.

3) Ch. Eng. Guye, Arch. des Sciences phys. et Nat. 20. 7. p. 15. 1905.

spannung von 1 Atm. bis zu 10 Atm. linear mit dem Druck ansteigt, und daß bei höheren Drucken die Darstellungskurve zwischen Funkenpotential und Druck in sehr großer Annäherung parabolisch (Druckachse als Achse) verläuft. Sie benutzten ein Gefäß, wie es gewöhnlich für die Verflüssigung von Gasen angewendet wird. Die Elektroden bestanden auch aus feinen Platindrähten, und der Funkenabstand war 0,1799 mm. Sie maßen die direkte Spannung mit einem Blondlotschen Elektrometer.

G. Ceruti¹⁾ hat in Luft den Druck bis zu 65 Atm. variiert und gefunden, daß die Funkenspannung *viel schneller als der Druck ansteigt*, so daß die Darstellungskurve zwischen Funkenpotential und Druck eine gegen die Druckachse konvexe Krümmung hat. Er benutzte ein metallisches Gefäß mit Kugelelektroden von 1,5 cm Durchmesser und veränderte den Elektrodenabstand von 0,03125 mm bis zu 0,375 mm. Dabei maß er die statische Spannung mit einem Righischen Elektrometer.

Auch E. A. Watson²⁾ hat die Entladung in Luft bei Drucken bis zu 16 Atm. untersucht und *das Wolfsche Resultat bestätigt*, indem er *Proportionalität zwischen Funkenpotential- und Druckzunahme* fand. Er benutzte in einem metallischen Gefäß verschieden große Kugelelektroden und variierte auch den Elektrodenabstand. Dabei verwendete er teils statische, teils dynamische Spannung.

M. Wien hat bei Gelegenheit seiner Untersuchung über Preßgaskondensatoren³⁾ gefunden, daß *das Funkenpotential langsamer ansteigt als es das Paschensche Gesetz verlangt*.

Wie man sieht, sind die Resultate so verschieden, daß man aus ihnen nichts ersehen kann.

Woran liegen nun diese Verschiedenheiten? Auf Anregung von Hrn. Prof. Wien habe ich es unternommen, über diese Sache zu arbeiten.

Um zu einem richtigen Resultat zu gelangen, mußten zuerst die Gründe der Unsicherheit ermittelt werden. Nach meiner Vermutung, die sich auch im Verlauf der Untersuchung

1) G. Ceruti, Rend. Inst. Lomb. 42. p. 476. 1909.

2) E. A. Watson, Journ. elektr. Eng. 43. p. 113. 1909.

3) A. Wien, Ann. d. Phys. 29. p. 681. 1909.

bestätigte, spielen Form und Größe der Elektroden, Elektrodenmaterial, das Volumen des Gefäßes und die Art des Kondensators keine große Rolle, ebensowenig die elektrischen Schwingungen, die vielleicht in dem Entladungskreise auftreten. Endlich erwies es sich als gleich, ob mit statischer oder dynamischer Spannung gearbeitet wurde, wie schon Swyngedauw¹⁾ und Algermissen²⁾ gezeigt haben. Hingegen sind von starkem Einfluß auf die Entladungspotentiale:

- a) die Warburgsche Funkenverzögerung,
- b) die chemische Veränderung des Gases durch den Funken.

Also war mein Augenmerk auf diese beiden Erscheinungen gerichtet, besonders auf die Funkenverzögerung, weil in den früheren Arbeiten dieser keine größere Beachtung geschenkt worden ist. Auf diesem Wege bin ich zu einem Resultat gekommen, welches die Beobachtungen von Ch. und H. Guye und M. Wien bestätigt.

§ 2. Die Versuchsanordnung.

Die Anordnung der Apparate ist in Fig. 1 dargestellt.

Das Gefäß *G*, in dem die Gase komprimiert wurden, bestand aus zwei Messingkappen, die einen inneren Durchmesser von 4,2 cm und eine Wandstärke von 1 cm besaßen. In jeder Kappe befand sich eine konische Öffnung, durch die ein konischer Porzellanisolator (in Fig. 1 schräg schraffiert) hindurch ging. Der Porzellanisolator war 6,5 cm lang, seine Dicke betrug 2,2 cm an dem einen, und 1,5 cm an dem anderen Ende. Er hatte in der Mitte ein kleines Loch von ca. 2 mm Weite, durch welches der Draht geführt wurde. Das Ende des Drahtes trug ein kleines Messingröhrchen mit Untersatz, in welches der Stiel der Elektrodenkugel hineingeschoben wurde. Der

Fig. 1.

1) R. Swyngedauw, Compt. rend. 122. p. 118 u. 195. 1895.

2) I. Algermissen, Ann. d. Phys. 19. p. 1016. 1906.

Draht war mit Siegellack verkittet und das Porzellan war andererseits mit Siegellack luftdicht an der Kappe befestigt.

Die eine Kappe hatte seitlich eine runde Stufenöffnung, deren Durchmesser auf der inneren Seite 3 cm, auf der äußeren Seite 1,5 cm betrug. Von der inneren Seite der Öffnung her war eine runde Quarzplatte von 2,5 cm Durchmesser und 0,7 cm Dicke mit Siegellack eingekittet. In die andere Kappe war ein Messingstück von 5 cm Länge und 3 cm Dicke eingeschraubt und hart eingelötet, welches einerseits mit einer Schraubenmutter für das Verbindungsstück und andererseits mit einer kleinen Öffnung für die Zulassung des Gases versehen war.

Die beiden Kappen wurden durch vier Schrauben fest zusammengehalten. Der Vorhang der einen Kappe paßte ganz genau in die Vertiefung der anderen Kappe. Dazwischen befand sich eine Bleidichtung. Der Inhalt des Gefäßes ohne die Porzellanisolatoren u. a. betrug 160 ccm.

Das Verbindungsstück *S*, das ich in der Manometerfabrik Schäffer & Budenberg in Magdeburg-Buckau habe anfertigen lassen, bestand aus dickem Messingrohr von der Form eines Kreuzes. Das untere Ende war in das Gefäß geschraubt, wie schon oben erwähnt, das obere Ende trug ein Sauerstoffmanometer aus derselben Fabrik mit einem Meßbereich von 0,5—100 Atm.

Die beiden Enden des Verbindungsstückes trugen Absperrventile für 150 Atm. Druck. Das rechte Ende des Verbindungsstückes über dem Absperrventil war durch ein Stahlrohr mit einer Bombe verbunden, während das linke Ende zu einer Wasserstrahlpumpe führte oder frei blieb. Der Druck im Gefäß konnte infolgedessen beliebig reguliert werden.

Überall wo eine Verbindung durch Gewinde bewirkt war, wurde mit Siegellack abgedichtet. Vor der Verschraubung wurden Gewinde und Mutter angewärmt, bis der Siegellack schmolz und dann verschraubt. Diese Siegellackdichtungen waren viel besser als andere. Wenn das Gefäß in Ordnung war, war es so dicht, daß bei einem Druck von 70 Atm. der Druck in einer Stunde nur um 0.1 Atm. abnahm.

An beide Enden des Gefäßes wurde je eine Glaskappe mit Siegellack oder Wachs befestigt und mit Paraffin- oder

Rizinusöl gefüllt, um den Zuleitungsdraht für die Elektrode vom Gefäß gut zu isolieren.

Das Schaltungsschema zeigt Fig. 2. Die Elektroden in dem Gefäß bestanden aus Kugeln von 1 cm Durchmesser aus Magnesium, bzw. aus 14 kar. Gold. Sie waren mittels einer kurzen, ca. 4 mm dicken Messingstange in das Untersatzröhrchen gesteckt. Kurze Drähte verbanden sie mit einem Vergleichsfunkenmikrometer, das halbkugelförmige Elektroden aus Magnesium von 5 cm Durchmesser besaß.

Fig. 2.

Der Mittelpunkt in der Verbindung der beiden Elektroden war einerseits mit Preßgaskondensatoren C (3 Stück in Serie) verbunden und andererseits mit den Polen des Induktoriums I . In nächste Nähe der Elektroden des Vergleichsfunkenmikrometers wurde ein Radiumpräparat (3 mg) gebracht. B ist eine Bogenlampe, endlich ist L eine Quarzlinse mit einer Brennweite von ca. 9,1 cm.

§ 3. Meßmethode und Messungen.

a) Die Bestimmung der Spannung.

Die Entladungsspannung wurde durch Vergleich mit der anderweitig bekannten Entladungsspannung einer zweiten parallel geschalteten Funkenstrecke ermittelt.

Man stellt zuerst die Funkenstrecke in dem Vergleichsfunkenmikrometer B so klein ein, daß der Funke in ihr überspringt. Dann verlängert man die Strecke B ein wenig, bis der Funke in der anderen Strecke A überspringt. Nun verkleinert man wieder B , bis der Funke wieder in B überspringt, und nimmt den Mittelwert aus beiden Entladungsspannungen.

Diese Methode ist schon von vielen Autoren angewendet worden, aber man findet, soviel ich weiß, nirgends in der Literatur angegeben, wie genau man in dieser Art die Spannung messen kann. Deswegen habe ich erst diesen Punkt genau untersucht.

In einem Funkenmikrometer A mit Kugelelektroden aus Magnesium von 1 cm Durchmesser wurde die Funkenstrecke genau auf 1,5 cm eingestellt und ihre Entladungsspannung

durch ein anderes Funkenmikrometer *B* mit Halbkugelelektroden aus Magnesium von 5 cm Durchmesser gemessen. Wenn beide Funkenstrecken bei annähernd gleichem Elektrodenabstand in freier Luft stehen und die Funkenstrecke nicht künstlich ionisiert wird, so springt der Funke unregelmäßig einmal hier und einmal da über und eine genaue Messung ist unmöglich. Erst wenn beide Strecken mit einer Bogenlampe beleuchtet oder mit einem Radiumpräparat bestrahlt werden, bekommt man ein regelmäßiges Resultat.

Um die Art und die Genauigkeit der Messung zu zeigen, ist im folgenden ein Beispiel gegeben.

Bei 15 mm Abstand in der Funkenstrecke *A* sprang der Funke zuerst in *B* über, als *B* auf 9,43 mm eingestellt war, und er sprang hier so lange über, bis *B* auf 9,82 mm eingestellt wurde. Wenn man nun die Strecke *B* wieder verkleinerte, sprang der Funke immer noch so lange in *A* über, bis *B* wieder auf 9,43 mm eingestellt wurde. Die mittlere Entladungsspannung, die einem Elektrodenabstand von 9,63 mm entspricht, wurde als Entladungsspannung in *A* angenommen. Hierbei ist der Unterschied beider Grenzen 0,39 mm und beträgt ca. 4 Proz. vom Mittelwert 9,63 mm. Diese Grenzen und ihr Unterschied sind aber nicht konstant, sondern hängen von verschiedenen Umständen ab, z. B. von der Unterbrechungszahl des Unterbrechers, von der Spannung im Induktor, von der Größe der Elektroden im Vergleichsfunkenmikrometer und endlich von dem Elektrodenabstand in *A* ab. Je größer die Unterbrechungszahl oder die Spannung oder die Größe der Elektroden in *B* und endlich je größer der Abstand in *A*, desto größer wird der Unterschied. Es wird also offenbar die Messung der Spannung genauer, wenn man eine möglichst kleine Unterbrechungszahl wählt und die Spannung möglichst gleich der Entladungsspannung macht.

Aus diesem Grunde habe ich einen Foucaultschen Pendelunterbrecher von ca. 2 Unterbrechungen pro Sekunde gewählt, nachdem ich es mit verschiedenen anderen Unterbrechern versucht hatte. Parallel zum Unterbrecher war immer eine große Kapazität geschaltet, die Unterbrechung selbst fand unter Petroleum statt.

Dieser Unterbrecher funktionierte bei kleinen Stromstärken sehr gut, bei größeren weniger gut, aber gestattet doch eine

Tabelle 1.

Luft. Elektroden: Magnesiumkugeln von 1 cm. Abstand: 1,8 mm.

Druck in Atm.	Abstand in mm, bei dem der Funke außen überspringt	Abstand in mm, bei dem der Funke innen überspringt	Mittel	Gesamt- mittel	Spannung in KV.
50,0	30,56	30,64	30,60	30,58	78,0
	30,54	30,62	30,58		
	30,52	30,60	30,56		
45,0	28,29	28,37	28,33	28,32	75,3
	28,28	28,36	28,32		
	28,27	28,35	28,31		
40,0	26,94	27,02	26,98	26,95	72,0
	26,92	27,00	26,96		
	26,87	26,95	26,91		
35,0	24,98	25,05	25,02	24,98	68,4
	24,93	25,00	24,97		
	24,91	24,98	24,95		
30,0	22,78	22,85	22,82	22,78	64,0
	22,74	22,81	22,78		
	22,71	22,78	22,75		
25,0	20,19	20,25	20,22	20,18	58,4
	20,14	20,22	20,18		
	20,10	20,17	20,14		
20,0	17,39	17,46	17,43	17,41	51,4
	17,38	17,44	17,41		
	17,37	17,43	17,40		
15,0	13,76	13,82	13,79	13,75	43,0
	13,71	13,79	13,75		
	13,69	13,75	13,72		
10,0	9,91	9,97	9,94	9,91	32,6
	9,87	9,93	9,90		
	9,85	9,91	9,88		
5,0	4,84	4,90	4,87	4,85	18,0
	4,83	4,89	4,86		
	4,79	4,88	4,81		

genügend genaue Messung und war immerhin besser als die anderen Unterbrecher.

Die oben erwähnte Abhängigkeit der zu messenden Größen von den verschiedenen Versuchsbedingungen, deren Gründe vielleicht in Lichtbogenscheinungen zu suchen sind, wäre an und für sich sehr interessant zu studieren. Ich möchte hier aber nicht zu weit darauf eingehen, sondern werde nur an einigen Beispielen (vgl. Tab. 1) zeigen, wie genau die Spannung gemessen werden konnte. Die kleine bei jeder Versuchsreihe merkliche Abnahme des Funkenpotentials beim zweiten Versuch gegen den ersten, des dritten Versuchs gegen den zweiten beruht auf der unten näher besprochenen chemischen Änderung der Luft durch den Funkenübergang.

Hier soll erwähnt sein, daß ich immer im Vergleichsfunkenmikrometer Elektroden aus Magnesium von 5 cm Durchmesser gebraucht habe. Den Wert der Entladungsspannung habe ich aus den Zahlen berechnet, die in dem Lehrbuch von Kohlrausch¹⁾ angegeben sind.

b) Die Messung des Elektrodenabstandes.

Der Elektrodenabstand im Innern des Gefäßes wurde durch Vergleich der Entladungsspannung mit einer anderen Funkenstrecke bestimmt, deren Elektrodenabstand bekannt war, da sich die direkte Messung des Abstandes im Innern sehr schwierig gestaltet hätte.

Dabei wurde das Gefäß mit Luft in Atm.-Druck gefüllt und die Elektrode des Vergleichsfunkenmikrometers wurde von derselben Größe wie im Gefäß gewählt, um für beide Funkenstrecken möglichst gleiche Bedingungen herzustellen.

Beispiel: Bei einem gewissen Abstand der Elektroden im Gefäß betrug der Abstand der äußeren Funkenstrecke, bei der der Funke im Innern übersprang, 1,10 mm, hingegen sprang der Funke außen bei dem Abstand 1,06 mm über. Also nahm ich 1,08 mm als Elektrodenabstand der Funkenstrecke im Gefäß an.

c) Die Oberfläche der Elektroden.

Da bei meinem Gefäß die Funkenstrecke sich von außen nicht variieren ließ, konnte ich nicht immer die Oberfläche

1) F. Kohlrausch, Lehrbuch für prakt. Physik. p. 720. Leipzig 1910.

der Elektroden frisch putzen, sondern mußte sie während einer ganzen Beobachtungsreihe unberührt lassen.

Es wäre sehr umständlich gewesen, die Oberfläche der Elektrode bei jedem Versuch wieder in blanken Zustand zu versetzen, weil man jedesmal das Gefäß hätte aufmachen müssen. Auch wäre es unmöglich gewesen, jedesmal wieder genau den gleichen Abstand zu erhalten. Also habe ich absichtlich immer stark benutzte Elektroden verwendet, damit keine weiteren Änderungen der Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden durch die Funken mehr eintreten konnten. Da zwei Messungen des Funkenabstandes vor und nach dem Übergang von vielen Funken miteinander sehr gut übereinstimmten, bin ich sicher überzeugt, daß die Oberfläche der Elektroden bei einer bestimmten Funkenstrecke während einer Versuchsreihe unverändert blieb, und daß meine Ergebnisse durch Veränderungen der Elektrodenoberfläche während einer Versuchsreihe nicht merklich beeinflußt sind.

d) Die Funkenverzögerung.

Bei hohem Druck ist die Funkenverzögerung viel stärker als bei niedrigem Druck, so daß man ohne künstliche Ionisation keine regelmäßige Messung machen kann.

Wie Fig. 2 zeigt, habe ich die Funkenstrecke im Gefäß mit einer Bogenlampe beleuchtet. Das Licht wurde durch eine Quarzlinse, deren Brennweite ca. 9,1 cm betrug, auf die Funkenstrecke konzentriert. Die äußere Funkenstrecke wurde mit einem Radiumpräparat, zuweilen mit einer Bogenlampe bestrahlt.

Da eine Herabsetzung der Funkenspannung durch Bestrahlung eintreten kann, wie sie zuerst von Swyngedauw erwähnt und von Herweg¹⁾ genau untersucht worden ist, muß man mit der Bestrahlung vorsichtig zu Werke gehen. Man muß nämlich die Stärke der Hilfsionisation so wählen, daß sie bloß die Funkenverzögerung aufhebt, aber nicht etwa eine Herabsetzung des Funkenpotentials bewirkt.

Um mich hiervon zu überzeugen, habe ich die Lichtstärke der Bogenlampe variiert, indem ich verschiedene Bogenlampen verwendete und die Stromstärke variierte. Ich fand aber

1) J. Herweg, *Ann. der Phys.* **24.** p. 326. 1907.

keinen Unterschied in der Entladungsspannung, obgleich ich die Stromstärke z. B. von 3 Amp. bis 25 Amp. veränderte. Ich muß daraus in Übereinstimmung mit C. Müller¹⁾ schließen, daß bei einer Hilfsionisation durch eine Bogenlampe keine merkliche Herabsetzung des Funkenpotentials eintritt, sondern nur die Verzögerung aufgehoben wird.

e) Die chemische Veränderung des Gases durch den Funkenübergang.

Durch den Funkenübergang tritt eine chemische Veränderung der Gase ein, die bei hohem Druck viel stärker zu sein scheint, als bei niedrigem,

Die Luft, in der viele Funken übergesprungen sind, zeigt eine gelbe Farbe, die vermutlich von NO_2 herrührt.

Elektroden in Kohlensäure werden nach einigen Funken durch Niederschlag von Kohlenstoff schwarz gefärbt.

Bei Sauerstoff kann man sich durch den Geruch leicht überzeugen, daß durch den Funken sich Ozon bildet.

In Luft springt der erste Funke schwerer über als der zweite und die folgenden. So bekommt man in frischer Luft einen größeren Wert für die Entladungsspannung als in Luft, in der schon viele Funken übergegangen sind, obgleich Druck und Elektrodenabstand immer gleich sind.

In nachstehender Fig. 3 (zur Tab. 2) gebe ich zwei Kurven, die ich bei einer bestimmten Funkenstrecke erhielt. Die Kurve 1 habe ich bekommen, als ich immer mit frischer Luft beobachtete. Die Kurve 2 habe ich bekommen, als ich in der Weise beobachtete, daß ich erst das Gefäß mit frischer Luft bis zu 50 Atm. füllte, dann die Entladungsspannung maß und nun die Luft ausströmen ließ, bis sich der Druck zu 48 Atm. ermäßigte, dann wieder die Spannung maß usw.

Die Verschiedenheit beider Kurven ist nur der chemischen Veränderung des Gases durch den Funken zuzuschreiben. Da chemische Veränderungen bei fast allen Gasen vorkommen, habe ich bei meiner Beobachtung immer mit frischem Gas natürlich aus ein und derselben Bombe gearbeitet. Bei Beobachtung anderer Gase — außer Luft — habe ich das Gefäß mit einer Wasserstrahlpumpe evakuiert und dann mit dem

1) C. Müller, Berliner Dissertation. p. 94. 1908.

betreffenden Gas gefüllt, dann wieder evakuiert und so fort, und dies etwa zehnmal wiederholt.

Hier sei erwähnt, daß ich die Bomben für die verschiedenen Gase — außer Kohlensäure — von der Sauerstoff-fabrik Berlin bezogen habe und daß die Resultate für ein und dasselbe Gas aus verschiedenen Bomben gut miteinander übereinstimmen. Es sei auch noch erwähnt, daß die Gase chemisch ziemlich rein waren, was man auch daraus entnehmen kann, daß die Resultate für Luft, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff bei 1 Atm. mit den Resultaten der anderen Autoren ziemlich gut übereinstimmen.

Fig. 3.

Tabelle 2. (Zur Fig. 3.)

Nr.	Funkenpotentiale in KV. bei dem Drucke in Atm.									
	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
1	78,0	75,3	72,0	68,4	64,0	58,4	51,4	43,0	32,6	18,0
2	78,0	74,7	71,0	66,5	61,4	55,6	48,1	39,6	29,2	15,0

Gas: Luft. Elektrodenabstand: 1,08 mm.

§ 4. Der Einfluß von Größe und Gestalt des Gefäßes auf das Funkenpotential.

Um einen etwaigen Einfluß der Gefäßwandungen und der Größe des Raumes, in dem der Funke überspringt, auf das Funkenpotential, welcher nach der Arbeit von Bouty¹⁾ über die Kohäsion eines Dielektrikums zu vermuten war, festzustellen, wurde ein neues Gefäß konstruiert.

1) M. E. Bouty, Compt. rend. p. 1207. 1900; p. 25. 1913.

Wie man aus nachstehender Fig. 4 leicht ersehen kann, wurden an den beiden Enden eines Messingzylinders von 6 cm äußerem und 4 cm innerem Durchmesser Isolatoren aus Hartgummi, die die Elektroden und Zuleitungen trugen, durch eiserne Kappen festgeschraubt. Zwischen Metall und Hartgummi befand sich eine Lederdichtung. Das Gefäß hatte natürlich ein Quarzfenster zur Bestrahlung und eine Öffnung zur Zuführung des Gases.

Fig. 4.

Dieses Gefäß besaß einige Vorteile gegenüber dem obigen. Erstens konnte man durch Hineinschieben eines Zylinders aus Metall oder Hartgummi den Inhalt des Gefäßes variieren. Zweitens zeigte sich keine elektrische Sprühwirkung, weil der Isolator dicker war. Endlich war es sehr handlich. Leider war es nicht so luftdicht, wie ich erwartete. Die Beobachtungen mit diesem Gefäße ergaben bei verschiedenem Volumen keinen merkbaren Unterschied von den früheren Resultaten, solange man immer mit frischem Gas arbeitete. Wenn man aber mit einer bestimmten Menge Gas hintereinander eine Reihe von Beobachtungen machte, ergab sich ein Unterschied, dessen Grund in der oben besprochenen chemischen Veränderung des Gases liegt.

§ 5. Beobachtungen mit einer Influenzmaschine.

Um diese Arbeit zu vervollständigen, wurden einige Beobachtungen mit einer 20 plattigen Töplerschen Influenzmaschine gemacht. Dabei wurde die Influenzmaschine an Stelle des Induktoriums verwendet und sonst die Versuchsanordnung beibehalten. Nur die Zuleitungen wurden wegen des Sprühens besser wie früher isoliert, indem alle Drähte mit Wachs überzogen wurden.

Die Messungen wurden ganz ähnlich wie früher ausgeführt. Die Geschwindigkeit der Maschine war so regulier-

bar, daß die Funken in langsamer Aufeinanderfolge übersprangen. In dieser Weise konnte man die Entladungsspannung genauer bestimmen als mit dem Induktorium. Das Ergebnis war kein anderes wie vorher und stand in guter Übereinstimmung mit den Resultaten der Herren Swyngedauw und Algermissen.

Endlich sei hier erwähnt, daß die Beobachtungen, die ich statt mit Preßgaskondensatoren mit einer größeren Leidener Flasche (zwei in Serie) gemacht habe, ebenfalls die gleichen Resultate ergaben. Es ist also, wie zu erwarten, die Art und Größe des Kondensators ohne Einfluß.

§ 6. Die Resultate bei Funkenübergang in Luft.

Folgende Tabelle faßt kurz die Ergebnisse der Untersuchungen zusammen. Die erhaltenen Werte sind Mittelwerte aus mindestens vier Beobachtungen, die gut untereinander übereinstimmen, wie man leicht aus der Tab. 1 ersehen kann.

Bei den folgenden Tabellen sind ebenfalls nur die Mittelwerte angegeben.

Tabelle 3. (Zur Fig. 5 u. 6.)

Luft. Elektrode: Magnesiumkugel von 1 cm Durchmesser.

Druck in Atm.	Funkenpotentiale in KV. bei den Abständen in mm							
	0,52	0,65	0,89	1,08	1,30	1,50	1,65	1,82
1,0	2,0	3,7	5,0	5,7	6,9	7,3	7,7	7,9
5,0	9,5	12,4	15,2	18,0	21,1	23,9	25,9	28,0
10,0	18,1	22,0	28,4	32,6	37,4	41,5	44,3	48,0
15,0	25,0	29,3	37,0	43,0	49,0	54,4	58,3	61,4
20,0	30,2	35,3	44,3	51,4	58,0	64,0	67,8	72,3
25,0	34,2	40,3	50,0	58,4	65,4	71,6	75,9	80,7
30,0	38,0	44,8	55,5	64,0	71,6	78,5	82,9	87,8
34,0	41,0	48,5	59,6	68,4	76,4	83,7	88,0	93,3
40,0	44,0	51,5	63,0	72,0	80,4	88,0	92,5	98,5
45,0	46,5	54,0	66,1	75,3	83,9	91,7	96,7	102,8
50,0	48,7	56,2	68,8	78,0	87,1	95,0	100,5	106,9
55,0	50,7	58,1	70,9	80,3	89,9	98,0	103,9	110,2
60,0	52,2	59,8	72,9	82,4	92,4	100,8	106,7	112,9
65,0	53,3	61,2	74,7	84,1	94,5	103,2	109,0	115,3
70,0	54,0	62,6	76,1	85,5	96,4	105,2	110,6	117,0

Fig. 6.

Fig. 5.

Fig. 8.

Fig. 7.

§ 7. Die Resultate für Stickstoff.

Tabelle 4. (Zur Fig. 7 u. 8.)

Stickstoff. Elektroden: Magnesiumkugeln von 1 cm Durchmesser.

Druck in Atm.	Funkenpotentiale in KV. bei den Abständen in mm					
	0,65	0,89	1,08	1,30	1,50	1,82
1,0	3,9	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
5,0	13,5	17,5	20,7	24,0	26,3	29,8
10,0	23,0	29,5	33,5	38,4	43,0	48,8
15,0	30,2	37,9	43,7	49,9	55,3	62,1
20,0	35,9	44,9	51,7	58,9	64,9	73,0
25,0	39,8	49,7	57,5	65,5	72,1	81,1
30,0	43,4	53,8	62,2	70,6	77,8	87,0
35,0	46,4	57,4	66,2	74,9	82,1	92,2
40,0	49,4	60,6	69,7	78,8	85,9	96,5
45,0	51,7	63,4	72,8	82,0	89,2	99,8
50,0	53,9	66,0	75,6	84,8	92,7	103,2
55,0	55,4	68,1	77,8	87,3	95,4	106,0
60,0	57,0	70,0	79,8	89,6	98,0	108,3
65,0	58,2	71,4	81,6	91,8	100,2	110,4
70,0	59,4	72,6	83,2	93,8	102,0	112,0

§ 8. Die Resultate für Kohlensäure.

Tabelle 5. (Zur Fig. 9 u. 10.)

Kohlensäure. Elektroden: Magnesiumkugeln von 1 cm Durchmesser.

Druck in Atm.	Funkenpotentiale in KV. bei den Abständen in mm					
	0,65	0,89	1,08	1,30	1,50	1,82
1,0	3,2	4,3	5,0	5,7	6,5	7,5
5,0	10,0	13,8	16,5	20,0	22,5	26,3
10,0	18,8	24,0	28,2	32,2	36,4	42,0
15,0	25,5	31,4	37,1	42,5	46,9	55,3
20,0	31,4	38,4	44,5	50,6	56,4	64,9
25,0	36,2	44,3	51,1	58,0	64,5	73,0
30,0	41,0	49,8	57,1	64,6	71,6	80,0
35,0	45,4	54,6	61,4	70,5	77,5	87,9
40,0	49,4	59,4	67,5	75,5	83,1	93,1
45,0	53,1	63,8	72,2	80,0	87,8	97,8
50,0	56,5	68,0	76,5	84,8	92,6	102,1
55,0	60,0	71,7	80,5	88,5	96,3	106,0
60,0	63,2	75,1	84,3	92,5	100,0	109,8
65,0	66,3	78,1	87,8			
70,0	69,0	81,1	90,6

Fig. 10.

Fig. 9.

§ 9. Die Entladungsspannung in einem Gemisch von Stickstoff und Wasserstoff.

Um die Abhängigkeit der Entladungsspannung von einem erheblichen Zusatz anderer Gase zu studieren, wurden einige Beobachtungen in einem Gemisch von Stickstoff und Wasserstoff durchgeführt.

Fig. 11.

Durch ein T-förmiges Stahlrohr wurde eine Bombe mit Stickstoff und eine Bombe mit Wasserstoff mit dem Gefäß luftdicht so verbunden, daß man beliebig Stickstoff oder Wasserstoff einlassen konnte. In den nachstehenden Gemischen beider Gase wurde die Funkenspannung beobachtet:

1. N allein.
2. Zuerst N bis 30 Atm., dann Nachfüllung von H bis zum
Gesamtdruck von 35 Atm.
3. desgleichen Gesamtdruck von 40 Atm.

4. Zuerst N bis 30 Atm., dann Nachfüll. v. H bis z. Gesamtdr. v. 50 Atm.
5. " N " 30 " " " " H " " 60 "
6. " H " 30 " " " " N " " 50 "
7. " H " 30 " " " " N " " 45 "
8. " H " 30 " " " " N " " 40 "
9. " H " 30 " " " " N " " 35 "
10. Wasserstoff allein.

Nachdem beide Gase eingelassen waren, ließ ich nach einer Viertelstunde das Gemisch ausströmen, bis der Gesamtdruck den gewünschten Wert erreicht hatte. Diese Beobachtungen waren sehr mühsam, weil man bei jeder Beobachtung diesen Prozeß wiederholen mußte, um die schon erwähnte chemische Veränderung des Gases zu vermeiden. Die Resultate sind folgende:

Tabelle 6. (Zur Fig. 11.)

Elektroden: Goldkugeln von 1 cm Durchmesser. Abstand: 0,58 mm.

Gemisch		Funkenpotentiale in KV. bei dem Drucke in						
Nr.	Verhältnis		5 Atm.	10Atm.	15Atm.	20Atm.	25 Atm.	30 Atm.
1	N : allein	Beob.	12,7	20,5	27,2	32,8	37,2	41,0
2	N : 30 H : 5	Beob.	11,6	19,3	25,2	30,0	34,5	38,3
		Ber.	11,8	19,1	25,3	30,4	34,6	38,0
3	N : 30 H : 10	Beob.	11,0	18,0	23,5	28,2	32,5	36,0
		Ber.	11,1	18,0	23,9	28,7	32,5	35,7
4	N : 30 H : 20	Beob.	10,4	16,5	21,6	26,0	30,0	33,5
		Ber.	10,2	16,5	21,8	26,2	29,7	32,6
5	N : 30 H : 30	Beob.	9,5	15,5	20,0	24,2	27,5	30,4
		Ber.	9,6	15,5	20,5	24,5	27,8	30,5
6	N : 20 H : 30	Beob.	8,8	14,0	18,8	22,3	25,6	28,4
		Ber.	8,9	14,5	19,2	22,8	25,8	28,4
7	N : 15 H : 30	Beob.	8,2	13,3	17,5	21,2	24,4	27,0
		Ber.	8,5	13,8	18,3	21,7	24,6	27,0
8	N : 10 H : 30	Beob.	7,6	12,5	16,3	19,8	22,9	25,5
		Ber.	8,0	13,0	17,2	20,4	23,0	25,3
9	N : 5 H : 30	Beob.	7,0	11,5	15,0	17,8	20,2	22,0
		Ber.	7,3	11,4	15,7	18,6	20,9	23,0
10	H : allein	Beob.	6,4	10,5	13,8	16,2	18,2	20,0

In der vorhergehenden Tab. 6 sind die Werte für Funkenpotential, welche nach der Formel

worden, um den Funkenabstand unverändert beizubehalten. Dabei wurden Elektroden aus Gold benutzt, da die Gase, besonders Sauerstoff, die Oberfläche der Elektroden beeinflussen konnten.

Da die Resultate der Luft, die sich aus zwei Beobachtungen, einer ersten und einer letzten, ergaben, untereinander sehr gut übereinstimmten, ist es sicher, daß der Funkenabstand während der ganzen Beobachtung sich gleich blieb.

Die Kurven für Luft, Kohlensäure und Stickstoff stimmen sehr gut überein mit den früheren Resultaten, die ich mit Magnesiumelektroden bekam.

Wie man aus der Fig. 12 sieht, haben die Kurven einen parabolischen Gang. Es soll versucht werden, die Beobachtungen durch eine Gleichung $ay^2 + by + c = x$ darzustellen, worin y das Funkenpotential in Kilovolt, und x den Druck in Atmosphären bedeutet. Durch die Methode der kleinsten Quadrate bekam ich die folgenden Gleichungen:

Fig. 12.

Für Luft	$20 y^2 - 402 y + 6902 = 1000 x$,
„ Sauerstoff	$15 y^2 - 135 y + 5000 = 1000 x$,
„ Stickstoff	$27 y^2 - 580 y + 7860 = 1000 x$,
„ Kohlensäure	$14 y^2 - 15 y + 4787 = 1000 x$,
„ Wasserstoff	$55 y^2 - 180 y + 3200 = 1000 x$,
„ Leuchtgas	$25 y^2 - 175 y + 1630 = 1000 x$.

Die berechneten Werte von y für die verschiedenen Gase bei verschiedenem Druck sind in der Tab. 7 neben den beobachteten angegeben. Sie stimmen für die größeren Werte von x ziemlich gut überein. Bei den kleineren Werten von x sind die Abweichungen größer und bei dem Druck von 1 Atm. erhält man bei allen Gasen komplexe Werte für y . Der Verlauf des Funkenpotentials mit dem Druck läßt sich also nur für höheren Druck durch eine derartige Gleichung wiedergeben.

Zusammenfassung.

Es wurde die Abhängigkeit des Funkenpotentials in verschiedenen Gasen vom Druck zwischen 1 und ca. 75 Atm. untersucht.

Als Hauptfehlerquellen erwiesen sich dabei:

- a) die Warburgsche Funkenverzögerung,
- b) die chemischen Veränderungen der Gase infolge des Durchgangs der Funken.

Auf nicht genügender Beachtung dieser Fehlerquellen dürften die Widersprüche beruhen, die die Resultate früherer Arbeiten untereinander und mit den meinigen aufweisen.

Die wichtigsten Ergebnisse der vorstehenden Untersuchungen sind:

1. *Das Paschensche Gesetz ist für hohen Druck nicht mehr gültig.* Die Zunahme des Entladungspotentials erfolgt nicht linear mit der Druckzunahme, sondern langsamer. Bei Drucken zwischen 10 und 75 Atm. läßt sich die Abhängigkeit annähernd durch eine Parabel darstellen. Unter 10 Atm. nimmt die Kurve mit abnehmendem Druck immer mehr einen linearen Charakter an.

2. Für verschiedene Gase sind die Krümmungen der Kurven verschieden, also schneiden sich zwei Kurven zuweilen miteinander, z. B. schneidet die Kurve für Sauerstoff und die für Kohlensäure die Kurven für Luft und Stickstoff.

3. In einem Gemisch von zwei Gasen hat das Funkenpotential einen Wert, welcher zwischen den beiden Werten der einzelnen Gase bei demselben Druck liegt und proportional dem Verhältnis des Gemisches ist.

4. Für die praktische Verwendung eines Gases für Preßgaskondensatoren ist Kohlensäure am empfehlenswertesten, obgleich die Durchschlagfestigkeit von Sauerstoff größer ist, doch ist die Verwendung von Sauerstoff wegen seiner Reaktionsfähigkeit ungünstig und gefährlich.

An dieser Stelle möchte ich meinem verehrten Lehrer, Hrn. Geheimrat Prof. M. Wien für seinen Rat und Hrn. Prof. K. Baedeker, der mir sein Radiumpräparat zur Verfügung stellte, meinen herzlichsten Dank sagen.

Jena, Physikal. Institut der Universität, August 1913.

(Eingegangen 20. Mai 1914.)