

**9. Untersuchungen an Inductorien  
an Hand der Bestimmungsstücke derselben;  
von Fr. Klingelfuss.**

(Aus den Verhandl. d. naturf. Gesellsch. in Basel, Bd. XIII.)

---

Durch eine Reihe der wichtigsten Entdeckungen der letzten Jahrzehnte wurde das Interesse für das Inductorium wieder mehr in den Vordergrund gerückt. Kurz nach der Entdeckung der X-Strahlen war eine so grosse Nachfrage nach Inductorien, dass die damals für die Anfertigung solcher Apparate eingerichteten wenigen Werkstätten nicht in der Lage waren, den augenblicklichen Bedarf zu decken. Die Folge davon war, dass sich auch die Technik mehr für diese Apparate zu interessiren begann. Die auf Erfahrung begründeten Constructionsregeln waren nicht allgemein bekannt und rationelle Anhaltspunkte für den Bau solcher Apparate waren in der Literatur nirgends zu finden.<sup>1)</sup> Man kannte nicht die Abhängigkeit der Funkenlänge von der Windungszahl, nicht den Einfluss grösserer oder kleinerer Eisenmassen, nichts Bestimmtes über die für verschiedene Funkenlängen erforderliche elektromotorische Kraft in der secundären Spule und nicht zuletzt, nichts über den Einfluss der Condensatoren bei den in Betracht kommenden Vorgängen und man hatte nur eine unklare Vorstellung über diese Vorgänge selbst.

Um daher nicht auf ein unsicheres Umhertasten angewiesen zu sein, habe ich es unternommen, von Grund auf die Bedingungen an den Bestimmungsstücken solcher Apparate zu untersuchen. Die bei dieser Gelegenheit gemachten Beobachtungen gaben mir dann die Möglichkeit an die Hand, den bisherigen Inductorien in ihrer Leistung sehr weit überlegene Apparate herzustellen. Ich komme einem mehrfach ausgesprochenen Wunsche nach, indem ich die Resultate meiner Beobachtungen im Nachstehenden veröffentliche.

---

<sup>1)</sup> H. du Bois, *Magnetische Kreise*, § 178—179, Berlin 1894.

## I. Funkenlänge und Windungszahl.

Stellt man sich Sätze von Spulen von bestimmter Anzahl gut isolirter Windungen her, und bringt dieselben als secundäre Wicklung nach und nach auf einen Eisenkern, welcher mit einer primären Wicklung versehen ist, und welcher durch die ganze Versuchsreihe *auf gleiche Magnetisirung* gebracht wird, so findet man, *dass die Funkenlänge der secundären Spulen mit der Windungszahl in gleichem Verhältniss wächst.*

Hierbei ist vorausgesetzt, dass die Capacität des Condensators während der Versuchsreihe nicht verändert werde.

Vergleicht man die Funkenlänge, welche bei Anwendung von stabförmigen Eisenkernen beobachtet worden ist, mit der Funkenlänge, welche man mit der gleichen Anzahl secundärer Windungen erhält, wenn der stabförmige Eisenkern durch einen nahezu geschlossenen Eisenkern ersetzt wird, Fig. 1, so findet man, dass bei letzterem die Funkenlänge erheblich grösser ausfällt. Die auf diese Weise erhaltenen Resultate sind in der Tab. I zusammengestellt, und zwar enthält die erste Reihe die Windungszahlen  $n_2$  der secundären Spule, die zweite und dritte die zugehörigen Funkenlängen ( $f_2$ ), a) für stabförmige, und b) für nahezu geschlossene Eisenkerne.

Tabelle I.

		$n_2$ 6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000
$(f_2)$ }	a)	6	$8\frac{1}{2}$	11	$13\frac{1}{2}$	16	$18\frac{1}{2}$	21	$23\frac{1}{2}$ cm
	b)	$7\frac{1}{2}$	$12\frac{1}{2}$	$17\frac{1}{2}$	$22\frac{1}{2}$	$27\frac{1}{2}$	$32\frac{1}{2}$	$37\frac{1}{2}$	$42\frac{1}{2}$ „

Es unterliegt keinem Zweifel, dass bei gleicher Magnetisirung und Windungszahl mit dem geschlossenen oder doch nahezu geschlossenen Eisenkern eine stärkere Inductionswirkung stattfindet, insbesondere sind die damit erzielten Funkenentladungen auch bedeutend dicker (von grösserer Stromstärke) als das bei stabförmigen Eisenkernen der Fall ist. Auf dieses Resultat hat Hr. du Bois<sup>1)</sup> schon hingewiesen, es wird aber hier zum erstenmal experimentell bestätigt.

Der Spalt (Luftstrecke) bei C in diesem Eisenkern musste 1 cm lang sein, um die Maximalwirkung zu erhalten. Bei ganz geschlossenem Eisen ging die Leistung erheblich zurück.

1) H. du Bois, Magnetische Kreise, p. 293, Berlin 1894.

Hr. Veillon<sup>1)</sup> hat an einem von mir hergestellten Inductorium mit nahezu geschlossenem Eisenkern Messungen angestellt über den Einfluss der grösseren oder kleineren Luftstrecke auf die Induction. Der Eisenkern des hierzu verwendeten Inductoriums hatte die in Fig. 1 abgebildete Form. Das obere Joch  $DD_1$  liess sich entfernen, wodurch die Luftstrecke für die Schliessung der magnetischen Kraftlinien 23 cm lang wurde. Auf diese Weise konnte die Messung für eine Luftstrecke von 1 cm und von 23 cm ausgeführt werden. Hier-

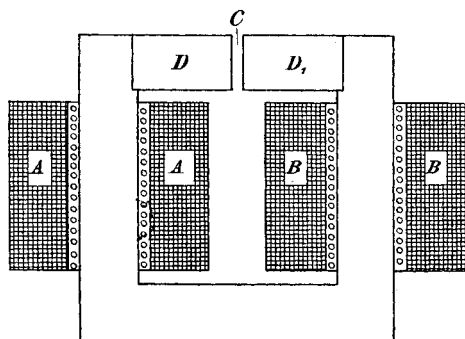


Fig. 1.

bei hat er gefunden, dass die Induction etwa dreimal grösser ist bei einer Luftstrecke von 1 cm als bei einer solchen von 23 cm Länge.

Mit einem Eisenkern von geschlossener Form kann man die Beobachtungen über  $42\frac{1}{2}$  cm Funkenlänge hinaus nur fortsetzen, wenn man der U-Form des Kernes ausserordentliche Dimensionen giebt; weil die auf beiden Schenkeln untergebrachten Spulenhälften A und B Fig. 1 sich mit ihren Windungen höchster Potentialdifferenz infolge dieser Anordnung derart nähern, dass bei weiterer Steigerung der Funkenlänge (Spannung) Entladungen zwischen den beiden Spulen stattfinden. Es ist also eine rein constructive Sache, grössere Apparate mit geschlossenem Eisenkern zu versehen. Bei diesen Messungen waren die Spulen mitsamt dem Eisenkern in einem

1) Henri Veillon, Archives des sciences physiques et naturelles, cent troisième année, Genf 1898.

flüssigen Isolator untergebracht. Der Unannehmlichkeiten halber, die flüssige Isolatoren mit sich bringen, habe ich später die gleichen Spulen in einen festen Isolator eingebettet, durfte alsdann jedoch die maximale Funkenlänge nicht über 35 cm steigern, wegen der grossen Nähe des Eisens in Bezug auf die Pole der Spulen, von wo aus bei weiterer Steigerung der Funkenlänge Entladungen auf das Eisen stattfinden.

Deshalb sind die nachfolgenden Beobachtungen bis zu 100 cm Funkenlänge vorderhand nur an stabförmigen Eisenkernen vorgenommen worden.

Diese Resultate sind in der Tab. Ia zusammengestellt, in der ersten Reihe die Windungszahlen  $n_2$  der secundären Spule, in der zweiten die zugehörige Funkenlänge ( $f_2$ ).

Tabelle Ia.

$n_2$	20000	30000	40000	50000	60000	70000	80000	84000
( $f_2$ )	23 $\frac{1}{2}$	35	47 $\frac{1}{2}$	58 $\frac{1}{2}$	71 $\frac{1}{2}$	83 $\frac{1}{2}$	96	100 cm

Die bei diesen Messungen verwendeten Eisenkerne wurden aus bestem schwedischen Bleche von 0,05 cm Dicke hergestellt. Die Kerne hatten quadratischen Querschnitt mit gebrochenen Ecken. Die Seite des Quadrates verhält sich zur Länge der Kerne etwa wie 1:20.

Wurden stabförmige Eisenkerne von sehr grossem Querschnitt in Bezug auf die Länge derselben verwendet (Verhältnis der Quadratseite zur Länge etwa 1:12), so erhöhten sich die erreichbaren Funkenlängen um etwa 25 Proc.

Als Unterbrecher wurde bei diesen und allen nachfolgend beschriebenen Versuchen ein etwa 6 kg Quecksilber enthaltendes Glasgefäss benutzt. Ueber dem Quecksilber befand sich eine etwa 10 cm hohe Petroleumschicht. Die eine Stromleitung war dauernd mit dem Quecksilber im Contact, während die andere Zuleitung — ein amalgamirter Kupferdraht — von Hand ein- und ausgetaucht wurde. Das Austauschen hat mit einer gewissen Geschwindigkeit zu geschehen, deren Grad man durch einige Uebung bald herausfindet.

Als Maassstab für die thatsächliche Länge, welche ein Funken zwischen positiver stumpfer Spitze und negativer Platte in Luft durchschlägt, wurde die von Hrn. Walter<sup>1)</sup> angegebene

1) B. Walter, Wied. Ann. 62. p. 301. 1897.

Methode benutzt. Da dieselbe für den Zweck praktisch ist, wurden die vor Erscheinen jener Arbeit gemachten Beobachtungen, soweit diese Methode einen Einfluss auf die Resultate haben konnte, nachgeprüft.

Um für die Folge Unklarheit diesbezüglich zu vermeiden, schicken wir voraus, dass wir den für die Magnetisirung verwendeten, sogenannten primären Strom, jenen Strom also, der die Unterbrecher-Contacts und die primäre Wicklung zu durchlaufen hat, kurzweg den *Magnetisirungsstrom* nennen.

Vergleicht man die in obigem erhaltenen Daten mit solchen der bisher bekannten Inductorien, so findet man einen auf-

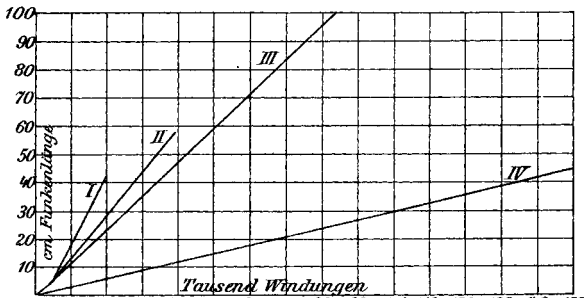


Fig. 2.

fallenden Unterschied in der für die Erreichung einer gewissen Funkenlänge nötigen, und der in solchen Apparaten untergebrachten Anzahl Windungen, soweit hierfür überhaupt Angaben erhältlich sind. So z. B. besitzt ein von Carpentier in Paris in den letzten Jahren gebautes Inductorium für 40 bis 45 cm Funkenlänge 153 000 Windungen<sup>1)</sup>, während nach unseren Versuchen für stabförmige Eisenkerne 38 000 Windungen, also der vierte Teil derselben genügt haben würden.

Zur besseren Uebersicht sind die Resultate der Tab. I und Ia in vorstehender Fig. 2 graphisch dargestellt, und vergleichshalber die Curve für das Carpentier'sche Inductorium, bezogen auf die maximale Funkenlänge und Windungszahl mit eingezeichnet. Die Windungszahlen sind als Abscissen, die Funkenlängen als Ordinaten aufgetragen. Die Curve III stellt

1) H. Veillon, Archives des sciences physiques et naturelles, Genf 103 année, Octobre 1898.

die Resultate für den stabförmigen, die Curve I diejenigen für den geschlossenen Eisenkern, und die Curve II einige Werte, welche mit sehr dicken Eisenkernen erhalten worden sind, dar. Die Curve IV endlich bezieht sich auf bezügliche Werte des Carpentier'schen Inductoriums.

Setzt man voraus, dass zum Durchschlagen einer Funkenstrecke von bestimmter Länge ein für allemal eine ganz bestimmte minimale Potentialdifferenz an den Enden der Spule hervorgebracht werden muss, so ist leicht einzusehen, dass die Potentialdifferenz zwischen benachbarten Windungen einer solchen Spule um so höher sein wird, je kleiner die Windungszahl derselben ist. Es setzen demnach Spulen, wie die hier in Frage stehenden, voraus, dass deren Windungen, in dem Verhältnis, wie die Windungszahl kleiner ist, besser isolirt werden müssen.

Ist nun die Feststellung der Proportionalität von Windungszahl und Funkenlänge an sich weniger überraschend, so sind die erhaltenen Werte doch nützlich für die Vorausberechnung einer Spule für irgend eine Funkenlänge. Andererseits *ist die genaue Kenntnis der Windungszahl solcher Spulen für exacte Arbeiten mit solchen eine unerlässliche Bedingung, vorausgesetzt, dass jede Windung innerhalb der Spule von benachbarten derart isolirt ist, dass Kurzschlüsse zwischen den Windungen dauernd ausgeschlossen sind.* Das erfordert selbstverständlich eine ausserordentlich sorgfältige Wicklung und Isolation jeder einzelnen Windung.

Aber nicht allein das, es muss auch die ganze Spule eines Inductoriums aus einem fortlaufenden Draht hergestellt werden, damit die zwischen den sonst üblichen Teilspulen nötigen Verbindungen, deren Spitzenwirkungen innerhalb der Spule sich jeder Controle entziehen, vermieden werden können. Erst dann wird man Spulen haben, auf deren Windungen man sich verlassen kann, und *deren Windungszahl als Factor in der Rechnung* benutzt werden darf, wie dies später gezeigt werden soll.

Es gelang mir nach vielen zeitraubenden Versuchen, Spulen herzustellen, welche diesen Bedingungen in weitgehendstem Maasse entsprechen. Ich behalte mir vor, dieses Thema später in einer besonderen Arbeit zu behandeln.

## II. Die Bedeutung des Extrastromes für die inducirte Spannung.

Die Kenntnis der Spannungen (Potentialdifferenzen), welche für gewisse Funkenlängen auftreten können, ist für die Herstellung solcher Spulen äusserst wichtig. Ohne diese Kenntnis ist der Bau grösserer Spulen geradezu unmöglich, derjenige kleinerer Spulen zum mindesten unrationell, weil die für die inducirten Spannungen nötigen Isolationsstärken nicht bestimmt werden können.

So stellte ich unter Aufwendung sehr grosser Kosten eine Spule mit den erforderlichen Windungen für 150 cm Funkenlänge zusammen. Die Stärke der Isolation wurde bei dieser Spule proportional derjenigen gemacht, welche sich an Spulen von 40—50 cm Funkenlänge als ausreichend stark erwiesen hatte. Sie wurde zur Sicherheit noch etwas stärker ausgeführt.

Bei der Prüfung durchschlug aber der Funke die sehr teure Isolation dieser Spule schon, als erst 110 cm Funkenlänge erreicht waren, und die Spule war dabei so ruinirt, dass sie nicht mehr zu gebrauchen war.

Wie aus später angestelltem Versuche hervorging, war hier die Gefahr, dass der Funke durchschlagen konnte, doppelt gross, da, wie wir das aus unseren späteren Beobachtungen ersehen werden, die Isolation kaum so stark war, als sie für die kleinste Spannung eines Funkens von 1 m Länge nötig ist, während aber andererseits die untergebrachte Windungszahl eine elektromotorische Kraft inducirt hatte, genügend hoch für einen Funken von 1,5 m Länge.

So ist es denn erklärlich, dass ich grosse Mühe darauf verwendet habe, um die bei verschiedenen Funkenlängen herrschenden Spannungen zu ermitteln.

Versuche, die Spannung bei Funkenentladungen zu messen, wurden bisher, soweit das aus der Literatur hervorgeht, nur an kleineren Spulen bis höchstens 60 cm Funkenlänge gemacht.<sup>1)</sup>

Ich war später in der Lage, Messungen an Spulen bis zu 1 m Funkenlänge vorzunehmen. Bevor wir hierauf weiter

---

1) A. Oberbeck, Wied. Ann. 62. p. 109. 1897; 64. p. 200. 1898; B. Walter, l. c. 62. p. 300. 1897.

eingehen, ist es nötig, den von mir für die Anstellung dieser Messungen eingeschlagenen Weg zu skizziren. In erster Linie konnte ich mich bei den von mir hergestellten Spulen auf die Zuverlässigkeit jeder einzelnen Windung verlassen. Die Zahl der Windungen der secundären Spule sowohl, als diejenige der primären war genau festgestellt.

Bei technischen Transformatoren für Wechselstrom, welche in ihren bestimmenden Teilen grosse Aehnlichkeit mit den Inductorien haben, verhalten sich die Spannungen in beiden Spulen wie deren Windungszahlen.

Würden wir bei einem Inductorium die Spannung desjenigen Stromes, der zur Magnetisirung des Eisenkernes dient, als die primäre Spannung voraussetzen, und versuchen, aus dieser und dem Windungsverhältnis beider Spulen die Spannung in der secundären Spule zu berechnen, so würden wir finden, dass die so erhaltene secundäre Spannung kaum hinreicht, einen Funken von einigen Millimetern Länge, statt eines solchen von, sagen wir z. B. 20 cm Länge, zu geben. Setzen wir auch die Spannung eines Funkens von 20 cm Länge vorläufig als unbekannt voraus, so wissen wir doch so viel, dass eine Spannung von 10 000 Volt nicht hinreicht, um diese Strecke in Luft zu durchschlagen, und mehr als 10 000 Volt wird uns auf obige Weise die Rechnung nicht ergeben.

Es müssen also in der primären Spule viel höhere Spannungen herrschen, wie das ja auch hinreichend bekannt ist, wenn auch hier das Transformationsgesetz gelten soll, wonach

$$\Delta_1 n_2 = \Delta_2 n_1$$

ist (worin  $\Delta$  die Spannungen,  $n$  die Windungszahlen bedeuten, Index 1 für die primäre, 2 für die secundäre Spule).

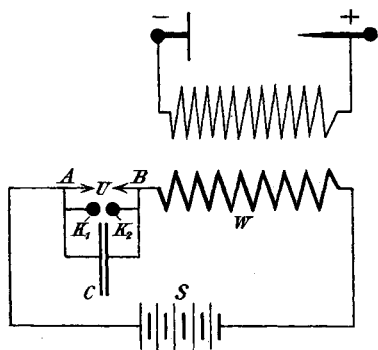


Fig. 3.

Fig. 3 zeigt die schematische Anordnung der den Eisenkern enthaltenden primären Wicklung  $W$ , des Unterbrechers  $U$ , des Condensators  $C$  und der Stromquelle  $S$  für den *Magnetisirungsstrom*.



Ich habe die Spannungen des *Extrastromes* unter den verschiedensten Bedingungen gemessen und dabei gefunden, dass dieselben in einem guten Inductorium das 100—200 fache der Spannung des Magnetisirungsstromes betragen können.

Während der Magnetisirungsstrom nach erfolgter Unterbrechung nur mehr oder weniger schnell auf Null abfällt, was ein Verschwinden der magnetischen Kraftlinien zur Folge hat, kann der Extrastrom nach erfolgter Unterbrechung des Magnetisirungsstromes zwischen der primären Spule und dem Condensator schwingen, wobei derselbe wie ein Wechselstrom durch Null in das entgegengesetzte Potential übergeht. Diesen Wechseln muss aber notwendigerweise die Ummagnetisirung des Eisenkerns folgen, und *die dadurch hervorgebrachte schnelle Aenderung des Magnetfeldes ist es, welche die ausserordentlich hohen elektromotorischen Kräfte in der secundären Spule zu induciren im stande ist.* Wie später zu beschreibende Versuche an den von mir hergestellten Inductorien gezeigt haben, schwingt der Extrastrom in der Secunde 1290 mal durch Null, wenn die Capacität 2,4 Mikrof. und 11 640 mal durch Null, wenn die Capacität 0,08 Mikrof. beträgt. Nun ist leicht einzusehen, dass das ganz andere Geschwindigkeiten sind, mit denen das Magnetfeld geändert wird, als selbst die beste Unterbrechung des Magnetisirungsstromes sie herbeizuführen im stande wäre. Aber die schnelle Unterbrechung des Magnetisirungsstromes führt eben doch herbei, dass nicht nur ein kräftiger Extrastrom inducirt wird, sondern sie verhütet auch, dass der inducirte Extrastrom sich zwischen den Contacten *A* und *B*, Fig. 3, entladen kann und erhöht dadurch *diejenige Menge des Extrastromes, welche nach erfolgter Unterbrechung des Magnetisirungsstromes zur eigentlichen Induction auf die secundäre Spule in Wirkung zu treten hat.*

Von diesem Gesichtspunkte ausgehend fällt also dem Extrastrom der primären Spule eine Hauptrolle bei den Vorgängen im Inductorium zu und wir werden sehen, wie vom richtigen Zustandekommen desselben der Erfolg abhängt.

Wir gehen zunächst dazu über, die Spannungen zu messen, welche der Extrastrom unter verschiedenen Bedingungen anzunehmen im stande ist.

Zu diesem Zwecke wurde ein Funkenmikrometer, welches

0,001 cm direct abzulesen gestattete, mit seinen beiden Kugeln  $K_1$ ,  $K_2$ , Fig. 3, von 1 cm Radius an die Belegungen des Condensators angeschlossen, während die übrige Schaltung die in Fig. 3 skizzierte geblieben ist. Auf diese Weise wurde alsdann die Funkenlänge gemessen, welche jeweilen an den Belegungen des Condensators erhalten werden konnte, und daraus die zugehörigen Spannungen in bekannter Weise ermittelt.

Das bei diesen Messungen verwendete Inductorium hatte folgende Hauptdimensionen: Der stabförmige Eisenkern, aus weichen Blechen zusammengesetzt, hatte quadratischen Querschnitt von 55 cm<sup>2</sup> und eine Länge von 200 cm; sein Gewicht betrug 85 kg. Ueber denselben befanden sich 800 Windungen eines gut isolirten Kupferdrahtes von 0,03 cm<sup>2</sup> Querschnitt als primäre Wicklung.

Ferner wurden zwei, je aus einem fortlaufenden Draht gewickelte secundäre Spulen von je 43 000 Windungen hergestellt, die sich einzeln oder beide über die primäre Wicklung schieben liessen. In dieser Weise konnte der Extrastrom der primären Spule gemessen werden, 1. ohne dass sich die secundären Spulen über der primären Spule befanden; 2. wenn eine Spule von 43 000 Windungen darüber geschoben war, und endlich 3. wenn man beide Spulen von je 43 000 Windungen, also mit zusammen 86 000 Windungen, über die primäre Spule geschoben hatte. Die beiden Spulenhälften konnten in der Mitte verbunden werden. Die Potentialdifferenz zwischen dieser Verbindungsstelle und dem Potential der Erde war in allen Fällen nahezu Null. Der bei diesen Messungen verwendete Condensator hatte eine unveränderte Capacität von 0,10 Mikrof., worauf ich mit Rücksicht auf spätere Beobachtungen hier besonders aufmerksam mache.

Die Versuchsreihe wurde nun folgendermaassen eingeteilt. Zunächst wurde die Funkenlänge des primären Extrastromes gemessen, bei ganz von der primären Spule entfernten secundären Windungen, während der Magnetisirungsstrom von 1—17 Amp. verändert wurde. Für jede Messung wurden die vorher voneinander entfernten Kugeln des Funkenmikrometers einander so lange näher gebracht, bis bei zehnmaliger Unterbrechung nicht mehr als 2—3 Funken zwischen den Kugeln übersprangen. Nach jedem Ueberspringen eines Funkens

wurden die Kugeln wieder voneinander entfernt. Die erhaltenen Werte (Centimeter-Funkenlänge) sind in nachfolgender Tab. II in der ersten Reihe *A* aufzeichnet.

Hierauf wurde eine secundäre Spule mit 43000 Windungen über die primäre Spule geschoben, sodass letztere an beiden Enden gleich weit über erstere hervorragte. Die Funkenstrecke der secundären Spule, deren positiver Pol eine stumpfe Spitze, und deren negativer Pol eine Scheibe von 25 cm Durchmesser bildete, wurde auf 10 cm Länge eingestellt und nun der Extrastrom in der vorigen Weise gemessen, indem der Magnetisirungsstrom wieder nach und nach von 1—17 Amp. erhöht wurde. In dieser Weise wurden die Messungen wiederholt, während die Funkenstrecke der secundären Spule zunächst auf 20 cm, dann auf 30 cm, dann auf 40 und schliesslich auf 50 cm eingestellt wurde. Die Resultate sind in Tab. II unter B., Reihe 5—9, zusammengestellt.

Hierauf wurden beide Spulen mit zusammen 86000 hintereinander geschalteten Windungen symmetrisch über die primäre Spule geschoben und die gleichen Messungen in der Weise wiederholt, dass die Funkenstrecke, mit 10 cm anfangend, nach Beendigung jeder Messungsreihe von 1—17 Amp. um 10 cm weiter auseinander gerückt wurde, bis zur höchst erreichbaren Funkenlänge von 100 cm. Auch diese Werte sind in Tab. II, unter C., Reihe 11—20, eingetragen. Die bei einigen Zahlen befindlichen Zeichen haben folgende Bedeutung: Bei den mit einem \* versehenen Zahlen sprang in der secundären Funkenstrecke kein Funke, mit einem ° bedeutet, dass der secundäre Funke nur hin und wieder übersprang, bei † sprangen noch etwa 50 Proc. und bei § sprangen etwa 75 Proc. der secundären Funken von sämtlichen primären Unterbrechungen.

Die fett gedruckten Zahlen aber bedeuten, dass hier zum ersten Male für die bezügliche Länge und Elektroden der secundäre Funke regelmässig ohne auszusetzen übersprang. Wir werden sehen, in welcher Weise wir von diesen Zeichen Gebrauch machen. Wird die Form der Elektroden verändert, so ändert sich damit auch die Funkenlänge ( $f_1$ ) des Extrastromes, welche beim Ueberspringen des Funkens der secundären Spule auf eine bestimmte Länge beobachtet wird. Insbesondere macht sich die Form der positiven Spitze hierbei

Tabelle II.

Magnet-  
strungs-  
strom  $J_1$ 

A. Ohne secundäre Spule (Centimeter-Funkenlänge an den Belegungen des Condensators).

0,010 0,027 0,045 0,060 0,080 0,090 0,105 0,127 0,140 0,147 0,165 0,180 0,200 0,215 0,230 0,250 0,275 cm

B. Wenn eine secundäre Spule mit 43000 Windungen über der primären ist.

10	0,01*	0,025°	0,035	0,044	0,060	0,080	0,080	0,090	0,105	0,105	0,135	0,140	0,155	0,165	0,165	0,170	0,170 cm
20	—	0,020*	0,035°	0,044	0,060	0,080	0,080	0,090	0,105	0,115	0,140	0,140	0,155	0,170	0,165	0,165	0,180 "
30	—	—	0,030*	0,050*	0,070°	0,070	0,080	0,087	0,105	0,120	0,140	0,140	0,155	0,170	0,165	0,165	0,185 "
40	—	—	—	—	0,055*	0,060°	0,085†	0,090	0,105	0,120	0,135	0,150	0,165	0,165	0,165	0,185 "	
50	—	—	—	—	—	—	0,095*	0,105*	0,125°	0,135°	—	—	—	—	—	—	"

C. Wenn eine secundäre Spule mit 86000 Windungen über der primären ist.

10	—	0,012	0,019	0,022	0,032	0,040	0,057	0,064	0,070	0,085	0,090	0,100	0,100	0,120	0,130	0,125	0,127 cm
20	—	0,012*	0,020	0,023	0,031	0,040	0,060	0,064	0,060	0,080	0,088	0,098	0,100	0,125	0,120	0,125	0,128 "
30	—	—	0,019*	0,022	0,032	0,040	0,055	0,064	0,060	0,080	0,085	0,100	0,100	0,115	0,120	0,120	0,125 "
40	—	—	—	0,027*	0,028	0,042	0,052	0,064	0,070	0,080	0,088	0,100	0,100	0,115	0,122	0,125	0,126 "
50	—	—	—	—	0,030*	0,045	0,052	0,063	0,070	0,080	0,090	0,100	0,100	0,115	0,115	0,125	0,128 "
60	—	—	—	—	—	0,045*	0,055	0,065	0,070	0,080	0,091	0,108	0,108	0,115	0,130	0,127	0,128 "
70	—	—	—	—	—	—	0,059*	0,065°	0,072	0,083	0,095	0,094	0,108	0,115	0,130	0,127	0,127 "
80	—	—	—	—	—	—	—	0,065*	0,075*	0,088°	0,095	0,100	0,108	0,115	0,122	0,128	0,127 "
90	—	—	—	—	—	—	—	—	0,090*	0,105*	0,103*	0,103*	0,105°	0,117†	0,125†	0,132	0,130 "
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,110*	0,120*	0,127*	"

"

geltend. Der besseren Uebersicht wegen tragen wir die Werte der Tab. II in folgender Fig. 4 graphisch auf, als Abscissen die Stromstärke, als Ordinaten die mit dem Mikrometer gemessenen Funkenlängen des primären Extrastromes.

Abgesehen von einigen Ungenauigkeiten, welche diese Messmethode mit sich bringt, verhalten sich die Werte der drei Messungsreihen nahezu wie 4:3:2, woraus hervorgeht, dass die Funkenlänge des Extrastromes im Falle B um 25 Proc., im Falle C, d. h. mit ganzer Spule von 86000 Windungen, um 50 Proc. vermindert wurde.

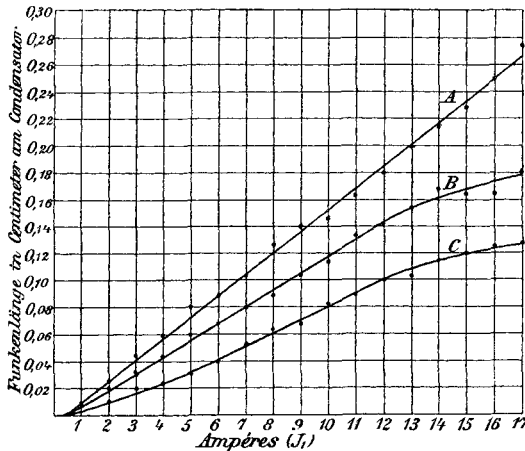


Fig. 4.

Während nun aber die Funkenlänge ( $f_1$ ) vollständig proportional der Stromstärke  $J_1$  zuzunehmen scheint, wenn keine secundäre Spule über der primären sich befindet (Curve A), ist das offenbar nicht mehr der Fall, wenn die secundären Spulen übergeschoben sind, wie die Curven B und C zeigen. Die Ursache dieser Abweichung wird uns weiterhin klar werden durch die Beobachtung, dass die Spannung an Funken mit grösserer Intensität (Stromstärke) zunimmt, gleichgültig, ob die durchschlagene Luftstrecke grösser oder kleiner ist.

Ein Blick auf die Tab. II zeigt manche interessante und überraschende Erscheinung. Zunächst sehen wir, dass die Zahlen in den einzelnen Columnen (bei gleichbleibendem Magnetisierungsstrom) nur wenig von einander abweichen, d. h.

dass die Spannung (Funkenlänge) am Condensator sich nur wenig (oder gar nicht) verändert, während die secundäre Funkenlänge von 10—50 bez. im Falle C von 10—100 cm verändert wird. Andererseits sehen wir, dass bei ein und derselben secundären Funkenlänge, z. B. 10 cm im Falle C, die Funkenlänge am Condensator von 0,012 bis 0,127 zunimmt, während die Stromstärke von 2—17 Amp. erhöht worden ist. Wir werden hieraus bestimmte Schlüsse ziehen können. Wir wollen aber, bevor wir uns weiter damit beschäftigen, die diesen Funkenlängen zukommenden Spannungen in Volt ermitteln. Zu diesem Zwecke wurde die Tab. 27c<sup>1)</sup> benutzt. Aus diesen Zahlen erhalten wir — möglichst angenähert — die unseren Funkenlängen der Tab. II zukommenden Spannungen in Volt, welche wir in Tab. III zusammenstellen.

Tabelle III.

$J_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Amp.
bei 43 000 secundären Windungen:										
$(f_1)$	0,010	0,022	0,033	0,046	0,061	0,072	0,081	0,090	—	cm
$A_1$	850	1650	2100	2700	3250	3600	4000	4400	—	Volt
bei 86 000 secundären Windungen:										
$(f_1)$	—	0,012	0,019	0,023	0,031	0,042	0,056	0,064	0,069	cm
$A_1$	—	1000	1450	1700	2050	2500	3000	3400	3600	Volt
$J_1$	10	11	12	13	14	15	16	17	Amp.	
$(f_1)$	0,083	0,092	0,100	0,102	0,118	0,121	0,126	0,127	cm	
$A_1$	4200	4400	4800	4900	5500	5600	5750	5850	Volt	

Die Spannungen sind, nur angenähert genau, da wegen der grossen Schwierigkeit, mit welcher die Funkenlängen am Condensator in der angedeuteten Weise gemessen werden können, eine absolute Genauigkeit dieser Messungen ausgeschlossen ist. Immerhin ist das Messungsergebnis derart genau genug, um vorläufig befriedigenden Einblick in die gesuchten Vorgänge zu erhalten.

Bringen wir die erhaltenen Werte für die Spannung  $A_1$  am Condensator in Beziehung zu der Stärke  $J_1$  des Magne-

1) F. Kohlrausch, Praktische Physik, 8. Aufl. p. 483.

tisierungsstromes, mit welcher diese Spannungen erhalten wurden, in Fig. 5, so sehen wir, dass zwischen der Spannung des primären Extrastromes und den Magnetisierungsstrom, wenn man von den Anfangs- und Endwerten absieht, nahezu Proportionalität herrscht. Ausserdem zeigt die Figur, in welcher die obere Curve sich auf die Messungen bezieht, während die secundäre Spule von

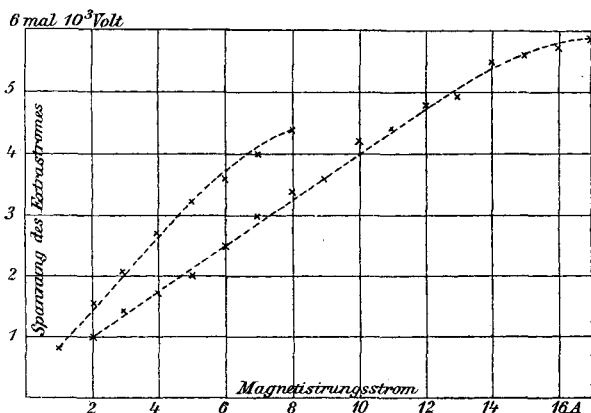


Fig. 5.

43000 Windungen, die untere, während jene mit 86000 Windungen aufgeschoben war, dass der primäre Extrastrom bei gleichem Magnetisierungsstrom  $J_1$  und gleicher Capacität  $K$  des Condensators eine höhere Spannung annimmt, wenn weniger secundäre Windungen vorhanden sind.

Die Condensatoren müssen demnach eine um so stärkere Isolation zwischen den Belegungen haben, je kleiner die Windungszahl der secundären Spule ist, mit welcher eine gewisse Funkenlänge erreicht werden soll.

### III. Ueber die Spannungen in der secundären Spule bei Funkenentladungen.

Wir haben schon erwähnt, dass bei den fett gedruckten Zahlen in Tab. II der Funke in der secundären Funkenstrecke zum erstenmal für die bezügliche Länge regelmässig übersprang ohne auszusetzen. Das fand statt:

Tabelle IV.

a) Bei der secundären Spule mit 43000 Windungen:

wenn die Funkenstrecke ( $f_2$ )	}	10	20	30	40	cm
eingestellt wurde auf						
mit einer Spannung des primären	}	2100	2700	3600	4400	Volt
Extrastromes $\Delta_1$ von						

b) Bei der secundären Spule mit 86000 Windungen:

wenn die Funken-	}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	cm
strecke ( $f_2$ ) ein-											
gestellt wurde auf	}	1000	1450	1700	2050	2500	3000	3600	4400	5750	Volt
mit einer Spannung											
des primären Extra-	}	1000	1450	1700	2050	2500	3000	3600	4400	5750	Volt
stromes $\Delta_1$ von											

Multiplizieren wir die zu den Funkenlängen ( $f_2$ ) von 10 bis 40 cm gehörigen Spannungen  $\Delta_1$  des Extrastromes aus der Tab. IV mit dem Windungsverhältnis  $n_2/n_1$  der zugehörigen Spulen, so erhalten wir:

Tabelle V.

Bei einer Funkenlänge von . . .	10	20	30	40	cm
für die Spule mit 43000 Wind. $\Delta_1 \frac{n_2}{n_1}$	112900	145100	193500	236500	Volt
für die Spule mit 86000 Wind. $\Delta_1 \frac{n_2}{n_1}$	107500	155900	182700	220400	Volt

wobei wir aber nichts anderes, als nach der Formel

$$\Delta_2 = \Delta_1 \frac{n_2}{n_1}$$

des allgemeinen Transformationsgesetzes  $\Delta_2$ , d. h. die Spannung in der secundären Spule berechnet haben. Die Zahlen der oberen und unteren Reihe geben eine überraschende Uebereinstimmung.

Vergleichen wir die Zahlen mit solchen, die auf andere Weise erhalten worden sind, so finden wir z. B. in der Arbeit von Hrn. Walter<sup>1)</sup>, dass er einen Funken von 20 cm Schlagweite zu 190000 Volt berechnet und diesen Wert genauer auf 130000 Volt setzt.

1) B. Walter, Wied. Ann. 62. p. 321. 1897.



In unserer Tab. V finden wir das eine Mal diese Spannung zu rund 145000 Volt, das andere Mal zu rund 156000 Volt, also beide zwischen jenen beiden von Hrn. Walter angegebenen Werten liegend. Die gute Uebereinstimmung der beiden Zahlenreihen der Tab. V unter sich berechtigt zu der Annahme, dass die in der hier geschilderten Weise ermittelten Spannungen für die secundären Funken von ihren wahren Werten nicht weit abweichen.

Fernerhin finden wir in Tab. V die Minimalspannung, welche nötig war, damit ein Funke ( $f_2$ ) auf 30 cm in Luft springe, zu 193500 bez. 182700 Volt. Ich kann als weiteres Beispiel der befriedigenden Uebereinstimmung, welche man in dieser Weise erhält, anführen, dass bei einem Inductorium mit „geschlossenem“ Eisenkern (Funkentransformator), der primär 320, secundär 21000 Windungen besitzt, die Funkenlänge ( $f_2$ ) von 30 cm dann erreicht wurde, wenn die Funkenlänge ( $f_1$ ) am Condensator bei beliebiger Capacität innerhalb der zulässigen Grenzen 0,044 cm betrug. Multipliciren wir die diesem Werte zukommende Spannung gleich 2600 Volt mit  $n_2/n_1$ , so erhalten wir auch hier wiederum 178600 Volt als Spannung eines Funkens ( $f_2$ ), der maximal auf 30 cm Länge durch Luft zu springen vermag.

Sind nun die Zahlen in den hier angeführten Beispielen richtig, so müssen ebenso die für die übrigen Funkenlängen gefundenen Werte der Wirklichkeit nahe kommen, d. h. wir können dann aus unserer Tab. II die Spannungen bis zu 90 cm Funkenlänge bestimmen und erhalten dadurch die in der Tab. VI zusammengestellten Zahlenwerte für die Funkenlänge und zugehörige Spannung, wie sie die Messungen an unserem Inductorium ergeben haben.

Tabelle VI.

$J_1$	2	3	4	5	6	7	9	11	16	Amp.
$f_2$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	cm
$A_2$	107500	155900	182700	220400	268800	322500	387000	473000	618100	Volt

Hier muss betont werden, dass die in vorstehender Tab. VI angegebenen Werte für die Spannung nur für die Form der bei den Versuchen verwendeten Elektroden gelten. Insbesondere die grössere oder geringere Schärfe der positiven

Spitze ändert die Zahlen der Tab. VI ganz erheblich. Es scheint, dass mit einer positiven Spitze von grösserer Schärfe die Entladung mit einer kleineren Elektrizitätsmenge (oder Stromstärke) zu stande kommt, und wir werden noch sehen, wie die Spannung bei Funkenentladungen nicht nur von der Länge der durchschlagenen Strecke (Widerstand), sondern auch von der Intensität der Entladung (Stromstärke) abhängt. Aber auch bei Anwendung mehr oder weniger scharfer Spitzen, wodurch die Werte der Spannung  $\Delta_2$  für die zugehörigen Funken-

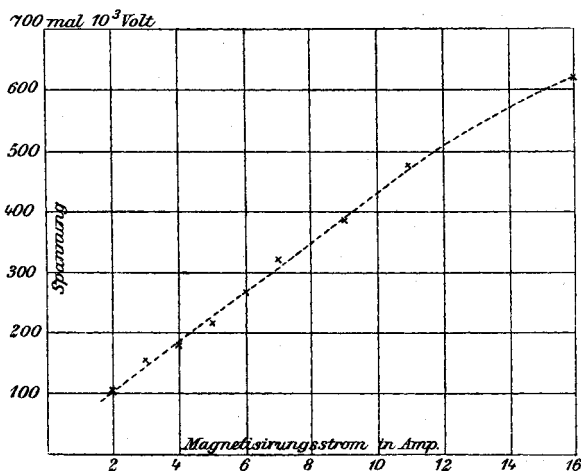


Fig. 6.

längen ( $f_2$ ) kleiner oder grösser ausfallen, bleibt der Charakter der Zahlenreihe für  $\Delta_2$  derselbe.

Die Tab. VI giebt uns dreierlei Beziehungen, nämlich 1. des Magnetisierungsstromes zur Funkenlänge, 2. des Magnetisierungsstromes zur Spannung und 3. der Funkenlänge zur Spannung.

Der erste Fall kann uns zunächst nicht interessieren, dagegen betrachten wir den zweiten Fall, zu welchem Zwecke wir uns der besseren Uebersicht wegen die Werte aus der Tab. VI in Fig. 6 eintragen, die Spannungen als Ordinaten, den Magnetisierungsstrom als Abscissen.

Wir sehen, dass die Endpunkte der Ordinaten, d. h. die Spannungen für die zugehörige Stromstärke, nahezu in eine

gerade Linie fallen. Setzen wir zunächst voraus, dass die magnetische Induction  $B$  bei dem hier in Frage stehenden Inductorium nicht über 10000 Linien hinausgegangen sei, so können wir für die erste Annäherung Proportionalität zwischen Magnetisierungsstrom und magnetischer Induction annehmen, ohne grosse Fehler zu begehen. Dann haben wir aber nach Tab. VI und Fig. 6 nicht nur Proportionalität zwischen Magnetisierungsstrom und Spannung, sondern dann ist auch die *Spannung dem Magnetfelde  $\Phi$  direct proportional*.

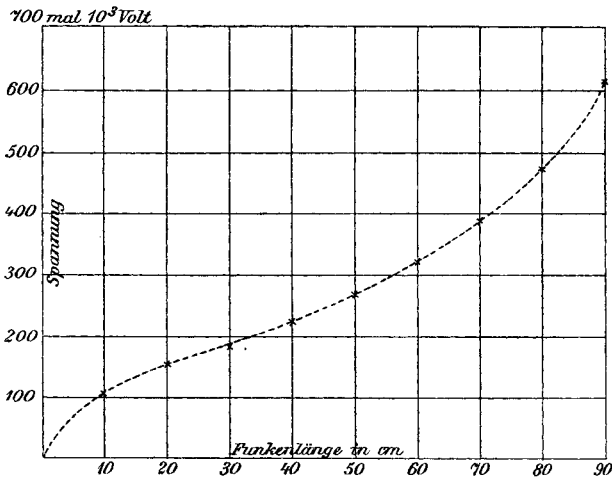


Fig. 7.

Anders verhält es sich, wenn wir die Werte der Spannung aus Tab. VI in Beziehung zu der damit erreichten Funkenlänge bringen.

Aus dieser Tabelle sehen wir, dass die Differenz zwischen zwei benachbarten Werten der Spannung  $\Delta_2$  mit zunehmender Funkenlänge wächst, woraus wir schliessen, dass zwischen zunehmender *Funkenlänge und Spannung* keine Proportionalität herrscht. Noch deutlicher sehen wir das aus Fig. 7, in welcher die Funkenlängen als Abscissen, die zugehörigen Spannungen als Ordinaten eingetragen sind.

Es muss nun eigentlich überraschen, dass, nachdem Proportionalität zwischen der Stärke des Magnetfeldes und der inducirten Spannung gefunden worden ist, dieselbe nicht mehr

besteht zwischen Spannung und Funkenlänge. Wir haben die Funkenlänge von 10—90 cm achtmal um je die gleiche Länge (10 cm) vergrößert, und da wir nicht annehmen können, dass die spezifische Leitungsfähigkeit bei den hier in Betracht kommenden Strecken (Längen in Luft) sich ändert, so haben wir also dadurch jedesmal den gleichen Betrag Widerstand hinzugefügt. Die Erklärung dieser merkwürdigen Abweichung müssen wir irgendwo anders suchen. Dem Gange unserer Betrachtung vorgreifend, muss hier erwähnt werden, dass die Spannung von Funkenentladungen für die gleiche Funkenlänge mit zunehmender Intensität der Funken zu wachsen scheint. Mit dieser Erscheinung werden wir uns noch eingehend beschäftigen.

Auf unseren speciellen Fall hat diese Thatsache folgenden Einfluss. Bevor eine eigentliche Funkenentladung eintritt, entströmt beiden Polen (Platte und Spitze der Funkenstrecke) der Spule eine gewisse Menge Elektrizität. Je grösser die Entfernung zwischen Spitze und Platte ist, desto grösser ist die Elektrizitätsmenge, welche vor der Funkenentladung an beiden Polen ausströmt. Sie ist als im Dunkeln sichtbare Büschelentladung bekannt, und bedeutet für die Intensität des Funkens einen Verlust, der seinen Ausdruck darin findet, dass eine höhere Spannung inducirt werden muss, um die im Funken vorhandene, und die durch seitliche Ausstrahlung an beiden Polen ausgetretene Elektrizitätsmenge zu erzeugen. Nur so können wir uns erklären, dass die Spannung mit wachsenden Luftstrecken von der Proportionalität abweicht.

*Die inducirte Spannung ist daher dem Magnetfelde  $\Phi$  proportional; die erreichbare Funkenlänge ist der Spannung nicht proportional.*

Dass die Spannung  $E$  für eine gleichbleibende Funkenlänge (Luftstrecke) vom Widerstand  $R$  mit zunehmender Intensität  $J$  des Funkens wachsen muss, geht schon aus dem Ohm'schen Gesetz hervor, wonach

$$E = JR$$

ist. Die Zahlen der Tab. II scheinen zu bestätigen, dass auch bei Funkenentladungen diesem Gesetze Genüge geleistet wird. Wir haben dort z. B. in der 11. Horizontalreihe für 10 cm

Funkenlänge ( $f_2$ ) eine Spannung des primären Extrastromes, welche von 0,012 cm Funkenlänge ( $f_1$ ) = ca. 1000 Volt bei 2 Amp. bis auf 0,127 cm Funkenlänge ( $f_1$ ) = ca. 5850 Volt bei 17 Amp. ansteigt, obschon die secundäre Funkenlänge ( $f_2$ ) nicht verändert wurde. Multipliciren wir die beiden Spannungen mit dem Windungsverhältnis  $n_2/n_1$ , so erhalten wir nach obigem die Spannung für den secundären Funken von 10 cm Länge, das eine Mal zu ca. 107 500 Volt, und das andere Mal zu ca. 600 000 Volt. Wir sehen allerdings den Funken im zweiten Falle als breites Flammenband in der Funkenstrecke übergehen, während im ersteren Falle nur ein schwacher, blauer Funke überspringt.

Eine ähnliche Beobachtung machen wir in den Verticalreihen der Tab. II. Fassen wir z. B. jene für 17 Amp. ins Auge, so sehen wir im Falle C, dass die Spannung des primären Extrastromes die gleiche geblieben ist, obschon die Länge der secundären Funken von 10—90 cm Länge verändert wurde.

Stets behielt der primäre Extrastrom eine Spannung von 5850 Volt. Diese mit dem Windungsverhältnis  $n_2/n_1$  multiplicirt, ergibt für den Funken ( $f_2$ ) eine Spannung von ca. 600 000 Volt, ob der Funke nun 90 cm oder nur 10 cm lang ist. Auch hier wieder sehen wir den Funken von 90 cm als dünnen, blauen Funken, denjenigen von 10 cm Länge aber, wie schon erwähnt, als breites, flammenartiges Band übergehen.

In diesen Falle veränderten wir den Widerstand  $R$  (die Länge der Luftstrecke), während das Magnetfeld und damit auch die Spannung  $E$  unverändert geblieben ist, sodass die Stromstärke  $J$  sich umgekehrt mit dem Widerstande  $R$  ändern musste.

Wird die Capacität des Condensators nicht verändert, so scheint die Spannung eines Funkens in Luft abzuhängen vom Widerstand (Länge) der durchschlagenen Strecke und der Stromstärke des Funkens.

Es können demnach, wie wir gesehen haben, Funken gleicher Länge verschiedene Spannung, Funken verschiedener Länge gleiche Spannung haben.

Wird die Magnetisirung auf gleiche Höhe gebracht, und die Capacität des Condensators nicht verändert, so inducirt das Inductorium unabhängig von der Länge der secundären Funken,

*d. h. unabhängig vom äusseren Widerstand, innerhalb der Belastungsgrenzen auf gleichbleibende Spannungen* — ein Gesetz, das mit demjenigen für technische Transformatoren Aehnlichkeit hat.

#### IV. Einfluss der Condensatoren.

Am Zustandekommen und richtigen Verlauf des Extrastromes, der bei diesen Vorgängen eine so hervorragende Rolle spielt, muss ohne Zweifel *der Condensator* einen nicht zu unterschätzenden Anteil haben. Es fällt ihm zunächst die Aufgabe zu, die durch die Oeffnung bei *U* Fig. 3 (p. 844) gestörte Strombahn zu ersetzen.

Wir werden nun zunächst zu untersuchen haben, welchen Einfluss die *Capacität* des Condensators auf das Zustandekommen des primären Extrastromes hat. Hr. Walter<sup>1)</sup> fand, dass die Capacität des Condensators unter Umständen auch zu gross genommen werden könne, und belegt durch Versuche, dass die maximal erreichbare Funkenlänge ( $f_2$ ) zurückgehe, wenn eine gewisse Capacität überschritten wird, welche nötig ist, um die durch die Dimensionen der Spule gegebene grösste Länge ( $f_2$ ) zu erreichen.

Wahrscheinlich war das bei diesen Beobachtungen verwendete Inductorium nicht geeignet, zu den grösseren Capacitäten auch zugleich grössere Magnetisirungsstromstärken anzuwenden, sonst würde Hr. Walter ein anderes Resultat erhalten haben.

Benutzt man nämlich zu diesen Versuchen eine Spule, deren Isolation gerade hinreicht, um die maximale Funkenlänge so zu erhalten, wie Hr. Walter das angegeben hat, d. h. dass bei zehn Unterbrechungen 8—9 Funken überspringen und 1—2 aussetzen, dass aber, wie Oberbeck<sup>2)</sup> von diesen Spulen sagt, die dazu nötige Stromstärke nicht überschritten werden darf, ohne die Isolation des Apparates zu gefährden, so wird man mit Hrn. Walter finden, dass bei solchen Spulen eine gewisse Capacität für diese maximal zulässige Stromstärke die günstigste ist.

---

1) B. Walter, Wied. Ann. **62**. p. 300. 1897.

2) A. Oberbeck, Wied. Ann. **62**. p. 109. 1897.

Hat man aber solche Spulen, wie das bei den von mir hergestellten der Fall war, bei denen man die Stärke des Magnetisierungsstromes noch erheblich über jenen Wert desselben hinaus, mit welchem die maximale Funkenlänge zum ersten Male erreicht wird, erhöhen kann, ohne gleich befürchten zu müssen, dass der Funke die Isolation durchschlägt, so erhält man denn doch ganz andere Resultate, wenn man die Capacität erhöht.

Wir werden auch sehen, dass die Furcht vor dem „Durchschlagen“ der Isolation selbst bei Anwendung sehr grosser Stromstärken im richtigen Verhältnis zur Capacität des Condensators ganz unbegründet ist. Ich habe bei meinen Beobachtungen an einem Funkentransformator für 30 cm Funkenlänge die maximale Funkenlänge noch erhalten, nachdem die Capacität des Condensators um das 50fache derjenigen kleinsten Capacität vergrössert war, mit welcher ebenfalls die maximale Funkenlänge erhalten werden konnte.

Für die genaue Bestimmung der von mir verwendeten Capacitäten fehlte mir ein Normalcondensator; da es hier aber zunächst nur darauf ankommt, die Erhöhung der Capacität in Bezug auf eine gewisse relative Einheit zu kennen, so gebe ich als Maass die Anzahl der jeweiligen Belegungen (Stanniolblätter) an. Diese Blätter hatten eine Länge von 50 cm und Breite von 25 cm in der einander gegenüberliegenden Fläche. Zwischen je zwei Blättern Stanniol befanden sich drei Blätter eines besonders gut präparirten Isolirpapieres (im Handel unter dem Namen „Giant“-Papier erhältlich) von zusammen 0,025 cm Dicke. Setzt man als Dielektricitätsconstante für dieses Papier  $C = 2$ , so erhält man durch Rechnung für zehn Glieder des Condensators eine Capacität von 0,0796 Mikrof.

Schaltete ich von dieser Capacität nach und nach 10, 20 etc. bis 300 Glieder ein, so erhielt ich jeweilen wieder die Funkenlänge von 30 cm, nachdem ich die Stärke des Magnetisierungsstromes  $J_1$  entsprechend erhöht hatte. In der Tab. VII enthält die obere Reihe die Anzahl Glieder des Condensators von 10 bis 300 Gliedern, die untere Reihe das Maass derjenigen Stromstärke, welche nötig war, damit der Funke auf 30 cm wieder übersprang.

Tabelle VII.

Con- densator	}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	Glieder
Magne- tisirungs- strom	}	7,6	8,0	9,1	9,6	10,2	11,3	12,0	13,0	13,9	15,0	20,0	25,5	Amp.

Wir sehen also, dass wir nur die Magnetisierungsstromstärke  $J_1$  zu erhöhen haben, um bei erhöhter Capacität jedesmal wieder die maximale Funkenlänge zu erhalten. Diese gegenseitige Steigerung lässt sich nun bis zur Grenze der Leistungsfähigkeit des Apparates fortsetzen.

*Während nun aber anfänglich der Funke dünn wie eine Stricknadel anzusehen war, wurde er mit erhöhter Capacität dicker und dicker, bis er bei 500 Blättern schliesslich das Aussehen eines fingerdicken Bandes von 30 cm Länge hatte.*

Messen wir während dieser Beobachtungen die Spannung (Funkenlänge  $f_1$ ) an den Belegungen des Condensators mit dem Funkenmikrometer, so finden wir dieselbe jedesmal zu 0,044 cm oder 2600 Volt, wenn der Magnetisierungsstrom jenen kleinsten Wert hat, der bei irgend einer Capacität zum Ueberspringen des Funkens auf die maximale Länge erforderlich ist.

Der bei diesen Beobachtungen verwendete Funkentransformator Nr. 14 (Inductorium mit „geschlossenem“ Eisenkern) hat primär 320, secundär 21000 Windungen; hieraus erhalten wir nach der Formel

$$\Delta_2 = \Delta_1 \frac{n_2}{n_1}$$

dann, wenn ein Funke von 30 cm eben überzuspringen vermag für irgend eine Capacität des Condensators, jedesmal gleich 178600 Volt.

Damit stehen wir scheinbar im Widerspruch mit einer früheren Beobachtung, nach welcher ein Funke von gewisser gleichbleibender Länge höhere Spannung hat, wenn die scheinbare Elektrizitätsmenge in der Entladung grösser ist. Die Ursache dieser Erscheinung wird sich durch unsere nachfolgenden Beobachtungen aufklären.

Wir wissen nun, dass es nur nötig ist, die Spannung  $\Delta_1$  für jede beliebige Capacität  $K$  auf jenen Wert zu bringen, welcher nach vorstehender Formel erforderlich ist, um aus  $\Delta_1$ , multi-



plicirt mit dem Windungsverhältnis beider Spulen, das für die verlangte Funkenlänge ( $f_2$ ) minimal nötige  $A_2$  zu erhalten.

Behalten wir die einer grösseren Capacität zukommende Magnetisierungsstromstärke für die maximale Funkenlänge bei und vermindern die Capacität wieder — etwa auf 10 oder 20 Glieder, so ist der Funke dicker, als er sein würde mit dem für diese kleinere Capacität nötigen Magnetisierungsstrom und erreicht annähernd die Dicke, die derselbe mit der zugehörigen grösseren Capacität haben würde.

Ich machte zur Bestätigung dieser Thatsache folgende Controlmessung an Funken von 30 cm Länge.

Capacität	0,08	0,8	0,08 Mikrof.
Magnetisierungsstrom $J_1$	7,6	15,0	15,0 Amp.
Funkenlänge ( $f_1$ )	0,035	0,035	0,062 cm
Scheinbare Intensität des secundären Funkens von 30 cm Länge	dünner blauer Funke	Funke mit dicker Aureole	Funke gleich dick aussehend wie der vorige

Die Resultate des ersten und zweiten Falles stimmen überein mit dem, was wir nach Vorstehendem erwartet haben, nämlich dass ( $f_1$ ) in beiden Fällen den gleichen Wert haben musste. Im dritten Falle aber sehen wir, dass ( $f_1$ ) bedeutend grösser ist, woraus hervorgeht, dass die Spannung des inducirten Extrastromes und demnach die Spannung in der secundären Spule eine beträchtlich höhere wurde, nämlich 227 000 Volt gegen 152 000 Volt. Wir hatten im zweiten und dritten Falle beide Male die Stromstärke  $J_1 = 15$  Amp., aber die Capacität im dritten Falle zehnmal kleiner als im zweiten. Es kann also mit zu kleiner Capacität für eine gewisse Stromstärke  $J_1$  die Spannung für eine bestimmte Funkenlänge ( $f_2$ ) unnütz erhöht, und damit die Isolation der Spule gefährdet werden, ohne dass die Elektrizitätsmenge der Entladung erhöht wird. Diese Beobachtung zeigt, dass auch *Funken gleicher scheinbarer Dicke (Elektrizitätsmenge) und gleicher Länge verschiedene Spannungen haben können, und zwar eine niedrigere Spannung mit grösserem Condensator, eine höhere mit kleinerem Condensator, wenn der Magnetisierungsstrom unverändert beibehalten wird.*

Aus diesen Beobachtungen haben wir ersehen können,

dass die Capacität des Condensators die Spannung und Intensität der secundären Funken in gewissem Sinne beeinflusst.

Was aber thatsächlich vorgeht, wenn wir die Capacität ändern, wissen wir vorläufig noch nicht und es erübrigt noch, das zu untersuchen. Wir wissen, dass die Potentialdifferenz  $P$  an den Belegungen eines Condensators von der Capacität  $K$  ausgedrückt wird durch die Formel

$$P = \frac{Q}{K},$$

worin  $Q$  die Elektrizitätsmenge bedeutet.

Für Wechselströme lautet die Formel

$$\Delta_1 = \frac{J_1 10^6}{\pi p K} {}^1),$$

worin  $J_1$  die Stromstärke in Ampère,  $p$  die Polwechselzahl pro Secunde,  $K$  die Capacität in Mikrofara und  $\Delta_1$  die Potentialdifferenz (Spannung) in Volt bedeuten. Wenn wir diesen Ausdruck für  $\Delta_1$  in die Formel des Transformationsgesetzes einfügen, so lautet dieselbe

$$\Delta_2 = \frac{J_1 10^6}{\pi p K} \frac{n_2}{n_1}.$$

Dieser Ausdruck setzt aber nicht nur voraus, dass wir während einer Funkenentladung thatsächlich auch Polwechsel, und damit pulsirende oder oscillirende Entladungen haben, sondern sie bedingt auch, dass wir die Grösse der Zahl  $p$  kennen, um mit dem Ausdrucke überhaupt etwas anfangen zu können.

Blasen wir gegen einen Funken, wie ihn Fig. 8 zeigt, einen Luftstrom von mässiger Geschwindigkeit, so zeigt derselbe das in Fig. 9 abgebildete Aussehen.

Wir bemerken in der abgeblasenen Entladung eine Anzahl parallel verlaufender Linien von wunderschöner Zeichnung. Hr. Prof. E. Hagenbach-Bischoff hatte seiner Zeit die Freundlichkeit mir die Erklärung für die Erscheinung zu geben.

Danach entsteht dieselbe dadurch, dass eine luftverdünnte Röhre, welche ein erster Funke in die Luft schlägt, durch den Luftstrom weiterbewegt wird, und dass nachfolgende Entladungen durch diese Bahn stattfinden, wodurch die Bahn

---

1) F. Uppenborn, Kalender f. Elektrotechniker 1900. p. 110.

jedesmal zum Aufleuchten kommt. Dass der Canal trotz dem Abblasen bestehen bleibt, erklärt Hr. E. Hagenbach dadurch,

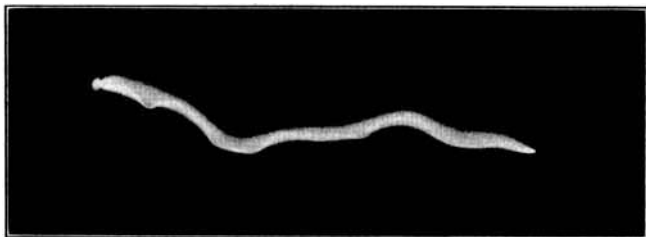


Fig. 8.

Einzelentladung (nicht abgeblasen) direct aus dem Funkentransformator.

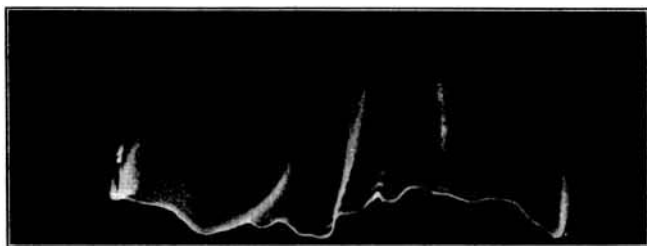


Fig. 9.

Abgeblasene Einzelentladung direct aus dem Funkentransformator.

dass die den Canal umgebende, jedenfalls etwas verdichtete Luftschicht für die in Betracht kommenden, kurzen Zeiten, welche zwischen zwei aufeinander folgenden Entladungen liegen, wie eine zähe Masse sich verhält.

Wir haben in dieser Erscheinung ein ausgezeichnetes Mittel, den Einfluss des Condensators auf die Schichtungsabstände zu beobachten.

Es müssen ja, wenn die Luftgeschwindigkeit gleich bleibt, die Linien um so näher bei einander liegen, je schneller sich die Entladungen folgen, und umgekehrt, um so weiter voneinander entfernt sein, je grösser die Zeit

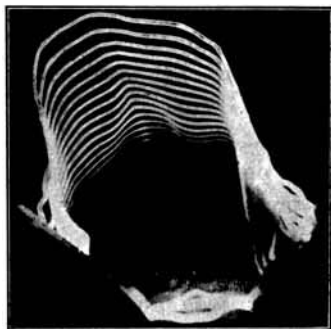


Fig. 10.  $\frac{1}{2}$  nat. Grösse.

Abgeblasene Entladung aus vier kleinen Leydener Flaschen, die durch eine einmalige Unterbrechung mittels des Funkentransformators, Fig. 13, p. 870, geladen wurden.

ist, welche zwischen zwei aufeinander folgenden Entladungen liegt.

Kennen wir die Luftgeschwindigkeit, so können wir aus dem Abstände zweier Linien die Zeit berechnen. Auf diese Weise fand ich durch Messung an einer photographischen Aufnahme eines mit ca. 6 m Luftgeschwindigkeit abgeblasenen Funkens, der bei einer Capacität von 1,6 Mikrof. und mit 20 Amp. Magnetisirungsstrom inducirt war, dass zwischen zwei Entladungen alsdann eine Zeit von 0,0006 Sec. liegt, woraus sich 1666 Entladungen in der Secunde ergeben.

Nun beobachtet man aber, dass die Linien (immer gleiche Luftgeschwindigkeit vorausgesetzt) nicht für alle Entladungen die gleiche Entfernung haben. Letztere ändert sich nämlich, wenn man entweder die Capacität oder den Magnetisirungsstrom ändert. Bei unseren beiden Funken (p. 861) von gleicher Länge und gleicher Dicke, von denen der eine eine Spannung von 152000 Volt, der andere aber eine solche von 227000 Volt hatte, sehen wir, dass dann, wenn die kleinere Capacität eingeschaltet ist, die Linien ausserordentlich nahe bei einander liegen, dann jedoch, wenn wir die grössere Capacität einschalten, die Linien mehrere Millimeter weit voneinander abstehen.

Beobachtet man die Abstände der Schichtung, welche sich ergeben, wenn man die Capacität des Condensators von 20 nach und nach auf 200 Glieder erhöht und dabei die für die Erreichung der maximalen Funkenlänge eben nötige Stromstärke jeweilen anwendet, so findet man, dass die Schichtung bei 20 Gliedern und 7,3 Amp. sehr nahe aneinander liegt, und mit Erhöhung der Capacität weiter und weiter wird. Wenn man diese Vergleichung in allen Teilen genau machen will, so muss man für jede Capacität die Schichtung photographiren, um daraus die Abstände der Linien zu ermitteln. Es geraten aber nicht alle Aufnahmen gleich gut, sodass man genötigt ist, für jede gleichartige Entladung mehrere Aufnahmen zu machen. Ich habe deshalb vorläufig die sich in der abgeblasenen Entladung zeigenden Entfernungen der Schichtung für die verschiedenen Capacitäten so gut wie möglich (ohne Photographie) abgeschätzt, und dabei die in folgender Zusammenstellung enthaltenen Abstände beobachtet.

Capacität	}	20	40	80	100	120	140	180	200	Glieder
		0,16	0,32	0,64	0,80	0,96	1,12	1,44	1,60	Mikrof.
Magnetisierungsstrom $J_1$	}	7,3	9,8	12,0	13,4	13,6	14,2	17,0	17,9	Amp.
Abgeschätzte Schichtungsweite		1,5	2,0	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0	5,0	mm

Hiernach hat sich, während die Capacität von 0,16 auf 1,60 Mikrof. erhöht wurde, die Schichtungsweite nahezu vom ein- zum vierfachen verändert, d. h. die Teilentladungen sind viermal langsamer erfolgt. Genauer und sicherer lässt sich diese Beobachtung wahrscheinlich mit dem rotirenden Spiegel anstellen.

Es lässt sich keine Aenderung der Schichtungsweite erkennen, wenn man die Luftstrecke, durch welche die Entladung stattfindet, innerhalb der zulässigen Grenzen grösser oder kleiner macht.

Diese Teilentladungen müssen im synchronen Zusammenhange mit der Aenderung des Magnetfeldes, und daher mit den Schwingungen im Condensator stehen.

Aus der Formel

$$p = \frac{J_1 10^6}{\pi \Delta_1 K}$$

können wir nun  $p$ , d. h. die Zahl der Polwechsel oder halben Schwingungen im Condensator berechnen, da wir ja alle Unbekannten des Ausdruckes rechts messen können.

Auf diese Weise erhalten wir  $p$  für die Werte der Tab. VII, in welcher  $\Delta_1$  den unveränderten Wert 2600 hatte, für verschiedene Magnetisierungsstromstärken und zugehörige Capacitäten, wenn wir für 10 Glieder des Condensators die berechnete Capacität von 0,08 Mikrof. zu Grunde legen. Diese Werte stellen wir in Tab. VIII zusammen, aus der wir die Fig. 11 construiren, welche als Abscissen die Capacität, als Ordinaten die Werte von  $p$  enthält.

Tabelle VIII.

$J_1$	7,6	8,0	9,1	9,6	10,2	11,3	Amp.
$K$	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	Mikrof.
$p$	11640	6100	4620	3700	3110	2870	pro Sec.
$J_1$	13,0	15,0	17,0	20,0	22,5	25,5	Amp.
$K$	0,64	0,80	1,12	1,60	2,00	2,40	Mikrof.
$p$	2500	2288	1850	1525	1372	1290	pro Sec.

Wir sehen, dass auch hier die Zahl  $p$  für die Capacität 0,16 etwa viermal höher liegt als für die Capacität 1,60, so dass das Verhältniss der im Vorhergehenden erwähnten Abschätzung der Schichtungsabstände in der abgeblasenen Entladung ziemlich gut hiermit übereinstimmt.

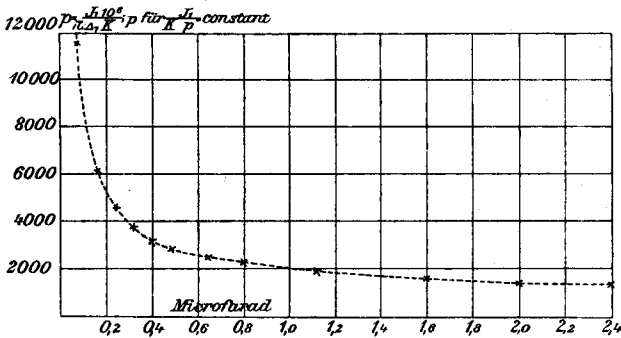


Fig. 11.

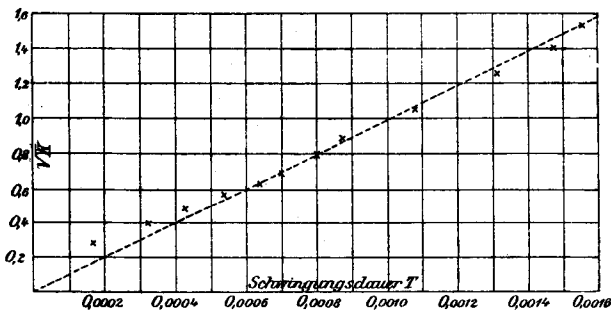


Fig. 12.

Nun ändert sich bekanntlich die Schwingungsdauer  $T$  proportional der Quadratwurzel aus der Capacität des Kondensators. Um die von uns gefundenen Werte dahin zu prüfen, stellen wir die Werte aus Tab. VIII für  $T = 2/p$  und  $\sqrt{K}$  zusammen, und construiren aus diesen Zahlen die Fig. 12, als Ordinaten die Werte von  $\sqrt{K}$ , als Abscissen diejenigen von  $T$ , und wir sehen, dass die Punkte in der That nahezu in eine gerade Linie fallen, deren gute Uebereinstimmung mit derselben

in Bezug auf den Weg, über welchen die Zahlen gefunden worden sind, eigentlich verwundern muss.

$\sqrt{K}$	0,282	0,400	0,489	0,566	0,632	0,692
$T$	0,000172	0,000328	0,000432	0,000540	0,000642	0,000698
$\sqrt{K}$	0,800	0,894	1,058	1,265	1,414	1,549
$T$	0,000800	0,000874	0,001080	0,001310	0,001472	0,001550

Wir können aus dem Ausdruck

$$A_2 = \frac{J_1 10^6}{\pi p K} \frac{n_2}{n_1}$$

die Ursache ersehen, weshalb Entladungen bei unveränderter Länge der Luftstrecke eine andere Spannung haben müssen, wenn der Magnetisierungsstrom  $J_1$  oder die Capacität  $K$  einseitig geändert wird, oder wie dieselbe für verschiedene Magnetisierungsstromstärken oder Capacitäten den gleichen Wert beibehält, wenn  $J_1/pK$  constant ist. Mit Rücksicht darauf, dass in diesem Falle eine Spule zu ihrer höchsten Leistungsfähigkeit gebracht werden kann, ohne die Spannung in einer die Isolation derselben gefährdenden Weise zu erhöhen, können wir Capacität und Magnetisierungsstrom alsdann in Bezug auf die Spule im *Normalzustand* befindlich bezeichnen.

*Im Normalzustande befinden sich die variablen Bedingungsgrößen für die Induction bei einem Inductorium, wenn Capacität und Magnetisierungsstrom sich so zu einander verhalten, dass die maximal zulässige Funkenlänge damit eben erreicht werden kann, aber nicht mehr erreicht wird, wenn entweder die Capacität vergrößert, oder die Magnetisierungsstromstärke verkleinert wird, oder wenn, was das Gleiche ist, durch gleichzeitige Aenderung der Capacität und des Magnetisierungsstromes keine Aenderung der inducirten Spannung herbeigeführt wird.*

Will man nach dieser Voraussetzung ein Inductorium nicht überlasten, so dürfen diese Variablen den Normalzustand nicht überschreiten, d. h. es darf nicht einseitig die Capacität zu klein, oder der Magnetisierungsstrom zu gross genommen werden.

So giebt uns die Tabelle p. 865 oben den Normalzustand für den Magnetisierungsstrom und die Capacität bei unserem Funkentransformator Nr. 18. Soll derselbe z. B. mit einer Capacität von 0,16 Mikrof. eingeschaltet werden, so ist der Normalzustand

mit einem Magnetisierungsstrom von 7,3 Amp. erreicht. Bei 1,12 Mikrof. ist das der Fall, wenn der Magnetisierungsstrom 14,2 Amp. beträgt. Oder, andererseits, will man mit 12 Amp. Magnetisierungsstrom arbeiten, so muss die zugehörige Capacität 0,64 Mikrof. betragen, um den Normalzustand zu haben.

Es geht hieraus hervor, dass bei rationell gebauten Inductorien abstöpselbare Condensatoren absolut unerlässlich sind.

Der in Frage stehende Funkentransformator Nr. 18 inducirt nach dem Vorhergehenden *im Normalzustande eine Spannung von rund 180 000 Volt*, unabhängig von der Funkenlänge oder Intensität der Entladung.

*Die im Normalzustande inducirte Spannung und die Grösse des Grenzbereiches, innerhalb welcher der Normalzustand durch Veränderung der Variablen  $J_1$  und  $K$  hergestellt werden kann, giebt ein wahres Bild über die Leistungsfähigkeit einer Spule.*

#### V. Nach vorstehenden Gesichtspunkten ausgeführte Apparate.

So grosse Lücken die hier mitgeteilten Beobachtungen noch offen lassen, haben uns dieselben dennoch wenigstens für den rationellen Bau von Inductorien wertvolle Anhaltspunkte an die Hand gegeben. Wir kennen nun für irgend eine verlangte Funkenlänge die erforderliche Windungszahl der secundären Spule und haben nicht mehr nötig empirisch so lange, meist verschwenderisch viel Draht aufzuwickeln, bis der verfügbare Raum gefüllt ist. Wir kennen ferner ziemlich genau die in diesen Windungen inducirte Spannung und können danach die nötigen Stärken für die Isolation der Spule bestimmen. Ferner haben wir den Einfluss der Capacität des Condensators kennen gelernt. Und wie wichtig diese Kenntnisse sind, zeigen die hervorragenden Resultate, die mit einer grösseren Anzahl Inductorien erhalten wurden, welche nach den hier genannten Gesichtspunkten gebaut sind.

Es gelingt uns heute auf Grund vorstehender Beobachtungen ohne Mühe, alle Grössen für Inductorien bis zu 1 m Funkenlänge vorauszubestimmen, derart, dass der fertige Apparat die Funken auf die volle Länge giebt und zwar so, dass unter allen Umständen für jede einzelne Unterbrechung sicher auch ein Funken überspringt. Und eine wie geringe Anzahl Win-



dungen benötigen wir in einer Spule für z. B. 1 m Funkenlänge gegenüber derjenigen Anzahl, die man sonst aufzuwinden gewohnt war.

Das Carpentier'sche Inductorium für 40—45 cm Funkenlänge besitzt 153000 Windungen, und wir bringen auf Spulen für 1 m Funkenlänge nur 86000 Windungen unter. Dadurch sind wir in der Lage, Draht vom vier- bis zehnfachen Querschnitt des bei älteren Apparaten üblichen Querschnittes zu verwenden. Durch die bedeutend geringere Länge einerseits und den viel grösseren Querschnitt des Drahtes andererseits wird aber auch der Widerstand solcher Spulen ganz bedeutend kleiner. So hat das Carpentier'sche Inductorium für 40 bis 45 cm Funkenlänge einen Widerstand von ca. 50000 Ohm, während eine von uns hergestellte Spule für 100 cm Funkenlänge nur etwa 40000 Ohm hat. Der Funkentransformator Nr. 14 (Abbildungen Figg. 13 und 14), welcher bis 35 cm lange Funken liefert, hat nur einen Widerstand von ca. 3250 Ohm. In ein Oelbad gestellt, giebt dieser Apparat bis 45 cm lange Funken. Infolge des ausserordentlich kleinen Widerstandes der secundären Windungen ist der Wirkungsgrad dieser Spulen naturgemäss ein viel grösserer, denn ein Unterschied im Widerstand von über 46000 Ohm muss bei Funken von 40 cm Länge, deren Minimalspannung 220000 Volt ist, denn doch einen mächtigen Einfluss ausüben.

In der That sind denn auch Funken von solcher Dicke, wie wir dieselben an unseren Apparaten erzielen und in den Figg. 8 und 9 dargestellt haben, bisher von keiner Seite erreicht worden.

Ich liess am Ende dieses Jahres ein Inductorium für 80 cm Funkenlänge nach meinen Angaben herstellen<sup>1)</sup>, welches nicht nur mächtige Funken dieser Länge bei Einzelunterbrechungen und bei Anwendung von Quecksilber-Schnellunterbrechern gab, sondern auch mit dem elektrolytischen Unterbrecher einen mächtigen Funkenstrom von 83 cm Länge unter fürchterlichem Getöse erzeugte.

Bei diesem Inductorium sind auf der primären Spule zwei getrennte Wicklungen angebracht, die eine mit Draht von

---

1) Inzwischen geliefert an Hrn. Prof. Lenard in Kiel.

0,03 cm<sup>2</sup> Querschnitt und 600 Windungen für Quecksilber- und ähnliche Unterbrecher, die andere von 0,12 cm<sup>2</sup> und 140 Windungen für den elektrolytischen Unterbrecher. Auf diese Weise kann mit diesem Inductorium ohne Auswechslung der primären

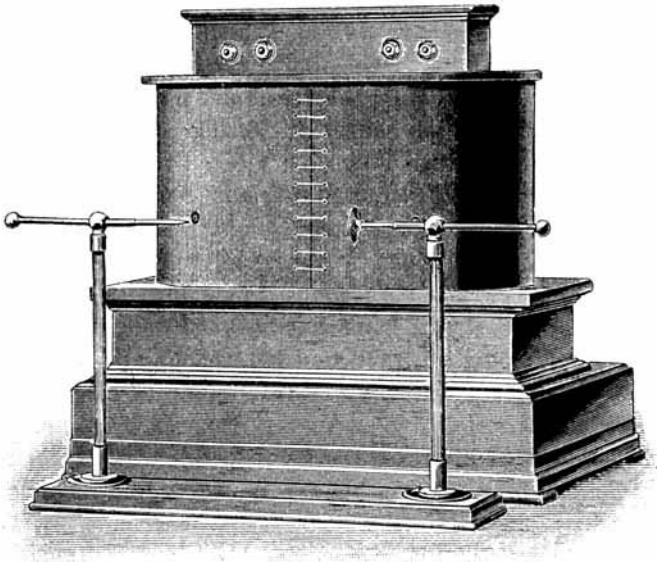


Fig. 13.

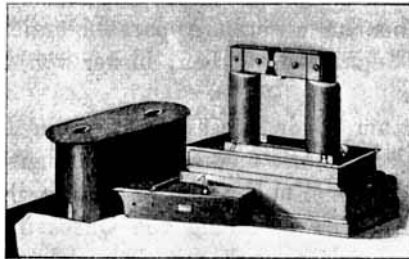


Fig. 14.

Spule oder des Eisenkerns sowohl der elektrolytische wie jeder andere Unterbrecher benutzt werden. Diese Anordnung hat sich sehr gut bewährt. Bei kleineren Spulen bis 40 cm Funkenlänge genügt es, von der Wicklung der primären Spule eine

gewisse Anzahl Windungen abzuzweigen, an welche dann der elektrolytische Unterbrecher angeschlossen wird. Auf diese Weise kann jede sonst gute Spule dazu gebracht werden, auch mit dem elektrolytischen Unterbrecher die durch die Dimensionen der Spule gegebene grösste Funkenlänge zu erhalten, ohne die vorherigen Eigenschaften der Spule zu zerstören.

Als besondere Merkwürdigkeit sei hier noch erwähnt, dass die grossen Spulen für 100 cm Funkenlänge ausserordentlich kleine Condensatoren erfordern. Dieselben geben schon mit einer Capacität von nur etwa 0,1 Mikrof. sehr kräftige Einzelfunken und solche mit Quecksilberunterbrechern hervorgebrachte auf 1 m Länge. Wird die Capacität unter Wahrung des Normalzustandes erhöht, so steigt damit die Elektrizitätsmenge in der Entladung, sodass man mit diesem Inductorium ebenfalls jene charakteristischen, flammenartigen Entladungen hervorbringen kann.

Auch diese Spule hat eine besondere Primärwicklung für den elektrolytischen Unterbrecher. Der mit letzterem bei diesem Apparate erzeugte Funkenstrom von 1 m Länge gewährt einen grossartigen Anblick.

Zum Schlusse kann ich nicht umhin, meinem hochverehrten Lehrer, Hrn. Prof. Hagenbach, meinen Dank auszusprechen für das überaus grosse Interesse, mit welchem er diese Arbeiten verfolgt, und für manche guten Ratschläge, die er mir im Verlaufe dieser Arbeiten gegeben hat.

Basel, im December 1900.

(Eingegangen 19. Mai 1901.)

---