

XII. *Eine Studie über electrische Resonanzerscheinungen; von Ernst Lecher.*

(Aus den Sitzungsber. d. kais. Acad. d. Wiss. in Wien. Mathem.-naturw. Cl.; Bd. 99. Abth. IIa. vom 24. April 1890; mitgetheilt vom Hrn. Verf.)

Die folgende Abhandlung enthält die Beschreibung und Untersuchung einer neuen Methode, electrische Wellen in Drähten mit Hülfe der von Hertz studirten Resonanz zu beobachten und zu messen. Die Arbeit liegt ganz im Bereiche jenes ausgedehnten Gebietes, welches vor dem Auftreten von Hertz kaum zugänglich erschien. Stets habe ich die Beobachtungen von Hertz bestätigt gefunden; in einem wichtigen Punkte jedoch erhielt ich ein anderes Resultat: ich fand nämlich für die Geschwindigkeit der Electricität in Drähten, für welche Hertz 200,000 km/s angibt, fast genau den Werth der Lichtgeschwindigkeit, wie dies ja auch die Maxwell'sche und alle sonstigen Theorien fordern. Warum mein Resultat von dem Hertz'schen differirt, kann ich nicht angeben. Eine mögliche Fehlerquelle bei Hertz, welche ich zuerst zur Erklärung dieser Abweichung heranziehen wollte, erwies sich bei näherem Studium als zu klein. Da aber meine Methode sehr einfach und übersichtlich und dabei ungemein leicht (ja sogar in Form eines Vorlesungsversuches) ausführbar ist, halte ich meinen Werth nicht nur theoretisch, sondern auch experimentell für den wahrscheinlicheren.

Der Versuch in seiner einfachsten Form.

A und A' sind quadratische Blechplatten von 40 cm Kantenlänge; sie sind mittelst eines 100 cm langen Drahtstückes verbunden, das in der Mitte durchschnitten ist und daselbst in F zwei Messingkugeln von ca. 3 cm Durchmesser enthält (in Fig. 1 ist nur der Querschnitt der quadratischen Platten gezeichnet). Die beiden Messingkugeln haben einen Abstand von ca. 0,75 cm voneinander und stehen mittelst eines dünnen Drahtes in Verbindung mit den Polen eines

sehr kräftigen Inductoriums, dessen Rolle eine Länge von 35 cm und einen Durchmesser von 18 cm hatte; dasselbe wurde durch vier kräftige Accumulatoren, in einigen Fällen auch durch eine Dynamomaschine gespeist. Zur Stromunterbrechung diente ein

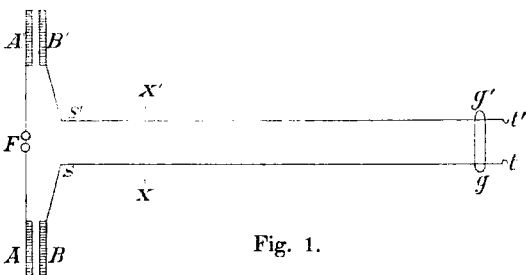


Fig. 1.

Foucault'scher Quecksilberinterruptor. Den Platten A und A' gegenüber stehen zwei gleichgrosse Platten B und B' in einer Entfernung von etwa 4 cm. Von diesen Platten B, B' führen zwei Drähte gegen s und s' und von da parallel bis t und t' . Der Abstand der parallelen Drähte voneinander (s bis s') sei 10–50 cm; die Länge st ($s't'$) hingegen muss mindestens 400 cm betragen. Der Durchmesser dieser parallelen Drähte betrug hier und bei allen Versuchen dieser Publication 1 mm. Für diesen ersten Versuch nehmen wir an, die Länge sei etwa 600 cm (in der Figur zu kurz gezeichnet), die Entfernung der parallelen Drähte voneinander 30 cm. An den Enden der parallelen Drähte (t und t') ist je eine Schnur befestigt, welche in der Verlängerung der Drähte noch etwa 100 cm weiter führt und ein leichtes und bequemes Spannen derselben ermöglicht.

Dieser Theil meiner Anordnung ist jener ähnlich, welche in der schönen Arbeit von Hertz¹⁾ angegeben ist und welche auch bei den Versuchen von Sarasin und De la Rive²⁾ in Verwendung kam.

Ueber die Drahtenden t und t' lege ich nun eine ausgepumpte Glasröhre ohne Electroden gg' , am besten mit Stickstoff und einer Spur Terpentindampf gefüllt; diese Glasröhre beginnt infolge der electrischen Schwingungen in den Drähten zu leuchten.

1) Hertz, Wied. Ann. 34. p. 551. 1888.

2) Sarasin u. De la Rive, Arch. des sciences phys. et natur. Genève. 23. p. 113. 1890.

Legt man jetzt, während die Röhre hell leuchtet, einen Drahtbügel über die parallelen Drähte, so wird er dieselben metallisch miteinander verbinden (die Richtung des Drahtbügels ist senkrecht zur Richtung der Drähte und durch die punktierte Linie xx' in Fig. 1 angedeutet); dann verschwindet momentan das Licht der Röhre. Verschiebt man nun den Querbügel xx' längs der Drähte, so kommt man an gewisse, merkwürdig scharf definirte Stellen, wo die Röhre plötzlich wieder aufleuchtet.¹⁾ Die Aufsuchung dieser Stellen und der die Lage dieser Stellen bedingenden Umstände bildet den Hauptinhalt dieser Arbeit.

Bei obiger Länge der Drähte von etwa 600 cm und einer gegenseitigen Entfernung von ca. 30 cm liegt die Stelle, an welcher beim Gleiten des Verbindungsbügels längs der parallelen Drähte die Röhre am Ende plötzlich aufleuchtet, ungefähr 100 cm von s und s' entfernt, also ungefähr in jener Gegend, welche in Fig. 1 mit x und x' bezeichnet ist,

Warum leuchtet die Röhre gerade nur bei Ueberbrückung dieser Stelle?

Die erste Idee bei Beantwortung dieser Frage scheint die, dass man in den Punkten x und x' Schwingungsbäuche der electrischen Schwingungen habe. Die Schwingung in dem Drahtstücke Bst stellt sich jedenfalls so her, dass am Ende t abwechselnd grosse Potentialschwankungen vor sich gehen; es würde dies in einer akustischen Analogie dem geschlossenen Ende einer Pfeife entsprechen. Die Electricität — Luft — drängt gegen dieses Ende hin und von demselben wieder weg, sodass wir an dieser Stelle das haben, was man bei einer akustischen Bewegung den Knotenpunkt nennt. Da wir auch in der Platte B solche abwechselnde Verdichtungen und Verdünnungen haben, so wäre wohl die Idee am nächsten liegend, dass, während die electrische Strömung zwischen B und t hin und her schwingt, in der Mitte sich

1) Statt der Glasröhre liesse sich auch in ganz analoger Weise ein Funken verwenden, welchen man zwischen t und t' durch Einschaltung eines Funkenmikrometers erhält; die Messungen scheinen aber genauer, wenn ein Ausgleich der Potentiale durch den leitenden Funken vermieden wird. Eine in einigen Punkten ähnliche Anordnung hat J. J. Thomson angegeben. Proc. of Roy. Soc. of Lond. 46. p. 11. 1889.

irgendwo eine Stelle befinden muss, wo das Potential während der Strömung stets Null ist; es entspricht dies dem Schwingungsbauch einer Pfeife, wo die Luft ohne jede Verdichtung und Verdünnung hin und her pendelt. In dem zweiten Drahte $B's't'$ ist das Zeichen des Potentials, ebenso wie das der Bewegung, stets das entgegengesetzte. Wenn ich daher die (electrische) Mitte der beiden Drähte miteinander verbinde, so würde nach dieser Auffassung im Querbügel keine Bewegung stattfinden und derselbe daher gerade an dieser Stelle die electrische Erscheinung nicht stören, sodass am Ende, in der Nähe der Röhre, heftige Potentialschwingungen stattfinden, welche die Röhre zum Leuchten bringen.

Diese — wiewohl die zunächst liegende — Erklärung gibt aber das Wesen des Versuches nicht vollständig. Wir haben es vielmehr mit einer Resonanzerscheinung zu thun. Wenn ich den Querbügel über xx' lege, so stellt sich zunächst eine Hauptschwingung her, welche, von B ausgehend, über $sxx's'$ nach B' geht. Schon das Ohr erkennt am Knattern des Funkens die Aenderung der Hauptschwingung. Diese erste Schwingung erzeugt durch Induction eine zweite Schwingung, welche in xx' erregt wird und sich von t' über $x'x$ nach t fortpflanzt. Dass diese Auffassung die richtige ist, wird aus vielen Beispielen der späteren Messungen hervorgehen, doch will ich gleich hier einige diesbezügliche Versuche angeben.

Der Verbindungsdraht xx' muss eine bestimmte Länge haben; sagen wir, den obigen Dimensionen entsprechend, 42 cm. (Fig. 2 gibt den Querbügel mit seinem Holzgriffe in $\frac{1}{10}$ seiner natürlichen Grösse wieder.) Nimmt man als Querbügel einen langen Draht, so rückt xx' je nach Umständen von oder gegen ss' . Die Hauptschwingung habe zuerst die Drahtlänge R zur Verfügung, plus der Brücke, die wir ihrer Kürze wegen vernachlässigen wollen; die resonirenden Wellenlängen hätten eine kleinere Länge r . Hat nun die Brücke eine grössere Länge l , so wird das frühere Verhältniss $R:r$ in $(R+l):(r+l)$ verrückt, daher die Verschiebung von xx' .

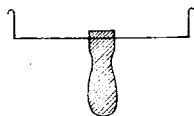


Fig. 2.

Uebers dies aber ist die ganze Erscheinung bei Ueberbrückung der parallelen Drähte mittelst eines langen Verbindungsstückes viel weniger ausgeprägt als früher. Eine luftleere Röhre hat nämlich das Unangenehme, dass sie den kleinsten electricischen Kräften gegenüber reagirt, und da jetzt die Strecke xx' , wo die Induction stattfindet, viel grösser ist als früher, ist auch die Resonanz eine viel stärkere, sodass auch bei einer minder guten Uebereinstimmung der beiden Schwingungen noch immer hinlänglich Energie zur Erregung der Lichterscheinung da ist. Die Röhre bleibt immer hell. Macht man umgekehrt den Drahtbügel sehr klein, bringt man die beiden Drähte etwa gar durch Zusammenbiegen an der entsprechenden Stelle xx' zur thatsächlichen Berührung, so leuchtet die Röhre gar nicht mehr. Die Strecke xx' , durch deren Induction die Energie für den ungeschlossenen Kreis $txx't'$ geliefert wird, ist jetzt zu klein, und auch hierdurch wird die Erscheinung, und zwar im entgegengesetzten Sinne wie früher, wo der Querbügel zu lang war, gestört. Die Röhre bleibt immer dunkel.

Ein weiterer Beweis dafür, dass wir es hier mit einer Resonanzbewegung zu thun haben, dürfte folgender sein:

Ich mache den Querbügel so, dass er aus zwei voneinander isolirten parallelen Drähten besteht, bringe ihn genau an die Stelle xx' , wo die Röhre hell aufleuchtet, löthe

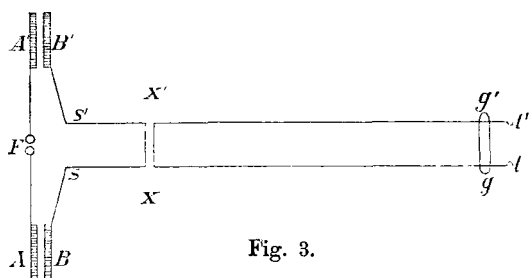


Fig. 3.

ihn an dieser Stelle fest und spalte jetzt durch Durchschneiden der Hauptdrähte den Bügel xx' der ganzen Länge nach entzwei.

Nun haben wir den ersten Stromkreis $Bsxx's'B'$ metallisch geschlossen und daneben, von ersterem vollständig isolirt, den secundären Leiter $txx't'$. Nach dieser Längsspaltung von xx' leuchtet die Röhre ganz so wie früher (Fig. 3).

Es seien nun die Drähte genau so wie früher gespannt, ein einfacher Drahtbügel von passender Länge quer über-

gelegt und so lange hin- und hergeschoben, bis die Röhre am Ende hell aufleuchtet. Wollen wir nun der Gründlichkeit wegen den Beweis dafür erbringen, dass die Röhre auch für die kleinsten Potentialschwingungen anspricht, so können wir die Röhre fast bis zu xx' verschieben, ohne dass ihr Licht sich irgendwie verändert.

Der Bügel sei in seiner richtigen Lage xx' , die Röhre liege irgendwo in der Mitte zwischen xx' und tt' , und ich schneide jetzt von den Drahtenden je etwa 100 cm weg. Dadurch wird der secundäre Kreis verkleinert, die Resonanz hört momentan auf: die Röhre ist dunkel. Schiebe ich jetzt aber den Bügel xx' gegen ss' , so verkleinere ich zu gleicher Zeit die primäre Schwingung und vergrößere die secundäre, und wenn ich xx' etwa 50 cm zurückgeschoben, findet wieder Resonanz statt: die Röhre leuchtet von Neuem auf. Dieser Versuch und der sofort zu beschreibende sind besonders für Vorlesungszwecke sehr geeignet.

Es sei nun wieder der Bügel an der richtigen Stelle und die Röhre leuchte. Wenn ich jetzt über die beiden Drahtenden tt' je ein Stanniolblatt lege, so wird durch Einführung dieser Capacität am Ende die Schwingungsdauer eine langsamere, die Röhre hört momentan zu leuchten auf, und ich muss mit dem Bügel xx' gegen tt' rücken, um sie wieder hell leuchten zu machen. Dagegen kann man den Bügel, den Schwingungsbauch, berühren oder eine Capacität an denselben hängen, ohne die Erscheinung zu stören; wenn ich aber an einer anderen Stelle die Leitung berühre, erlischt das Licht sofort.

Man sieht aus diesem einfachen Versuche schon, dass diese Methode geeignet ist, Capacitäten (und Dielectricitätsconstanten) bei so raschen Schwingungen zu vergleichen, und dass man auch die Aequivalenz der Selbstpotentiale und der Capacitäten in der bekannten Formel für die Schwingungsdauer electrischer Oscillationen prüfen kann.

Ein Nachweis dafür, dass man es hier wirklich mit electrischen Oscillationen zu thun hat, kann in derselben Weise erbracht werden, wie dies Hertz gethan. Zieht man die Kugeln des Hauptfunkens soweit auseinander, dass die Oscillationen in dem Hauptfunken aufhören — man kann

die Kugeln auch soweit voneinander ziehen, dass gar kein Funke mehr überspringt — so bleibt die Röhre immer dunkel, wiewohl jetzt an den Drahtenden die volle Spannung des Ruhmkorff ungeschmälert zur Geltung kommt.

Beschreibung einiger wichtiger Nebenumstände.

Um meine Methode vollständig zu beschreiben, möchte ich in diesem Abschnitte einige Nebenumstände besonders erwähnen, welche für das Gelingen der Versuche wichtig sind.

Statt der eingangs geschilderten Röhre kann man auch eine Geissler'sche Röhre über die Enden t und t' legen.¹⁾

1) Die Verwendung Geissler'scher Röhren bei den Hertz'schen Versuchen hat zuerst Dragoumis (Nat. 39. p. 548. 1889) angegeben. Ich habe gleichfalls die meisten der Hertz'schen Versuche in ähnlicher Weise, wie es Dragoumis beschreibt, mit Hülfe von Geissler'schen Röhren in der Festversammlung der chemisch-physikalischen Gesellschaft am 12. December 1889 in Wien gezeigt, wobei ich mich jedoch, um durch Ableiten der Electricität nicht gestört zu sein, zum grössten Theile solcher Röhren bediente, welche keine Electroden besaßen. Dass solche Röhren durch electricische Induction ins Leuchten kommen können, ist ja eine längst bekannte Thatsache, als neu entdeckt erst jüngsthin von Hrn. James Moser (Wien. Ber. 99. p. 5. 1890). Dieses Leuchten entsteht, wie schon Worthington (Phil. Mag. (5) 19. p. 218. 1885) muthmaasst, wohl durch keinerlei Strom, es entspricht vielmehr dem Hin- und Herschwanke der Induction in der Röhre.

Nur in einem Falle haben mir bei Nachmachung der Hertz'schen Versuche die Geissler'schen Röhren den Dienst versagt. Ich wollte bei dem bekannten Versuche mit dem parabolischen Hohlspiegel das kleine Fünkchen hinter dem zweiten Spiegel einem grösseren Zuschauerkreis sichtbar machen und habe es zunächst mit verschiedenen Electroden probirt, wobei ich die besten Resultate erhielt, wenn ich das Fünkchen zwischen einer Quecksilberkuppe und einer Kupferspitze überspringen liess. Noch schöner ist der Funke zwischen Quecksilber und Zink, nur tritt da leider nur gar zu leicht ein kräftiges Amalgamiren und Abbrechen der Spitze ein. Wenn ich nun die Luft um das kleine Fünkchen, welches zwischen Quecksilber und Kupfer übersprang, durch Auspumpen entfernte, änderte das Fünkchen weder Helligkeit, noch Gestalt, sodass sich mit freiem Auge nicht einmal entscheiden liess, ob die Entladung im luftleeren Raume oder unter gewöhnlichem Atmosphärendruck vor sich ging.

Auch möchte ich noch erwähnen, dass besonders bei nahen Distanzen manche der Funken, wie sie Hertz bei seinen Versuchen in secundären Leitern erzeugt, Knallgas zur Explosion bringen, durch welches Mittel man gleichfalls das Vorhandensein des Fünkchens einem grösseren Auditorium bemerkbar machen kann.

Dies wurde jedoch vorsichtig so eingerichtet, dass die Electroden der Geissler'schen Röhre nicht nur mit den Drahtenden t und t' in keinerlei metallische Verbindung traten, sie waren vielmehr immer noch einige Centimeter von denselben entfernt. Es soll nämlich durch das Ueberlegen der Geissler'schen Röhre oder der früher erwähnten Glasröhre keinerlei electriche Strömung zwischen den beiden Drähten vermittelt werden. Unter einer grösseren Anzahl Geissler'scher Röhren, die je nach Inhalt und Druck verschieden wirken, wird man immer einige passende herausfinden können. Die ausgepumpte Röhre, welche ich verwendete, brauchte ich nicht einmal mit den Drähten in Berührung zu bringen; selbst in 10 cm Entfernung leuchtete sie noch, sowie electriche Oscillationen in den Drähten stattfanden. (Bei directer Induction durch die primäre Schwingung konnte ich bis auf 1 m Entfernung gehen.) So konnte ich mich leicht davon überzeugen, dass beim directen Ueberlegen der Röhre die Schwingungsbäuche an derselben Stelle liegen, wie wenn die Röhre die Drähte gar nicht berührt, dass wir somit wirklich einen Indicator für die electriche Oscillationen haben, ohne dass dieselben dadurch merklich gestört wurden.

Bei Vorlesungsexperimenten jedoch, wo es sich in erster Linie um ein brillantes Leuchten handelt oder bei sehr grossen Drahtlängen, wo die Schwingung schon sehr schwach ist, empfiehlt es sich, an jener Stelle der luftleeren Röhre, wo dieselbe an den Drähten anliegt, je einen kleinen Draht-ring oder einen Stanniolstreifen nach Art der Gassiot'schen Röhren herumzubiegen. Ja, selbst ein directes Einschalten der Geissler'schen Röhre ändert die Lage der Wellen nur wenig.

Was den Hauptcondensator AB und $A'B'$ betrifft, so ist auch dessen Beschaffenheit an einige Bedingungen geknüpft. Seine Capacität soll möglichst gross sein, damit die Schwingungen in den Drähten kräftig ausfallen. Macht man aber diese Capacität zu gross, so hört die ganze Erscheinung auf. Wir werden in späteren Messungen einige Mal Gelegenheit haben, zu sehen, dass die Capacität des Condensators bei gewissen Drahtlängen einen Maximalwerth nicht übersteigen darf, dass somit wirklich, wie dies ja die Theorie auch for-

dert, dann ein Oscilliren der Electricität aufhört. Bei einer Vergrösserung des Condensators wird die Erscheinung immer verschwommener und capriciöser, die sonst gleichförmig leuchtende Röhre leuchtet nur alle paar Secunden einmal auf, um schliesslich ganz dunkel zu bleiben, sodass man es nicht mit einem plötzlichen Versagen, sondern mit einem immer Undeutlicherwerden des Phänomens zu thun hat.

Ferner habe ich der Bequemlichkeit wegen versucht, den Luftcondensator durch einen an Capacität gleich grossen, aber räumlich kleineren Glascondensator zu ersetzen. Hier tritt ein anderer Uebelstand störend hervor: die Dichtigkeit der Electricität wird eine zu grosse. Ich habe ein Glas von 22 mm Dicke verwendet und darüber entsprechend grosse Stanniolscheiben geklebt, das Ganze überdies in Paraffin oder in Schellack gebettet, und trotzdem war die Ausstrahlung der Electricität am Rande der Scheibe eine so grosse dass man die Lichterscheinung durch das Paraffin sah.

Um das lästige Aufpoliren der Kugeln, zwischen welchen der Funken überspringt, zu vermeiden, habe ich diese Kugeln excentrisch gestellt, sodass beim Drehen der Electroden um die Längsaxe ohne Aenderung der Funkendistanz stets neue Partien der Kugeln in die Funkenbahn kamen. Die Länge des Funkens ist von keinerlei Einfluss, solange er nicht zu gross oder zu klein wird, in welch' ersterem Falle die Oscillation ganz aufhört, in letzterem aber die Potentialschwankung eine zu kleine wird.

Des Ferneren fand ich, dass die Lage der Schwingungsbäuche abhängig ist von der Entfernung, in welcher die beiden parallelen Drähte voneinander gespannt sind. Hingegen konnte ich einen Einfluss der umliegenden Gegenstände, der Wände, Gasarme etc. auf die Schwingungsdauer kaum beobachten. Gleichwohl habe ich es vermieden, den Platz eventueller grösserer Leiter in der Nähe der Drähte während der Versuchsdauer zu verändern.

Weiter zeigte sich, dass bei Versuchsreihen, welche miteinander zu vergleichen sind, der Zuleitungsdraht vom Inductorium her der primären Schwingung stets an der nämlichen Stelle zugeführt werden muss; es ist somit nicht gleichgültig, ob die Zuleitung mehr in der Nähe der Elec-

troden, in der Mitte der Leitung oder am Condensator endet. Auch die Gestalt des Zuleitungsdrahtes ist von Einfluss auf die Lage der Schwingungsbäuche. Jedenfalls schwingt der Zuleitungsdraht mehr oder weniger mit. Ich will die betreffenden Messungen hier nicht mittheilen, da einige Schlüsse, welche ich im Laufe der Arbeit experimentell ziehen werde, diese Behauptung erhärten.

Nachdem alle diese Bedingungen ausprobiert waren, schritt ich zu folgender Anordnung.

Wellenlänge in verschieden langen Drähten.

Fig. 4 gibt die Anordnung der Versuche. Die primäre Schwingung findet zwischen den vertical stehenden Platten A und A' (Quadrate mit 40 cm Seitenlänge) durch den Funken F statt. Die Entfernung von A bis A' ist 66 cm. Von A und A' je 6 cm entfernt stehen die secundären Platten B und B' ; es ist zwischen den Platten A und B

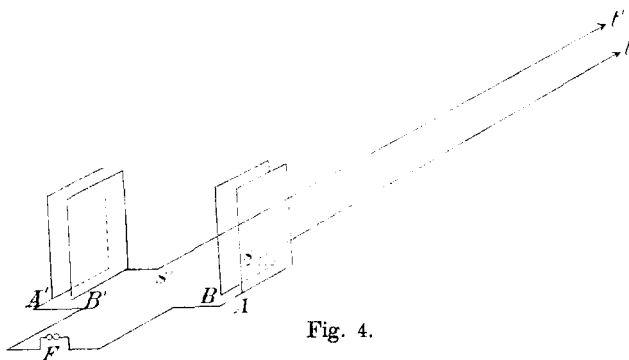


Fig. 4.

überdies noch je ein dünnes Paraffinpapier eingeschoben (in der Fig. 4 nicht gezeichnet), um jedes Ueberströmen der Electricität unmöglich zu machen. Die Drahtlänge von der Ecke der Platte B bis zu s beträgt 10 cm, die Strombahn von A bis F 100 cm.

Die Zuleitung der Electricität geschieht unmittelbar neben den Kugeln. Bei den nun zu schildernden Versuchen blieb der ganze Theil der beschriebenen Anordnung unverändert stehen, während von s und s' an ($ss' = 31$ cm) die beiden Drähte in horizontaler Richtung parallel weggeführt

wurden und die Länge dieser Drähte (st und $s't'$) von 300 bis 3500 cm variirt werden konnte. Dann wird die in Fig. 2 gezeichnete Brücke (Stromlänge = 42 cm) verschoben und jene Stelle, wo die Röhre am Ende der Drähte aufleuchtete, notirt.

Folgende Tabelle enthält einen Theil dieser Beobachtungen, und zwar beschränke ich mich auf eine Länge von 2000 cm, da die Resultate der grösseren Distanzen mir nichts wesentlich Neues zu geben und auch weniger genau zu sein scheinen.

Länge des Drahtes in cm	Entfernung der Bäuche von ss' in cm					
247	—	—	—	—	—	—
348	33	—	—	—	—	—
451	73 <i>g</i>	—	—	—	—	—
648	113 <i>g</i>	477 <i>s</i>	—	—	—	—
870	243 <i>gg</i>	591 <i>s</i>	712 <i>ss</i>	—	—	—
1062	<u>34</u>	<u>329 <i>g</i></u>	<u>733</u>	892 <i>s</i>	—	—
1270	<u>77</u>	435	<u>890</u>	1036	1270	—
1435	<u>0</u>	99	<u>591</u>	803 <i>ss</i>	<u>1006</u>	<u>1166</u>
1632	<u>22</u>	<u>145</u>	<u>631</u>	<u>1151</u>	<u>1232</u>	—
1801	40	174	756	1293	1469	1562
1956	58	197	758	821	1385	1588

u. s. w.

Ein neben den Zahlen für die Schwingungsbäuche stehendes *g* bedeutet, dass die Erscheinung deutlich erscheint, das Licht der Röhre hell ist; *gg* bedeutet sehr gut, *s* schlecht, *ss* sehr schlecht.

Diese Zahlen scheinen besonders bei weiteren Distanzen ganz willkürlich über die Drahtlängen zerstreut zu liegen. Folgender Versuch gibt eine Erklärung hierfür.

Verschieben wir, während der erste Drahtbügel an seiner Stelle bleibt, einen zweiten gleich grossen Querbügel längs der Drähte, so finden wir neuerlich Stellen, wo die Röhre aufleuchtet, immer aber nur an solchen Orten, wo bereits der erste Versuch mit dem einen Drahtbügel allein einen Schwingungsbauch angezeigt. Liegen diese zwei Bügel an ihrer richtigen Stelle, so kann man auch noch einen

dritten aufsetzen, u. s. f. Die Zahlen, welche in obiger Tabelle einmal, resp. zweimal unterstrichen sind, zeigen an, dass sie in dieser Weise zusammengehören.

Legen wir z. B. bei der Drahtlänge 1632 einen Bügel aber 22, so leuchtet die Röhre. Wir lassen den Bügel ruhig liegen und nehmen nun einen zweiten, und wenn wir diesen verschieben, leuchtet die Röhre bei 631 oder bei 1232, nicht aber bei 145, 1151 oder an sonstigen Stellen. Legen wir diesen zweiten Bügel jetzt (der erste bleibt auf 22) auf 631 und suchen den Draht mit einem dritten Bügel ab, so müssen wir genau auf 1232 gehen, damit die Röhre wieder leuchte.

Ebenso können wir andererseits bei der gleichen Drahtlänge von 1632 auch in ähnlicher Weise 145 und 1151 gleichzeitig überbrücken.

Es gehören also bei dieser Drahtlänge von den fünf Knotenpunkten zusammen 22, 631 und 1232, welche gleichzeitig überbrückt zusammen leuchten, oder aber 145 und 1151.

Diese Versuche machen eine ohnehin naheliegende Erklärung selbstverständlich. Die Electricität in einem Drahte von bestimmter grösserer Länge schwingt ähnlich wie die Luft in einer Pfeife. Denken wir uns eine lange Röhre mit Luft gefüllt und am Anfange der Röhre eine Vorrichtung ähnlich der einer Zungenpfeife. Eine kurze Strecke hinter dieser Pfeife sei die Röhre durch eine in der Längsrichtung verschiebbare, ziemlich starre Quermembran geschlossen. Die Schwingungsdauer der Pfeifenzunge bestimme die Tonhöhe, werde aber bis zu einem gewissen Grade von der Schwingung der anliegenden, bis zur Membran reichenden Luftsäule beeinflusst. Wenn ich hier die Membran längs der Röhre verschiebe, so wird das Ende der Röhre in gewissen Fällen resoniren, in anderen nicht, und die Erscheinung wird nur dadurch scheinbar complicirter, weil wir mit dem Verschieben der Membran nicht nur das Verhältniss der beiden Röhrentheile, sondern gleichzeitig auch — bis zu einem gewissen Grade — die Schwingungsdauer der erregenden Zunge ändern.

Ähnlich ist es bei unseren electrischen Schwingungen.

Fig. 5 stelle der Reihe nach die verschiedenen Draht-

längen der Tabelle auf p. 860 vor. Die Drahtlängen sind so aufgezeichnet, dass die Enden derselben eine gerade Linie bilden. Bei der Länge 348 cm und 451 cm liegt der Schwingungsbauch *a* in der electrischen Mitte zwischen dem Drahtende und *BB'*. Bei 648 und 870 müssen wir mit diesem Punkte noch weiter hinausrücken; es ist somit auch die primäre Schwingung vergrößert worden. Gegen das Ende der Drähte liegen zwei weitere, undeutlich ausgesprochene Punkte *c* und *b*, deren Bedeutung erst bei grösseren Längen, sagen wir z. B. 1435, klar wird. Es sind dann neue Schwingungsbäuche vom Anfange her in den Draht hineingerückt.

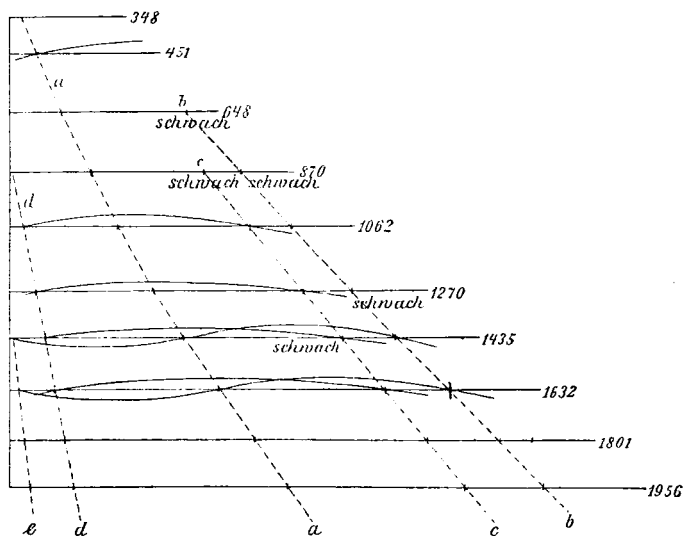


Fig. 5.

Betrachten wir zuerst den mittleren Schwingungsbauch *a*. Wenn wir den Draht immer länger gemacht haben, mussten wir mit *a*, wie die Zeichnung zeigt, ganz symmetrisch hinausrücken, d. h. da zunächst die secundäre Drahtlänge vergrößert wurde, mussten wir, um Resonanz zu erzielen, auch die primäre vergrößern. In einem gewissen Momente aber lässt sich die primäre Schwingung durch den angehängten Draht nicht weiter vergrößern (genau wie im obigen akustischen Beispiel die Schwingung der Pfeifenzunge stärker wird als die der mitschwingenden Luftmasse). Wir sehen das zum

ersten Mal bei einer Drahtlänge von 1435, wiewohl die ersten Anzeichen schon viel früher eintreten. Vom Schwingungsbauch a aus haben wir nicht, wie früher, *eine* halbe Wellenlänge bis zum Ende, sondern *drei* halbe, es hat sich zwischen a und dem Ende ein neuer Schwingungsbauch herausgebildet, ebenso natürlich auch auf der anderen Seite zwischen a und B , und wir können daher jetzt drei Brücken auflegen. Die eine Curve zeigt die betreffende Schwingungsform; sie schneidet die horizontale in drei Punkten, den Schwingungsbäuchen, jenen Stellen, die man gleichzeitig überbrücken kann, c , a und b . Diese Längen, 1435 und die benachbarten, können aber auch noch so schwingen, dass sich bei d und e je ein Schwingungsbauch herausbildet.¹⁾

Aus diesen Versuchen lässt sich auch ersehen, wie gering der Einfluss der umliegenden Gegenstände ist. Die Zahlen 0, 591, 1166 für die Länge 1435 ergeben die Wellenlängen 591 und 575, die Zahlen 22, 631, 1232 für die Länge 1632 ergeben die Wellenlängen 609 und 601; endlich die Zahlen 40, 756 und 1469 für die Länge 1801 ergeben die Wellenlänge 716 und 713 u. s. f., woraus ersichtlich, dass die Wellenlängen rechts und links von a bis auf einige Procent einander gleich sind, wiewohl die erste Drahthälfte ziemlich knapp durch einen Thürstock, die zweite jedoch ganz frei durch einen grossen Saal ging. Nur wenn metallische Leiter in der Nähe wären, welche auf die Schwingungen ungefähr resonirten und dabei auch einen beträchtlichen Theil der Energie der ursprünglichen Schwingung absorbirten, nur dann würde sich ein Einfluss auf die Lage der Bäuche herausstellen.

Dass dem so ist, ergibt ja gerade die ganze Versuchreihe, und dieses Ergebniss erscheint mir nicht unwichtig. Die Oscillation einer primären Schwingung ist nicht unter allen Umständen unveränderlich. In den eben geschilderten

1) Die ähnliche Methode der nach dem ersten Erscheinen dieser Abhandlung erfolgten, somit ziemlich gleichzeitigen Arbeit von K. Waitz (Wied. Ann. 91. p. 435. 1890) halte ich nicht für einwurfsfrei. Zwei benachbarte Lagen der Brücke ohne Berücksichtigung der sonstigen Drahtlängen würden z. B. oben 22 cm u. dergl. ergeben. Auch ist die Lage des Funkens als Indicator nicht glücklich gewählt. Den Ausdruck Schwingungsknoten wendet Waitz anders an als ich es oben nach dem Beispiele von Hertz gethan.

Versuchen, die allerdings dadurch, dass ein grosser Energie-
theil der Hauptschwingung für die Nebenschwingung ver-
wendet wird, besonders dazu geeignet sind, erhalten wir ja
bei einer und derselben primären Oscillation alle möglichen
Wellenlängen innerhalb gewisser Grenzen.

Capacitäten an den Drahtenden.

Die beiden Drähte hatten je eine Länge von 1122 cm;
die primäre Schwingung und die Hauptcondensatoren *AB*
waren genau wie früher. Das Ende der Drähte war durch
je einen weichen Draht von 69,7 cm Länge mit einer kreis-
förmigen Condensatorplatte ($R = 8,96$ cm) verbunden.

Entfernung der Con- densatorplatten von- einander in cm	Entfernung der Schwingungs- bäuche von <i>ss'</i> in cm	
	<i>c</i>	<i>a</i>
1,6	561,3	1020,5
1,2	590,3	1043,3
0,9	630,4	sehr { 1071,3
0,7	659,1	schwach { 1081,5
0,6	679,8	nichts { —
0,5	695,5	zu sehen { —

Aus dieser Tabelle ist zu ersehen, dass eine Vergrösse-
rung der Capacität am Ende die Schwingungsdauer ver-
längert; ich muss mit dem Bügel hinaus. Des ferneren zeigt
sich, dass diese Vergrösserung, absolut durch die Ver-
schiebung in Centimetern gemessen, für die kleinere Schwin-
gungsdauer viel weniger ausbildet. Die Zahlen steigen von
1020 auf 1081 um 61, während die entsprechenden Zahlen
561 und 659 sich um 98 unterscheiden. Es ist dies eine
Folge der Aequivalenz des Selbstpotentials und der Capacität.
Bei einer Vergrösserung der Capacität muss, wenn die
Schwingungsdauer gleich bleiben soll, der längere Draht viel
stärker verkleinert werden, als der kürzere.

Weiter zeigt sich, dass bei Vergrösserung der Capacität
die Schwingung, wie bereits eingangs angedeutet, eventuell
ganz aufhört, und zwar nur die raschere, denn nur für diese
ist dann die Capacität im Verhältnisse zum Selbstpotential
zu gross. Wäre das Versagen ein präciseres, so könnte man
daraus den enormen Widerstand des Kupferdrahtes gegen
so rasche Schwingungen berechnen.

Schliesslich möchte ich an dieser Stelle darauf hinweisen, dass man denselben Knotenpunkt sowohl durch Aenderung der Drahtlänge als auch der Capacität erreichen und auf diese Weise die Aequivalenz des Selbstpotentials und der Capacität nachweisen kann. Obige Messungen sind wegen nicht genügend genauer Parallelstellung der Condensatorplatten wohl kaum zu einer genaueren Rechnung zu verwenden.

Ebenso kann derselbe Schwingungsbauch dadurch erhalten werden, dass man die Condensatorplatten auseinander zieht und dafür ein Dielectricum einschiebt. Ueber eine auf diese Weise vorgenommene Bestimmung der Dielectricitätsconstanten, will ich in einer demnächst erscheinenden Arbeit referiren.¹⁾

Geschwindigkeit der Electricität in Drähten.

Ich glaube, dass die von mir geschilderte Methode eine einwurfsfreie Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer electrischen Welle im Drahte gestattet. Zu dem Zwecke wurden die Condensatorplatten am Ende der Drähte in eine Entfernung von 0,990 cm gebracht. (Da die Platten, trotzdem sie für diesen Versuch ganz besonders vom Mechaniker montirt wurden, nicht genau parallel standen, so wurden sie zunächst mittelst einer Mikrometerschraube soweit zusammengeschraubt, bis der Contact derselben durch die Leitung eines electrischen Hilfsstromes sich zeigte und hierauf mit einem sehr flachen Keil die nicht aufeinander liegenden Stellen von der Seite her gemessen. Obige Zahl ist bereits das Mittel dieser Messungen.) Die beiden geraden Drähte hatten, wie früher, eine Länge von 1122 cm; von ihren Enden ging, wie früher, je ein lose gespannter Draht von 69,7 cm Länge zur Mitte der beiden Condensatorplatten OO' . Die Glasröhre gg' liegt über diesem Condensator OO' .

Die beiden langen Drähte wurden nun an zwei Stellen, d und c , gleichzeitig überbrückt und d und c sorgfältig so gewählt, dass die Röhre am Ende möglichst schön aufleuchtete. d liegt 121,5 c 1061,1 cm vom Anfange ss' entfernt (Mittel aus 20 Versuchen).

1) Vorgelegt in der Sitzung der Wiener Acad. am 16. Mai 1890.
Ann. d. Phys. u. Chem. N. F. **XLI**.

Wir haben jetzt zwei Schwingungen scharf abgegrenzt: eine halbe Schwingung geht zwischen den beiden Condensatorplatten über cc' hin und her, während die entsprechende ganze Schwingung die geschlossene Strombahn der Strecke $dcc'd'$ ausfüllt (Fig. 6). Es ist somit die halbe Wellenlänge der ganzen Schwingung gleich $cd + \text{Querbrücke} = 982 \text{ cm}$, weil der Querbügel $= 42,0 \text{ cm}$ ist.

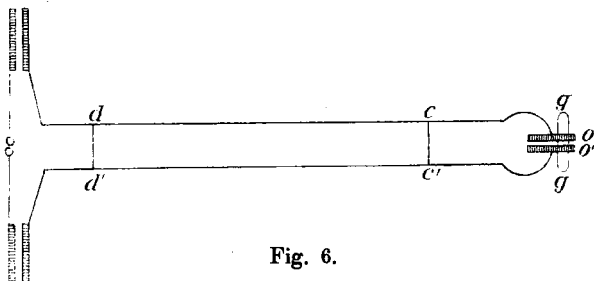


Fig. 6.

Die Schwingungsdauer hierfür lässt sich aber aus der zweiten Schwingung nach der Formel $\pi\sqrt{PC}/v$ berechnen, wo P das Selbstpotential, C die Capacität und v die Lichtgeschwindigkeit respective die Verwandlungszahl des electromagnetischen in electrostatisches Maasssystem ist, da ich P und C in diesen beiden Maassen ausdrücke. Für das Selbstpotential P verwenden wir die einfache Neumann'sche Formel $2L\{\log \text{nat.}(4L/d) - 0,75\}$ und erhalten $P = 5248 \text{ cm}$, wenn wir für die Länge L der Strombahn hier einsetzen:

$2 \times (\text{Abstand des Bauches } c \text{ vom Ende} + \text{Condensatorzuleitungsdraht}) + \text{Querbrücke}$, d. i. $303,2 \text{ cm}$, und für den Durchmesser des Drahtes $d = 0,1 \text{ cm}$.

Die Capacität berechnet sich mit 20 cm nach der einfachen Formel $R^2/4\delta$; würde ich die Kirchhoff'sche¹⁾ Formel anwenden, so käme ich auf ungefähr $22 (R = 8,96 \text{ cm}$ und $\delta = 0,990 \text{ cm})$. Da die Strombahn eine verhältnissmässig kurze ist und in der Mitte der kreisförmigen Platten eigentlich nicht endet, so glaube ich, dass der Condensator nicht ganz ausgenützt wird, dass man, ohne die Wirkung wesentlich zu ändern, noch aus der Mitte der Platte ein kreisförmiges Loch ausschneiden könnte. Man könnte vielleicht durch einen solchen Versuch ersehen, inwieweit die Condensatorplatten

1) Kirchhoff, Gesammelte Abhandlungen. p. 101.

ihrer theoretischen Aufgabe, die Enden der Stromschwankung zu bilden, nachkommen. Ich glaube daher, dass auch die Zahl 20 noch zu hoch ist, gleichwohl will ich diese Zahl in Ermangelung der richtigen anwenden. Aber auch die Zahl 22, welche nach den Messungen von Klemenčič¹⁾ auch bei der angewandten Distanz noch annähernd richtig sein dürfte, würde das Endresultat nicht wesentlich alteriren.

Wir erhalten somit:

$$\pi\sqrt{PC} = \pi\sqrt{5248.20} = 1017,$$

das ist jener Weg, den das Licht während der Zeit einer Schwingungsdauer zurücklegt. Die entsprechende Wellenlänge fanden wir oben 982 cm.

Diese beiden Zahlen 1017 und 982 sind gleich. Daraus folgt, dass die electrische Schwingung nicht nur in der Luft, wie dies ja von Hertz so schön und überzeugend gezeigt, sondern auch im Drahte mit Lichtgeschwindigkeit sich fortpflanzt.²⁾ Diese theoretisch sehr wahrscheinliche Gleichheit lässt umgekehrt auch einen Rückschluss auf die sicher angenäherte Richtigkeit der oben gebrauchten Schwingungsformel für electrische Oscillationen und die Formel für das Selbstpotential zu, deren Wahrscheinlichkeit ja schon durch die Messungen von Hertz gesichert ist.

Meine Methode, bei der überdies alle Störungen der Oscillation durch den Funken wegfallen, ist so einfach und übersichtlich, dass ich an die Richtigkeit derselben glaube, ohne zu wissen, warum Hertz andere Werthe erhielt. Ein diesbezüglicher Verdacht, der sich bei Anstellung meiner Versuche mir aufdrängte, erwies sich, wie der nächste Abschnitt zeigen wird, als unbegründet.

Studium einer möglichen Fehlerquelle bei Hertz.

Da in allen bisher geschilderten Versuchen die Schwingungsdauer der primären Schwingung durch das Mitschwingen der übrigen Systeme bis zu einem gewissen Grade verändert wurde (gerade darauf basiren ja meine Messungen), wobei

1) Klemenčič, Wien. Ber. 86. p. 1190. 1882.

2) Zu demselben Resultate gelangte auch J. J. Thomson (l. c.); mir scheint aber seine ganze Anordnung nicht einwurfsfrei und auch die Fehlergrenze (2 Fuss auf 10 m) zu gross, als dass seine Messung irgend wie zur Entscheidung obiger Frage herangezogen werden könnte.

allerdings die der primären Schwingung entnommene Energie eine sehr grosse war, so ist die Frage nicht ohne Interesse, wie weit eine solche Fehlerquelle bei den Hertz'schen Versuchen auftritt.

Zu dem Zwecke sind die beiden Drähte (Länge 1124 cm), wie früher, mit dem Hauptsysteme in Verbindung. An das Ende der Drähte t und t' hänge ich je eine Metallplatte (Quadrat mit 40 cm Seite) vertical schwebend auf. Der einen Platte bei t steht in 5 cm Entfernung eine zweite, gleich grosse gegenüber. (Fig. 7. Der primäre Erregungsapparat,

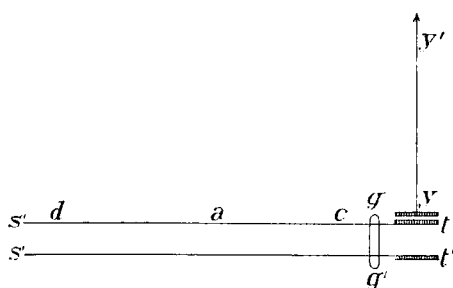


Fig. 7.

welcher noch an ss' käme, ist weggelassen. Wieder sind die parallelen Drähte zu kurz gezeichnet.) Von der Mitte der letzteren Platte führt nun ein verschieden langer Draht $y-y'$ horizontal, aber senkrecht zu den Hauptdrähten weiter.

In diesem Draht $y-y'$ werden nun genau jene Wellen erzeugt, die Hertz beobachtet. Die Glasröhre gg' liegt vor den Condensatorplatten. Wenn ich a oder c (a , c und d haben die Bedeutung von Fig. 5) überbrücke, so kann ich durch Verschiebung der Bäuche a und c leicht den Einfluss des Drahtes yy' studiren. Die Länge dieses Drahtes wurde von

Länge d. Neben- drahtes $y-y'$	0	100	160	247	292	340	411	473	524	567	642	719	765	844	933	1003	1060
Verschiebung in cm des Bauches c	0	+4	+8	+12	+17	+30	ohne Bauch				-22	-9	-5	+1	+2	+11	+21
a	0	+2	+3	+9	+15	+17	+29	+33	+45	+59	+62	+72	ohne Bauch				-40

0—1060 cm variirt. Ist dieser Draht gleich 0, so liegt d bei 83, a bei 487 und c bei 919 cm. Die Tabelle gibt die Verschiebung des Knotenpunktes a und c aus dieser ihrer ursprünglichen Lage in Centimetern.

Fig. 8 zeigt in übersichtlicherer Weise, als dies die

Tabelle kann, den Verlauf. In derselben stellt die Horizontale die Drahtlänge yy' , die Verticale die Verschiebung des Schwingungsbauches c oder a dar, und zwar positiv eine Verschiebung gegen tt' , negativ gegen den Anfangspunkt der

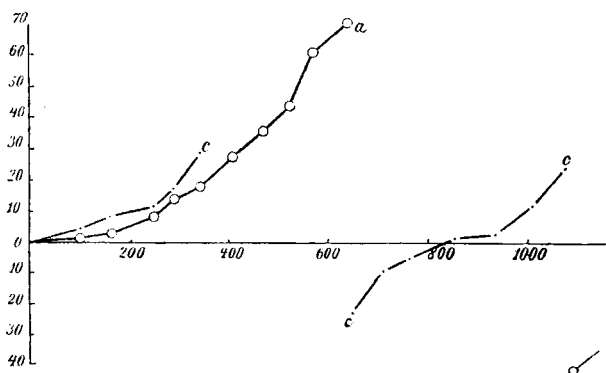


Fig. 8.

parallelen Drähte. Mache ich den Draht yy' immer länger, so rückt c mehr ans Ende, die Lichterscheinung wird immer schwächer und hört schliesslich, wenn yy' 400 cm lang ist, ganz auf. Wird der Nebendraht noch länger, so fängt bei 600 cm die Röhre wieder an zu leuchten; der Schwingungsbauch liegt aber jetzt weiter vom Ende weg, rückt langsam gegen die ursprüngliche Lage und steigt dann wieder. Genau dasselbe tritt mit dem Schwingungsbauche a ein; die Aenderungen aber sind grösser und das Verschwinden und Wiederauftreten erfolgt bei grösseren Längen des Nebendrahtes.

Betrachten wir zunächst den Schwingungsbauch c genauer. Derselbe rückt, wenn ich den Nebendraht etwa 200 cm mache, gegen das Ende, d. h. ich habe, um Resonanz zu erzielen, die Hauptschwingung vergrössern müssen; es ist somit die Schwingungsdauer durch das Anhängen dieses Drahtes vergrössert worden, und zwar umsomehr, je länger der Draht ist. Wenn aber der Nebendraht yy' ungefähr gleich $\frac{1}{4}$ Wellenlänge ist, dann scheint dieser zweite Draht nicht mehr unisono und vergrössernd mit der Hauptschwingung zu schwingen; es scheint sich jetzt in dem Drahte vielmehr eine solche Schwingung herzustellen, welche mit der Hauptschwin-

gung interferirt, daher das Ausbleiben des Bauches. Wird der Draht noch länger, so wirkt diese an und für sich schnellere Nebenschwingung, wie das Zurücktretten des Bauches anzeigt, beschleunigend auf die Hauptschwingung, aber immer weniger, je länger der Draht wird. Ist yy' (siehe Fig. 8) ca. 830 cm lang, so ist der Einfluss des Drahtes ganz geschwunden, um bei noch grösserer Länge, wo ja die Nebenschwingung wieder langsamer wird, verzögernd auf die Hauptschwingung zu wirken. Als Maass für die Schwingungsdauer können wir die Wellenlänge von d bis c nehmen. Ist yy' gleich Null, so liegt d bei 83 cm. Es ist somit:

$$c - d + \text{Querbrücke} = 919 - 83 + 42 = 878$$

gleich der halben Wellenlänge, während die Länge des Nebendrahtes yy' 830 sein musste, um eine Uebereinstimmung des neuen und alten Bauches zu erwirken. Die Differenz zwischen 878 und 830 dürfte zum grossen Theil von dem Condensator bei y herrühren.

Genau dasselbe gilt auch für den Schwingungsbauch a . Soweit hier die Messungen reichen, haben wir gleichfalls zuerst eine Verzögerung; wenn ungefähr $\frac{1}{4}$ Wellenlänge, die hier grösser ist als früher, in yy' Platz hat, Aufhebung und schliesslich Beschleunigung der Hauptschwingung.

Es ist somit nachgewiesen, dass bei der Hertz'schen Anordnung die Hauptschwingung eventuell gestört werden kann. Es lässt sich aber aus unseren Versuchen leicht berechnen, dass diese Störung eine verhältnissmässig geringe ist. Die grösste Störung des Bauches c ist 30 cm bei $y - y' = 340$ cm. Der Punkt d liegt dann bei 88 cm; die halbe Wellenlänge ist hier wieder leicht wie oben zu finden:

$$c - d + \text{Querbrücke} = (919 + 30) - 88 + 42 = 903.$$

Die halbe Wellenlänge ändert sich von 878 auf 903, welche Aenderung das Maximum der eventuellen Fehlerquelle ergäbe.

Ebenso habe ich in der Nähe der parallelen Leitungsdrähte Resonatoren von gleicher und verschiedener Schwingungsdauer in ganz geringen Entfernungen aufgespannt, und auch hier betrugen die Aenderungen in der Originalschwingung im ungünstigsten Falle nur einige Procent.

Physikal. Inst. der Univ. Wien. April 1890.