

Universitätsbibliothek Karlsruhe

III A 735-2

Hertz, Heinrich

Gesammelte Werke

Band 2

**Leipzig
1894**

2
HERTZ
GESAMMELTE
WERKE

AUSBILDUNG
FÜR
ELEKTRIKALTAFT

734

III A 735²



GESAMMELTE WERKE

VON

HEINRICH HERTZ.

BAND II

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE AUSBREITUNG DER
ELEKTRISCHEN KRAFT.



LEIPZIG, 1894
JOHANN AMBROSIIUS BARTH
(ARTHUR MEINER)

UNTERSUCHUNGEN

ÜBER DIE

AUSBREITUNG

DER

ELEKTRISCHEN KRAFT

VON

HEINRICH HERTZ

MIT 40 FIGUREN IM TEXT

ZWEITE AUFLAGE

LEIPZIG, 1894
JOHANN AMBROSIIUS BARTH
(ARTHUR MEINER)

GESAMMELTE WERKE

VON

HEINRICH HERTZ.

BAND II

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE AUSBREITUNG DER
ELEKTRISCHEN KRAFT.



LEIPZIG, 1894
JOHANN AMBROSIIUS BARTH
(ARTHUR MEINER)

UNTERSUCHUNGEN

ÜBER DIE

AUSBREITUNG

DER

ELEKTRISCHEN KRAFT

VON

HEINRICH HERTZ

MIT 40 FIGUREN IM TEXT

ZWEITE AUFLAGE

LEIPZIG, 1894
JOHANN AMBROSIIUS BARTH
(ARTHUR MEINER)

III A 735² - 2(2)

Übersetzungsrecht vorbehalten.



SEINER EXCELLENZ

DEM WIRKLICHEN GEHEIMEN RATHE

HERRN

HERMANN VON HELMHOLTZ

IN TIEFSTER EHRFURCHT UND DANKBARKEIT

GEWIDMET

VOM VERFASSER.

Vorwort.

In der letzten Zeit sind mehrfach von der Verlagsbuchhandlung der „Annalen der Physik und Chemie“ Abzüge meiner Arbeiten über die zeitliche Ausbreitung der elektrischen Kraft und über elektrische Schwingungen gewünscht worden, ohne dass es möglich war, solche Wünsche zu befriedigen. Der Herr Verleger der Annalen forderte mich deshalb auf, einen Wiederabdruck jener Arbeiten in gesammelter Form zu veranstalten. Ein unveränderter Abdruck ohne Zusatz schien mir unzulässig, da sich durch meine Schuld und durch die Neuheit des Gegenstandes nicht unerhebliche Irrthümer in die Arbeiten eingeschlichen haben und ich mir nicht den Anschein geben durfte, als hielte ich in allen Punkten an der einmal geäußerten Ansicht fest. Eine vollständige Neubearbeitung der Versuche unter Vermeidung des Falschen und Zweifelhaften konnte wiederum die aufgewandte Mühe nicht lohnen, und es ist auch wohl unmöglich, Versuche von andern Gesichtspunkten aus zu schildern, als von welchen aus sie angestellt wurden. Ich habe mich deshalb entschlossen, zwar die hierher gehörigen Arbeiten in unveränderter Form abzudrucken, zugleich aber eine weniger strenge gehaltene Uebersicht über den Gang und Zusammenhang der Arbeiten vorzuschicken. Ich erlangte so die

Gelegenheit, wirklich begangene Fehler anzuerkennen, irrthümlich mir zugerechnete Fehler abzulehnen, zugleich gewann ich die Möglichkeit, öffentlich eine Reihe von Fragen zu beantworten, die häufig mündlich oder brieflich an mich gestellt worden sind.

Die begangenen Fehler mit der Schwierigkeit der Untersuchung ausdrücklich zu entschuldigen, wäre wohl nur dann ein Anlass, wenn ich wegen derselben hart getadelt worden wäre. Das ist aber nicht der Fall; selbst diejenigen Fachgenossen, welche mir auf Grund eigener Arbeit in einzelnen Punkten widersprechen mussten, haben dies mit soviel Sachlichkeit und Wohlwollen gethan, dass ich dessen nur mit Dankbarkeit gedenken kann.

Bonn, im Dezember 1891.

Inhalt.

	Seite
1. Einleitende Uebersicht.	
A. Zu den Versuchen	1
B. Zur Theorie	21
2. Ueber sehr schnelle elektrische Schwingungen	32
3. Aus der Abhandlung Herrn W. von Bezold's: „Untersuchungen über die elektrische Entladung. Vorläufige Mittheilung“	59
4. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung	69
5. Ueber die Einwirkung einer geradlinigen elektrischen Schwingung auf eine benachbarte Strombahn	87
6. Ueber Inductionerscheinungen, hervorgerufen durch die elektrischen Vorgänge in Isolatoren	102
7. Ueber die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Wirkungen	115
8. Ueber elektrodynamische Wellen im Luftraume und deren Reflexion	133
9. Die Kräfte elektrischer Schwingungen, behandelt nach der Maxwell'schen Theorie	147
10. Ueber die Fortleitung elektrischer Wellen durch Drähte	171
11. Ueber Strahlen elektrischer Kraft	184
12. Ueber die mechanischen Wirkungen elektrischer Drahtwellen	199
13. Ueber die Grundgleichungen der Elektrodynamik für ruhende Körper	208
14. Ueber die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper	256
Nachträgliche Anmerkungen	286
Namenverzeichniss	296

1. Einleitende Uebersicht.

A. Zu den Versuchen.

Sehr häufig bin ich gefragt worden, auf welche Weise ich zuerst zu den im Folgenden beschriebenen Versuchen geführt worden bin. Der allgemeine Anlass war dieser: Im Jahre 1879 hatte die Akademie der Wissenschaften zu Berlin als Preisarbeit die Aufgabe ausgeschrieben, irgend eine Beziehung zwischen den elektrodynamischen Kräften und der dielektrischen Polarisation der Isolatoren experimentell nachzuweisen, sei es nun eine elektrodynamische Kraft, welche durch Vorgänge in Nichtleitern erregt würde, sei es eine Polarisation der Nichtleiter durch die Kräfte der elektrodynamischen Induction. Da ich damals im physikalischen Institut zu Berlin mit elektrodynamischen Arbeiten beschäftigt war, machte Herr von Helmholtz mich auf jene Aufgabe aufmerksam und versprach mir die Unterstützung des Instituts, wenn ich mich an die Bearbeitung derselben wagen wollte. Ich überlegte mir die Aufgabe und berechnete den Erfolg, welcher sich etwa unter den günstigsten Verhältnissen erwarten liess, unter Anwendung der Schwingungen Leydener Flaschen oder offener Inductionsapparate. Das Ergebniss war freilich nicht das gewünschte; es zeigte sich, dass eine unzweifelhafte Wirkung kaum zu hoffen war, vielmehr nur eine solche, welche an der Grenze der Beobachtung lag. Ich verzichtete deshalb auf die Bearbeitung jener Aufgabe; es ist mir auch nicht bekannt geworden, dass dieselbe eine anderweitige Bearbeitung gefunden hätte. Es blieb aber mein Ehrgeiz, die damals aufgegebene Lösung später dennoch auf irgend einem neuen Wege zu finden, zugleich war meine Aufmerksamkeit ge-

schärft für Alles, was mit elektrischen Schwingungen zusammenhing. Es war nicht wohl möglich, dass ich eine neue Form solcher Schwingungen übersehen konnte, falls ein glücklicher Zufall mir eine solche in die Hände spielte.

Ein solcher Zufall und damit der besondere Anlass der folgenden Untersuchungen trat mir im Herbst 1886 entgegen. In der physikalischen Sammlung der Technischen Hochschule zu Karlsruhe, wo ich diese Versuche ausführte, hatte ich zu Vorlesungszwecken ein Paar sogenannter Riess'scher oder Knochenhauerscher Spiralen vorgefunden und benutzt. Es hatte mich überrascht, dass es nicht nöthig war, grosse Batterien durch die eine Spirale zu entladen, um in der andern Funken zu erhalten, dass vielmehr hierzu auch kleine Leydener Flaschen genügten, ja der Schlag eines kleinen Inductionsapparats, sobald nur die Entladung eine Funkenstrecke zu überspringen hatte. Indem ich die Verhältnisse abänderte, fiel mir die Erscheinung der Nebenfunken auf, von welcher die folgende Untersuchung ausgeht. Anfangs hielt ich die elektrischen Bewegungen für zu stürmisch und unregelmässig, um sie weiter benutzen zu können; als ich aber das Auftreten des Indifferenzpunktes in der Mitte einer Nebenleitung und damit eine klare und reine Erscheinung gefunden hatte, war ich überzeugt, dass nunmehr die Aufgabe der Berliner Akademie löslich sein würde, und weiter ging zur Zeit mein Ehrgeiz nicht. Bestärkt wurde meine Ueberzeugung natürlich, als ich fand, dass ich regelmässige Schwingungen vor mir hatte. Die erste hierunter wieder abgedruckte Abhandlung: „Ueber sehr schnelle elektrische Schwingungen“ giebt im Wesentlichen in richtiger zeitlicher Folge die Untersuchung wieder, wie sie zu Ende des Jahres 1886 und zu Anfang des Jahres 1887 ausgeführt wurde.

Während diese Arbeit im Druck war, sollte ich erfahren, dass ihr Inhalt nicht völlig so neu war, wie ich glaubte. Der Geographentag vom April 1887 führte Herrn W. von Bezold nach Karlsruhe und in mein Institut; ich sprach ihm von meinen Versuchen, er antwortete mir, dass er ähnliche Erscheinungen schon vor einer Reihe von Jahren beobachtet habe und machte mich aufmerksam auf seinen Aufsatz: „Untersuchungen über die elektrische Entladung“ im 140. Bande der Poggendorff'schen Annalen. Dieser Aufsatz war mir völlig entgangen,

da er sich äusserlich auf ganz andere Dinge als auf elektrische Schwingungen, nämlich auf die Lichtenbergischen Figuren zu beziehen schien, wie er denn auch überhaupt keine seinem wichtigen Inhalt entsprechende Beachtung gefunden zu haben scheint. In einem Nachtrag zu der vorigen Arbeit erkannte ich die älteren Rechte Herrn von Bezolds auf eine ganze Reihe von Beobachtungen an. An Stelle dieses Nachtrages ist hier als zweite Nummer mit der freundlichen Genehmigung Herrn von Bezolds derjenige Theil seiner Abhandlung mitgetheilt, welcher sich auf den uns hier interessirenden Gegenstand bezieht. Man wird sich jetzt fast mit Erstaunen fragen, wie es möglich war, dass so wichtige und so bestimmt ausgesprochene Ergebnisse keinen grössern Einfluss auf den Gang der Wissenschaft ausgeübt haben. Vielleicht hat hierzu der Umstand beigetragen, dass Herr v. Bezold seine Mittheilung als eine vorläufige bezeichnet hatte.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle auch der Verdienste zweier englischer Fachgenossen zu gedenken, welche gleichzeitig mit mir dem gleichen Ziele zustrebten. Professor Oliver Lodge in Liverpool hat in den gleichen Jahren, in welchen ich die hier beschriebene Arbeit ausführte, die Theorie des Blitzableiters verfolgt und dabei eine Reihe von Versuchen über die Entladung sehr kleiner Condensatoren angestellt, welche ihn auf die Beobachtung von Schwingungen und Wellen in Drähten führten. Da er vollständig auf dem Boden der Maxwell'schen Anschauung stand und eifrig bestrebt war, diese Anschauungen zu erweisen, so ist kaum zu zweifeln, dass wenn ich ihm nicht zugekommen wäre, er auch zur Beobachtung der Wellen in der Luft und damit zum Nachweis der zeitlichen Ausbreitung der elektrischen Kraft gelangt wäre. Professor Fitzgerald in Dublin hatte sich seit mehreren Jahren bemüht, mit Hilfe der Theorie die Möglichkeit solcher Wellen vorauszusagen und die Bedingungen für die Erzeugung derselben aufzufinden. Auf meine eigenen Versuche waren die Arbeiten dieser Gelehrten freilich ohne Einfluss, da ich erst nachträglich Kenntniss von denselben erhielt. Ich glaube übrigens nicht, dass es möglich gewesen wäre, mit Hilfe der Theorie allein zu den Erscheinungen vorzudringen. Denn das wirkliche Eintreten derselben in unsern Versuchen hängt ausser von ihrer theoretischen

Möglichkeit noch ab von einer besonderen und überraschenden Eigenschaft des elektrischen Funkens, welche durch keine Theorie vorauszusehen war.

Durch die bisher erwähnten Versuche hatte ich ein Mittel erlangt, schnellere elektrische Bewegungen zu erregen, als vorher dem Physiker zu Gebote gestanden hatten. Ehe ich indess dazu schreiten konnte, dies Mittel zur Erforschung der Vorgänge in Isolatoren anzuwenden, musste eine andere Untersuchung erledigt sein. Bald nach Beginn der Versuche war mir eine merkwürdige Wechselwirkung zwischen gleichzeitigen elektrischen Funken aufgefallen. Es war nicht meine Absicht, mich durch diese Erscheinung von meinem eigentlichen Ziele abziehen zu lassen; sie trat aber doch in zu bestimmter und räthselhafter Gestalt auf, als dass ich sie hätte ganz vernachlässigen können. War ich doch einige Zeit zweifelhaft, ob ich nicht eine völlig neue Form elektrischer Fernwirkung vor mir hätte. Dass das Licht das Wirksame sei, schien ausgeschlossen, weil Glasplatten die Wirkung abschnitten, und natürlich dauerte es einige Zeit, ehe ich darauf kam, Versuche mit Platten aus Bergkrystall anzustellen. Nachdem ich sicher wusste, dass ich es nur mit einer Wirkung des ultravioletten Lichtes zu thun hatte, liess ich diese Untersuchung fallen, um mich wieder der Hauptfrage zuzuwenden. Da eine gewisse Kenntniss der Erscheinung für die Untersuchung der Schwingungen nicht entbehrt werden kann, ist meine diesbezügliche Mittheilung „Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung“ unter Nr. 4 hier ebenfalls abgedruckt. Die genauere Kenntniss der Erscheinung selbst ist seither durch die Arbeiten einer ganzen Reihe von Forschern, vor allen der Herren Righi, Hallwachs, Elster und Geitel, ungemein gefördert; die Mechanik derselben hat sich freilich dem Verständniss noch nicht vollständig erschlossen.

Der Sommer 1887 verstrich mit vergeblichen Versuchen, mit Hülfe der neuen Klasse von Schwingungen den elektrodynamischen Einfluss der Isolatoren wirklich nachzuweisen. Die einfachste Methode hätte darin bestanden, den Einfluss der Dielektrica auf die Lage des Indifferenzpunktes eines Nebenschlusses zu bestimmen. Allein ich hätte alsdann elektrostatische Kräfte in den Kauf nehmen müssen, und die Aufgabe bestand gerade darin,

die Kraft der Induction allein zu untersuchen. Der Plan, welchen ich verfolgte, war dieser: der primäre Leiter¹⁾ erhielt die in Figur 1 angegebene Gestalt; zwischen seine Endplatten A und A' wurde ein Klotz BB aus Schwefel oder Paraffin gebracht und schnell wieder entfernt. Die Erwartung war, dass ohne diesen Klotz nur sehr schwache Funken, mit dem Klotz sehr kräftige Funken in dem secundären Leiter C sich zeigen würden, dem ich diejenige Lage gegen den primären gab, welche ich bis dahin einzig in Betracht gezogen hatte. Der erste Theil der Erwartung be-

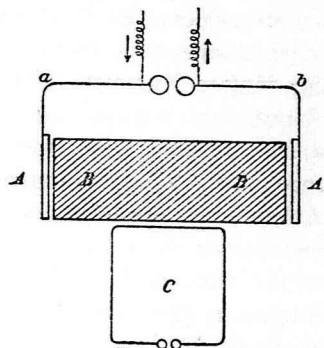


Fig. 1.

gründete sich auf die Voraussetzung, dass in dem fast geschlossenen Leiter C die elektrostatischen Kräfte niemals einen Funken hervorrufen könnten, da diese Kräfte ein Potential haben, also ihr Integral über eine fast geschlossene Strombahn verschwindet. Es wäre dann bei fehlendem Isolator nur die Inductionswirkung des entfernteren Drahtes a b in Betracht gekommen. Der Versuch wurde dadurch vereitelt, dass ich stets sehr kräftige Funken in dem secundären Leiter erhielt, so dass die mässige Verstärkung oder Schwächung, welche der Isolator hervorbringen musste, nicht zur Geltung kam. Erst ganz allmählich gelang es mir, mir klar zu machen, dass jener Satz, welcher die Voraussetzung meines Versuches bildete, hier keine Anwendung fände; dass bei der Schnelligkeit der Bewegung auch Kräfte, welche ein Potential besaßen, in der fast geschlossenen Leitung Funken erregen könnten; dass überhaupt die grösste Vorsicht zu beobachten sei bei Anwendung der allgemeinen Begriffe und Lehrsätze, welche der gewöhnlichen Elektrizitätslehre entstammten. Diese Sätze bezogen sich alle auf statische oder stationäre Zustände, hier aber hatte ich in Wahrheit veränderliche Zustände vor mir. Ich sah ein, dass ich gewissermaassen allzu gerade auf mein Ziel zugegangen war. Es gab ja noch eine unendliche Mannigfaltig-

¹⁾ Es wird vorausgesetzt, dass der Leser die vorerwähnten Abhandlungen jetzt bereits kenne.

keit anderer Lagen des secundären gegen den primären Leiter, unter diesen konnten wohl solche sein, welche für mein Vorhaben günstiger waren. Diese Mannigfaltigkeit war also zuerst zu erforschen. So fand ich die mich überraschenden äusserst regelmässigen und abwechslungsvollen Erscheinungen, welche in der fünften Nummer „Ueber die Einwirkung einer geradlinigen elektrischen Schwingung auf eine benachbarte Strombahn“ beschrieben sind. Die Auffindung und Entwirrung dieser äusserst regelmässigen Erscheinungen machte mir besondere Freude. Die Abhandlung erschöpft durchaus nicht alle erkennbaren Feinheiten; wer die Versuche auf andere Leiterformen variiren wollte, würde wohl noch einen dankbaren Stoff finden. Die Beobachtungen in grösseren Abständen sind auch wohl sehr ungenau, da sie durch die damals noch nicht vermutheten Reflexionen getrübt sind. Uebrigens erregte gerade die immer wachsende Entfernung, bis zu welcher ich die Wirkung wahrnahm, am meisten mein Erstaunen; man war bis dahin gewohnt, elektrische Kräfte nach dem Newton'schen Gesetze abnehmen und also mit wachsender Entfernung schnell unmerklich werden zu sehen.

Durch diese Untersuchung hatte ich nunmehr Lagen des secundären Leiters gewonnen, in welchen die Annäherung eines Isolators Funken entstehen oder verschwinden lassen musste, statt nur die Grösse derselben abzuändern. Die Lösung der Aufgabe, welche ich verfolgte, gelang nun ohne Weiteres in der Art, wie es in der Abhandlung No. 6 „Ueber Inductionerscheinungen, hervorgerufen durch die elektrischen Vorgänge in Isolatoren“ dargestellt ist. Unterm 10. November 1887 konnte ich der Berliner Akademie Mittheilung von dem glücklichen Erfolge machen.

Jene Aufgabe der Akademie, welche mich bis hierher geleitet hatte, war offenbar seinerzeit von Herrn von Helmholtz in folgendem Zusammenhange gestellt worden. Wenn man von den Sätzen der Elektrodynamik ausgeht, welche damals allgemeine Anerkennung genossen, so gelangt man zu den damals durchaus nicht allgemein anerkannten Gleichungen der Maxwell'schen Theorie durch Hinzunahme der Voraussetzungen: erstens, dass die Veränderungen der dielektrischen Polarisationen der ponderablen Nichtleiter dieselben elektrodynamischen Kräfte ausüben wie gleichwerthige Ströme; zweitens, dass die elektrodynamischen Kräfte ebenso gut wie die elektrostatischen die dielek-

trischen Polarisationen zu erregen im Stande sind; drittens, dass der Luftraum und der leere Raum selber sich in diesen Beziehungen wie jedes andere Dielektricum verhalten. Die Ableitung der Maxwell'schen Gleichungen aus der ältern Anschauung und aus Voraussetzungen, welche den angeführten gleichwerthig sind, hat von Helmholtz in seiner Abhandlung „Ueber die Bewegungsgleichungen der Elektrizität für ruhende leitende Körper“¹⁾ am Schluss derselben gegeben. Da die Aufgabe, alle drei Voraussetzungen und damit die Richtigkeit der ganzen Maxwell'schen Theorie zu erweisen, eine unbillige Forderung schien, so hatte sich die Akademie begnügt, die Bestätigung einer der beiden ersten zu verlangen.

Die erste Voraussetzung war nunmehr als richtig erwiesen. Ich dachte eine Zeit lang daran, nun zunächst die zweite in Angriff zu nehmen. Unmöglich schien die Prüfung derselben jetzt keineswegs; ich goss zu dem Ende geschlossene Ringe von Paraffin. Es fiel mir aber während der Arbeit auf, dass sich das Hauptinteresse der neuen Theorie eigentlich nicht an die Folgerungen der ersten beiden Voraussetzungen knüpfte. Wären für einen bestimmten Isolator die erste und die zweite Voraussetzung als richtig erwiesen, so wäre gezeigt, dass sich in diesem Isolator Wellen der von Maxwell vermutheten Art fortpflanzen könnten, mit einer endlichen Geschwindigkeit, welche vielleicht von der des Lichtes sehr weit abweiche. Dies konnte aber nicht sehr überraschen, nicht mehr, als etwa der längst bekannte Umstand, dass sich in Drähten die elektrische Erregung mit grosser aber endlicher Geschwindigkeit fortpflanzte. Ich musste mir sagen, dass der Kernpunkt, der Sinn und die Besonderheit der Faraday'schen und damit der Maxwell'schen Anschauung in der dritten Voraussetzung liege, dass es also ein würdigeres Ziel sei, wenn ich mich geradeswegs auf diese wandte. Für den Luftraum²⁾ die erste und die zweite Voraussetzung gesondert zu prüfen, sah ich keine Möglichkeit; beide Voraussetzungen aber waren zugleich bewiesen, wenn es gelang, eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellen im Luftraum nachzuweisen.

¹⁾ v. Helmholtz, Ges. Abhandl. I. 545.

²⁾ Die Ausdrücke Luftraum und leerer Raum werden hier als Synonyme gebraucht, weil die wägbare Luft in diesen Versuchen von verschwindendem Einfluss ist.

Einige erste Versuche hierzu, welche ich bei kürzeren Abständen vorgenommen und welche in den vorigen Abhandlungen erwähnt sind, waren allerdings missglückt. Aber inzwischen war es gelungen, die Inductionswirkung bis auf 12 m Entfernung wahrzunehmen; in dieser Entfernung musste sich die Phase der Bewegung schon mehr als einmal umgekehrt haben, es kam nur darauf an, diese Umkehr nachzuweisen. So entstand der Plan, dessen Ausführung in der Arbeit „Ueber die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Wirkungen“ dargelegt ist. Die ersten Schritte der Ausführung gelangen leicht. In gerade gespannten Drähten entstanden mit überraschender Schärfe durch Reflexion die stehenden Schwingungen mit Knoten und Bäuchen, welche gestatteten, die Wellenlänge genau zu bestimmen und die Phasenänderung längs des Drahtes festzustellen. Ebenso schnell gelang es, die durch den Draht und die durch die Luft fortgeleitete Wirkung zur Interferenz zu bringen und also ihre Phase zu vergleichen. Besaßen nun beide Wirkungen eine endliche und die gleiche Geschwindigkeit, wie ich erwartete, so mussten sie in allen Entfernungen mit gleicher Phase interferiren. Ein einfacher qualitativer Versuch, welcher bei der Uebung, welche ich damals besaß, in einer Stunde zu beenden war, musste dies entscheiden und auf einmal zum Ziele führen. Als ich nun aber die Apparate sorgfältig aufgestellt hatte und den Versuch ausführte, fand ich die Phase der Interferenz deutlich verschieden in verschiedenen Entfernungen und zwar etwa in solcher Abwechslung, wie es einer unendlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit im Luftraum entsprochen hätte. Entmuthigt brach ich die Versuche ab. Erst nach einigen Wochen nahm ich dieselben wieder auf. Ich sagte mir, dass es die gleiche Wichtigkeit habe, zu erfahren, dass sich die elektrische Kraft mit unendlicher Geschwindigkeit ausbreite und dass die Maxwell'sche Theorie falsch sei, wie sich im Gegentheil zu überzeugen, dass diese Theorie Recht habe, vorausgesetzt nur, dass das Ergebniss ein bestimmtes und sicheres sei. Ich stellte also, ohne auf die Resultate zu achten, mit bester Sorgfalt die Erscheinungen fest, wie sie waren, und zwar mit den Ergebnissen, welche in der Abhandlung selbst wiedergegeben sind. Als ich dann daran ging, diese Ergebnisse genauer zu durchdenken, sah ich, dass sich die Folge der Interferenzen auch nicht

mit der Annahme einer unendlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Einklang bringen liess, sondern dass es nöthig war, eine endliche Geschwindigkeit anzunehmen, welche aber grösser war als die im Drahte. Die verschiedenen Möglichkeiten suchte ich in der Weise in Harmonie zu bringen, welche die Abhandlung angeht, und obwohl mir die Verschiedenheit der Geschwindigkeiten unwahrscheinlich geschienen hatte, glaubte ich doch den Versuchen nicht misstrauen zu dürfen. Es war ja auch keineswegs unmöglich, dass unbekannte Ursachen, etwa eine eigentliche Trägheit der freien Elektrizität, die Bewegung im Drahte verlangsamt.

Ich habe hier so ausführlich berichtet, weil ich den Leser überzeugen möchte, dass ich in dieser Untersuchung nicht einfach in bequemster Weise eine vorgefasste Meinung durch passende Deutung der Versuche habe bestätigen wollen. Im Gegentheil habe ich diese nicht leichten Versuche entgegen einer vorgefassten Ansicht mit bestmöglicher Sorgfalt durchgeführt. Und doch habe ich offenbar bei allem Glück gerade in dieser Untersuchung entschieden Unglück gehabt. Denn anstatt mit leichter Mühe zum wahren Ziele zu gelangen, wozu ein richtig angelegter Plan mich vielleicht berechtigt hätte, scheine ich mit grosser Mühe in die Irre gegangen zu sein.

Erstens ist die Arbeit entstellt durch einen Rechenfehler. Die Schwingungsdauer ist im Verhältniss von $\sqrt{2}:1$ zu gross berechnet worden. Auf diesen Fehler hat zuerst Herr Poincaré¹⁾ aufmerksam gemacht. Der Fehler scheint den Inhalt der Arbeit wesentlich zu beeinflussen, beeinflusst freilich in Wahrheit mehr die Form. Mein Vertrauen auf die Zuverlässigkeit der Rechnung beruhte wesentlich auf der vermeintlichen Uebereinstimmung derselben mit den Versuchen von Siemens und Fizeau und mit meinen eigenen.²⁾ Hätte ich den richtigen Werth der Capacität benutzt und also einen Widerspruch der Rechnung mit den Versuchen gefunden, so würde ich der Rechnung die geringere Beachtung geschenkt haben, und die Arbeit wäre in der Form etwas verändert, in der Sache unverändert niedergeschrieben worden.

¹⁾ H. Poincaré, Comptes rendues 111. p. 322.

²⁾ Vergleiche die Bemerkung am Schluss des zweiten Abschnittes der Arbeit selbst.

Zweitens aber, und das ist der wichtigere Punkt, ist es kaum möglich, an einem Hauptergebniss der Arbeit festzuhalten, nach welchem die Geschwindigkeiten in der Luft und im Drahte verschieden sind. Statt diesem Ergebniss zu Hülfe zu kommen, haben die weiteren Erfahrungen, welche an Drahtwellen gewonnen wurden, dasselbe immer unwahrscheinlicher gemacht. Es scheint jetzt ziemlich sicher, dass, wenn der Versuch vollkommen richtig und ohne störende Einflüsse angestellt worden wäre, er allerdings beinahe das Resultat hätte ergeben müssen, welches ich zuerst erwartete. Es hätte die Phase der Interferenz allerdings ein Mal das Zeichen wechseln müssen, (was ich nicht im Voraus erwartet hatte); ein zweiter Vorzeichenwechsel der Interferenz, (welchen doch die Versuche einstimmig aufweisen) hätte dann aber nicht mehr eintreten dürfen. Es erscheint schwer, einen störenden Einfluss aufzuweisen, welcher so täuschend die Wirkung einer verschiedenen Geschwindigkeit nachahmen konnte; unmöglich aber erscheint es doch auch keineswegs, eine solche Täuschung anzunehmen. Ich vermuthete bei der Ausführung dieser Versuche nicht im Mindesten einen Einfluss der benachbarten Wände; ich entsinne mich z. B., dass ich den wellenführenden Draht nur in einem Abstand von 1,5 m an einem eisernen Ofen vorbeiführte. Es wäre möglich, dass eine derartige, stets an demselben Punkte wirkende Störung den Anlass des zweiten Phasenwechsels der Interferenz abgegeben hat. Wie dem auch sei, ich erlaube mir die Hoffnung auszusprechen, dass auch diese Versuche von einem andern Beobachter unter möglichst günstigen Bedingungen, d. h. in einem möglichst grossen Raume möchten wiederholt werden. Ist der Plan des Versuches, wie ich denke, richtig, so muss derselbe richtig ausgeführt zu jeder Zeit das Resultat geben, welches er gleich anfangs hätte geben sollen, er würde dann ohne Messungen zugleich die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen in der Luft erweisen und die Gleichheit derselben mit der Geschwindigkeit der Wellen im Drahte.

Ich möchte hier übrigens noch einige weitere Ueberlegungen anführen, welche mich damals in der Meinung bestärkten, dass die Wellen im Drahte verzögert seien. Wenn die Wellen im Drahte mit der gleichen Geschwindigkeit forteilten, wie die Wellen im Luftraum, so müssen die elektrischen Kraftlinien senkrecht auf dem Drahte stehen. Ein gerader wellendurch-

flossener Draht kann dann auf einen benachbarten parallelen Draht keine Inductionswirkung ausüben. Eine solche Wirkung aber fand ich, wenn sie auch nur schwach war. Also schloss ich, dass die Kraftlinien nicht senkrecht auf dem Drahte ständen und dass die Geschwindigkeit der Wellen nicht die Lichtgeschwindigkeit sei. Ferner ergibt eine einfache Rechnung, dass wenn die Kraftlinien senkrecht auf der Richtung des Drahtes stehen, dann die in einem einzelnen Drahte in der Welle fortgepflanzte Energie logarithmisch unendlich würde. Also schloss ich, es sei eine derartige Welle von vornherein unmöglich. Endlich schien mir, dass es auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in einer geraden Leitung ohne Einfluss sein müsse, ob die Leitung ein glatter Draht sei oder ein Draht mit seitlichen Ansätzen oder ein gezackter Draht oder auch ein in kleinen Windungen aufgerollter spiraliger Draht, solange nur alle diese Abweichungen von der geraden Linie klein wären gegen die Wellenlänge und ihr Widerstand nicht in Betracht käme. Nun fand ich aber, dass alle diese Abänderungen einen sehr merklichen Einfluss auf die Geschwindigkeit ausübten. Ich schloss also, dass hier eine noch unverstandene verzögernde Ursache thätig sei, welche auch schon im einfachen glatten Draht ihre Wirkung äussert. Diese und ähnliche Gründe erscheinen mir jetzt nicht mehr von entscheidendem Gewicht, aber damals beruhigten sie mich hinreichend, um die Verschiedenheit der Geschwindigkeit ohne Rückhalt zu behaupten und in dieser Erkenntniss ein Hauptinteresse des Versuchs zu sehen. Bald sollte ich eine vermeintliche, mir damals sehr willkommene Bestätigung meiner Ansicht finden.

Während ich die Wirkung meiner primären Schwingung in grossen Entfernungen untersuchte, war mir deutlich eine Art von Schattenbildung hinter leitenden Massen entgegengetreten, und diese war mir nicht sehr auffällig erschienen. Etwas später glaubte ich auch eine eigenthümliche Verstärkung der Wirkung vor solchen schattengebenden Massen und vor den Wänden des Raumes zu bemerken. Als mir zuerst der Gedanke kam, dass diese Verstärkung von einer Art Reflexion der elektrischen Kraft von den leitenden Massen herrühre, schien mir derselbe fast unzulässig, so sehr wich er immerhin von der uns damals geläufigen Vorstellung einer elektrischen Kraft ab, unbeschadet

aller Bekanntschaft mit dem Vorstellungskreis der Maxwell'schen Theorie. Nachdem ich aber das Vorhandensein wirklicher Wellen glaubte sicher festgestellt zu haben, trat ich der anfangs verworfenen Erklärungsart wieder näher und kam so zu den Erscheinungen, welche in der Abhandlung „Ueber elektrodynamische Wellen im Luftraum und deren Reflexion“ dargelegt sind. Qualitativ dürfte gegen den Inhalt dieser Arbeit nichts einzuwenden sein, die Versuche sind sehr oft wiederholt und bestätigt gefunden worden. Was aber die Messungen anlangt, so ist auch der Inhalt dieser Arbeit verdächtig, da er ebenfalls zu dem höchst unwahrscheinlichen Resultat führt, dass die Geschwindigkeit in der Luft wesentlich grösser als die der Drahtwellen sei. Angenommen, dies Resultat ist unrichtig, wie ist der begangene Fehler zu erklären? Sicherlich nicht durch einfache Ungenauigkeit der Beobachtung. Die Beobachtung mag vielleicht um Dezimeter ungenau gewesen sein, auf keinen Fall um Meter. Ich vermag auch hier nur ganz im Allgemeinen den besonderen Resonanzverhältnissen des benutzten Raumes die Schuld zu geben. Haben sich vielleicht die Eigenschwingungen desselben herausgebildet und habe ich die Knoten solcher Eigenschwingung beobachtet, während ich die Knoten der Wellen des primären Leiters zu beobachten glaubte? Sicherlich war die Entfernung der Knoten, welche ich in der Luft mass, wesentlich verschieden von den Wellenlängen im Drahte; ich habe ausdrücklich mein Augenmerk auf die Frage gerichtet, ob sie verschieden oder gleich wären. Was freilich die genaue Uebereinstimmung mit der ersten Versuchsreihe anlangt, so gebe ich gern zu, dass ich mich hier in der Deutung der Versuche von dem Wunsche habe beeinflussen lassen, die Uebereinstimmung zwischen beiden Messungen herzustellen. Ich verlege den ersten Knoten eine gewisse Strecke hinter die Wand, für deren Grösse aus den Versuchen ein fester Zwang nicht herzuzunehmen ist. Hätte ich die Versuche anders combiniren wollen, so hätte ich wohl ein der Einheit näher kommendes Verhältniss der Geschwindigkeiten berechnen können; ich hätte aber niemals Gleichheit der Geschwindigkeiten aus denselben herleiten können.

Wenn nun aber meine damaligen Versuche übereinstimmend auf eine verschiedene Geschwindigkeit schliessen lassen, so ist die Frage natürlich, welche Gründe mich denn jetzt bestimmen,

lieber unbekannte Fehlerquellen in den Versuchen zuzugeben, als an der behaupteten Verschiedenheit festzuhalten. Ist es die von vielen Seiten hervorgehobene Abweichung des Ergebnisses von der Theorie? Gewiss nicht; die Theorie war mir auch damals bekannt und dieselbe muss sich den Versuchen unterordnen. Ist es der hierauf bezügliche Versuch Herrn Lecher's?¹⁾ Bei aller Anerkennung der grossen Verdienste Herrn Lecher's um dies Gebiet muss ich diese Frage doch verneinen. Herr Lecher setzt bei der Ausnutzung seines Versuchs die Richtigkeit der Rechnung, damit in gewissem Sinne die Richtigkeit der Theorie voraus.²⁾ Dann sind es also die Resultate der Herren Sarasin und de la Rive,³⁾ welche die Versuche genau wiederholten mit einem der Theorie vollständig entsprechendem Ergebniss? In gewissem Sinne ja, in anderm Sinne nein. Die Genfer Physiker arbeiteten in einem viel kleineren Raume als ich selber; die grösste ihnen zu Gebote stehende Entfernung betrug nur 10 Meter und selbst auf diese Entfernung hin konnten die Wellen sich nicht völlig frei entwickeln. Ihr Spiegel war nur 2,8 m hoch. Die Sorgfalt der Beobachtung kann die Ungunst der räumlichen Verhältnisse nicht compensiren. In meinen Versuchen hatten die Wellen doch immerhin einen völlig freien Spielraum von etwa 15 m. Mein Spiegel war 4 m hoch. Läge also die Entscheidung einzig und allein bei den Versuchen, so könnte ich denjenigen der Herren Sarasin und de la Rive kein grösseres Gewicht als meinen eigenen beilegen und insofern also nein.⁴⁾ Aber die Genfer Versuche zeigen jedenfalls, dass sich die von mir ausgeführten Messungen nicht überall bestätigen; sie zeigen, dass vor andern reflectirenden Wänden und in andern Räumen die Erscheinungen quantitativ anders ausfallen und dass die Wellenlängen unter Umständen auch die von der Theorie ge-

¹⁾ E. Lecher. Eine Studie über elektrische Resonanzerscheinungen. Wied. Ann. 41. 850.

²⁾ Die gleiche Bemerkung gilt auch für die ganz neuerdings erschienene Arbeit des Herrn Blondlot, C. R. 113. 628. [Vergl. Anmerk. 15 am Schluss des Buches.]

³⁾ E. Sarasin u. L. de la Rive, Comptes rendues 112. 658.

⁴⁾ In einem Raum von nicht näher angegebenen Dimensionen fand Herr Trouton die Wellenlänge meines primären Leiters in der Luft ebenso wie ich zu etwa 10 m. Nature 39. 391.

forderten Werthe haben. Geben aber die Versuche zweideutige und widersprechende Auskunft, so enthalten sie offenbar noch unverstandene Ursachen der Täuschung und dann allerdings können sie nicht gegen die durch so viele Wahrscheinlichkeitsgründe gestützte Theorie ins Feld geführt werden. Die Genfer Versuche entkräften also meine eigenen und insofern stellen sie das Gleichgewicht zu Gunsten der Theorie wieder her.

Ich muss indessen bekennen, dass für mich die entscheidenden Gründe mehr indirekter Art waren. Als ich zuerst eine Verzögerung der Wellen in den Drähten zu finden glaubte, hoffte ich die Ursache dieser Verzögerung bald aufzudecken und Uebergänge zwischen beiden Geschwindigkeiten aufzufinden. Diese Hoffnung hat sich nicht verwirklicht. Ich habe keine Uebergänge gefunden und statt auf eine Aufklärung stiess ich bei zunehmender Erfahrung auf wachsende Widersprüche, bis dieselben mir schliesslich unauflöslich schienen und ich die Ueberzeugung von der Richtigkeit meiner ersten Beobachtung aufgeben musste. Dazu kam die von mir selbst gemachte Erfahrung, dass für kurze Wellen der Unterschied der Geschwindigkeiten so gut wie verschwindet. Ehe ein Fachgenosse dieses Gebiet betreten hatte, fasste ich meine Ueberzeugung in den Worten zusammen:¹⁾ „Für lange Wellen fand sich also die Wellenlänge in der Luft grösser als die in Drähten, während für kurze Wellen beide merklich gleich sich zeigten. Dies Ergebniss ist zu auffällig, als dass wir es als sicher betrachten könnten. Die Entscheidung muss späteren Versuchen vorbehalten bleiben.“ Von späteren Versuchen kommen bisher nur die Versuche der Herren Sarasin und de la Rive in Betracht und da diese in kleinen Räumen vorgenommen wurden, kann man sie mit mehr Recht für eine Bestätigung des zweiten Theiles meiner Behauptung erklären, als für eine Widerlegung des ersten Theiles. Für lange Wellen scheinen mir entscheidende Versuche noch auszustehen.²⁾ Ich kann allerdings kaum zweifeln, dass dieselben

¹⁾ Archives de Genève (3). 21, p. 302.

²⁾ Seit ich das Obige geschrieben, ist der ausgesprochene Wunsch völlig erfüllt worden durch die Versuche, welche die Herren Sarasin und de la Rive in der grossen Halle der Rhône-Wasserwerke zu Genf ausgeführt haben (Archives de Genève (3). 29, pp. 358 und 441). Diese Versuche haben die Gleichheit der Geschwindigkeiten in Luft und in Drähten bewiesen und

für die Gleichheit der Geschwindigkeit in allen Fällen entscheiden werden.

Vielleicht fragt der Leser, warum ich nicht selbst versucht habe, durch Wiederholung der Versuche die Zweifel zu beseitigen. Ich habe die Versuche wohl wiederholt, aber ich habe dabei nur gefunden, was auch zu vermuthen steht, dass die einfache Wiederholung unter ähnlichen Verhältnissen die Zweifel nicht zu heben, sondern eher zu vermehren im Stande ist. Die sichere Entscheidung steht bei Versuchen, welche unter günstigeren Verhältnissen ausgeführt werden. Günstigere Verhältnisse bedeuten hier grössere Räume. Solche waren mir bisher nicht zur Hand. Ich betone nochmals, dass die Ungunst der Räume nicht durch Sorgfalt der Beobachtung compensirt werden kann. Wenn sich die langen Wellen nicht entwickeln können, können sie auch nicht beobachtet werden. Es mag hiermit genug über diese Frage gesagt sein.

Die bisher erwähnten Versuche über die Reflexion der Wellen waren im März 1888 vollendet. Noch in demselben Monat machte ich den Versuch, die Zerstreung der Fernwirkung durch Reflexion an einer krummen Fläche zu verhindern. Ich baute für meine grosse Schwingung einen parabolischen Hohlspiegel von 4 m Höhe und etwa 2 m Oeffnung. Ich fand aber entgegengesetzt meiner Erwartung die Fernwirkung bedeutend geschwächt. Der grosse Spiegel wirkte wie ein die Schwingung umgebender Schutzkasten. Ich sagte mir, dass die Wellenlänge der Schwingung zu gross sei gegen die Brennweite des Spiegels. Eine mässige Verkleinerung des primären Leiters besserte den Erfolg nicht. Ich versuchte darauf mit einem Leiter zu arbeiten, welcher dem grossen geometrisch ähnlich, aber im Verhältniss 10 : 1 verkleinert war. Vielleicht bin ich nicht ausdauernd genug in diesen Versuchen gewesen, jedenfalls gelang es mir damals überhaupt nicht, so kurze Schwingungen zu erzeugen und zu beobachten und ich

also volle Uebereinstimmung hergestellt zwischen Erfahrung und Theorie. Ich betrachte diese Versuche als abschliessend und unterwerfe mich denselben nun ebenso willig, als ich damals zögern musste, mich von Versuchen überzeugen zu lassen, welche den meinigen nicht überlegen waren. Ich freue mich, hier den Herren Sarasin und de la Rive danken zu können für die Freundlichkeit und das Wohlwollen, welches sie mir bei Erörterung dieser Streitfrage stets erwiesen, — einer Streitfrage, welche jetzt völlig zu ihren Gunsten entschieden ist. [Zusatz zur englischen Ausgabe, 1893].

gab diese Versuche auf, um mich zunächst andern Fragen zuzuwenden.

Einmal galt es, die theoretische Behandlung der Versuche reiner und klarer zu fassen. Der Standpunkt, von welchem aus in den bisherigen Arbeiten die Versuche gedeutet waren, ist der Standpunkt, auf welchen ich durch das Studium der Abhandlungen von Helmholtz's¹⁾ gestellt war. Herr v. Helmholtz hält in diesen Abhandlungen zwei Formen der elektrischen Kraft auseinander, die elektrodynamische und die elektrostatische, welchen, solange die Erfahrung nicht gesprochen, zwei verschiedene Geschwindigkeiten beizulegen sind. Eine Deutung der Versuche von diesem Standpunkt aus konnte in keinem Falle falsch sein, aber sie war vielleicht unnöthig verwickelt. In einem besondern Grenzfall vereinfacht sich die Helmholtz'sche Theorie bedeutend, ihre Gleichungen gehen alsdann über in die Gleichungen der Maxwell'schen Theorie; es bleibt nur eine Form der Kraft übrig, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Es war also zu versuchen, ob man nicht mit diesen weit einfacheren Annahmen der Maxwell'schen Theorie auskomme. Der Versuch gelang. Die Ergebnisse der Rechnung sind dargelegt in der Abhandlung „Die Kräfte elektrischer Schwingungen, behandelt nach der Maxwell'schen Theorie“. Derjenige Theil dieser Arbeit, welcher sich auf die Interferenzen zwischen Luft- und Drahtwellen bezieht, wäre offenbar leicht jeder andern Form solcher Interferenzen anzupassen, welche etwa vollkommnere Versuche ergeben könnten.

Neben diesen theoretischen Betrachtungen setzte ich die Versuche fort und wandte dieselben wieder mehr den Wellen in Drähten zu. Ich verfolgte dabei erstens das Ziel, die Ursache der vermeintlichen Verzögerung dieser Wellen aufzufinden. Zweitens wünschte ich die Anschauung zu prüfen, derzufolge die Wellen überhaupt nicht im Innern des Leiters, sondern vielmehr im umgebenden Raum ihren Sitz und Spielplatz haben. Ich liess also nicht mehr die Wellen in einem Draht theilen, sondern in dem Zwischenraum zwischen zwei Drähten, zwischen zwei Platten, in röhrenförmigen Räumen; nicht mehr in verschiedenen Metallen, sondern in verschiedenen trennenden Isolatoren. Die Abhandlung „Ueber die Fortleitung elektrischer Wellen durch Drähte“, obwohl

¹⁾ v. Helmholtz, Ges. Abhandl. I. 545.

erst später vollendet und veröffentlicht, ist grösstentheils im Sommer 1888 ausgeführt.

Im Herbst wurde ich nämlich von den Versuchen an Drähten aus Anlass einer besonderen Erscheinung abgezogen. Als ich zur Untersuchung der Wellen in dem engen Zwischenraum zwischen zwei Drähten Resonatoren von geringem äusserem Umfange anwandte und bemüht war, solche Resonatoren abzustimmen, fand ich, dass ich am Ende der Drähte auch dann deutliche Knoten erhielt, wenn ich viel zu kleine Resonatoren benutzte. Selbst als ich zu Kreisen von wenigen Centimetern Durchmesser herabstieg, erhielt ich noch Knoten; dieselben lagen in geringem Abstände vom Ende der Drähte und ich konnte noch halbe Wellenlängen bis herab zu 12 cm beobachten. So hatte mich ein Zufall auf die vorher nicht gefundene Spur der kurzen Wellen gebracht, ich verfolgte sogleich diese Spur und es gelang mir nun auch schnell eine Form des primären Leiters zu finden, welche mit den kleinen Resonatoren zusammen arbeitete.

Die Erscheinung, durch welche ich auf die Beobachtung der kurzen Wellen zurückgeführt wurde, habe ich an sich nicht beachtet und dieselbe, da sich keine passende Anknüpfung bot, in der Veröffentlichung nirgends erwähnt. Es war offenbar ein besonderer Fall derselben Erscheinung, welche später von den Herren Sarasin und de la Rive entdeckt,¹⁾ mit dem Namen „multiple Resonanz“ belegt, und dahin gedeutet wurde, dass der primäre Leiter überhaupt keine bestimmte Schwingungsdauer besitze, sondern alle innerhalb weiter Grenzen liegenden Schwingungen gleichzeitig ausführe. Wenn ich selber jene Erscheinung nicht beachtete, so lag dies einmal daran, dass ich über dieselbe schnell zu andern Versuchen fortgeführt wurde. Es lag aber nicht weniger auch daran, dass ich mir für jene Erscheinung in meinem Falle von vorn herein eine Erklärung gebildet hatte, welche derselben nur ein weit geringeres Interesse lieh als die Erklärung der Herren Sarasin und de la Rive. Ich sah die Erscheinung an als die nothwendige und vorauszusehende Folge der schnellen Dämpfung der primären Schwingung. Herr Sarasin hatte die Freundlich-

¹⁾ E. Sarasin und L. de la Rive, Arch. de Genève (3). 23. p. 113. 1890.

keit, mich von dem Ergebniss seiner Versuche alsbald in Kenntniss zu setzen, ich theilte ihm mein Bedenken gegen seine Erklärung der Erscheinung und meine eigene Erklärung derselben mit, aber obwohl er meinen Ausführungen die liebenswürdigste Bereitwilligkeit entgegenbrachte, gelang es uns nicht, uns über die Deutung der Versuche zu verständigen. Eine solche Verständigung gelang sogleich mit Herrn H. Poincaré, welcher sich selber eine im wesentlichen gleiche Auffassung der Erscheinung gebildet und mir brieflich dieselbe mitgetheilt hatte. Er hat diese Auffassung mathematisch ausgearbeitet und in seinem Werke „Electricité et optique“ veröffentlicht.¹⁾ Gleichzeitig und unabhängig davon hat Herr V. Bjerknes die mathematischen Entwicklungen durchgeführt.²⁾ Dass die Erklärung der Herren Poincaré und Bjerknes nicht nur eine mögliche, sondern die einzig mögliche Erklärung bildet, ist, wie mir scheint nachgewiesen durch eine eben erschienene Untersuchung³⁾ des Herrn Bjerknes, welche feststellt, dass die Schwingung des primären Leiters wenigstens in erster Annäherung eine regelmässig gedämpfte Sinuswelle von bestimmter Periode ist. Die sorgfältigen Untersuchungen der Herren Sarasin und de la Rive enthalten demnach eine unentbehrliche Vervollständigung unserer Kenntniss dieses Gebietes, aber sie enthalten keinen Widerspruch gegen irgend eine von mir aufgestellte Behauptung. So sind diese Versuche von ihren Urhebern auch angesehen worden. Eine schärfere Kritik ist aus Anlass jener Versuche von einem ausgezeichneten, übrigens diesen Versuchen fernstehendem französischen Gelehrten an meinen Arbeiten ausgeübt worden. Ich hoffe, man wird jetzt urtheilen, dass für eine solche Kritik die Berechtigung fehlte.⁴⁾

Es sei mir gestattet, bei dieser Gelegenheit auch der Zweifel zu erwähnen, welche in der letzten Zeit von den Herren Hagenbach und Zehnder gegen die Beweiskraft meiner Versuche ausgesprochen worden sind.⁵⁾ Ich möchte die Arbeit der

¹⁾ H. Poincaré, *Electricité et optique* II. p. 249.

²⁾ V. Bjerknes, *Wied. Ann.* 44. p. 92. 1891.

³⁾ V. Bjerknes, *Wied. Ann.* 45. p. 513. 1891.

⁴⁾ Cornu, *Comptes rendues* 110. p. 72. 1890.

⁵⁾ E. Hagenbach u. L. Zehnder, *Wied. Ann.* 43. p. 610. 1891.

Herren Hagenbach und Zehnder noch nicht als abgeschlossen betrachten. Die Verfasser behalten sich vor, auf die Erklärung der Resonanz, die Art der Fernwirkung, die Bildung der Knoten und Bäuche zurückzukommen. Dies sind aber gerade und fast allein die Erscheinungen, auf welchen meine Versuche und die ganze Deutung derselben beruht.

Nachdem ich nun in der vorhin erwähnten Weise zur Beobachtung sehr kurzer Wellen gelangt war, wählte ich solche von etwa 30 cm Länge aus und wiederholte mit denselben zunächst die früheren Versuche. Im Widerspruch mit meinen Erwartungen stand die neue Erfahrung, dass diese kurzen Wellen an Drähten mit fast der gleichen Geschwindigkeit entlang eilten, welche sie in der Luft besaßen. Da so kurzen Wellen leicht ein freier Spielraum zu verschaffen war, so konnte hier ein Zweifel an der Richtigkeit des Resultats nicht aufkommen. Nachdem ich mich mit der Behandlung der kurzen Wellen vertraut gemacht hatte, nahm ich die Versuche mit den Hohlspiegeln wieder auf. Der alte grosse Spiegel war nicht mehr vorhanden, ich liess einen kleineren von 2 m Höhe und etwas über 1 m Öffnung herstellen. Die Wirkung desselben war so auffallend günstig, dass ich sogleich nach den ersten Proben nicht nur einen zweiten Hohlspiegel, sondern auch ebene spiegelnde Flächen und ein grosses Prisma bestellte. Schnell hinter einander und ohne Mühe gelangen nun die Versuche, welche in der Abhandlung „Über Strahlen elektrischer Kraft“ dargestellt sind; dieselben waren lange vorher überlegt und vorbereitet gewesen, mit Ausnahme der Polarisationsversuche, welche mir erst während der Arbeit einfielen. Diese Versuche mit den Hohlspiegeln sind schnell aufgefallen, sie sind häufig wiederholt und bestätigt worden. Sie haben einen Beifall gefunden, welcher meine Erwartungen weit übertraf¹⁾. Ein guter Theil dieses Beifalls entsprang einer philosophischen Quelle. Die alte Frage nach der Möglichkeit und dem Wesen der Wirkung in die Ferne war be-

¹⁾ Diese Versuche gaben auch den Anlass zu dem Vortrage „Ueber die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität“, in welchem ich 1889 auf der Heidelberger Naturforscherversammlung den allgemeinen Zusammenhang meiner Versuche in leichtfasslicher Form darstellte (gedruckt bei E. Strauss, Bonn).

rührt. Die von der Wissenschaft geheiligte, vom Verstande aber nur ungerne getragene Herrschaft der unmittelbaren Fernkräfte schien im Gebiet der Elektrizität durch einfache und schlagende Versuche für immer zerstört.

Mit der Erreichung jenes Ziels war ein gewisser Abschluss erreicht. Eine Lücke war mir indessen noch empfindlich. Die Versuche behandelten nur die Ausbreitung der elektrischen Kraft. Es war wünschenswerth, dass gezeigt würde, dass auch die magnetische Kraft sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Nach der Theorie war hierzu die Erzeugung besonderer magnetischer Wellen nicht erforderlich, die elektrischen Wellen mussten an sich zugleich Wellen magnetischer Kraft sein; es kam nur darauf an, in diesen Wellen die magnetische Kraft neben der elektrischen wirklich nachzuweisen. Ich hoffte dass dies möglich sein würde durch Beobachtung der mechanischen Kräfte, welche die Wellen auf ringförmige Leiter ausübten. So wurden damals die Versuche geplant, welche aus äusseren Anlässen erst später und nur unvollkommen zur Ausführung kamen, und über welche die letzte experimentelle Arbeit „Über die mechanischen Wirkungen elektrischer Drahtwellen“ Bericht erstattet.

Werfen wir einen Blick zurück. Durch die Gesamtheit der geschilderten Versuche ist zum ersten Male der Beweis geliefert worden für die zeitliche Ausbreitung einer vermeintlichen Fernkraft. Diese Thatsache bildet den philosophischen, in gewissem Sinne zugleich den wichtigsten Gewinn der Versuche. In jenem Beweise ist enthalten die Erkenntniss, dass die elektrischen Kräfte sich von den ponderablen Körpern loslösen und selbstständig als Zustände oder Veränderungen des Raumes fortbestehen können. Neben dieser Erkenntniss liefern die Einzelheiten der Versuche den Beweis, dass die besondere Art der Ausbreitung der elektrischen Kraft die grösste Analogie,¹⁾ wenn nicht vollständige Uebereinstimmung zeigt mit der Ausbreitung der Lichtbewegung. Dadurch wird die Hypothese, dass das Licht eine

¹⁾ Die Analogie liegt keineswegs nur in der Uebereinstimmung der mehr oder weniger genau gemessenen Geschwindigkeiten. Die nahezu gleiche Geschwindigkeit ist nur ein Element der Analogie unter vielen Elementen.

elektrische Erscheinung sei, in hohem Grade wahrscheinlich gemacht. Ein strenger Beweis für diese Hypothese kann von vornherein nur durch Versuche geliefert werden, welche am Lichte ausgeführt sind.

Was wir hier als die Leistung der Versuche bezeichnet haben, leisten dieselben unabhängig von der Richtigkeit besonderer Theorien. Nichtsdestoweniger liegt die Bedeutung der Versuche offenbar in ihrem Zusammenhang mit der Theorie, in welchem Zusammenhang sie ja auch unternommen wurden. Seit dem Jahre 1861 besitzt die Wissenschaft die Theorie, welche Maxwell auf den Anschauungen Faradays aufgebaut hat, welche wir deshalb die Faraday-Maxwell'sche Theorie nennen und welche die Möglichkeit der hier aufgefundenen Klasse von Erscheinungen mit der gleichen Sicherheit behaupten konnte, mit welcher die übrigen elektrischen Theorien gezwungen waren, die Möglichkeit derselben zu verneinen. Die Maxwell'sche Theorie übertraf von vornherein die übrigen elektrischen Theorien durch Schönheit und Reichthum der Beziehungen, welche sie zwischen den Erscheinungen annahm. Die Wahrscheinlichkeit dieser Theorie und damit die Zahl ihrer Anhänger wuchs von Jahr zu Jahr. Gleichwohl vermochte die Maxwell'sche Theorie die ihr entgegenstehenden Theorien nicht vollständig zu verdrängen, weil sie sich nur auf die Wahrscheinlichkeit ihrer Endergebnisse, nicht auf die Sicherheit ihrer Voraussetzungen berufen konnte. Die Fundamentalhypothesen der Maxwell'schen Theorie widersprachen den üblichen Anschauungen und konnten sich nicht an sichere Versuche als an Beweise anlehnen. In diesem ihrem natürlichen Zusammenhang können wir Absicht und Ergebniss unserer Versuche nicht besser charakterisiren, als indem wir sagen: Die Absicht dieser Versuche war die Prüfung der Fundamentalhypothesen der Faraday-Maxwell'schen Theorie und das Ergebniss der Versuche ist die Bestätigung der Fundamentalhypothesen dieser Theorie.

B. Zur Theorie.

Was ist nun aber, genau gesprochen, die Faraday-Maxwell'sche Theorie? Maxwell hat als Arbeit seiner reiferen Jahre uns ein grösseres Werk über die Elektrizität und den Magne-

tismus hinterlassen; man darf also wohl sagen, die Maxwell'sche Theorie sei diejenige Theorie, welche in diesem Werke niedergelegt ist. Aber denjenigen Fachgenossen, welche diesen Fragen näher getreten sind, wird nicht allen mit dieser Antwort Genüge geschehen sein. Mancher hat sich mit Eifer an das Studium des Maxwell'schen Werkes gemacht und, ohne auf ungewöhnliche mathematische Schwierigkeiten gestossen zu sein, dennoch darauf verzichten gemusst, sich eine völlig widerspruchsfreie Vorstellung von Maxwells Ansichten zu bilden. Mir selbst ist es nicht besser gegangen. Bei der grössten Bewunderung für die mathematischen Beziehungen der Maxwell'schen Theorie war ich doch hinsichtlich der physikalischen Bedeutung seiner Behauptungen nicht immer vollständig sicher, Maxwells wahre Meinung errathen zu haben. In meinen Versuchen konnte ich mich daher auch nicht direkt durch das Maxwell'sche Buch leiten lassen, ich liess mich hier leiten durch die Arbeiten von Helmholtz, wie es ja auch aus der Darstellung der Versuche deutlich hervorgeht. Für den besonderen Grenzfall der Helmholtz'schen Theorie, welcher auf die Maxwell'schen Gleichungen führt, und auf welchen die Versuche hinleiteten, verflüchtigt sich nun aber leider die physikalische Grundlage der Helmholtz'schen Theorie, wie sich dieselbe allgemein verflüchtigt, wenn man von Fernkräften absehen will. Ich versuchte deshalb mir die unentbehrlichen physikalischen Vorstellungen widerspruchsfrei selbst zu construiren, indem ich von den Maxwell'schen Gleichungen ausging, im Uebrigen aber die Maxwell'sche Theorie so viel wie möglich vereinfachte durch Elimination oder einfache Fortlassung aller derjenigen Elemente, welche ich nicht verstand und welche entbehrlich waren, da sie auf keine möglichen Erscheinungen einen Einfluss üben konnten. So entstanden die beiden theoretischen Arbeiten, welche den Schluss dieser Sammlung bilden. Die Darstellung der Theorie in Maxwells eigenem Werk, die Darstellung als Grenzfall der Helmholtz'schen Theorie und die Darstellung in den vorliegenden Abhandlungen sind also wesentlich verschiedene Formen für einen wesentlich gleichen gemeinsamen Inhalt. Dieser gemeinsame Inhalt der verschiedenen Formen, für welchen gewiss noch viele andere Formen gefunden werden können, erscheint mir als der unsterbliche Theil der Maxwell'schen Arbeit, diesem

Inhalt und nicht den besonderen Vorstellungen oder Methoden Maxwells möchte ich den Namen „Maxwell'sche Theorie“ vorbehalten wissen. Auf die Frage „Was ist die Maxwell'sche Theorie?“ wüsste ich also keine kürzere und bestimmtere Antwort als diese: Die Maxwell'sche Theorie ist das System der Maxwell'schen Gleichungen. Jede Theorie, welche auf diese Gleichungen führt, und damit dieselben möglichen Erscheinungen umfasst, würde ich als eine Form oder ein Specialfall der Maxwell'schen Theorie bezeichnen; jede Theorie, welche auf andere Gleichungen und damit auf andere mögliche Erscheinungen führt, ist eine andere Theorie. In diesem Sinne also und nur in diesem Sinne bilden die beiden theoretischen Abhandlungen dieser Sammlung eine Darstellung der Maxwell'schen Theorie. Keineswegs können sie den Anspruch erheben, genau Maxwells Gedanken wiederzu geben. Es ist im Gegentheil zweifelhaft, ob Maxwell, falls er lebte, die vorgetragene Darstellung als die seine anerkennen würde.

Darin, dass derselbe Inhalt in verschiedenen Fassungen vorgetragen wird, liegt ein bedeutendes Erschwerniss für das Verständniss jeder einzelnen Fassung. Dieselbe Bezeichnung bedeutet in den verschiedenen Formen verwandte und doch verschiedene Begriffe oder Vorstellungen. Die erste Bedingung für das Verständniss ist also, dass man jede Darstellung für sich zu verstehen suche und nicht in sie die Vorstellungen einer andern Darstellung hineintrage. Vielleicht erweise ich manchen Fachgenossen einen Dienst, wenn ich hier kurz die Grundvorstellungen der drei Darstellungen der Maxwell'schen Theorie erläutere, welche ich oben erwähnte. Ich habe dabei Gelegenheit anzugeben, worin nach meinem Urtheil die besondere Schwierigkeit von Maxwell's eigener Darstellung liege. Die oft gehörte Ansicht, dass diese Schwierigkeit mathematischer Natur sei, kann ich nicht theilen.

Wenn wir die Körper aus der Ferne auf einander wirken sehen, so können wir uns von der Natur dieser Wirkung verschiedene Vorstellungen machen. Wir können die Einwirkung als eine unmittelbare, den Raum überspringende Fernkraft betrachten oder wir können sie als die Folge einer Wirkung ansehen, welche in einem hypothetischen Medium von Punkt zu

Punkt sich fortpflanzt. In den Anwendungen dieser Vorstellungen auf die Elektrizität können wir indessen noch eine Reihe feinerer Unterschiede machen. Gehen wir von der reinen Vorstellung der unmittelbaren zu der reinen Vorstellung der vermittelten Fernwirkung über, so können wir etwa vier Standpunkte unterscheiden.

Auf dem ersten Standpunkte betrachten wir die Anziehung zweier Körper als eine Art geistiger Hinneigung beider zu einander. Die Kraft, welche jeder von beiden ausübt, ist geknüpft an das Vorhandensein des andern Körpers. Damit überhaupt eine Kraft vorhanden sei, müssen mindestens zwei Körper vorhanden sein. Ein Magnet erhält gewissermassen seine Kraft erst dann, wenn ein anderer Magnet in seine Nähe gebracht wird. Diese Vorstellung ist die reine Vorstellung der Fernkraft, die Vorstellung des Coulombschen Gesetzes. Sie ist in der Lehre von der Elektrizität fast verlassen, sie wird wohl noch benutzt in der Lehre von der Gravitation. Der berechnende Astronom spricht von der Anziehung zwischen der Sonne und einem Planeten, aber die Anziehung im leeren Raum beschäftigt ihn nicht.

Auf dem zweiten Standpunkt sehen wir die Anziehungen der Körper immer noch an als eine Art geistiger Einwirkung derselben auf einander. Aber obwohl wir zugeben, dass wir diese Fernwirkung nur dann bemerken können, wenn wir mindestens zwei Körper haben, so nehmen wir doch an, dass auch der einzelne der wirkenden Körper beständig das Bestreben habe, in jedem Punkte seiner Umgebung Anziehungen hervorzubringen von bestimmter Grösse und Richtung, auch dann, wenn sich keine andern ihm verwandten Körper in der Nähe finden. Mit den stetig von Punkt zu Punkt sich ändernden Bestrebungen dieser Art füllen wir in unserer Vorstellung den Raum. Gleichwohl nehmen wir nicht am Ort der Wirksamkeit irgend eine Veränderung des Raumes an, um deren willen wir diesen Ort als den Sitz der Kraft bezeichnen könnten, sondern zugleich Sitz und Ursprung der Kraft bleibt der wirkende Körper. Dieser Standpunkt ist etwa der Standpunkt der Potentialtheorie. Er ist selbstverständlich auch der Standpunkt gewisser Capitel in Maxwell's Werk, obwohl nicht der Standpunkt der Maxwell'schen Theorie. Um die Vorstellungen in sinnlicher Darstellung mit einander vergleichen zu können, sind in Fig. 2 zwei ent-

gegengesetzt elektrisirte Condensatorplatten von diesem Standpunkt aus in leicht verständlicher Symbolik dargestellt. Man sieht in den Platten die materiell gedachte positive und negative Elektrizität, zwischen den Platten die durch Pfeile dargestellte Kraft. Ob der Raum zwischen den Platten erfüllt oder leer ist, ist von diesem Standpunkt aus gleichgültig. Geben wir also den Lichtäther zu, denken ihn uns aber aus einem Theil B des Raumes entfernt, so wird gleichwohl in diesem Raum die Kraft unverändert sein.

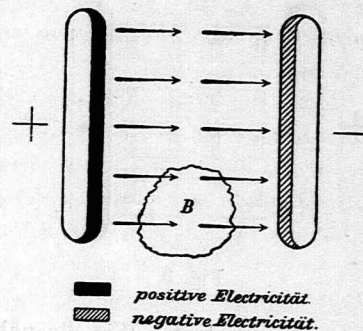


Fig. 2.

Der dritte Standpunkt behält die Vorstellungen des zweiten bei, fügt ihnen aber eine Complication hinzu. Er nimmt an, dass die unvermittelten Fernkräfte die Wirkung der getrennten Körper nicht allein bestimmen. Vielmehr nimmt er an, dass die Kräfte in dem überall erfüllt gedachten Raum Veränderungen hervorrufen, welche ihrerseits Anlass zu neuen Fernkräften geben. Die Anziehungen der getrennten Körper beruhen dann zum Theil auf der unmittelbaren Fernwirkung derselben, zum Theil auf dem Einfluss des veränderten Mediums. Die Veränderung des Mediums selbst wird gedacht als eine elektrische, bez. magnetische Polarisation seiner kleinsten Theile unter dem Einfluss der wirkenden Kraft. Im Hinblick auf statische Erscheinungen ist dieser Standpunkt von Poisson für den Magnetismus entwickelt, von Mosotti auf die elektrischen Erscheinungen übertragen worden; in allgemeinsten Entwicklung und in Ausdehnung auf das ganze Gebiet des Elektromagnetismus findet er sich vertreten in der Theorie von Helmholtz.¹⁾

Fig. 3 versinnlicht diesen Standpunkt für den Fall, dass sich das Medium nur in geringem Maasse an der Gesamt-

¹⁾ Am Schluss der Abhandlung „Ueber die Bewegungsgleichungen der Elektrizität für ruhende leitende Körper.“ Ges. Abh. I. p. 545.

wirkung betheiligt. Man sieht in den Platten die freien Elektricitäten, ebenso die in den Theilen des Dielectricums getrennten, aber nicht ableitbaren elektrischen Fluida. Denken wir uns, der Raum zwischen den Platten enthalte nur den Lichtäther und machen wir in denselben eine Höhlung von der Gestalt B, so werden in dieser Höhlung die Kräfte erhalten bleiben, die Polarisationen aber fortfallen.

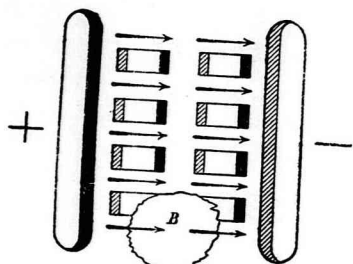


Fig. 3.

Ein Grenzfall dieser Vorstellungswiese ist von besonderer Wichtigkeit. Wie die nähere Ueberlegung zeigt, können wir die allein beobachtbare Gesamtwirkung der greifbaren Körper auf einander in verschiedener Weise vertheilen auf den Einfluss der unmittelbaren Fernkräfte und auf den Einfluss des zwischenliegenden Mediums. Wir können den Theil der Gesamtenergie, welcher seinen Sitz in den elektrisirten Körpern hat, vergrößern auf Kosten des Theiles, welchen wir in dem Medium suchen, und umgekehrt. Im Grenzfall nun suchen wir die gesamte Energie im Medium. Da den Elektricitäten, welche sich in den Leitern finden, keine Energie entsprechen soll, so müssen die Fernkräfte verschwindend klein werden. Dafür ist wieder nothwendige Bedingung, dass nirgends freie Elektricität auftrete. Die Elektricität muss sich also bewegen wie eine incompressible Flüssigkeit. Daher haben wir nur geschlossene Ströme, daher die Möglichkeit, die Theorie auf alle Arten der elektrischen Bewegung zu erweitern trotz unserer Unkenntniss der Gesetze der ungeschlossenen Ströme.

Die mathematische Behandlung dieses Grenzfalles führt uns auf die Gleichungen Maxwell's. Wir bezeichnen also diese Behandlung als eine Form der Maxwell'schen Theorie. So wird auch dieser Grenzfall bei v. Helmholtz bezeichnet. Keineswegs aber soll damit gesagt sein, dass die zu Grunde liegenden Vorstellungen die Vorstellungen Maxwell's seien.

Figur 4 symbolisirt uns die Vorstellungen dieser Theorie von dem Zustand des Raumes zwischen den zwei elektrisirten

Platten. Die Fernkräfte sind zu Schemen herabgesunken. Die Elektricität in den Leitern ist noch vorhanden und sie ist auch unentbehrlich für die Vorstellung, aber sie wird in ihren Fernwirkungen vollständig neutralisirt durch die gegen sie hin verschobene entgegengesetzte Elektricität des Mediums. Der Druck, welchen dieses Medium infolge der Anziehung seiner inneren Elektricitäten ausübt, zieht die Platten gegen einander. In dem

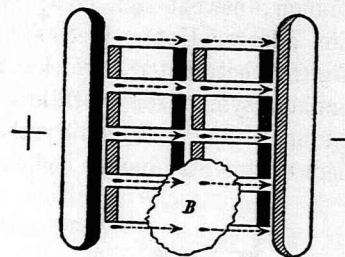


Fig. 4.

Hohlraum B finden sich nur die verschwindend kleinen Fernkräfte vor.

Der vierte Standpunkt gehört der reinen Vorstellung von der vermittelten Wirkung. Wir geben auf diesem Standpunkte zu, dass die vom dritten Standpunkte aus angenommenen Veränderungen des Raumes thatsächlich vorhanden sind, und dass dieselben die Vermittler des Einflusses sind, welchen die greifbaren Körper auf einander ausüben. Aber wir läugnen, dass diese Polarisationen die Folge von Fernkräften sind, wir läugnen das Vorhandensein dieser Fernkräfte überhaupt; wir beseitigen die Elektricitäten, von welchen diese Fernkräfte ausgehen sollten. Vielmehr betrachten wir jetzt jene Polarisationen als das einzig wirklich vorhandene; sie sind zugleich die Ursache der Bewegungen der ponderablen Körper und der übrigen Erscheinungen, welche uns diese Körper als verändert erblicken lassen. Die Erklärung des Wesens der Polarisationen, ihres Zusammenhangs und ihrer Wirkungen vertagen wir oder suchen sie in mechanischen Hypothesen; wir weigern uns aber, in den bisher benutzten Elektricitäten und Fernkräften eine befriedigende Erklärung dieses Zusammenhangs und dieser Wirkungen zu sehen. Die Ausdrücke Elektricität, Magnetismus, u. s. w., behalten für uns nur den Werth von Abkürzungen.

In mathematischer Hinsicht können wir die Behandlung dieses vierten Standpunktes vollständig zusammenfallen lassen mit dem Grenzfall des dritten Standpunktes. Aber physikalisch betrachtet bleibt er gleichwohl vollständig von demselben verschieden. Es ist unmöglich, zugleich die Fernkräfte zu läugnen

und sie als Ursachen der Polarisationen anzusehen. Was wir von diesem Standpunkte aus irgend als „Elektricität“ bezeichnen können, bewegt sich nicht wie eine incompressible Flüssigkeit. Ein anderer Unterschied springt in die Augen, wenn wir die Figur 5 betrachten, welche uns die Vorstellung dieses Standpunkts symbolisch vorführt. Die Polarisation des Raumes ist mit Hilfe desselben Symboles dargestellt, dessen wir uns auf dem dritten Standpunkt bedienen. Aber während in Figur 3 und 4

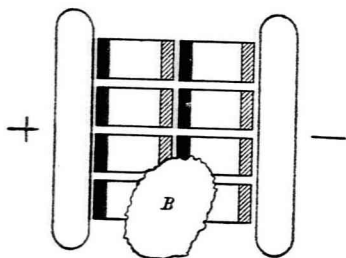


Fig. 5.

diese Darstellung das Wesen der Polarisation erläuterte durch das als bekannt vorausgesetzte Wesen der Elektricität, soll hier durch die Darstellung das Wesen der elektrischen Belegung definiert werden durch den als bekannt angesehenen Polarisationszustand des Raumes. Jedes Theilchen des Dielektricum erscheint hier in entgegengesetzter Weise mit Elektricität belegt, wie in den Vorstellungen des dritten Standpunktes. Entfernen wir in der Vorstellung aus dem Raume B wiederum den Aether, so bleibt in diesem Raume schlechterdings nichts zurück, was uns an die elektrische Erregung der Umgebung erinnern könnte.

Dieser vierte Standpunkt ist nun, wie ich denke, der Standpunkt Maxwell's. Die allgemeinen Auseinandersetzungen seines Werkes lassen keinen Zweifel, dass er die Fernkräfte vollständig beseitigen wollte. Maxwell sagt ausdrücklich, dass, wenn in einem Dielektricum die Kraft, also das „displacement“ nach der rechten Seite gerichtet ist, man sich alsdann jedes Theilchen des Dielektricum vorzustellen habe als belegt mit negativer Elektricität auf der rechten Seite, mit positiver Elektricität auf der linken Seite. Aber es ist nicht zu läugnen, dass für den ersten Blick andere Aussagen Maxwell's mit den Vorstellungen dieses Standpunktes im Widerspruch zu stehen scheinen. Maxwell nimmt auch in den Leitern Elektricität an, diese Elektricität bewegt sich stets so, dass sie mit den Verschiebungen im Dielektricum zusammen geschlossene Ströme bildet. Die Behauptung, dass sich die Elektricität bewege wie eine incom-

pressible Flüssigkeit, ist ein Lieblingssatz Maxwell's. Diese Aussagen aber passen nicht in die Vorstellungen des vierten Standpunktes, sie lassen vermuthen, dass es vielmehr der dritte Standpunkt gewesen sei, dessen Anschauungen Maxwell vor Augen standen. Ich glaube, dass dies letztere niemals der Fall war, dass die Widersprüche scheinbar sind und auf einem Missverständniss beruhen. Irre ich nicht, so ist der Zusammenhang der folgende: Maxwell hat ursprünglich seine Theorie entwickelt an der Hand sehr bestimmter und specieller Vorstellungen über das Wesen der elektrischen Erscheinungen. Er nahm an, dass die Poren des Aethers und aller Körper erfüllt seien mit einer zarten Flüssigkeit, welche aber keine Fernkräfte ausübte. In den Leitern sollte sich diese Flüssigkeit frei bewegen und diese Bewegung sollte das bilden, was wir einen elektrischen Strom nennen. In den Isolatoren sollte diese Flüssigkeit durch elastische Kräfte an ihren Ort gefesselt sein und die Verschiebung, das „displacement“ derselben wurde betrachtet als das Wesen der elektrischen Polarisation. Die Flüssigkeit selbst nannte Maxwell als die Ursache aller elektrischen Erscheinungen „Elektricität“. Als Maxwell nun sein grosses Werk abfasste, sagten ihm offenbar die gehäuften Hypothesen jener ersten Vorstellung nicht mehr zu oder er fand Widersprüche in denselben und so liess er sie fort. Aber er eliminirte sie doch nicht so vollständig, dass nicht eine ganze Reihe von Bezeichnungen, die aus jener Vorstellung stammen, zurückgeblieben wären. Und so hat leider das Wort „Elektricität“ in Maxwell's Werk offenbar einen Doppelsinn. Einmal bezeichnet es dasjenige, was auch wir so bezeichnen, eine Grösse, welche positiv und negativ sein kann, und welche den Ausgangspunkt mindestens scheinbarer Fernkräfte bildet. Zweitens bezeichnet es jenes hypothetische Fluidum, von welchem keine, auch keine scheinbaren Fernkräfte ausgehen, und dessen Menge in einem Raum unter allen Umständen nur eine positive Grösse sein kann. Liest man die Ausführungen Maxwell's, indem man beständig den Sinn des Wortes „Elektricität“ in geeigneter Weise interpretirt, so lassen sich die zuerst überraschenden Widersprüche fast immer zum Verschwinden bringen. Ich muss indess bekennen, dass mir dies in Vollständigkeit und zu meiner vollkommenen Befriedigung doch nicht hat gelingen

wollen; ich würde sonst bestimmter und nicht so zweifelnd reden.¹⁾

Wie dem auch sei, jedenfalls ist in den beiden theoretischen Abhandlungen dieser Sammlung der Versuch gemacht, die Maxwell'sche Theorie, d. h. das Maxwell'sche Gleichungssystem von diesem vierten Standpunkt aus darzustellen. Ich habe mich bemüht, den Standpunkt rein zu wahren, also Vorstellungen, welche ihm fremd sind, überhaupt nicht erst in die Betrachtung einzuführen.²⁾ Ich habe mich ferner bemüht, in der Darstellung die Zahl derjenigen Vorstellungen möglichst zu beschränken, welche von uns in die Erscheinungen willkürlich hineingetragen werden und nur solche Elemente zuzulassen, welche nicht entfernt oder abgeändert werden können, ohne zugleich mögliche Erfahrungen abzuändern. Es ist wahr, dass durch dies Bestreben die Theorie einen sehr abstracten und farblosen Anblick erhält. Es befriedigt wenig, nur allgemein von „gerichteten Zustandsänderungen“ da reden zu hören, wo man gewohnt war, das sinnliche Bild der mit Elektricitäten belegten Atome vor Augen zu haben. Es befriedigt wenig, Gleichungen als allgemeine Ergebnisse der Erfahrung hingestellt zu sehen, für welche man gewohnt war, durch längere mathematische Ableitungen einen scheinbaren Beweis zu erhalten. Ich glaube indessen, dass man ohne Selbsttäuschung aus der Erfahrung nicht viel mehr entnehmen kann, als in jenen Abhandlungen ausgesagt ist. Wünscht man der Theorie mehr Farbe zu verleihen, so ist nichts im Wege, dass man noch nachträglich der Einbildungs-

¹⁾ Aehnlich urtheilt Herr Poincaré in seinem Werke „Electricité et optique“, Vol. I. Les Théories de Maxwell. Herr L. Boltzmann in seinen „Vorlesungen über Maxwell's Theorie“ scheint, wie ich selbst, mehr eine widerspruchsfreie Ableitung des Maxwell'schen Systems zu beabsichtigen, als eine genaue Wiedergabe von Maxwell's eigenen Gedanken. Da das Werk noch unvollendet, ist ein sicheres Urtheil noch nicht möglich.

²⁾ Der Ausdruck „elektrische Kraft“ in diesen Abhandlungen ist nur ein Name für einen Polarisationszustand des Raumes. Um Missverständnissen vorzubeugen, hätte ich vielleicht besser gethan, ihn durch ein anderes Wort zu ersetzen, etwa das Wort „elektrische Feldintensität“, wie es Herr E. Cohn vorschlägt in seiner gleiches Ziele verfolgenden Abhandlung: Zur Systematik der Electricitätslehre, Wiedem. Ann. 40. p. 625. 1890.

kraft zu Hilfe komme durch concrete sinnliche Vorstellungen von dem Wesen der elektrischen Polarisation, des elektrischen Stromes u. s. w. Aber die Strenge der Wissenschaft erfordert doch, dass wir dies bunte Gewand, welches wir der Theorie überwerfen, und dessen Schnitt und Farbe vollständig in unserer Gewalt liegt, wohl unterscheiden von der einfachen und schlichten Gestalt selbst, welche die Natur uns entgegenführt und an deren Formen wir aus unserer Willkür nichts zu ändern vermögen.

Was ich im Einzelnen zu den Abhandlungen noch bemerken möchte, werde ich am Schlusse des Buches in der Gestalt nachträglicher Anmerkungen hinzufügen.

2. Ueber sehr schnelle elektrische Schwingungen.

(Wiedemanns Annalen, Band 31, p. 421, 1887.)

Die elektrischen Oscillationen geöffneter Inductionsapparate haben eine Schwingungsdauer, welche nach Zehntausendtheilen der Sekunde gemessen werden kann. Etwa hundertmal schneller erfolgen die Schwingungen oscillirender Flaschenladungen, welche Feddersen beobachtete.¹⁾ Schnellere Schwingungen noch als diese lässt die Theorie als möglich voraussehen in gutleitenden ungeschlossenen Drähten, deren Enden nicht durch grosse Capacitäten belastet sind, ohne dass freilich die Theorie zu entscheiden vermöchte, ob solche Schwingungen je in bemerkbarer Stärke thatsächlich erregt werden können. Gewisse Erscheinungen legten mir die Vermuthung nahe, dass Schwingungen der letztgenannten Art unter bestimmten Verhältnissen wirklich auftreten, und zwar in solcher Stärke, dass ihre Fernwirkungen der Beobachtung zugänglich werden. Weitere Versuche bestätigten meine Vermuthung, und es soll deshalb über die beobachteten Erscheinungen und die angestellten Versuche hier berichtet werden.

Die Schwingungen, um welche es sich dabei handeln wird, sind wiederum etwa hundertmal schneller, als die von Feddersen beobachteten. Ihre Schwingungsdauer, freilich nur mit Hilfe der Theorie geschätzt, rechnet nach Hundertmilliontheilen der Sekunde. Der Schwingungsdauer nach stellen sich demnach diese Schwingungen schon in die Mitte zwischen die akustischen Schwingungen der ponderablen Körper und die Lichtschwingungen

¹⁾ Für die Litteratur siehe Colley, Wied. Ann. 26. p. 432. 1885. [Auch Anmerkung 1 am Schluss des Buches].

des Aethers. Hierin und in der Möglichkeit, dass ihre nähere Beobachtung für die Theorie der Elektrodynamik nützlich werden kann, liegt das Interesse, welches sie bieten.

Einleitende Versuche.

Schaltet man in den Entladungskreis eines Inductoriums ausser der eigentlichen Funkenstrecke noch ein Riess'sche Funkenmikrometer ein, dessen Pole durch einen längeren metallischen Nebenschluss verbunden sind, so zieht die Entladung den Weg durch die Luftstrecke des Mikrometers dem Wege durch die metallische Leitung vor, sobald die Länge der Luftstrecke eine gewisse Grenze nicht überschreitet. Diese Erfahrung ist nicht neu, sie liegt bekanntlich der Construction der Blitzableiter in den Telegraphenleitungen zu Grunde. Man darf erwarten, dass wenn der metallische Nebenschluss nur kurz und von kleinem Widerstande gewählt wird, dass dann die Funken im Mikrometer verschwinden werden. Thatsächlich nimmt nun auch die Länge der zu erzielenden Funken ab mit der Länge des Nebenschlusses, aber zum völligen Erlöschen sind die Funken unter Umständen kaum zu bringen. Selbst wenn die beiden Kugeln des Mikrometers durch wenige Centimeter eines dicken Kupferdrahtes verbunden sind, lassen sich noch Fünkchen, wenn auch äusserst kurze beobachten. Unmittelbar zeigt dieser Versuch, dass im Moment der Entladung das Potential längs des Schliessungskreises schon auf wenige Centimeter hin um Werthe von Hunderten von Volts variirt, mittelbar giebt er Zeugnis von der ausserordentlichen Geschwindigkeit, mit welcher die Entladung einsetzt. Denn die Potentialdifferenz an den Mikrometerkugeln kann nur als eine Wirkung der Selbstinduction in dem metallischen Nebenschluss angesehen werden. Die Zeit, in welcher das Potential an der einen Kugel merkliche Aenderungen erleidet, ist von derselben Ordnung wie diejenige Zeit, in welcher sich diese Aenderungen bis zur zweiten Kugel durch eine kurze Strecke eines guten Leiters fortpflanzen. Zwar könnte man vermuthen, schon der Widerstand des Nebenschlusses bedinge bei der vielleicht grossen Stromdichtigkeit der Entladung die auftretende Potentialdifferenz der Mikrometerkugeln. Eine angenäherte Betrachtung der quantitativen Verhältnisse erweist diese

Vermuthung als unzulässig, eine derartige Vermuthung aber wird überhaupt nicht aufgeworfen werden können bei den folgenden Versuchen. Wir schliessen wiederum das Funkenmikrometer durch eine gute metallische Leitung, etwa durch einen zum Rechteck gebogenen Kupferdraht von 2 mm Durchmesser und $\frac{1}{2}$ m Länge, aber wir fügen es nicht in den Entladungskreis des Inductoriums ein, sondern wir verbinden nur den einen Pol desselben mit einem beliebigen Punkte des Entladungskreises durch einen Zwischendraht. Fig. 6 giebt die Anordnung der Apparate; *A* stellt schematisch das Inductorium, *B* den Entlader, *M* das Mikrometer dar.

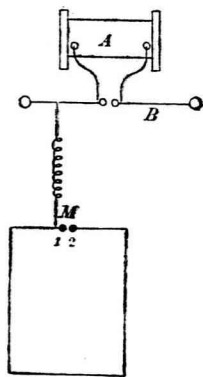


Fig. 6.

Wir beobachten alsdann wieder während der Thätigkeit des Inductoriums einen Funkenstrom im Mikrometer, welcher unter Umständen eine Länge von mehreren Millimetern erreicht. Einmal zeigt nun dieser Versuch, dass im Augenblicke der Entladung nicht nur im eigentlichen Schliessungskreis, sondern auch in allen mit demselben verbundenen Leitern heftige elektrische Bewegungen stattfinden. Zweitens aber zeigt er deutlicher, als der vorige Versuch, dass diese Bewegungen so schnell verlaufen, dass schon die Zeit, in welcher elektrische Wellen kurze metallische Leiter durchsetzen, merklich in Betracht kommt. Denn man kann ja den Versuch nur in der Weise deuten, dass die vom Inductorium ausgehende Aenderung des Potentials um eine in Betracht kommende Zeit früher zu der Kugel 1, als zu der Kugel 2 gelangt. Bedenkt man, dass sich nach allem, was wir wissen, elektrische Wellen in Kupferdrähten nahezu mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen, so kann die Erscheinung billig in Verwunderung setzen. Es erschien mir deshalb der Mühe werth, zu untersuchen, welche Umstände für das Zustandekommen lebhafter Funken im Mikrometer günstig wären. Des kürzeren Ausdruckes halber wollen wir diese Funken im Gegensatz zu der eigentlichen Entladung als Nebenfunken und den Schliessungskreis des Mikrometers als Nebenkreis bezeichnen.

Zunächst zeigte sich, dass kräftige Entladungen nöthig sind,

wenn man Nebenfunken von mehreren Millimetern Länge erzielen will. Ich benutzte daher zu allen folgenden Versuchen ein grosses Inductorium von Ruhmkorff, von 52 cm Länge und 20 cm Durchmesser, welches mit Quecksilberunterbrecher versehen war und durch sechs grosse Bunsen'sche Elemente erregt wurde. Kleinere Inductorien gaben qualitativ gleiche Resultate, aber die Nebenfunken waren kürzer und ihre Unterschiede daher schwerer zu beobachten. Gleiches gilt von der Entladung von Leydener Flaschen oder von Batterien, welche an Stelle des Inductoriums gesetzt wurden. Es zeigte sich ferner, dass auch bei Anwendung desselben Apparates noch sehr viel von der Beschaffenheit des erregenden Funken im Entlader abhängt. Findet derselbe zwischen zwei Spitzen statt oder zwischen einer Spitze und einer Platte, so giebt er nur zu sehr schwachen Nebenfunken Anlass, ebenso unwirksam erweist sich die Entladung in verdünnten Gasen oder durch Geissler'sche Rohre. Als gut wirksam erweist sich nur der Funke zwischen zwei Kugeln, derselbe darf dabei weder zu lang, noch zu kurz sein. Ist er kürzer als $\frac{1}{2}$ cm, so sind die Nebenfunken schwach, ist er länger als $1\frac{1}{2}$ cm, so bleiben sie fast ganz aus.

Ich benutzte in den folgenden Versuchen Funken von ca. $\frac{3}{4}$ cm Länge zwischen zwei Messingkugeln von 3 cm Durchmesser als die geeignetsten. Auch solche Funken waren nicht immer gleichmässig wirksam, die geringfügigsten Umstände liessen oft ohne ersichtlichen Zusammenhang an die Stelle wirksamer unwirksamer Funken treten. Bei einiger Uebung kann man aus dem Anblick und dem Geräusch der Funken auf ihre Fähigkeit, Nebenfunken zu erregen, schliessen. Die wirksamen Funken sind weissglänzend, schwach gezackt und von scharfem Knall begleitet. Dass der Funke im Entlader eine wesentliche Bedingung für den Nebenfunken ist, zeigt man leicht, indem man die Entladungskugeln so weit auseinander zieht, dass die Schlagweite des Inductoriums überschritten wird, es hört dann jede Spur von Nebenfunken auf, obwohl die Spannungen, welche auftreten, grösser sind als vorher.

Die Länge des Mikrometerkreises hat naturgemäss einen grossen Einfluss auf die Länge der Funken in ihm. Je grösser diese Länge, je grösser wird ja die Verzögerung, welche die eintreffende elektrische Welle zwischen ihrem Auftreten an der

einen Kugel des Mikrometers und an der anderen erleidet. Nimmt man die Länge des Nebenschlusses sehr klein, so werden die Nebenfunklen ausserordentlich kurz, aber man kann kaum einen Kreis herstellen, in dem nicht unter günstigen Umständen sich noch Funken zeigten. Feilt man die Enden eines dicken Kupferdrahtes von 4—6 cm Länge spitz, biegt ihn zu einem fast geschlossenen Kreise zusammen, isolirt ihn und berührt nunmehr mit diesem kleinen Drahtkreis den Entlader, so begleitet im allgemeinen ein minimaler Funkenstrom zwischen seinen Spitzen die Entladungen des Inductoriums. Sehr geringen Einfluss auf die Länge der Nebenfunklen hat die Dicke und das Material, also der Widerstand des Nebenschlusses. Mit Recht lehnten wir es demnach ab, den Widerstand für die auftretenden Potentialdifferenzen verantwortlich zu machen. Und es kann uns nicht wundern nach unserer Auffassung der Erscheinung, dass der Widerstand fast gar nicht in Betracht kommt, da ja die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer elektrischen Welle in einem Drahte in erster Linie lediglich von dessen Capacität und Selbstinduction, nicht aber von seinem Widerstande abhängt. Ebenfalls ohne wesentlichen Einfluss ist die Länge des Verbindungsdrahtes zwischen dem Neben- und dem Hauptkreise, sobald dieselbe nicht viele Meter übersteigt. Man muss annehmen, dass sich die aus dem Hauptkreise stammende elektrische Erschütterung ohne wesentliche Abmilderung durch ihn hindurch fortpflanzt.

Sehr bemerkenswerthen Einfluss hat hingegen die Lage der Zuleitungsstelle zum Nebenschluss auf die Länge der Funken in ihm. Man darf das erwarten, wenn unsere Deutung der Erscheinung überhaupt richtig ist. Denn wenn man die Zuleitungsstelle so legt, dass die Wege von ihr bis zu den beiden Kugeln des Mikrometers gleich werden, so wird jede durch den Zuleitungsdraht ankommende Aenderung mit gleicher Phase in beiden Kugeln ankommen, eine Potentialdifferenz zwischen ihnen kann nicht auftreten. Diese Vermuthung bestätigt der Versuch. Entfernen wir nämlich die Zuleitungsstelle zum Nebenschluss, welche wir uns bisher an der einen Mikrometerkugel dachten, mehr und mehr von dieser, so nimmt die Funkenlänge ab, an einer gewissen Stelle erlöschen die Funken völlig oder fast völlig; sie wachsen alsdann wieder in dem Maasse, als sich die Zuleitungsstelle der zweiten

Mikrometerkugel nähert, und erreichen an dieser die gleiche Länge, wie an der ersten. Der Punkt, an welchem das Minimum der Funkenlänge eintritt, mag der Indifferenzpunkt genannt werden. Er kann meist bis auf wenige Centimeter bestimmt werden. Es zeigt sich, dass er die Drahtlänge zwischen den beiden Mikrometerkugeln stets nahezu halbirt. Ist die Leitung symmetrisch rechts und links von der Verbindungslinie zwischen Mikrometer und Indifferenzpunkt, so findet stets völliges Auslösen der Funken statt. Die Erscheinung kann schon an ganz kurzen Nebenschlüssen beobachtet werden, Fig. 7 zeigt eine zweckmässige Anordnung des Versuches. *abcd* ist ein auf Siegellackstützen¹⁾ isolirtes Rechteck von blankem Kupferdraht von 2 mm Durchmesser; es war in meinen Versuchen 80 cm breit, 125 cm lang. Wird der Zuleitungsdraht an den Kugeln 1 und 2 oder auch bei *a* und *b* angebracht, so treten 3—4 mm lange Funken zwischen 1 und 2 auf; es sind überhaupt keine Funken zu erlangen bei Zuleitung zum Punkte *e*, wie in der Figur; eine Verschiebung der Zuleitungsstelle von wenigen Centimetern nach rechts oder links lässt Funken im Mikrometer auftreten. Es ist zu bemerken, dass wir schon Funken von wenigen Hundertsteln Millimetern Länge als wahrnehmbar rechnen.

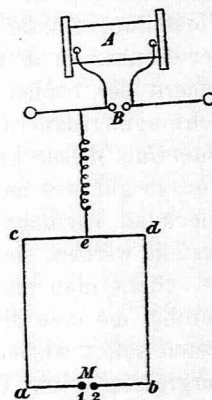


Fig. 7.

Der folgende Versuch zeigt, dass die Vorstellung über den Verlauf des Vorganges noch eine Unvollständigkeit in sich schliessen muss. Befestigt man nämlich, nachdem die Zuleitung auf Verschwinden der Funken eingestellt ist, an die eine Mikrometerkugel noch eine weiterführende Leitung, so treten wieder lebhaftere Funken auf. Das gleichzeitige Eintreffen der von *e* ausgehenden Welle in 1 und 2 kann durch diese weiterführende Leitung nicht geändert werden. Indessen sieht man leicht, wie auch dieser Versuch sich erklärt. Es wird nämlich mit dem einmaligen Anlauf der Wellen gegen *a* und *b* sein Bewenden nicht haben, sondern dieselben werden reflectirt den Nebenschluss

¹⁾ [Siehe Anmerkung 2 am Schluss des Buches].

mehrere, vielleicht viele mal durchlaufen und so zu stehenden Schwingungen in demselben Anlass geben. Sind die Wege $eca1$ und $edb2$ gleich, so werden auch die reflectirten Wellen gleichzeitig in 1 und 2 eintreffen. Fehlen aber die von einer der Kugeln reflectirten Wellen, wie in dem letzten Versuche, so wird zwar nicht die erste von e kommende Erschütterung, wohl aber werden die reflectirten Wellen zu Funken Anlass geben. Wir würden uns also vorzustellen haben, dass die in e anlangende plötzliche Aenderung die Eigenschwingungen des Nebenschleifens anrege, etwa wie der Schlag eines Hammers die Eigenschwingungen eines elastischen Stabes entstehen lässt. Ist diese Vorstellung richtig, so muss die Bedingung für das Verschwinden der Funken in M wesentlich diese sein, dass die Schwingungsdauern der beiden Strecken $e1$ und $e2$ gleich werden. Diese Schwingungsdauern sind bestimmt durch das Product des Selbstpotentials dieser Leiterstücke in die Capacität ihrer Enden, sie sind so gut wie unabhängig vom Widerstande der Zweige. Die folgenden Versuche können zur Prüfung dieser Ueberlegung angestellt werden, sie zeigen sich im Einklange mit derselben.

Stellt man die Zuleitung auf den Indifferenzpunkt ein und berührt die eine Mikrometerkugel mit einem isolirten Leiter, so treten sofort wieder Funken auf, da die Capacität des Zweiges vergrößert wird. Schon eine isolirte Kugel von 2—4 cm Durchmesser genügt. Je grösser indessen die hinzugefügte Capacität ist, desto lebhafter werden die Funken. Ein Berühren im Indifferenzpunkte e hat keinen Einfluss, da er beide Zweige gleichmässig trifft. Die Wirkung der Hinzufügung einer Capacität in den einen Zweig wird aufgehoben durch Hinzufügen der gleichen Capacität in den anderen Zweig. Sie kann auch compensirt werden durch Verschiebung des Zuleitungsdrahtes gegen den belasteten Zweig hin, d. h. durch Verminderung der Selbstinduction desselben. Aehnlich wie die Hinzufügung einer Capacität wirkt die Vergrößerung des Selbstpotentials. Schneidet man den einen Zweig auf und fügt einige Centimeter oder Decimeter aufgerollten Kupferdrahtes ein, so treten die Funken wieder auf. Die vorgenommene Aenderung kann compensirt werden durch Einschaltung der gleichen Länge Kupferdraht in den anderen Zweig oder durch Verschiebung des Kupferdrahtes gegen den geänderten Zweig hin oder durch Hinzufügung einer

passenden Capacität an den anderen Zweig. Indessen muss bemerkt werden, dass, wenn die beiden Zweige ungleichartig waren, im allgemeinen nur noch ein Minimum der Funkenlänge, nicht ein völliges Erlöschen erreicht werden konnte.

Sehr kleinen Einfluss hatte der Widerstand der Zweige auf die Erscheinung. Wurden in dem einen Zweige an Stelle des dicken Kupferdrahtes sehr viel dünnere Kupferdrähte oder Neusilberdrähte gesetzt, so war dadurch das Gleichgewicht der Zweige nicht gestört, obwohl der eine Zweig den hundertfachen Widerstand des anderen hatte. Sehr grosse Flüssigkeitswiderstände freilich machten eine Einstellung auf Funkenlosigkeit unmöglich, und den gleichen Einfluss hatten kurze Luftstrecken, welche in einen der Zweige eingeschaltet wurden.

Das Selbstpotential von Eisendrähnen ist für langsam sich ändernde Ströme etwa 8—10mal grösser als dasjenige gleich langer und gleich dicker Kupferdrähte. Ich vermuthete deshalb, dass kurze Eisendrähte langen Kupferdrähnen das Gleichgewicht halten würden. Diese Vermuthung fand sich nicht bestätigt, sondern es blieb Gleichgewicht zwischen den Zweigen erhalten, wenn der eine Kupferdraht durch einen gleich langen Eisendraht ersetzt wurde. Ist überhaupt die bisherige Vorstellung von dem beobachteten Phänomen richtig, so lässt sich nur so deuten, dass der Magnetismus des Eisens so schnellen Schwingungen, wie sie hier vorliegen, überhaupt nicht zu folgen vermag und daher ausser Wirksamkeit bleibt. Ein weiter unten zu erwähnender Versuch scheint das Gleiche zu erweisen.

Inductionswirkungen ungeschlossener Ströme.

Die in den vorigen Versuchen auftretenden Funken verdanken ihr Entstehen unserer Vermuthung nach der Selbstinduction. Bedenkt man aber, dass die fragliche Inductionswirkung nur von äusserst schwachen Strömen in kurzen geraden Leitern herrührt, so erscheint der Zweifel wohl gerechtfertigt, ob dieselbe wirklich eine ausreichende Erklärung der Funken gebe. Um diesen Zweifel zu beseitigen, versuchte ich, ob die beobachteten elektrischen Bewegungen nicht auch in benachbarten Leitungen Wirkungen von entsprechender Grösse äusserten. Ich bog deshalb aus Kupferdraht rechteckige Schliessungsbogen

von 10—20 cm Seitenlänge, welche nur eine ganz kurze Funkenstrecke einschlossen. Dieselben wurden isolirt den geraden Leitern, in welchen die elektrischen Bewegungen stattfanden, genähert, und zwar so, dass eine Seite des Rechteckes parallel dem Leiter war. Es zeigte sich bei hinreichender Annäherung stets in dem genäherten Leiter ein Funkenstrom, welcher die Entladungen des Inductoriums begleitete. Am lebhaftesten fielen diese inducirten Funken aus in der Nähe des Entladers, aber auch an der Zuleitung zur Nebenschliessung, sowie an den Zweigen dieser letzteren liessen sie sich wahrnehmen. Sorgfältig wurde constatirt, dass zwischen der inducirenden und inducirten Leitung keine Entladung überging, auch wurde dies durch eingeschobene feste Isolatoren noch besonders verhindert. Hier ist nun ein Irrthum in der Auffassung der Erscheinung kaum möglich. Dass freilich die Induction zwischen zwei einfachen kurzen Drahtlängen, in denen sich nur kleine Elektrizitätsmengen bewegen, sich dennoch bis zur Funkenbildung steigern könne, deutet von neuem auf die ausserordentliche Kürze der Zeit, in welcher jene kleinen Elektrizitätsmengen in den Leitungen hin und her passiren müssen.

Um die Erscheinungen näher zu studiren, wurde das früher als Nebenschliessung benutzte Rechteck nochmals, und zwar als inducirte Leitung benutzt. Wie Fig. 8 andeutet, wurde längs der kurzen Seite desselben in 3 cm Entfernung ein zweiter Kupferdraht gh ausgespannt, welche mit einem beliebigen Punkte des Entladers in Verbindung stand. Solange das Ende h des Drahtes gh frei mündete, traten nur ganz schwache Fünkchen im Mikrometer M auf, welche den Entladungsströmen des Drahtes gh ihr Dasein verdankten. Wurde aber alsdann an h ein isolirter Conductor C — der abgetrennte Conductor einer

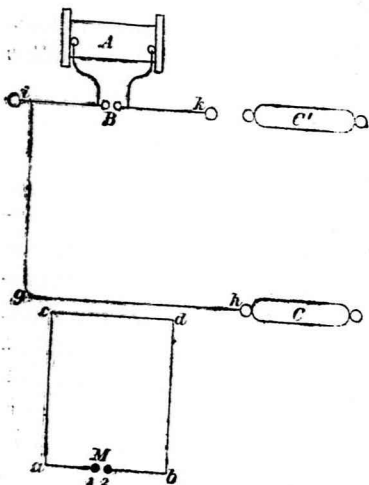


Fig. 8.

Elektrisirmaschine — angehängt, sodass grössere Elektrizitätsmengen den Draht zu passiren hatten, so traten Funken im Mikrometer auf, welche ein bis zwei Millimeter an Länge erreichten. Ein elektrostatischer Einfluss des Conductors war nicht die Ursache, denn wurde derselbe in g statt in h angehängt, so war er ohne Wirkung. Es war auch nicht der Ladungsstrom des Conductors, sondern allein die durch den Funken veranlasste plötzliche Entladung, welche wirkte. Denn wurden die Kugeln des Entladers so weit auseinander gezogen, dass in ihm kein Funke mehr überging, so blieb auch der inducirte Kreis völlig funkenlos. Nicht jede Art von Funken veranlasste eine hinreichend wirksame Entladung, nur diejenigen Funken, welche vorher zu kräftigen Nebenfunken Anlass gaben, zeigten sich hier zur Erregung der Inductionswirkung brauchbar. Im sekundären Kreis gingen die erregten Funken nicht nur zwischen den Kugeln des Mikrometers, sondern auch von diesen zu anderen isolirt genäherten Leitern über. Die Funken wurden merklich verkürzt durch Verbinden der Kugeln mit Conductoren von grösserer Capacität oder durch Berühren einer derselben mit der Hand; offenbar waren die in Bewegung gesetzten Elektrizitätsmengen zu klein, um Leiter von grösserer Capacität auf die volle Spannung zu laden. Hingegen wurden die Funken nicht wesentlich geschädigt durch eine Verbindung der beiden Mikrometerkugeln mittelst eines kurzen nassen Fadens. Physiologische Wirkungen des inducirten Stromes waren nicht wahrzunehmen, man konnte die sekundäre Leitung berühren oder durch den Körper schliessen, ohne eine Erschütterung zu empfinden.

Gewisse Nebenerscheinungen liessen mich vermuthen, dass die elektrische Bewegung in dem Draht gh deshalb so lebhaft inducirend wirkte, weil dieselbe nicht durch einen einfachen Entladungsstrom gebildet werde, sondern oscillatorischer Natur sei. Ich suchte deshalb, die Induction dadurch zu verstärken, dass ich die Bedingungen für das Zustandekommen kräftiger Oscillationen günstiger gestaltete. Insbesondere die folgende Versuchsanordnung entsprach meiner Absicht. Ich hängte wie vorher den Conductor C an die Leitung gh an und zog nun das Funkenmikrometer soweit auseinander, dass nur noch vereinzelte Funken übergingen. Ich hängte alsdann an den noch

freien Pol des Ansladers k (Fig. 8) einen zweiten, dem ersten ungefähr gleichen Conductor C' . Es ward dadurch der Funkenstrom wieder sehr lebhaft, und es konnten bei weiterem Auseinanderziehen des Mikrometers merklich längere Funken erhalten werden als vorher. Eine directe Einwirkung der Leitung ik kann nicht die Ursache sein, denn eine solche musste die Wirkung der Strombahn gh schwächen, und es muss also eine Einwirkung des Condensators C' auf den Entladungsstrom von C statthaben. Nehmen wir eine aperiodische Entladung des Conductors C an, so ist eine solche Einwirkung nicht verständlich. Sie wird aber verständlich, wenn wir die Annahme machen, der inducirende Strom in gh bestehe in einer elektrischen Schwingung, welche das eine Mal in dem System C — Draht gh — Entlader, das andere Mal in dem System C — Draht gh — Draht ik — C' stattfindet. Es ist klar, dass erstens das zweitgenannte System eine kräftigere Eigenschwingung besitzt, und zweitens, dass der Funke in ihm in geeigneter Lage zur Erregung der Schwingung angebracht ist.

Wir überlassen es dem Folgenden, unsere Auffassung weiter zu bestätigen. Schon jetzt dürfen wir indessen zu ihren Gunsten den Umstand anführen, dass sie eine genauere Darlegung der Rolle zu geben gestattet, welche die Ruhmkorffentladung in dem Versuche spielt. Sind nämlich oscillatorische Bewegungen in der Leitung $C-C'$ für die Erzeugung einer kräftigen Inductionswirkung nöthig, so genügt es nicht, dass der Funke in dieser Leitung in ausserordentlich kurzer Zeit einsetze, sondern er muss auch den Widerstand der Leitung unter einen gewissen Werth hinunterbringen, und zu diesem Ende darf die Stromdichte vom ersten Augenblick an nicht unterhalb einer bestimmten Grenze liegen. Daher erhalten wir nur eine ausserordentlich schwache Inductionswirkung, wenn wir die Conductoren C und C' statt durch den Ruhmkorff durch eine Elektrisirmaschine¹⁾ auf entgegengesetztes Potential laden und sich entladen lassen; daher ist die Wirkung ebenfalls sehr schwach bei Anwendung eines kleinen Inductoriums oder bei Einschaltung einer zu langen Funkenstrecke; in allen diesen Fällen ist die Bewegung aperiodisch. Hingegen eine kräftige Ruhmkorffentladung führt Schwing-

¹⁾ [Siehe Anmerkung 3 am Schluss des Buches].

ungen und damit eine kräftige Wirkung nach aussen herbei, indem sie die folgenden Functionen übernimmt: Erstens lädt sie die Enden C und C' der Leitung bis zu einem hohen Potential, zweitens führt sie einen plötzlich einsetzenden Funken herbei, drittens hält sie nach Einleitung der Entladung den Widerstand der Luftstrecke auf einem so niedrigen Werth, dass Schwingungen entstehen können. Ist die Capacität der Leitungsenden sehr gross, sind es etwa die Belegungen einer Batterie, so vermag, wie wir wissen, der Entladungsstrom dieser Capacitäten selber den Widerstand der Funkenstrecke hinreichend herabzusetzen; bei kleinen Capacitäten aber muss diese Function von einer fremden Entladung übernommen werden, und aus diesem Grunde ist unter den Verhältnissen unserer Versuche die Ruhmkorffentladung als Erregerin der Schwingungen unentbehrlich.

Da in dem letztbesprochenen Versuch die inducirten Funken mehrere Millimeter Länge hatten, so zweifelte ich nicht, dass auch bei weit grösserem Abstand der wirkenden Drahttheile noch Funken sich würden erzielen lassen, und ich suchte deshalb einige Abänderungen des Versuchs, welche Interesse boten, herzustellen. Dem inducirenden Strom gab ich die Gestalt einer geraden Linie (Fig. 9). Seine Enden wurden durch die Conductoren C und C' gebildet. Dieselben hatten einen Abstand

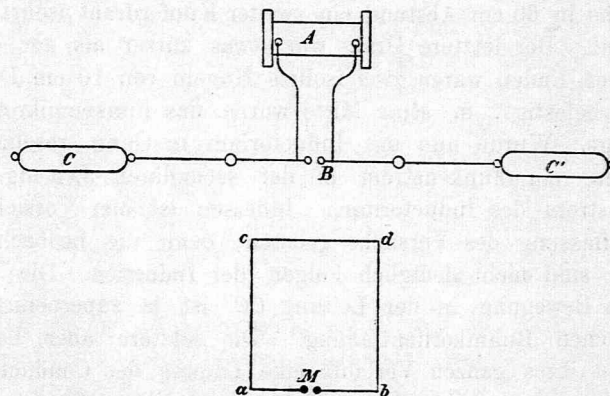


Fig. 9.

von 3 m und waren verbunden durch einen 2 mm dicken Kupferdraht, welcher in seine Mitte den Entlader des Inductoriums auf-

nahm. Der inducirte Strom war derselbe wie in den vorigen Versuchen, also 80 cm breit, 120 cm lang. Wurde nun die kürzeste Entfernung zwischen beiden Leitern gleich 50 cm gemacht, so waren noch inducirte Funken von 2 mm Länge zu erhalten; wurde die Entfernung grösser, so nahm die Funkenlänge schnell ab, doch war noch bei 1,5 m kürzester Entfernung ein regelmässiger Funkenstrom wahrnehmbar. Man konnte sich ohne Störung des Versuchs zwischen der inducirenden und der inducirten Leitung bewegen. Dass die beobachtete Erscheinung wirklich in der geradlinigen Strombahn ihre Ursache hatte, wurde durch einige Controlversuche wiederum bestätigt. Entfernte man die eine oder beide Hälften der geradlinigen Leitung, so hörten die Funken im Mikrometer auf, wenn auch das Inductorium weiter arbeitete. Ebenso hörten dieselben auf, wenn die Kugeln des Entladers bis zur Verhinderung der Funken in ihm auseinander gezogen wurden. Da hierbei die elektrostatischen Spannungen an den Enden der Conductoren C und C' nur wachsen, so beweist dies, dass diese Spannungen nicht die Ursache der Funken im Mikrometer sind.

Die inducirte Strombahn war bisher geschlossen, es lag aber nahe, zu vermuthen, dass in einer ungeschlossenen Strombahn die Induction sich nicht weniger würde geltend machen. Es wurde deshalb parallel dem geradlinigen Drahte des vorigen Versuchs in 60 cm Abstand ein zweiter Kupferdraht isolirt ausgespannt. Der letztere Draht war etwas kürzer als der erste, an seinen Enden waren zwei isolirte Kugeln von 10 cm Durchmesser befestigt, in seine Mitte wurde das Funkenmikrometer eingefügt. Wurde nun das Inductorium in Gang gesetzt, so begleitete ein Funkenstrom in der secundären Leitung den Funkenstrom des Inductoriums. Indessen ist hier Vorsicht in der Auffassung des Versuchs geboten, denn die beobachteten Funken sind nicht lediglich Folgen der Induction. Die alternirende Bewegung in der Leitung CC' ist ja superponirt der eigentlichen Ruhmkorffentladung. Die letztere aber bedingt während ihres ganzen Verlaufs eine Ladung des Conductors C in dem einen, des Conductors C' in dem anderen Sinne. Diese Ladungen hatten auf den geschlossenen Kreis der vorigen Versuche keinen Einfluss, in der gegenwärtigen unterbrochenen Leitung aber bedingen sie durch lediglich elektrostatische In-

fluenz entgegengesetzte Ladungen in den beiden Theilen der Leitung und damit Funken im Mikrometer. In der That, ziehen wir hier die Kugeln des Entladers bis zum Erlöschen der Funken in ihm auseinander, so bleiben im Mikrometer, wenn auch schwächere, Funken bestehen. Diese entsprechen der elektrostatischen Influenz, sie überdecken die Wirkung, welche wir allein darstellen wollen.

Es giebt indessen ein einfaches Mittel, die störenden Funken zu beseitigen. Dieselben fallen fort, wenn wir eine schlecht leitende Verbindung zwischen den Kugeln des Mikrometers herstellen, am einfachsten mit Hülfe eines nassen Fadens. Die Leitungsfähigkeit eines solchen reicht offenbar hin, um die Strömung den relativ langsamen Aenderungen der Ruhmkorffentladung folgen zu lassen, aber sie reicht, wie wir bereits sahen, nicht hin, um bei den äusserst geschwinden Oscillationen der geradlinigen Leitung den Ausgleich der Elektricitäten zu vermitteln. Erzeugen wir nach Anbringung des Fadens wiederum in der primären Leitung den Funken, so treten auch in der secundären Leitung wieder lebhaftere Funken auf, dieselben sind nun lediglich die Folgen der schnellen Schwingungen in der primären geradlinigen Leitung. Ich habe versucht, in welchem Abstand sich diese Wirkung noch würde geltend machen. Bei 1,2 m Abstand der parallelen Drähte waren die Funken noch recht merklich, die grösste senkrechte Entfernung, in welcher noch Funken regelmässig beobachtet werden konnten, betrug 3 m. Da die elektrostatische Einwirkung schneller mit der Entfernung abnimmt, als die Inductionswirkung, so war bei den grösseren Entfernungen die Complication des Versuchs durch die Zuhülfenahme des nassen Fadens überflüssig, auch ohne dieselbe hatten nur solche Entladungen, welche Schwingungen im primären Draht erregen, Funken in der secundären Leitung zur Folge.

Ich glaube, dass hier zum ersten mal die Wirkung geradliniger ungeschlossener Ströme aufeinander, welche in der Theorie eine so grosse Rolle spielt, thatsächlich in die Erscheinung gerufen ist.

Resonanzerscheinungen.

Das Vorhandensein sehr schnell sich ändernder Ströme von starker Inductionswirkung in den Leitern, welche mit dem Entladungskreise in Zusammenhang stehen, kann als durch die Versuche bewiesen angesehen werden. Das Vorhandensein regelmässiger Schwingungen indessen wurde nur angenommen, um verhältnissmässig wenige Erscheinungen zu erklären, von welchen sich vielleicht auch in anderer Weise Rechenschaft geben liesse. Es würde aber das Vorhandensein solcher Schwingungen, so schien mir, erwiesen werden, wenn es gelänge, resonanzartige Beziehungen zwischen den beiden aufeinander wirkenden Stromkreisen nachzuweisen. Ein regelmässig oscillirender Strom muss nach dem Princip der Resonanz unter übrigens ähnlichen Umständen eine viel grössere Inductionswirkung ausüben auf einen Stromkreis von gleicher Schwingungsdauer, als auf einen solchen von nur wenig abweichender Periode.¹⁾ Lässt man also zwei Stromkreise aufeinander wirken, von welchen man nahezu gleiche Schwingungsdauer voraussetzen darf, und ändert nun die Capacität oder das Selbstpotential und damit die Schwingungsdauer eines derselben continuirlich ab, so muss sich die Resonanz dadurch äussern, dass für bestimmte Werthe dieser Grössen die Inductionswirkung beträchtlich stärker ausfällt, als für die beiderseits benachbarten Werthe.

Nach diesem Principe wurden die folgenden Versuche angestellt, welche nach einigem Tasten vollständig der Absicht entsprechend verliefen. Die Versuchsanordnung ist nahezu die durch Fig. 9 dargestellte, nur waren jetzt für die Leitungen etwas andere Verhältnisse gewählt. Als primärer Stromträger diente ein 2,6 m langer, 5 mm starker, genau gerader Kupferdraht. In seiner Mitte war er durchschnitten, um die erregende Funkenstrecke aufzunehmen. Die beiden kleinen Kugeln, zwischen welchen die Entladung stattfand, waren unmittelbar auf den Draht aufgesetzt und mit den Polen des Inductoriums verbunden. An seinen Enden trug der Draht zwei Kugeln von 30 cm Durchmesser, von starkem Zinkblech gefertigt. Dieselben konnten auf dem Drahte verschoben werden. Da sie in elektrischem Sinne stets die Enden der Stromleitung bildeten, so konnte hierdurch

¹⁾ Vgl. Oberbeck, Wied. Ann. 26. p. 245. 1885.

der Strom leicht verkürzt und verlängert werden. Der secundäre Stromträger war so abgemessen, dass er der Vermuthung nach eine etwas kürzere Schwingungsdauer als der primäre hatte; er bestand aus Kupferdraht von 2 mm Durchmesser und hatte die Gestalt eines Quadrats von 75 cm Seitenlänge. Es wurde nun der kürzeste Abstand der beiden Leitungen gleich 30 cm gewählt und dem primären Strom zunächst seine volle Länge gelassen. Die Länge der grössten Funken im inducirten Kreise war unter diesen Umständen 0,9 mm. Berührte man die beiden Pole des Kreises mit zwei isolirten Metallkugeln von 8 cm Durchmesser, so stieg die Funkenlänge und konnte bei passender Annäherung der beiden Kugeln aneinander auf 2,5 mm gebracht werden. Wurden hingegen die beiden Pole mit zwei Conductoren von sehr grosser Oberfläche berührt, so sank die Funkenlänge auf einen kleinen Bruchtheil eines Millimeters herab. Ganz analoge Erscheinungen traten ein, wenn die Pole des secundären Kreises mit den Platten eines Kohlrausch'schen Condensators verbunden wurden. Bei grossem Abstand der Platten wirkte die Vermehrung der Capacität förderlich auf die Funkenlänge ein, wurden aber die Platten einander genähert, so nahm die Funkenlänge wieder bis zu sehr kleinen Werthen ab. Am bequemsten konnte die Capacität des secundären Kreises dadurch regulirt werden, dass über seine beiden Enden zwei parallele Stücke Draht gehängt wurden, deren Abstand und Länge geändert wurden. Bei sorgfältigem Reguliren stieg die Funkenlänge auf 3 mm und nahm dann ab, sowohl wenn die Drähte verlängert, als wenn sie verkürzt wurden. Dass Vermehrung der Capacität die Funkenlänge vermindert, erscheint als das Natürliche, dass sie dieselbe vermehrt, dürfte schwer anders als durch Resonanz zu erklären sein.

Waren die vorigen Versuche richtig gedeutet, so hatte der secundäre Stromkreis ohne hinzugefügte Capacität eine etwas kürzere Periode als der primäre. Es musste daher auch Resonanz eintreten, wenn die Schwingungen des primären beschleunigt wurden. In der That, als ich in der vorhin angedeuteten Weise die Länge des primären Kreises verringerte, wuchs die Funkenlänge, sie erreichte ein Maximum von wiederum 3 mm, wenn die Entfernung der Mittelpunkte der Endkugeln etwa 1,5 m betrug, und nahm wieder ab bei weiterer Annäherung der Kugeln.

Man könnte glauben, dass nun die Funkenlänge sich noch weiter würde steigern lassen, wenn wieder, wie vorhin, die Capacität des secundären Kreises vermehrt würde. Das ist nicht der Fall, das Anhängen derselben Drähte, welche vorhin die Funkenlänge vermehrten, setzt dieselbe jetzt auf etwa 1 mm herunter. Es stimmt dies mit unserer Auffassung der Erscheinung; was vorhin die Gleichheit der Schwingungsdauern herbeiführte, zerstört jetzt die auf anderem Wege erreichte Gleichheit. Am beweiskräftigsten erschien der Versuch, wenn er in folgender Weise angestellt wurde: Das Funkenmikrometer war auf eine feste Funkenlänge von 2 mm eingestellt. War alsdann der secundäre Kreis in seiner ursprünglichen Verfassung, und der primäre Kreis 1,5 m lang, so gingen die Funken regelmässig über. Die Funken erloschen vollständig, wenn dem secundären Kreis in erwähnter Weise eine kleine Capacität hinzugefügt wurde; sie traten wieder auf, wenn alsdann der primäre Strom auf 2,6 m Länge gebracht wurde; sie erloschen zum zweiten mal, wenn die dem secundären Kreis hinzugefügte Capacität verdoppelt wurde, und sie konnten zum nochmaligen Auftreten und Verschwinden durch fortgesetzte Vermehrung der Capacität des verlängerten primären Stromes gebracht werden. Der Versuch zeigt recht deutlich, dass nicht in den Verhältnissen einer der beiden Strombahnen, sondern in der Harmonie derselben das Moment zu suchen ist, welches eine kräftige Wirkung bedingt.

Die Länge der inducirten Funken stieg bei grösserer Annäherung der beiden Leitungen beträchtlich über die bisher genannten Werthe hinaus. Bei einer Entfernung von 7 cm zwischen beiden Kreisen und Einstellung auf genaue Resonanz gelang es, inducirte Funken von 7 mm Länge zu erhalten, dabei waren dann die im inducirten Leiter auftretenden elektromotorischen Kräfte fast ebenso gross, wie die im inducirenden.

In den bisherigen Versuchen wurde die Resonanz hergestellt durch Aenderung des Selbstpotentials und der Capacität des primären Kreises, sowie der Capacität des secundären Kreises. Die folgenden Versuche zeigen, dass die Aenderung der Selbstinduction des secundären Kreises ebenfalls benutzt werden kann. Es wurde eine Reihe von Rechtecken $abcd$ (Fig. 9) hergestellt, in welchen den Seiten ab und cd ihre Längen gelassen wurden, in welchen aber für ac und bd immer längere Drähte, von

10 cm anfangend bis zu 250 cm, eingeschaltet wurden. Es zeigte sich ein ausgesprochenes Maximum der Funkenlänge für eine Länge des Rechtecks von 1,8 m. Um einen Anhalt für die Beurtheilung der quantitativen Verhältnisse zu geben, habe ich bei verschiedenen Längen des inducirten Kreises die grössten Funken, welche auftraten, gemessen. Fig. 10a veranschaulicht die Resultate.¹⁾ Als Abscissen sind die Gesamtlängen der inducirten Leitung, als Ordinaten die maximalen Funkenlängen aufgetragen. Die Punkte bezeichnen die einzelnen Beobachtungen. Eine grosse Unsicherheit wohnt diesen wie allen Messungen über Funkenlängen bei; diese Unsicherheit vermag das Hauptresultat nicht zu verdecken. Bei einer anderen Versuchsreihe wurde nicht allein die Länge der Seiten ab und cd , sondern auch ihr Abstand, welcher gleich 30 cm war, und ihre Lage constant erhalten, die Seiten ac und bd aber wurden aus Drähten von allmählich wachsender Länge, welche zu lockeren Spiralen gerollt waren, gebildet. Fig. 10b stellt die gewonnenen Resultate dar. Das Maximum fällt hier auf eine etwas grössere Drahtlänge als vorher. Man darf vermuthen, dass dies daher rühre, dass hier durch die Vermehrung der Länge nur das Selbstpotential, dort sowohl das Selbstpotential als die Capacität gesteigert wurde.

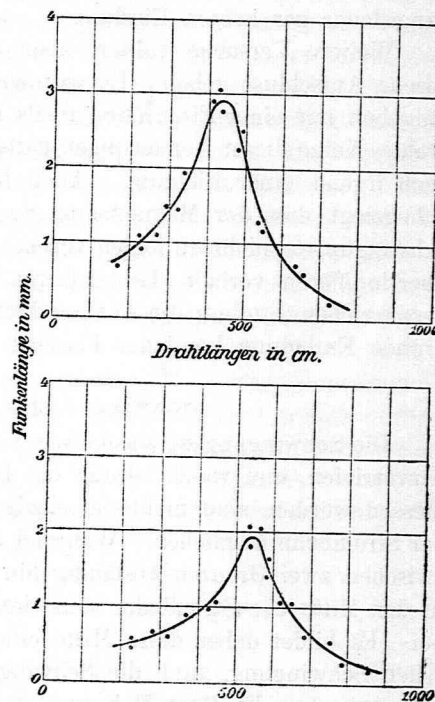


Fig. 10, a und b.

¹⁾ [Siehe Anmerkung 4 am Schluss des Buches].

Einige Versuche wurden angestellt, um zu erfahren, wie sich die Erscheinungen ändern würden durch Aenderung des Widerstandes der secundären Leitung. Es wurde in dieser Absicht der Draht cd des Rechtecks ersetzt durch verschiedene dünne Kupfer- und Neusilberdrähte, wodurch der Widerstand des secundären Kreises bis auf das Hundertfache gesteigert wurde. Auf die Funkenlänge hatte diese Aenderung einen sehr kleinen, auf das Eintreten der Resonanz, d. h. auf die Schwingungsdauer gar keinen Einfluss.

Weitere Versuche sollten über den Einfluss vorhandenen Eisens Aufschluss geben. Es wurde dabei der Draht cd theils umgeben mit einer Eisenröhre, theils ersetzt durch einen Eisendraht. Keine dieser Aenderungen hatte einen merklichen Einfluss nach irgend einer Richtung. Auch hier wird die Vermuthung nahegelegt, dass der Magnetismus des Eisens äusserst schnellen Schwingungen nicht zu folgen vermag und sich denselben gegenüber indifferent verhält. Leider liegen keine Erfahrungen darüber vor, welchen Einfluss die Anwesenheit des Eisens auf die oscillirende Entladung Leydener Flaschen hat.

Schwingungsknoten.

Die Schwingungen, welche wir in der inducirten Strombahn hervorriefen, und welche durch die Funken im Mikrometer gemessen werden, sind nicht die einzigen, aber die einfachsten in der Strombahn möglichen. Während an den Enden das Potential zwischen zwei Grenzen beständig hin und her oscillirt, behält es in der Mitte der Strombahn stets den gleichen mittleren Werth bei. Es bildet daher diese Mitte einen Knotenpunkt der elektrischen Schwingung, und die Schwingung hat nur diesen einen Knotenpunkt. Es lässt sich nun das Vorhandensein desselben auch experimentell nachweisen, und zwar auf zweierlei Weisen. Einmal kann dies geschehen, indem man eine isolirte kleine Kugel der Drahtleitung nähert. Der mittlere Werth des Potentials der kleinen Kugel kann von dem des benachbarten Drahtstückes nicht merklich verschieden sein, Funken zwischen der Kugel und dem Draht können daher nur darin ihren Ursprung haben, dass das Potential des benachbarten Punktes der Leitung hinreichend grosse Oscillationen um den Mittelwerth ausführt. Die Funken müssen daher lebhaft auftreten an den Enden der Leitung, sie müssen

ausbleiben hingegen in der Nähe des Knotenpunktes. Und so verhält es sich in der That, nur tritt freilich ein völliges Ausbleiben der Funken bei Berührung des Knotenpunktes nicht ein, sondern nur eine Herabminderung auf einen minimalen Werth. Die zweite Art, den Knotenpunkt nachzuweisen, ist deutlicher. Man regulirt den inducirten Kreis auf Resonanz mit dem inducirenden und stellt das Funkenmikrometer auf eine Funkenlänge, welche ohne Wirkung der Resonanz nicht mehr erreicht werden kann. Berührt man nun mit einem Conductor von einiger Capacität irgend einen Punkt der Leitung, so ist zu erwarten, dass dadurch im allgemeinen die Resonanz gestört werde, und die Funken erlöschen, nur eine Berührung im Knotenpunkt kann die Schwingungsdauer nicht beeinträchtigen. In der That entspricht dem der Erfolg des Versuchs. Die Mitte des Drahtes cd kann man mit einer isolirten Kugel oder mit der Hand berühren oder sie sogar metallisch mit der Gasleitung verbinden, ohne dass am Funken eine Aenderung sich zeigte, die gleichen Eingriffe an den Seitenzweigen oder den Polen ausgeführt, haben Erlöschen der Funken zur Folge.

Nachdem so die Möglichkeit dargethan war, experimentell einen Knotenpunkt nachzuweisen, schien mir der Versuch lohnend, eine inducirte Schwingung mit zwei Knotenpunkten herzustellen. Ich verfuhr dabei in folgender Weise. Der gerade inducirende Strom CC' und der rechteckige inducirte $abcd$ wurden aufgestellt wie in den früheren Versuchen und auf Resonanz gebracht. Es wurde alsdann dem Rechteck $abcd$ ein genau gleiches $efgh$ in der Weise, wie Fig. 11 es andeutet, gegenübergestellt und die benachbarten Pole beider verbunden, also 1 mit 3 und 2 mit 4 (Fig. 11). Das ganze System bildet einen metallisch geschlos-

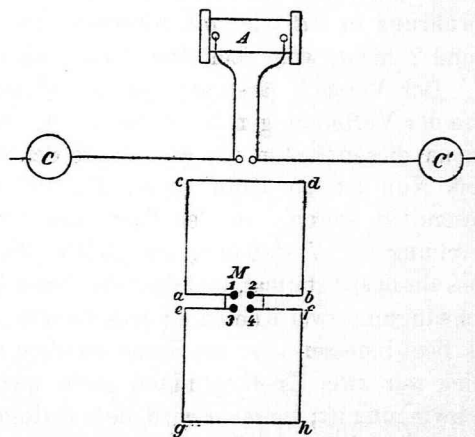


Fig. 11.

senen Stromkreis, und die tiefste oder Grundschwingung, welche in ihm möglich ist, hat zwei Knotenpunkte. Da die Periode dieser Schwingung mit der Periode jeder der beiden Hälften und so mit der Periode des primären Leiters nahe übereinstimmen muss, so war die Vermuthung, dass sich Schwingungen ausbilden würden, welche in den Verbindungsstellen 1, 3 und 2, 4 zwei Bäuche, in den Mitten von cd und gh aber zwei Knotenpunkte haben würden. Gemessen wurden diese Schwingungen immer noch durch die Funkenlänge zwischen den Polen 1 und 2, welche durch die Kugeln des Mikrometers gebildet waren. Die Resultate des Versuches waren die folgenden: Zunächst zeigte sich gegen die Erwartung, dass durch Anhängen des Rechtecks $efgh$ die Schlagweite zwischen 1 und 2 bedeutend vermindert wurde. Von etwa 3 mm sank sie auf 1 mm herab. Aber gleichwohl zeigte sich, dass immer noch eine Resonanz zwischen dem primären Kreise und dem secundären stattfand. Denn jene Aenderung an $efgh$ setzte die Funkenlänge noch weiter herunter, mochte die Aenderung in einer Verlängerung oder in einer Verkürzung des Rechtecks bestehen. Ferner ergab sich, dass wirklich die beiden Knotenpunkte, welche erwartet wurden, vorhanden waren. Aus cd und gh wurden nur weit schwächere Funken, als aus ae und bf gegen eine genäherte Kugel erhalten. Und es liess sich auch nachweisen, dass diese Knotenpunkte eben derjenigen Schwingung angehörten, welche durch Resonanz verstärkt den Funken 1—2 lieferte. Denn eine Berührung in cd oder gh schädigte die Funkenlänge zwischen 1 und 2 nicht, wohl aber eine Berührung an jeder anderen Stelle.

Der Versuch lässt sich in der Weise abändern, dass man eine der Verbindungen 1—3 oder 2—4, etwa die letztere aufhebt. Da an diesen Stellen für die erregte Schwingung die Stromstärke stets Null ist, so kann dieser Eingriff die Schwingung nicht wesentlich stören. In der That lässt sich auch nach Unterbrechung der Verbindung auf gleiche Weise wie vorher zeigen, dass Resonanz statthat, und dass die dieser Resonanz entsprechende Schwingung zwei Knoten an denselben Stellen wie vorher besitzt. Es liegt indessen jetzt die Sache insofern anders, als die Schwingung mit zwei Knotenpunkten nicht mehr die tiefste mögliche Schwingung ist; vielmehr wird die Schwingung mit grösster Periode eine solche sein, welche nur einen Knotenpunkt zwischen a und

e besitzt, und für welche die grössten Spannungen an den Polen 2 und 4 auftreten. Nähert man nun die an diesen Polen befindlichen Kugeln einander, so findet man, dass auch zwischen ihnen eine schwache Funkenbildung statthat, und man wird vermuthen, dass diese Funken einer wenn auch schwachen Erregung der Grundschwingung zuzuschreiben sind. Diese Vermuthung kann durch die folgende Weiterführung des Versuches fast zur Gewissheit erhoben werden. Wir unterbrechen den Funken zwischen 1 und 2 und richten unsere Aufmerksamkeit auf die Länge des Funkens zwischen 2 und 4, welcher die Intensität der Grundschwingung misst. Wir vermehren nun die Schwingungsdauer des primären Stromleiters durch Ausziehen auf die volle Länge und Hinzufügen von Capacität. Wir finden, dass dabei die beobachteten Funken bis zu einer Maximallänge von einigen Millimetern wachsen, um alsdann wieder abzunehmen. Sie haben offenbar ihren grössten Werth dann, wenn die Schwingung des primären Stromes mit der Grundschwingung übereinstimmend geworden ist. Und es lässt sich, während die Funken zwischen 2 und 4 ihre grösste Länge haben, leicht zeigen, dass diesen Funken nunmehr nur ein Knotenpunkt entspricht. Denn nur zwischen a und e kann die Leitung ohne Schädigung des Funkens berührt werden, während die Berührung der vorherigen Knotenpunkte den Funkenstrom unterbricht. Auf diese Weise ist es also möglich, in demselben Leiter einmal vorzugsweise die Grundschwingung, das andere mal vorzugsweise die erste Oberschwingung zu erregen.

Die Frage, ob es möglich sei, auch Schwingungen mit mehreren Knoten nachzuweisen, habe ich einstweilen so wenig wie eine Reihe weiterer Fragen zu beantworten gesucht. Da schon die bisherigen Resultate nur bei genauer Aufmerksamkeit auf geringfügige Aenderungen zu erhalten waren, so schien es mir nicht wahrscheinlich, dass die Antwort auf weitergehende Fragen unzweideutig ausfallen würde. Die sich darbietenden Schwierigkeiten liegen sowohl in der Natur der Beobachtungsmethode, als auch in der Natur der beobachteten elektrischen Bewegungen. Wenn sich die letzteren auch unzweideutig als Schwingungen offenbarten, so tragen sie doch auf der anderen Seite den Charakter wenig regelmässiger Schwingungen zur Schau. Ihre Intensität wechselt von Entladung zu Entladung beträchtlich, das verhält-

nismässig geringe Hervortreten der Resonanz lässt auf eine starke Dämpfung schliessen; manche Nebenerscheinungen deuten an, dass sich den regelmässigen Schwingungen unregelmässige Bewegungen überlagern, wie dies auch in den complicirten Leitersystemen nicht anders zu erwarten ist. Wollen wir unsere Schwingungen in Bezug auf ihre mathematischen Verhältnisse mit einer besonderen Form akustischer Schwingungen vergleichen, so dürfen wir nicht die in gleichmässiger Stärke lang andauernden harmonischen Schwingungen von Stimmgabeln oder Saiten wählen, sondern etwa die schnell verklingenden, mit unregelmässigen Bewegungen vermischten Schwingungen, welche hölzerne Stäbe beim Anschlag mit einem Hammer ergeben.¹⁾ Auch in der Akustik müssen wir uns mit Andeutungen der Resonanz, der Knotenbildung u. s. w. begnügen, sobald es sich um Schwingungen der letztgenannten Art handelt.

Um eine Wiederholung der Versuche mit gleichem Erfolge zu ermöglichen, muss ich noch eine Bemerkung hinzufügen, deren Bedeutung zunächst nicht klar erscheinen dürfte. Bei allen beschriebenen Versuchen war die Aufstellung der Apparate eine solche, dass der Funke des Inductoriums vom Ort des Funkens im Mikrometer aus sichtbar war. Aendert man diese Bedingung ab, so erhält man wohl qualitativ die gleichen Erscheinungen, aber die Funkenlängen erscheinen vermindert. Ich habe dieser Erscheinung eine besondere Untersuchung gewidmet, welche ich getrennt von der vorliegenden zu veröffentlichen beabsichtige.²⁾

Zur Theorie.

Es wäre in hohem Maasse wünschenswerth, auf experimentellem Wege Aufschluss über die quantitativen Verhältnisse der Schwingungen zu erhalten. Da sich jedoch hierfür einstweilen ein Weg nicht zeigt, so rufen wir die Theorie an, um wenigstens einen Anhalt für diese Verhältnisse zu gewinnen. Die Theorie der elektrischen Schwingungen, welche durch Sir W. Thomson v. Helmholtz und Kirchhoff entwickelt worden ist, hat sich bewährt sowohl für die Oscillationen offener Inductionsapparate,

¹⁾ [Siehe Anmerkung 5 am Schluss des Buches.]

²⁾ [Siehe die No. 4].

als für die oscillirende Flaschenentladung;¹⁾ wir dürfen daher überzeugt sein, dass sie auch in ihrer Anwendung auf die vorliegenden Erscheinungen wenigstens der Ordnung nach richtige Resultate ergeben wird.

Als das wichtigste Element erscheint zunächst die Schwingungsdauer. Als ein Beispiel, welches der Rechnung zugänglich ist, bestimmen wir die (einfache oder halbe) Schwingungsdauer T , welche dem von uns zu den Resonanzversuchen benutzten primären Leiter eigenthümlich war. Mit P sei bezeichnet der Selbstinductionscoefficient dieses Leiters in magnetischem Maass, in Centimetern gemessen; mit C die Capacität eines Endes desselben, in elektrostatischem Maass, also ebenfalls in Centimetern gemessen; endlich mit A die Geschwindigkeit des Lichtes in Centimetern/Secunde. Es ist alsdann, wenn der Widerstand als klein vorausgesetzt ist, $T = \pi \sqrt{PC} / A$. In unserem Versuche bestand die Capacität der Leitungsenden zum grössten Theil in derjenigen der daselbst angebrachten Kugeln, wir werden keinen wesentlichen Fehler begehen, wenn wir für C den Radius dieser Kugeln oder $C = 15$ cm setzen.²⁾ Was das Selbstpotential P anlangt, so war es dasjenige eines geraden Drahtes, dessen Durchmesser $d = 1/2$ cm, und dessen Länge $L = 150$ cm für den Fall der Resonanz war. Nach der Neumann'schen Formel $P = \iint \cos \epsilon / r ds ds'$ berechnet, wird für einen solchen Draht $P = 2L \left\{ \log \text{nat} (4L/d) - 0.75 \right\}$ und hiernach für unseren Versuch $P = 1902$ cm.

Allerdings steht es bekanntlich durchaus nicht fest, ob für ungeschlossene Ströme die Neumann'sche Formel dürfe angewandt werden; vielmehr schliesst die allgemeinste, mit den bisherigen Erfahrungen verträgliche Formel, wie sie durch v. Helmholtz³⁾ aufgestellt ist, noch eine unbekannte Constante k ein. Nach der allgemeinen Formel berechnet, wird für einen geradlinigen cylindrischen Draht von der Länge L und dem Durchmesser d : $P = 2L \left\{ \log \text{nat} (4L/d) - 0.75 + 1/2 (1 - k) \right\}$. Setzen wir darin $k = 1$, so kommen wir zum Neumann'schen Werthe,

¹⁾ Lorenz, Wied. Ann. 7. p. 161. 1879.

²⁾ [Siehe die Anmerkung 6 am Schlusse des Buches].

³⁾ v. Helmholtz, Abhandlungen 1. p. 567.

setzen wir $k=0$ oder $k=-1$, so erhalten wir diejenigen Werthe, welche den Theorien von Maxwell und von Weber entsprechen. Nehmen wir an, dass wenigstens einer dieser Werthe der richtige sei, und schliessen demnach die Annahme aus, dass k einen sehr grossen negativen oder positiven Werth besitze, so kommt uns wenig auf den wahren Werth von k an. Denn die mit den verschiedenen Werthen von k berechneten Potentiale unterscheiden sich um weniger als ein Sechstel ihrer Grösse, und wenn also das Potential $P=1902$ cm etwa nicht zu der Drahtlänge 150 cm gehört, so gehört es doch zu einer wenig davon verschiedenen Länge unseres primären Leiters. Aus den Werthen von P und C ergibt sich die Länge $\pi \sqrt{CP}$ zu 531 cm. Dies ist diejenige Strecke, welche das Licht während der Dauer einer Schwingung zurücklegt, es ist zugleich die Wellenlänge der elektrodynamischen Wellen, welche die Maxwell'sche Anschauung als Wirkung der Schwingungen nach aussen voraussetzt. Die Schwingungsdauer T selbst ergibt sich aus jener Länge gleich 1,77 Hundertmillionteln Secunde, und damit ist die Angabe gerechtfertigt, welche wir im Eingang über die Grössenordnung derselben machten.

Wenden wir jetzt unser Augenmerk dem wenigen zu, was die Theorie über die Dämpfungsverhältnisse der Schwingungen auszusagen vermag. Damit überhaupt in der ungeschlossenen Leitung Schwingungen möglich seien, muss der Widerstand derselben kleiner als $2A\sqrt{P/C}$ sein. Für unsere primäre Leitung ist $\sqrt{P/C}=11,25$; da nun die Geschwindigkeit A gleich 30 Erdquadrant/Secunde, also gleich 30 Ohm ist, so ist für unseren Versuch die zulässige Grenze für w gleich 676 Ohm. Es ist durchaus wahrscheinlich, dass der eigentliche Widerstand einer kräftigen Entladung unterhalb dieser Grenze liegt, und es wird sich also von Seiten der Theorie kein Widerspruch gegen die Annahme von Schwingungen erheben. Liegt der wirkliche Werth des Widerstandes einigermassen von jenem Grenzwert entfernt, so verhält sich die Amplitude einer Schwingung zur Amplitude einer unmittelbar folgenden wie $1 : e^{-(wT/2P)}$. Die Anzahl der Schwingungen, welche sich folgen bis zur Verminderung der Amplitude auf ihren 2,71. Theil ist demnach gleich $2P/wT$ oder gleich $2A\sqrt{P/C}\pi w$. Sie verhält sich also zu 1 wie der π . Theil des berechneten Grenzwertes zum wirklichen Werth

des Widerstandes oder wie 215 Ohm zu w . Leider ist uns über den wahren Werth des Widerstandes einer Funkenstrecke nicht einmal eine Schätzung möglich. Vielleicht dürfen wir als sicher betrachten, dass dieser Widerstand nicht weniger als einige Ohm betragen könne, da selbst der Widerstand starker Lichtbogen nicht unter derartige Werthe hinuntergeht. Daraus würde folgen, dass die Zahl der in Betracht kommenden Wellen nach Zehnern, nicht aber nach Hunderten oder Tausenden zu rechnen ist.¹⁾ Dies entspricht auch ganz dem Charakter der Erscheinungen, wie schon am Schlusse des vorigen Abschnittes angedeutet wurde. Es entspricht auch dem Verhalten der nächstverwandten Erscheinung, der oscillirenden Flaschenentladung, bei welcher wir ebenfalls nur eine recht beschränkte Zahl von Schwingungen in merklicher Stärke sich folgen sehen.

Anders als in dem bisher allein berücksichtigten primären Strome liegen die Verhältnisse im rein metallischen secundären Leiter. Hier würde nach der Theorie die erregte Bewegung erst nach Tausenden von Schwingungen zur Ruhe kommen. Es liegt kein Grund vor, an der Richtigkeit dieses Ergebnisses zu zweifeln, eine vollständigere Theorie würde freilich noch die Rückwirkung auf die primäre Leitung zu berücksichtigen haben und dabei vermuthlich auch für den secundären Kreis zu grössern Werthen der Dämpfung gelangen.

Zum Schluss werfen wir noch die Frage auf, ob die von uns beobachteten Inductionswirkungen der Schwingungen von der Ordnung derjenigen waren, welche die Theorie vermuthen lässt, oder ob sich hier etwa directe Widersprüche zwischen den Erscheinungen und unserer Deutung derselben offenbaren? Wir können die Frage durch folgende Ueberlegung erledigen. Zunächst bemerken wir, dass der Maximalwerth der elektromotorischen Kraft, welche die Schwingung in ihrer eigenen Strombahn inducirt, nahezu gleich sein muss der maximalen Spannungsdifferenz der Enden. Denn wenn die Schwingungen ungedämpft wären, würde sogar vollkommene Gleichheit zwischen beiden Grössen bestehen, da alsdann in jedem Augenblicke die Spannungsdifferenz der Enden und die elektromotorische Kraft der Induction sich das Gleichgewicht hielten. Nun ist in unseren Versuchen

¹⁾ [Siehe Anmerkung 7 am Schluss des Buches].

die Potentialdifferenz der Enden von solcher Grösse, dass ihr eine Schlagweite von etwa 7—8 mm entspricht, und eine derartige Schlagweite stellt also den Werth der grössten Inductionswirkung der Schwingung in ihrer eigenen Bahn dar. Wir bemerken zweitens, dass in jedem Augenblicke die im secundären Kreis inducirte elektromotorische Kraft sich zu der im primären Kreis inducirten verhält, wie das Potential p des primären Kreises auf den secundären zu dem Eigenpotential P des primären. Für unsere Resonanzversuche bietet eine angenäherte Berechnung von p nach bekannten Formeln keine Schwierigkeiten, es fand sich p in den verschiedenen Versuchen zwischen dem neunten und dem zwölften Theile von P liegend. Danach dürfen wir schliessen, dass die maximale elektromotorische Kraft, welche unsere Schwingung in dem secundären Kreise hervorruft, von solcher Stärke ausfallen werde, dass sie zu Funken von $\frac{1}{2}$ bis $\frac{2}{3}$ mm Länge Veranlassung giebt. Und somit lässt die Theorie auf der einen Seite unter allen Umständen sichtbare Funken im secundären Kreise erwarten, auf der anderen Seite aber sehen wir auch, dass wir für Funken von mehreren Millimetern Länge nur dann eine Erklärung geben können, wenn wir annehmen, dass mehrere aufeinander folgende Inductionswirkungen sich verstärken. Wir werden also auch von Seiten der Theorie dazu gedrängt, die von uns beobachteten Erscheinungen als Resonanzwirkungen anzusprechen.

Eine weitere Anwendung der Theorie auf die vorliegenden Erscheinungen dürfte erst dann nutzbringend sein, wenn es gelingen sollte, auf irgend eine Weise die Schwingungsdauern direct zu messen. Eine solche Messung würde mehr als eine Bestätigung der Theorie, sie würde eine Erweiterung derselben mit sich bringen. Die Absicht der vorliegenden Arbeit beschränkt sich darauf, zu zeigen, dass und auf welche Weise auch in kurzen metallischen Leitern die diesen Leitern eigenthümlichen Schwingungen erregt werden können.

3. Aus der Abhandlung Herrn W. von Bezold's: „Untersuchungen über die elektrische Entladung. Vorläufige Mittheilung.“

(Poggendorf's Annalen 140, p. 541. Berichte der Bayrischen Akad. d. Wissensch. 1870.)

Da wir denjenigen Theil der v. Bezold'schen Arbeiten, welcher uns hier allein angeht, aus dem Zusammenhang herausreissen müssen, so sei es gestattet, denselben durch wenige Worte einzuleiten.

Die Untersuchung v. Bezold's knüpft an die Beobachtung der Lichtenbergischen Staubfiguren an. Herr v. Bezold hatte bemerkt, dass unter gewissen Verhältnissen der Charakter der positiven und der negativen Figuren abgeändert und einander genähert erscheint, so sehr, dass z. B. die negativen Figuren auf den ersten Anblick für positive gehalten werden könnten. Die erste Abweichung vom normalen Charakter tritt stets in der Weise ein, dass im Mittelpunkte der negativen Figur eine kleine positive Figur, im Mittelpunkte der positiven eine kleine negative Figur erscheint. Es hatte sich ergeben, dass die complicirteren Figuren ihre Entstehung stets einem Funken verdanken, welcher einer alternirenden Entladung entsprach, während die einfachen Figuren durch einfache Entladungen hervorgebracht werden. In jeder zusammengesetzten Figur hat sich eine alternirende Entladung gewissermaassen selbst registriert; aus dem Anblick der Figur kann der alternirende Charakter der Entladung und der Sinn ihres ersten Ausschlages sogleich erkannt werden. Wir können also die Lichtenbergischen Figuren zur Untersuchung der Entladung verwenden.

v. Bezold erzeugte die Lichtenbergischen Figuren in folgender Weise: Eine gut isolirende horizontale Glastafel war auf

ihrer Unterseite mit Staniol belegt und diese Belegung zur Erde abgeleitet. Auf die Oberseite der Tafel war die Spitze einer vertikal gerichteten Stricknadel gestellt, welcher die Entladung zugeführt wurde. Hierauf wurde die Stricknadel entfernt, die Platte bestäubt und die entstehende Figur beobachtet. Wenn man diese Vorrichtung, welche als die Probetafel bezeichnet wird, unmittelbar in den Entladungskreis einer Leydener Flasche oder des Conductors einer Elektrisirmaschine einschaltet, so ist natürlich das Zustandekommen einer alternirenden Entladung, ja einer vollständigen Entladung überhaupt, von vornherein unmöglich gemacht. Man wird also die Probetafel nur in den Nebenschluss der eigentlichen zu untersuchenden Entladung einschalten dürfen.

Indem nun Herr v. Bezold diesen Weg einschlug und als Hauptentladung die Entladung des Conductors seiner Elektrisirmaschine zur Erde benutzte, stiess er sogleich auf sehr auffallende Erscheinungen. Positive Figuren erschienen da, wo negative zu erwarten waren, grosse da, wo man kleine vermuthet hatte, und umgekehrt. Das Ohm'sche Gesetz versagte völlig, es schien als habe die bewegte Elektrizität die Kraft, benachbarte Elektrizität mit sich fortzureissen, als könnten „bei elektrischen Strömungen ähnliche Erscheinungen auftreten, wie sie bei der Bewegung der Flüssigkeiten unter dem Namen von Saugphänomenen beobachtet sind.“ Dabei mussten freilich zunächst noch viele Einzelheiten unerörtert bleiben. Wir geben nunmehr das Wort an Herrn v. Bezold selbst ab:

„Diese eigenthümlichen Beobachtungen gaben die Veranlassung zu weiteren Versuchen über die Verzweigung elektrischer Entladungsströme.

Auch hier ergaben alternirende Entladungen constantere Resultate als einfache und es wurde deshalb stets für eine geeignete Rückleitung Sorge getragen. Dass ein einfacher Draht zu diesem Zwecke nicht brauchbar ist, beweisen die obigen Versuche, es wurden deshalb die Inductionsrollen des Ruhmkorff's R zur Rückleitung benutzt.

Wurde nun die Elektrisirmaschine Q langsam in Drehung versetzt, bis ein Funke bei F übersprang, so erschienen auf der Tafel bei A die zusammengesetzten positiven Figuren mit grosser Regelmässigkeit.

Wurde der Strom durch einen kurzen Draht D abgezweigt und der Zweigstrom ebenfalls durch einen Zuleiter B auf die Tafel geführt, so erschienen, wie zu erwarten war, zwei vollkommen gleiche Figuren. Hatte hingegen der Zweigdraht eine nur einigermaassen beträchtliche Länge

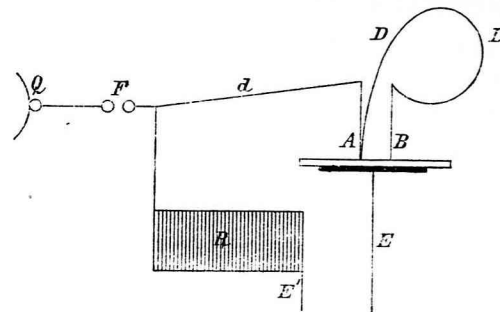


Fig. 12.

(etwas mehr als 1 Meter), so zeigten die Figuren bereits eine entschiedene Grössenverschiedenheit. Sobald nämlich die Länge des Drahtes diese Grenze überschritten hatte, war die Figur bei B immer grösser als jene bei A , selbst wenn man die Abzweigung ganz nahe am Ende des Zuleiters (1 cm über der Platte) vornahm. Bei Verlängerung des Zweigdrahtes D wurde auch die Grössendifferenz zwischen den beiden Figuren immer auffallender, bis sich endlich für $D = 6,4$ m und $F = 4,0$ mm (F ist die Länge der Funkenstrecke) die Figur bei A auf ein kleines Sternchen reducirte, manchmal wohl auch ganz ausblieb.

Dieser Versuch zeigt augenfällig, dass die Ohm'schen Gesetze nur für stationäre Strömungen, nicht aber für die elektrische Entladung gelten, wie es ja auch alle theoretischen Untersuchungen ergeben haben. Während nämlich durch den ganz kurzen Zweig A gar keine Elektrizität auf die Platte geht, schlägt sie, wenigstens scheinbar, den viel hundertmal längeren Weg durch den Draht D ein.

Verlängert man den Draht D noch mehr, so bleibt vorerst innerhalb ziemlich weiter Grenzen die Erscheinung unverändert, und erst, wenn man die Länge desselben etwa auf das Doppelte gebracht hat, wird auch die Figur bei A wieder grösser, bis bei noch beträchtlicheren Längen die Grössendifferenz der beiden Figuren wieder vollständig verschwindet. Hierbei war es ganz gleichgültig, ob ein dicker oder dünner, besser oder schlechter

leitender Draht angewendet, ob er in einer straffgespannten Schleife hin und her oder im Bogen herumgeführt wurde. Mit Spiraldrähten habe ich jedoch noch nicht experimentirt.

Bei der vollkommenen Neuheit der Erscheinung schien es mir nun interessant, das Verhalten des Drahtes D an verschiedenen Stellen zu untersuchen. Es wurde deshalb eine Aenderung getroffen, wie sie in Fig. 13 schematisch dargestellt ist. Auf

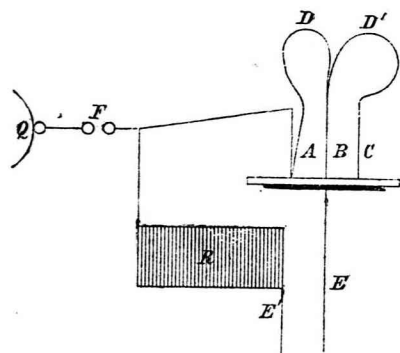


Fig. 13.

die Tafel werden die Zuleiter A, B, C aufgesetzt, welche durch zwei Drähte D und D' miteinander verbunden sind. Wählt man nun die Länge dieser Drähte so, dass bei C eine möglichst grosse, bei A hingegen eine möglichst kleine Figur entsteht, so wird die Figur bei B grösser als jene bei A und kleiner als jene bei C . Ist jedoch die Länge des Drahtes beträchtlicher, so nähern sich die Grössen der Figuren A und C der Gleichheit, während B bei richtiger Wahl des Verhältnisses $D:D'$ ganz klein wird, ja sogar ganz verschwindet. Bei einer Schlagweite von 4,3 mm und den Längen $AF = 50$ cm $D = 6,2$ m $D' = 8,1$ m waren die Figuren bei A und C gross, während bei B nur ganz kleine Sternchen erschienen.

Hebt man irgend einen der Zuleiter von der Tafel ab, so werden dadurch die Figuren an den übrigen Zuleitern nicht im Geringsten geändert.

Dieser Versuch lehrt die neue Thatsache kennen, dass die Verbindung des Zuleiters mit einem blind endenden Drahte hinreicht, um die Figur, welche am Zuleiter entsteht, ganz wesentlich zu verändern, beziehungsweise dieselbe zum Verschwinden zu bringen. Am belehrendsten wird das Experiment, wenn man nahe beim Zuleiter A ein zweites Funkenmikrometer f (Fig. 14) anbringt, dessen eine Kugel mit A verbunden ist, während die andere zu dem Drahte D führt. Stellt man

alsdann das Funkenmikrometer f zuerst auf eine weite Distanz ein, und verringert man diese allmählich, so sieht man, wie von dem Augen-

blicke an, wo der Funke bei f überspringt, die Figur bei A eine andere wird, beziehungsweise verschwindet. Beachtet man aber, dass bei

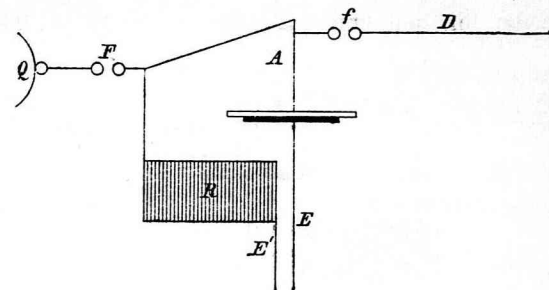


Fig. 14.

alterirenden Entladungen der Draht sofort wieder vollständig entladen wird, so ergibt sich, dass bei einem solchen Vorgang Elektrizität zuerst bis an das äusserste Ende des Drahtes D hinein, und sofort wieder herausgetrieben wird, dass also hier Bewegungen stattfinden, welche einer Reflexion vollkommen vergleichbar sind.

Diese Betrachtung führt zu einer Hypothese über die eigenthümlichen Grössenveränderungen, welche die Staubfiguren bei den beschriebenen Abzweigungen erleiden.

Werden nämlich elektrische Wellen in einen Draht hineingetrieben, und müssen sie nach Reflexion am Ende desselben auf demselben Wege wieder zurückkehren, so werden die ankommenden mit den reflectirten Wellen interferiren und hiedurch Erscheinungen hervorrufen, welche den bei Orgelpfeifen beobachteten analog sind. Die bisher mitgetheilten Beobachtungen zeigen wirklich eine solche Analogie in hohem Grade, und man darf es wohl wagen, die Stellen des Drahtes, an welchen Maximal- und Minimalfiguren erscheinen, mit den Schwingungsbäuchen und Schwingungsknoten zu vergleichen.

Die Hypothese, dass man hier Interferenz-Erscheinungen vor sich habe, gewinnt noch dadurch an Wahrscheinlichkeit, dass die Versuche nur mit alternirenden Entladungen in überzeugender Weise gelingen, während bei einfachen Entladungen zwar ebenfalls Grössendifferenzen der verschiedenen Figuren beobachtet werden, aber lange nicht in so hohem Grade.

Mit den eben beschriebenen Versuchen wurde noch eine

kleine Modification vorgenommen, welche abermals den Ausgangspunkt für neue Untersuchungen bildete.

Verknüpft man nämlich das Ende des Drahtes D (Fig. 12) wieder mit dem ersten Zuleiter A wie es in dem Schema Fig. 15

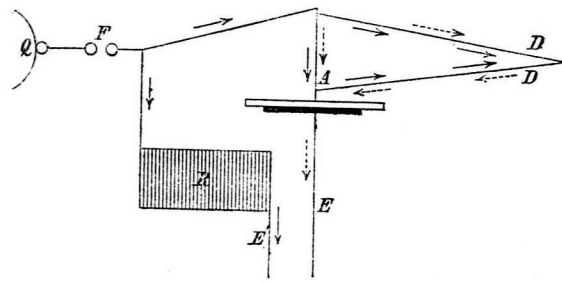


Fig. 15.

versinnlicht ist, so kann die Figur bei richtiger Wahl der Drahtlänge ebenfalls zum Verschwinden gebracht werden. Dieser Versuch bildete eigentlich den Ausgangspunkt für die sämtlichen bisher mitgetheilten, ich habe jedoch seine Beschreibung bis auf diese Stelle hier verschoben, da er nicht dazu geeignet ist, das Verständniss der obigen Experimente zu erleichtern. Ich selbst glaubte in ihm zuerst ein Analoges des Savart'schen Interferenzversuches für Schallwellen gefunden zu haben, und dachte mir die Strombewegung im Sinne der gestrichelten Pfeile vor sich gehend. Die Experimente mit dem blind endenden Draht, sowie der Umstand, dass der Abstand der beiden Abzweigungspunkte auf A keinen entscheidenden Einfluss äusserte, mussten diese Ansicht erschüttern. Um jeden Zweifel hierüber zu beseitigen, unterbrach ich die Drahtschleife D der Reihe nach an verschiedenen Stellen durch eine Funkenstrecke. Die Kugeln dieses zweiten Mikrometers waren hierbei einander bis auf 0,01 bis 0,03 mm genähert. Ich dachte mir nämlich, dass es in dem Falle, wo der Strom von beiden Seiten her in den Draht einströmt, in diesem Drahte eine Stelle geben müsse, an welcher sich die beiden Wellenzüge begegnen. Befindet sich die Funkenstrecke gerade an dieser Stelle, so muss die Spannung auf beiden Kugeln gleichzeitig dieselbe Höhe erreichen, und es ist demnach an dieser Stelle kein Grund zur Entstehung eines Funkens gegeben, während man an allen andern Stellen einen solchen zu erwarten hat.

Der Funke blieb wirklich aus, wenn das Mikrometer in der

Mitte der Schleife eingeschaltet wurde und erschien, sobald dasselbe nur um wenige Decimeter von dieser Stelle nach der einen oder andern Seite entfernt wurde. Hiermit ist nachgewiesen, dass der Stromlauf durch die ausgezogenen Pfeile dargestellt wird, und andererseits ist die kleine Verspätung sichtbar gemacht, welche der elektrische Entladungsstrom bei dem Durchlaufen weniger Decimeter Draht erleidet.

Vor Allem suchte ich nun nach den Bedingungen, unter welchen dieser Versuch über die Verzögerung am schlagendsten gelingt.

Ich fand es dabei am Besten, direct den Entladungsstrom des Ruhmkorff'schen Apparates, mithin das Schema (Fig. 16) anzuwenden. Der inducierende Strom wurde durch ein Grove's-

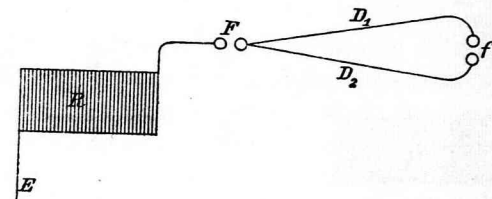


Fig. 16.

ches Element erzeugt, und die Funkenstrecke im Funkenmikrometer ungefähr $F=2$ mm gemacht, da weder grössere noch kleinere Funkenstrecken so gute Resultate lieferten.

Unter diesen Umständen war es für die Hervorbringung des Funkens genügend, wenn der eine Draht D auch nur um 1 Decimeter länger war, als der andere. Waren sie hingegen gleich lang, so erschien niemals ein Funke. Man kann ihn jedoch augenblicklich zur Erscheinung bringen, wenn man durch Anlegen des Knopfes einer Leydner Flasche an einen der Drähte die Symmetrie der beiden Stromwege stört.

Auch bei diesen Versuchen äusserten Material und Dicke der Drähte nicht den geringsten Einfluss. Ob ich einen versilberten Kupferdraht von 0,06 mm Durchmesser oder einen Eisendraht von 0,23 oder endlich einen Kupferdraht von 0,80 mm Durchmesser anwendete, immer blieb der Funke aus, wenn nur die beiden Drähte gleich lang waren.

Es ist mithin die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektrizität für alle (gespannten)¹⁾ Drähte eine gleiche.

¹⁾ Spiralförmig gewundene Drähte werden vermuthlich ein anderes Resultat geben.

In der bisher beschriebenen Form ist jedoch der Versuch ziemlich unscheinbar, da man nur mit sehr kleinen Funkenstrecken des Hilfsmikrometers f arbeiten kann. Ich war deshalb bestrebt, ihn in einer Weise abzuändern, welche gestattet, denselben auch einem Auditorium sichtbar zu machen.

Versuche mit kleinen Geissler'schen Röhren führten bis jetzt noch zu keinem entschiedenem Resultate. Dagegen kann man die Verspätung wenigstens bei Verzögerungslängen von einigen Metern recht schön auf folgende Art nachweisen. (Fig. 17.)

Theilt man einen (negativen) Entladungsschlag, am besten den eines Ruhmkorff'schen Apparates, ebenso wie oben gleich hinter dem Funkenmikrometer in zwei Zweige und verbindet man einen derselben mit der Belegung der vollkommen

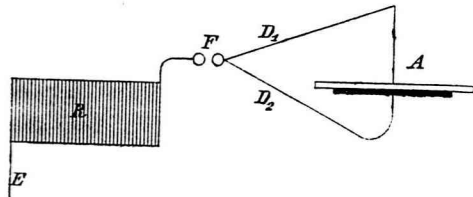


Fig. 17.

isolirten Probepatte, während man den andern durch den Zuleiter A auf die obere unbelegte Fläche führt, so kann auf der oberen Tafel eine positive, negative oder auch gar keine Figur erscheinen, je nachdem der obere Zweig grösser, kleiner oder ebenso lang ist als der untere. Und zwar müssen die Versuche in bestimmtem Sinne ausfallen, wenn sie die Vermuthung bestätigen sollen, dass sie Zeitdifferenzen ihren Ursprung verdanken. Wenn man sich nämlich daran erinnert, dass es gleichgültig ist, ob man positive Elekcrecität auf die Platte führt oder negative hinwegnimmt, so versteht man, dass eine positive Entladung eine positive Figur hervorruft, wenn die Elekcrecität früher an die Spitze des Zuleiters ankommt als auf der Belegung, d. h. wenn D_1 kürzer ist als D_2 . Gelangt hingegen die Entladung früher auf die Belegung, so wird der Zuleiter von der Influenz-elekcrecität im entgegengesetzten Sinne durchlaufen und es muss demnach auf der Glasfläche eine negative Figur entstehen, sobald D_2 kürzer ist als D_1 . Im Verlaufe der Bewegung muss diese Influenz-entladung im Drahte D_1 auf die direkte von F herkommende Elekcrecität treffen, und hierdurch der Figur ein zusammengesetzter Charakter aufgedrückt werden.

Zwischen diesen beiden Anordnungen mit ganz entgegengesetzten Resultaten muss es aber offenbar solche geben, bei welchen gar keine Figuren entstehen, da kein Grund vorhanden ist, wesshalb eine solche der einen oder der anderen Art zu Stande kommen sollte. Dies muss der Fall sein, wenn die Elekcrecität von beiden Seiten her gleichzeitig eintrifft, d. h. wenn D_1 und D_2 gleich lang¹⁾ sind.

Die Versuche entsprachen diesen theoretischen Voraussetzungen vollkommen. Man erhält mit jeder Elekcrecitätsart Figuren der beiden Arten, wenn man über die Längen der Drähte richtig disponirt.

Diese Behauptung könnte freilich Manchem, der den Versuch nicht unter ganz günstigen Verhältnissen anstellt, abgesehen von dem einen Falle, wo wegen vollkommener Gleichheit der beiden Zweige gar keine Figuren zu Stande kommen, unrichtig erscheinen. Es kann nämlich eintreten, dass sämtliche Figuren auf den ersten Blick positiv zu sein scheinen, unter welchen Verhältnissen und mit welcher Elekcrecitätsart man auch arbeiten mag.

Der Grund liegt einfach darin, dass die zusammengesetzten negativen Figuren in diesem Falle zu jener Gruppe gehören, welche bereits einen stark positiven Charakter an sich tragen und selbst bei eingehender Beschäftigung mit denselben kaum als negativ erkannt werden können.

Der nach einem Polwechsel eintretende bedeutende Grössenunterschied ist aber vollkommen hinreichend, um jeden Zweifel über die wahre Natur der Figuren sofort zu beseitigen und die Uebereinstimmung der Versuche mit den theoretischen Voraussetzungen zu beweisen.

Alles zusammengefasst, wurden nachfolgende Resultate gewonnen:

1) Bietet man einer elektrischen Entladung nach Durchbrechung einer Funkenstrecke zwei Wege zur Erde dar, einen kürzern und einen längern, durch eine Probepatte unter-

¹⁾ Eine kleine Längendifferenz zu Gunsten des oberen Drahtes kann vielleicht hierbei stattfinden, da die von unten kommende Elekcrecität sich über die ganze Belegung ausbreiten muss.

brochenen, so findet bei kleinen Schlagweiten eine Theilung des Entladungsstromes statt. Bei grösseren Funkenstrecken hingegen schlägt die Elektrizität nur den kurzen Weg ein und reisst sogar aus dem andern Zweige gleichnamige Elektrizität mit sich fort.

2) Sendet man einen elektrischen Wellenzug in einen am Ende isolirten Draht, so wird derselbe am Ende reflectirt und Erscheinungen, welche diesen Vorgang bei alternirenden Entladungen begleiten, scheinen ihren Ursprung der Interferenz der ankommenden und reflectirten Wellen zu verdanken.

3) Eine elektrische Entladung pflanzt sich in gleich langen Drähten gleich rasch fort, ohne Rücksicht auf das Material, aus welchem diese Drähte bestehen.“

4. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung.

(Sitzungsberichte d. Berl. Akad. d. Wiss. vom 9. Juni 1887.

Wiedemanns Ann. 31. p. 983.)

In einer Reihe von Versuchen, welche ich über die Resonanzerscheinungen zwischen sehr schnellen elektrischen Schwingungen angestellt und kürzlich veröffentlicht habe,¹⁾ wurden durch dieselbe Entladung eines Inductoriums, also genau gleichzeitig, zwei elektrische Funken erregt. Der eine derselben, der Funke *A*, war der Entladungsfunke des Inductoriums und diente zur Erregung einer primären Schwingung. Der zweite, der Funke *B*, gehörte der inducirten, secundären Schwingung an. Der letztere war ziemlich lichtschwach, seine maximale Länge war in den Versuchen genau zu messen. Als ich nun gelegentlich zur Erleichterung der Beobachtung ein verdunkelndes Gehäuse um den Funken *B* anbrachte, bemerkte ich, dass innerhalb des Gehäuses die maximale Funkenlänge sehr merklich kleiner war, als sie vorher gewesen. Bei successiver Entfernung der einzelnen Theile des Gehäuses fand sich, dass nur derjenige Theil desselben die benachtheiligende Wirkung ausübte, welcher die dem Funken *A* zugekehrte Seite des Funkens *B* deckte. Die dort befindliche Wand aber zeigte die Wirkung nicht allein, wenn sie sich in unmittelbarer Nähe des Funkens *B* befand, sondern ebenso, wenn sie in grösserer Entfernung von *B* zwischen die Funken *A* und *B* eingeschoben wurde. Die Erscheinung war bemerkenswerth genug, um ein näheres Eingehen auf dieselbe herauszu-

¹⁾ Siehe No. 2. p. 32.

fordern. Ich theile im Folgenden die Thatsachen mit, welche ich im Verlaufe der Untersuchung festzustellen vermochte.

1. Auf eine elektrostatische oder elektrodynamische Schutzwirkung lässt sich die Erscheinung nicht zurückführen. Denn nicht allein gute Leiter zeigten, zwischen *A* und *B* eingeschoben, die Wirkung, sondern auch vollkommene Nichtleiter, insbesondere Glas, Paraffin, Hartgummi, welche doch eine Schutzwirkung nicht ausüben vermögen. Wiederum Metallgitter von grobem Gewebe zeigten einen Einfluss nicht, während sie doch zur Schutzwirkung hinreichen.

2. Der Umstand, dass die beiden Funken *A* und *B* synchronen sehr schnellen Schwingungen entsprachen, war unwesentlich. Denn wenn auf irgend eine andere Weise gleichzeitig zwei Funken erregt wurden, liess sich die Erscheinung ebenfalls hervorrufen. Sie zeigte sich, auch wenn ich statt des inducirten Funkens einen Nebenfunkens (nach der Bezeichnungswiese meiner vorigen Arbeit) verwandte. Sie zeigte sich auch dann, wenn ich als den Funken *B* eine Seitenentladung nach der Bezeichnung von Riess benutzte, wie sie erhalten wird, wenn man den einen Pol des Inductoriums mit einem isolirten Conductor verbindet und eine Funkenstrecke einschaltet. Sie lässt sich aber auch in bequemster und deutlichster Weise hervorrufen, wenn man in denselben Stromkreis zwei Inductorien mit gemeinsamem Interruptor einschaltet, deren eines den Funken *A*, deren anderes den Funken *B* ergiebt. Diese Versuchsanordnung wurde für die ferneren Versuche fast allein benutzt. Da mir die Versuche mit einer Reihe verschiedener Inductorien gelangen, so dürften sich dieselben mit jedem beliebigen Paar von Apparaten ausführen lassen. Indessen scheint es doch zweckmässig, diejenige Versuchsanordnung, welche die besten Resultate gab und zumeist benutzt wurde, genau zu beschreiben. Den Funken *A* gab ein grosses Inductorium (*a*, Fig. 18) von Ruhmkorff von 52 cm Länge und 20 cm Durchmesser, getrieben durch 6 grosse Bunsen'sche Elemente (*b*) und versehen mit einem besonderen Quecksilberinterruptor (*e*). Es vermochte bei dem vorhandenen Strom zwischen Spitze und Platte Funken bis zu 10 cm, zwischen 2 Kugeln Funken bis zu etwa 3 cm Länge zu geben. Benutzt wurde meist ein Funke von 1 cm Länge

zwischen den Spitzen eines allgemeinen Ausladers (*d*). Den Funken *B* gab ein kleineres, ursprünglich wohl für medicinische Zwecke bestimmtes Inductorium

(*e*) von relativ grosser Stromstärke, aber nur $1\frac{1}{2}$ —1 cm maximaler Schlagweite. Da es hier in den Kreis des grossen Inductoriums eingeschaltet war, so kam sein Condensator nicht in Wirksamkeit, und es gab daher nur Funken von 1—2 mm Länge. Benutzt wurden Funken von etwa 1 mm Länge zwischen den verwickelten Kugeln eines Riess'schen Funkenmikrometers (*f*)

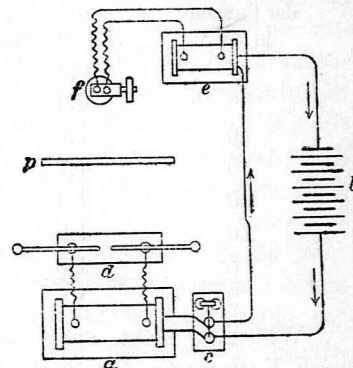


Fig. 18.

oder zwischen Messingkugeln von 5 bis 10 mm Durchmesser. Werden nun bei so beschaffenen Apparaten die beiden Funkenstrecken parallel in nicht zu grossem Abstand aufgestellt, der Interruptor in Thätigkeit gesetzt und das Funkenmikrometer so weit auseinander gezogen, dass die Funken in ihm eben noch regelmässig übergehen, so erlöschen diese Funken sofort und vollständig, wenn man eine Platte (*p*) von Metall, Glas etc. zwischen die beiden Funkenstrecken in *d* und *f* einsenkt; sie treten sofort wieder auf, wenn die Platte entfernt wird.

3. Die Deutlichkeit der Erscheinung nimmt zu, je mehr der Funke *B* dem Funken *A* genähert wird. Die Entfernung der beiden Funken, an welchen ich die Erscheinung zuerst bemerkte, betrug $1\frac{1}{2}$ m, und es kann also in dieser Entfernung die Wirkung noch recht merklich sein. Andeutungsweise habe ich sie bis zu einer Entfernung von 3 m zwischen den Funken wahrnehmen können. Indessen äussert sich die Erscheinung in solchen Entfernungen nur noch eben durch eine grössere und geringere Regelmässigkeit des Funkenstromes *B*; in Entfernungen unterhalb eines Meters kann ihre Stärke gemessen werden durch den Unterschied der maximalen Funkenlänge vor und nach Einschaltung der Platte. Um eine Vorstellung von der Grösse der Wirkung zu geben, theile ich die folgenden, naturgemäss

rohen Beobachtungen mit, welche sich bei der durch Fig. 8. dargestellten Versuchsanordnung ergeben:

Entfernung der Funken in cm	Länge des Funkens B in mm		Unterschied
	vor Einschaltung der Platte	nach Platte	
∞	0,8	0,8	0
50	0,9	0,8	0,1
40	1,0	0,8	0,2
30	1,1	0,8	0,3
20	1,3	0,8	0,5
10	1,5	0,8	0,7
5	1,6	0,8	0,8
2	1,8	0,8	1,0

Wie man sieht, steigt unter Umständen die Schlagweite durch Entfernung der Platte auf ihren doppelten Werth.

4. Die in der Tabelle mitgetheilten Beobachtungen können auch angezogen werden zum Beweise der folgenden Aussage, welche man freilich von vornherein gemuthmasst haben wird: Die Erscheinung beruht nicht darauf, dass die Platte ihrerseits den Funken *B* beeinträchtigt, sondern darauf, dass die Platte eine die Schlagweite befördernde Wirkung des Funkens *A* wieder aufhebt. Stellen wir das Funkenmikrometer bei grosser Entfernung der Funken *A* und *B* so ein, dass der Funke *B* eben nicht mehr übergeht, und nähern nun das Funkenmikrometer dem Funken *A*, so tritt der Funkenstrom *B* wieder auf — dies ist die Wirkung; schieben wir nun die Platte ein, so erlischt der Funkenstrom wieder — dies ist die Aufhebung der Wirkung. Die Platte bildet demnach nur das Mittel, die Wirkung des Funkens *A* bequem und deutlich sichtbar zu machen. Ich nenne fortan den Funken *A* den activen, den Funken *B* den passiven Funken.

5. Die Wirksamkeit des activen Funkens ist nicht an eine besondere Form desselben gebunden. Sowohl Funken zwischen Kugeln, als solche zwischen Spitzen zeigten sich wirksam. Kurze gerade Funken äusserten ihren Einfluss, ebenso auch lange gezackte. Zwischen lichtschwachen bläulichen und hellleuchtenden weissglänzenden Funken war kein wesentlicher Unterschied. Schon Funken von 2 mm Länge machten ihren Einfluss auf grössere Entfernung geltend. Es geht ferner die Wirkung nicht von einem

bestimmten Theile des Funkens aus, sondern jeder Theil ist wirksam. Man kann diese Behauptung beweisen, indem man eine Glasröhre über die Funkenstrecke zieht. Das Glas lässt die Wirkung nicht hindurch, und der Funke ist also bei dieser Anordnung unwirksam. Sobald aber ein kurzes Stück des Funkens an dem einen oder dem anderen Pol oder in der Mitte entblösst wird, tritt die Wirksamkeit ein. Einen Einfluss des Metalls der Pole habe ich nicht bemerkt. Es ist unwesentlich, dass in unserer Versuchsanordnung der active Funke parallel dem passiven ist.

6. Die Empfänglichkeit der passiven Funken für die Wirkung ist dagegen von ihrer Form ziemlich abhängig. Keine Empfänglichkeit vermochte ich wahrzunehmen bei langen gezackten Funken zwischen Spitzen; eine geringe bei kurzen Funken zwischen Spitzen. Am besten zeigte sich die Wirkung bei Funken zwischen Kugeln, und hier wiederum ist sie am auffälligsten bei kurzen Funken. Man benutzt für die Versuche mit Vortheil Funken von 1 mm Länge zwischen Kugeln von 5—10 mm Durchmesser. Doch habe ich auch noch auf Funken von 2 cm Länge eine Einwirkung deutlich wahrgenommen. Vielleicht ist sogar die absolute Verlängerung, welche solche Funken erfahren, ebenso gross wie diejenige kurzer Funken, aber ihre relative Verlängerung ist jedenfalls viel kleiner, und die Wirkung verschwindet daher in den Unterschieden, welche sich zwischen den einzelnen Entladungen des Inductoriums finden. Einen merklichen Einfluss des Stoffes der Pole habe ich nicht gefunden. Ich untersuchte die Funken zwischen Polen von Kupfer, Messing, Eisen, Aluminium, Zinn, Zink, Blei. Am ehesten schien dem Eisen ein geringer Vorzug vor den übrigen Metallen in Bezug auf die Empfindlichkeit des Funkens zuzukommen. Die Pole müssen rein und glatt sein, sind sie verunreinigt oder durch langen Gebrauch stark corrodirt, so versagt wohl die Wirkung.

7. Die Beziehung zwischen den beiden Funken ist eine reciproke. Es soll damit gesagt sein, dass nicht nur der grössere und kräftigere Funke die Schlagweite des kleineren vergrössert, sondern dass auch umgekehrt der kleinere Funke begünstigend auf die Schlagweite des grossen einwirkt. Stellt man nämlich in unserer bisherigen Versuchsanordnung das Funkenmikrometer so ein, dass die Entladung in ihm mit Sicherheit übergeht, den

Auslader aber auf solche Entfernung, dass die Entladungen des grossen Inductoriums eben versagen, so findet man, dass diese Entladungen nun durch Annäherung des Funkenmikrometers wieder hervorgerufen werden, dass aber Einschieben einer Platte diese Wirkung wieder aufhebt. Selbstverständlich muss dabei der Funke des grossen Inductoriums ein empfänglicher sein, und die Einwirkung ist dabei nicht so auffällig wie vorher, nach Maassgabe der geringeren Empfindlichkeit langer Funken. Sind beide Inductorien an der Grenze ihrer Schlagweite, so treten Complicationen ein, welche mit dem vorliegenden Gegenstand wahrscheinlich nichts zu thun haben.¹⁾ Eine Auslösung langer Funken durch andere sehr viel kürzere hat man häufig Gelegenheit zu beobachten, und ein Theil dieser Erscheinungen dürfte sich gewiss auf die hier untersuchte Wirkung zurückführen lassen. Stellt man die Entladungen eines Inductoriums zwischen Kugeln her und zieht die Kugeln bis zum Versagen des Funkens auseinander, so tritt der Funkenstrom wieder auf, wenn man einer der Polkugeln einen isolirten Leiter nähert und mittelst desselben kleine Seitenfunken zieht. Ich habe mich auf das bestimmteste überzeugt, dass hierbei die Seitenentladung die Rolle eines activen Funkens im Sinne der gegenwärtigen Untersuchung übernimmt. Es genügt auch die Berührung einer der Polkugeln mit einem Nichtleiter oder die Annäherung einer Spitze bis auf einige Entfernung, um die gleiche Wirkung hervorzurufen. Es erscheint wenigstens möglich, dass die kaum sichtbare Seitenentladung über die Oberfläche des Nichtleiters und von der Spitze aus die Rolle eines activen Funkens spielt.

8. Die Wirkung des activen Funkens breitet sich nach allen Seiten geradlinig und unter Strahlenbildung aus, genau nach den Gesetzen der Lichtbewegung. Man mache die Längsaxe der beiden in Betracht kommenden Funken senkrecht gegen die Horizontale und schiebe nun eine Platte mit senkrechter Begrenzung langsam von der Seite her zwischen die Funken ein. Man findet, dass die Wirkung des activen Funkens nicht allmählich, sondern plötzlich bei einer bestimmten Stellung der Platte aufgehoben wird. Visirt man nun vom Orte des passiven Funkens an der Kante der Platte entlang, so findet man, dass

¹⁾ [Siehe Anmerkung 8 am Schluss des Buches.]

der active Funke eben von der Platte bedeckt ist. Stellt man die Platte mit senkrechter Kante zwischen die beiden Funken und zieht sie langsam seitwärts heraus, so tritt bei einer ganz bestimmten Stellung die Wirkung ein, und man findet alsdann, dass nun der active Funke vom Ort des passiven Funkens aus eben neben der senkrechten Kante sichtbar geworden ist. Stellt man zwischen die Funken eine Platte mit schmalem senkrechten Spalte und bewegt sie hin und her, so findet man, dass nur bei einer ganz bestimmten Stellung die Wirkung hindurchgeht, nämlich dann, wenn der active Funke durch den Spalt hindurch vom Ort des passiven Funkens aus sichtbar ist. Schiebt man mehrere Platten mit derartigen Spalten hintereinander ein, so findet man, dass bei bestimmter Stellung die Wirkung durch alle hinter einander hindurchgeht. Sucht man durch Probiren diese Stellungen auf, so findet man schliesslich, am einfachsten natürlich durch Visiren, dass alle Spalten in der durch die beiden Funken gelegten Verticalebene liegen. Stellt man in einiger Entfernung vom activen Funken eine Platte auf mit beliebig gestalteter Oeffnung, und bestimmt hinter der Platte durch Hin- und Herbewegen des passiven Funkens die Grenze des Raumes, in welchem sich die Wirkung geltend macht, so erhält man als Grenze eine Kegelfläche, welche durch den Ort des activen Funkens als Spitze und die Grenze der Oeffnung gegeben ist. Stellt man vor den activen Funken in einiger Entfernung eine kleinere Platte auf, so findet man durch Hin- und Herbewegen des passiven Funkens, dass die Platte die Wirkung des activen Funkens genau in demjenigen Raume aufhebt, welchen sie vor dem Lichte des Funkens schützt. Es erscheint fast selbstverständlich, dass die Wirkung nicht allein im Schlagschatten fremder Körper aufgehoben ist, sondern auch im Eigenschatten der Polkugeln des passiven Funkens. In der That, drehen wir den letzteren so, dass seine Längsrichtung mit derjenigen des activen Funkens zwar in der gleichen Ebene bleibt, aber aus der parallelen Stellung in die senkrechte übergeht, so fällt die Wirkung fort.

9. Die meisten festen Körper halten die Wirkung des activen Funkens auf, jedoch nicht alle; einzelne feste Körper sind durchlässig für dieselbe. Als undurchlässig erwiesen sich alle Metalle, welche ich prüfte, auch in dünnen Blechen; ferner Paraffin, Siegellack, Harze, Hartgummi, Kautschuk; alle Arten gefärbten

und ungefärbten, geschliffenen und ungeschliffenen, dicken und dünnen Glases, Porzellan, Steingut; Holz, Pappe, Papier; Elfenbein, Horn, thierische Haut, Federn; endlich Achat und in bemerkenswerther Weise Glimmer, sogar in äusserst dünnen Blättchen. Eine Abweichung von diesem Verhalten aber fand sich bei weiterer Untersuchung der Krystalle. Einzelne derselben zeigten sich zwar ebenfalls undurchlässig, wie Kupfervitriol, Topas, Amethyst; andere aber liessen die Wirkung, wenn auch abgeschwächt, hindurch, wie krystallisirter Zucker, Alaun, Doppelspath, Steinsalz; einzelne endlich zeigten sich fast völlig durchlässig, so Gyps (Marienglas) und vor allen der Bergkrystall, welcher noch in Schichten von mehreren Centimetern Dicke die Wirkung kaum schädigte. Die Versuche werden zweckmässig in folgender Weise angeordnet. Man stellt den passiven Funken in wenigen Centimetern Entfernung vom activen Funken auf und bringt den ersteren auf seine maximale Länge. Man schiebt nun den zu untersuchenden Körper ein. Wird dadurch der Funkenstrom nicht unterbrochen, so ist der Körper sehr durchlässig. Wird der Funkenstrom aber unterbrochen, so verringert man seine Schlagweite, bis er eben wieder zu Stande kommt. Man schaltet nun noch ausser dem zu untersuchenden Körper eine undurchlässige Platte ein. Unterbricht oder schwächt dieselbe den Funkenstrom nochmals, so war der Körper wenigstens theilweise durchlässig; hat die Platte keinen Einfluss mehr, so war er vollkommen undurchlässig. Mit der Dicke der eingeschalteten Körper nimmt ihre Einwirkung zu, und kann dieselbe füglich als eine Absorption der Wirkung des activen Funkens bezeichnet werden; doch zeigten auch die theilweise absorbirenden Körper ihren Einfluss meist schon in sehr dünnen Schichten.

10. Auch die Flüssigkeiten erweisen sich zum Theil durchlässig, zum Theil undurchlässig für die Wirkung. Für die Versuche wurde der active Funke etwa 10 cm senkrecht oberhalb des passiven angebracht und zwischen beiden ein flaches Gefäss aufgestellt, dessen ebener Boden aus einer kreisrunden, 4 mm dicken Platte von Bergkrystall bestand. In dies Gefäss wurde eine mehr oder weniger tiefe Schicht der Flüssigkeit eingegossen und ihr Einfluss alsdann beurtheilt, wie oben derjenige der festen Körper. Als auffällig durchlässig erwies sich das Wasser, welches selbst bei einer Tiefe von 5 cm die Wirkung kaum beein-

trächtigte. Durchlässig in dünneren Schichten waren auch concentrirte reine Schwefelsäure, Alkohol, Aether. Theilweise durchlässig zeigten sich reine Salzsäure, reine Salpetersäure, Salmiakgeist. Fast völlig oder völlig undurchlässig waren geschmolzenes Paraffin, Benzol, Petroleum, Schwefelkohlenstoff, Lösung von Schwefelammonium, ferner stark gefärbte Flüssigkeiten, wie Fuchsinlösung, Lösung von übermangansaurem Kali etc. Ein Interesse gewährten auch die Versuche mit Salzlösungen. In das Gefäss von Bergkrystall wurde eine Wasserschicht von 1 cm Tiefe gebracht, dieser tropfenweise die concentrirte Salzlösung zugesetzt, umgerührt und die Wirkung beobachtet. Von manchen Salzen genügte der Zusatz weniger, ja eines Tropfens, um den passiven Funken zum Verlöschen zu bringen. So beim Quecksilbernitrat, dem unterschwefligsauren Natron, dem Bromkalium, dem Jodkalium. Bei Zusatz von Kupfer- und Eisensalzen trat die Auslöschung des passiven Funkens ein, ehe noch die Färbung des Wassers deutlich wahrnehmbar wurde. In etwas grösserer Menge zugefügt, übten eine Wirkung aus die Lösungen von Salmiak, Zinkvitriol, Kochsalz.¹⁾ Dagegen waren selbst in concentrirter Lösung noch gut durchlässig schwefelsaures Kali, schwefelsaures Natron, schwefelsaure Magnesia.

11. Dass einzelne Gase für die Wirkung selbst auf grössere Strecken hin durchgängig sind, ist schon aus den in Luft ausgeführten Versuchen ersichtlich. Einzelne Gase sind nun aber auch für die Wirkung in hohem Grade undurchlässig. Für die Versuche wurde zwischen den activen und den passiven Funken ein 20 cm langes Glasrohr von 2 $\frac{1}{2}$ cm Durchmesser eingeschaltet, welches beiderseitig durch dünne Quarzplatten verschlossen war, und durch welches mit Hilfe zweier seitlicher Zuleitungen beliebige Gase durchgeleitet werden konnten. Ein Diaphragma liess der Wirkung nur den Weg durch das Glasrohr offen. Wasserstoff ergab keinen merklichen Unterschied gegen Luft. Auch die Füllung des Rohres mit Kohlensäure hielt den Durchgang der Wirkung kaum nachweisbar auf. Wurde aber Leuchtgas eingeleitet, so setzte der Funkenstrom des passiven

¹⁾ Nach meinen Versuchen absorbirt eine concentrirte Kochsalzlösung stärker als krystallisirtes Steinsalz. Dies Resultat erscheint zu auffällig, um nicht einer Bestätigung zu bedürfen.

Funkens sofort aus. Wurde das Leuchtgas durch Luft vertrieben, so setzte der Funke wieder ein, und dieser Versuch liess sich mit vollkommener Regelmässigkeit wiederholen. Schon die Einleitung von Luft, welche mit etwas Leuchtgas vermischt war, erwies sich als schädigend für die Wirkung. Es genügt daher auch ein viel kürzerer Weg durch das Leuchtgas, um die Wirkung aufzuheben. Lässt man zwischen den beiden Funken einen Strahl von Leuchtgas von 1 cm Durchmesser frei in die Luft austreten, so ist auf der dem activen Funken abgekehrten Seite des Strahles sehr deutlich sein Schatten, d. h. eine mehr oder weniger vollständige Aufhebung der Wirkung des activen Funkens wahrzunehmen. Die braunen Dämpfe der Untersalpetersäure zeigen eine ähnlich kräftige Absorption wie das Leuchtgas. Auch bei ihnen bedarf es nicht des Rohres mit den Quarzplatten zum Nachweis derselben. Hingegen absorbiren Chlor, Bromdampf und Joddampf zwar auch, aber durchaus nicht im Verhältniss ihrer Undurchsichtigkeit. Wurde so viel Bromdampf in das Rohr geleitet, dass dasselbe schon merklich gefärbt erschien, so war noch keine absorbirende Thätigkeit erkennbar, wurde der Bromdampf so dicht, dass der active Funke nur noch eben mit dunkelrother Farbe durch das Rohr sichtbar war, so ging immer noch ein Rest der Wirkung hindurch.

12. Bei Verdünnung der Luft um den passiven Funken wächst, wenigstens bis zu einem gewissen Grade der Verdünnung, die Stärke der Wirkung. Letztere ist dabei gemessen gedacht durch den Unterschied der Länge des geschützten und des ungeschützten Funkens. In den Versuchen wurde der passive Funke erzeugt unter einer Luftpumpenglocke zwischen zwei Polenden, welche verstellbar die Wandung der Glocke durchsetzten. Der active Funke wirkte von aussen durch ein in die Glocke eingesetztes Fenster aus Bergkrystall. Es wurde nun bei derselben Stromstärke, aber verschiedenem Luftdruck die maximale Funkenlänge beobachtet, einmal, wenn das Fenster offen, das andere mal, wenn es bedeckt war. Die folgende Tabelle darf als Typus des Verlaufs angesehen werden.

Luftdruck in mm Hg	Länge des passiven Funkens bei geschlossenem Fenster in mm	offenem	Unterschied
760	0,8	1,5	0,7
500	0,9	2,3	1,4

Luftdruck in mm Hg	Länge des passiven Funkens bei geschlossenem Fenster in mm	offenem	Unterschied
300	1,0	3,7	2,7
100	2,0	6,2	4,2
80	sehr gross	sehr gross	unbestimmt

Wie man sieht, wuchs bei abnehmendem Druck die Länge des unbeeinflussten Funkens nur sehr langsam, die des beeinflussten schneller, der Unterschied beider nahm zu. Bei einem gewissen Druck aber breitete sich das blaue Glimmlicht über eine grössere Fläche der Kathode aus, die Schlagweite wurde sehr gross, die Entladung nahm einen anderen Charakter an, und eine Beeinflussung durch den activen Funken war nicht mehr wahrzunehmen.

13. Die Erscheinung zeigt sich auch dann, wenn die Funken anstatt in Luft in einem anderen Gase entstehen; auch dann, wenn die beiden Funken in zwei verschiedenen Gasen sich bilden. In den Versuchen wurden die beiden Funken in zwei getrennten kleinen tubulirten Glasgefässen erzeugt, welche durch Bergkrystallplatten verschlossen waren und mit verschiedenen Gasen gefüllt werden konnten. Die Versuche wurden hauptsächlich angestellt, weil gewisse Beobachtungen die Vermuthung nahe legten, dass der Funke in einem bestimmten Gase wesentlich nur auf einen anderen Funken in dem gleichen Gase wirke, und es wurden deshalb die vier Gase Wasserstoff, Luft, Kohlensäure, Leuchtgas in den sechzehn möglichen Combinationen geprüft. Das Hauptresultat war, dass jene Vermuthung als eine irrthümliche erkannt wurde. Es darf vielmehr behauptet werden: Als active Funken benutzt, zeigen die Funken in verschiedenen Gasen keinen grossen Unterschied in ihrer Wirksamkeit, als passive Funken benutzt, zeigen sie hingegen einen beträchtlichen Unterschied in der Empfänglichkeit. Die Funken in Wasserstoff erfuhren unter übrigens gleichen Umständen eine merklich grössere Verlängerung als die in der Luft, diese wieder eine etwa doppelt so grosse als die in Kohlensäure und Leuchtgas. Der Wirkung der Absorption wurde allerdings in diesen Versuchen keine Rechnung getragen, da sie bei Anstellung der Versuche noch unbekannt war; nur beim Leuchtgas dürfte dieselbe merklichen Einfluss gehabt haben.

14. Nicht alle Theile des passiven Funkens sind gleichmässig an der Wirkung betheilig; die Wirkung betrifft die Nähe

der Pole, hauptsächlich die Nähe des negativen Pols.¹⁾ Man zeigt dies, indem man dem passiven Funken eine Länge von 1—2 cm giebt, sodass man die verschiedenen Theile getrennt beschatten kann. Eine Beschattung der Anode hat einen geringeren Einfluss, eine Beschattung der Kathode hebt den grössten Theil der Wirkung auf. Durch die Undeutlichkeit der Erscheinung an langen Funken ist die Constatirung der Thatsache etwas erschwert. Bei kurzen Funken, bei welchen eine gesonderte Beschattung der einzelnen Theile nicht möglich ist, lässt sich die Behauptung in folgender Weise illustriren. Man stellt den passiven Funken parallel dem activen auf und dreht ihn nun nach rechts und nach links aus der parallelen in die senkrechte Lage, bis die Wirkung erlischt. Man findet, dass man in dem einen Sinne einen grösseren Spielraum hat, als in dem anderen, und zwar ist diejenige Drehung im Vortheil, bei welcher dem activen Funken die Kathode zugewandt, diejenige im Nachtheil, bei welcher die Kathode abgewandt wird. Ob die Einwirkung ausschliesslich oder nur zum grössten Theil an der Kathode stattfindet, habe ich nicht mit Sicherheit zu entscheiden vermocht.

15. Die Wirkung des activen Funkens wird von den meisten Oberflächen reflectirt. Von polirten Oberflächen erfolgt die Reflexion nach den Gesetzen der regelmässigen Lichtreflexion. Für die gröberen Versuche wurde der active Funke vor der einen Oeffnung eines 50 cm langen, 1 cm weiten, beiderseits offenen Glasrohres angebracht, welches eine grössere Pappscheibe durchsetzte, sodass nur durch das Rohr hindurch die Wirkung die Scheibe passiren konnte. Wurde nun hinter der zweiten Oeffnung des Rohres der passive Funke hin und her bewegt, so zeigte sich ein Einfluss auf ihn lediglich in der Verlängerung des Hohlraumes des Rohres; hier aber zeigte sich ein weit kräftigerer Einfluss, als wenn das Rohr entfernt und nur das Diaphragma beibehalten wurde. Die letztere Erscheinung war der Anlass zur Benutzung des Rohres, sie deutet selbst bereits auf eine Reflexion an den Wänden desselben. Das Funkenmikrometer wurde nun seitlich von dem aus dem Rohre austretenden Strahle so aufgestellt, dass die Längsrichtung des Funkens parallel mit der

¹⁾ [Siehe Anmerkung 9 am Schluss des Buches.]

Richtung des Strahles war. Brachte man nun den Funkenstrom im Mikrometer eben zum Versagen, so trat er wieder auf, wenn eine ebene Oberfläche unter 45° gegen den Strahl geneigt, so in denselben hineingehalten wurde, dass sie nach dem gewöhnlichen Reflexionsgesetz den Strahl auf den passiven Funken werfen musste. Die Reflexion zeigte sich mehr oder weniger an Glas, Krystallen, den Metallen, auch wenn diese Körper nicht besonders blank waren, ebenso auch an Körpern wie Porzellan, polirtes Holz, weisses Papier. Von einer stark berussten Glasplatte erhielt ich keine Reflexion.

Bei den feineren Versuchen wurde der active Funke so eingerichtet, dass er eine senkrechte gerade Linie bildete, in geringer Entfernung von ihm wurde eine grössere Platte mit senkrechtem Spalt aufgestellt, hinter welcher polirte ebene Spiegel von verschiedenen Metallen, von Glas und Bergkrystall angebracht wurden. Durch Bewegungen des passiven Funkens wurden alsdann die Grenzen desjenigen Raumes ermittelt, in welchem sich hinter dem Spalt die Wirkung geltend machte. Diese Grenzen waren völlig scharfe, sie fielen stets zusammen mit den Grenzen desjenigen Raumes, in welchem das Spiegelbild des Funkens sichtbar war. Bei nicht polirten Körpern liessen sich diese Versuche wegen der Schwäche der Wirkung nicht ausführen, es ist zu vermuthen, dass bei solchen Körpern die Reflexion eine diffuse ist.

16. Beim Uebergang aus Luft in ein festes durchlässiges Medium zeigt die Wirkung des activen Funkens eine der Brechung des Lichtes analoge Erscheinung, doch wird die Wirkung stärker gebrochen, als das sichtbare Licht. Für die gröberen Versuche diente wieder das bei den Reflexionsversuchen benutzte Glasrohr. Wurde der passive Funke in etwa 30 cm Entfernung von der dem activen Funken abgewandten Oeffnung des Rohres in dem austretenden Strahle aufgestellt und nun unmittelbar an der Oeffnung von der Seite her ein Quarzprisma mit der brechenden Kante voran in den Strahl eingeschoben, so erlosch, trotz der Durchlässigkeit des Quarzes, der Einfluss auf den passiven Funken, sobald das Prisma die Oeffnung des Rohres bedeckte. Bewegte man alsdann aber den Funken im Kreise um das Prisma herum nach der Seite hin, nach welcher das Prisma den Lichtstrahl ablenkte, so kam man bald zu Orten, an welchen sich der Ein-

fluss wieder zeigte. Stellte man den passiven Funken nun dort auf, wo der Einfluss am kräftigsten sich zeigte, und visirte von dort aus durch das Prisma nach dem Rohr, so vermochte man nicht das Innere des Rohres und den aktiven Funken am Ende desselben zu erblicken; um durch das Rohr hindurch den activen Funken zu sehen, musste man das Auge um eine ganz merkliche Strecke gegen die ursprüngliche Lage der Funken zurückbewegen. Ebenso zeigte sich die Erscheinung bei Verwendung eines Steinsalzprismas. In den feineren Versuchen wurde wiederum der active Funke senkrecht gestellt und in einiger Entfernung von ihm ein senkrechter Spalt angebracht, hinter welchem das Prisma sich befand. Wurde der active Funke durch Einschalten einer Leydener Flasche leuchtend gemacht, so liess sich leicht der vom Lichte erfüllte Raum hinter dem Prisma bestimmen. Mit Hülfe des passiven Funken konnte der von der hier besprochenen Wirkung erfüllte Raum begrenzt werden. Fig. 19 giebt das so unmittelbar durch die Versuche erhaltene Resultat im Grundriss in $\frac{1}{2}$ der natürlichen Grösse. Der Raum $abcd$

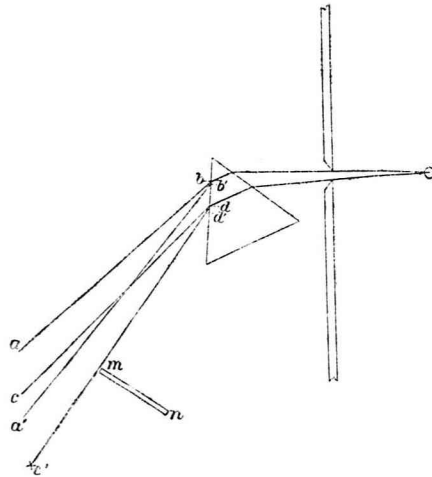


Fig. 19.

ist der vom Lichte, der Raum $a'b'c'd'$ der von unserer Wirkung erfüllt. Da die Grenzen des letzteren Raumes hier keine scharfen waren, so sind die Strahlen $a'b'$ und $c'd'$ in folgender Weise ermittelt. Der passive Funke wurde an einem entfernteren Punkte, etwa c' , an der Grenze des beeinflussten Gebietes aufgestellt. Es wurde alsdann von der Seite her ein Schirm mn (Fig. 19) mit senk-

eines Prismas von kleinem brechenden Winkel die Entfernung des Funkens vom Spalt so gross und die Breite des Spaltes so klein genommen, als es die Wahrnehmbarkeit der Wirkung irgend gestattete. Das sichtbare Licht war alsdann in ein schmales Spectrum ausgebreitet, und die Wirkung des activen Funkens zeigte sich in einem nicht sehr ausgedehnten Raume, welcher merklich stärker als das sichtbare Violett abgelenkt war. Fig. 20 zeigt die Verhältnisse, wie sie unmittelbar auf der Grundlage



Fig. 20.

des Prismas aufgezeichnet wurden, r ist die Richtung der rothen, v die Richtung der violetten Strahlen, w ist diejenige Richtung, in welcher sich der Einfluss der Wirkung des activen Funkens am stärksten geltend machte.

Ob eine Doppelbrechung der Wirkung stattfindet, habe ich nicht constatiren können. Meine Quarzprismen gestatteten keine hinreichende Trennung der Strahlen, meine Kalkspathstücke erwiesen sich als zu undurchlässig.¹⁾

17. Nach Kenntniss des bisher Mitgetheilten wird man darin einig sein, dass bis zum Beweise des Gegentheils das Licht des activen Funkens als die nächste Ursache der von ihm ausgehenden Wirkung betrachtet werden müsse. Jeder anderen Muthmassung, welche auf Bekanntes zurückgeht, wird durch den einen oder den anderen Versuch widersprochen. Ist aber die beobachtete Erscheinung überhaupt eine Wirkung des Lichtes, so ist sie doch nach Ergebniss der Brechungserscheinungen lediglich eine solche des ultravioletten Lichtes. Dass sie nicht eine solche der sichtbaren Lichtarten ist, wird schon durch den Umstand bewiesen, dass Glas und Glimmer für jene undurchlässig, für diese durchlässig sind. Dass hingegen die Wirkung eine solche des ultravioletten Lichtes sei, wird durch die Absorptionserschei-

¹⁾ [Siehe Anmerkung 10 am Schluss des Buches].

nungen an sich wahrscheinlich gemacht. Wasser, Bergkrystall, die Sulfate der Leichtmetalle sind hervorragend durchlässig für ultraviolettes Licht und für die hier untersuchte Wirkung; Benzol und verwandte Körper sind in auffälliger Weise undurchlässig für beide. Uebrigens scheinen die in unseren Versuchen wirk- samen Strahlen an der äussersten Grenze des bisher unter- suchten Spectrums zu liegen. Wenigstens ging das auf empfind- lichen, käuflichen Trockenplatten aufgenommene Spectrum des Funkens kaum bis zu der Stelle, an welcher die stärkste Ein- wirkung auf den passiven Funken stattfand. Auch zeigte sich in der Photographie kaum ein Unterschied, ob nun das Licht durch Leuchtgas hindurchgegangen war oder nicht, während der Unterschied in der Wirkung auf den Funken ein sehr grosser war. Fig. 21 zeigt die Ausdehnung einiger aufgenom- menen Spectren. Unter *a* ist in *r* der Ort des sichtbaren Roth, unter *v* derjenige des sicht- baren Violett, unter *w* derjenige der stärksten

Wirkung auf den passiven Funken angegeben. Die übrigen Reihen geben die Breite und Lage der photographischen Eindrücke, *b* nach dem Durchgang lediglich durch Luft und Quarz, *c* nach dem Durchgang durch Leuchtgas, *d* nach dem Durchgang durch eine dünne Glimmerplatte, *e* nach dem Durchgang durch Glas.

Fig. 21.

18. Unsere Annahme, dass die vorliegende Wirkung dem Lichte zuzuschreiben sei, erhält eine Bestätigung durch die Erfahrung, dass die gleiche Wirkung auch durch eine Reihe der gewöhnlichen Lichtquellen hervorgerufen werden kann. Freilich giebt die Lichtstärke im gewöhnlichen Sinne des Wortes durch- aus keinen Maassstab für die Wirksamkeit, und es bleibt für unsere Versuche der schwach sichtbare Funke des Inductoriums eine der wirksamsten Lichtquellen. Lässt man den Funkenstrom eines beliebigen Inductoriums zwischen Kugeln übergehen, zieht die Kugeln so weit auseinander, dass der Funke eben versagt, und nähert nun die Flamme einer Kerze bis auf etwa 8 cm, so setzt der Funkenstrom wieder ein. Man wird zunächst der heissen Luft der Flamme die Wirkung zuschreiben; bemerkt man aber, dass ein kleines und dünnes eingeschobenes Glimmerblättchen die Wirkung aufhebt, eine viel grössere Quarzplatte aber dieselbe

nicht aufhebt, so wird man die hier untersuchte Wirkung wieder- erkennen. Wie die Kerze wirken alle verwandten Flammen von Gas, Holz, Benzin u. s. w. Auch die nichtleuchtende Flamme des Alkohols und des Bunsen'schen Brenners erweisen sich wirksam, und bei der Kerzenflamme scheint die Wirkung mehr von dem unteren, nichtleuchtenden Theil, als von dem oberen, leuchtenden auszugehen. Von einer kleinen Wasserstofflamme war kaum eine Wirkung zu erhalten. Ferner erwiesen sich un- wirksam das Licht des in der Flamme oder galvanisch weiss- glühenden Platins, eine kräftige, in nächster Nähe des Funkens angezündete Phosphorflamme, brennendes Natrium und Kalium. Brennender Schwefel zeigte ebenfalls keinen Einfluss, doch wohl nur wegen der geringen Intensität seiner Flamme, denn die Flamme des Schwefelkohlenstoffs zeigte einige Wirkung. Eine weit kräftigere Wirkung als alle bisher genannten Lichtquellen zeigte das Magnesiumlicht, sein Einfluss machte sich in dem Abstand eines Meters geltend. Etwas schwächer und bis auf eine Entfernung eines halben Meters wirkend war das Drum- mond'sche Kalklicht, erzeugt mit Hülfe eines Leuchtgas-Sauer- stoff-Gebläses, doch dürfte die Wirkung wesentlich der Gebläse- flamme zukommen; ob nämlich der Kalkcylinder in die Flamme gebracht wurde oder nicht, machte keinen grossen Unterschied. Vom Sonnenlicht erhielt ich niemals eine unzweideutige Wirkung, zu welcher Zeit des Tages und des Jahres ich bisher auch zu prüfen Gelegenheit hatte. Concentrirte ich das Sonnenlicht mit Hülfe einer Quarzlinse auf den Funken, so war eine geringe Wirkung vorhanden, doch war eine solche auch mit Hülfe einer Glaslinse zu erhalten und dürfte deshalb der Erwärmung zuge- schrieben werden. Von allen Lichtquellen aber ist weitaus die wirksamste der elektrische Lichtbogen, er ist zugleich die einzige, welche mit dem Funken wetteifern kann. Zieht man die mit Kugeln versehenen Pole eines Inductoriums so weit auseinander, dass der Funke eben nicht mehr übergeht, und entzündet in 1, 2, 3, ja 4 m Abstand den Lichtbogen, so entsteht gleichzeitig mit ihm wieder der Funkenstrom und versagt auch wieder, wenn der Lichtbogen erlischt. Durch eine enge, vor dem Lichtbogen aufgestellte Oeffnung kann man das violette Licht des schwach- leuchtenden eigentlichen Bogens von dem der weissglühenden Kohlen trennen; man findet, dass der Einfluss im wesentlichen

schon von dem ersteren ausgeht. Mit dem Lichte des elektrischen Bogens habe ich einen grossen Theil der früher beschriebenen Versuche wiederholt, so die Versuche über die geradlinige Ausbreitung, die Reflexion, die Brechung der Wirkung, sowie die Absorption derselben durch Glas, Glimmer, Leuchtgas und andere Körper.

Nach den Resultaten unserer Versuche hat das ultraviolette Licht die Fähigkeit, die Schlagweite der Entladungen eines Inductoriums und verwandter Entladungen zu vergrössern. Die Verhältnisse, unter welchen es bei derartigen Entladungen seine Wirkung äussert, sind freilich recht complicirte, und es ist also wünschenswerth, die Wirkung auch unter einfacheren Bedingungen, insbesondere unter Vermeidung des Inductoriums zu studiren. Bei dem Versuche, nach dieser Hinsicht Vortheile zu erlangen, bin ich auf Schwierigkeiten gestossen.¹⁾ Ich beschränke mich deshalb gegenwärtig darauf, die festgestellten Thatsachen mitzutheilen, ohne eine Theorie über die Art, wie die beobachteten Erscheinungen zu Stande kommen, zu versuchen.

¹⁾ [Siehe Anmerkung 11 am Schluss des Buches].

5. Ueber die Einwirkung einer geradlinigen elektrischen Schwingung auf eine benachbarte Strombahn.

(Wiedemanns Ann. 34, p. 155. 1888.)

In einem früheren Aufsatze¹⁾ habe ich gezeigt, in welcher Weise man in einem geradlinigen, ungeschlossenen Leiter die diesem Leiter eigenthümliche elektrische Grundschwingung erregen kann. Ich habe auch gezeigt, dass eine solche Schwingung in einem benachbarten, fast geschlossenen Stromkreise eine sehr kräftige Inductionswirkung ausübt, sobald der letztere Kreis von gleicher Schwingungsdauer mit der erregenden Schwingung ist. Da ich diese Wirkungen zu weiteren Untersuchungen zu benutzen gedachte, so verfolgte ich die Erscheinung durch die verschiedenen Lagen, welche der secundäre Kreis gegen den erregenden Strom einnehmen kann. Die über eine geschlossene Strombahn berechnete Integralwirkung der Induction eines Stromelementes ist durch die bestehende Elektrodynamik eindeutig bestimmt. Da nun unsere secundäre Strombahn bis auf eine ausserordentlich kurze Funkenstrecke geschlossen ist, so vermuthete ich, dass diese Integralwirkung genügen würde, die neuen Erscheinungen zu erklären, doch fand ich, dass ich mich getäuscht hatte. Um zu einem Verständniss der nicht ganz einfachen Ergebnisse des Versuches zu gelangen, ist es nöthig, auch den secundären Kreis in jeder Hinsicht als ungeschlossenen Strom aufzufassen. Es genügt demgemäss nicht, auf die Integralkraft der Induction Rücksicht zu nehmen, sondern man muss die Vertheilung der Kraft auf die einzelnen Theile des Kreises beachten, und darf

¹⁾ Siehe No. 2, Seite 32.

auch die elektrostatische Kraft, welche von den sich ladenden Enden der Schwingung ausgeht, nicht ausser Rechnung lassen. Ursache hiervon ist die Geschwindigkeit, mit welcher in diesen Versuchen die Kräfte ihr Zeichen ändern. Eine sich langsam ändernde elektrostatische Kraft vermöchte auch bei grösster Intensität in unserem secundären Leiter keinen Funken hervorzurufen, weil die freie Elektrizität des Leiters sich so vertheilen könnte und vertheilen würde, dass sie die äussere Kraft aufhobe; in unseren Versuchen aber ändert sich die Richtung der Kraft so schnell, dass die Elektrizität keine Zeit hat, jene Vertheilung anzunehmen.

Es ist für die Darstellung bequem, die Theorie vorauszu- senden und an der Hand derselben die Erscheinungen zu besprechen, und ich werde deshalb diesen Weg einschlagen. Doch ist der logische Zusammenhang der entgegengesetzte, denn die mitgetheilten Thatsachen stehen fest unabhängig von der Theorie, und die entwickelte Theorie soll mehr in den Thatsachen, als in den gegebenen Erläuterungen ihre Stütze finden.

Der Apparat.

Bevor wir zur Entwicklung der Theorie schreiten, seien einige Worte den Apparaten gewidmet, mit welchen die Versuche ausgeführt wurden, und auf welche sich daher zunächst die Theorie bezieht. Der primäre Leiter bestand aus einem geraden Kupferdraht von 5 mm Durchmesser, an dessen Enden zwei aus Zinklech gefertigte Kugeln von 30 cm Durchmesser befestigt waren. Der Abstand der Mittelpunkte der letzteren betrug 1 m. In der Mitte war der Draht durch die $\frac{3}{4}$ cm lange Funkenstrecke unterbrochen, in welcher durch die möglichst kräftigen Entladungen eines grossen Inductoriums die Schwingungen erregt wurden. Die Richtung des Drahtes war horizontal, auch wurden die Versuche nur in der Nähe der durch den Draht gelegten Horizontalebene angestellt. Es ist dies keine Beschränkung der Allgemeinheit, da die Erscheinungen in jeder durch den Draht gelegten Meridianebe die gleichen sein müssen. Die secundäre Strombahn, aus einem 2 mm starken Drahte gebildet, hatte die Gestalt eines Kreises von 35 cm Radius, welcher bis auf die kurze, durch eine Mikrometerschraube regulirbare Funkenstrecke geschlossen war. Die Kreisform war im Gegen-

satz zu den früheren Versuchen aus folgendem Grunde gewählt. Schon die ersten Versuche hatten gezeigt, dass die Funkenlänge in verschiedenen Punkten des secundären Leiters verschieden gross ausfiel, wenn auch der Leiter als Ganzes nicht aus seiner Lage gerührt wurde. Bei Wahl der Kreisform war nun das Anbringen der Funkenstrecke in den verschiedenen Punkten in einfachster Weise möglich. Es war nämlich, um diese Aenderung auf das bequemste vornehmen zu können, der Kreis drehbar auf einer Axe befestigt, welche durch seinen Mittelpunkt ging und senkrecht auf seiner Ebene stand. Diese Axe wurde in verschiedenen Holzgestellen in solcher Weise befestigt, wie es für die jedesmaligen Versuche nöthig war.

Bei den gewählten Dimensionen war der secundäre Kreis sehr nahezu in Resonanz mit dem primären. Die genauere Abstimmung erfolgte durch kleine Metallbleche, welche zur Vermehrung der Capacität an den Polen angelöthet waren und bis zur Erreichung einer maximalen Funkenlänge vergrössert oder verkleinert wurden.

Zerlegung der auf den secundären Kreis wirkenden Kräfte.

Wir nehmen an, dass in jedem Punkte die elektrische Kraft, ohne ihre Richtung zu verändern, als einfache periodische Function der Zeit hin und her schwankt; auch nehmen wir an, dass diese Schwankung in allen Punkten gleiche Phase habe. Wenigstens für die Nähe des primären Leiters trifft das zu, und wir beschränken uns zunächst auf die Nähe. Wir bestimmen einen Punkt des secundären Kreises durch seinen im Kreise gemessenen Abstand s von der Funkenstrecke und nennen Σ die Componente der elektrischen Kraft, welche zu beliebiger Zeit im Punkte s in der Richtung des Kreiselementes ds wirkt. Dann ist Σ eine Function von s , welche nach Durchlaufung der ganzen Kreislänge S wieder zu ihrem Anfangswerthe zurückkehrt. Es giebt also eine Entwicklung von Σ nach Kreisfunctionen, deren Anfang ist:

$$\Sigma = A + B \cos 2\pi s / S + \dots + B' \sin 2\pi s / S + \dots$$

Die höheren Glieder berücksichtigen wir nicht. Sie bewirken, dass unsere Folgerungen nur angenähert gelten, insbesondere, dass in solchen Lagen, in welchen wir auf Verschwinden der Funken rechnen, doch noch schwache Funken auftreten. Doch

haben unsere Versuche einstweilen nicht die Feinheit, dass eine Betrachtung jener Glieder nützlich oder auch nur möglich wäre. Fassen wir dagegen die angemerktten Glieder näher ins Auge.

Die Kraft A zunächst wirkt in gleichem Sinne mit gleicher Grösse in allen Theilen des Kreises. Die elektrostatische Kraft trägt zu A nichts bei, da dieselbe, um den Kreis herum integriert, das Integral Null ergibt. Vielmehr entspricht A der Integralkraft der Induction. Man weiss, dass diese gemessen wird durch die in der Zeiteinheit erfolgende Aenderung der Zahl der magnetischen Kraftlinien, welche den Kreis durchschneiden. Betrachten wir das magnetische Feld, in welchem sich der Kreis befindet, als homogen, so wird demnach A proportional sein derjenigen Componente der magnetischen Kraft, welche senkrecht auf der Ebene des secundären Kreises steht. A wird also verschwinden, wenn die Richtung der magnetischen Kraft in die Ebene des secundären Kreises fällt. Der Kraft A entspricht eine Schwingung, deren Intensität unabhängig ist von der Lage der Funkenstrecke im Kreise; wir wollen die dieser Schwingung entsprechende Funkenlänge a nennen.

Was nun die übrigen beiden Glieder anlangt, so bemerken wir zunächst, dass die Kraft $B \sin 2\pi s/S$ nicht im Stande ist, die Grundschiwingung unseres Kreises zu erregen. Denn da sie völlig symmetrisch zu beiden Seiten der Funkenstrecke ist, so beeinflusst sie beide Pole in gleichem Sinne, kann daher eine Verschiedenheit derselben nicht hervorrufen. Anders verhält es sich mit der Kraft $B \cos 2\pi s/S$. Theilen wir den Kreis, von der Funkenstrecke ausgehend, in vier gleiche Theile, so wirkt in den beiden der Funkenstrecke gegenüberliegenden Theilen die Kraft in gleichem Sinne und regt die Grundschiwingung kräftig an. Allerdings stellt sich dieser Kraft die Kraft in denjenigen Theilen entgegen, welche der Funkenstrecke anliegen, aber sie vermag hier nicht in gleicher Weise zur Wirkung zu kommen. Denn da die Strömung an den offenen Enden des Kreises stets Null sein muss, ist die Elektrizität in der Nähe dieser Enden nicht in gleicher Freiheit beweglich, wie in der Mitte des Kreises. Man wird sich die Bedeutung dieses etwas abgekürzten Ausdruckes versinnlichen an dem Bilde einer zwischen zwei festen Punkten ausgespannten Saite, deren mittlere und äussere Theile von entgegengesetzt gerichteten Kräften angegriffen werden. Die

Saite als Ganzes wird den auf ihre Mitte wirkenden Kräften folgen, und der Grundton der Saite wird ertönen, wenn die Kräfte im Rhythmus desselben hin und her schwanken. So wird denn auch durch das Glied $B \cos 2\pi s/S$ die Grundschiwingung unseres Kreises erregt werden, und zwar in derjenigen Richtung, in welcher sie erregt würde, wenn nur in dem der Funkenstrecke gegenüberliegenden Drahttheil die Kraft thätig wäre. Die Intensität der Schwingung wird übrigens proportional sein der Grösse B . Um die Bedeutung derselben zu erkennen, wollen wir annehmen, das elektrische Feld, in welchem sich der Kreis befindet, sei nahezu homogen. Nennen wir alsdann E die Grösse der in diesem Felde wirkenden elektrischen Gesamtkraft, $\tilde{\omega}$ den Winkel, welchen ihre Richtung mit der Ebene des secundären Kreises bildet, und ϑ den Winkel, welchen die Projection der Kraft auf diese Ebene mit der vom Centrum nach der Funkenstrecke gezogenen Geraden bildet, so ist angenähert $\Sigma = E \cos \tilde{\omega} \sin (2\pi s/S - \vartheta)$,¹⁾ und also $B = -E \cos \tilde{\omega} \sin \vartheta$. Der Werth von B hängt also unmittelbar ab von der Gesamtkraft, sowohl elektrostatische als elektrodynamische Ursachen tragen zu demselben bei. B wird Null, wenn $\tilde{\omega} = 90^\circ$ ist, d. h. wenn die Gesamtkraft senkrecht steht auf der Ebene des Kreises, und zwar in diesem Falle für alle Lagen der Funkenstrecke im Kreise. B wird aber auch Null, wenn $\vartheta = 0$ ist, d. h. wenn die Projection der elektrischen Kraft auf die Ebene des Kreises die Richtung vom Centrum des Kreises auf die Funkenstrecke zu besitzt. Führen wir die Funkenstrecke in irgend einer Lage des Kreises in demselben herum, so ändert sich der Winkel ϑ , entsprechend ändert sich B und entsprechend auch die Intensität der Schwingung und die Funkenlänge. Die Funkenlänge, welche dem zweiten Gliede unserer Entwicklung entspricht, kann also angenähert dargestellt werden durch die Formel $\beta \sin \vartheta$.

Die beiden Glieder, welche jedes für sich die Funkenlänge a und $\beta \sin \vartheta$ hervorrufen, haben in Hinsicht der Zeit gleiche Phase. Gleiche Phase haben also auch die erregten Schwingungen,

¹⁾ Ist das Feld wirklich homogen, so ist demnach $A = 0$, und A wird also klein sein, wenn das Feld angenähert homogen ist. Das hindert aber nicht, dass die Kraft A eine Schwingung von gleicher Grössenordnung wie die Kraft $B \cos 2\pi s/S$ erzeugt.

und ihre Amplituden addiren sich. Da die Funkenlängen nun den maximalen Gesamtamplituden nahezu proportional sind, so addiren sich auch die Funkenlängen. Führen wir demnach in irgend einer Lage des secundären Kreises die Funkenstrecke in demselben herum, so muss sich die Funkenlänge darstellen lassen in der Form $\alpha + \beta \sin \vartheta$. Gleiche absolute Werthe des Ausdrucks bei verschiedenem Vorzeichen bedeuten dabei Gleiches, da sich die Richtung der Schwingung in der Funkenlänge nicht ausspricht. Von welchen Umständen α und β abhängen, haben wir angegeben, ihre absoluten Werthe zu finden, würde nur einer sehr entwickelten Theorie gelingen, doch genügt das Bisherige zum Verständniss der Erscheinungen.

Die Ebene des secundären Kreises ist vertical.

Stellen wir nun unseren Kreis irgendwo in der Nähe des primären Leiters so auf, dass seine Ebene vertical steht, sein Mittelpunkt aber in die durch den primären Leiter gelegte Horizontalebene fällt. Wir beobachten keine Funken im Kreise, sobald die Funkenstrecke auf der einen oder der anderen Seite ebenfalls in die Horizontalebene fällt, in anderen Lagen der Funkenstrecke aber treten mehr oder minder lange Funken auf. Da Auslöschung in zwei diametral entgegengesetzten Punkten eintritt, ist das α unserer Formel hier stets gleich Null, ϑ wird dann gleich Null, wenn die Funkenstrecke in die Horizontalebene fällt. Wir schliessen daraus: Erstens, dass die Linien der magnetischen Kraft in der Horizontalebene überall senkrecht stehen und im Raume also Kreise um die primäre Schwingung bilden, wie es auch die Theorie verlangt. Zweitens, dass die Linien der elektrischen Kraft in den Punkten der Horizontalebene in diese Ebene selbst und überall im Raume also in die durch die primäre Schwingung gelegten Ebenen fallen, was ebenfalls auch von der Theorie gefordert wird. Entfernen wir in irgend einer der hier betrachteten Lagen durch Drehung des Kreises um seine Axe die Funkenstrecke aus der Horizontalebene, so nimmt die Funkenlänge zu, bis die Funken im höchsten oder tiefsten Punkt des Kreises anlangen, woselbst sie Längen bis zu 2—3 mm erreichen. Dass die auftretenden Funken der Grundschwingung des Kreises angehören, wie es unsere Theorie verlangt, und nicht etwa der ersten Oberschwingung, was zu vermuthen nahe liegt, kann auf

verschiedene Weise nachgewiesen werden. So zeigt man durch kleine Aenderungen am Kreise, dass die Schwingung, welche diese Funken hervorruft, in Resonanz steht zur primären Schwingung, was für die Oberschwingungen nicht zutrifft. Ferner erlöschen die Funken, wenn man den Kreis durchschneidet in den Punkten, in welchen er die Horizontalebene durchsetzt, obwohl diese Punkte in Hinsicht der ersten Oberschwingung Knotenpunkte sind.

Halten wir nun die Funkenstrecke im höchsten Punkte fest und drehen den Kreis um eine verticale, durch seinen Mittelpunkt und die Funkenstrecke gelegte Axe, so finden wir, dass während einer vollen Drehung die Funken zweimal einen Maximalwerth erreichen und zweimal entweder Null werden oder doch der Auslöschung nahe kommen. Offenbar sind die Lagen, in welchen ersteres eintritt, diejenigen, in welchen die Richtung der elektrischen Kraft in die Ebene des Kreises fällt ($\tilde{\omega} = 0$); die Lagen aber, in welchen letzteres eintritt, sind diejenigen, in welchen jene Richtung auf dieser Ebene senkrecht steht ($\tilde{\omega} = 90^\circ$). Wir haben also nunmehr ein Mittel, die Richtung der elektrischen Kraft in jedem Punkte zu erkennen. Ich habe für eine Reihe von Punkten die Lage, in welcher die Funken sehr kurz wurden oder völlig verlöschten, aufgesucht und dieselben unmittelbar nach der Natur aufgenommen. Der untere Theil der Zeichnung (Fig. 22) giebt die Resultate. AA' ist der primäre Leiter, die geraden Linien mn

sind die Projectionen des secundären Leiters auf die Horizontalebene, doch sind nicht alle beobachteten Lagen in die Zeichnung aufgenommen. Die kurzen Geraden, welche auf jenen senkrecht stehen, geben die Richtung der Kraft. Da diese Kraft nirgends Null wird, wenn man von der Kugel A zur Kugel A' geht, so wechselt sie ihr Zeichen nicht; es war also erlaubt,

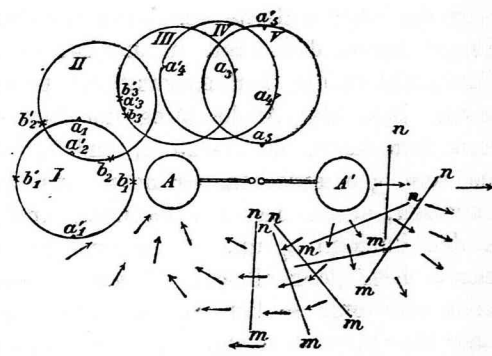


Fig. 22.

die Senkrechten mit Pfeilspitzen zu versehen in der Art, wie es geschehen ist. An die Zeichnung knüpfen wir die folgenden Bemerkungen:

1. Die Vertheilung der Gesamtkraft in der Nähe der geradlinigen Schwingung ist sehr ähnlich der Vertheilung der elektrostatischen Kraft, welche von den Enden der Schwingung ausgeht. Insbesondere stimmt die Richtung der Gesamtkraft in der Nähe der Mitte der Schwingung überein mit derjenigen der elektrostatischen Kraft; die derselben entgegenstehende elektrodynamische Kraft wird also überwältigt. Auch die Theorie ergibt, dass in diesen Gegenden die Kraft der Induction schwächer ist als die elektrostatische Kraft.

2. Doch bemerkt man ganz wohl einen Einfluss der Inductionswirkung. Es erscheinen nämlich die Kraftlinien gewissermaassen von der Axe der Schwingung weggedrängt; sie machen einen grösseren Bogen, um von A nach A' zu gelangen, als wenn nur die elektrostatische Kraft thätig wäre.¹⁾ Es erklärt sich dies daraus, dass die Inductionskraft die dem primären Leiter parallele Componente der elektrostatischen Kraft schwächt, auf die zum primären Leiter senkrechte Componente aber ohne Einfluss ist.

Die Ebene des secundären Kreises liegt horizontal.

Die Erscheinungen, welche eintreten, wenn die Ebene des secundären Kreises in die Horizontalebene fällt, wollen wir mit Hülfe der oberen Hälfte der Zeichnung (Fig. 22) erläutern. Wir bringen zuerst den Kreis in die Lage I, in welcher sich sein Mittelpunkt in der Verlängerung der primären Schwingung befindet. Dass hier Auslöschung der Funken eintritt, wenn die Funkenstrecke in die Punkte b_1 und b'_1 fällt, dürfen wir schon aus rein geometrischen Gründen aus dem Vorgegangenen schliessen; ebenso dass sich maximale und gleiche Funkenlängen in den Punkten a_1 und a'_1 finden. In meinen Versuchen betragen diese Funkenlängen 2,5 mm. Verschieben wir nun den Kreis ein wenig seitlich aus der bisherigen Lage heraus in die Lage II. Hier wird der Kreis von magnetischen Kraftlinien durchsetzt, das um den Kreis genommene Integral der Induc-

¹⁾ Es trat dies in der grossen Originalzeichnung besser hervor, als in der verkleinerten Copie.

tionskraft verschwindet nicht, a ist nicht Null. Unser Ausdruck $a + \beta \sin \vartheta$, in welchem a zunächst einen kleinen Werth hat, lässt also, da wir auf das Vorzeichen keine Rücksicht nehmen, zwei verschieden grosse Maxima $\beta + a$ und $\beta - a$ erwarten, welche für $\vartheta = 90^\circ$ eintreten, und deren Verbindungslinie also auf der Richtung der elektrischen Kraft senkrecht steht. Diese zwei Maxima müssen getrennt sein durch zwei Punkte der Funkenlosigkeit in der Nähe des kleineren Maximums. Dem entspricht die Erscheinung. Denn in den Punkten b_2 und b'_2 finden wir zusammengerückt unsere Nullpunkte wieder, dazwischen in den Punkten a_2 ¹⁾ und a'_2 maximale Funkenlängen, und zwar in a_2 von 3,5 mm, in a'_2 von 2 mm Länge. Die Linie $a_2 a'_2$ steht nahezu senkrecht auf der Richtung der elektrischen Kraft. Damit unsere Erklärung vollständig sei, haben wir noch zu zeigen, dass a_2 der Summe, a'_2 der Differenz der Wirkungen entsprechen müsse. Fassen wir den Fall ins Auge, dass die Funkenstrecke in a_2 liegt. Während die Kugel A positiv geladen ist, treibt die elektrische Gesamtkraft in dem a_2 gegenüberliegenden Theile des Kreises die positive Elektrizität von A weg, sucht also die positive Elektrizität in eine Kreisbewegung zu setzen, welche in unserer Zeichnung dem Sinne des Uhrzeigers entspricht. Zwischen den Kugeln A und A' ist die elektrostatische Kraft zu derselben Zeit von A gegen A' hin gerichtet, die ihr stets entgegengesetzte Inductionskraft ist also in der Nähe der Strombahn auf A zu gerichtet und ist überall im Raume dieser Richtung parallel. Da diese Kraft nun in unserem Kreise in der Nähe der primären Schwingung stärker wirkt als in der Ferne derselben, so sucht auch sie die positive Elektrizität in eine Kreisbewegung zu setzen, welche dem Sinne des Uhrzeigers entspricht. Beide Ursachen wirken also in a_2 in dem gleichen Sinne und verstärken sich. Ganz analog zeigt man, dass sie sich in a'_2 schwächen. Die Erscheinung ist sonach vollständig erklärt.

Rücken wir nun mit unserem Kreise der Mitte der primären Schwingung näher nach III. Die beiden Punkte der Auslöschung fallen hier in einen zusammen, das eine Maximum ist verschwunden, dem einen sehr ausgedehnten Gebiet der Auslöschung a'_3 liegt das zweite Maximum a_3 gegenüber mit einer

¹⁾ Dieses im Holzschnitt vergessene Zeichen ist im Kreise II diametral gegenüber a'_2 zu ergänzen.

Funkenlänge von 4 mm. Offenbar ist hier $\alpha = \beta$ und die Funkenlänge durch die Formel $\alpha (1 + \sin \vartheta)$ dargestellt. Die Linie $a_3 a'_3$ steht wieder senkrecht auf der Richtung der elektrischen Kraft. Nähern wir den Kreis weiter der Mitte der primären Schwingung, so wächst α über β hinaus. Der Ausdruck $\alpha + \beta \sin \vartheta$ wird dann für keinen Werth von ϑ mehr Null, sondern geht zwischen dem Maximalwerth $\alpha + \beta$ und dem Minimalwerth $\alpha - \beta$ hin und her. So zeigt denn auch der Versuch in den fraglichen Lagen des Kreises keine Punkte der Funkenauslöschung mehr, sondern nur Maxima und Minima der Funken. In der Lage IV haben wir in a_4 eine Funkenlänge von 5,5 mm, in a'_4 eine Länge von 1,5 mm. In der Lage V haben wir in a_5 eine Funkenlänge von 6 mm, in a'_5 eine solche von 2,5 mm¹⁾, in den mittleren Punkten mittlere Längen. Die Verbindungslinie aa' dreht sich beim Uebergang aus der Lage III in die Lage V schnell aus der zur primären Strömung parallelen in die zu derselben senkrechten Richtung, bleibt also stets angenähert senkrecht zur Richtung der elektrischen Kraft.

In den zuletzt erwähnten Lagen verdanken die Funken im wesentlichen der Inductions-kraft ihre Entstehung. Es war also kein Fehler, wenn ich in meiner ersten Arbeit die Erscheinung in diesen Lagen als eine Inductionswirkung ansprach. Gänzlich unabhängig von elektrostatischen Ursachen ist die Funkenbildung indessen auch in diesen Lagen nur dann, wenn wir die Funkenstrecke in die mittlere Lage zwischen Maximum und Minimum bringen, woselbst $\beta \sin \vartheta$ gleich Null wird.

Die übrigen Lagen des secundären Kreises.

Diejenigen Lagen, welche wir noch nicht besprochen haben, und in welchen der secundäre Kreis geneigt ist gegen die Horizontalebene, lassen sich als Uebergangszustände zwischen den besprochenen Lagen auffassen. Ich habe keine Erscheinungen bemerkt, welche sich nicht in den Rahmen der gegebenen Theorie fügten, wohl aber Bestätigungen der Theorie gefunden. Betrachten wir nur einen Fall. Der Kreis liege zunächst in der Horizontalebene in der Lage V, und die Funkenstrecke liege der

¹⁾ In diesen Lagen muss der secundäre Funken vor dem Licht des primären Funkens geschützt werden, wenn der Versuch rein sein soll.

primären Schwingung zugewandt im Punkte a_5 . Der Kreis werde nun um eine horizontale Axe, welche durch seinen Mittelpunkt parallel zur primären Schwingung gelegt ist, gedreht, sodass die Funkenstrecke sich hebt. Die elektrische Kraft bildet während der Drehung stets einen rechten Winkel mit der vom Mittelpunkt zur Funkenstrecke gezogenen Geraden, somit ist ϑ stets gleich 90° . β hat in allen Lagen nahezu den gleichen Werth; α aber ändert sich nahe wie der Cosinus des Neigungswinkels φ der Kreisebene gegen die Horizontalebene, da α den vom Kreise geschnittenen magnetischen Kraftlinien proportional ist. Bezeichnet daher α_0 den Werth von α für die Ausgangslage, so ist der Werth von α in den übrigen Lagen $\alpha_0 \cos \varphi$, und es ist also zu erwarten, dass der Zusammenhang der Funkenlänge mit dem Winkel φ durch den Ausdruck $\alpha_0 \cos \varphi + \beta$, worin $\alpha_0 > \beta$, gegeben sei. Dies bestätigt die Erfahrung. Denn indem wir die Funkenstrecke heben, nimmt die Länge der Funkenstrecke von dem Anfangswerthe von 6 mm an gleichmässig ab, erreicht im höchsten Punkte ihrer Bahn die Länge von 2 mm, sinkt dann aber im zweiten Quadranten weiter bis fast auf Null, wächst wieder bis zu dem kleineren Maximum von 2,5 mm, welches in der Horizontalebene stattfindet, um wieder abzunehmen und nach Durchlaufung derselben Zustände in umgehrter Richtung zum Anfangswerthe zurückzukehren.

Halten wir während der letzterwähnten Drehung den Kreis fest in derjenigen Lage, in welcher sich die Funkenstrecke im höchsten Punkte ihrer Bahn befindet, so lässt eine verticale Hebung des ganzen Kreises die Funken schwächer werden und schliesslich fast verschwinden, eine verticale Senkung befördert die Entwicklung der Funken. Befindet sich die Funkenstrecke unter übrigens gleichen Umständen im tiefsten Punkte, so gelten die entgegengesetzten Aussagen. Diese Erscheinungen lassen sich durch rein geometrische Betrachtungen aus dem Vorangegangenen ableiten.

Die Kräfte in grösseren Abständen.

Wir haben oben einen Weg angegeben, die Richtung der elektrischen Gesamtkraft in jedem Punkte auf dem Wege des Versuchs zu ermitteln. Es liegt nahe, diesen Weg auch in grösseren Entfernungen zu betreten, und der Versuch erscheint

um so lohnender, als die verschiedenen bestehenden Theorien der Elektrodynamik in Hinsicht auf die Vertheilung der Kraft in der Umgebung eines ungeschlossenen Stromes weit auseinander gehen. Wir stellen also die Ebene unseres Kreises in die verticale Lage, bringen die Funkenstrecke in den höchsten Punkt und suchen durch Drehung um eine verticale Axe zu ermitteln, in welcher Lage die Funken am längsten sind, in welcher Lage sie verlöschen oder fast verlöschen. Indem wir uns nun zunächst auf 1—1,5 m von der primären Schwingung entfernen, stossen wir auf eine unerwartete Schwierigkeit. Die Maxima und Minima verlieren nämlich, abgesehen von bestimmten Lagen, an Deutlichkeit, sodass eine Einstellung auf dieselben schwer ist, ja in gewissen Punkten werden die Unterschiede der Funkenlängen während der Drehung des Kreises so klein, dass die Angabe einer bestimmten Richtung der Kraft unmöglich wird. Bemerkenswerth ist nun, dass diese Schwierigkeit wieder verschwindet, wenn wir eine Entfernung von etwa 2 m überschritten haben. Allerdings sind die Funken jetzt sehr klein, dieselben müssen im Dunkeln und mit der Lupe beobachtet werden, aber sie erlöschen scharf in einer bestimmten Lage des Kreises und sind am kräftigsten in der dazu senkrechten Lage. In den grösseren Entfernungen nehmen die Funken nur sehr langsam ab. Die äusserste Entfernung, bis zu welcher sie sich verfolgen lassen, habe ich noch nicht feststellen können. Als ich den primären Leiter in der einen Ecke eines grossen Hörsaales von 14 m Länge und 12 m Breite aufstellte, waren noch in den entferntesten Theilen des Saales die Funken wahrnehmbar, der ganze Raum schien erfüllt von den Schwingungen der elektrischen Kraft. In den benachbarten Räumen war freilich auch in geringeren Abständen die Wirkung nicht mehr merklich, durch feste Wände geht sie nur sehr gedämpft hindurch. In dem genannten Hörsaal bestimmte ich nun die Vertheilung der Kraft in folgender Weise: Wo die Richtung der Kraft fest bestimmbar war, wurde sie durch einen Kreidestrich auf dem Boden des Raumes angegeben; wo sie aber nicht wohl bestimmbar war, wurde ein Stern auf den Boden gezeichnet. Die Figur 23 giebt ein verkleinertes Bild eines Theiles der so entstandenen Zeichnung; wir wollen an dieselbe die folgenden Bemerkungen knüpfen:

1. In Entfernungen, welche 3 m übertreffen, ist die Kraft überall parallel der primären Schwingung. Es ist dies offenbar das Gebiet, in welchem nur noch die Induktionskraft wirksam ist, während die elektrostatische Kraft schon unmerklich geworden ist. Alle Theorien stimmen darin überein, dass die Kraft der Induction eines Stromelementes abnehme umgekehrt proportional der Entfernung, während die elektrostatische Kraft als Differenzwirkung der beiden Pole abnimmt umgekehrt proportional der dritten Potenz der Entfernung. Es ist bemerkenswerth, dass in der Richtung der Schwingung die Wirkung sehr viel schneller abnimmt, als in der dazu senkrechten Richtung, sodass in ersterer die Wirkung sich schon in 4 m Entfernung kaum wahrnehmen lässt, während sie in letzterer Richtung jedenfalls weiter als auf 12 m reicht. Viele der als möglich angenommenen Elementargesetze der Induction werden versagen, wenn sie auf die Uebereinstimmung mit diesen Ergebnissen des Versuchs geprüft werden.

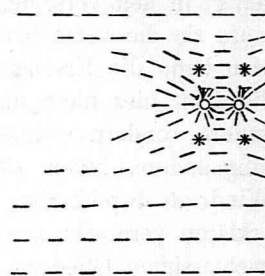


Fig. 23.

2. Dass in Entfernungen, welche kleiner als 1 m sind, der Charakter der Vertheilung durch die elektrostatische Kraft gegeben ist, haben wir schon früher erwähnt.

3. In den Punkten zweier bestimmten Geraden lässt sich die Richtung der Kraft in allen Entfernungen bestimmen. Die erste dieser Geraden ist die Richtung der primären Schwingung selbst, die zweite ist die auf der Mitte der primären Schwingung errichtete Senkrechte. In der letzteren wird die Grösse der Kraft in keiner Entfernung gleich Null, die Grösse der durch sie erregten Funken nimmt gleichmässig von grösseren zu kleineren Werthen ab. Auch in dieser Hinsicht stehen die Erscheinungen im Widerspruch mit einzelnen der möglichen Elementargesetze, welche ein Verschwinden in bestimmter Entfernung verlangen.

4. Ein eigenthümliches Ergebniss des Versuchs ist die Existenz der Gebiete, in welchen sich die Richtung der Kraft nicht bestimmen lässt, und welche in unserer Zeichnung durch je einen Stern bezeichnet sind. Im Raume bilden diese Gebiete zwei

Ringe um die geradlinige Schwingung. Da die Kraft hier in allen Richtungen nahezu gleich stark wirkt, ohne doch gleichzeitig in den verschiedenen Richtungen wirken zu können, so muss sie die verschiedenen Richtungen nacheinander annehmen. Man kann die Erscheinung daher wohl nur dahin deuten, dass die Kraft hier nicht unter gleichbleibender Richtung ihre Grösse ändere, sondern vielmehr bei nahezu gleicher Grösse ihre Richtung ändere, indem sie bei jeder Schwingung die Zeichen der Windrose durchkreist. Ich habe dies Verhalten ebensowenig zu erklären vermocht aus den in unserer vereinfachten Theorie vernachlässigten Gliedern, als aus den Oberschwingungen, welche ja unserer Grundschwingung wohl beigemischt sein mögen. Auch scheint mir, dass keine der Theorien, welche auf die Annahme einer unvermittelten Fernwirkung aufgebaut sind, etwas Aehnliches vermuthen lässt. Eine einfache Erklärung der Erscheinung aber ergibt sich, wenn man für die elektrostatische Kraft und die Kraft der Induction verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten zulässt. Denn in den Gebieten, von welchen wir reden, stehen beide Kräfte senkrecht aufeinander und sind von gleicher Grössenordnung; haben dieselben also infolge des durchlaufenen Weges eine merkliche Phasenverschiebung gegeneinander erhalten, so wird ihre Resultante, die Gesamtkraft, bei jeder Schwingung die Richtungen der Windrose durchlaufen, ohne in einer Lage sich der Null zu nähern.

Eine verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrostatischen und der elektrodynamischen Kraft setzt eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit mindestens einer derselben voraus. Es scheint mir daher sehr wahrscheinlich, dass hier die erste Andeutung für eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrischen Fernwirkungen vorliege.

In meiner vorigen Arbeit habe ich angemerkt¹⁾, dass geringfügige Umstände oft ohne ersichtlichen Zusammenhang die Fähigkeit des primären Funkens, Schwingungen zu erregen, zerstören. Wenigstens einen derartigen Umstand habe ich auf seine gesetzmässige Grundlage zurückführen können. Es hat sich nämlich gezeigt, dass die Beleuchtung des primären Funkens die

¹⁾ Siehe No. 2. p. 32.

Befähigung desselben zur Erregung schneller elektrischer Bewegungen aufhebt. Beobachtet man also die in einem secundären Leiter inducirten Funken, oder die Funken in einem beliebigen, an den Entladungskreis angeschlossenen Nebenkreis, so sieht man diese Funken erlöschen, sobald in der Nähe des primären Funkens ein Stück Magnesiumdraht abgebrannt oder eine elektrische Bogenlampe angezündet wird. Gleichzeitig verliert der primäre Funke dann seinen knallenden Klang. Besonders empfindlich ist der Funke gegen das Licht einer zweiten Entladung. So bleiben die Schwingungen stets aus, wenn man aus den einander zugekehrten Flächen der Polkugeln durch einen isolirten kleinen Leiter Funken zieht, diese Funken mögen noch so unscheinbar sein. Ja, es genügt, eine feine Spitze dem Funken zu nähern oder einen Punkt der inneren Flächen der Polkugeln mit einer Siegellackstange, einem Glasstab, einem Glimmerblättchen zu berühren, um die Natur des Funkens zu verändern und die Schwingungen aufzuheben. Einige naheliegende Versuche scheinen mir zu zeigen, und weitere Versuche werden es gewiss bestätigen, dass auch in den letztgenannten Fällen das Licht einer für das Auge kaum sichtbaren Seitenentladung die wirksame Ursache der Veränderung ist.

Diese Erscheinungen sind offenbar eine besondere Form derjenigen Einwirkung des Lichts auf die elektrische Entladung, von welcher ich vor einiger Zeit eine erste Form beschrieben habe, und welche inzwischen auch von den Herren E. Wiedemann, H. Ebert und W. Hallwachs in weiteren Formen studirt worden ist.

6. Ueber Inductionserscheinungen, hervorgerufen durch die elektrischen Vorgänge in Isolatoren.

(Sitzungsber. d. Berl. Akadem. v. 10. Nov. 1887. Wiedemanns Ann.
34, p. 273.)

Dass die elektrischen Vorgänge in den Isolatoren neben den sicher nachgewiesenen elektrostatischen Wirkungen auch die entsprechenden elektrodynamischen Wirkungen mit sich führen, ist eine der Grundannahmen gerade der aussichtsvollsten elektrischen Theorien. Jene Annahme ist auch längst durch die Gesammtheit der elektrischen Erscheinungen in hohem Grade wahrscheinlich geworden; als das sichere Ergebniss irgend welcher directen Beobachtungen aber kann sie bislang kaum bezeichnet werden. Einen Beitrag zur Ausfüllung dieser misslichen Lücke hoffe ich in Folgendem zu bieten, indem ich eine Reihe von Versuchen beschreibe, welche sich mit geringen Mitteln wiederholen lassen, welche sicher gelingen, und in welchen sich eine von Isolatoren ausgehende Inductionswirkung offenbart. Eine magnetische Wirkung, welche von den Vorgängen in einem Isolator herrührt, hat sich bereits in einem Versuche des Herrn Röntgen¹⁾ gezeigt, vorausgesetzt, dass die endgültige Mittheilung über jenen Versuch die demselben zunächst gegebene Deutung bestätigt.

Zum Nachweis der Inductionswirkung dienten mir die äusserst schnellen elektrischen Schwingungen, welche in ungeschlossenen

¹⁾ W. C. Röntgen, Sitzungsber. d. Berl. Acad. 1885. p. 195, vgl. auch die neuere Arbeit, Sitzungsber. der Berl. Acad. 1888. p. 23.

metallischen Leitern durch passend angebrachte Funken erregt werden können.¹⁾ Die Methode ist die folgende: Ein primärer Leiter, in welchem Schwingungen der genannten Art erregt werden, wirkt inducirend auf einen secundären Leiter ein. Die Beobachtung der inducirten Bewegung geschieht mit Hilfe einer eingeschalteten Funkenstrecke. Damit die Beobachtung recht empfindlich sei, sind beide Leiter auf gleiche Schwingungsdauer gebracht. Der secundäre Leiter wird nun dem primären möglichst genähert, jedoch in solcher Lage, dass die auf seine verschiedenen Theile wirkenden Kräfte sich aufheben, sodass er funkenfrei erscheint. Wird jetzt das Gleichgewicht durch Annäherung von Leitern gestört, so treten wieder Funken auf; das System bildet eine Art von Inductionswage. Aber diese Inductionswage hat das Eigenthümliche, dass sie auch anspricht, wenn grössere Massen von Isolatoren ihr genähert werden. Bei der Geschwindigkeit der Schwingungen sind nämlich die in den Isolatoren durch dielektrische Polarisirung verschobenen Elektrizitätsmengen von derselben Grössenordnung, wie die in den Metallen durch Leitung in Bewegung gesetzten.

Der Apparat.

Die Figur 24 zeigt den Apparat, durch welchen dies Princip verwirklicht wurde. Nur die wesentlichen Theile sind gezeichnet, man hat sich dieselben durch ein leichtes Holzgerüst verbunden zu denken. AA' ist der primäre Leiter, bestehend aus zwei quadratischen Messingplatten von 40 cm Seitenlänge, welche durch einen 70 cm langen, $\frac{1}{2}$ cm starken Kupferdraht verbunden sind. In der Mitte des letzteren ist eine $\frac{3}{4}$ cm lange Funkenstrecke eingeschaltet, gut polirte Messingkugeln bilden die Pole. Führt man nun den letzteren die möglichst kräftige Entladung eines grösseren Inductoriums zu, so laden sich zunächst die Platten A und A' in entgegengesetztem Sinne und entladen sich dann im Augenblick der Entstehung des Funkens gegeneinander unter Bildung der dem Leiter AA' eigenthümlichen Oscillationen, deren Schwingungsdauer etwa auf den hundertmillionsten Theil der Secunde geschätzt werden kann.

¹⁾ Siehe No. 2 und No 5.

Die sogleich nachfolgende Entladung des Inductoriums ist auf die hier zu besprechenden Erscheinungen von ebenso geringem Einfluss, wie die Anwesenheit des Induktionsapparates selbst und der Zuleitungen zu ihm.

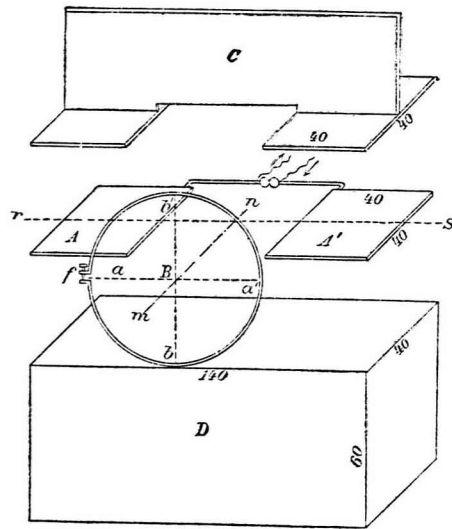


Fig. 24.

Der sekundäre Leiter *B* ist ein genauer Kreis von 35 cm Radius aus 2 mm starkem Kupferdrahte, er enthält die Funkenstrecke *f*, deren Länge durch eine feine Schraube zwischen einigen hundertstel und einigen ganzen Millimetern variiert werden kann. Bei den gewählten Ausmessungen des Kreises *B* findet Resonanz statt zwischen ihm und dem primären Leiter, und es können bei günstiger Lage sekundäre Funken

von 6—7 mm Länge erhalten werden. Für unsere Versuche wird der Kreis drehbar auf einer Axe befestigt, welche durch seinen Mittelpunkt geht und senkrecht auf seiner Ebene steht; eine Drehung um diese Axe ändert also die Lage des Kreises nicht, sondern führt nur die Funkenstrecke in ihm herum. Die Drehungsaxe wird so orientirt, dass sie in die Ebene der Platten *A* und *A'* und zwar in die Mittellinie *mn* derselben fällt. Fügen wir noch hinzu, dass der geringste Abstand zwischen *AA'* und *B* 12 cm beträgt, so haben wir unseren Apparat vollständig beschrieben. An demselben beobachten wir nun die folgenden Erscheinungen:

Fällt die Funkenstrecke *f* in die horizontale Ebene von *AA'*, also in die Punkte *a* und *a'*, so ist sie völlig funkenfrei. Eine Drehung des Kreises um wenige Grade aus diesen Lagen in dem einen oder dem anderen Sinne lässt schon winzige Fünkchen entstehen. Diese Fünkchen wachsen an Stärke und Länge, je mehr wir die Funkenstrecke von den Gleichgewichtslagen ent-

fernen, und erreichen Maximallängen von etwa 3 mm, wenn *f* in den höchsten und den tiefsten Punkt *b* und *b'* des Kreises tritt. Die sich in dieser Weise offenbarenden Schwingungen des sekundären Leiters verdanken jedesmal ihre Entstehung der oscillirenden elektrischen Kraft, welche in dem *f* gegenüberliegenden Theile des Kreises *B* auftritt. Obwohl der Gestalt nach fast geschlossen, ist *B* doch als ein ungeschlossener Stromkreis zu betrachten; die der Funkenstrecke beiderseits benachbart liegenden Teile wirken nur als Capacitäten der Stromenden. Die wirkende Kraft setzt sich zusammen aus der elektrostatischen Kraft und der ihr entgegengerichteten Kraft der Induction; die erstere als die grössere von beiden bestimmt das Vorzeichen der gesammten Kraft. Bezeichnen wir das Vorzeichen dieser Kraft und die Amplitude der erregten Schwingung als positiv, wenn *f* im höchsten Punkte des Kreises liegt, so haben wir relativ zu einer festen Richtung im Kreise *B* die Kraft und die Amplitude als negativ zu rechnen, wenn sich *f* im tiefsten Punkte befindet. Durch den Nullwerth in der Gleichgewichtslage geht die Amplitude von dem einen zu dem anderen Vorzeichen über.

Es erscheint nützlich für das Folgende, auch diejenigen Erscheinungen zu betrachten, welche eintreten, wenn wir den Kreis *B* parallel mit sich selbst, und ohne ihn aus seiner Ebene zu entfernen, ein wenig nach unten verschieben. Es zeigt sich, dass hierdurch die Funkenlänge im höchsten Punkte zunimmt, im tiefsten abnimmt, und dass die funkenfreien Punkte — die Nullpunkte, wie wir sie nennen wollen — nicht mehr in der durch die Axe gelegten Horizontalen liegen, sondern auf beiden Seiten um einen gewissen Winkel nach unten gedreht erscheinen. Durch die geringe Verschiebung hat sich die Wirksamkeit der elektrostatischen Kräfte kaum geändert, wohl aber die Wirksamkeit der Kräfte der Induction. Denn die letzteren geben nunmehr, um den geschlossenen Kreis *B* herumintegriert ein von Null verschiedenes Integral, sie geben daher Anlass zu einer Schwingung, deren Amplitude ein von der Lage der Funkenstrecke unabhängiges Vorzeichen besitzt, und zwar ist dieses Vorzeichen nach unserer Rechnungsweise das positive. Denn die Richtung der Integralkraft der Induction ist entgegengesetzt der elektrostatischen Kraft in der oberen Hälfte, gleich gerichtet aber in der unteren Hälfte des Kreises *B*, in welcher letzterer wir das Vor-

zeichen der elektrostatischen Kraft als positiv bezeichneten. Da nun die neu hinzutretende Schwingung gegen die schon betrachtete eine Phasendifferenz nicht besitzt, so addirt sich ihre Amplitude einfach zu der jener Schwingung, und so erklären sich die Erscheinungen.

Eine vollständigere Begründung der Deutungen, welche wir hier den Erscheinungen unterlegt haben, findet man in der vorangegangenen Arbeit.¹⁾

Annäherung von Leitern.

Bisher war angenommen, dass die Leiter AA' und B in einem grösseren Zimmer in möglichster Entfernung von allen störenden Gegenständen aufgestellt seien. Auch ist eine solche Aufstellung notwendig, wenn wir wirklich Funkenlosigkeit in den Punkten a und a' erzielen wollen. Denn wir bemerken bald, dass genäherte Leiter, z. B. längere Metallstäbe, welche wir unterhalb der Vorrichtung auf die Erde legen, Funken auftreten lassen. Bei einiger Aufmerksamkeit finden wir, dass selbst der Körper des Beobachters merklichen Einfluss ausübt. Halten wir uns in der Verlängerung der Axe mn in 1—2 m Entfernung, so ist der Apparat funkenfrei; wir haben aber nur nöthig, die Funkenstrecke aus nächster Nähe zu untersuchen, um sicher jedesmal Funken vorzufinden. Aus der Nothwendigkeit, die sehr feinen Fünkchen aus der Ferne zu betrachten, ergiebt sich die weitere Nothwendigkeit, mit geschontem Auge im dunkeln Zimmer zu beobachten. Wir wollen nun einen Leiter auswählen, welcher eine nicht zu geringe Wirksamkeit besitzt, und dessen Schwingungsdauer wir als kleiner, als die unserer primären Schwingung voraussetzen dürfen. Der Leiter C unserer Zeichnung, aus Metallblech gefertigt, entspricht diesen Bedingungen. Nähern wir denselben von oben dem primären Leiter AA' , so beobachten wir das Folgende: Im höchsten Punkte b hat die Funkenlänge abgenommen, im tiefsten Punkte b' hat sie zugenommen, die Nullpunkte erscheinen nach oben hin, d. h. gegen den genäherten Leiter gedreht, während in den früheren Nullpunkten sich nunmehr merkliche Funken vorfinden. Aus dem letzten Versuche des vorigen Abschnittes wissen wir, welche Wirkung eine Ver-

¹⁾ Siehe No. 5.

schiebung des Leiters AA' nach oben haben würde. Qualitativ die gleiche Wirkung würde ein oberhalb AA' angebrachter zweiter, dem Strom AA' stets gleichgerichteter Strom haben. Unser Leiter C übt nun genau die entgegengesetzte Wirkung aus, und diese Wirkung erklärt sich also aus dem früheren als eine von C ausgehende Inductionswirkung, wenn wir in C einen dem Strom in AA' stets entgegengesetzten Strom annehmen dürfen. Aber diese Annahme ist sogar nothwendig, denn die vorwiegend wirkende elektrostatische Kraft sucht einen solchen Strom hervorzubringen, und da die Eigenschwingung des Leiters schneller ist als die der Kraft, so erfolgt die Strömung mit gleicher Phase wie die erregende Kraft. Um die Richtigkeit dieser Deutungen auf die Probe zu stellen, habe ich den Versuch in der Weise erweitert, dass ich die horizontalen Platten des Leiters C in ihrer Lage belies, das verticale Blech aber entfernte und durch immer längere und dünnere Drähte ersetzte, in der Absicht, dadurch die Schwingungsdauer des Leiters C allmählich zu vergrössern. Die Folgen dieser fortschreitenden Aenderung waren diese: Zunächst rückten die Nullpunkte immer mehr nach oben, wurden aber zugleich immer verwaschener, indem in ihnen nicht mehr eine Auslöschung, sondern nur noch ein Minimum der Funkenlänge stattfand. Die Funkenlänge im höchsten Punkte war bisher weit kleiner als die im tiefsten, nach dem Verschwinden der Nullpunkte aber begann sie wieder zu wachsen. In einem gewissen Stadium waren die Funken im höchsten und tiefsten Stand wieder gleich, aber nirgends im Kreise waren Nullpunkte zu finden, sondern überall fand sehr lebhaft Funkenbildung statt. Von hier ab verminderte sich nun die Funkenlänge im tiefsten Punkte, und bald entwickelten sich in der Nähe desselben zwei zunächst nur schwach ausgesprochene Nullpunkte, welche sich allmählich verschärften und den Punkten aa' näherten, aber nunmehr stets auf der dem Leiter C abgekehrten Seite des Kreises lagen. Schliesslich fielen sie in die Punkte a und a' selbst, und es war dann der gleiche Zustand eingetreten, welcher vor Annäherung des Leiters C geherrscht hatte. Dieser Verlauf entspricht demjenigen, welchen wir nach unserer Auffassung erwarten durften. Nähert sich nämlich die Schwingungsdauer des Leiters C derjenigen des Leiters AA' , so nimmt die Intensität der Strömung in C zu, zugleich aber tritt eine Phasendifferenz

zwischen dieser Strömung und der sie erregenden Kraft ein. Im Stadium der Resonanz ist die Strömung in C am heftigsten, und die Phasendifferenz beträgt, wie bei jeder Resonanz einer schwach gedämpften Schwingung, nahezu eine Viertelschwingungsdauer; es ist daher eine Interferenz zwischen den durch AA' und den durch C in B erregten Schwingungen nicht mehr möglich. Dieser Zustand entspricht offenbar dem oben besonders hervorgehobenen Stadium. Wird die Schwingungsdauer von C wesentlich grösser als die von AA' , so nimmt die Amplitude der Schwingungen von C wieder ab, ihre Phasendifferenz gegen die erregende Kraft nähert sich dabei dem Werthe einer halben Schwingungsdauer. Die Strömung in C ist nun in jedem Augenblicke gleichgerichtet mit derjenigen in AA' , eine Interferenz der durch beide Strömungen in B erregten Schwingungen ist wieder möglich, aber die Wirkung des Leiters C muss jetzt entgegengesetzt derjenigen sein, welche er im ursprünglichen Zustande hatte.

Nähert man den Leiter C dem Leiter AA' beträchtlich, so werden die Funken im Kreise B überhaupt klein. Eine solche Annäherung vergrössert die Schwingungsdauer von AA' und hebt dadurch die Resonanz zwischen AA' und B auf.

Annäherung von Nichtleitern.

Schon die roheste Schätzung lässt erkennen, dass in grösseren Massen isolirender Substanzen, welche wir dem Apparate nähern, mindestens ebenso grosse Elektrizitätsmengen durch dielektrische Polarisation verschoben werden müssen, als sich durch Leitung in den dünnen Metallstäben bewegten, deren Annäherung sich schon deutlich in dem Apparate geltend machte. Würde sich demnach die Annäherung solcher Isolatoren ohne Einfluss auf die Vorgänge in unserem Apparate zeigen, so würde dadurch bewiesen sein, dass die durch dielektrische Polarisation verschobene Elektrizität eine entsprechende elektrodynamische Wirkung nicht ausübt. Sind aber die von Faraday und Maxwell ausgegangenen Anschauungen richtig, so dürfen wir einen bemerkbaren Einfluss erwarten, und zwar würden wir vermuthen müssen, dass die Annäherung eines Isolators wirkt wie die eines Leiters von sehr geringer Dauer der Eigenschwingung. Die letztere Vermuthung findet sich vollständig bestätigt durch die Versuche, welche keinen

anderen Schwierigkeiten begegnen, als der Beschaffung hinreichend grosser isolirender Massen.

Die ersten Versuche stellte ich an mit einem Materiale, welches leicht zur Hand ist, mit Papier. Ich häufte aus Büchern unterhalb des Leiters AA' einen parallelepipedischen Körper von 1,5 m Länge, 0,5 m Breite und 1 m Höhe auf, bis zur Berührung mit den Platten A und A' . Es zeigte sich deutlich, dass in den vorher funkenfreien Lagen des Kreises B nunmehr Funken auftraten, und dass erst eine Drehung der Funkenstrecke f um etwa 10° gegen den Bücherhaufen hin die Funken zum Erlöschen brachte. Hierdurch ermuthigt, liess ich 800 kg. unvermischten Asphalts in die Form eines Blockes von 1,4 m Länge, 0,6 m Höhe und 0,4 m Breite giessen, welchen die Figur in D darstellt. Diesem wurde unser Apparat von oben her bis zum Aufliegen der Platten auf dem Klotz genähert. Die Einwirkung war auf den ersten Blick erkennbar, und liessen sich die folgenden Einzelheiten unterscheiden:

1. Der Funke im höchsten Punkte des Kreises war jetzt bedeutend stärker als der im tiefsten, dem Asphalt zugekehrten Punkte.

2. Die Nullpunkte erschienen nach unten, d. h. gegen den Isolator hin, gedreht, und zwar beim Aufliegen der Platten um den ziemlich genau messbaren Winkel von 23° . Eine völlige Auslöschung fand übrigens auch in diesen Punkten nicht mehr statt. In den ursprünglichen Nullpunkten zeigte sich jetzt ein lebhaftes Funkenspiel.

3. Lagen die Platten A und A' auf dem Asphaltklotz auf, so machte sich eine Aenderung der Schwingungsdauer von AA' geltend, es musste die Schwingungsdauer von B gleichfalls etwas vergrössert werden, wenn die Funken ihre maximale Länge behalten sollten.

4. Wurde der Apparat in irgend einer Richtung von dem Asphaltblock allmählich entfernt, so nahm die Wirkung des Blockes stetig ab, ohne in qualitativer Hinsicht eine Aenderung zu erfahren.

Es waren also sämtliche Wirkungen eines Leiters von kleiner Schwingungsdauer auch hier vorhanden. Die Uebereinstimmung der Wirkungsweise des Isolators mit derjenigen eines Leiters zeigte sich ferner darin, dass die eine durch die entgegen-

gesetzte andere compensirt werden konnte. Lag nämlich unser Apparat auf dem Asphalt auf, und wurde alsdann von oben her der Leiter C genähert, so wanderten die Nullpunkte rückwärts ihrer ursprünglichen Lage zu, und sie fielen wieder in die Punkte a und a' , wenn der Leiter C bis auf etwa 11 cm dem Leiter AA' genähert war. Lag die obere Fläche des Asphaltes 5 cm unterhalb der Platten A und A' , so trat die Compensation schon bei einem Abstände von 17 cm zwischen AA' und C ein. Stets compensirte der Leiter den Isolator dann, wenn ersterer sich in etwas grösserer Entfernung als letzterer befand. In roher Weise zeigen diese Versuche, dass auch quantitativ die Wirkung des Isolators etwa diejenige war, welche erwartet werden durfte.

Der benutzte, übrigens vorzüglich isolirende Asphalt enthielt, wie schon sein hohes specifisches Gewicht vermuthen liess, sehr viel Mineralbestandtheile. In der That fanden sich in 100 Gewichtstheilen nicht weniger als 62 Theile Asche, nämlich 17 Theile Quarzsand, 40 Theile Kalkverbindungen, 5 Theile Thon- und Eisenverbindungen.¹⁾ Um den Zweifel zu beseitigen, dass die Wirkung lediglich diesen, vielleicht zum Theil leitenden Verbindungen zuzuschreiben sei, liess ich einen zweiten, ganz gleichen Block aus dem gleichfalls vollkommen isolirenden sogenannten künstlichen Pech anfertigen, welches von Aschebestandtheilen fast frei ist. Die an diesem beobachteten Erscheinungen waren die gleichen, wie die oben beschriebenen, nur etwas schwächer, so betrug die maximale Verschiebung der Nullpunkte hier nur 19°. Leider enthält nun aber dieses künstliche Pech neben Kohlenwasserstoffen auch eine schwer zu bestimmende Menge ungebundener Kohle im Zustand der feinsten Vertheilung. Man wird dieser Kohle Leitungsvermögen nicht absprechen können, und es war also auch durch diesen Versuch der gedachte Zweifel nicht völlig behoben. Die Fortsetzung der Untersuchung mit reinen Substanzen in gleich grossem Maassstabe verbot sich durch die Kosten, welche ein solches Unternehmen verursacht haben würde. Ich liess deshalb das System der Leiter AA' und B noch einmal in genau dem halben Maassstabe der Lineardimensionen ausführen und versuchte, ob auch in diesem kleineren Modell die Erscheinungen sich noch hinreichend genau würden verfolgen

¹⁾ Für die Analyse bin ich meinem Collegen, Hrn. Hofrath Engler, zu Dank verpflichtet.

lassen. Es zeigte sich, dass dies ganz wohl anging, freilich war hier für die Beobachtung der äusserst zarten Fünkchen eine gespanntere Aufmerksamkeit erforderlich. Für eine Demonstration der Erscheinung oder für quantitative Versuche empfiehlt sich die Beibehaltung des grösseren Maassstabes. Mit dem kleinen Apparate habe ich in allem acht Stoffe untersucht, welche ich der Reihe nach anführe:

1. Asphalt. Es wurde der beschriebene grosse Block benutzt. Lagen die Platten A und A' so auf dem Block, dass ihre Vorderkante in der vorderen Begrenzungsebene des Blockes lag, so betrug die Drehung der Nullpunkte 31°, zog man den Apparat nach vorn, bis die Mittellinie rs in die Vorderfläche des Blockes fiel, so betrug die Drehung noch 20°.

2. Pech, künstliches, aus Steinkohlen gewonnen. Es wurde ebenfalls der grosse Block benutzt. Die Drehungen in den beiden unter 1. genannten Lagen betrug bezw. 21° und 13°.

3. Papier. Wurde der Apparat auf einen aus Papier gebildeten Block von 70 cm Länge, 35 cm Höhe, 20 cm Breite gelegt, so erschienen die Nullpunkte um etwa 8° gegen das Papier zu gedreht.

4. Holz. Wurde ein gleicher Block aus dichtem, völlig trockenem Holze gebildet, so betrug die Drehung der Nullpunkte etwa 10°.

5. Sandstein. Einem ausgedehnten trockenem Sandsteinpfeiler des Gebäudes bis fast zur Berührung genähert, ergab der Apparat eine Drehung der Nullpunkte gegen den Sandstein hin von etwa 20°. Schon an dem grossen Apparate hatte ich bemerkt, dass ein Einfluss des steinernen Fussbodens sich geltend machte, sobald der Apparat demselben auf $\frac{1}{2}$ m genähert wurde.

6. Schwefel. Aus Stangenschwefel wurde in einer Holzform ein massiver Block von 70 cm Länge, 20 cm Breite, 35 cm Höhe gegossen und die Form entfernt. Die Wirkung des Blockes war sehr deutlich, die oben beschriebenen Einzelheiten waren verfolgbare, die Drehung betrug 13—14°.

7. Paraffin. Das Paraffin war weiss, bei 60—70° schmelzend ergab es eine wasserklare Flüssigkeit ohne alle Unreinigkeiten. Es wurde in eine Form aus Pappe von den mehrfach genannten Dimensionen gegossen und die Form entfernt. Die Wirkung war sehr deutlich, die Drehung betrug 7°.

8. Petroleum. Um auch einen flüssigen Isolator zu untersuchen, füllte ich 45 l reinen Petroleums in einen dichten Kasten aus Eichenholz von 70 cm lichter Länge, 20 cm Breite, 35 cm Tiefe. Der gefüllte Kasten bewirkte eine Drehung von etwa 7° . Der leere Kasten bewirkte eine solche von etwa 2° . Der sehr merkliche Unterschied entspricht etwa der Wirkung, welche das Petroleum allein gehabt haben würde.

Der übereinstimmende Verlauf der Beobachtungen an so verschiedenen, zum Theil reinen Stoffen, wird kaum einen Zweifel an der Realität der Wirkung oder daran aufkommen lassen, dass dieselbe den Stoffen, nicht den Verunreinigungen zuzuschreiben sei. Auch sehe ich nur zwei Einwände, welche man hinsichtlich der Deutung der Erscheinungen machen könnte, und welche es vortheilhaft ist von vorn herein zu widerlegen. Erstens könnte man behaupten, die Wirkung sei keine elektrodynamische, sondern der Isolator verändere in seiner Nähe die Vertheilung der elektrostatischen Kraft, und diese geänderte Vertheilung habe die geänderte Erscheinung zur Folge. Ich habe vergeblich versucht, auf Grund dieser Annahme die Einzelheiten der Erscheinungen zu deuten. Aber es lässt sich jene Behauptung auch direct widerlegen. Erfüllt nämlich der Isolator einen Raum, welcher nur durch Kraftlinien und durch Theile der Oberflächen von A und A' begrenzt ist, so giebt er nicht zu einer Aenderung der elektrostatischen Kräfte ausserhalb seiner Masse Anlass. Nun ist die durch die Mittellinie rs gelegte senkrechte Ebene sicherlich von Kraftlinien gebildet, und ebenso ist es die horizontale Ebene der Platten A und A' selber. Ist also der Isolator begrenzt durch diese beiden Ebenen, und erstreckt er sich hinter der ersteren und unter der letzteren so weit, als er überhaupt noch Einfluss hat, so ist jeder elektrostatische Einfluss auf den äusseren Raum vermieden. Legten wir nun den kleineren unserer Apparate mit der Linie rs auf die obere Vorderkante eines der grossen Blöcke, so war der angegebenen Bedingung in hinreichender Weise genügt. Gleichwohl verschwand die Wirkung, wie oben bemerkt, nicht, sondern war von ähnlicher Stärke, wie unter den günstigsten Umständen. Diese Wirkung rührte also nicht von elektrostatischen Kräften her.

Zweitens kann man einwenden, die Wirkungen seien vielleicht Strömungen zuzuschreiben, welche einem Reste von Leitungsvermögen ihr Dasein verdanken. Dieser Einwand wird kaum auf Beifall rechnen dürfen, wenn er hinsichtlich der vorzüglichen Isolatoren Schwefel und Paraffin vorgebracht wird. Aber ich glaube, dass er selbst hinsichtlich der weniger guten Isolatoren, wie Holz, nicht am Orte ist. Gesetzt auch, ein solcher Stoff isolire so mangelhaft, dass er der geladenen Platte A gestatte, sich in dem zehntausendsten Theile der Secunde, aber nicht viel schneller, zu entladen, so würde doch während einer Schwingung unseres Apparates die Platte immer nur den zehntausendsten Theil ihrer Ladung verlieren. Der eigentliche Leitungsstrom in dem untersuchten Stoffe würde also immer nur den zehntausendsten Theil des primären Stromes in AA' ausmachen, und er würde also noch völlig unwirksam sein. Wenigstens für die besseren Isolatoren ist demnach jede Mitwirkung der Leitung ausgeschlossen.

Für die quantitativen Verhältnisse der Versuche erscheint es nicht möglich, schon jetzt eine entsprechende Deutung zu geben.

Wir haben oben gesehen, welchen Einfluss ein dem primären Leiter AA' genäherter metallischer Leiter C auf den secundären Kreis B hat. War C in Resonanz mit AA' , so war seine Einwirkung auf C nicht interferenzfähig mit der directen Wirkung von AA' . Gleichzeitig aber war diese Einwirkung im Zustande der Resonanz ziemlich kräftig, sodass dieselbe noch wahrgenommen werden konnte, wenn auch C um 1—1,5 m von AA' entfernt wurde. Hierauf gründete ich Versuche, welche eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrischen Kräfte nachweisen sollten. Brauchen nämlich diese Kräfte Zeit, um zunächst von AA' nach C und von da zurück nach B zu gelangen, so wird die Phasendifferenz zwischen den Wirkungen von AA' auf B und von C auf B zunehmen mit wachsender Entfernung zwischen AA' und C , und beide Wirkungen müssen wieder interferenzfähig werden, wenn die Entfernung zwischen AA' und C so gross wird, dass sie von der elektrischen Kraft in dem vierten Theile der halben Schwingungsdauer durch-

laufen wird. Diese Versuche blieben jedoch ohne Erfolg, indem ich keine der Erscheinungen, welche ich erwartete, wahrzunehmen vermochte. Da es sich aber im günstigsten Falle um die Beobachtung äusserst zarter Abänderungen handelte, so glaube ich nicht, dass dies negative Resultat gegenüber den anderweitig von mir erhaltenen positiven Resultaten ins Gewicht fallen kann.

7. Ueber die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Wirkungen.

(Sitzungsber. d. Berl. Akad. d. Wiss. vom 2. Febr. 1888, Wiedemanns Ann. 34, p. 551.)

Wirken veränderliche elektrische Kräfte im Innern von Isolatoren, deren Dielektricitätsconstante merklich von Eins verschieden ist, so üben die jenen Kräften entsprechenden Polarisationen elektrodynamische Wirkungen aus. Eine andere Frage aber ist es, ob auch im Luftraum veränderliche elektrische Kräfte mit Polarisationen von elektrodynamischer Wirksamkeit verknüpft sind. Man hat die Folgerung ziehen können, dass, wenn diese Frage zu bejahen ist, die elektrodynamischen Wirkungen sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten müssen.

Während ich mich vergeblich nach Versuchen umsah, welche eine unmittelbare Beantwortung der angeregten Frage hätten ergeben können, kam mir der Gedanke, es möchte möglich sein, jene Folgerung zu prüfen, und zwar selbst dann, wenn die fragliche Geschwindigkeit die des Lichtes nicht unbeträchtlich überträfe. Der Plan, welcher für die Untersuchung aufgestellt wurde, war der folgende: Zuerst sollten mit Hülfe der schnellen Schwingungen eines primären Leiters entsprechende regelmässige, fortschreitende Wellen in einem geradlinig ausgespannten Drahte erzeugt werden. Zuzweit sollte ein secundärer Leiter gleichzeitig der Einwirkung der durch den Draht fortgepflanzten Wellen und der durch die Luft fortgepflanzten directen Wirkung der primären Schwingung ausgesetzt und so beide Wirkungen zur Interferenz gebracht werden. Endlich sollten solche Interferenzen in verschiedenen Abständen vom primären Kreise hergestellt und so ermittelt werden, ob die Schwingungen der elektrischen Kraft

in grösseren Entfernungen eine Phasenverzögerung gegen die Schwingungen in der Nähe aufwiesen oder nicht. Ein vorhandener Phasenunterschied würde eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit anzeigen. Dieser Plan hat sich in allen Theilen als durchführbar erwiesen. Die nach ihm angestellten Versuche haben ergeben, dass sich die Inductionswirkung durch den Luft-raum allerdings mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet. Diese Geschwindigkeit ist grösser als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen in Drähten. Das Verhältniss beider Geschwindigkeiten ist nach den bisherigen Versuchen etwa 45 : 28, danach ergibt sich die absolute Grösse der ersteren als von der Ordnung der Lichtgeschwindigkeit. Ueber die Ausbreitung der elektrostatischen Wirkungen konnte ein Urtheil noch nicht gewonnen werden.

Der primäre und der secundäre Leiter.

Der primäre Leiter AA' (Fig. 25) bestand aus zwei quadratischen Messingplatten von 40 cm Seitenlänge, welche durch einen 60 cm langen Kupferdraht verbunden waren. In der Mitte des Drahtes befand sich die Funkenstrecke, in welcher durch die sehr kräftigen Entladungen eines Inductoriums J die Schwingungen eingeleitet wurden. Der Leiter wurde 1,5 m über dem Fussboden so aufgestellt, dass der Draht horizontal lag, die

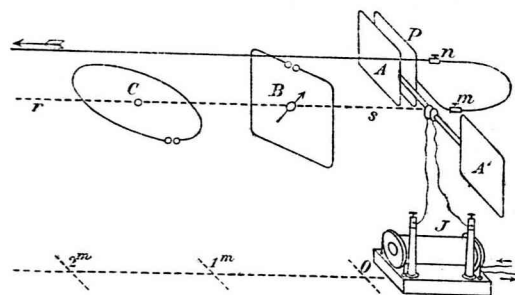


Fig. 25.

Ebene der Platten vertical stand. Eine Gerade rs , welche wir durch die Funkenstrecke horizontal und senkrecht zur Richtung der primären Schwingung legen, wollen wir als die Grundlinie unserer Versuche bezeichnen. In der Grundlinie bezeichnen wir einen Punkt, welcher 45 cm von der Funkenstrecke entfernt ist, als den Nullpunkt. Die Versuche wurden in einem grossen Hörsaal angestellt, in welchem sich auf eine Entfernung von 12 m hin keine festen Gegen-

stände in der Nachbarschaft der Grundlinie befanden.¹⁾ Während der Versuche wurde dieser Raum verdunkelt.

Als secundäre Strombahn diente theils ein Draht C , welcher die Gestalt eines Kreises von 35 cm Radius hatte, theils ein Draht B , welcher in die Gestalt eines Quadrats von 60 cm Seitenlänge gebogen war. Die Funkenstrecke beider Leiter war durch eine Mikrometerschraube einstellbar, die des letztgenannten war mit einer Lupe ausgestattet. Beide Leiter waren in Resonanz mit dem primären Leiter. Die (halbe) Schwingungsdauer aller drei betrug, aus Capacität und Selbstpotential des primären Leiters berechnet, 1,4 hundertmilliontel Secunde.²⁾ Es ist freilich unsicher, ob die gewöhnliche Theorie elektrischer Schwingungen hier noch genaue Resultate giebt. Dass dieselbe für die Entladungen Leydener Flaschen noch richtige Zahlenwerthe ergeben hat, lässt uns vertrauen, dass auch hier ihre Resultate wenigstens der Ordnung nach mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

Betrachten wir nun die Einwirkung der primären Schwingung auf die secundäre Strombahn in einigen für unseren Zweck wichtigen Lagen. Wir bringen zunächst den Mittelpunkt des secundären Leiters in die Grundlinie und lassen seine Ebene mit der durch die Grundlinie gelegten verticalen Ebene zusammenfallen. Wir wollen diese Lage als die erste Hauptlage bezeichnen. In derselben nehmen wir keine Funken im secundären Kreise wahr. Es ist dies leicht erklärlich, die elektrische Kraft steht in allen Punkten senkrecht auf der Richtung des secundären Drahtes.

Wir belassen nun den Mittelpunkt des secundären Leiters in der Grundlinie, bringen aber seine Ebene in die zur Grundlinie senkrechte Lage, die zweite Hauptlage. Es finden sich jetzt Funken im secundären Kreise, sobald die Funkenstrecke oberhalb oder unterhalb der durch die Grundlinie gelegten Horizontalebene liegt, keine Funken jedoch, wenn die Funkenstrecke in jene Ebene fällt. Mit der Entfernung von der primären Schwingung nimmt die Länge der Funken anfangs schnell, dann aber sehr langsam ab; ich konnte die Funken auf der ganzen,

¹⁾ [Siehe Anmerkung 12 am Schluss des Buches].

²⁾ Siehe No. 2. p. 55. [Siehe auch Anmerkung 13 am Schluss des Buches].

mir zu Gebote stehenden Entfernung von 12 m beobachten und zweifle nicht, dass in grösseren Räumen diese Entfernung sich wird erweitern lassen. Die Funken in dieser Lage verdanken ihr Dasein im wesentlichen der elektrischen Kraft, welche jedesmal in dem der Funkenstrecke gegenüberliegenden Theil des secundären Kreises wirkt. Die Gesamtkraft lässt sich in den elektrostatischen und den elektrodynamischen Theil zerlegen; es unterliegt keinem Zweifel, dass in der Nähe der erstere, in der Ferne der letztere Theil überwiegt und die Richtung der Gesamtkraft angiebt.

Wir bringen endlich die Ebene des secundären Leiters in die horizontale Lage, während wir seinen Mittelpunkt in der Grundlinie belassen. Wir wollen sagen, der Leiter befinde sich jetzt in der dritten Hauptlage. Benutzen wir den kreisförmigen Leiter, bringen seinen Mittelpunkt in den Nullpunkt der Grundlinie und führen seine Funkenstrecke langsam in ihm herum, so beobachten wir das Folgende: Ueberall findet sehr lebhaft Funkenbildung statt. Die Funken sind am kräftigsten und etwa 6 mm lang, wenn die Funkenstrecke dem primären Leiter zugekehrt ist, sie nehmen gleichmässig ab, wenn sich die Funkenstrecke von dort entfernt, und erreichen einen Minimalwerth von etwa 3 mm auf der dem primären Leiter abgekehrten Seite. Wäre der Leiter nur der elektrostatischen Kraft ausgesetzt, so würden wir Funkenbildung zu erwarten haben, wenn die Funkenstrecke auf der einen oder andern Seite in die Nachbarschaft der Grundlinie fällt, Auslöschung der Funken in den beiden mittleren Lagen. Und zwar wäre die Richtung der Schwingung bedingt durch die Richtung der Kraft in dem der Funkenstrecke gegenüberliegenden Theile des secundären Leiters. Ueber diese von der elektrostatischen Kraft erregte Schwingung legt sich aber die von der Inductions-kraft erregte Schwingung, welche deshalb sehr kräftig ist, weil die Inductions-kraft hier, um den geschlossen gedachten secundären Kreis herum integriert, einen endlichen Integralwerth ergiebt. Diese Integralkraft der Induction hat eine von der Lage der Funkenstrecke unabhängige Richtung, sie wirkt entgegen der elektrostatischen Kraft in dem AA' zugekehrten, zusammen mit der elektrostatischen Kraft in dem von AA' abgekehrten Theil des secundären Leiters. Elektrostatische und elektrodynamische Kraft wirken daher zusammen,

wenn die Funkenstrecke dem primären Leiter zugewandt liegt, sie wirken gegeneinander, wenn die Funkenstrecke vom primären Leiter abliegt. Dass es in letzterer Lage die Inductions-kraft ist, welche überwiegt und die Richtung der Schwingung bedingt, erkennt man daran, dass der Uebergang aus dem einen in den anderen Zustand ohne Erlöschen der Funken in irgend einer Lage erfolgt. Für unseren Zweck kommt es auf die folgende Bemerkung an: Liegt die Funkenstrecke um 90° nach rechts oder links aus der Grundlinie herausgedreht, so liegt sie in einem Knotenpunkte in Hinsicht der elektrostatischen Kraft, und die in ihr auftretenden Funken verdanken ihr Dasein lediglich der Inductions-kraft; insbesondere noch dem Umstande, dass die letztere, um den geschlossenen Kreis genommen, von Null verschieden ist. In dieser besonderen Lage können wir also auch in der Nähe des primären Leiters die Inductions-wirkung unabhängig von der elektrostatischen Wirkung untersuchen.

Die vollständigen Belege für die hier gegebenen Deutungen sind in einer früher mitgetheilten Arbeit¹⁾ enthalten; auf einige Bestätigungen, welche diese Deutungen und damit die Ergebnisse jener Arbeit im Folgenden finden, weise ich hin.

Die Wellen im geradlinigen Drahte.

Um mit Hülfe unserer primären Schwingungen fortschreitende Wellen in einem Drahte zu erzeugen, welche unserem Zweck entsprechen, verfahren wir in folgender Weise. Hinter die Platte A setzen wir eine gleich grosse Platte P . Von der letzteren führen wir einen 1 mm starken Kupferdraht bis zum Punkte m der Grundlinie, von da in einem Bogen von 1 m Länge bis zum Punkte n , welcher etwa 30 cm über der Funkenstrecke liegt, und nun geradlinig parallel der Grundlinie fort bis auf solche Entfernung, dass eine Störung durch reflectirte Wellen nicht zu befürchten ist. In meinen Versuchen durchsetzte der Draht das Fenster, ging dann etwa 60 m frei durch die Luft und endete in einer Erdleitung. Besondere Versuche zeigten, dass jene Entfernung hinreichend sei. Nähern wir nun diesem Draht einen fast zum Kreise geschlossenen metallischen Leiter,

¹⁾ Siehe No. 5 p. 87.