

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Gesammelte Werke

Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft

Hertz, Heinrich

Vaduz/Liechtenstein, 1984

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

[urn:nbn:de:bsz:31-269600](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-269600)

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

(Wiedemanns Ann. 31, p. 155. 1888.)

In einem früheren Aufsätze¹⁾ 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 Zinkblech 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 Meridianebene 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 angemerkten 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 integrirt, 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 α 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 Grundschwingung 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 Grundschwingung kräftig an. Allerdings stellt sich dieser 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 $\mathcal{Z} = E \cos \tilde{\omega} \sin (2 \pi s / S - \vartheta)$,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 α 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

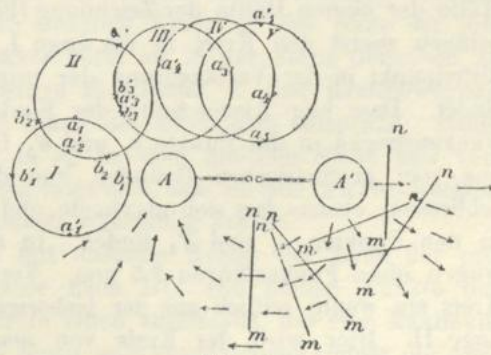


Fig. 22.

Kraft nirgends Null wird, wenn man von der Kugel A zur Kugel A' geht, so wechselt sie ihr Zeichen nicht; es war also erlaubt,

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 Vorangegangenen 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 Inductions-kraft 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 parallel 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 Inductionskraft 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_6 . 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

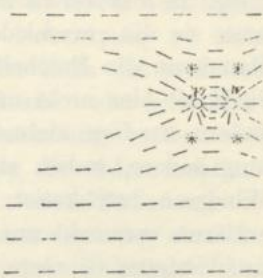


Fig. 23.

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.

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 Siegelackstange, 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.